

EDDYMULT:

複合トーラス導体系の渦電流問題を
解くための計算コードシステム

1989年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所研究成果編集委員会

委員長 吉川 允二(理事)

委 員

井川 勝市 (燃料・材料工学部)	中井 洋太 (物理部)
石黒 幸雄 (原子炉工学部)	林 尚志 (技術情報部)
伊藤 泰義 (原子力船研究開発室)	備後 一義 (保健物理部)
岩田 忠夫 (物理部)	藤城 俊夫 (燃料安全工学部)
金子 義彦 (原子炉工学部)	藤野 威男 (化学部)
工藤 博司 (アイソトープ部)	船橋 昭昌 (臨界プラズマ研究部)
近藤 育郎 (JT-60試験部)	星 薦雄 (動力試験炉部)
斎藤 実 (材料試験炉部)	幕内 恵三 (開発部)
斎藤 伸三 (高温工学試験研究炉設計室)	宮田定次郎 (研究部)
白井 英次 (研究炉管理部)	宮本 喜晟 (高温工学部)
竹田 辰興 (核融合研究部)	森内 茂 (環境安全研究部)
立川 鳳造 (化学部)	八巻 治恵 (原子力船技術部)
飛岡 利明 (原子炉安全工学部)	吉田 弘幸 (企画室)

Japan Atomic Energy Research Institute

Board of Editors

Masaji Yoshikawa (Chief Editor)

Kazuyoshi Bingo	Takeo Fujino	Toshio Fujishiro
Akimasa Funahashi	Takashi Hayashi	Tatsuo Hoshi
Katsuichi Ikawa	Yukio Ishiguro	Yasuyoshi Ito
Tadao Iwata	Yoshihiko Kaneko	Ikuro Kondo
Hiroshi Kudo	Keizo Makuuchi	Yoshiaki Miyamoto
Teijiro Miyata	Shigeru Moriuchi	Yohta Nakai
Minoru Saito	Shinzo Saito	Eiji Shirai
Enzo Tachikawa	Tatsuoki Takeda	Toshiaki Tobioka
Jikei Yamaki	Hiroyuki Yoshida	

JAERIレポートは、日本原子力研究所が研究成果編集委員会の審査を経て不定期に公開している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI reports are reviewed by the Board of Editors and issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

EDDYMULT: 複合トラス導体系の渦電流問題を解くための計算コードシステム

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

中村幸治・小関隆久

(1988年8月11日受理)

多数のトラス状導体および軸対称ポロイダル磁場コイル群から成る複合トラス導体系に対する実際的な渦電流問題を解くため、有限要素回路法を応用した計算コードシステム EDDYMULT を開発した。このコードシステムを用いた計算では、対象とする複合トラス導体系の渦電流固有モード分解、外部起電力による渦電流分布の時間追跡およびこれら電流のつくる磁場構造の3次元解析が可能である。したがって、トカマク型核融合実験装置における渦電流関連の諸問題、ポロイダル磁場コイル電源の設計、トカマク本体電磁力の設計、プラズマ位置制御の解析などに汎用的に適用することができる。

本報告書は、EDDYMULT コードシステムについて、①解析理論、②計算コードシステムの構成、③入力の方法、④取り扱える問題の範囲、⑤サブルーチンの処理機能などを詳細に説明したものであり、本コードシステムを使用する際の手引として用いることができる。

EDDYMULT: A Computing System for Solving Eddy Current Problems in a Multi-Torus System

Yukiharu NAKAMURA and Takahisa OZEKI

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan

(Received August 11, 1988)

A new computing system EDDYMULT based on the finite element circuit method has been developed to solve actual eddy current problems in a multi-torus system, which consists of many torus-conductors and various kinds of axisymmetric poloidal field coils. The EDDYMULT computing system can deal three-dimensionally with the modal decomposition of eddy current in a multi-torus system, the transient phenomena of eddy current distributions and the resultant magnetic field. Therefore, users can apply the computing system to the solution of the eddy current problems in a tokamak fusion device, such as the design of poloidal field coil power supplies, the mechanical stress design of the intensive electromagnetic loading on device components and the control analysis of plasma position.

The present report gives a detailed description of the EDDYMULT system as an user's manual : ①theory, ②structure of the code system, ③input description, ④problem restrictions, ⑤description of the subroutines, etc.

Keywords: Eddy Current, Finite Element Circuit Method, Tokamak, Modal Decomposition, EDDYMULT, Multi-Torus System, Electromagnetic Loading, Control Analysis, Magnetic Field

目 次

1. 序 論	1
2. 計算コードシステムのための定式化	3
2.1 有限要素回路理論	3
2.1.1 電流関数の基底関数展開とエネルギー積分	3
2.1.2 有限要素分割と局所基底	5
2.1.3 回路定数	7
2.1.4 回路方程式と固有値問題	8
2.1.5 境界条件と対称性	9
2.1.6 次元縮小	11
2.2 数値解析のための定式化	14
2.2.1 計算体系と計算手順	14
2.2.2 トーラス導体毎の渦電流固有モード解析	16
2.2.3 トーラス導体間相互の磁気結合	26
2.2.4 複合トーラス導体系の渦電流解析	33
2.2.5 磁場の計算	36
3. 計算コードシステム EDDYMULT の説明	43
3.1 特 徴	43
3.2 構成とその機能	45
3.2.1 EDTDEC プログラム	46
3.2.2 EM1DEC プログラム	47
3.2.3 EM2DEC プログラム	47
3.2.4 EM3DEC プログラム	48
3.2.5 FLDDEC プログラム	49
3.3 入力方法	49
3.3.1 EDTDEC プログラム	50
3.3.2 EM1DEC プログラム	63
3.3.3 EM2DEC プログラム	67
3.3.4 EM3DEC プログラム	71
3.3.5 FLDDEC プログラム	80
3.4 各プログラムに対する共通記憶領域	85
3.5 各ファイル中のレコード	100
3.5.1 EDTDEC プログラム	101
3.5.2 EM1DEC プログラム	102
3.5.3 EM2DEC プログラム	103
3.5.4 EM3DEC プログラム	103
3.5.5 FLDDEC プログラム	105

3.6	使用上の注意	108
3.6.1	使用上の制限	108
3.6.2	コアサイズの決め方	109
3.7	計算例	112
3.7.1	プリンター出力	114
3.7.2	プロッター出力	120
4.	計算とモデル実験との比較	127
5.	結 論	129
	謝 辞	130
	参考文献	131
	付 録	133
A.1	境界条件, 対称性のための1次変換	133
A.2	処理の流れの概要	135
A.3	各プログラムで用いられるサブルーチンの説明	151
A.3.1	EDTDEC プログラム	151
A.3.2	EM1DEC プログラム	202
A.3.3	EM2DEC プログラム	209
A.3.4	EM3DEC プログラム	231
A.3.5	FLDDEC プログラム	264
A.3.6	ESHARE プログラム	289

Contents

1. Introduction	1
2. Formulation for the Computing System	3
2.1 Finite Element Circuit Theory	3
2.1.1 Basis Function Expansion of Current Functions and Energy Integrals	3
2.1.2 Division into Finite Elements and Local Basis	5
2.1.3 Circuit Constants	7
2.1.4 Set of Circuit Equations and Eigenvalue Problem	8
2.1.5 Boundary Conditions and Symmetries	9
2.1.6 Reduction of the Dimension	11
2.2 Formulation for the Numerical Analyses	14
2.2.1 Modeling and Procedure for Calculation	14
2.2.2 Modal Analysis of Eddy Current on the Each Torus Conductor	16
2.2.3 Magnetic Coupling Between Torus Conductors	26
2.2.4 Eddy Current Analyses of Multi-Torus System	33
2.2.5 Calculations of Magnetic Field	36
3. Description of the EDDYMULT System	43
3.1 Characteristics of the Computing System	43
3.2 System Structure and Functions	45
3.2.1 EDTDEC Program	46
3.2.2 EM1DEC Program	47
3.2.3 EM2DEC Program	47
3.2.4 EM3DEC Program	48
3.2.5 FLDDEC Program	49
3.3 Input Description	49
3.3.1 EDTDEC Program	50
3.3.2 EM1DEC Program	63
3.3.3 EM2DEC Program	67
3.3.4 EM3DEC Program	71
3.3.5 FLDDEC Program	80
3.4 Description of Common Area	85
3.5 Description of Records in the Files for Use	100
3.5.1 EDTDEC Program	101
3.5.2 EM1DEC Program	102
3.5.3 EM2DEC Program	103
3.5.4 EM3DEC Program	103
3.5.5 FLDDEC Program	105

3.6	Operating Instructions	108
3.6.1	Problem Restrictions	108
3.6.2	Core-Size Estimation	109
3.7	Example Problem	112
3.7.1	Output from Printer	114
3.7.2	Output from Plotter	120
4.	Comparison Between Calculation and Scale-Model Experiment	127
5.	Conclusions	129
	Acknowledgments	130
	References	131
	Appendices	133
A.1	Linear Transformation for the Boundary Condition and Symmetry	133
A.2	Outline of Flow Chart of the Computing System	135
A.3	Description of Subroutines	151
A.3.1	EDTDEC Program	151
A.3.2	EM1DEC Program	202
A.3.3	EM2DEC Program	209
A.3.4	EM3DEC Program	231
A.3.5	FLDDEC Program	264
A.3.6	ESHARE Program	289

1. 序 論

トカマク装置による核融合の研究および開発においては、装置の電磁力設計、プラズマの位置制御解析の立場から、構造物に流れる渦電流が基本的な課題であると広く考えられている¹⁻⁴⁾。たとえば、ディスプラシオンと呼ばれるプラズマの急速な消滅によって生成される強大な電磁力は、真空容器などの構造物に直接作用しその健全性を損う恐れがある。一方、構造物上に誘起された渦電流は、理想の制御磁場を乱す不整磁場をもたらす、望ましいトカマク平衡に悪影響を与える。その他、電磁流体力学的不安定性の成長率に対する渦電流の抑制効果^{5,6)}などにみられるように、核融合の分野では渦電流は極めて基本的かつ重要な現象である。したがって、渦電流を精度良く評価することが必要であり、トカマク装置による核融合研究の今後の進展とともにこの要請はますます増大するものと考えられる。

このような重要性にもかかわらず、渦電流を正確に評価することは実際には困難であって、先の要請を満足する計算コードの手段が完成しているとは言い難い。これは評価手法の原理的な問題というよりも、むしろ取り扱うべき体系の複雑さにその原因があるといえる。比較的単純な体系に対しては、対象とする体系のモデル化の仕方、取り扱う電磁界現象の範囲などに依存した渦電流評価のための手法が既にあり、そのための計算コードも幾つか開発されている⁷⁻¹⁹⁾。これらは手法およびその機能から大別して、i) 円形の断面形状を有する軸対称トーラス上の渦電流をそのポロイダルモード成分に分解するトカマク回路論などの解析的アプローチ²⁾、ii) 有限要素法による任意形状3次元導体上の渦電流解析^{7,8)}、iii) 薄板で近似される導体を有限要素分割することによって得られる定係数線形回路方程式系を決定する方法⁹⁻¹⁷⁾などがある。iii) はいわゆる有限要素回路法と呼ばれ、渦電流の固有値問題を回路方程式に対して解き、得られた直交関数基底に対してモード毎の応答を得る手法が含まれる¹⁴⁻¹⁷⁾。

トカマク型核融合実験装置による核融合の研究は、臨界プラズマ条件の実証の段階を迎えており、1980年代に入り、JET、TFTR、JT-60などの大型トカマク装置が相次いで建設され、現在も実験運転が続けられている。核融合炉の規模に近いこれらのトカマク装置は、ベローズなどのように不均質かつ非等方な抵抗の導体を有するとともに、更にこれら複雑なトーラス導体が多数組み合わせられて全体系が構成されているのが普通である。このため、一様な抵抗分布を前提とするトカマク回路論など簡便な解析的アプローチは、評価精度の点で実用上の問題があるといえる。また、一般の渦電流問題をいわゆるオームの法則を付加したマックスウェルの電磁界方程式で記述し、これに対して変分的方法を適用する有限要素法が開発されている。この方法は、これらマックスウェルの電磁界方程式の解である渦電流および電磁界の場を直接求めるため、極めて複雑な解析となることを覚悟しなければならない。一方、有限要素回路法は渦電流の問題を電磁界の場の問題と考えず、適当に定義した1次独立な回路系の解を得ることを基本とする現象論的な方法である。亀有らは、この有限要素回路法を薄板で近似される導体の渦電流問題に応用した。そこではトカマク装置の主要構造物である真空容器や架台などが計算対象とされ、これらの構造物を、それぞれ個別に分離した比較的単純な体系の渦電流問題として解いた。これにより、有限要素回路法が渦電流問題を解くための有力な解析手法であることが実証された^{14,15)}。しかしながら、先に述べたように実際のトカマク装置は、真空容器、各種架台、および多層のコイル導体から成るトロイダル磁場コイル、更に各種の軸対称ポロイダル磁場コイル群などから構成されており、これら主要構造物を全て含んだ総合的な渦電流解析が必要である。このため、我々は有限要素回路法を拡張し、多数の導体群から成る複合トーラス導体系の渦電流問題を解くことができる汎用計算コードシステム 'EDDYMULT' を開発した^{16,17)}。

一般にこのような大規模計算では計算時間や計算のための内部記憶領域の制限を強く受けるため、開発にあたっては計算次元の縮小法、更にインダクタンスや抵抗のためのエネルギー積分計算に対する形状関数の導入などを新たに考慮した。このため、解析理論の基礎に立ち返り定式化を行った。臨界プラズマ試験装置 JT-60 の建設に際しては、この計算コードシステムを用いて電磁力の設計や誤差磁場の評価など一連の渦電流評価が行われた¹⁸⁻²¹⁾。今後は本計算コードシステムを用い、積極的に渦電流効果を取り入れた高精度のプラズマ制御法の検討などへの応用が期待されている²²⁾。

本報告は 'EDDYMULT' 計算コードシステムを詳細に説明したものである。報告書の作成にあたっては、一般の利用者がプログラムの使用に際してプログラム内容を意識しなくてもよいように、使用方法、処理機能および使用制限などを項目別に詳しく解説することを心掛けた。

'EDDYMULT' コードシステムは、渦電流の固有モード解析を始め、時間追跡、磁場構造解析に至るまでの多様なリスタート機能および図形処理機能を備える大規模な計算プログラムである。一般の利用者の立場に立てば、この種の大規模計算プログラムは利用の際に相当な困難を強いられたり、またプログラムソースファイルの管理および作成しようとする、或いは作成したデータファイルの管理などに多人の配慮を要求されることがしばしばあり、実用上の大きな欠点となっている。本コードシステムの開発にあたっては、ソースプログラムの管理、入出力方法およびデータファイルの管理等の保守・操作に関して利用者のための便宜を可能な限り計るよう留意した。これらは 'EDDYMULT' コードシステムの構造や体系にも反映されており、本コードシステムの 1 つの特徴となっている。

第 2 章は、有限要素回路法の解析理論および本計算コードシステムのための定式化を記した。第 3 章では、初めに計算コードシステムの特徴、システム構成および処理機能についての説明を与えた。更に、ジョブ制御文の具体例を含む入力についての詳しい説明を述べた。'EDDYMULT' コードシステムは使用に際しての制限をできるだけ設けないように配慮してあるので、実用上、殆どの場合与える問題の若干の修正により目的を達することができる。第 3 章の後半には、全ての COMMON 文で用いたパラメータ変数および本計算コードシステムで使ったファイル中のレコードについての詳細な説明を示した。更に、使用に際しての制限事項や注意、問題の実行にあたってのコアサイズの推定法を述べ、章の終わりに簡単な計算例およびその計算結果の要約をまとめた。ここでは、本計算例の場合について、計算時間、記憶容量を定量的に述べその評価を与えた。第 4 章には、本計算コードシステムを検証するため、簡単なトラス模型を用いて行った実験の結果を示す。付録には本コードシステム全体の処理の流れと主なサブルーチンの詳しい機能について説明がなされている。

2. 計算コードシステムのための定式化

ここでは、EDDYMULT コードシステムで用いた有限要素回路理論についてまず述べ、次に本コードシステムが取り扱うことのできる複合トラス導体系における渦電流問題について、その具体的な定式化を行う。対象とする渦電流問題には、変位電流の効果が無視できる程度に準静的な過渡的渦電流現象であること、全ての導体は非磁性であること、更に、各導体はその厚みが無限に薄く、したがって、表皮効果が無視できることなどの条件が課せられている。

2.1 有限要素回路理論^{14) 17)}

本節においては、曲面上の電流を或る基底関数により展開することにより渦電流問題を解く方法を述べる。更に、次節における複合トラス導体系への応用に向けて、実際の計算時に問題となる次元の縮小法についてその一般的な説明を行う。

2.1.1 電流関数の基底関数展開とエネルギー積分

一般に、導体曲面上の電流 \mathbf{J} には湧き出しがないので、 \mathbf{J} は、時間と導体曲面上の位置とのベクトル値関数である電流ベクトルポテンシャル \mathbf{V} により

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{V}, \quad (2.1)$$

のように表わされる。

ところで、Fig. 2.1 に示すように、電流ベクトルポテンシャル \mathbf{V} は、導体曲面 S に対し常に垂直方向を向いている。この垂直方向成分を便宜上電流関数 V と呼ぶ。曲面上の電流は $V = \text{const.}$ の曲線に沿って流れる。また、(2.1)式から電流関数 V には定数の任意性があり、したがって導体曲面上の或る点での V の値を常に零と置くことができる。

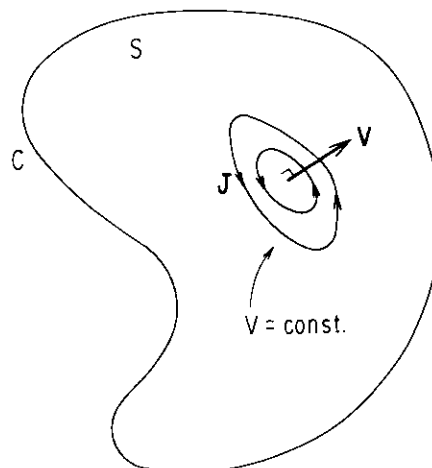


Fig. 2.1 Current vector potential \mathbf{V} on the conductor S bounded by a simple closed boundary C : Current function V is a normal component of the current vector potential \mathbf{V} to the conductor surface. Current \mathbf{J} always flows along the closed curve of $V = \text{const.}$

更に、電流関数 V は曲面 S 上で定義される適当な 1 次独立な関数系 a_n ($n = 1, 2, \dots, \infty$) により

$$V = \sum_n^{1, \infty} V_n a_n, \quad (2.2)$$

のように展開できるとする。ここで、 V_n は展開の際の係数であり、 a_n は曲面の全領域で定義されている。

Fig. 2.2 に示されているような N_1 個の導体曲面から成る複合導体系を考える。ここで、直交座標系 (u, v, w) は個々の導体毎に独立に定義されているとする。したがって、導体曲面 S 上の点 P は座標面 w 上の 2 次元直交座標 (u, v) により与えられるものと定義できる。この座標系を用いると、点 P の直角座標系 (x, y, z) に関する座標は

$$x = x(u, v), \quad y = y(u, v), \quad z = z(u, v), \quad (2.3)$$

と表わされる。曲面上の線素片 ds は

$$ds^2 = f^2 du^2 + g^2 dv^2, \quad (2.4)$$

と表わされる。ここで、 f, g はそれぞれ、

$$f^2(u, v) = \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2, \quad g^2(u, v) = \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right)^2, \quad (2.5)$$

で定義される曲面上の第 1 基本量 (first fundamental quantities) である。また、 u, v の直交性により

$$\frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v} + \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v} + \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v} = 0, \quad (2.6)$$

が成り立つ。次に、 u —一定および v —一定の座標線に接するそれぞれの単位ベクトルを、 e_u, e_v とする。 e_u, e_v は同じ位置で互に直交しており、それぞれ、

$$e_u = \left(\frac{1}{f} \frac{\partial x}{\partial u}, \frac{1}{f} \frac{\partial y}{\partial u}, \frac{1}{f} \frac{\partial z}{\partial u} \right), \quad e_v = \left(\frac{1}{g} \frac{\partial x}{\partial v}, \frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial v}, \frac{1}{g} \frac{\partial z}{\partial v} \right), \quad (2.7)$$

のように 3 成分を持つ。

Fig. 2.1 に示したように、曲面 S 上の電流 $\mathbf{J}(u, v)$ は面の法線方向の成分を持たないので、

$$\mathbf{J}(u, v) = j_u(u, v) e_u(u, v) + j_v(u, v) e_v(u, v), \quad (2.8)$$

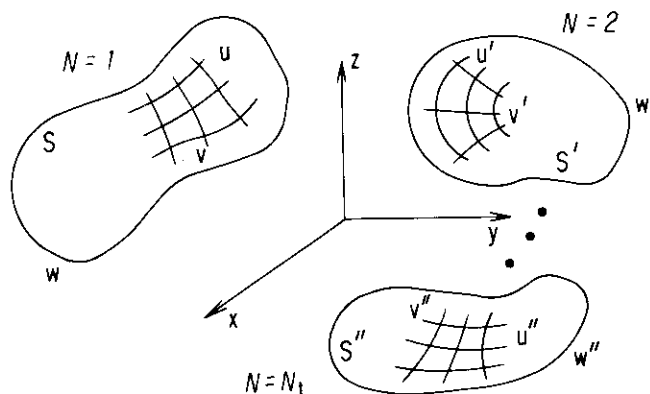


Fig. 2.2 Multi-conductor system: Conductor S lies on the coordinate surface w . The curvilinear coordinate system (u, v, w) is defined separately corresponding to the individual conductor. The (u, v) denotes the two-dimensional orthogonal coordinate system on S .

と表わすことができる。ここで、 u および v 方向の成分 j_u および j_v は、それぞれ、

$$j_u = \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial v}, \quad j_v = -\frac{1}{f} \frac{\partial V}{\partial u}, \quad (2.9)$$

のように電流関数 V を用いて与えられる。(2.2)式で表わされる1次独立な関数系 $a_n(u, v)$ ($n=1, 2, \dots, \infty$) を(2.9)式に代入して、以下のような電流密度の展開形式を得ることができる。すなわち、

$$j_u = \sum_n^{1, \infty} V_n \left(\frac{1}{g} \frac{\partial a_n}{\partial v} \right), \quad j_v = -\sum_n^{1, \infty} V_n \left(\frac{1}{f} \frac{\partial a_n}{\partial u} \right). \quad (2.10)$$

我々の目的は、薄板で近似できる導体曲面上で連続的に分布する準静的な渦電流問題を解くことにある。(2.2)式および(2.10)式は、導体曲面上の電流が或る1次独立な基底関数 $a_n(u, v)$ ($n=1, 2, \dots, \infty$) により展開され、このような基底に対して、考慮する導体曲面全体にわたり2次元的電流が一意に記述できることを示している。物理的には、基底関数 $a_n(u, v)$ は導体曲面上に1次独立な回路系を定義していると考えられる。更に、この回路系に対して渦電流の電磁気的な性質を与える。そのため、次のエネルギー積分を考える。

$$U_{nn'} = \frac{\mu_0}{8\pi} \int_S \int_{S'} \frac{\mathbf{J}_n \cdot \mathbf{J}_{n'}}{\rho_{12}} dS dS', \quad (n, n' = 1, 2, \dots, \infty), \quad (2.11)$$

$$W_{nn'} = \int_S \mathbf{J}_n \{\eta\} \mathbf{J}_{n'}^T dS, \quad (n, n' = 1, 2, \dots, \infty). \quad (2.12)$$

ここに、 $U_{nn'}$ は曲面 S 上の電流 \mathbf{J}_n と曲面 S' 上の電流 $\mathbf{J}_{n'}$ とによる磁気エネルギーであり、 $W_{nn'}$ は曲面 S 上の電流 \mathbf{J}_n と曲面 S' 上の電流 $\mathbf{J}_{n'}$ とによるジュール損失である。 μ_0 は真空の透磁率である。 ρ_{12} は曲面 S 上の点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ と曲面 S' 上の点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ との間の距離で、 $\rho_{12}^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$ である。行列 $\{\eta\} \in R^{2 \times 2}$ は曲面の面電気抵抗を表わし、次の正定値実対称行列である。

$$\{\eta\} = \begin{Bmatrix} \eta_u & \eta_{uv} \\ \eta_{vu} & \eta_v \end{Bmatrix}. \quad (2.13)$$

もし面電気抵抗が等方であれば、 $\eta_u = \eta_v = \eta$ 、 $\eta_{uv} = \eta_{vu} = 0$ である。(2.11)式および(2.12)式の積分では、 $dS = fg du dv$ である。今後本報告を通じて記号 $\{\}$ により或る行列を表わすものとする。行列要素が実数であるときの行列のサイズは、 $R^{m \times m'}$ などによって表わす。たとえば、 $\{M\} \in R^{m \times m'}$ は、実数を行列要素とする m 行 m' 列の行列を意味するものとする。行列要素が整数である場合は、 $I^{m \times m'}$ などと表現する。更に、 $(*)^T$ は、行列又はベクトルの転置を意味するものとする。もし、外部から磁場が印加され、それが磁場ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}(u, v)$ で表わされるとすると、曲面 S 上の電流 \mathbf{J}_n と \mathbf{A} との相互磁気エネルギーは

$$U_{cn} = \int_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{J}_n dS, \quad (2.14)$$

と表わされる。

2.1.2 有限要素分割と局所基底

導体曲面上の渦電流は曲面全体にわたり連続的に分布しており、このため本来渦電流問題は無限次元の関数空間で議論する必要がある。実際にはこれを離散化し有限次元の数値解析を行う。このため、曲面を有限要素分割し、後に示すような u, v 両方向に区分的に1次の局所基底 (local basis) $a_n(u, v)$ を採用する²³⁾。したがって、Fig. 2.3 に示すような有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ が定義できる。すなわち、 $\bar{\Omega}_{ij}$ は節点 $(i; j)$ 毎に与えられ、この節点を取り巻く4つの有限要素 (“ゾーン” ①, ②, ③, ④と呼ぶ) から構成される。このそれぞれの有限要素を $\Omega(\sigma, \mu)$ ($\sigma = L, U$; $\mu = L, U$) とすると、

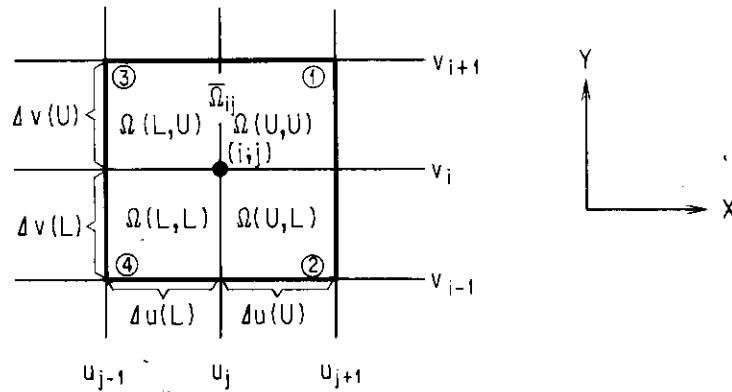


Fig. 2.3 Partition of a conductor S into finite elements $\Omega(\sigma, \mu)$ ($\sigma=L, U; \mu=L, U$): The finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$ corresponding to the node (i, j) consists of four rectangular finite elements, which are classified by zone numbers as ①, ②, ③ and ④ according to the position of finite element Ω .

$$\bar{\Omega}_{ij} = \bigcup_{\sigma}^{L, U} \bigcup_{\mu}^{L, U} \Omega(\sigma, \mu), \quad (2.15)$$

となる。∪は合併または和集合を意味する。

以上のように曲面毎に個別に有限要素分割を行い、その結果曲面上で N 個の節点が得られたとすると、(2.2)式は

$$V = \sum_n^{1, N} V_n a_n(u, v), \quad (2.16)$$

と書き換えられる。局所基底を次のように定義する。すなわち、

$$a_n = P(\sigma)Q(\mu), \quad n=1, 2, \dots, N. \quad (2.17)$$

ここで、 $P(\sigma)$ 、 $Q(\mu)$ は4つの有限要素(ゾーン)毎に与えられる区分的1次関数で、

$$P(\sigma) = \frac{1-\varepsilon(\sigma)X}{2}, \quad (\sigma=L, U), \quad Q(\mu) = \frac{1-\varepsilon(\mu)Y}{2}, \quad (\mu=L, U), \quad (2.18)$$

と表わされる。 $\varepsilon(L)=-1$ および $\varepsilon(U)=1$ である。 X, Y は共に閉区間 $[-1, 1]$ の間に値をとる局所座標(local coordinate)で、ゾーン毎に次式のように定義される。

$$X = \frac{2}{\Delta u(\sigma)}(u - u_0(\sigma)) - 1, \quad Y = \frac{2}{\Delta v(\mu)}(v - v_0(\mu)) - 1. \quad (2.19)$$

ここで、 $\Delta u(\sigma)$ 、 $\Delta v(\mu)$ はゾーン①、②、③、④に対応する有限要素 $\Omega(\sigma, \mu)$ のそれぞれ u, v 方向の幅である。また、

$$u_0(L) = u_{j-1}, \quad u_0(U) = u_j, \quad v_0(L) = v_{i-1}, \quad v_0(U) = v_i, \quad (2.20)$$

である。Fig. 2.3からわかるように

$$\left. \begin{aligned} \Delta u(L) &= u_j - u_{j-1}, & \Delta u(U) &= u_{j+1} - u_j, \\ \Delta v(L) &= v_i - v_{i-1}, & \Delta v(U) &= v_{i+1} - v_i. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

の関係がある。

上に述べたことから、局所基底 a_n を (2.17) 式で定義し、(2.16) 式により電流関数 V を与えると、(2.10) 式中の微分項は

$$\frac{\partial a_n}{\partial v} = -\frac{\varepsilon(\mu)}{\Delta v(\mu)} P(\sigma), \quad \frac{\partial a_n}{\partial u} = -\frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta u(\sigma)} Q(\mu), \quad (2.22)$$

となり、エネルギー積分などの数値計算を具体的にを行うことができる。

2.1.3 回路定数

ここでは先に定義した局所基底に対して、電流成分 $V_n, V_{n'}$ に関するインダクタンス、抵抗および外部起電力などの回路定数を定式化する。

(2.11) 式および (2.12) 式のエネルギー積分を、(2.10) 式で与えられる電流成分 $V_n, V_{n'}$ に対して

$$U_{nn'} = \frac{1}{2} K_{nn'} V_n V_{n'}, \quad (2.11')$$

$$W_{nn'} = R_{nn'} V_n V_{n'}, \quad (2.12')$$

のように書き換え、インダクタンス $K_{nn'}$ および抵抗 $R_{nn'}$ を定義する。その結果、これらの回路定数は、

$$K_{nn'} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \iiint \frac{1}{\rho_{12}} \left\{ f_1 f_2 \left(\frac{\partial a_n}{\partial v} \right)_1 \left(\frac{\partial a_{n'}}{\partial v} \right)_2 \mathbf{e}_{u_1} \cdot \mathbf{e}_{u_2} - f_1 g_2 \left(\frac{\partial a_n}{\partial v} \right)_1 \left(\frac{\partial a_{n'}}{\partial u} \right)_2 \mathbf{e}_{u_1} \cdot \mathbf{e}_{v_2} \right. \\ \left. - g_1 f_2 \left(\frac{\partial a_n}{\partial u} \right)_1 \left(\frac{\partial a_{n'}}{\partial v} \right)_2 \mathbf{e}_{v_1} \cdot \mathbf{e}_{u_2} + g_1 g_2 \left(\frac{\partial a_n}{\partial u} \right)_1 \left(\frac{\partial a_{n'}}{\partial u} \right)_2 \mathbf{e}_{v_1} \cdot \mathbf{e}_{v_2} \right\} du_1 dv_1 du_2 dv_2, \quad (2.23)$$

$$R_{nn'} = \iint \left(\eta_u \frac{f}{g} \frac{\partial a_n}{\partial v} \frac{\partial a_{n'}}{\partial v} - 2\eta_{uv} \frac{\partial a_n}{\partial v} \frac{\partial a_{n'}}{\partial u} + \eta_v \frac{g}{f} \frac{\partial a_n}{\partial u} \frac{\partial a_{n'}}{\partial u} \right) dudv, \quad (2.24)$$

となる。

ところで、(2.23) 式の積分は有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ の 4 つのゾーンと $\bar{\Omega}_{km}$ の 4 つのゾーンとに対して実施する必要がある。このとき、局所基底による (2.22) 式を用いて有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ との間のインダクタンス $K_{ij; km}$

$$K_{ij; km} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma_1}^{\text{L,U}} \sum_{\mu_1}^{\text{L,U}} \sum_{\sigma_2}^{\text{L,U}} \sum_{\mu_2}^{\text{L,U}} \{ \varepsilon(\mu_1) \varepsilon(\mu_2) \alpha_{\sigma_1 \sigma_2} - \varepsilon(\mu_1) \varepsilon(\sigma_2) \beta_{\sigma_1 \mu_2} \\ - \varepsilon(\sigma_1) \varepsilon(\mu_2) \gamma_{\mu_1 \sigma_2} + \varepsilon(\sigma_1) \varepsilon(\sigma_2) \delta_{\mu_1 \mu_2} \}, \quad (2.25)$$

が得られる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\sigma_1 \sigma_2} &= \frac{\Delta u_1(\sigma_1) \Delta u_2(\sigma_2)}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{f_1 f_2}{\rho_{12}} \mathbf{e}_{u_1} \cdot \mathbf{e}_{u_2} P(\sigma_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\ \beta_{\sigma_1 \mu_2} &= \frac{\Delta u_1(\sigma_1) \Delta v_2(\mu_2)}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{f_1 g_2}{\rho_{12}} \mathbf{e}_{u_1} \cdot \mathbf{e}_{v_2} P(\sigma_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\ \gamma_{\mu_1 \sigma_2} &= \frac{\Delta v_1(\mu_1) \Delta u_2(\sigma_2)}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{g_1 f_2}{\rho_{12}} \mathbf{e}_{v_1} \cdot \mathbf{e}_{u_2} Q(\mu_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\ \delta_{\mu_1 \mu_2} &= \frac{\Delta v_1(\mu_1) \Delta v_2(\mu_2)}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{g_1 g_2}{\rho_{12}} \mathbf{e}_{v_1} \cdot \mathbf{e}_{v_2} Q(\mu_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

である。(2.26) 式の積分は、 $\Omega_1(\sigma, \mu) = \Omega_2(\sigma, \mu)$ のように有限要素 (ゾーン) が重なるときには $\rho_{12} = 0$ の特異点を有し、直接数値計算が実行できない。このためゾーンの重なりが生じる場合には、(2.26) 式を変形して解析的に解を求める。この具体的な手続きは次節にて述べる。

抵抗 $R_{ij; km}$ についても同様にして

$$R_{ij; km} = \sum_{\sigma}^{\text{L, U, L, U}} \sum_{\mu}^{\text{L, U, L, U}} \{ \varepsilon(\mu) \varepsilon(\mu') \eta_{\sigma\sigma'} - 2\varepsilon(\mu) \varepsilon(\sigma') \eta_{\sigma\mu'} + \varepsilon(\sigma) \varepsilon(\sigma') \eta_{\mu\mu'} \},$$

$$\Omega = \Omega'$$
(2.27)

が得られる。すなわち、(2.27)式の総和は $\Omega(\sigma, \mu) = \Omega(\sigma', \mu')$ のようにゾーンが重なる場合のみについて実行する必要がある。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \eta_{\sigma\sigma'} &= \frac{1}{2^2} \frac{\Delta u(\sigma)}{\Delta v(\mu')} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_u \frac{f}{g} P(\sigma) P(\sigma') dX dY, \\ \eta_{\sigma\mu'} &= \frac{1}{2^2} \frac{\Delta u(\sigma)}{\Delta u(\sigma')} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_{uv} P(\sigma) Q(\mu') dX dY, \\ \eta_{\mu\mu'} &= \frac{1}{2^2} \frac{\Delta v(\mu)}{\Delta u(\mu')} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_v \frac{g}{f} Q(\mu) Q(\mu') dX dY, \end{aligned} \right\}$$
(2.28)

である。

外部磁場 $A(u, v)$ が印加されたときは、(2.14)式を用いて、外部起電力 E_n が

$$E_n = \iint \left(f \frac{\partial a_n}{\partial v} A_u - g \frac{\partial a_n}{\partial u} A_v \right) du dv,$$
(2.29)

によって与えられる。ここで、 A_u, A_v は外部磁場 $A(u, v)$ のそれぞれ u, v 成分である。更に、上式に (2.22)式で与えられる局所基底による表現を代入すると、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ に対する外部起電力 E_{ij} が

$$E_{ij} = \sum_{\sigma}^{\text{L, U, L, U}} \sum_{\mu}^{\text{L, U, L, U}} \{ \varepsilon(\mu) e_{\sigma} - \varepsilon(\sigma) e_{\mu} \},$$
(2.30)

によって求まる。ただし、

$$e_{\sigma} = -\frac{\Delta u(\sigma)}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f P(\sigma) A_u dX dY, \quad e_{\mu} = -\frac{\Delta v(\mu)}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g Q(\mu) A_v dX dY,$$
(2.31)

である。

以上で、一般的な曲面群から成る複合導体系の渦電流問題に対する諸回路定数が求まった。次に、これらを用い行列形式による回路方程式を立て、固有値展開により問題を解くことができることを示す。

2.1.4 回路方程式と固有値問題

(2.25)~(2.28)式および (2.30)式, (2.31)式により、有限次元の回路方程式

$$\{M\} \dot{\mathbf{X}} + \{R\} \mathbf{X} = \mathbf{E},$$
(2.32)

が1階の時間に関する連立常微分方程式として得られる。ここで、 $\mathbf{X}(t) \in R^{\Sigma N}$ は、先に述べたように、局所基底 a_n に対応した電流成分 V_n をベクトル要素とする電流ベクトルであり、 ΣN は Fig. 2.2 に示すように、 N_i 個の曲面上の全節点の数を表わす。また、 $\dot{\mathbf{X}}$ は $\mathbf{X}(t)$ の時間微分を表わす。 $\mathbf{E}(t) \in R^{\Sigma N}$ はこのときの外部起電力であり、(2.30)式および (2.31)式で与えられるベクトル要素を有する時間の関数のベクトルである。 $\{M\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N}$ は、(2.25)式および (2.26)式で与えられる行列要素から成る複合導体系のインダクタンス行列である。 $\{R\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N}$ は、(2.27)式および (2.28)式で与えられる行列要素から成る複合導体系の抵抗行列である。 $\{M\}$ および $\{R\}$ は、物理的要素から共に正定値実対称行列である。更に、固有値展開のために次の一般化固有値問題を考える。

$$\{M\} \mathbf{X} = \{D(\lambda)\} \{R\} \mathbf{X}.$$
(2.33)

ここで、 $\{D(\lambda)\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N}$ は、互いに異なる実固有値 λ をその対角要素とする対角行列で、固有値 λ は該当する渦電流固有モードの時定数を意味している。

一般化固有値問題 (2.33) 式を解いて得られた正方モード行列を $\{\Phi\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N}$ とする。このとき、モード行列はノルムの大きさに関する任意性を有するが、ここでは

$$\{\Phi\}^T \{R\} \{\Phi\} = \{I\}, \tag{2.34}$$

のように規格化する。ただし、 $\{I\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N}$ は単位行列である。更に、(2.32) 式の回路方程式の外部起電力 E を、モード行列 $\{\Phi\}$ を用いて、次のように固有モードに分解する。

$$\varepsilon_i = \{\Phi\}^T E |_i, \tag{2.35}$$

ただし、上式の右辺の添字 i は、該当するベクトルの第 i 要素を意味する。以上の結果、局所基底 a_n に関して表現された回路方程式 (2.32) 式は、第 i 番目の固有モードの振幅 $\xi_i(t)$ に関して次のように表現することができる。

$$\lambda_i \dot{\xi}_i(t) + \xi_i(t) = \varepsilon_i(t). \tag{2.36}$$

ここで、 $\dot{\xi}_i = d\xi_i/dt$ である。回路方程式 (2.36) 式の解は、積分することによって直ちに得られて

$$\xi_i(t) = \xi_i(0) \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) + \frac{1}{\lambda_i} \int_0^t \varepsilon_i \exp\left(\frac{t'-t}{\lambda_i}\right) dt', \tag{2.37}$$

となる。ここで、 $\xi_i(0)$ は $t=0$ における第 i 固有モードの初期振幅である。

2.1.5 境界条件と対称性

以上までで有限要素回路理論の主要な部分の説明が完結した。次に、導体曲面に電氣的絶縁やポート穴などが存在する場合、その曲面の境界条件を導入したり、更に、考慮している複合導体系が或る幾何学的な対称性を有する場合、その対称条件を導入する方法を述べる。ここでは、渦電流問題は曲面を要素分割した有限要素回路系に対する行列形式で与えられており、これら境界条件、対称条件は共に適当な 1 次変換を用いて表わすことができる。

Fig. 2.4 に示すように、外部境界 ∂C^{out} 、内部境界 C^{in} および ∂C^{in} を有する有界曲面 S を考える。たとえば、内部境界 C^{in} は導体曲面の穴を意味し、内部境界 ∂C^{in} は導体曲面の電氣的絶縁を意味する。電流関数の定義 (2.1)

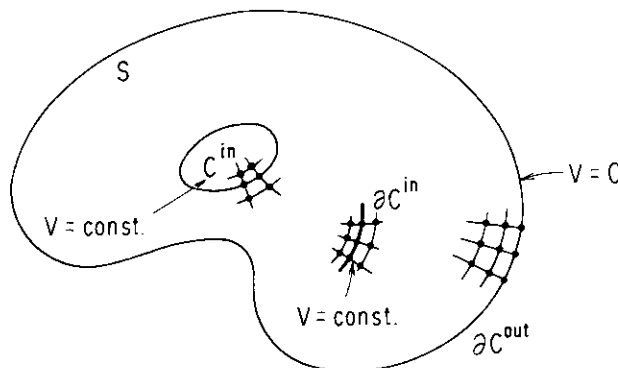


Fig. 2.4 Boundary conditions on a conductor surface S bounded by ∂C^{out} : C^{in} means the inner boundary of a hole and ∂C^{in} that of an electrical cut, in each of which a current function V should be held constant; On the outer boundary ∂C^{out} , the current function V can be put zero, since an arbitrary constant may be added to V .

式より、導体曲面上の任意の2点間の電流関数の差は、この2点を結ぶ任意の曲線を横切る全電流に等しい。したがって、外部境界 ∂C^{out} 上に位置する有限要素の節点、内部境界 ∂C^{in} 上に位置する節点、更に、内部境界 C^{in} 内に位置する全ての節点上の電流関数を、それぞれ一定と置くことができる。更に、電流関数に対する定数の任意性により、外部境界 ∂C^{out} 上では電流関数を全て零と置くことができる。その結果、曲面上の任意の点における電流関数は、その点と外部境界との間を流れる全電流を与える。以上の条件は、以下のように、全て1次変換で定義することができる。いま、ポート穴や電氣的絶縁を含め導体曲面全体を要素分割したとする。ただし、分割の仕方は穴の境界や電氣的絶縁が分割線に沿うように実施する。このようにして得られた有限要素に対して、(2.17)式で定義される局所基底 $a_n (n=1, 2, \dots, N)$ を全ての導体曲面にわたってとる。このときすでに述べたように、電流成分 $V_n (n=1, 2, \dots, N)$ に関するインダクタンス、抵抗および外部起電力の行列要素が、それぞれ(2.25)式、(2.27)式および(2.30)式を用いて求まる。その後、これらの境界条件を考慮して新しい変数 $V'_n (n'=1, 2, \dots, N')$ を導入する。常に $N' < N$ が成り立っており、その結果 V_n は1次変換 $\{A\} \in I^{N \times N'}$ を用いて、 V'_n に対して

$$V = \{A\} V', \quad (2.38)$$

のように記述できる。ここで、 V は V_n を、 V' は V'_n を要素にもつ列ベクトルである。変換行列 $\{A\}$ の具体的な形の例は、外部境界 ∂C^{out} 、内部境界 ∂C^{in} 、 C^{in} の各場合について付録 A.1 に与えられる。(2.11')式、(2.12')式および(2.14)式の有限次元の局所基底に対する式を行列形式に書き直し、(2.38)式を代入すると、

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{2} V^T \{M\} V = \frac{1}{2} V'^T \{A\}^T \{M\} \{A\} V', \\ W &= V^T \{R\} V = V'^T \{A\}^T \{R\} \{A\} V', \\ U_e &= E^T V = E'^T \{A\} V', \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

となる。したがって、新しい変数列 V' に対する行列 $\{M'\}$ 、 $\{R'\}$ および E' は、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \{M'\} &= \{A\}^T \{M\} \{A\}, \\ \{R'\} &= \{A\}^T \{R\} \{A\}, \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

および、

$$E' = \{A\}^T E,$$

となる。ここで、行列 $\{M\}$ および $\{R\}$ が本来正定値実対称行列であるため、変換の結果得られた行列 $\{M'\}$ および $\{R'\}$ は、(2.40)式から明らかなように、やはり共に正定値実対称行列である。

(2.38)式の変換は、必要に応じ何回でも繰り返し実行することができる。たとえば、上に述べたように、或る境界条件に関する1次変換 $\{A\}$ を考慮し、新しい変数列 $V'^T = (V'_1, V'_2, \dots, V'_{N'})$ ($N' < N$) を導入したとする。その後、この境界条件とは独立な別の境界条件に着目し、1次変換 $\{A'\} \in I^{N' \times N''}$ により、別の新しい変数列 $V''^T = (V''_1, V''_2, \dots, V''_{N''})$ ($N'' < N' < N$) を導入する。このとき、(2.38)式と同様にして

$$V' = \{A'\} V'', \quad (2.41)$$

が成り立つ。したがって、新しい変数列 V'' に対する行列 $\{M''\}$ 、 $\{R''\}$ および E'' は

$$\left. \begin{aligned} \{M''\} &= \{A'\}^T \{A\}^T \{M\} \{A\} \{A'\}, \\ \{R''\} &= \{A'\}^T \{A\}^T \{R\} \{A\} \{A'\}, \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

および,

$$E'' = \{A'\}^T \{A\}^T E,$$

となる。結局、考慮すべき境界条件全てに対して重複することのない1次変換の系列 $\{A\}$, $\{A'\}$, $\{A''\}$, ... を考え、変換の順序に関係なく、(2.42)式のような操作を行行列 $\{M\}$, $\{R\}$ および E に対して施せば全ての境界条件を取り込むことができる。

最後に、複合導体系の曲面群が全体として或る幾何学的な対称性や周期性を持ち、更に外部から加わる磁場が同じ対称性や周期性を持つ場合について、その条件を導入する方法を述べる。複合導体系全体としての対称面 Π を考える。このとき、曲面上の一般の電流関数 $V(u, v)$ は、次に示す2つの部分、すなわち対称面 Π を挟み電流関数の符号が異なるoddなパリティ部分 $V^{\text{odd}}(u, v)$ 、および同じ符号のevenなパリティ部分 $V^{\text{even}}(u, v)$ とに分離することができる。

$$\left. \begin{aligned} V^{\text{odd}}(u, v) &= \frac{1}{2} \{V(u, v) - V(-u, v)\}, \\ V^{\text{even}}(u, v) &= \frac{1}{2} \{V(u, v) + V(-u, v)\}. \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

ここで、対称面 Π は曲面の各々で定義される2次元直交座標系 (u, v) の $u=0$ の座標線を含むものとする。言い換えれば、各曲面の $u=0$ の座標線は全てこの対称面 Π に埋め込まれているとする。この場合、対称線となる $u=0$ の座標線を挟んで、対応する曲面上の対となる2点で V が等しかったり、逆符号であることがあらかじめわかっていることになる。したがって、対称線の片側だけを考慮し問題を簡単化することができる。しかもこのような場合、oddなパリティ部分とevenなパリティ部分とは互に結合しないので、それぞれ別々に問題を解くことができる。先に境界条件を導入した方法と同様に、これらの条件に対しても行列形式を用いた1次変換を導入することができる。

ポート穴および電氣的絶縁などの内部境界、更に曲面の境界で与えられる外部境界などの境界条件、また周期性や対称性などの諸条件に対する上記の1次変換においては、常に $N' < N$ が成り立つ。必然的に大規模な計算となる複合トラス導体系の渦電流解析にとっては、このことは、1次変換によってより低次の渦電流問題を定義することができるという意味で、実行上大きな利点となる。後に述べるように、次元縮小(Reduction of Dimension)と呼ぶ低次元問題を導くための積極的な方法とこれらを区別するため、上記の1次変換による低次元化を縮約(Contraction)と呼ぶことにする。

2.1.6 次元縮小

いままで述べてきた方法を実際の複合導体系に直接応用し、渦電流問題を解くことは原理的には可能である。しかしながら、実際のトカマク装置はそれぞれが複雑な幾何学的形状を有する多数の導体系から構成されており、このため問題の規模が巨大になり計算の実行が不可能になってしまう困難がしばしば生じる。したがって、何らかの方法により計算規模を縮小することが必要となるが、これには大別して2つの方法がある。1つは先に述べた対称性や周期性など、系の或る幾何学的な相似性を利用する方法である。これにより渦電流問題を最小の周期に制限したり、電流関数のパリティに関しoddかまたはevenな部分をそれぞれ個別に考慮することで計算規模を大幅に減らすことができる。もう1つは、有限要素分割の結果得られた有限次元の渦電流をその主要な項

と主要でない寄生的な項とに類別し、後者を対象とする系から取り除く積極的な次元縮小法である。ここでは、この積極的な次元縮小(Reduction of Dimension)について説明する。我々が用いる次元縮小法の基礎概念は、制御理論の分野で多用される“構造可制御性 (Structural Controllability)”の考えに基づいている²⁴⁻²⁶⁾。

有限次元の定係数線形システム

$$\{A\}\dot{X} + \{B\}X = \{C\}U, \quad (2.44)$$

をまず考える。ここで、 $\{A\} \in R^{n \times n}$ 、 $\{B\} \in R^{n \times n}$ および $\{C\} \in R^{n \times r}$ とする。 $X \in R^n$ は状態ベクトルであり、 $U \in R^r$ は外部入力である。通常、(2.24)式は定係数線形システムの間接標準形 (Intermediate Standard Form) と呼ばれる²⁴⁾。一般には、(2.44)式で与えられる線形の数値システムは、 $\{A\}$ 、 $\{B\}$ および $\{C\}$ のパラメータの値からその系の性質が一意的に決定されるが、この性質の中で最も重要なものとして、入力による影響が全ての状態に行きわたるか否かを意味する可制御性が上げられる。最も単純な例として、パラメータ $\{C\}$ の或る行要素が全て零で、更にその行に対応する状態ベクトルの要素に対し、他の状態ベクトルの要素からの寄与がパラメータ行列 $\{A\}$ および $\{B\}$ の非対角項を介して存在しない場合を考える。このとき、注目している状態ベクトルの要素に対応するモードは自律系となり、外部入力の影響を受けることがないため不可制御となる。更に、ここでは(2.44)式の数値システムに対して、行列 $\{A\}$ 、 $\{B\}$ および $\{C\}$ の各要素の絶対値が或る適当に小さい $\varepsilon (> 0)$ と比較して十分に小さい要素を零と置いた“構造化システム” ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) を考える。したがって、 $\{\bar{A}\} \in I^{n \times n}$ 、 $\{\bar{B}\} \in I^{n \times n}$ および $\{\bar{C}\} \in I^{n \times r}$ である。構造可制御性とは、上に述べた可制御性の概念を構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) において述べた性質である。特に構造化システムでは、系の可制御性の性質を定性的に説明でき、グラフ論的に容易に考察が可能であるので制御理論の分野で多用されている。以下に(2.44)式のシステムの構造可制御性を判定し、構造可制御部分と構造不可制御部分に分けるための具体的方法を説明する。このためまず、制御理論からの重要な帰結を述べておく²⁴⁻²⁶⁾。

[定理]

構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) が構造可制御であるためには ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) が既約 (irreducible) であることが必要である。

ここで、構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) が既約であるとは、置換行列 $\{P\}$ をどのように選んでも

$$\{P\}\{A\}\{P\}^{-1} = \begin{Bmatrix} A_{11} & \mathbf{0} \\ A_{21} & A_{22} \end{Bmatrix}, \quad \{P\}\{B\}\{P\}^{-1} = \begin{Bmatrix} B_{11} & \mathbf{0} \\ B_{21} & B_{22} \end{Bmatrix}, \quad \{P\}\{C\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ C_2 \end{Bmatrix}, \quad (2.45)$$

の形に変換できないことをいう。さて、この定理をグラフ論的に解釈するために、構造化システムの構造を直感的でわかりやすい形に表現できる有向グラフを導入する。

構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) の有向グラフを次のように定義する。まず、状態ベクトルの変数に対応する節点 x_1, x_2, \dots, x_n と、入力に対応する節点 u_1, u_2, \dots, u_r を考える。次に、 $\{\bar{A}\}$ または $\{\bar{B}\}$ の要素が、それぞれ $a_{ij} \neq 0$ または $b_{ij} \neq 0$ であるならば、節点 x_j から節点 x_i へ、 $\{\bar{C}\}$ の要素が $c_{ij} \neq 0$ であるならば、節点 u_j から節点 x_i へ有向枝をつける。こうして描けたグラフが有向グラフ $G(\{\bar{A}\}, \{\bar{B}\}, \{\bar{C}\})$ である。構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) が既約であること、有向グラフ $G(\{\bar{A}\}, \{\bar{B}\}, \{\bar{C}\})$ の任意の節点 x_j が節点集合の部分集合 $\{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ の少なくとも1つの要素と有向枝で結ばれていることは等価である。こういった有向枝が存在するとき、節点は可到達 (accessible) であるという²⁶⁾。

いま、特殊な場合としてパラメータ行列 $\{B\}$ が単位行列である場合を考える。このとき、(2.44)式に対する構造化システム ($\{\bar{A}\}$ 、 $\{\bar{B}\}$ 、 $\{\bar{C}\}$) において、先の構造可制御性は $\{\bar{A}\}$ と $\{\bar{C}\}$ だけを用いて議論できる。我々が目的とする複合導体系における渦電流解析においては、このパラメータ行列 $\{B\}$ は抵抗行列 $\{R\}$ に相当する。したがって本来、行列 $\{B\}$ はここで仮定した単位行列ではなく、何らかの基底変換により抵抗行列 $\{R\}$ が単位行列となるように

表現し直す必要がある。このため、たとえば、互いに交差することがない導体毎に渦電流の一般化固有問題 (2.33) 式を解き、ジュール損失に関して規格化された固有関数基底を複合導体系に対して得たとする。このとき、系全体の抵抗行列は単位行列に変換される。したがって、形式上 (2.44) 式の線形システムのパラメータ行列 $\{B\}$ を単位行列であると仮定しても一般性を失わない。ここで重要なことは、導体毎の一般化固有値問題は複合導体系全体に関するそれに対して十分に小規模の問題であり、実際の数値解析で容易に処理できることである。

EDDYMULT コードシステムでは、複合トラス導体系の大規模な渦電流問題を処理するため、トラス導体毎の固有関数基底で渦電流問題を仮に表現し、これに対する複合導体系における構造不可制御部分を消去し次元縮小を行う。このような基底で表現された線形システム (2.44) 式に対して、更に状態ベクトル X の要素の順序を適当に入れ換え、 $X^T = (X_1^T, X_2^T, X_3^T)$ のように書き換えることができるとする。本来パラメータ行列 $\{A\}$ は対称行列であるから、これを考慮し (2.44) 式に対する構造化システムを X_1, X_2 および X_3 を用いて表わすと、

$$\begin{Bmatrix} * & * & 0 \\ * & * & 0 \\ 0 & 0 & * \end{Bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{pmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} * \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot U, \quad (2.46)$$

$$X^T = \{X_1, X_2, X_3\},$$

となる。 $*$ は零でない要素を含む適当な行列を意味する。ここで、 X_1 は $\{A\}$ の非対角要素を介し X_2 とは互いに結合するが、 X_3 とは結合しない状態ベクトルを意味する。このとき X_1 は、入力により制御可能である。一方、 X_2 は $\{A\}$ の非対角要素を介し X_1 と互いに結合し、 X_3 とは結合しない状態ベクトルを意味する。このとき X_2 は、 X_1 が入力により制御可能であるため、入力の影響を X_1 を介して受け、したがって間接的に制御可能である。 X_3 は X_1 と X_2 の双方と結合しない不可制御な状態ベクトルを意味する。結局、入力の影響が及ばない状態ベクトルのクラスは X_3 だけである。このときの構造化システム $(\bar{A}), (\bar{B}), (\bar{C})$ に対して、有向グラフ $G((\bar{A}), (\bar{B}), (\bar{C}))$ が Fig. 2.5 のように描ける。このグラフから容易にわかるように、 $(\bar{A}), (\bar{B}), (\bar{C})$ が構造可制御であるためには、先の X_3 のクラスを系が含まないことが必要である。

以上の手続きを経ることによって、我々が考察している渦電流問題においては、上に述べた基底変換により (2.32) 式で与えられる回路方程式を (2.46) 式のような構造化システムに変換し、更に構造可制御性について類別したことになる。更に、我々が取り扱う渦電流問題は本来漸近安定であることがわかっているため、これにより、 X_3 の部分の初期値が零であれば、 X_3 は零状態を時間的に維持し続けることになる。したがって、 X_3 の部分については系からこれを除外することができる。

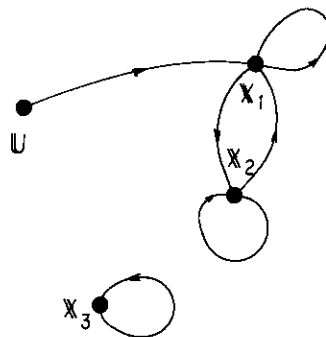


Fig. 2.5 Directed graph $G((\bar{A}), (\bar{B}), (\bar{C}))$. X_1, X_2 and X_3 denote three distinct classes with respect to the structural controllability: X_1 means a directly controllable class; X_2 an indirectly controllable class; and X_3 an uncontrollable class. U indicates an input.

2.2 数値解析のための定式化^{14,17)}

ここでは、前節までで説明してきた有限要素回路理論を複合トーラス導体系の渦電流問題に適用する。記述する内容のおよその順序は、EDDYMULT コードシステムの処理手順にしたがっている。考慮する複合トーラス導体系は、全体として系の赤道面に関し上下対称な幾何学的配置を仮定している。このため、前節で述べたように、この赤道面に関して電流関数のパリティを odd な部分と even な部分とに分離して問題を取り扱うことができる。多数のトーラス導体群から構成される複合トーラス導体系の大規模な渦電流解析の実施にあたり、前節で述べた次元縮小処理が必要となるが、EDDYMULT コードシステムでは、処理の都合上トーラス導体毎に独立に得られた固有関数基底に対して実行する。トカマク装置の渦電流問題では、トーラス導体以外の軸対称外部コイルも渦電流の1つの要素としてとらえ、誘起されるコイル電流の反作用を考慮した総合的な渦電流問題を解くのが普通である。このため渦電流の時間追跡にあたっては、これらの効果が自然に導入できるように定式化を行った。最後に、誘起された渦電流が生成する磁場を求めるための具体的な定式化を示す。

2.2.1 計算体系と計算手順

Fig. 2.6 に示すように、系の赤道面 ($z=0$) に関して上下対称な幾何学的配置を有する複合トーラス導体系を考える。更に、この上下対称な幾何学的配置を有する全ての軸対称トーラス導体は、それぞれが互いに交差することがないものとする。したがって、電流関数を even と odd のパリティとに分離しこれらを互いに結合させず、問題をそれぞれ独立に取り扱うことができる。 (ϕ, ℓ) はトーラス導体 S_N 上の2次元直交座標で、 ℓ は、トーラス導体のポロイダル断面が赤道面と外側で交差する点 ($\ell=0$) からポロイダル断面に沿って測った長さである。トーラス導体群は、全体として $\phi=0$ に関する対称性と更に $\phi=0$ を基点とする N_ϕ の周期性を有するものとする。したがって、少なくとも一般には $N_\phi=1$ の対称性と周期性を常に有する。Fig. 2.6 のように座標系を定めたとき、(2.3)式、(2.5)式および(2.7)式などの微分幾何学的諸量は以下ようになる。

まず

$$r=r(\ell), \quad z=z(\ell), \quad (2.47)$$

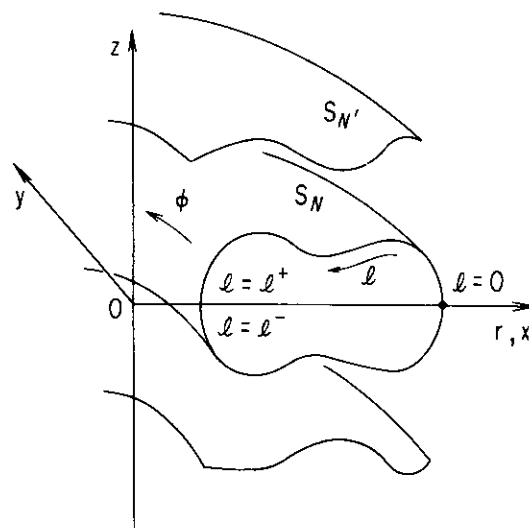


Fig. 2.6 Multi-torus system symmetric with respect to the equatorial plane $z=0$. The (ϕ, ℓ) is a two-dimensional orthogonal coordinate on the torus S_N . The ℓ is a length measured along the poloidal cross-section of torus from the outermost periphery of torus. The (r, ϕ, z) is the usual cylindrical coordinate and the (x, y, z) the Cartesian coordinate system.

と置く。 (r, ϕ, z) は通常の間筒座標である。 $\phi = 0$ を x 軸の方向にとると、(2.3)式は

$$x = r(\ell) \cos \phi, \quad y = r(\ell) \sin \phi, \quad z = z(\ell), \quad (2.48)$$

となり、第1基本量 f, g は

$$f = r(\ell), \quad g = 1, \quad (2.49)$$

となる。座標線 ℓ および ϕ はそれぞれ $[\ell^-, \ell^+]$ および $[-\pi, \pi]$ で定義されており、トーラス導体の断面が閉じている場合には、2点 (ϕ, ℓ^-) と (ϕ, ℓ^+) は互いに一致する。 $\phi = \text{一定}$ および $\ell = \text{一定}$ の方向に沿う単位ベクトルは、それぞれ

$$\mathbf{e}_\phi = (-\sin \phi, \cos \phi, 0), \quad \mathbf{e}_\ell = \left(\frac{dr}{d\ell} \cos \phi, \frac{dr}{d\ell} \sin \phi, \frac{dz}{d\ell} \right), \quad (2.50)$$

となる。これらの諸量はトーラス導体毎に独立に与えられ、(2.48)式により直交座標系 (x, y, z) において互いの関連を持っている。

次にトーラス導体全体を有限要素に分割する。分割は $\phi = \text{一定}$, $\ell = \text{一定}$ の線に沿って行う。したがって、トーラス導体は長方形の有限要素の集合により覆われることになる。ところで、複合トーラス導体はトロイダル方向に全体として N_ϕ の対称性と周期性を有しているので、Fig. 2.7 に示すように、計算の対象領域を $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ に制限することができる。いま ϕ 方向には $[0, \pi/N_\phi]$ を等 N 分割し、 ℓ 方向には M 分割したとすると、有限要素の幅はそれぞれ $\Delta\phi$, $\Delta\ell_i (= \ell_{i+1} - \ell_i)$ となる。Fig. 2.8 に $[0, \ell^-]$ および $[0, \pi/N_\phi]$ の領域のメッシュ図を示す。 $i (= 0, 1, \dots, \text{IMAX})$ および $j (= 1, 2, \dots, \text{JMAX})$ は、それぞれ有限要素回路の ℓ 方向および ϕ 方向の要素番地であり、このとき、 $\text{IMAX} = M$, $\text{JMAX} = N + 1$ である。一般には、同じトーラス導体であっても $\Delta\ell_i \neq \Delta\ell_{i'}$ ($i \neq i'$) であり、トーラス導体が異なれば $\Delta\phi \neq \Delta\phi'$ である。ただし、 $\phi = \pi/N_\phi$ 上ではたとえトーラス導体が変わっていても、それぞれのトーラス導体の ϕ 方向分割点が一致するように考慮しなくてはならない。

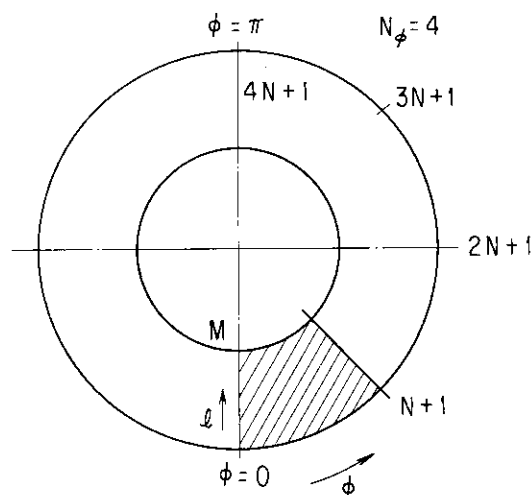


Fig. 2.7 Projection of the upper half of the symmetric and periodic torus in the ϕ -direction. The shadowed region indicates the minimum toroidal section, where we have to obtain the current function V for the case of $N_\phi = 4$. Here, the torus is divided into rectangular finite elements. The N and M represent the numbers of partitions along the ϕ and ℓ -directions, respectively.

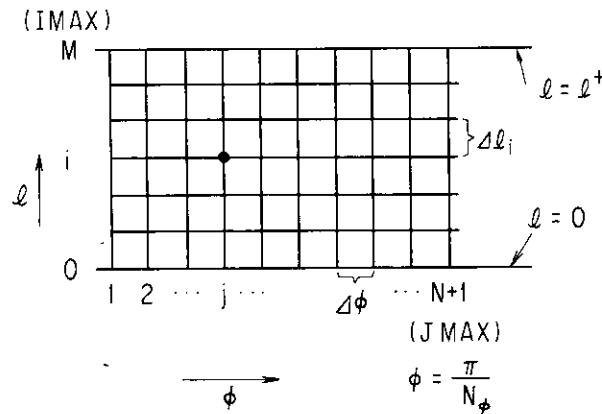


Fig. 2.8 Mesh chart of the toroidal section of Fig. 2.7. The ϕ interval $[0, \pi/N_\phi]$ is equi-partitioned into N finite elements. The i ($=0, 1, \dots, \text{IMAX}$) denotes the l -directional address of finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$ and the j ($=1, 2, \dots, \text{JMAX}$) the ϕ -direction.

次に、EDDYMULT コードシステムの実際計算手順にしたがい、本節で行う説明の流れを以下に示す。まず初めにトーラス導体間相互の結合を無視し、(2.33)式の一般化固有値問題を解くことによりトーラス導体毎の渦電流固有モード解析を行う。その結果、トーラス導体毎に定義される固有関数基底が複合トーラス導体系に対して得られる。後にこれらの数値計算のための定式化を行うが、局所基底に対するインダクタンスや抵抗などの回路定数を計算する際には、有限要素の重なりが問題となる。そこでは、この有限要素の重なり方についてその類別法を詳しく述べる。特に(2.26)式の積分は、有限要素が重なる場合、 $\rho_{12} = 0$ の特異点を有するので数値積分を直接実行できない。このため、数値積分を解析的に処理するための定式化を与える。また、一般に(2.26)式の数値計算は多くの計算時間を必要とするため、系の幾何学的な対称性や周期性を利用し、必要最小限の1次独立なインダクタンス $K'_{ij;km}$ を計算し、これを元にして全体のインダクタンスを生成する方法を述べる。更に、前節で述べたように、これらの回路定数をトーラスの $[0, \ell^+]$ および $[0, \pi/N_\phi]$ の最小対象領域に縮約させる手順を説明する。続いて、トーラス導体間相互のモード間結合を計算するための定式化を行う。これにより多数のトーラス導体を連成させ、渦電流問題を解くことができる。このモード間結合を求めるための数値積分にはやはり多くの計算時間を必要とするため、積分がモードに依存しない形になるように、形状関数を導入する。また、1次独立な形状関数を見付ける手続きや、これを元にして全体の形状関数を生成させる方法、更にこれらをトーラスの最小対象領域に縮約させる方法などを詳しく説明する。ところで、本節の初めに述べたように、複合トーラス導体系の渦電流がトーラス導体毎の固有関数基底に対して表現されたとすると、抵抗行列 $\{R\}$ は、(2.46)式のように単位行列に変換されたことになる。したがって、この基底に対してそのままの形で前節で説明した次元縮小の方法を適用することができる。更に、本節では軸対称外部コイルを渦電流の要素として取り込み、より一般の渦電流問題を解くための定式化を行う。最後に、誘起された渦電流が生成する3次元的構造を有する磁場を計算するための説明を与える。

2.2.2 トーラス導体毎の渦電流固有モード解析

トーラス導体を先に述べたように有限要素分割すると、(2.18)式で定義される区分的1次関数の局所基底(2.17)式に対するインダクタンスや抵抗を具体的に求めることができる。このとき、(2.49)式の第1基本量および(2.50)式の2次元直交座標 ϕ, ℓ に沿う各単位ベクトルを用いると、(2.26)式は、

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_{\sigma_1\sigma_2} &= \frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_1 r_2}{\rho_{12}} \cos(\phi_2 - \phi_1) P(\sigma_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \beta_{\sigma_1\mu_2} &= \frac{\Delta\phi\Delta\ell'_2}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_1}{\rho_{12}} \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \sin(\phi_2 - \phi_1) P(\sigma_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \gamma_{\mu_1\sigma_2} &= \frac{\Delta\ell_1\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_2}{\rho_{12}} \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \sin(\phi_1 - \phi_2) Q(\mu_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \delta_{\mu_1\mu_2} &= \frac{\Delta\ell_1\Delta\ell'_2}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\rho_{12}} \left\{ \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_2 \right\} Q(\mu_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2,
 \end{aligned} \right\} (2.51)$$

となる。ただし、 $\rho_{12}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + (z_1 - z_2)^2$ である。(2.28)式は、

$$\left. \begin{aligned}
 \eta_{\sigma\sigma'} &= \frac{1}{2^2} \frac{\Delta\phi}{\Delta\ell_i} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_{\phi} r P(\sigma) P(\sigma') dXdY, \\
 \eta_{\sigma\mu'} &= \frac{1}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_{\phi\ell} P(\sigma) Q(\mu') dXdY, \\
 \eta_{\mu\mu'} &= \frac{1}{2^2} \frac{\Delta\ell_i}{\Delta\phi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \eta_{\ell r} \frac{1}{r} Q(\mu) Q(\mu') dXdY,
 \end{aligned} \right\} (2.52)$$

となる。ここでは、積分は同一のトーラス導体に関するものであるため、(2.51)式における $\Delta\phi'$ または $\Delta\ell'_i$ は、それぞれ $\Delta\phi$ または $\Delta\ell_i$ である。(2.52)式の積分は、 $\Omega(\sigma, \mu) = \Omega'(\sigma, \mu)$ のように有限要素(ゾーン)が重なる場合について実施する。

(A) 有限要素が重なる場合の計算

(1) ゾーンの重なり分類

一般の位置にある有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ を Fig.2.9 に示す。有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ 間のインダクタンス $K'_{ij; km}$ は (2.25)式で示されるように、次の16通りのゾーンの組合せ

- ①-①, ①-②, ①-③, ①-④,
- ②-①, ②-②, ②-③, ②-④,
- ③-①, ③-②, ③-③, ③-④,
- ④-①, ④-②, ④-③, ④-④,

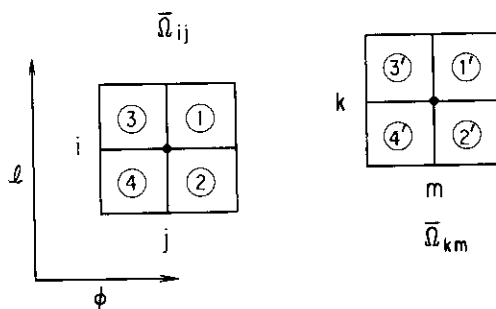


Fig. 2.9 Pairing finite element circuits: $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$. ① means the zone number of $\bar{\Omega}_{ij}$ and ①' that of $\bar{\Omega}_{km}$.

についての積分の和となる。しかしながら、有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ に関するインダクタンス $K'_{ij; km}$ と有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{km}; \bar{\Omega}_{ij})$ に関するインダクタンス $K'_{km; ij}$ が常に等しいことから、1次独立な有限要素回路の重なり方には Fig. 2.10 に示す5通りしか存在しない。いまそれぞれの場合を、i) 場合 O.1 ($k=i, m=j$), ii) 場合 O.2 ($k=i, m=j+1$), iii) 場合 O.3 ($k=i+1, m=j-1$), iv) 場合 O.4 ($k=i+1, m=j$) および v) 場合 O.5 ($k=i+1, m=j+1$) のように分離し、Fig. 2.11 に示すような重なり方を考える。明らかに、①-①, ②-②, ③-③, ④-④, ①-③, ②-④, ③-②, ①-②, ③-④, ①-④の10通りのゾーンの重なり方を考えればよい。

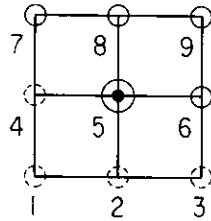


Fig. 2.10 Positions of nodes $(i; j)$ and $(k; m)$ for the case which the finite element circuits $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$ are laid to overlap each other. ● denotes the position of node $(i; j)$ of $\bar{\Omega}_{ij}$ and ○ the position of node $(k; m)$ of $\bar{\Omega}_{km}$.

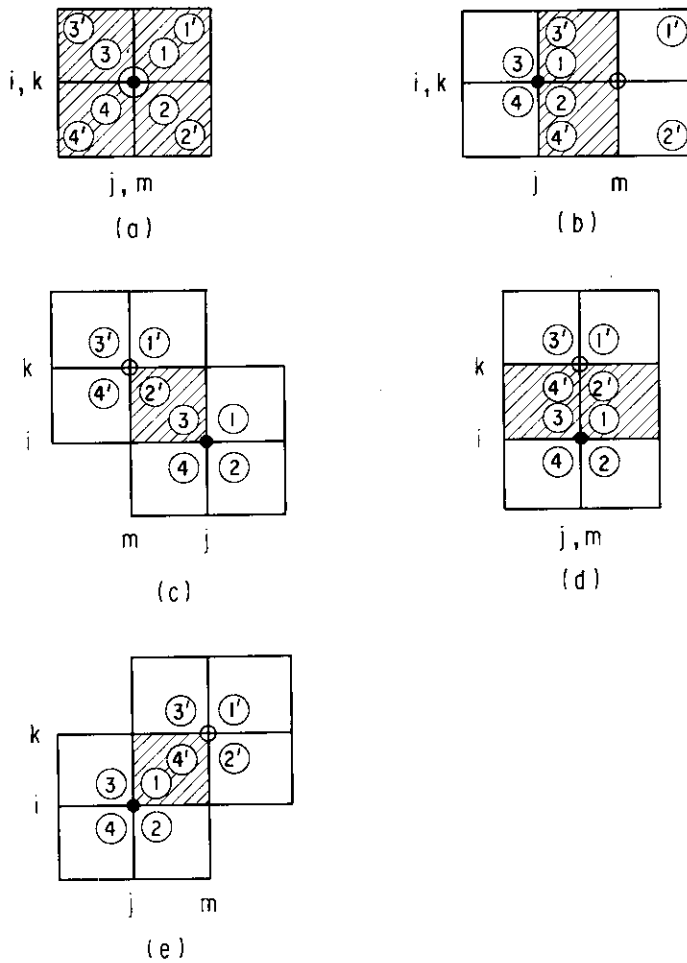


Fig. 2.11 Overlapping of zones shown hatched. (a) Case O.1: $k=i, m=j$; (b) Case O.2: $k=i, m=j+1$; (c) Case O.3: $k=i+1, m=j-1$; (d) Case O.4: $k=i+1, m=j$; and (e) Case O.5: $k=i+1, m=j+1$.

(2) ゾーンが重なる場合のインダクタンスの計算

インダクタンスの計算に用いる (2.51) 式はゾーンが重なる場合、 $\rho_{12} = 0$ の特異点を有するため直接数値計算が実行できない。したがって、この場合の解析的な計算式を、インダクタンスを与える一般式 (2.23) 式に立ち戻って導く^{14,17)}。有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ に対するゾーン番号を① (=①, ②, ③, ④), $\bar{\Omega}_{km}$ に対するゾーン番号を② (=①, ②, ③, ④) とすると、ゾーンの組合せ①-②に対するインダクタンス $K_{①②}$ は、

$$K_{①②} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \iiint_{\rho_{12}} \frac{1}{r} \left\{ r r' \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{①} \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{②} \mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{e}'_\phi - r \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{①} \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{②} \mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{e}'_\ell - r' \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{①} \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{②} \mathbf{e}_\ell \cdot \mathbf{e}'_\phi + \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{①} \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{②} \mathbf{e}_\ell \cdot \mathbf{e}'_\ell \right\} d\phi d\ell d\phi' d\ell', \quad (2.53)$$

で与えられる。ゾーン①と②とが重なる場合には、 $\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{e}'_\ell = 0$, $\mathbf{e}_\ell \cdot \mathbf{e}'_\phi = 0$, $\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{e}'_\phi = 1$ および $\mathbf{e}_\ell \cdot \mathbf{e}'_\ell = 1$ と置いてよいから、(2.53) 式の積分の第 2 項および第 3 項は計算する必要がない。

ところで、 $\Delta \ell = \ell_{i+1} - \ell_i$ と置き、(2.17) 式のように局所基底を取ったとすると、(2.53) 式の被積分関数にある電流関数 V の微分項は、

ゾーン①において、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{①} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_i} (\ell - \ell_{i+1}), \quad \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{①} = -\frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_i} (\phi - \phi_{j+1}),$$

ゾーン②において、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{②} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_{i-1}} (-\ell + \ell_{i-1}), \quad \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{②} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_{i-1}} (-\phi + \phi_{j-1}),$$

ゾーン③において、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{③} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_i} (-\ell + \ell_{i+1}), \quad \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{③} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_i} (-\phi + \phi_{j-1}),$$

ゾーン④において、

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)_{④} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_{i-1}} (\ell - \ell_{i-1}), \quad \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)_{④} = \frac{1}{\Delta \phi \Delta \ell_{i-1}} (\phi - \phi_{j-1}),$$

(2.54)

と表わせる。更に、Fig. 2.11 に示したゾーンの重なりそれぞれの場合について ϕ 方向分割が等分割であるため、以下のように、積分(2.53)式を書き換えることができる。

i) 場合 O.1 に関して

①-①と③-③の積分(2.53)式は等しく、②-②と④-④の積分(2.53)式は等しい。また、①-①の積分で $a = \Delta \ell_i$, $b = r \Delta \phi$ および $X = \ell - \ell_i$, $Y = r(\phi - \phi_j)$, ②-②の積分で $a = \Delta \ell_{i-1}$, $b = r \Delta \phi$ および $X = \ell - \ell_{i-1}$, $Y = r(\phi - \phi_j)$ 等と置けば、(2.53)式の積分は次のように①-①と②-②で同形式となる。

$$K_{①①} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{1}{\rho_{12}} (XX' + YY') dXdYdX' dY', \quad (2.55)$$

ii) 場合 O.2 に関して

上の場合と同様にして積分は①-③と②-④で同形式となり、

$$K_{①③} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{1}{\rho_{12}} (bY - XX' - YY') dXdYdX' dY', \quad (2.56)$$

と表わせる。

iii) 場合 O.4 に関して

①-②と③-④の積分は等しくて、上の場合と同様の変数変換を施して

$$K_{\textcircled{1}\textcircled{1}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{1}{\rho_{12}} (aX - XX' - YY') dXdYdX' dY', \quad (2.57)$$

と表わせる。

iv) 場合 O .3 と 場合 O .5 に関して

両方の積分は等しくて、たとえば①-④の積分については

$$K_{\textcircled{1}\textcircled{2}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{1}{\rho_{12}} (XX' - aX + YY' - bY) dXdYdX' dY', \quad (2.58)$$

と表わせる。

ところで、 $\rho_{12}^2 = (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2$ と置き、便宜上次の積分関数を定義する。

$$\left. \begin{aligned} S_{x_2} &= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{XX'}{\rho_{12}} dXdYdX' dY', \\ S_{y_2} &= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{YY'}{\rho_{12}} dXdYdX' dY', \\ S_x &= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{X}{\rho_{12}} dXdYdX' dY', \quad \left(= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{X'}{\rho_{12}} dXdYdX' dY' \right), \\ S_y &= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{Y}{\rho_{12}} dXdYdX' dY', \quad \left(= \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b \frac{Y'}{\rho_{12}} dXdYdX' dY' \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

(2.59)式の積分が求まれば、(2.55)～(2.58)式の積分は全て求まる。一般に、或る既知の関数 $F(x, x'; y, y')$ に対して、

$$F(x, x'; y, y') = \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial x'} + \frac{\partial^2 G}{\partial y \partial y'}, \quad (2.60)$$

を満たす別の関数 $G(x, x'; y, y')$ を見付けることができれば、Gauss の定理によって

$$\iiint_{\Omega} \iiint_{\Omega'} F dx dy dx' dy' = \oint_{\Omega} \oint_{\Omega'} G d\vec{\ell} \cdot d\vec{\ell}', \quad (2.61)$$

が成り立つことが知られている。ここで、右辺は2つの有限要素 Ω および Ω' に沿う2重線積分で、 $d\vec{\ell} \cdot d\vec{\ell}' = dx dy' + dy dy'$ である。これにより、

$$S_0(a, b) = \frac{1}{3} (a^3 + b^3 - \sqrt{a^2 + b^2}^3) + ab \left(a \sinh^{-1} \frac{b}{a} + b \sinh^{-1} \frac{a}{b} \right),$$

と定義される S_0 を用いて、(2.59)式は

$$\left. \begin{aligned} S_{x_2}(a, b) &= \frac{2}{15} a^5 + \frac{1}{3} a^2 b^3 + \frac{1}{45} b^5 + \frac{1}{2} a^4 b \sinh^{-1} \frac{a}{b} + \frac{2}{3} a^3 b^2 \sinh^{-1} \frac{a}{b} \\ &\quad - \left(\frac{2}{15} a^4 + \frac{29}{90} a^2 b^2 + \frac{1}{45} b^4 \right) \sqrt{a^2 + b^2}, \\ S_{y_2}(a, b) &= S_{x_2}(b, a), \\ S_x(a, b) &= a S_0(a, b), \\ S_y(a, b) &= b S_0(a, b), \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

と表わされることがわかる²⁷⁾。

以上の結果、ゾーンの重なりが有る場合の積分(2.55)~(2.58)式は、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} K_{\textcircled{1}\textcircled{1}} &= \bar{K}_{\textcircled{2}\textcircled{2}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} (S_{x_2} + S_{y_2}), \\ K_{\textcircled{1}\textcircled{3}} &= K_{\textcircled{2}\textcircled{4}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} (-S_{x_2} - S_{y_2} + bS_y), \\ K_{\textcircled{3}\textcircled{2}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} (-S_{x_2} - S_{y_2} + aS_x), \\ K_{\textcircled{1}\textcircled{4}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} (S_{x_2} + S_{y_2} - aS_x - bS_y), \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

となる。

(3) 抵抗計算のためのゾーンの重なり分類

抵抗の計算に必要な(2.52)式の積分は、 $\Omega(\sigma, \mu) = \Omega'(\sigma, \mu)$ のように有限要素(ゾーン)が重なる場合についてのみ実行する必要がある。その場合の重なり条件としては、先に述べた場合 0.1~場合 0.5を考えればよいことになる。更に、トラス導体の或るトロイダル区間が、ベローズのように面電気抵抗の異方性を有するときがあるので、抵抗計算においては重なり条件以外にベローズの境界を考慮する必要が生じる。

ここでは、 ϕ 方向の有限要素分割を等間隔に行っているのので、下記の①、②、③および④の4通りの境界条件の区別に注意すればよい。後は、 ϕ = 一定の l 方向要素に沿って抵抗を計算し、 ϕ 方向の他の場所でこの値をそれぞれの境界条件毎に適用すればよい。

- ① 全てベローズ部の場合
- ② 全て厚肉部の場合
- ③ ベローズ部と厚肉部が共存し、 ϕ 方向右側の領域が厚肉部の場合
- ④ ベローズ部と厚肉部が共存し、 ϕ 方向左側の領域が厚肉部の場合

これらはそれぞれの場合毎に異なった処理が必要となるので、Fig. 2.11 に示すゾーンの重なりとベローズ・厚肉部の存在の仕方に関する区別を述べる。

① 場合 B. 1 (全てベローズ部の場合)

Fig. 2.11 の全ての重なりをベローズ部とする。

② 場合 B. 2 (全て厚肉部の場合)

Fig. 2.11 の全ての重なりを厚肉部とする。

③および④ 場合 B. 3 (ベローズ部と厚肉部が共存する場合)

- 1) 場合 B. 3.1 : 場合 B. 1の方法でベローズ部のみを算出する。
- 2) 場合 B. 3.2 : 場合 B. 2の方法で厚肉部のみを算出する。
- 3) 場合 B. 3.3 : Fig. 2.11 の③-③, ④-④, ③-②, ③-④の重なりをベローズ部とし、他の重なりを厚肉部として算出する。
- 4) 場合 B. 3.4 : Fig. 2.11 の①-①, ②-②, ①-③, ②-④, ①-②, ①-④の重なりをベローズ部とし、他の重なりを厚肉部として算出する。

(B) トラスの対称性・周期性および電流関数のパリティに基づく回路定数の縮約

(1) 赤道面の上下に対するパリティに基づく縮約

先に述べたような方法でトラス導体を長方形の有限要素に分割すると、Fig. 2.12 に示すような有限要素回路が得られる。このとき、 $l = l^+$, $l = 0$ および $l = l^-$ の境界線に関して、これら有限要素回路は、 $\overline{\partial\Omega}$ のように

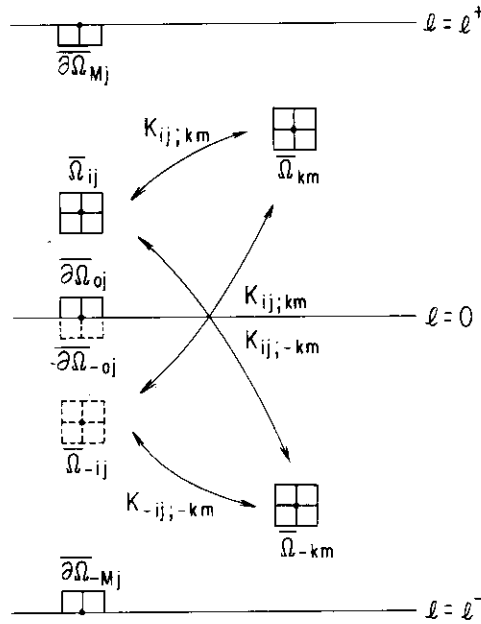


Fig. 2.12 Finite element mesh of the torus extended to a plane for calculation of an inductance $K_{ij;km}$: It must be noted that the finite element circuit $\overline{\partial\Omega}$ on the boundaries $l=l^+$, $l=0$ and $l=l^-$ consists of two individual finite elements as $\overline{\partial\Omega} = \bigcup_{\sigma, \mu} \Omega(\sigma, \mu)$; Since the torus geometry is symmetric with respect to an equatorial plane, $K_{ij,km} = K_{-ij,-km}$ and $K_{ij;-km} = K_{-ij;km}$ always hold for both the parities of current function V .

2つの有限要素から構成されていることに注意する必要がある。 $l=0$ では2つの有限要素回路 $\overline{\partial\Omega}_{0j}$, $\overline{\partial\Omega}_{-0j}$ が与えられるが、これらは互いに独立ではなく、実際には節点(0;j)の電流関数により一義的に回路が定義されるので、 $\overline{\Omega}_{0j} = \bigcup_i \overline{\partial\Omega}_{ij}$ のように4つの有限要素から成る1つの回路となる。また、トーラス導体のポロイダル断面が l 方向に閉じている場合、 $l=l^+$, $l=l^-$ の点は一致するので、ここでも、 $\overline{\Omega}_{Mj} = \bigcup_i \overline{\partial\Omega}_{ij}$ のような4つの有限要素から成る有限要素回路を構成する。Fig. 2.12からわかるように、トーラス導体は赤道面に関し上下対称な幾何学的配置を有しているので、電流関数のパリティに関係なく $K_{ij;km} = K_{-ij;-km}$ および $K_{ij;-km} = K_{-ij;km}$ が成り立つ。

まず、 $K_{ij;km}$ と $K_{ij;-km}$ との間に成り立つ関係を説明する。トーラス導体の赤道面に関する上下対称な幾何学的配置を考慮すると、Fig. 2.3に示す有限要素回路の構成からわかるように、有限要素回路 $\overline{\Omega}_{-km}$ の4つの有限要素 $\Omega(\sigma, \mu)$ は、これと上下対称な位置にある $\overline{\Omega}_{km}$ の4つの有限要素を、 μ に関しその上下関係を反転させた配置となる。インダクタンス $K_{ij;-km}$ を求めるためには、まずこの反転に対応して(2.25)式の第1項と第3項の符号を反転させる。次に、 $K_{ij;-km}$ の算出に必要な形状関数(2.51)式の積分を $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}^*$, $\beta_{\sigma_1\mu_2}^*$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}^*$, $\delta_{\mu_1\mu_2}^*$ と表す。このときの積分点間の距離 ρ_{12}^* は、 $\rho_{12}^{*2} = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos(\phi_1 - \phi_2) + (z_1 + z_2)^2$ であり、赤道面上下の幾何学的関係は $(dr/d\ell)_2^* = -(dr/d\ell)_2$, $(dz/d\ell)_2^* = (dz/d\ell)_2$ および $r_2^* = r_2$ であることから、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\sigma_1\sigma_2}^* &= -\frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_1r_2}{\rho_{12}^*} \cos(\phi_2 - \phi_1) P(\sigma_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\ \beta_{\sigma_1\mu_2}^* &= -\frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_1}{\rho_{12}^*} \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \sin(\phi_2 - \phi_1) P(\sigma_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\mu_1 \mu_2}^* &= -\frac{\Delta \ell_i \Delta \ell'_i}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r_2}{\rho_{12}^*} \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \sin(\phi_1 - \phi_2) Q(\mu_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\ \delta_{\mu_1 \mu_2}^* &= -\frac{\Delta \ell_i \Delta \ell'_i}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\rho_{12}^*} \left\{ \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_2 \right\} Q(\mu_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \end{aligned} \right\} (2.64)$$

となる。ここで、(2.64)式の第2式と第4式については、 $Q(\mu_2)$ に関する積分変数 Y_2 に対してその積分区間を上述述べた符号反転にしたがい反転させた。(2.64)式を(2.51)式と比較すると、積分点間の距離が ρ_{12}^* に、第4式の積分における第2項の符号が負に、更に全ての形状関数の符号が反転しており、その他は形式上同じであることがわかる。

以上の結果、実際の数値積分においては、トーラス赤道面に関する電流関数のパリティがevenの場合、形状関数に対する(2.51)式の4つの積分の第1式から第3式までは $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} - 1/\rho_{12}^*$ に、第4式の第1項に対する $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} - 1/\rho_{12}^*$ に、第2項に対する $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} + 1/\rho_{12}^*$ に置き換えれば、赤道面の上下に対するパリティに基づく縮約が考慮できたことになる。一方電流関数がoddの場合は、同じく第1式から第3式までは $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} + 1/\rho_{12}^*$ に、第4式の第1項に対する $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} - 1/\rho_{12}^*$ に、第2項に対する $1/\rho_{12}$ を $1/\rho_{12} - 1/\rho_{12}^*$ に置き換えればよい。

ところで、トーラス導体は ϕ 方向に等分割されているから、このことと上で述べた赤道面の上下に対するパリティに基づく縮約についての説明から、1次独立なインダクタンス $K'_{ij;km}$ としては、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ の節点 $(i;j)$ の位置を $\phi=0$, $\ell=[0, \ell^-]$ に、 $\bar{\Omega}_{km}$ の節点 $(k;m)$ の位置を $\phi=[0, \pi]$, $\ell=[0, \ell^+]$ に制限したものを考えればよいと結論できる。

抵抗 $R_{ij;km}$ については、これが有限要素の重なりを有する場合についてのみ値を有することと、トーラス導体の赤道面の上下で2つの有限要素回路が重なりを持たないことから、電流関数のパリティに関係なく、赤道面に対して片側で求めた値を単純に2倍すれば求められる。

(2) トーラスの対称性・周期性に基づく縮約

ここでは、先の説明で得られた1次独立なインダクタンス $K'_{ij;km}$ を生成元とし、トーラスの ϕ 方向の対称性・周期性を利用し、 $\phi=[0, \pi/N_\phi]$, $\ell=[0, \ell^-]$ の必要最小の領域にインダクタンス $K'_{ij;km}$ を縮約させる。抵抗 $R_{ij;km}$ については、以前に述べたベローズ部と厚肉部の境界条件についての分類を考慮し、その場合毎に値を求め、その後この最小の領域に展開させればよい。

1次独立な $K'_{ij;km}$ としては、そのときの有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ の各々の節点 $(i;j); (k;m)$ を $0 \leq i \leq M, j=1; 0 \leq k \leq M, 1 \leq m \leq N_\phi \cdot N+1$ として計算し、これを生成元とする。すなわち、 $\bar{\Omega}_{ij}$ の節点 $(i;j)$ の位置は $\phi=0$, $\ell=[0, \ell^-]$ とする。一方、 $\bar{\Omega}_{km}$ の節点 $(k;m)$ の位置は $\phi=[0, \pi]$, $\ell=[0, \ell^+]$ である。したがって、 $N_{\max}=N_\phi \cdot N+1$ とすると、1次独立なインダクタンス $K'_{ij;km}$ の総数は、

$$N_{\max} \cdot (M+1) + N_{\max} \cdot M + \dots + N_{\max} \cdot 1 = N_{\max} \cdot (M+1) \cdot (M+2)/2,$$

である。以下の説明の都合上、次の[CHAIN]、[BLOCK]を定義する。

㉑ [CHAIN]

或る i のときの $K'_{ij;km}$ の集合を[CHAIN]と呼ぶ。このとき、各[CHAIN]毎の $K'_{ij;km}$ の総数は、

第1 [CHAIN] : $j=1$, $i=0$ で $(M+1) \cdot (N_\phi \cdot N+1)$ 個

第2 [CHAIN] : $j=1$, $i=1$ で $M \cdot (N_\phi \cdot N+1)$ 個

第3 [CHAIN] : $j=1$, $i=2$ で $(M-1) \cdot (N_\phi \cdot N+1)$ 個

⋮ ⋮

最終 [CHAIN] : $j=1, i=M$ で $1 \cdot (N_\phi \cdot N + 1)$ 個
である。

⑥ [BLOCK]

或る i に対する [CHAIN] に含まれる或る k の $K'_{ij;km}$ の集合を [BLOCK] と呼ぶ。第 i [CHAIN] を考えると、このときの各 [BLOCK] 毎の $K'_{ij;km}$ の総数は

第1 [BLOCK] : $j=1, k=i$ で $N_\phi \cdot N + 1$ 個

第2 [BLOCK] : $j=1, k=i+1$ で $N_\phi \cdot N + 1$ 個

第3 [BLOCK] : $j=1, k=i+2$ で $N_\phi \cdot N + 1$ 個

⋮

最終 [BLOCK] : $j=1, k=M$ で $N_\phi \cdot N + 1$ 個

であり、したがって、第 i [CHAIN] は $(M-i+1)$ 個の [BLOCK] を持つことになる。これを配列の形で図示すると Fig. 2.13 のようになる。

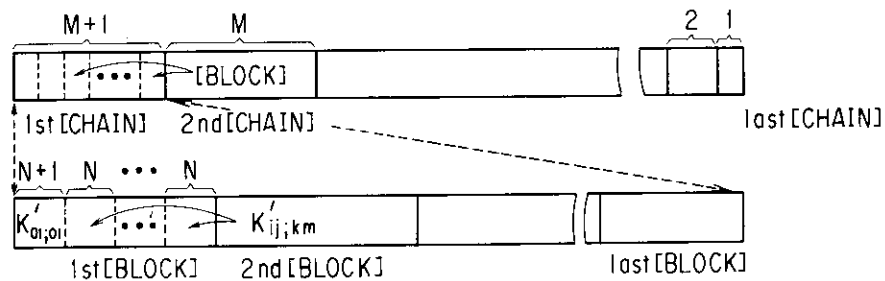


Fig. 2.13 Description of [CHAIN] and [BLOCK] for the array $K'_{ij;km}$. The [CHAIN] is a set of [BLOCK] and the [BLOCK] is a set of $N_\phi \cdot N + 1$ inductances $K'_{ij;km}$ for fixed i, j and k and not fixed m .

一般のインダクタンス $K_{ij;km}$ は、生成元である 1 次独立なインダクタンス $K'_{ij;km}$ の第 i [CHAIN] の $(k-i+1)$ 番目の [BLOCK] の中から、 j, m の値により探し出すことになる。更に、トラス導体の対称性・周期性に基づき一般のインダクタンス $K_{ij;km}$ を縮約させるが、この $\bar{\Omega}_{km}$ についての縮約回数は最大 $2N_\phi$ 回である。以下に、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{km}$ の k を固定した l = 一定の有限要素回路列 $\{\bar{\Omega}_{km}\}$ を考え、この [BLOCK] 内における縮約の対象となるデータ $K'_{ij;km}$ を求める方法を説明する。この方法を Fig. 2.14 に示す。

まず、当該 [BLOCK] 内での縮約対象データの番地を計算するにあたり、次のように、 $\bar{\Omega}_{km}$ の ϕ 方向位置 m に関する 2 つの場合を考慮する必要があることがわかる。

- i) $m \neq 1$ かつ $m \neq N + 1$
- ii) $m = 1$ または $m = N + 1$

i) の場合の番地計算法

Fig. 2.14 に示すように、第 i [CHAIN]、 $(k-i+1)$ 番目の [BLOCK] の番地を探す方法を説明する。また、

Fig. 2.14 での縮約の対象となるデータの番号と当該 [BLOCK] における番地との対応を以下に示す。

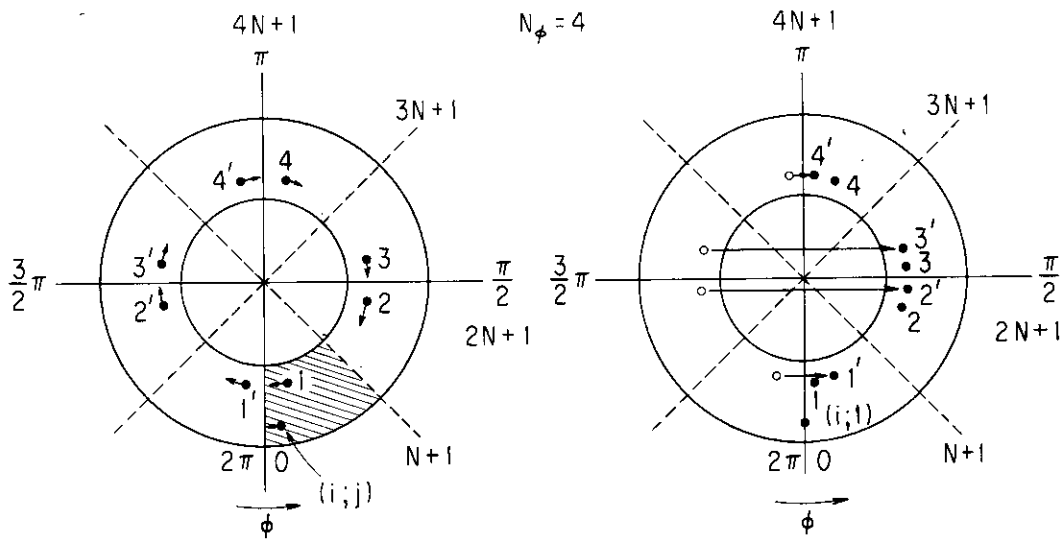


Fig. 2.14 Procedure looking for the address of [BLOCK] element $K_{ij, km}$ to be contracted by use of the symmetry and periodicity of the torus; The left figure represents the actual arrangement of finite element to be contracted. The right figure can be obtained by rotating the left figure in the ϕ -direction so as to superimpose the node $(i; j)$ over $(i; 1)$.

プログラム上の ループ変数	図上の対象 データ番号	[BLOCK] における番地
1	1	$0 \cdot N + IABS(M - J) + 1$
	1'	$0 \cdot N + M + J + 1$
2	2	$2 \cdot N + 1 - (M - 1) - J + 1$
	2'	$2 \cdot N + 1 - (M - 1) + J - 1$
3	3	$2 \cdot N + 1 - (M - 1) - J + 1$
	3'	$2 \cdot N + 1 - (M - 1) + J - 1$
4	4	$4 \cdot N + 1 - (M - 1) - J + 1$
	4'	$4 \cdot N + 1 - (M - 1) + J - 1$
5 ⋮ N_ϕ	⋮	⋮

ただし、[BLOCK]での計算番地が N_{max} を越えた場合は、求める番地は $N_{max} - ([BLOCK] \text{ における番地})$ である。これはループ変数が N_ϕ であって、Fig. 2.14 に示される対象データ番号が N_ϕ のときに起こり得る。

ii) の場合の番地計算法

Fig.2.15 に示すように、i)の場合と同様にして

プログラム上の ループ変数	図上の対象 データ番号	[BLOCK] における番地
1	1	$0 \cdot N + 1 + IABS(M - J)$
2	1'	$2 \cdot N + 1 - IABS(M - J)$
3	2	$2 \cdot N + 1 + IABS(M - J)$
4	2'	$4 \cdot N + 1 - IABS(M - J)$
5 ⋮ N_ϕ	⋮ ⋮ ⋮	⋮ ⋮ ⋮

のように [BLOCK] における番地が求められる。この場合、和をとるべき対象データは N_ϕ 個である。

以上の結果、 $0 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N + 1$ の有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と、 $0 \leq k \leq M, 1 \leq m \leq N + 1$ の有限要素回路 $\bar{\Omega}_{km}$ に対する縮約されたインダクタンス $K_{ij;km}$ が得られた。更に、トーラス導体がポート穴や電気的絶縁を有する場合は、ここで得られたインダクタンス $K_{ij;km}$ および抵抗 $R_{ij;km}$ を、2.1 節で述べた手法にしたがい適当な 1 次変換を用いて縮約させることができる。また電流関数が定数の任意性を有することから、電流関数のパリティに関係なく常に $K_{0l;km}$ および $R_{0l;km}$ を零と置くことができる。

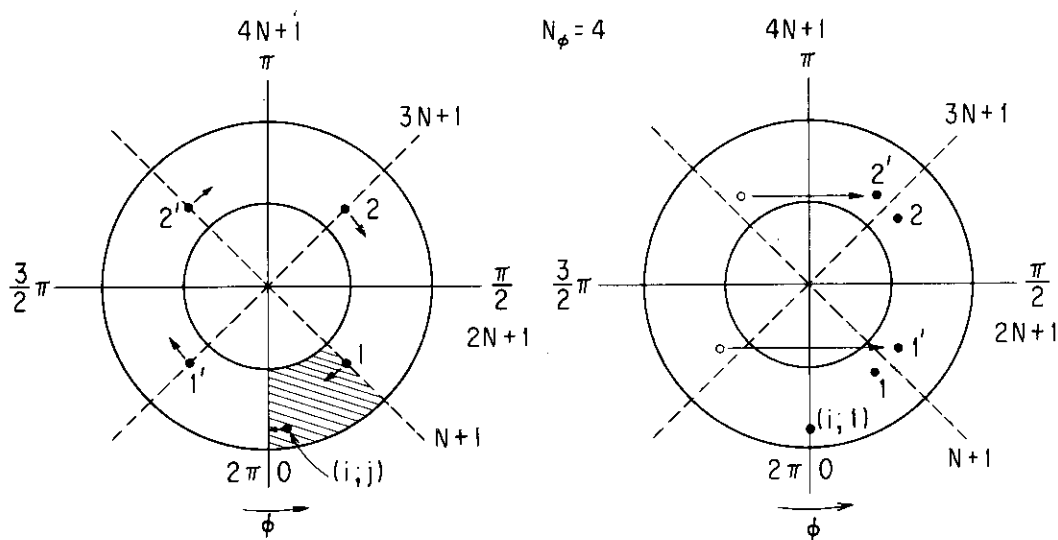


Fig. 2.15 Procedure looking for the address of [BLOCK] element $K'_{ij;km}$ to be contracted by use of the symmetry and periodicity of the torus. Here, the finite element circuit $\bar{\Omega}_{km}$ lies on boundaries as $\phi = n\pi/N_\phi$ ($n=1, 3, \dots$). The right figure can be obtained by rotating the left figure in the same manner as Fig. 2.14.

2.2.3 トーラス導体間相互の磁気結合

ここでは、複合トーラス導体系でのトーラス導体間相互の磁気結合を求める。トーラス導体は互いに交わることがないため、抵抗による互いの結合は存在しない。いま、先の説明で示したように、個々のトーラス導体のインダクタンス行列 $\{M\}$ 、抵抗行列 $\{R\}$ を計算し、(2.33) 式の一般化固有値問題を全てのトーラス導体毎について解き、 N_t 組の固有関数基底が得られたとする。この固有関数基底で表現される複合トーラス導体系の渦電流問題で

は、異なるトーラス導体間相互のモード間結合が磁気的結合を介して存在する。このとき、複合トーラス導体系の抵抗行列は単位行列となっている。このときのインダクタンス行列の構造を Fig. 2.16 に示す。対角ブロック行列は、インダクタンス行列がトーラス導体毎の固有関数に対して表現されているため、対角行列となっている。非対角ブロック行列がここで求めようとするモード間結合である。

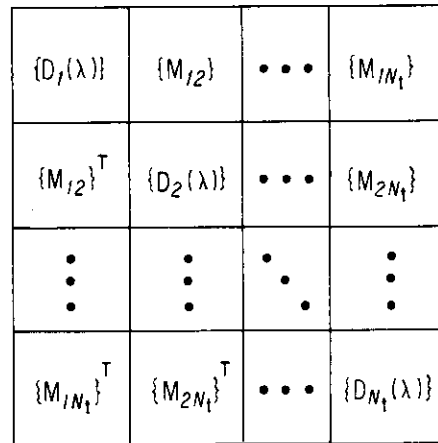


Fig. 2.16 Structure of the inductance matrix for the multi-torus system. The $\{D_N(\lambda)\}$ denotes the diagonal matrix with the eigenvalue λ of eigen mode on the torus conductor S_N . The $\{M_{NN'}\}$ means a submatrix of mutual inductance between the eigen modes on the tori S_N and $S_{N'}$.

モード間結合は基本的には (2.23)式を用いて計算されるが、いまの場合、電流関数は局所基底ではなく該当する固有関数基底をとる必要があり、2重表面積分をそれぞれのトーラス導体の全領域にわたり実施しなければならない。このため、今後のモード間結合の計算に対しては、Fig. 2.17 のような有限要素 Ω_{ij} を考える。 $\Delta M_{nn'}(\Omega; \Omega')$ をトーラス導体 S_N の有限要素 Ω_{ij} に関する第 n 固有関数基底およびトーラス導体 $S_{N'}$ の有限要素 Ω'_{km} に関する第 n' 固有関数基底に対する部分的インダクタンスとする。このとき、求める第 n モードと第 n' モードのモード間結合 $M_{nn'}$ は

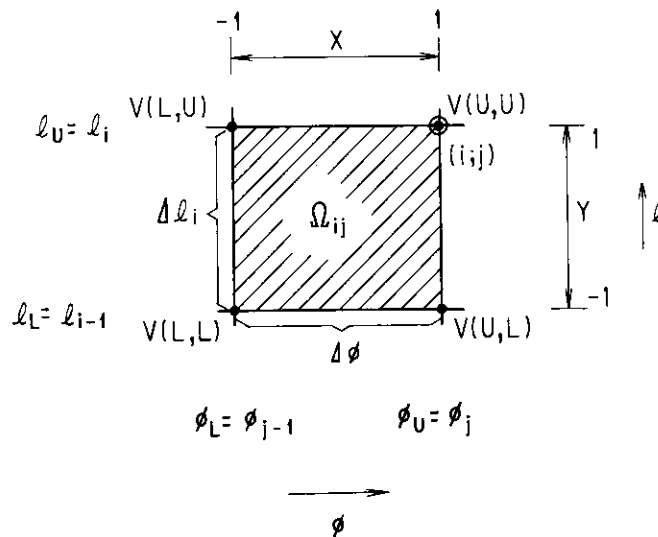


Fig. 2.17 Finite element Ω_{ij} corresponding to the node $(i; j)$, the nodal value $V(\sigma, \mu)$ of current function at the vertex (σ, μ) , and the local coordinate (X, Y) . Here, $\sigma=L, U; \mu=L, U$ and $-1 \leq X \leq 1; -1 \leq Y \leq 1$.

$$M_{nn'} = \sum_{\Omega_i} \sum_{\Omega_{m'}} \Delta M_{nn'}(\Omega; \Omega'), \quad (2.65)$$

のように、トラス導体 S_N と $S_{N'}$ の全領域にわたる有限要素についての総和となる。Fig. 2.17 に示すように、有限要素 Ω_{ij} において電流関数 $V(\phi, \ell)$ が Ω_{ij} の4つの節点量 $V(\sigma, \mu)$ ($\sigma=L, U; \mu=L, U$) を用いて

$$V(\phi, \ell) = \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{L, U, L, U} P(\sigma) Q(\mu) V(\sigma, \mu), \quad (2.66)$$

と表わすことができるとする。ここで、 $P(\sigma)$ および $Q(\mu)$ は共に $[0, 1]$ の間に値を持つ区分的1次関数で、それぞれ、

$$P(\sigma) = \frac{1 + \varepsilon(\sigma)X}{2}, \quad Q(\mu) = \frac{-1 + \varepsilon(\mu)Y}{2}, \quad (2.67)$$

ただし、

$$X = \frac{2}{\Delta\phi}(\phi - \phi_L) - 1, \quad Y = \frac{2}{\Delta\ell}(\ell - \ell_L) - 1, \quad (2.68)$$

である。 X および Y は、それぞれ ϕ 方向および ℓ 方向の有限要素 Ω_{ij} における局所座標で、共に $[-1, 1]$ の間に値を持つ。内挿関数 $P(\sigma)$ および $Q(\mu)$ は、局所基底に対する形状関数(2.64)式など、いままでの説明で用いた有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ において定義されている同じ記号で表現されている区分的1次関数(2.18)式とその符号が異なっていることに注意されたい。

インダクタンスの(2.23)式をトラス導体系に適用し、被積分関数の a_n をトラス導体 S_N 上の固有関数 $V(\phi, \ell)$ で置き換えると、 V に関する微分 $\partial V / \partial \ell$, $\partial V / \partial \phi$ は(2.66)式を用いて

$$\frac{\partial V}{\partial \ell} = \frac{1}{\Delta\ell} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{L, U, L, U} \varepsilon(\mu) P(\sigma) V(\sigma, \mu), \quad \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{1}{\Delta\phi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{L, U, L, U} \varepsilon(\sigma) Q(\mu) V(\sigma, \mu), \quad (2.69)$$

となる。したがって、モード n とモード n' の間の部分的インダクタンスは、

$$\begin{aligned} \Delta M_{nn'}(\Omega; \Omega') = & \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma_1} \sum_{\mu_1}^{L, U, L, U} \sum_{\sigma_2} \sum_{\mu_2}^{L, U, L, U} \{ \varepsilon(\mu_1) \varepsilon(\mu_2) \alpha_{\sigma_1 \sigma_2} + \varepsilon(\mu_1) \varepsilon(\sigma_2) \beta_{\sigma_1 \mu_2} \\ & + \varepsilon(\sigma_1) \varepsilon(\mu_2) \gamma_{\mu_1 \sigma_2} + \varepsilon(\sigma_1) \varepsilon(\sigma_2) \delta_{\mu_1 \mu_2} \} V_n(\sigma_1, \mu_1) V_{n'}(\sigma_2, \mu_2), \end{aligned} \quad (2.70)$$

となる。 $\alpha_{\sigma_1 \sigma_2}$, $\beta_{\sigma_1 \mu_2}$, $\gamma_{\mu_1 \sigma_2}$, $\delta_{\mu_1 \mu_2}$ はモードに依存しない系の幾何学的配置のみで決まる形状関数で、(2.51)式と同様の形式により与えられる。ただし、このとき $P(\sigma)$ および $Q(\mu)$ は(2.67)式を用いる必要がある。(2.70)式は以下の意味で重要な意味を持つ。すなわち、一般にモード間結合はモードの組毎に(2.23)式と同様の4重積分を行うことにより得られるが、この4重積分を実際に数値計算するには多大な計算時間と記憶領域が必要で、問題によっては実行が不可能となることが考えられる。この点、(2.70)式の意味するところは、モードの組に関係なく形状関数を一度計算しておきさえすれば、他は全てのモードの組に対して、既に得た形状関数を利用し、固有関数との単純な1次結合により、系のインダクタンスを全て容易に得ることができる。このように形状関数を導入することにより、複合トラス導体系における大規模な渦電流問題の数値解析を実行することが可能となる。

また、トラス導体毎に与えられた固有関数基底によって複合トラス導体系の渦電流問題を表現した場合、抵抗行列 $\{R\}$ が形式上単位行列で与えられる。更に、このときの電流ベクトルの要素を互いに適当に入れ換えることにより、容易に(2.46)式のような回路方程式に書き換えることができる。このとき、2.1節の次元縮小の説明にしたがって、もし全体として主要でない渦電流のクラスを見い出すことができれば、近似の日安を明確にした上での次元縮小が可能となる。個々のトラス導体では比較的小規模の計算であっても、複合トラス導体系全体としては大規模なものとなるのが一般の渦電流解析においては、この次元縮小は数値解析上の必要不可欠な手

続きであるといえる。

先に述べたように、モード間結合は、(2.70)式を用いトーラス導体の全領域にわたり計算を行う必要があり、このための形状関数を求めなければならない。しかしながら、いま有限要素分割が ϕ 方向に等分割されていること、および系には幾何学的配置の対称性・周期性があるため、手間のかかる形状関数の計算を最小限にすることができる。次に、この1次独立な形状関数を求める方法、およびこれを生成元とし系全体の形状関数を求める方法について説明する。最後に、系の幾何学的性質やパリティに基づくこれら形状関数の縮約法について述べる。

(A) 1次独立な形状関数

ここでは、モード間結合の計算に必要な形状関数 $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}$, $\beta_{\sigma_1\mu_2}$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}$, $\delta_{\mu_1\mu_2}$ を求めるが、対となる2つのトーラス導体 S_N , $S_{N'}$ がそれぞれ ϕ 方向に等分割されていることを利用して、必要最小限の1次独立な積分領域を見付ける方法について述べる。これにより、多大な計算時間と記憶領域が必要な2重表面積分を経済的に実行することができる。いま、各トーラス導体毎に有限要素 Ω_j の i を固定した l =一定の帯状有限要素列 $\{\Omega\}$ をFig. 2.18のようにとり、有限要素対 $(\Omega; \Omega')$ を考える。このとき、 $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ 内でトーラス導体 S_N と $S_{N'}$ の有限要素の ϕ 方向メッシュ座標が一致することがある。また、 $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ で、それぞれのトーラス導体の有限要素数に対して、1以上の自然数に関する最大公約数が必ず存在する。実際、 $\phi = \pi/N_\phi$ では、トーラス導体 S_N と $S_{N'}$ の有限要素の ϕ 方向メッシュ座標は必ず一致している。この有限要素メッシュ座標が一致する ϕ を ϕ^* とする。すると、トーラス導体 S_N 上の有限要素列 $\{\Omega\}$ の1次独立な積分領域については、明らかに $0 \leq \phi \leq \phi^*$ に制限して考えればよい。 $\phi^* \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ については、 $0 \leq \phi \leq \phi^*$ に対して得られた形状関数を有限要素 Ω と Ω' の相対位置を考慮し、 ϕ 方向に適当に回転させこれを流用すればよい。更に、Fig. 2.18に示すように、 $\phi = \phi^*/2$ は或る有限要素対

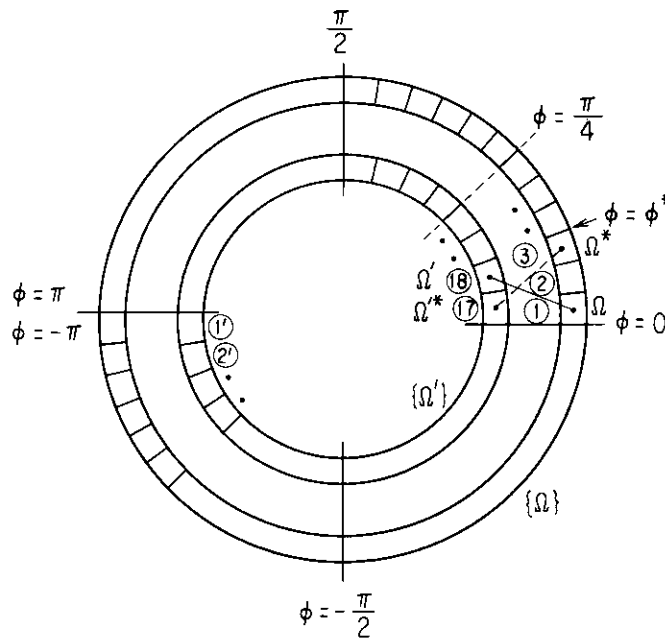


Fig. 2.18 Arrangement of finite element series $\{\Omega\}$ and $\{\Omega'\}$: the finite element Ω on the torus S_N and the finite element Ω' on the torus $S_{N'}$; $N_\phi=4$, $N=6$, $N'=4$. At $\phi=\phi^*$, the ϕ -coordinates of finite elements, Ω and Ω' , coincide each other. Since S_N and $S_{N'}$ are, respectively, divided into finite elements with equal ϕ -meshes as $\Delta\phi$ and $\Delta\phi'$, the finite elements Ω and Ω^* on the torus S_N are symmetrically arranged with respect to $\phi=\phi^*/2$ as well as Ω' and Ω'^* on the torus $S_{N'}$.

$(\Omega; \Omega')$ に対して、その重なりも含め折り返し対称な配置となるもう 1 組の有限要素対 $(\Omega^*; \Omega'^*)$ を伴なう。この折り返し対称な有限要素対に対する形状関数を、 $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}^*$ 、 $\beta_{\sigma_1\mu_2}^*$ 、 $\gamma_{\mu_1\sigma_2}^*$ 、および $\delta_{\mu_1\mu_2}^*$ とする。このとき、形状関数を与える (2.51) 式は、第 1 式と第 4 式が ϕ と ϕ' に対する ϕ 方向の先行関係の逆転に関して不変であり、第 2 式と第 3 式がこの先行関係の逆転に関して符号が反転することから

$$\alpha_{\sigma_1\sigma_2}^* = \alpha_{\sigma_1^*\sigma_2^*}, \quad \beta_{\sigma_1\mu_2}^* = -\beta_{\sigma_1^*\mu_2^*}, \quad \gamma_{\mu_1\sigma_2}^* = -\gamma_{\mu_1^*\sigma_2^*}, \quad \delta_{\mu_1\mu_2}^* = \delta_{\mu_1^*\mu_2^*} \quad (2.71)$$

となることがわかる。ここで、 $\sigma^* = L$ ($\sigma = U$ のとき)、 $\sigma^* = U$ ($\sigma = L$ のとき) と定義した。以上述べたことから、1 次独立な形状関数としては、トーラス導体 S_N 上の有限要素列 $\{\Omega\}$ については $0 \leq \phi \leq \phi^*/2$ 内にある有限要素 Ω の各々に対して、一方トーラス導体 $S_{N'}$ 上の有限要素列 $\{\Omega'\}$ についてはこれより ϕ 方向に先行する位置を占める $N_\phi \cdot N'$ 個の有限要素 Ω' に対するものを考えれば充分であると結論できる。このようにして有限要素対 $(\Omega; \Omega')$ に対する 1 次独立な形状関数が求まれば、その後折り返し対称な有限要素対 $(\Omega^*; \Omega'^*)$ に対しては、数値積分を行わずに (2.71) 式を用い単に符号を考慮するだけで全ての形状関数が求まる。

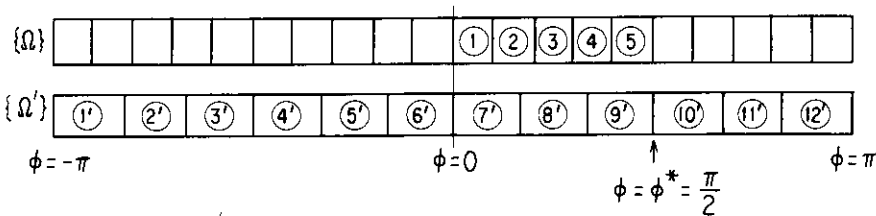


Fig. 2.19 Example of the ϕ -directional arrangement of finite element series $\{\Omega\}$ and $\{\Omega'\}$: the finite element Ω on the torus S_N and the finite element Ω' on the torus $S_{N'}$; $N_\phi = 2$, $N = 5$, $N' = 3$. ① indicates the mesh number of Ω and ① that of Ω' .

以上の手続きを、Fig. 2.19 に示すように、トーラス導体 S_N と $S_{N'}$ の双方に対する $\ell =$ 一定の帯状有限要素列 $\{\Omega\}$ および $\{\Omega'\}$ を考え、具体的な例を用いて実行してみる。ここでは、 $N_\phi = 2$ で、トーラス導体 S_N の ϕ 方向分割 N を 5、トーラス導体 $S_{N'}$ の ϕ 方向分割 N' を 3 とする。 $0 \leq \phi \leq \pi/2$ 内に存在する $\{\Omega\}$ と $\{\Omega'\}$ の有限要素の数はそれぞれ $N = 5$ 、 $N' = 3$ であるから、先に定義した最大公約数を N_{ab} とすると $N_{ab} = 1$ で、 $\phi^* = \pi/2$ である。したがって、 $0 \leq \phi \leq \phi^*$ 内に存在する $\{\Omega\}$ と $\{\Omega'\}$ の有限要素の数をそれぞれ N_a と N_b とすると、 $N_a = 5$ および $N_b = 3$ である。更に、 $0 \leq \phi \leq \phi^*$ にある S_N の 5 つの有限要素 Ω の各々に対して、 $S_{N'}$ で ϕ 方向に先行する有限要素 Ω' の内最も Ω の ϕ 座標に近い要素番号を $N_\ell(j)$ ($j = 1, 2, \dots, 5$) とすると、

$$N_\ell(1) = 7, \quad N_\ell(2) = 8, \quad N_\ell(3) = 8, \quad N_\ell(4) = 9, \quad N_\ell(5) = 10,$$

であることがわかる。したがって、1 次独立な形状関数は次の有限要素対 $(\Omega; \Omega')$ に対して計算するだけでよい。すなわち、

Ω の ① に関して

$$(\textcircled{1}; \textcircled{7}), \quad (\textcircled{1}; \textcircled{8}), \quad (\textcircled{1}; \textcircled{9}), \quad (\textcircled{1}; \textcircled{10}), \quad (\textcircled{1}; \textcircled{11}), \quad (\textcircled{1}; \textcircled{12}),$$

Ω の ② に関して

$$(\textcircled{2}; \textcircled{8}), \quad (\textcircled{2}; \textcircled{9}), \quad (\textcircled{2}; \textcircled{10}), \quad (\textcircled{2}; \textcircled{11}), \quad (\textcircled{2}; \textcircled{12}), \quad (\textcircled{2}; \textcircled{1}),$$

Ω の ③ に関して

$$(\textcircled{3}; \textcircled{8}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{9}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{10}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{11}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{12}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{1}), \quad (\textcircled{3}; \textcircled{2}),$$

Ω の④に関して

$$(4; 9), (4; 10), (4; 11), (4; 12), (4; 1), (4; 2),$$

Ω の⑤に関して

$$(5; 10), (5; 1), (5; 2), (5; 1), (5; 2), (5; 3),$$

である。これらと折り返し対称な有限要素対 (Ω^* ; Ω'^*) との対応は、

Ω の①に関して Ω^* の⑤が対応し、それぞれ、

$$\begin{array}{cccccc} (1; 7) & (1; 8) & (1; 9) & (1; 10) & (1; 11) & (1; 12) \\ | & | & | & | & | & | \\ (5; 9) & (5; 8) & (5; 7) & (5; 6) & (5; 5) & (5; 4) \end{array}$$

Ω の②に関して Ω^* の④が対応し、それぞれ、

$$\begin{array}{cccccc} (2; 8) & (2; 9) & (2; 10) & (2; 11) & (2; 12) & (2; 1) \\ | & | & | & | & | & | \\ (4; 8) & (4; 7) & (4; 6) & (4; 5) & (4; 4) & (4; 3) \end{array}$$

Ω の③に関して Ω^* の③が対応し、それぞれ、

$$\begin{array}{cccccc} (3; 8) & (3; 9) & (3; 10) & (3; 11) & (3; 12) & (3; 1) & (3; 2) \\ | & | & | & | & | & | & | \\ (3; 7) & (3; 6) & (3; 5) & (3; 4) & (3; 3) & (3; 2) & (3; 1) \end{array}$$

Ω の④に関して Ω^* の②が対応し、それぞれ、

$$\begin{array}{cccccc} (4; 9) & (4; 10) & (4; 11) & (4; 12) & (4; 1) & (4; 2) \\ | & | & | & | & | & | \\ (2; 7) & (2; 6) & (2; 5) & (2; 4) & (2; 3) & (2; 2) \end{array}$$

Ω の⑤に関して Ω^* の①が対応し、それぞれ、

$$\begin{array}{cccccc} (5; 10) & (5; 11) & (5; 12) & (5; 1) & (5; 2) & (5; 3) \\ | & | & | & | & | & | \\ (1; 6) & (1; 5) & (1; 4) & (1; 3) & (1; 2) & (1; 1) \end{array}$$

のようになる。この例から明らかなように、折り返し対称な有限要素対 (Ω^* ; Ω'^*) の ϕ 方向番地を探すためには、次のマジック数を定義しておくとう便利である。

$$M_{ga} = N_a + 1, \quad M_{gb} = 2N_\phi N_b - N_b + 1. \tag{2.72}$$

この例については

$$M_{ga} = 6, \quad M_{gb} = 16,$$

である。

[B] 形状関数の縮約

(1) 電流関数のパリティに基づく縮約

Fig. 2.20 に示すように、トーラス導体 S_N 上の有限要素 Ω' に対し、これとトーラス赤道面に関して上下対称な位置にある有限要素 Ω'^* を考える。一般に、電流関数 V' は赤道面に関して odd かまたは even かどちらかのパリティを有しているため、有限要素対 (Ω ; Ω') と (Ω ; Ω'^*) に関する両者の形状関数の間には或る類似の関係が成り立つ。このとき、形状関数は、(2.67)式の内挿関数を用いて(2.51)式の形により与えられる。いま、 $\mu_2^* = L(\mu_2 = U$ のとき)、 $\mu_2^* = U(\mu_2 = L$ のとき) と置き、有限要素対 (Ω ; Ω'^*) に関する形状関数を $\alpha_{\sigma_1 \sigma_2}^*$ 、 $\beta_{\sigma_1 \mu_2}^*$ 、 $\gamma_{\mu_1 \sigma_2}^*$ および $\delta_{\mu_1 \mu_2}^*$ と置く。まず、これらの積分において、 Y_2 に関する積分の向きを逆転させ(2.70)式の総和に関する符号を考慮すると、 $\alpha_{\sigma_1 \sigma_2}^*$ 、 $\beta_{\sigma_1 \mu_2}^*$ 、 $\gamma_{\mu_1 \sigma_2}^*$ 、 $\delta_{\mu_1 \mu_2}^*$ は、形式上、 $-\alpha_{\sigma_1 \sigma_2}^*$ 、 $\beta_{\sigma_1 \mu_2}^*$ 、 $-\gamma_{\mu_1 \sigma_2}^*$ 、 $\delta_{\mu_1 \mu_2}^*$

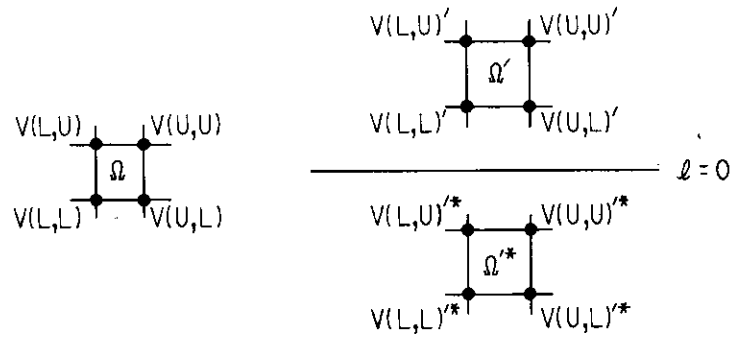


Fig. 2.20 Pairing finite elements (Ω ; Ω') and (Ω ; Ω'^*): Ω on the torus S_N and Ω' or Ω'^* on the torus $S_{N'}$. Ω' or Ω'^* are arranged symmetrically with respect to the equatorial plane. If the current function V' is odd, then $V(L, L)'^* = -V(L, U)'$, $V(L, U)'^* = -V(L, L)'$, $V(U, L)'^* = -V(U, U)'$ and $V(U, U)'^* = -V(U, L)'$. On the other hand, if V' is even, then $V(L, L)'^* = V(L, U)'$, $V(L, U)'^* = V(L, L)'$, $V(U, L)'^* = V(U, U)'$ and $V(U, U)'^* = V(U, L)'$.

となる。更に、 Ω' と Ω'^* の各積分点で $(dr/d\ell)_2^* = -(dr/d\ell)_2$ の関係があること、更に、これと電流関数のパリティによって符号が異なることから、トーラス導体 $S_{N'}$ 上の2つの有限要素 Ω' と Ω'^* について和をとったときの形状関数を改めて $\alpha'_{\sigma_1\sigma_2}$, $\beta_{\sigma_1\mu_2}$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}$, $\delta_{\mu_1\mu_2}$ と書けば、

$$\begin{aligned}
 \alpha'_{\sigma_1\sigma_2} &= \frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho_{12}} - \frac{1}{\rho_{12}^*} \right) r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \\
 &\quad P(\sigma_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \beta_{\sigma_1\mu_2} &= \frac{\Delta\phi\Delta\ell'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho_{12}} \pm \frac{1}{\rho_{12}^*} \right) r_1 \sin(\phi_2 - \phi_1) \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \\
 &\quad P(\sigma_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \gamma_{\mu_1\sigma_2} &= \frac{\Delta\ell_i\Delta\phi'}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho_{12}} \pm \frac{1}{\rho_{12}^*} \right) r_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \\
 &\quad Q(\mu_1) P(\sigma_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2, \\
 \delta_{\mu_1\mu_2} &= \frac{\Delta\ell_i\Delta\ell'_i}{2^4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(\frac{1}{\rho_{12}} \pm \frac{1}{\rho_{12}^*} \right) \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{1}{\rho_{12}} \pm \frac{1}{\rho_{12}^*} \right) \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_2 \right\} Q(\mu_1) Q(\mu_2) dX_1 dY_1 dX_2 dY_2,
 \end{aligned} \tag{2.73}$$

となる。(2.73)式中の複号は電流関数の odd と even のパリティに関して同順であり、 $\rho_{12}^{*2} = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + (z_1 + z_2)^2$ である。

(2) 電流関数の ϕ 方向の周期性・対称性に基づく縮約

電流関数は本来 ϕ 方向に或る周期性と対称性を有しているため、このことを利用し形状関数を縮約させることができる。有限要素対(Ω ; Ω')に関する形状関数を考え、トーラス導体 S_N の固定した有限要素 Ω に対して、トーラス導体 $S_{N'}$ の或る有限要素 Ω' を含む l —一定の位置にある帯状の有限要素列 $\{\Omega'\}$ を考える。更に、Fig. 2.21 に示すように、電流関数の周期性または対称性に基づく縮約対象となる有限要素列 $\{\Omega'\}$ の有限要素を、それぞれ Ω' または Ω'^* とする。明らかに、 ϕ 方向の周期性に基づく縮約については、この条件を満たす全ての有限要素対(Ω ; Ω')の形状関数に対し、それぞれの単純な和をとればよい。

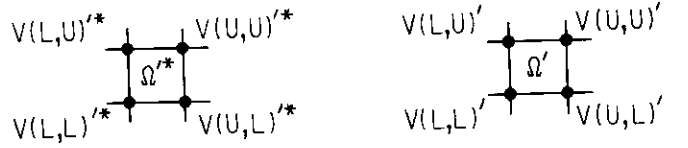


Fig. 2.21 Finite elements Ω' and Ω'^* on the torus S_N . Ω' is the finite element to be reduced by use of the periodicity and Ω'^* by use of the symmetry along the ϕ -direction. Here, $V(L, L)^* = V(U, L)'$, $V(L, U)^* = V(U, U)'$, $V(U, L)^* = V(L, L)'$ and $V(U, U)^* = V(L, U)'$.

ϕ 方向の対称性に基づく縮約については、有限要素 Ω' と Ω'^* の電流関数が、Fig. 2.21 のように、 $V(L, L)^* = V(U, L)'$, $V(L, U)^* = V(U, U)'$, $V(U, L)^* = V(L, L)'$, $V(U, U)^* = V(L, U)'$ の関係を持つことを考慮し以下のように処理する。まず、 Ω' と Ω'^* に関する X_2 の積分の向きを互いに逆転させる。いま、有限要素対 $(\Omega; \Omega'^*)$ についての形状関係を $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}^*$, $\beta_{\sigma_1\mu_2}^*$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}^*$, $\delta_{\mu_1\mu_2}^*$ と置くと、この積分の向きの逆転の結果、(2.70) 式の部分的インダクタンスにおける第 2 項および第 4 項の符号が反転する。したがって、(2.67) 式の内挿関数を用いた(2.51)式の形の形状関数は、 $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}^*$, $-\beta_{\sigma_1\mu_2}^*$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}^*$, $-\delta_{\mu_1\mu_2}^*$ のように書き換えられる。ここで、 $\sigma^* = L(\sigma = U$ のとき), $\sigma^* = U(\sigma = L$ のとき) と定義した。以上述べたことから、周期的な有限要素 Ω' と対称的な有限要素 Ω'^* との縮約を考慮して、 Ω' と Ω'^* 双方に関する形状関数を新たに $\alpha_{\sigma_1\sigma_2}$, $\beta_{\sigma_1\mu_2}$, $\gamma_{\mu_1\sigma_2}$, $\delta_{\mu_1\mu_2}$ と書けば、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\sigma_1\sigma_2} &= \alpha_{\sigma_1\sigma_2}^* + \alpha_{\sigma_1\sigma_2}^{* *}, & \beta_{\sigma_1\mu_2} &= \beta_{\sigma_1\mu_2}^* - \beta_{\sigma_1\mu_2}^{* *}, \\ \gamma_{\mu_1\sigma_2} &= \gamma_{\mu_1\sigma_2}^* + \gamma_{\mu_1\sigma_2}^{* *}, & \delta_{\mu_1\mu_2} &= \delta_{\mu_1\mu_2}^* - \delta_{\mu_1\mu_2}^{* *}, \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

となる。ここで、各式における右辺の第 1 項は周期性に基づく縮約対象である有限要素対 $(\Omega; \Omega')$ に関する形状関数であり、第 2 項は対称性に基づく縮約対象である有限要素対 $(\Omega; \Omega'^*)$ の形状関数であることに注意されたい。

2.2.4 複合トーラス導体系の渦電流解析

先の一連の議論により、次元縮小された固有関数基底に対する複合トーラス導体系のインダクタンス $\{M^*\} \in R^{\Sigma N^* \times \Sigma N^*}$ が得られる。ただし、 ΣN^* は考慮している複合トーラス導体系の縮小された次元である。このとき、複合トーラス導体系の抵抗は ΣN^* 次の単位行列であるため、次の固有値問題を考えることができる。

$$\{M^*\}X = \{D(\lambda)\}X. \quad (2.75)$$

ただし、 $\{D(\lambda)\} \in R^{\Sigma N^* \times \Sigma N^*}$ は、固有値 λ を対角要素とする対角行列である。ここで以下の説明のために、各種行列のサイズを与える記号を要約する。 N_N をトーラス導体系 $S_N (N = 1, 2, \dots, N_t)$ 上の 1 次独立な節点の数とする。次元縮小前の固有関数基底の数は、当該トーラス導体系 S_N の 1 次独立な節点の数に等しく、次元縮小前の複合トーラス導体系における全固有関数基底の数を ΣN とすると $\Sigma N = \sum_N N_N$ が成り立つ。 \sum_N は全トーラス導体系についての総和を表わす。更に、 N_N^* をトーラス導体系 S_N に対して得られた次元縮小後の固有関数基底の数とする。次元縮小後の複合トーラス導体系における全固有関数基底の数を ΣN^* とすると $\Sigma N^* = \sum_N N_N^*$ が成り立つ。

固有値問題(2.75)式を解いて、ジュール損失に対して規格化されたモード行列 $\{W\} \in R^{\Sigma N^* \times \Sigma N^*}$ が得られたと

する。このモード行列の列ベクトルは、固有値問題(2.75)式の解固有ベクトルにより構成されている。有限要素分割されたトラス導体系上の1次独立な各節点において与えられる複合トラス導体系全体における固有ベクトルは、以下の手続きにより得られる。まず2.1節の説明にしたがって、トラス導体系毎に一般化固有値問題(2.33)式を解き、導体間相互の磁氣的結合を無視した場合の固有関数基底 $\{\Phi\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N^*}$ を得たとする。ただし、次元縮小により無視されるべきモードの列ベクトルは取り除いてあるとする。 $\{\Phi_N\} \in R^{N_N \times N_N^*}$ をトラス導体系 S_N に関するこのモード行列とすると、このとき、 $\{\Phi\}$ は

$$\{\Phi\} = \left\{ \begin{array}{ccc} \{\Phi_1\} & & \\ & \mathbf{0} & \\ & \{\Phi_2\} & \\ & & \ddots \\ \mathbf{0} & & \{\Phi_N\} \end{array} \right\}, \quad (2.76)$$

と表わすことができる。更に、固有値問題(2.75)式のモード行列 $\{\Psi\}$ を、トラス導体系毎に対する部分モード行列 $\{\Psi_N\} \in R^{N_N^* \times \Sigma N^*}$ で定義される行列を用いて

$$\{\Psi\} = \left\{ \begin{array}{c} \{\Psi_1\} \\ \{\Psi_2\} \\ \vdots \\ \{\Psi_N\} \end{array} \right\}, \quad (2.77)$$

のように分解して表わす。一般に或る基底に対して相似変換 $\{\Phi\}$ を施し、その後更に別の相似変換 $\{\Psi\}$ を施した結果は、 $\{\bar{\Phi}\} = \{\Phi\} \{\Psi\}$ で与えられる相似変換 $\{\bar{\Phi}\}$ を元の基底に対して施したものに等しい。したがって、複合トラス導体系における全節点上の固有ベクトル $V \in R^{\Sigma N}$ は、この行列 $\{\bar{\Phi}\} \in R^{\Sigma N \times \Sigma N^*}$

$$\{\bar{\Phi}\} = \{\Phi\} \{\Psi\}, \quad (2.78)$$

の各列ベクトルにより与えられる。すなわち、(2.76)式および(2.77)式から、トラス導体系 S_N 上の節点に対して、複合トラス導体系のモード行列 $\{\Phi_N\} \in R^{N_N \times \Sigma N^*}$ が

$$\{\bar{\Phi}_N\} = \{\Phi_N\} \{\Psi_N\}, \quad (2.79)$$

と与えられることがわかる。これにより、複合トラス導体系全体で互いに直交する渦電流モードの組が全て得られ、それぞれのモードに対してトラス導体系上の全節点の固有ベクトルが具体的に与えられた。各モードの外部起電力による時間応答は、(2.35)式によってモード毎の外部起電力を算出し、(2.36)式を用いてモード毎に別々に求めればよい。

複合トラス導体系は、一般にトラス導体系群に加えて軸対称の外部コイルを含むことが多い。そこで、以下に軸対称外部コイルを導入し、これに対する定式化を行うこととする。 N_c 個の軸対称外部コイルを考え、それぞれがトラス導体系と同じく系の赤道面に関して上下対称な幾何学的配置を有するものとする。このため、トラス導体系の電流関数と同様に odd かまたは even かのパリティをこのコイルに対しても定義することができ、軸対称外部コイルを含む複合トラス導体系の渦電流問題の場合においてもそれぞれのパリティ毎に問題を個別に取り扱うことができる。

便宜上 M 個のトラス導体系上の互いに直交する渦電流固有モードを考え、これと N_c 個の軸対称外部コイルを考える。回路方程式(2.32)式のインダクタンス $\{M\} \in R^{(M+N_c) \times (M+N_c)}$ および抵抗 $\{R\} \in R^{(M+N_c) \times (M+N_c)}$ を、それぞれ、

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & m_{11} & \cdots & m_{1N_c} \\ \mathbf{0} & \ddots & \vdots & & \vdots \\ & & \lambda_M & m_{M1} & \cdots & m_{MN_c} \\ & & & L_1 & \cdots & M_{1N_c} \\ \text{Sym.} & & & \text{Sym.} & & \vdots \\ & & & & & L_{N_c} \end{Bmatrix}, \quad (2.80)$$

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} 1 & & & & \mathbf{0} \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & \\ & & & R_1 & \\ \mathbf{0} & & & & \ddots \\ & & & & & R_{N_c} \end{Bmatrix}, \quad (2.81)$$

とおく。 λ_m はトーラス導体上の第 m 渦電流固有モードの固有値、 m_{mn} はトーラス導体上の第 m 渦電流固有モードと第 n 軸対称外部コイルとの間の相互インダクタンスである。 $M_{nn'}$ は第 n および第 n' 軸対称外部コイル間の相互インダクタンス、 L_n は第 n 軸対称外部コイルの自己インダクタンス、 R_n は同じく抵抗である。軸対称外部コイルを含む複合トーラス導体系の渦電流固有モード解析を行うため、固有値問題

$$\{\overline{M}\} \mathbf{X} = \{D(\tau)\} \mathbf{X}, \quad (2.82)$$

を解くことにする。ここで、 $\{\overline{M}\} = \{R\}^{-1/2} \{M\} \{R\}^{-1/2}$ であり、 $\{R\}^{-1/2}$ は $\{R\}$ が (2.81) 式のようにすでに直交しているため容易に得ることができる。(2.82) 式の固有値問題に対する規格化されたモード行列を $\{\Psi\} \in R^{(M+N_c) \times (M+N_c)}$ とすると、軸対称外部コイルを含む第 k 渦電流固有ベクトルは、 $\{R\}^{-1/2} \{\Psi\} \in R^{(M+N_c) \times (M+N_c)}$ の第 k 列ベクトルにより与えられる。

インダクタンスおよび抵抗が、それぞれ (2.80) 式および (2.81) 式で与えられる回路方程式 (2.32) 式における外部起電力 $\mathbf{E} \in R^{M+N_c}$ については、以下のように求める。外部磁場による第 m 電流成分に対する外部起電力を E_m^{ex} ($m = 1, 2, \dots, M, \dots, M+N_c$) とし、軸対称外部コイルの内部起電力を E_n^{in} ($n = 1, 2, \dots, N_c$) とする。全体の外部起電力は $\mathbf{E} = (E_1^{\text{ex}}, E_2^{\text{ex}}, \dots, E_M^{\text{ex}}, E_{M+1}^{\text{ex}} + E_1^{\text{in}}, E_{M+2}^{\text{ex}} + E_2^{\text{in}}, \dots, E_{M+N_c}^{\text{ex}} + E_{N_c}^{\text{in}})^T$ である。このとき、(2.82) 式の固有値問題を解いて得た軸対称外部コイルを含む複合トーラス導体系における各モードの外部起電力 $\mathbf{E}' \in R^{M+N_c}$ は、2.1 節 (2.35) 式の起電力についてのモード変換と同様にして

$$\mathbf{E}' = \{\Psi\}^T \{R\}^{-1/2} \mathbf{E}, \quad (2.83)$$

となる。軸対称外部コイルの内部起電力 E_n^{in} は、課せられる計算条件により一意的に与えられるべきものであり、外部磁場による軸対称外部コイルの起電力 E_m^{ex} ($m = M+1, M+2, \dots, M+N_c$) は、通常の過渡的電気回路理論でよく知られる軸対称コイルと外部磁場との相互作用として容易に定式化できる。一般に、トーラス導体に対する外部起電力は、電流関数が局所基底で表わされている場合、(2.30)、(2.31) 式のように与えられる。いまの場合、トーラス導体上の M 個の固有関数基底に対して外部起電力 E_m^{ex} ($m = 1, 2, \dots, M$) が与えられることから、2.1 節 (2.35) 式のモード変換を先の局所基底による外部起電力に対して施し、ただちに得ることができる。しかしながらここでは、トーラス導体の固有関数基底が既に得られているから、軸対称な磁場 A_ϕ の下で積分

$$E_m^{\text{ex}} = 4N_\phi \int_0^{k^+} r A_\phi \int_0^{\frac{\pi}{N_c}} \frac{\partial V_m}{\partial \ell} d\phi d\ell, \quad (m = 1, 2, \dots, M), \quad (2.84)$$

により直接求めることができる。ここで、 $V_m(\phi, \ell)$ はトーラス導体上の固有関数であり、トーラス導体が Fig. 2.17 のような有限要素で分割されたとき、その有限要素内で(2.66)式のように4つの節点量 $V_m(\sigma, \mu)$ ($\sigma=L, U; \mu=L, U$) を用いて表わされる。このため、 $\partial V_m/\partial \ell$ は、(2.69)式によりこれらの節点量を用いてただちに与えられる。(2.84)式の ℓ 方向積分を $\ell_{i-1} \leq \ell \leq \ell_i$ に制限し、この ℓ =一定の帯状有限要素列 $\{\Omega\}$ に対する部分起電力を $\Delta_i E_m^{\text{ex}}$ のように表わすと、

$$\Delta_i E_m^{\text{ex}} = \frac{4N_\phi \Delta\phi}{\Delta\ell_i} \left\{ \sum_\sigma V_m(\sigma, U) - \sum_\sigma V_m(\sigma, L) \right\} \int_{\ell_{i-1}}^{\ell_i} r A_\phi d\ell, \quad (2.85)$$

となることが容易にわかる。ここで、 \sum_σ は固定された i の有限要素 Ω_i を含む有限要素列 $\{\Omega\}$ に関する $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ の ϕ 方向領域についての総和で、

$$\left. \begin{aligned} \sum_\sigma V_m(\sigma, U) &= \frac{1}{2} V_m(0, \ell_i) + V_m(\Delta\phi, \ell_i) + \dots + V_m\left(\frac{\pi}{N_\phi} - \Delta\phi, \ell_i\right) + \frac{1}{2} V_m\left(\frac{\pi}{N_\phi}, \ell_i\right), \\ \sum_\sigma V_m(\sigma, L) &= \frac{1}{2} V_m(0, \ell_{i-1}) - V_m(\Delta\phi, \ell_{i-1}) + \dots + V_m\left(\frac{\pi}{N_\phi} - \Delta\phi, \ell_{i-1}\right) - \frac{1}{2} V_m\left(\frac{\pi}{N_\phi}, \ell_{i-1}\right), \end{aligned} \right\} \quad (2.86)$$

のように固有関数 $V_m(\phi, \ell)$ を用いて与えられる。

2.2.5 磁場の計算

最後に、渦電流によって生成される磁場を求めるための定式化を行なう。Fig. 2.22 に、トーラス導体上の電流関数のパリティと磁場構造の関係を模式的に示す。この図では、トーラス導体の赤道面および $\phi=0$ のポロイダル断面双方に関するあらゆるパリティの組について、そのときの磁場の構造を与えている。ただし、EDDYMULTコードシステムで取り扱いが可能な組は図中の(a)、(b)である。図中の(c)、(d)は $\phi=0$ の対称性に関して電流関数が odd の場合を示している。

一般に、複合トーラス導体系は軸対称外部コイルを含むが、この磁場ベクトルポテンシャルは (R, θ, Z) を円筒座標とすると θ 方向成分しか持たず、

$$A_\theta(R, Z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{R_c}{R} \right)^{1/2} \left\{ \left(\frac{2}{\kappa} - \kappa \right) K(\kappa) - \frac{2}{\kappa} E(\kappa) \right\}, \quad (2.87)$$

と表わすことができる²⁸⁾。ここで、 I はコイル電流である。 $K(\kappa)$ および $E(\kappa)$ は、 κ を母数とする第1種および第2

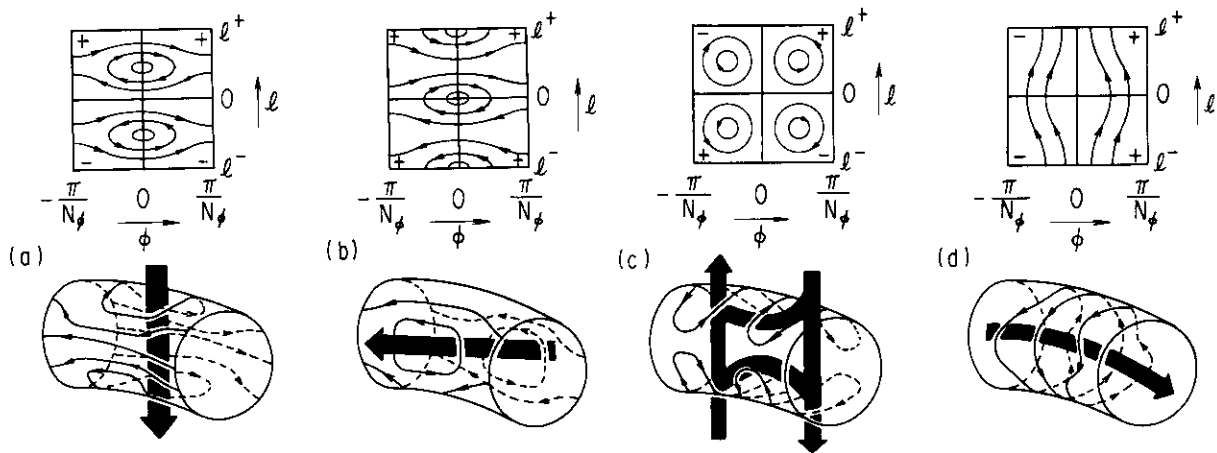


Fig. 2.22 Correspondence between the parity of eddy current (illustrated by a thin arrow) and the structure of its magnetic field (illustrated by a thick arrow): The magnetic fields of subfigures (a) and (b) couple with an axisymmetric poloidal field coils; The eddy current with the parity of subfigure (d) can interact only with the toroidal field coils.

種完全楕円積分である。この母数 κ は、 (R, Z) 平面でのコイルの位置を (R_c, Z_c) と表わすと、

$$\kappa^2 = \frac{4RR_c}{(R+R_c)^2 + (Z-Z_c)^2}, \quad (2.88)$$

である。

一方、トーラス導体 S 上の電流 \mathbf{J} によって空間点 (R, θ, Z) に生成される磁場は、磁場ベクトルポテンシャル $\mathbf{A} = (A_R, A_\theta, A_Z)$

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{J}}{\rho} dS, \quad (2.89)$$

により与えられる。ここでは、積分はトーラス導体 S の全表面にわたり実施する。 ρ は空間点 (R, θ, Z) と S 上の積分点 (r, ϕ, z) との間の距離で、 $\rho^2 = R^2 + r^2 - 2rR \cos(\theta - \phi) + (Z - z)^2$ である。モード毎の磁場ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は、電流密度 \mathbf{J} を与える (2.9) 式にトーラス導体 S 上の渦電流固有関数 V を適用して定義される。

いま、(2.89) 式の積分をトーラス導体 S 上の或る有限要素 Ω に制限して考える。更に、この有限要素内で電流関数 $V(\phi, \ell)$ が、(2.66) 式のように有限要素 Ω の 4 つの節点量 $V(\sigma, \mu)$ ($\sigma = L, U; \mu = L, U$) を用いて表わすことができるとする。このとき、

$$\left. \begin{aligned} A_R(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{\rho} \left\{ r \frac{\partial V}{\partial \ell} \sin(\theta - \phi) - \frac{\partial V}{\partial \phi} \frac{dr}{d\ell} \cos(\theta - \phi) \right\} d\phi d\ell, \\ A_\theta(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{\rho} \left\{ r \frac{\partial V}{\partial \ell} \cos(\theta - \phi) + \frac{\partial V}{\partial \phi} \frac{dr}{d\ell} \sin(\theta - \phi) \right\} d\phi d\ell, \\ A_Z(R, \theta, Z) &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \phi} \frac{dz}{d\ell} d\phi d\ell, \end{aligned} \right\} \quad (2.90)$$

と表わすことができるが、 $\partial V / \partial \ell$ および $\partial V / \partial \phi$ は、(2.69) 式により具体的に与えられているためこれを直接数値積分することができる。トーラス導体全体に関する磁場ベクトルポテンシャルについては、有限要素 Ω についての総和をとればよい。ところで、複合トーラス導体系におけるモード毎の渦電流の磁場諸量を求めるためには、全ての有限要素に対して (2.90) 式のような膨大な表面積分を実施する必要がある。しかしながら、(2.66) 式のように電流関数が有限要素 Ω 内で既知の内挿関数で表現されているため、(2.90) 式から渦電流のモードに依存しない形状関数が定義できる。形状関数は系の幾何学的配置のみで決定される。したがって、一度この形状関数を数値積分により求めておきさえすれば、有限要素 Ω に関するモード毎の 4 つの節点量とこれら形状関数との単純な 1 次結合により、モード毎の磁場ベクトルポテンシャルを与えることができる。

(2.69) 式を (2.90) 式に代入すると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_\sigma &= \frac{\Delta \phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1/\rho}^1 r P(\sigma) \sin(\theta - \phi) dX dY, \\ \beta_\mu &= \frac{\Delta \ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1/\rho}^1 \frac{1}{\rho} Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \cos(\theta - \phi) dX dY, \\ \gamma_\sigma &= \frac{\Delta \phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1/\rho}^1 r P(\sigma) \cos(\theta - \phi) dX dY, \\ \delta_\mu &= \frac{\Delta \ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1/\rho}^1 \frac{1}{\rho} Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \sin(\theta - \phi) dX dY, \\ \eta_\mu &= \frac{\Delta \ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1/\rho}^1 \frac{1}{\rho} Q(\mu) \frac{dz}{d\ell} dX dY, \end{aligned} \right\} \quad (2.91)$$

のように、添字 $\sigma = L, U$ および $\mu = L, U$ に対する 10 個の形状関数が得られる。これらの形状関数は渦電流モー

ドに依存せず、系の幾何学的配置のみで決定される。このとき、磁場ベクトルポテンシャルは

$$\left. \begin{aligned} A_R(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \{ \varepsilon(\mu) \alpha_{\sigma} - \varepsilon(\sigma) \beta_{\mu} \} V(\sigma, \mu), \\ A_{\theta}(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \{ \varepsilon(\mu) \gamma_{\sigma} + \varepsilon(\sigma) \delta_{\mu} \} V(\sigma, \mu), \\ A_Z(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \varepsilon(\sigma) \eta_{\mu} V(\sigma, \mu), \end{aligned} \right\} \quad (2.92)$$

によって与えられる。

(A) 形状関数の縮約

(1) 電流関数のパリティに基づく縮約

一般に、電流関数はトーラスの赤道面に関して odd か even かどちらかのパリティを有している。このため、このことを利用し形状関数 α_{σ} , β_{μ} , γ_{σ} , δ_{μ} , η_{μ} をトーラスの赤道面の上下で縮約することができる。これを具体的に説明するために、Fig. 2.23 に示すような或る有限要素 Ω とこれと赤道面に関して上下対称でかつ同じ ϕ 方向の位置にある有限要素 Ω^* を考える。形状関数 α_{σ} , β_{μ} , γ_{σ} , δ_{μ} , η_{μ} は、或る規則の下にトーラス赤道面に関して縮退する。 $\mu^* = \text{L}$ ($\mu = \text{U}$ のとき), $\mu^* = \text{U}$ ($\mu = \text{L}$ のとき) と定義し、 α_{σ}^* , β_{μ}^* , γ_{σ}^* , δ_{μ}^* , η_{μ}^* を有限要素 Ω^* に関する形状関数とする。まず、even パリティの場合を考える。このとき、有限要素 Ω^* に関する磁場ベクトルポテンシャル (A_R^* , A_{θ}^* , A_Z^*) は、 $V(\text{L}, \text{L})^* = V(\text{L}, \text{U})$, $V(\text{L}, \text{U})^* = V(\text{L}, \text{L})$, $V(\text{U}, \text{L})^* = V(\text{U}, \text{U})$ および $V(\text{U}, \text{U})^* = V(\text{U}, \text{L})$ であるから、

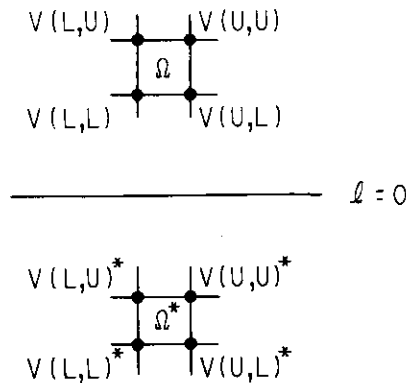


Fig. 2.23 Finite elements Ω and Ω^* which are symmetric each other with respect to the equatorial plane: If the current function V is odd, then $V(\text{L}, \text{L})^* = -V(\text{L}, \text{U})$, $V(\text{L}, \text{U})^* = -V(\text{L}, \text{L})$, $V(\text{U}, \text{L})^* = -V(\text{U}, \text{U})$ and $V(\text{U}, \text{U})^* = -V(\text{U}, \text{L})$; On the otherhand, if V is even, then $V(\text{L}, \text{L})^* = V(\text{L}, \text{U})$, $V(\text{L}, \text{U})^* = V(\text{L}, \text{L})$, $V(\text{U}, \text{L})^* = V(\text{U}, \text{U})$ and $V(\text{U}, \text{U})^* = V(\text{U}, \text{L})$.

$$\left. \begin{aligned} A_R^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \{ \varepsilon(\mu^*) \alpha_{\sigma}^* - \varepsilon(\sigma) \beta_{\mu}^* \} V(\sigma, \mu), \\ A_{\theta}^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \{ \varepsilon(\mu^*) \gamma_{\sigma}^* + \varepsilon(\sigma) \delta_{\mu}^* \} V(\sigma, \mu), \\ A_Z^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \varepsilon(\sigma) \eta_{\mu}^* V(\sigma, \mu), \end{aligned} \right\} \quad (2.93)$$

となる。更に、トーラス導体の赤道面に関し上下対称な位置にある有限要素 Ω と Ω^* の間には

$$\left. \begin{aligned} r &= r^*, \quad z = -z^*, \\ \frac{dr}{d\ell} &= -\left(\frac{dr}{d\ell}\right)^*, \quad \frac{dz}{d\ell} = \left(\frac{dz}{d\ell}\right)^*, \end{aligned} \right\} \quad (2.94)$$

のような関係があることがわかっている。このことから、 Ω^* に関する形状関数(2.91)式を

$$\left. \begin{aligned} \alpha_\sigma^* &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r}{\rho^*} P(\sigma) \sin(\theta - \phi) dXdY, \\ \beta_\mu^* &= -\frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\rho^*} Q(\mu^*) \frac{dr}{d\ell} \cos(\theta - \phi) dXdY, \\ \gamma_\sigma^* &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{r}{\rho^*} P(\sigma) \cos(\theta - \phi) dXdY, \\ \delta_\mu^* &= -\frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\rho^*} Q(\mu^*) \frac{dr}{d\ell} \sin(\theta - \phi) dXdY, \\ \eta_\mu^* &= \frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{\rho^*} Q(\mu^*) \frac{dz}{d\ell} dXdY, \end{aligned} \right\} \quad (2.95)$$

のように書き表わすことができる。ここで、 $\rho^{*2} = R^2 + r^2 - 2rR\cos(\theta - \phi) - (Z + z)^2$ である。更に、磁場ベクトルポテンシャルの計算式(2.90)式における積分を、 Ω と Ω^* を両方含む有限要素の領域で実施するものと再定義する。このときの形状関数を改めて α_σ , β_μ , γ_σ , δ_μ , η_μ と考えることにすれば、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_\sigma &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*}\right) r P(\sigma) \sin(\theta - \phi) dXdY, \\ \beta_\mu &= \frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*}\right) Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \cos(\theta - \phi) dXdY, \\ \gamma_\sigma &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*}\right) r P(\sigma) \cos(\theta - \phi) dXdY, \\ \delta_\mu &= \frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*}\right) Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \sin(\theta - \phi) dXdY, \\ \eta_\mu &= \frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho^*}\right) Q(\mu) \frac{dz}{d\ell} dXdY, \end{aligned} \right\} \quad (2.96)$$

となる。これは電流関数が even の場合に関して、トーラス導体赤道面の上下対称な位置にある有限要素 Ω と Ω^* についての縮約を考慮した形状関数となっている。

odd パリティの場合については、電流関数がトーラス導体の赤道面を挟んで上下で符号が逆であることだけが even パリティの場合と異なるから、(2.96)式は

$$\left. \begin{aligned} \alpha_\sigma &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*}\right) r P(\sigma) \sin(\theta - \phi) dXdY, \\ \beta_\mu &= \frac{\Delta\ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho^*}\right) Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \cos(\theta - \phi) dXdY, \\ \gamma_\sigma &= \frac{\Delta\phi}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho^*}\right) r P(\sigma) \cos(\theta - \phi) dXdY, \end{aligned} \right\} \quad (2.97)$$

$$\delta_\mu = \frac{\Delta \ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho^*} \right) Q(\mu) \frac{dr}{d\ell} \sin(\theta - \phi) dXdY,$$

$$\eta_\mu = \frac{\Delta \ell_i}{2^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*} \right) Q(\mu) \frac{dz}{d\ell} dXdY,$$

となる。

(2) 電流関数の ϕ 方向の周期性・対称性に基づく縮約

電流関数は本来 ϕ 方向に或る周期性と対称性を有しており、このことを利用し形状関数を縮約させることができる。これを具体的に説明するため、Fig. 2.24 に示すような ℓ = 一定の帯状の有限要素列 $\{\Omega\}$ を考える。一般に有限要素列 $\{\Omega\}$ は、 $2N_\phi N$ 個の有限要素 Ω_{ij} から成るが、説明の都合上 $\{\Omega\}$ を $2N_\phi$ 個の有限要素部分列 ([BLOCK] と呼ぶ) に等分割する。したがって、 N_ϕ が奇数のとき $\phi = -\pi$ から数えて最初の有限要素部分列 ([BLOCK]) は、対称性に基づく縮約対象となり、 N_ϕ が偶数のときこの最初の有限要素部分列 ([BLOCK]) は周期性に基づく縮約対象となる。以後の有限要素部分列 ([BLOCK]) には、それぞれ周期性に基づくものと対称性に基づくものが交互に現れる。

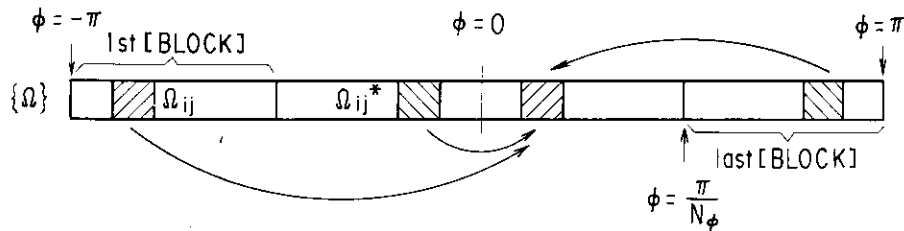


Fig. 2.24 Finite element series $\{\Omega\}$ composed of a set of finite elements Ω_{ij} with fixed i when $\ell = \text{const}$: The [BLOCK], which is defined as the subseries of N finite elements Ω_{ij} , is given by the $2N_\phi$ equi-partition of finite element series $\{\Omega\}$. Here, ▨ denotes the finite element Ω_{ij} to be contracted by use of the periodicity and ▩ the finite element Ω_{ij}^* to be contracted by use of the symmetry.

ϕ 方向の周期性に基づく縮約については、Fig. 2.24 に ▨ で示す有限要素 Ω の全てについて、形状関数 (2.91) 式で与えられる $\alpha_\sigma, \beta_\mu, \gamma_\sigma, \delta_\mu, \eta_\mu$ のそれぞれ単純に和を取ればよい。

一方、 ϕ 方向の対称性に基づく縮約については、Fig. 2.25 に示すように、有限要素 Ω とこれと対称な関係にある有限要素 Ω^* の電流関数が、 $V(L,L)^* = V(U,L), V(L,U)^* = V(U,U), V(U,L)^* = V(L,L), V(U,U)^* = V(L,U)$ の関係を持つことを用いる。したがって、 Ω^* の磁場ベクトルポテンシャル $A^* = (A_R^*, A_\theta^*, A_Z^*)$ は、対称な関係にある Ω の 4 つの節点量 $V(\sigma, \mu)$ ($\sigma = L, U; \mu = L, U$) を用いて

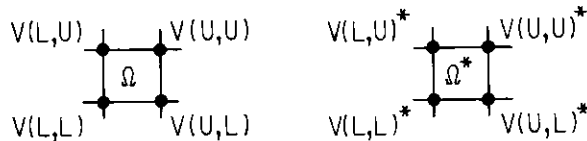


Fig. 2.25 Finite elements Ω and Ω^* being symmetric each other along the ϕ -direction. Here, $V(L,L)^* = V(U,L), V(L,U)^* = V(U,U), V(U,L)^* = V(L,L)$ and $V(U,U)^* = V(L,U)$.

$$\left. \begin{aligned} A_R^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U,L,U} \sum_{\mu} \{ \varepsilon(\mu) \alpha_{\sigma}^{**} - \varepsilon(\sigma^*) \beta_{\mu}^* \} V(\sigma, \mu), \\ A_{\theta}^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U,L,U} \sum_{\mu} \{ \varepsilon(\mu) \gamma_{\sigma}^{**} + \varepsilon(\sigma^*) \delta_{\mu}^* \} V(\sigma, \mu), \\ A_Z^*(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U,L,U} \sum_{\mu} \varepsilon(\sigma^*) \eta_{\mu}^* V(\sigma, \mu), \end{aligned} \right\} \quad (2.98)$$

のように表わせる。ここで、 $\sigma^* = L$ ($\sigma = U$ のとき)、 $\sigma^* = U$ ($\sigma = L$ のとき) と定義した。 α_{σ}^* 、 β_{μ}^* 、 γ_{σ}^* 、 δ_{μ}^* 、 η_{μ}^* は、有限要素 Ω^* の形状関数である。以上の説明から、有限要素 Ω と Ω^* についての縮約を考慮した形状関数を、次のように新たに定義し直すことができる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\sigma} &= \alpha_{\sigma} + \alpha_{\sigma}^{**}, \quad \beta_{\mu} = \beta_{\mu} - \beta_{\mu}^*, \quad \gamma_{\sigma} = \gamma_{\sigma} - \gamma_{\sigma}^{**}, \\ \delta_{\mu} &= \delta_{\mu} - \delta_{\mu}^*, \quad \eta_{\mu} = \eta_{\mu} - \eta_{\mu}^*, \end{aligned} \right\} \quad (2.99)$$

である。

[B] 渦電流磁場

先の説明にしたがって、複合トーラス導体系の渦電流による磁場ベクトルポテンシャル $A(R, \theta, Z)$ が或る空間点に対して求めたとする。このとき、磁場 $B = (B_R, B_{\theta}, B_Z)$ は次式で求まる。

$$B = \nabla \times A. \quad (2.100)$$

更に、Fig. 2.26 に示すように、3次元空間 (R, θ, Z) が R, θ, Z のそれぞれの座標線に沿った境界を有する直方体の有限要素 Ω_s に分割されているとする。いま、この有限要素 Ω_s 内で A がそれぞれ区分的1次の内挿関数である $P(\sigma)$ 、 $Q(\mu)$ 、 $R(\nu)$ を用いて

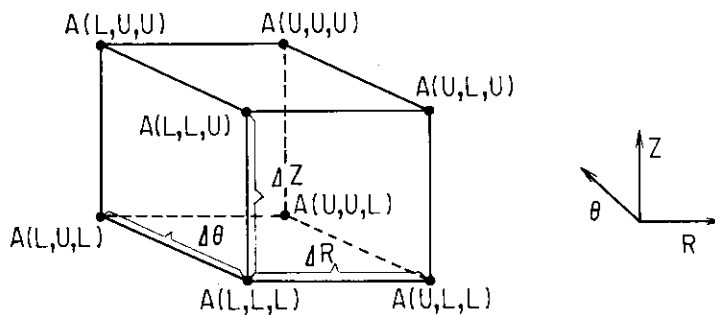


Fig. 2.26 Box-shaped finite element Ω_s and vector potential A at the vertices: Eight vertices are classified by the nodal parameters (σ, μ, ν) ($\sigma = L, U; \mu = L, U; \nu = L, U$).

$$A(R, \theta, Z) = \sum_{\sigma}^{L,U,L,U} \sum_{\mu} \sum_{\nu} P(\sigma) Q(\mu) R(\nu) A(\sigma, \mu, \nu), \quad (2.101)$$

のように表わすことができるとする。ここで、 $A(\sigma, \mu, \nu)$ は有限要素 Ω_s の8つの節点 (σ, μ, ν) ($\sigma = L, U; \mu = L, U; \nu = L, U$) における磁場ベクトルポテンシャルである。内挿関数は

$$\left. \begin{aligned} P(L) &= 1 - X, & P(U) &= X, \\ Q(L) &= 1 - Y, & Q(U) &= Y, \\ R(L) &= 1 - W, & R(U) &= W, \end{aligned} \right\} \quad (2.102)$$

で定義され、 X , Y , W は次の局所基底である。すなわち、

$$X = \frac{1}{\Delta R}(R - R_L), \quad Y = \frac{1}{\Delta \theta}(\theta - \theta_L), \quad W = \frac{1}{\Delta Z}(Z - Z_L). \quad (2.103)$$

(2.101)式を(2.100)式に代入すれば、

$$\left. \begin{aligned} B_R(R, \theta, Z) &= \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \frac{1}{R \Delta \theta} \varepsilon(\mu) P(\sigma) R(\nu) A_Z(\sigma, \mu, \nu) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) P(\sigma) Q(\mu) A_{\theta}(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_{\theta}(R, \theta, Z) &= \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) P(\sigma) Q(\mu) A_R(\sigma, \mu, \nu) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Delta R} \varepsilon(\sigma) Q(\mu) R(\nu) A_Z(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_Z(R, \theta, Z) &= \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \left(\frac{1}{R} P(\sigma) + \frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta R} \right) Q(\mu) R(\nu) A_{\theta}(\sigma, \mu, \nu) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{R \Delta \theta} \varepsilon(\mu) P(\sigma) R(\nu) A_R(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

が得られる。特に有限要素 Ω_s の重心 (R_0, θ_0, Z_0) では、上式は

$$\left. \begin{aligned} B_R &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \frac{1}{R_0 \Delta \theta} \varepsilon(\mu) A_Z(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) A_{\theta}(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_{\theta} &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) A_R(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{\Delta R} \varepsilon(\sigma) A_Z(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_Z &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \sum_{\nu}^{\text{L,U,L,U,L,U}} \left\{ \left(\frac{1}{2R_0} + \frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta R} \right) A_{\theta}(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{R_0 \Delta \theta} \varepsilon(\mu) A_R(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (2.105)$$

となる。軸対称コイルのつくる磁場ベクトルポテンシャルは、 θ 方向成分しか持たない。このとき、重心点上での磁場は

$$B_R = -\frac{1}{2} \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \frac{\varepsilon(\mu)}{\Delta Z} A_{\theta}(\sigma, \mu), \quad B_Z = \frac{1}{2} \sum_{\sigma}^{\text{L,U,L,U}} \sum_{\mu}^{\text{L,U,L,U}} \left(\frac{1}{2R_0} + \frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta R} \right) A_{\theta}(\sigma, \mu), \quad (2.106)$$

により計算される。

3. 計算コードシステム EDDYMULT の説明

ここでは、EDDYMULT コードシステムのプログラム構造および処理機能について、その概要を説明する。処理の流れについての詳細な説明については、付録 A .2 および A .3 を参照されたい。本計算コードシステムの実行に際しては、多数のデータファイルや作業用ファイルが必要となる。これらのファイルの識別の詳細な説明については、3.3 節の入力方法または付録 A .2 を参照されたい。

3.1 特徴

EDDYMULT コードシステムは、基本的には次のような 5 つのモジュール ID (指標) で分類される FORTRAN プログラムから成る。

- ① EDTDEC プログラム
- ② EM1DEC プログラム
- ③ EM2DEC プログラム
- ④ EM3DEC プログラム
- ⑤ FLDDEC プログラム

これらの他に、ESHARE プログラムがあるが、これは上の 5 つのプログラム群において共通に使用されるサブルーチン群を 1 つのプログラムにまとめたものがある。これら全てのプログラムは、ソース管理の一元化のため GEM ファイルとして一本にまとめられている。GEM は、ソースプログラム、データ、ジョブ制御文などを DASD(Direct Access Storage Device) 上に割当てられたデータセット上に或る単位毎に格納し、保守、管理を行うプログラムで、FACOM OSIV/F4 MSP に標準の Generalized program Editing and Management facilities の略称である。EDDYMULT コードシステムは、トカマク型核融合実験装置における渦電流問題を一般的に取り扱うため、全体を通じて以下のような処理上の特徴を持っている。

- トーラス導体のポロイダル断面は、直線と円弧で近似できる任意の形状で与えられる。
- トーラス導体は、全体としてトロイダル方向に或る周期性を持ち、更にはその周期の中心に対して対称であるとする。個々のトーラス導体は導体の電気抵抗率によって 2 種類の領域に分けることができる。すなわち、真空容器を例にとると、1 つは厚肉部に相当し一定の面抵抗率或いは $1/r$ (r : 中心軸からの距離) に比例する抵抗率を持つ領域で、他はベローズ部に相当しトロイダル方向とポロイダル方向に異なった抵抗率を持つ領域である。
- ポート穴やカットを任意の場所に入れることができる。その境界は有限要素分割の分割線に一致した直線と長方形の集合で表わす。
- 外部磁場は、軸対称であり、トーラス導体の赤道面に関し上下対称な線電流のコイル群によって表現する。その時間変化は、1 次関数、指数関数、三角関数など初等関数の 1 次結合によって表わす。
- 外部受動コイルの導入により、ポロイダル磁場コイルの反作用を考慮することができる。
- 簡単な入力パラメータ指定により、電流関数のパリティが odd な部分、even な部分に分離し処理を進めることができる。

Fig. 3.1 に本コードシステムで取り扱うことのできる問題の処理の流れを示す。これら渦電流の固有モード解析・時間追跡・磁場構造解析に至る一連の処理は、限られた計算資源のなかでは一度にまとめて完結するのが不可能であるので、

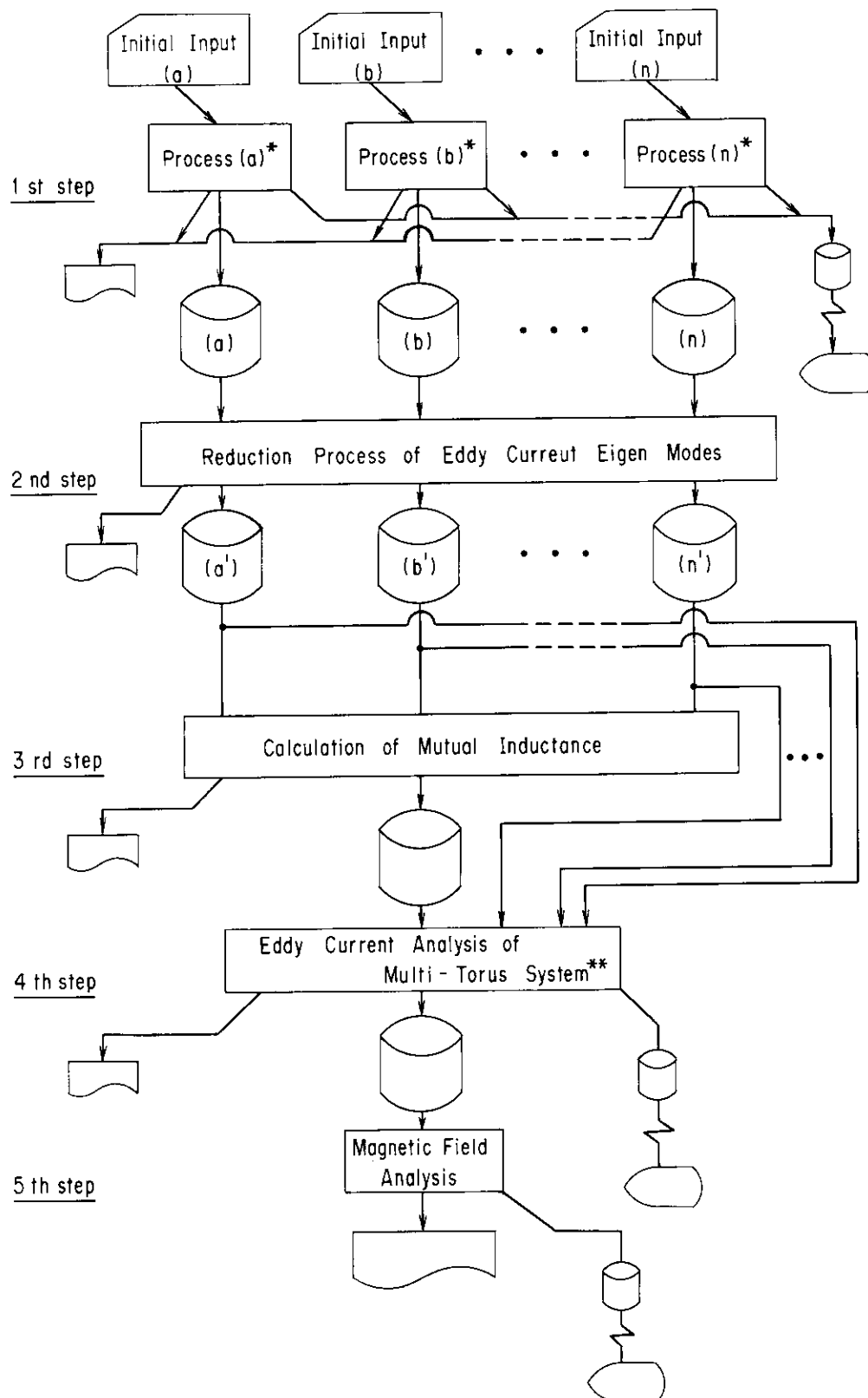


Fig. 3.1 General flow diagram of the EDDYMULT computing system. The process (i) means a modal analysis of the i -th torus conductor (the notice * in the figure). Eddy current analysis of multi-torus system (the notice ** in the figure) is a process of both the modal analysis and the transient analysis of eddy current in a multi-torus system.

- i) 第1段階の処理 (EDTDEC, ESHARE プログラム使用)
単一トラス導体に対する渦電流の固有モード解析
- ii) 第2段階の処理 (EM1DEC, ESHARE プログラム使用)
次のステップ以後の連成系の問題を取り扱うためのモード選択
- iii) 第3段階の処理 (EM2DEC, ESHARE プログラム使用)
複合(連成)トラス導体系のためのモード間相互作用の算出
- iv) 第4段階の処理 (EM3DEC, ESHARE プログラム使用)
複合トラス導体系の渦電流固有モード解析および時間追跡
- v) 第5段階の処理 (FLDDEC, ESHARE プログラム使用)
磁場構造解析

の5段階処理になっている。このため、各処理ステップでの入力作業、多数のファイルの割当ておよび管理のための配慮が必要である。また、トカマク装置における渦電流問題は、取り扱う立場により、あるときはモードが、またあるときは時間変化が重要であったりするなど、多種多様なとらえ方が存在する。更に、複合トラス導体の内の一部のトラス導体だけを再考する必要がある場合があり、このときには、すでに作成されたファイルを有効利用した、リスタート機能が合理的に行われるようになっていくことが望ましい。このため、本コードシステムはこういった要求に対応できる多様な各種の機能を有している。EDDYMULT コードシステムはユーザーに便宜を計る意味で以下の特徴を持つ。

- (1) 入力は全て 'NAMELIST' 入力方式である。
- (2) 多くの入出力ファイルの割当ては、ソースプログラム内で IPF コマンドにより自動的に実行される。
- (3) COMMON ブロックは INCLUDE 化し、ソースプログラム管理の合理化を計っている。
- (4) 各処理ステップに必要なモジュール群は、1本の GEM ファイルにまとめられたものの中からモジュール ID (指標) でラベル付されたものを必要に応じて呼び出す。このため、ジョブ制御文(JCL)によりモジュール ID を指定する。
- (5) 問題に固有の入出力ファイルは、誤用を防止するため、データセットの読み出しの際にファイル不整合チェックを実施する。
- (6) 処理結果の出力プリント、図形出力のためのリスタート機能を豊富に有する。
- (7) 入力パラメータにより電流関数のパリティを指定できる。
- (8) 出力プリントまたは図形出力などを入力により自由に選択指定できる。
- (9) コアサイズの経済性を考慮し、処理に必要な作業領域を共通化するための自動処理を行う。
- (10) 渦電流、磁場計算共モードデータがファイルに保存されているため、異なる外部入力波形による時間追跡の問題に対して極めて少ない計算資源により処理を楽に行うことができる。
- (11) 再考する必要があるトラス導体があっても、単一トラス導体の固有モード解析 (第1段階)、モード縮小 (第2段階)、当該トラス導体に関連する相互作用ブロックのみの計算 (第3段階) をやり直すだけで第4段階以後の処理に進むことができる。

3.2 構成とその機能

管理の便宜上、ソースファイルは一本の GEM ファイルとしてまとめてあり、モジュール ID (指標) で管理する方法をとっている。利用者は実行する問題に応じて必要なモジュール ID を JCL で指定すればよい。プログラムの更新は通常の GEM ファイルと全く同じにすればよい。なお、プログラム中の COMMON ブロックは全て INCLUDE 化され、ソースプログラムと同じ GEM ファイルのメンバーになっている。しかし、利用者はこの

COMMON ブロックに関し JCL による特別な考慮をする必要はない。ソースファイルの構造を Fig. 3.2 に示す。

先に述べたように、EDDYMULT コードシステムは処理内容毎に5つの FORTRAN プログラムから成り、各処理ステップ間は数多くの入出力ファイルで結びつけられている。これらのファイルは、各 FORTRAN プログラム毎に識別のための FORTRAN 論理機番が自動的に割当てられる。利用者は実行に際して識別されたファイルに任意のデータセット名を与えればよい。FORTRAN 論理機番についての詳しい説明は、後述の付録 A .2 または A .3 を参照されたい。また、EDDYMULT コードシステムは、多種のリスタート機能を有するとともに、オフライン処理であるが図形の出力も必要に応じ実施することができる。ここでは、入出力の体系、リスタートオプションおよび処理機能について、各処理ステップ毎にその概要を述べる。なお、実際の処理の流れについては付録 A .2 処理の流れの概要を参照されたい。

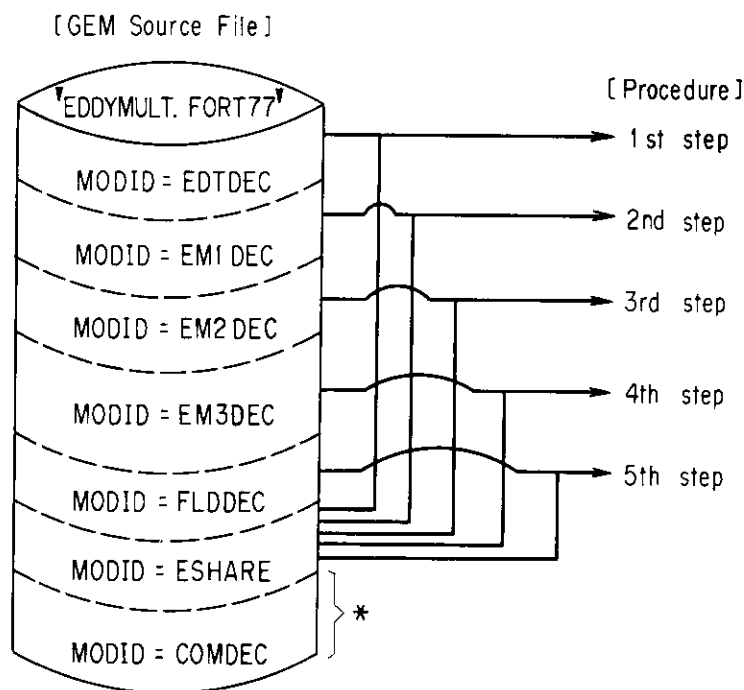


Fig. 3.2 Source file structure of the EDDYMULT computing system. Here, the set of modules identified by the module ID as COMDEC, which is always required for each program, is automatically put into execution (the notice * in the figure).

3.2.1 EDTDEC プログラム

本プログラムでは、単一のトラス導体の渦電流固有関数基底を求める。対象とする複合トラス導体系を構成する全てのトラス導体について、本プログラムを用い全ての固有関数基底を計算する必要がある。

初めに、問題のタイトル、電流関数のパリティ条件、トラス導体の形状、ベローズによる抵抗の異方性の有無、計算領域指定、有限要素分割の仕方や出力指定のためのオプションなどを入力する。これにより、有限要素のメッシュ諸量、たとえば (r, ϕ, z) 座標、節点番号などを作成し、更に Gauss-Legendre 数値積分のための積分データを計算する。ポート穴が存在する場合には、これによる行列の縮約や固有ベクトルの展開のための条件を作る。プログラムの実行に必要な作業用ファイルや結果をダンプするためのデータファイルの割当ては、入力にしたがい自動的に処理する。これらの結果は全てプリント出力される。更に、データファイルへのダンプが指示されている場合には、FORTRAN 論理機番 3 のファイルへこれらの結果を記憶する。

次に、インダクタンス行列 $\{M\}$ および抵抗行列 $\{R\}$ を、それぞれ (2.23)式および(2.24)式を用いて数値計算する。この際の多重積分には Gauss-Legendre 数値積分公式を用いるが、一般にこの計算量は膨大であり、内部記憶領域を多量に必要とする。このため、特にインダクタンス行列 $\{M\}$ については、その結果を FORTRAN 論理機番 4 の作業用ファイルに一時記憶する。更に、渦電流固有関数基底の求解のため、一般化固有値問題 (2.33) 式を QR 法²⁹⁾により解く。このときにも作業用として FORTRAN 論理機番 4 のファイルを使用する。固有値、固有ベクトルの計算結果は、ダンプ指定にしたがい FORTRAN 論理機番 3 のデータファイルに保存されるとともにプリント出力される。このデータファイルは、本プログラムによる処理に引き続いて行われる一連の処理のための入力データとして用いられるが、一方で、本プログラムを用いた固有値、固有ベクトルの出力プリントおよび等高線プロット³⁰⁾や電流密度分布の 1 次元プロットのためのデータファイルとしても利用される。一般に、固有ベクトルのプリントやプロット出力のためのデータ量は膨大であり、1 回の出力処理では隋いきれないことが多い。このため、リスタート処理により必要な結果をプリント、プロット出力している。このリスタート処理の場合には、インダクタンス $\{M\}$ や抵抗 $\{R\}$ を求めるための数値計算や固有値問題の求解は不要であり、単に上のデータファイルを参照しプリントおよびプロット出力している。

3.2.2 EM1DEC プログラム

ここでは、先の処理で得られたトーラス導体毎に定義される固有関数基底の渦電流モード群に対して、2.1 節で説明した次元縮小の方法を用い可制御なモードを選択する。これにより複合トーラス導体系の渦電流モードの次数が決定される。

初めに、モードの次元縮小のための判定値や渦電流を誘起する外部磁場を与える軸対称コイルに関する諸量を入力する。次に、本プログラムの結果を記憶するためのダンプファイルを、各トーラス導体毎に 1 本ずつ自動的に割当てて。次元縮小の処理には、EDTDEC プログラムを用いて得た各トーラス導体に対するデータファイル群が使用される。これらにより、電流関数のパリティ条件やトーラス導体の ϕ 方向の対称性や周期性などの条件を判定し、複合トーラス導体系の渦電流問題に適合するか否かのファイル不整合チェックを実施する。処理後のデータは、出力プリントに関する入力の指定パラメータにしたがいこれを出力する。更に、トーラス導体毎に新たに割当てられた FORTRAN 論理機番 21 ~ 30 の各ファイルに処理後のデータをトーラス導体毎に記憶する。

3.2.3 EM2DEC プログラム

本プログラムでは、EM1DEC プログラムで次元縮小されたトーラス導体毎の渦電流固有モードに対して、(2.65)式および (2.70)式を用いトーラス導体間相互のモード間結合を求める。一般にはこの処理に要する計算時間は膨大であり、考慮している複合トーラス導体系の全てのトーラス導体に対してこのモード間結合を 1 回の処理で求めることができないことが多い。したがって、複数回の処理により計算を完結させることとなるが、毎回の処理毎に前回までの処理結果をファイルから読取り前進させるようにしている。前進した結果は新たに用意したファイルへ書込む。

初めに、問題のタイトル、電流関数のパリティ条件、トーラス導体の導体数、2 重表面積分の数値計算法、出力指定のためのオプションなどを入力する。次に、入力の指定により定義された全てのトーラス導体に対して、EM1DEC プログラムで得られた次元縮小後のデータファイル群 (FORTRAN 論理機番 21 ~ 30) を開設する。更に、FORTRAN 論理機番 2 および 10 の作業用ファイル、モード間結合のための FORTRAN 論理機番 11 および 12 の各ファイルの割当てを自動的に実施する。まずモード間結合の計算に先立ち、初回の処理を除き、前回までの処理の結果得られたモード間結合をファイル (FORTRAN 論理機番 12) から読取る。新たに求めるモード間結合については、2.2 節で説明した 1 次独立な形状関数を、Gauss-Legendre 数値積分かまたは重心近似のどち

らか指定された方法により算出する。次に、この1次独立な形状関数を生成元としてトラス導体の計算対象全領域に拡張し、更に ϕ 方向の周期性・対称性に基づきこれらを最小の計算対象領域に縮約させる。これらの結果はFORTRAN論理機番10の作業用ファイルに記憶される。次に、この形状関数を用いてモード間結合を(2.70)式により計算し、結果をプリント出力、更にFORTRAN論理機番11のデータファイルに記憶する。

3.2.4 EM3DEC プログラム

ここでは、複合トラス導体系の渦電流固有値問題(2.75)式を解き、その後外部コイルによる渦電流各モードの応答を(2.37)式により求め、系全体の渦電流を時間追跡する。複合トラス導体系の固有値問題(2.75)式は、各トラス導体上の次元縮小された固有関数基底で表現されているが、EM2DECプログラムで得られたモード間結合を用いてFig. 2.16に示すような行列構造を有するインダクタンス $\{M\}$ を構成する。また複合トラス導体系には軸対称外部コイルを必要に応じ追加し、そのコイルの反作用を考慮した渦電流問題を考慮することができる(このコイルを外部受動コイルと呼び、一方渦電流の要素とならないただ起電力を与えるだけのコイルを外部能動コイルと呼ぶ)。このため、このときには外部受動コイルを含むインダクタンス行列を構成し、外部受動コイルを連成させた問題を解くことになる。

初めに、問題のタイトル、電流関数のパリティ条件、外部コイルの位置やコイルの巻数および物性等の諸量、時間追跡のための時間波形、リスタート用情報、出力プロットおよびプリントのための入力パラメータなどを入力する。これにより、i) 各トラス導体の固有関数基底やメッシュ点情報などを記憶している参照用ファイル(FORTRAN論理機番21~30)、ii) モード間結合のファイル(FORTRAN論理機番12)、iii) 本プログラムのためのリスタート用ファイル(FORTRAN論理機番2)、iv) 等高線プロット用のデータファイル(FORTRAN論理機番11)、v) 外部起電力係数のためのファイル(FORTRAN論理機番13)、vi) FLDDECプログラムでの磁場計算のためのデータファイル(FORTRAN論理機番10)およびvii) 作業用ファイル(FORTRAN論理機番4)などの各種ファイル、を必要に応じ自動的に開設および割当てする。入力は全てプリントされる。参照されるファイルの内容と本プログラムのために与えられた入力条件との整合性は、電流関数のパリティ条件やトラス導体の ϕ 方向の周期性・対称性などにより比較されチェックされる。

次に、複合トラス導体系の渦電流固有値問題(2.75)式を解く。外部受動コイルが存在する場合は、トラス導体各モードとこれらコイルとの結合、コイル間相互のインダクタンスおよび抵抗を計算し、固有値問題(2.82)式を解く。結果は出力のための入力オプションにしたがいプリント出力され、FORTRAN論理機番2のリスタート用ファイルに記憶される。複合トラス導体系の体系に変更がなかった外部起電力の時間波形だけが異なるようなリスタート計算の場合には、固有値問題の処理を実行せずこのファイルの結果を参照し計算を行うことができる。更に、各トラス導体毎の固有関数基底と本プログラムで得られた連成系のモード行列を用い複合トラス導体系全体での固有関数を(2.79)式を用い算出する。これらの結果は出力のための入力オプションの指示にしたがいプリント、プロット出力される。

時間追跡処理にあたっては、先の処理で得られた結果を記憶しているFORTRAN論理機番2のファイルを常に参照する。最初に、各トラス導体毎の次元縮小された固有関数基底に対し外部起電力係数を計算する。この外部起電力係数は、複合トラス導体系における渦電流モードに対するそれでないことに注意されたい。したがって、本プログラムで得られた連成系のモード行列を上記外部起電力係数に作用させ、これをモード変換する。この結果はFORTRAN論理機番13のファイルに記憶される。リスタート計算の場合は、外部起電力係数の計算を実行する必要がないので、このファイルの内容を参照し処理を進める。最後に、入力で指定された時間ステップ毎にモードの応答を求め、各トラス導体に対してモード合成を行い渦電流の時間変化を算出、プリントおよびプロット出力する。

なお、次プログラムによる磁場計算の際に用いられる FORTRAN 論理機番 10 のファイルには、複合トラス導体系の諸情報、トラス導体メッシュ情報、渦電流固有モードの固有関数、モードの時間応答などが記憶されている。

3.2.5 FLDDEC プログラム

本プログラムは、EDDYMULT コードシステムのプログラム群を用いた一連の処理の最終処理を実施するためのもので、渦電流による磁場の解析を行う。

初めに、対象とする複合トラス導体系のトラス導体数、外部コイル群のコイル数などの諸量、Gauss-Legendre 数値積分のための諸量、空間点データ、出力に関するオプションのパラメータ、各種ファイルの名称などを入力する。これにより、i) EM3DEC プログラムで作成された本プログラムの実行のためのファイル (FORTRAN 論理機番 20)、ii) 'ARGUS'³¹⁾ による磁場の等高線プロットのためのデータファイル (FORTRAN 論理機番 29)、iii) 複合トラス導体の渦電流によるモード毎の磁場ベクトルポテンシャルのためのデータファイル (FORTRAN 論理機番 27)、iv) 渦電流によるモード毎の磁場のためのデータファイル (FORTRAN 論理機番 25)、v) 渦電流によるモード毎の磁束のためのデータファイル (FORTRAN 論理機番 26) および vi) その他本プログラムでの作業のための一時ファイル、を開設および割当てする。次に処理の都合から、EM3DEC プログラムで作成された FORTRAN 論理機番 20 のファイルの記憶内容を、i) 複合トラス導体系の諸情報、ii) 固有値および固有関数などのトラス導体システムデータ、iii) 外部コイルの数やコイルの固有関数などコイルに関する諸量およびモードの時間応答やコイル電流値などの時間追跡結果、に分離し、それぞれを i) FORTRAN 論理機番 22、ii) FORTRAN 論理機番 23 および iii) FORTRAN 論理機番 24 に再記憶する。

更に、渦電流各モード毎に磁場ベクトルポテンシャルを (2.90) 式を用いて計算する。このとき、まずトラス導体毎の渦電流モードによる磁場ベクトルポテンシャルをそれぞれ FORTRAN 論理機番 30 ~ 39 に一時記憶させ、その後全てのトラス導体に関してこれらをモード毎に合成し、FORTRAN 論理機番 21 のデータファイルに記憶させる。更に、外部受動コイルが存在する場合には、これに対するモード毎の磁場ベクトルポテンシャルを (2.87) 式を用いて算出し、FORTRAN 論理機番 25 のファイルに一時記憶、これと全トラス導体の渦電流各モードによる磁場ベクトルポテンシャルを合成させ、結果を FORTRAN 論理機番 27 のデータファイルに保存する。リスタート計算の場合は、磁場ベクトルポテンシャルの計算は行わず、ただこのファイルの記憶内容を参照する。結果は入力によるプリントの指示によりこれを出力する。その後、先の磁場ベクトルポテンシャルからモード毎の磁束を計算する。この結果は FORTRAN 論理機番 26 のファイルへ書込まれ保存される。更に、'ARGUS' プログラムによるモード毎の磁束分布のプロットのために、FORTRAN 論理機番 29 のファイルを作成する。また、入力の指定にしたがい結果をプリントする。更に、モード毎の磁場ベクトルポテンシャル (FORTRAN 論理機番 27) から (2.105) 式を用いて磁場を算出し、これを FORTRAN 論理機番 25 のファイルに保存、更にプリントする。

時間追跡については、先の処理により得られたモード毎の磁場諸量と FORTRAN 論理機番 24 に一時記憶されたモードの時間応答の係数との単に 1 次結合を計算することによる。更に、外部能動コイルが存在する場合には、これを合成させる。プリント出力される磁場諸量としては、磁場ベクトルポテンシャル、磁束および磁場の時間変化である。その内の磁束は、'ARGUS' プログラムによる時間追跡の磁束分布のプロット処理のために、FORTRAN 論理機番 29 のデータファイルにダンプされる。

3.3 入力方法

ここでは、EDDYMULT コードシステムの 5 つのプログラム毎にジョブ制御文の具体例を与え、あわせて全て

の入力についての説明を行う。具体例として示したジョブ制御文の中の最初の数行は、JCLG を経由して起動されたユーザージョブに対して、

- ① 当該ジョブの出力結果の保障
- ② SYSIN パラメータ中の JUSER 文によるユーザーの資格チェック
- ③ JUSER 文、リソース情報、OPTP 文による目的ジョブ制御文の JOB 文の創生
- ④ ジョブ名の自動発行
- ⑤ 実行ジョブクラスおよびジョブプライオリティの設定

等を自動処理する原研計算センター固有のジョブマクロコマンドである。ここでは更に、GEM ファイル中の当該データセットに対してシンタックスチェックが行われる。

3.3.1 EDTDEC プログラム

[1] ジョブ制御文

1) ベローズ部を有するトラス導体の通常の問題の場合

```

//JCLG LOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER ***** ,***** ,*****
//      T.7 C.2 W.4 I.4 P.0 SRP
//      OPTP PASSWORD=ED,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****.*****',Q=' .FORT77'
- G AAA,MODID=(EDTDEC,ESHARE) ----- ①
- PUT AAA,OUT=OUTDD ----- ②
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW;PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=0,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)'
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&JOBNAM ITITLE= 'VACUUM VESSEL WITH M-COIL JACKET ( 61.10. 8 )',
IPARTY=0, &END ----- ③
&RSTOPT IRST= 0, &END ----- ④
&MESHDT IPOINT=5,
FORM(1,1)=4.9561,FORM(2,1)=0.0,
FORM(1,2)=4.6516,FORM(2,2)=0.462,FORM(3,2)=0.5027,MESH(2)=2,
FORM(1,3)=3.4649,FORM(2,3)=0.9739,FORM(3,3)=0.0 ,MESH(3)=4,
FORM(1,4)=2.3519,FORM(2,4)=0.800,FORM(3,4)=1.0598,MESH(4)=6,
FORM(1,5)=1.9872,FORM(2,5)=0.0 ,FORM(3,5)=1.0598,MESH(5)=6,
NPHI=9, NNPFI=8, &END ----- ⑤
&PORTDT NP=0, &END ----- ⑥
&GLDT IX=3, IY=5, &END ----- ⑦
&PHYSDT RO=2.586, ASIGMA=1.29E-6, AD=6.5E-2, BRO=7.72,
BSIGMA=1.29E-6, BD=2.7E-3,IAOPT=0,BSIG2F=1.45,
NNSS=1,IBLL=1,IBS(1)=3, &END ----- ⑧
&LPOPI IPSK=0,IPK=0,IPETA=0,IPVEC=1,IPVEJ=1, &END ----- ⑨
&GPOPT IPLTEV=0,IPLTJE=0,IGPCP(1)=0 &END ----- ⑩
&GPOPT1 &END
&MODOUT ISMD=1,IEMD=5, &END

```

```

&FILNAM FNAMDP='J****.#ODD.VESSELMC.DATA',
          FNAMGP='J****.ODD.GPCPI.DATA',
          FNAMWK='J****.ODD.EDTO1.DATA',USERID='J****', &END } ----- ⑩
/*
++
//

```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュールIDの指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ リスタートオプションの入力
- ⑤ メッシュデータの入力
- ⑥ ポート穴の入力
- ⑦ 数値積分データの入力
- ⑧ 物性値, ベローズ部の入力
- ⑨ プリント出力の指定
- ⑩ プロット出力の指定
- ⑪ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は, プログラム内で自動的に処理される)

2) ポート穴を有するトーラス導体の問題の場合

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER *****,*----- ①
      T.12 C.4 W.4 I.6 P.0 SRP LRG
      OPTP PASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****.*----- ②
      - G AAA,MODID=(EDTDEC,ESHARE)
      - PUT AAA,OUT=OUTDD
      - END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=0,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)'
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&JOBNAM ITITLE='TOROIDAL COIL NO.1 ( 60.6.28 )',
          IPARTY=0, &END } ----- ③
&RSTOPT IRST=-2, &END ----- ④
&MESHDT IPOINT=4,
          FORM(1,1)=5.925,FORM(2,1)=0.0,
          FORM(1,2)=3.32, FORM(2,2)=2.605,FORM(3,2)=2.605,MESH(2)=6,
          FORM(1,3)=2.26, FORM(2,3)=2.380,FORM(3,3)=2.605,MESH(3)=5,
          FORM(1,4)=0.715,FORM(2,4)=0.0,FORM(3,4)=2.605,MESH(4)=14,
          NPHI=9, NNPFI=8, &END } ----- ⑤

```

```

&PORTDT NP=3,NPC(1)=2,INVERT(1,1)= 0,INVERT(2,1)=1,
      INVERT(1,2)=25,INVERT(2,2)=1,
      NPC(2)=10,INVERT(1,3)=11,INVERT(2,3)=5,
      INVERT(1,4)=25,INVERT(2,4)=5,
      INVERT(1,5)= 6,INVERT(2,5)=4,
      INVERT(1,6)= 6,INVERT(2,6)=6,
      INVERT(1,7)=11,INVERT(2,7)=6,
      INVERT(1,8)=11,INVERT(2,8)=4,
      INVERT(1,9)= 0,INVERT(2,9)=3,
      INVERT(1,10)= 0,INVERT(2,10)=7,
      INVERT(1,11)= 6,INVERT(2,11)=7,
      INVERT(1,12)= 6,INVERT(2,12)=3,
      NPC(3)=2,INVERT(1,13)= 0,INVERT(2,13)=9,
      INVERT(1,14)=25,INVERT(2,14)=9,
&GLDT IX=3, IY=7,
&PHYSDT RO=3.32, ASIGMA=1.724E-8, AD=0.3198, BRO=1.0,
      BSGMA=0.0E-7, BD=0.00, IAOPT=0, BSG2F=1.0,
      NNSS=0, IBL=0, IBS(1)=0,
&LPOPT IPSK=0, IPK=0, IPETA=0, IPVEC=1, IPVEJ=0,
&GPOPT IPLTEV=0, IPLTJE=0, IGPCP(1)=0
&GPOPT1
&MODOUT ISMD=1, IEMD=5,
&FILNAM FNAMPD='J****.#ODD.TFC1.DATA',
      FNAMGP='J****.ODD.GPCP1.DATA',
      FNAMWK='J****.ODD.EDT05,DATA',USERID='J****',
/*
++
//

```

⑥
⑦
⑧
⑨
⑩
⑪

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュールIDの指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ リスタートオプションの入力
- ⑤ メッシュデータの入力
- ⑥ ポート穴の入力
- ⑦ 数値積分データの入力
- ⑧ 物性値, ベローズ部の入力
- ⑨ プリント出力の指定
- ⑩ プロット出力の指定
- ⑪ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は, プログラム内で自動的に処理される)

3) 電流密度 J_ϕ , J_ψ の1次元プロットおよび 'GPCP' プロットデータ作成の場合

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER *****
      T.3 C.2 W.1 I.4 P.0 SRP GRP
      OPTP RASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****.*****',Q='.FORT77'
- G AAA,MODID=(EDTDEC,ESHARE)
- PUT AAA,OUT=OUTDD
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
// UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=0,
// OBJJS='50,10',

```

①
②

```

// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)'
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN  DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&JOBNAM ITITLE= 'VACUUM VESSEL WITH M-COIL JACKET ( 61.10. 9 )', ) ----- ③
      IPARTY=0,                                     &END
&RSTOPT IRST= 2,                                  &END----- ④
&MESHDT IPOINT=5,
      FORM(1,1)=4.9561,FORM(2,1)=0.0,
      FORM(1,2)=4.6516,FORM(2,2)=0.462,FORM(3,2)=0.5027,MESH(2)=2,
      FORM(1,3)=3.4649,FORM(2,3)=0.9739,FORM(3,3)=0.0 ,MESH(3)=4, ----- ⑤
      FORM(1,4)=2.3519,FORM(2,4)=0.800,FORM(3,4)=1.0598,MESH(4)=6,
      FORM(1,5)=1.9872,FORM(2,5)=0.0 ,FORM(3,5)=1.0598,MESH(5)=6,
      NPFI=9,          NNPHI=8,          &END
&PORTDT NP=0,                                     &END----- ⑥
&GLDT IX=3, IY=5,                                &END ----- ⑦
&PHYSDT RO=2.586, ASIGMA=1.29E-6, AD=6.5E-2, BRO=7.72,
      BSIGMA=1.29E-6, BD=2.7E-3, IAOPT=0,BSIG2F=1.45, ----- ⑧
      NNSS=1,IBLL=1,IBS(1)=3,                    &END
&LPOPT IPSK=0,IPK=0,IPETA=0,IPVEC=0,IPVEJ=0,    &END ----- ⑨
&GPOPT IPLTEV=1,IPLTJE=1,IGPCP(1)=0,IGPOL(1)=1, &END
&GPOPT1 IPLOT(1,1)=1,IPLOT(2,1)=1,IPLOT(3,1)=1,IPLOT(4,1)=1,
      INLP(1,1)=8,INLP(2,1)=6,
      INLPC(1,1,1)=1,INLPC(1,2,1)= 2,
      INLPC(2,1,1)=2,INLPC(2,2,1)= 5,
      INLPC(3,1,1)=3,INLPC(3,2,1)= 8,
      INLPC(4,1,1)=4,INLPC(4,2,1)=11,
      INLPC(5,1,1)=5,INLPC(5,2,1)=14,
      INLPC(6,1,1)=6,INLPC(6,2,1)=17,
      INLPC(7,1,1)=7,
      INLPC(8,1,1)=8,
&MODOUT ISMD=1,IEMD=25,                          &END
&FILNAM FNAMDP='J****.#ODD.VSLMC.DATA',
      FNAMGP='J****.ODD.GPCP4.DATA',
      FNAMWK='J****.ODD.EDTO5.DATA',USERID='J****', &END ----- ⑪
//      EXPAND GRNLP
/*
++
//

```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュール ID の指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ リスタートオプションの入力
- ⑤ メッシュデータの入力
- ⑥ ポート穴の入力
- ⑦ 数値積分データの入力
- ⑧ 物性値, ベローズ部の入力
- ⑨ プリント出力の指定
- ⑩ プロット出力の指定
- ⑪ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は、プログラム内で自動的に処理される)

(2) 入力の説明

Namelist名	変数	タイプ	説明
JOBNAM	JTITLE(2) IPARTY	文字定数 整数	本問題のタイトルで、80語以内の任意の名称を与える。 電流関数のパリティ (デフォルト値=0) $\begin{cases} =0 & : \text{odd} \\ =1 & : \text{even} \end{cases}$
RSTOPT	IRST	整数	リスタートオプションで、詳しくは3.2節(構成と機能)を参照すること。 $\begin{cases} =-2 & : \text{EMIDECプログラムのためにファイルにダンプする。} \\ =2 & : \text{作成済みのファイルを用いたリスタートを行う。} \\ \text{その他} & : \text{通常の実行を行い、ファイル作成しない。} \end{cases}$
MESHDT	R(10) IPOINT	実数 整数	接続点間をメッシュ分割する際、分割点をr座標(単位はm)の入力により与える場合の入力用作業領域である(断面の分割方法についての詳細は、入力変数 MESH, FORM の説明を参照すること)。 トラス導体の断面形状を与える接続点の数

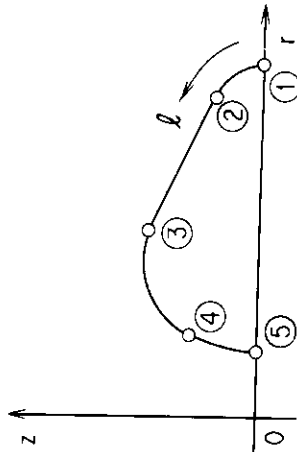


Fig. 3.3 Cross-sectional view of the upper half of a torus. Here, ① means the number of the n-th contacting point. The l is the length measured along the cross-section from the outermost point of torus.

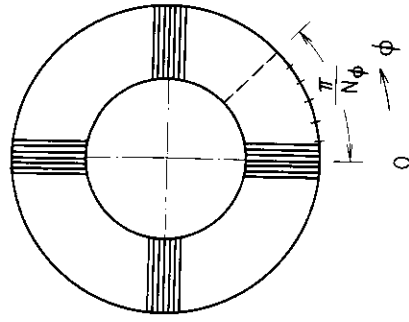


Fig. 3.4 Top view of the torus. The minimum area in the ϕ -direction is located at $[0, \pi/N_\phi]$. Here, the symmetry and periodicity in the ϕ -direction are given for the case $N_\phi=2$.

Name/ist. 名	変数	タイプ	説明
NPHI	整数	数	<p>トーラス導体の対称性: N_ϕ</p>
NNPHI	整数	数	<p>ϕ 方向の分割の仕方</p> <p>ϕ 方向の計算対象領域を N ($=NNPHI$) 分割すると, メッシュ点としては $N+1$ となる。Fig. 3.3, Fig. 3.4 の例では</p> $\left. \begin{array}{l} IPOINT = 5 \\ NPHI = 4 \\ NNPHI = 6 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{(始点, 終点も含む)} \\ \phi \text{ 方向のメッシュ点が決まる。} \end{array}$ <p>である。</p> <p>接続点の r, z 座標と曲率半径 r (ただし, 直線の場合は 0.0 とする), および接続点間の分割条件を与える入力データで, この入力データにより ℓ 方向のメッシュ点諸量が決まる。</p> <p>i) FORM(8, 40), MESH(40)</p> <p>FORM(1, N) : 接続点の r 座標 (単位は m)</p> <p>FORM(2, N) : 接続点の z 座標 (単位は m)</p> <p>FORM(3, N) : 前の接続点からこの接続点までの曲率半径 r (単位は m)</p> <p>円弧を与える条件 $r > 0$ の場合, トーラス赤道面からみて円弧が常に円になるようにプログラム内で算出される。</p> <p>MESH(N) : 前の接続点からこの接続点までの分割条件</p> <p>ii) 接続点間の分割方法には次の 2通りがある。</p> <p>1) 接続点間の ℓ に沿って等分割する。</p> <p>2) 接続点間の分割点の r 座標を入力する。</p> <p>これを指定する方法は, 1) の場合 MESH(N) を正に, 2) の場合 MESH(N) を負にする。ここで, 接続点が必要メッシュ点となるため, MESH(N) は接続点 $N-1$ から N の接続点間の分割条件に対応する。いま M</p>

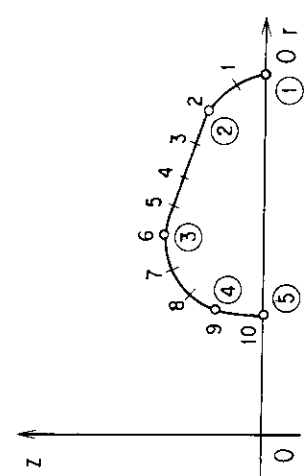
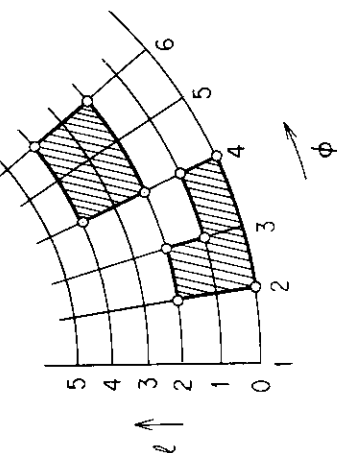
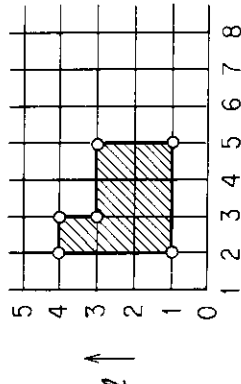
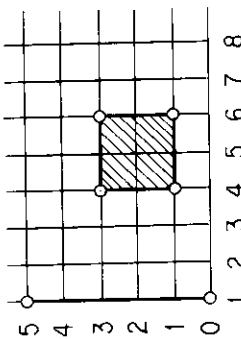
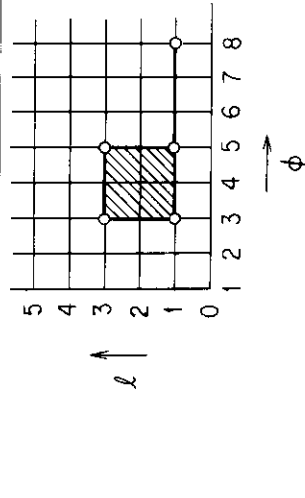
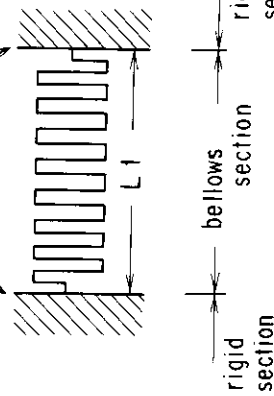
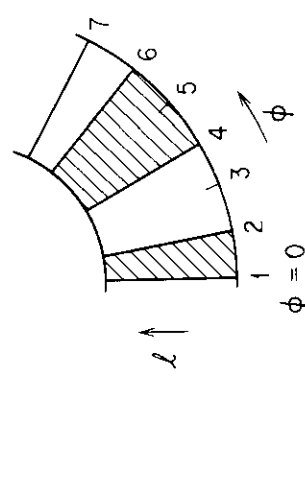
Namelist名	変数	タイプ	説明																														
PORTDT	NP	整数	<p>ポルト穴の個数 (最大5個)</p> <p>Fig. 3.6に NP=2 の場合の例を示す。</p>																														
			<p>=MESH(N) (N>1) とすると, M =1 のときその接続点間は1つのメッシュ幅となり, M >1 かつ M>0 ならその接続点を M 等分し, 接続点を除くと M-1 点のメッシュ幅が求まる。次に, M >1 かつ M<0 なら M -1 個のメッシュ幅の r 座標が必要となる。始点, 終点を含む接続点の数を N とすると, 始点を含めて</p> $l \text{ 方向の分割点} = \sum_{i=1}^{2N} MESH(D) + 1,$ <p>である。</p> <p>一方, 2) の場合には先の R(40) の入力が必要である。例を Fig. 3.5 に示す。接続点は5つで, ①-⑤を等分割 (2等分割), ②-③を分割指定 (4分割), ③-④を等分割 (3等分割), ④-⑤を等分割 (1等分割) する。この場合, 接続点番号②と③の間の分割に関して, 4-1=3 個の r 座標の入力が必要である。</p> <div style="text-align: center;">  <table border="1" data-bbox="782 385 1069 771"> <thead> <tr> <th>①</th> <th>r</th> <th>z</th> <th>γ</th> <th>MESH</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>r₁</td> <td>z₁</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>r₂</td> <td>z₂</td> <td>γ₂</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>r₃</td> <td>z₃</td> <td>0.0</td> <td>-4</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>r₄</td> <td>z₄</td> <td>γ₄</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>r₅</td> <td>z₅</td> <td>γ₅</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> </div>	①	r	z	γ	MESH	①	r ₁	z ₁	x	x	②	r ₂	z ₂	γ ₂	2	③	r ₃	z ₃	0.0	-4	④	r ₄	z ₄	γ ₄	3	⑤	r ₅	z ₅	γ ₅	1
①	r	z	γ	MESH																													
①	r ₁	z ₁	x	x																													
②	r ₂	z ₂	γ ₂	2																													
③	r ₃	z ₃	0.0	-4																													
④	r ₄	z ₄	γ ₄	3																													
⑤	r ₅	z ₅	γ ₅	1																													

Fig. 3.5 Method for the mesh generation along the l-direction and the input data table.
 Here, ① means the number of n-th contacting point and n the index number of the generated mesh point.

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
	NPC(5)	整数	ポータ穴指定のための頂点の数	
	INVERT(2, 20)	整数	頂点の節点番号(i ; j)で、複数のポータ穴の場合連続して入力する。 INVERT(1, N): ℓ 方向の節点番号 i INVERT(2, N): ϕ 方向の節点番号 j	
			ポータ穴が四角形を超える多角形の場合は、四角形の集合として入力する必要がある。例を Fig. 3.7, Fig. 3.8 および Fig. 3.9 にあけるが、INVERT は NP 個分の NPC との対で連続に入力する。	<p>Fig. 3.6 Example of mesh division for the case with two port-holes (NP=2).</p>
			例 1 の場合 (Fig. 3.7 参照)	
			四角形の集合で表わす方は一意ではないが、どの取り方でもよい。ただし、頂点の入力については各々閉じた四角形として順に入力する必要がある。	
				
				
				<p>Fig. 3.7 Example #1 of mesh division for a polygonal hole: NP=1; NPC=8; INVERT=(1, 2), (1, 3), (4, 3), (4, 2), (1, 3), (1, 5), (3, 5) and (3, 3).</p>
				<p>Fig. 3.8 Example #2 of mesh division for a square hole and a cut isolated each other: NP=2; NPC=2; INVERT=(0, 1), (0, 5), and NPC=4; INVERT=(1, 4), (1, 6), (3, 6) and (3, 4).</p>

Namelist名	変数	タイプ	説明	明
			<p>例2の場合 (Fig. 3.8 参照) 線状の電氣的絶縁のように、直線としてのポータ穴の入力が可能である。</p> <p>例3の場合 (Fig. 3.9 参照) 直線と四角形の集合として入力するとき、頂点の数は必ず6または4の倍数+2となる。プログラムの制約から先に直線情報を入力する必要がある。</p>	 <p>Fig. 3.9 Example #3 of mesh division for the hole consists of a rectangle and a cut: NP=1; NPC=6; INVERT=(1, 5), (1, 8), (1, 3), (1, 5), (3, 5) and (3, 3).</p>
GLDT	IX IY	整数 整数	<p>Gauss-Legendre 積分の積分点数 (ϕ 方向の積分点数) Gauss-Legendre 積分の積分点数 (l 方向の積分点数) Gauss-Legendre 積分の積分点数は2~10 データ点の範囲内である。入力が2未満なら2, 10を超えるとき10を採用する。</p>	
PHYSDT	R0 ASIGMA BSIGMA AD BD BR0 IAOPT BSIG2F	実数 実数 実数 実数 実数 実数 整数 実数	<p>r_0: トラス導体のポロイダル断面中心の半径 (単位は m) η_a: 厚肉部の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot m$) η_b: ベローズ部の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot m$) d_a: 厚肉部の厚さ (単位は m) d_b: ベローズ部の厚さ (単位は m) f_b: ベローズ部の異方抵抗の係数 (Fig. 3.10 参照) I_a: r 座標による厚肉部の抵抗分布を考慮するか否かのオプション (=0: 考慮しない, =1: 考慮する) f_{bb}: ワンターン抵抗修正係数</p>	

Name/ist名	変数	タイプ	説明
NNSS	整数	数	ベローズと厚肉境界の数
IBLL	整数	数	ベローズ・厚肉か厚肉・ベローズかのφ方向の順序を指定するパラメータ
IBS(20)	整数	数	ベローズ・厚肉境界の位置を与えるφ方向メッシュ点番号
			i) R0, ASIGMA, BSIGMA, AD, BD, IAOPT, BSIG2Fについて 1) 厚肉部 σ_a を面導電率 (= d/η) とすると、以下のように与えられる。 $\begin{cases} \text{IAOPT} = 0 : (\sigma_a)_\ell = (\sigma_a)_\phi - \sigma_a \\ \text{IAOPT} = 1 : (\sigma_a)_\ell = (\sigma_a)_\phi - \sigma_a \cdot (r/r_0) \end{cases}$
			2) ベローズ部 ベローズ部の異方抵抗の係数 f_b は Fig. 3.10 に示すように、次のように決定される。 σ_b を面導電率 (= d/η) とし、 $f_b = L2/L1$ とすると、 $\begin{cases} \sigma_\phi = \sigma_b \frac{f_{bb}}{f_b} \left(\frac{r}{r_0} \right), \\ \sigma_\ell = \sigma_b f_b \left(\frac{r_0}{r} \right), \end{cases}$
			 <p>Fig. 3.10 Cross-section of the bellows section: The L1 denotes the distance between neighboring rigid sections and the L2 the length measured along the cross-section of bellows.</p>
			ii) NNSS, IBLL, IBS(20) について NNSS > 0 のときベローズと厚肉の境界が存在するが、NNSS = 0 のときは存在しない。Fig. 3.11 に示す例ではベローズ・厚肉境界の数は3で、

NameList名	変数	タイプ	説明	明
			<p> $\begin{cases} \text{IBLL}=1: \text{ベローズ・厚肉の順} \\ \text{IBLL}=0: \text{厚肉・ベローズの順} \end{cases}$ であるため、いまの場合 $\text{IBLL}=1$ である。更に、ベローズと厚肉の境界数は3であるため、ϕ 方向メッシュ番号 IBS は3つ必要となる。NNSS=0 のとき $\begin{cases} \text{IBLL}=1: \text{全てベローズ} \\ \text{IBLL}=0: \text{全て厚肉} \end{cases}$ である。 </p>	 <p>Fig. 3.11 Example of the boundary of bellows and rigid sections: The bellows sections are shown hatched. Here, the input parameters are given as NNSS=3; IBLL=1; IBS(1)-2, IBS(2)-4 and IBS(3)=6.</p>
LPOPT	<p>IPSK 整数</p> <p>IPK 整数</p> <p>IPETA 整数</p> <p>IPVEC 整数</p> <p>IPVEJ 整数</p> <p>IOUT(10) 整数</p>	<p>プリント出力のオプションで、以下の全ての変数に対して、共通に</p> <p> $\begin{cases} =0: \text{プリントしない。} \\ =1: \text{プリントする。} \end{cases}$ である。 </p>	<p> $\{M\}$ の計算の元となる1次独立な有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ に対する値 $K'_{ij, km}$ の出力の有無 (ただし、リストアートオプション IRST が0以下の場合のみ有効で、このときラインプリンターに出力される)。 マトリクス $\{M\}$ の $K_{ij, km}$ の出力の有無 マトリクス $\{R\}$ の $R_{ij, km}$ の出力の有無 固有ベクトルの出力の有無 電流密度 J_ϕ, J_θ の出力の有無 固有値問題が正しく解けたか否かの判定のため、モード行列 $\{\phi\}$ に対してマトリクス $\{\phi\}^T$ を出力する。このためのオプションで、IOUT(1)のみを使用する。ただし、常にデフォルト値=0である。 </p>	

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
GPOPT	IPLTEV	整数	数	<p>等高線図および電流密度 J_ϕ、J_θ の 1 次元プロット出力のためのオプション 固有ベクトルの等高線図を描くためのファイナル (FORTRAN 論理機番 11) への出力の有無を指定する入力パラ メータである。ただし、等高線図を出力プロットする際には、オフラインの 'GPCP' プログラム³⁰⁾を使用する。</p> <p> $\begin{cases} =0 & : \text{プロットしない (等高線図を描かない)} \\ =1 & : \text{プロットする (等高線図を描く)} \end{cases}$ </p>
	IPLTJE	整数	数	<p>電流密度 J_θ、J_ϕ の 1 次元プロットの有無</p> <p> $\begin{cases} =0 & : \text{プロットしない} \\ =1 & : \text{プロットする} \end{cases}$ </p>
	IGPOL(10)	整数	数	<p>等高線図を描くにあたり、特に θ 方向のメッシュ幅が大きく異なる場合には、満足した等高線図を得られない ため、Gauss-Legendre 数値積分における Legendre 多項式の零点上の値を用い補間を行う必要がある。これを 行うか否かのオプションで、IGPOL(1) のみを使用する。</p> <p> $\begin{cases} =0 & : \text{補間を取らない} \\ =1 & : \text{補間を取る} \end{cases}$ </p>
	NZLVL	整数	数	<p>等高線図の Z 方向の線数 (デフォルト値 = 10)</p> <p>この NZLVL は、電流関数 V_{ij} を Z_{ij} としたとき、等高線図の間隔 ΔZ を</p> $\Delta Z = \frac{Z_{ij} \downarrow_{\max}}{\text{NZLVL}} \approx 1, 2, 5 \times 10^n, \quad (n: \text{整数})$ <p>のように規格化して、プログラム内で再定義される。結局、最大 $2 \cdot \text{NZLVL} - 1$ 本の等高線図が得られる。</p>
	GPCPSZ	実数	数	<p>同作図寸法 (単位は cm) (デフォルト値 = 20.0 cm)</p>
	IGPCP(10)	整数	数	<p>等高線図の次の出力形式を指定するパラメータで、IGPCP(1) のみを使用する (デフォルト値 = 0)。</p> <p> $\begin{cases} =0 & : \text{投影図} \\ =1 & : \text{展開図} \end{cases}$ </p>

Namelist名	変数	タイプ	説明
GPOPT1	IPLOT(4, 10)	整数	<p>電流密度 J_ϕ, J_ϕ の 1 次元プロットのためのパラメータで, IPLOT(4, 1), INLP(2, 1), INLPC(40, 2, 1) は EDTDEC プログラムでは I=1 のみを使用する。</p> <p>IPLOT(1, 1) : $J_{\phi-l}$ のプロット制御</p> <p>IPLOT(2, 1) : $J_{\phi-l}$ のプロット制御</p> <p>IPLOT(3, 1) : $J_{\phi-\phi}$ のプロット制御</p> <p>IPLOT(4, 1) : $J_{\phi-\phi}$ のプロット制御</p> <p>INLP(1, 1) : x 軸が l の図 J_ϕ, $J_{\phi-l}$ のときの ϕ パラメータの数</p> <p>INLP(2, 1) : x 軸が ϕ の図 J_ϕ, $J_{\phi-\phi}$ のときの l パラメータの数</p> <p>INLPC(N, 1, 1) : ϕ パラメータのメッシュ番号 ($1 \leq N \leq \text{INLP}(1, 1)$)</p> <p>INLPC(N, 2, 1) : l パラメータのメッシュ番号 ($1 \leq N \leq \text{INLP}(2, 1)$)</p>
MODOUT	ISMD IEMD	整数 整数	<p>電流密度 J_ϕ, J_ϕ の 1 次元プロットおよび等高線図プロットの際の出力モードの開始と終了番号</p> <p>開始番号</p> <p>終了番号</p>
FILNAM	FNAMDP FNAMGP FNAMWK USERID	文字定数 文字定数 文字定数 文字定数	<p>本問題で使用するファイル名およびユーザーID(全てのファイルの割当て開設はIPFコマンドにより行われる)。</p> <p>EMIDEC用(同時にリスタート用)ファイルの名称であり, 45語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。</p> <p>等高線図プロットのため, 'GPCP' プログラム³⁰⁾で使用するファイルの名称であり, 45語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。</p> <p>作業用ファイルの名称で同じく 45語以内。</p> <p>ユーザーのID名で (=J×××××) のように 5語以内である。ファイル名は 'J×××××.○○○○○○○○.DATA' のように入力する。</p>

3.3.2 EM1DEC プログラム

(1) ジョブ制御文

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER *****,*****
    I.1 C.3 W.0 I.4 P.0 SRP
    OPTP PASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****,*****',Q='FORI77'
- G AAA,MODID=(EM1DEC,ESHARE) -----
- PUT AAA,OUT=OUTDD
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORI77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=0,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)',
//      DYNAMNBR=10
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//        DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06FO01 DD SYSOUT=*
//FT05FO01 DD *
&JOBNAM ITITLE='MODE REDUCTION OF JT-60 MULTI TORUS SYSTEM',
&PARTY=0 ,
&RSTOPT IRST=1,
&CONDDT NCOND =1,
        NCOIL =4,
&LPOPT IOUT(1)=0,
&DELET EPS =6.300E-3,MDLIMT(1)= 1,MDLIMT(2)= 20,
        MDLIMT(3)= 10,MDLIMT(4)= 20,
        MDLIMT(5)= 20,MDLIMT(6)= 20,
        MDLIMT(7)= 20,MDLIMT(8)= 1,
        MDLIMT(9)= 1,MDLIMT(10)= 1, &END
&COILST NB(1)=13,NB(2)=11,NB(3)=5,NB(4)=2,
        CR( 1,1)=5.01 ,CZ( 1,1)=0.5 ,CTURN( 1,1)= 1.0,
        CR( 2,1)=3.75 ,CZ( 2,1)=1.477 ,CTURN( 2,1)= 3.0,
        CR( 3,1)=2.73 ,CZ( 3,1)=1.485 ,CTURN( 3,1)= 3.0,
        CR( 4,1)=2.26 ,CZ( 4,1)=1.34 ,CTURN( 4,1)= 3.0,
        CR( 5,1)=2.0 ,CZ( 5,1)=1.122 ,CTURN( 5,1)= 3.0,
        CR( 6,1)=1.83 ,CZ( 6,1)=0.925 ,CTURN( 6,1)= 2.0,
        CR( 7,1)=1.725 ,CZ( 7,1)=0.7515,CTURN( 7,1)= 3.0,
        CR( 8,1)=1.664 ,CZ( 8,1)=0.615 ,CTURN( 8,1)= 2.0,
        CR( 9,1)=1.616 ,CZ( 9,1)=0.506 ,CTURN( 9,1)= 2.0,
        CR(10,1)=1.58 ,CZ(10,1)=0.398 ,CTURN(10,1)= 2.0,
        CR(11,1)=1.556 ,CZ(11,1)=0.292 ,CTURN(11,1)= 2.0,
        CR(12,1)=1.54 ,CZ(12,1)=0.186 ,CTURN(12,1)= 2.0,
        CR(13,1)=1.531 ,CZ(13,1)=0.08 ,CTURN(13,1)= 2.0,
        CR( 1,2)=4.982 ,CZ( 1,2)=0.7185,CTURN( 1,2)=-3.0,
        CR( 2,2)=4.864 ,CZ( 2,2)=0.7185,CTURN( 2,2)=-5.0,
        CR( 3,2)=3.9485,CZ( 3,2)=1.554 ,CTURN( 3,2)=-6.0,
        CR( 4,2)=3.75 ,CZ( 4,2)=1.761 ,CTURN( 4,2)=-2.0,
        CR( 5,2)=2.26 ,CZ( 5,2)=1.105 ,CTURN( 5,2)= 4.0,
        CR( 6,2)=2.044 ,CZ( 6,2)=0.901 ,CTURN( 6,2)= 2.0,
        CR( 7,2)=1.925 ,CZ( 7,2)=0.673 ,CTURN( 7,2)= 2.0,
        CR( 8,2)=1.905 ,CZ( 8,2)=0.6055,CTURN( 8,2)= 1.0,
        CR( 9,2)=1.863 ,CZ( 9,2)=0.537 ,CTURN( 9,2)= 2.0,
    
```

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧

```

CR(10,2)=1.767 ,CZ(10,2)=0.201 ,CTURN(10,2)= 2.0,
CR(11,2)=1.755 ,CZ(11,2)=0.088 ,CTURN(11,2)= 3.0,
CR( 1,3)=4.727 ,CZ( 1,3)=0.7335,CTURN( 1,3)= 5.0,
CR( 2,3)=4.106 ,CZ( 2,3)=1.575 ,CTURN( 2,3)=-5.0,
CR( 3,3)=2.730 ,CZ( 3,3)=1.71 ,CTURN( 3,3)=-4.0,
CR( 4,3)=1.799 ,CZ( 4,3)=0.409 ,CTURN( 4,3)= 2.0,
CR( 5,3)=1.775 ,CZ( 5,3)=0.329 ,CTURN( 5,3)= 2.0,
CR( 1,4)=4.54 ,CZ( 1,4)=0.0 ,CTURN( 1,4)= 8.0,
CR( 2,4)=4.14 ,CZ( 2,4)=0.35, ,CTURN( 2,4)=-4.0, &END
&FILNAM FNAMIN( 1)='J****.#ODD.VESSELMC.DATA',
FNAMDP( 1)='J****.#ORD.VESSELMC.DATA',
USERID   ='J****', &END] ----- ⑨
/*
++
//

```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュール ID の指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ リスタートオプションの入力
- ⑤ トラス導体数, 外部コイルシリーズ数の入力
- ⑥ プリント出力の指定
- ⑦ モード縮小のためのデータ入力
- ⑧ 外部コイルシリーズの座標, ターン数等の諸量の入力
- ⑨ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は, プログラム内で自動的に処理される)

(2) 入力の説明

Namelist 名	変数数	タイプ	説明	明
JOBNAM	ITITLE(2)	文字定数	本問題のタイトルで、80 語以内の任意の名称を与える。	
	IPARTY	整数	電流関数のパリティ (デフォルト値=0) $\begin{cases} =0 & : \text{ odd} \\ =1 & : \text{ even} \end{cases}$	
RSTOPT	IRST	整数	モード縮小処理後のデータをファイルダンプするか否かのオプション (デフォルト値=0) $\begin{cases} =-0 & : \text{ しない。} \\ \neq 0 & : \text{ する。} \end{cases}$	
CONDDT	NCOND	整数	トーラス導体数: N_t (10 以下)	
	NCOIL	整数	可制御性チェックをする際に必要なアクチュエータ (外部コイル) の数で、50 以下である。NCOIL=0 と入力した場合には、モード縮小処理をしない、またファイルのダンプもしない。	
LPOPT	IOUT(10)	整数	トーラス導体のメッシュ数およびモードデータなどのプリントオプションである。第1トーラス導体に対して $\text{IOUT}(1) \begin{cases} \leq 0 & : \text{ プリントしない。} \\ = 1 & : \text{ トーラス導体のメッシュ数をプリントする。} \\ \geq 2 & : \text{ トーラス導体のメッシュ数および縮小処理後のモードデータをプリントする。} \end{cases}$	
DELET	EPS	実数	全トーラス導体に対し共通の可制御性の判定基準値 ϵ	
	MDLIMIT(10)	整数	縮小対象とならない最大モード番号で、可制御性チェックによるモード縮小はこれより高次のモードに対して処理が実行される。第1トーラス導体に対して、MDLIMIT(1)のように順に入力する (デフォルト値=0)。対応するトーラス導体のモード次数よりも大きな値を入力したときは、モード次数に置き換えられる (このときモード縮小処理を実施しない)。	
COILST	NB(50)	整数	外部コイルシリーズのブロック数	

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
	CR(50, 50) CZ(50, 50) CTURN(50, 50)	実数 実数 実数	第 J シリーズ第 I ブロックの中心 R 座標 (単位は m) 第 J シリーズ第 I ブロックの中心 Z 座標 (単位は m) 第 J シリーズ第 I ブロックのターン数	
FIL.NAM	FNAMIN(10) FNAMDP(10) USERID	文字定数 文字定数 文字定数	オリジナルファイルの名称で, 45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。 ダンプ用ファイルの名称で, 45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。 ユーザーの ID 名で (=J×××××) のように 5 語以内である。ファイル名は 'J×××××.○○○○.DATA' のように入力する。	

3.3.3 EM2DEC プログラム

〔1〕 ジョブ制御文

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER *****
      T.12 C.3 W.7 I.9 P.0 SRP LRG
      OPTP PASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****.*****',Q='.FORT77'
- G AAA,MODID=(EM2DEC,ESHARE) ----- ①
- PUT AAA,OUT=OUTDD ----- ②
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=0,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE',
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)',
//      DYNAMNBR=15
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&JOBNAM ITITLE='MAGNETIC COUPLING(CG) IN JT-60 MULTI TORUS SYSTEM', } ----- ③
      IPARTY=0,&END ----- ④
&CONDDT NCOND=10,&END
&BLKOPT IJBLCK(1, 2)=1,IJBLCK(1, 3)=1,IJBLCK(1, 4)=1,IJBLCK(1, 5)=1,
      IJBLCK(1, 6)=1,IJBLCK(1, 7)=1,IJBLCK(1, 8)=1,IJBLCK(1, 9)=1,
      IJBLCK(1,10)=1,IJBLCK(2, 3)=1,IJBLCK(2, 4)=1,IJBLCK(2, 5)=1,
      IJBLCK(2, 6)=1,IJBLCK(2, 7)=1,IJBLCK(2, 8)=1,IJBLCK(2, 9)=1,
      IJBLCK(2,10)=1,IJBLCK(3, 4)=1,IJBLCK(3, 5)=1,IJBLCK(3, 6)=1,
      IJBLCK(3, 7)=1,IJBLCK(3, 8)=1,IJBLCK(3, 9)=1,IJBLCK(3,10)=1,
      IJBLCK(4, 5)=1,IJBLCK(4, 6)=1,IJBLCK(4, 7)=1,IJBLCK(4, 8)=1,
      IJBLCK(4, 9)=1,IJBLCK(4,10)=1,IJBLCK(5, 6)=1,IJBLCK(5, 7)=1,
      IJBLCK(5, 8)=1,IJBLCK(5, 9)=1,IJBLCK(5,10)=1,IJBLCK(6, 7)=1,
      IJBLCK(6, 8)=1,IJBLCK(6, 9)=1,IJBLCK(6,10)=1,IJBLCK(7, 8)=1,
      IJBLCK(7, 9)=1,IJBLCK(7,10)=1,IJBLCK(8, 9)=1,IJBLCK(8,10)=1,
      IJBLCK(9,10)=1, ----- ⑤
      MFLAG(1, 2)=1,MFLAG(1, 3)=1,MFLAG(1, 4)=1,MFLAG(1, 5)=1,
      MFLAG(1, 6)=1,MFLAG(1, 7)=1,MFLAG(1, 8)=1,MFLAG(1, 9)=1,
      MFLAG(1,10)=1,MFLAG(2, 3)=1,MFLAG(2, 4)=1,MFLAG(2, 5)=1,
      MFLAG(2, 6)=1,MFLAG(2, 7)=1,MFLAG(2, 8)=1,MFLAG(2, 9)=1,
      MFLAG(2,10)=1,MFLAG(3, 4)=1,MFLAG(3, 5)=1,MFLAG(3, 6)=1,
      MFLAG(3, 7)=1,MFLAG(3, 8)=1,MFLAG(3, 9)=1,MFLAG(3,10)=1,
      MFLAG(4, 5)=1,MFLAG(4, 6)=1,MFLAG(4, 7)=1,MFLAG(4, 8)=1,
      MFLAG(4, 9)=1,MFLAG(4,10)=1,MFLAG(5, 6)=1,MFLAG(5, 7)=1,
      MFLAG(5, 8)=1,MFLAG(5, 9)=1,MFLAG(5,10)=1,MFLAG(6, 7)=1,
      MFLAG(6, 8)=1,MFLAG(6, 9)=1,MFLAG(6,10)=1,MFLAG(7, 8)=1,
      MFLAG(7, 9)=1,MFLAG(7,10)=1,MFLAG(8, 9)=1,MFLAG(8,10)=1,
      MFLAG(9,10)=1,
      &END
&LPOPT IOUT(1)=1, ----- ⑥
&FILNAM FNAMIN( 1)='J****.#ORD.VESSEL.MC.DATA',
      FNAMIN( 2)='J****.#ORD.PFCS.DATA',
      FNAMIN( 3)='J****.#ORD.CC.DATA',
      FNAMIN( 4)='J****.#ORD.TFCJB.DATA',
      FNAMIN( 5)='J****.#ORD.TFC1.DATA',
      FNAMIN( 6)='J****.#ORD.TFC2.DATA',
      FNAMIN( 7)='J****.#ORD.TFC3.DATA',
      FNAMIN( 8)='J****.#ORD.BASE.DATA', ----- ⑦

```

```
FNAMIN( 9)='J****.#ORD.SUPO401.DATA',  
FNAMIN(10)='J****.#ORD.SUPO402.DATA',  
FNAMDP='J****.#ODD.JT60IMP.DATA',  
FNAMRS='J****.#ODD.JT60IMP.DATA',  
USERID='J****', &END  
/*  
**  
//
```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュール ID の指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ トラス導体数の入力
- ⑤ リスタート処理, 数値積分法の指定
- ⑥ プリント出力の指定
- ⑦ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は, プログラム内で自動的に処理される)

〔2〕 入力の説明

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
JOBNAM	ITITLE(2) IPARTY	文字定数 整数	本問題のタイトルで、80 語以内の任意の名称を与える。 電流関数のパリティ (デフォルト値=0) $\begin{cases} =0 & : \text{ odd} \\ =1 & : \text{ even} \end{cases}$	
CONDDT	NCOND	整数	トーラス導体数: N_t (10 以下)	
BLKOPT	IJBLOCK(10, 10)	整数	モード間結合の計算処理の実行と、ファイルの参照またはダンプなどを制御する処理パラメータ モード間結合の計算処理の実行と、ファイルの参照またはダンプなどを制御する処理パラメータ $\begin{cases} =0 & : \text{ 当該ブロック}(i, j)\text{ に対し, ファイルからの読取りもこれの書込みも計算も実行しない。} \\ =1 & : \text{ 当該ブロック}(i, j)\text{ に対し, モード間結合を計算し, FORTRAN 論理機番 IF11 に計算結果を書込む。} \\ =2 & : \text{ 当該ブロック}(i, j)\text{ に対し, ファイル (FORTRAN 論理機番 IF12) からデータを読取り, これをファイル (FORTRAN 論理機番 IF11) に書込む。} \\ =3 & : \text{ 当該ブロック}(i, j)\text{ に対し, すでにファイル (FORTRAN 論理機番 IF12) に記憶されている内容を新たに計算した結果に置き換える。これらは, ファイル (FORTRAN 論理機番 IF11) に書込まれる。} \end{cases}$ IJBLOCK(I, J) ブロック (i, j) とは, 第 i トーラス導体と第 j トーラス導体 (j>i) とのモード間結合を表す上三角非対角ブロック行列をいう (Fig. 2.16 参照)。 2 重表面積分の数値積分方法を指定するパラメータ (デフォルト値 0) $\begin{cases} =0 & : \text{ Gauss Legendre 積分} \\ =1 & : \text{ 重心近似} \end{cases}$	
LPOPT	IOUT(10)	整数	モード間結合のブロック行列をプリントするためのオプションで, IOUT(1)のみを使用する。	

Namelist名	変数	タイプ	説明
			<p>{ =0 : プリントしない。 =1 : プリントする。</p>
FILNAM	FNAMIN(10) FNAMDP(10) USERID	文字定数 文字定数 文字定数	<p>本問題で使用するファイル名およびユーザーID (全てのファイルの割当て開設はIPFコマンドにより自動的に行われる)。 本問題を構成する必要な全てのトラス導体系毎の入力ファイル名で、トラス導体系順にトラス導体系必要である。45語以内のアルファベットおよび数字にて入力する。EMIDECプログラムにて使用したのと同じものでなければならぬ。 本問題により新たに創生されるファイルの名称で、45語以内のアルファベットおよび数字にて入力する。 ユーザーのID名で(=J××××)のように5語以内である。ファイル名はJ×××××.○○○○.DATAのように入力する。</p>

3.3.4 EM3DEC プログラム

(1) ジョブ制御文

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER ***** ,***** ,*****
    T.3 C.5 W.3 I.4 P.0 SRP GRP
    OPTP PASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****.*****',Q='.FORT77'
- C AAA,MODID=(EM3DEC,ESHARE) ----- ①
- PUT AAA,OUT=OUTDD ----- ②
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=2,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)',
//      DYNAMNBR=40
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&JOBNAM ITITLE= '25 MSEC JT-60 DISRUPTION ( 61.10.13 )',
    IPARTY=0,
    &END ----- ③
&RSTOPT IRST= 1,ICIT=-1,
    &END ----- ④
&CONDDT NCOND= 10,
    &END ----- ⑤
&COILD1 NE=27,NC=1,NB(1)=18,NB(2)=2,NB(3)=6,NB(4)=6,NB(5)=6,
    NB(6)=6,NB(7)=4,NB(8)=6,NB(9)=4,NB(10)=4,
    NB(11)=4,NB(12)=4,NB(13)=4,NB(14)=4,NB(15)=6,
    NB(16)=10,NB(17)=12,NB(18)=4,NB(19)=8,NB(20)=4,
    NB(21)=4,NB(22)=2,NB(23)=4,NB(24)=4,NB(25)=6,
    NB(26)=8,NB(27)=8,NB(28)=1,
    &END
&COILD2 CETA=2.232E-8,
    CRO(1)=6.4E-3,CRO(2)=0.0E-3,CRO(3)=0.0E-3,
    &END ----- ⑥
&COILD3 CR( 1,1)=4.727 ,CZ( 1,1)=0.8315,CTURN ( 1,1)= 1.0,
    CR( 2,1)=4.727 ,CZ( 2,1)=0.7825,CTURN ( 2,1)= 1.0,
    CR( 3,1)=4.727 ,CZ( 3,1)=0.7335,CTURN ( 3,1)= 1.0,
    CR(1,28)=3.03 ,CZ(1,28)=0.0 ,CTURN(1,28)=1.0,
    CA(1,28)=1.0 ,CB(1,28)=1.0
    &END
&REDUCT IRDOPT=0,EPS=0.0,
    &END ----- ⑦
&TIMEDT NTDIV=0,TIME(1)=1.0,TIME(2)=125.0E-3, TIME(3)=5.0E-3,
    CCONST(1,1,28)=2.7E6,CCONST(2,1,1 )=0.0,
    CCONST(3,1,28)=2.7E6,
    CCONST(4,1,28)=0.0 ,CCONST(5,1,1 )=0.0,
    CCONST(6,1,28)=25.0E-3,
    CCONST(7,1,28)=0.0,
    CCONST(8,1,28)=0.0,
    TSDIV(1)=0.00,TSDIV(2)=0.00,VEIN(1)=0.0,
    &END
&LPOPT IPK=0,IOUT(1)=0, IOUT(2)=0,IPVEC=0,IPVPT=0,
    IPVEJ=0,IPVPJ=1,
    &END ----- ⑧
&DMPOPT IDUMOP=1,IDMPS=1,IDNPE=20,IDMPI=1,
    &END ----- ⑨
    &END ----- ⑩

```

```

&GPOPT1 IPLTEV=0,IPLTVP=0,IPLTJE=0,IPLIJT=0,          &END
&GPOPT2 IGPCP(1)=0,IGPOL(1)=1,NZLVL=20,GPCPSZ=10.0,    &END
&GPOPT3 IPLOT(1,1)=1,IPLOT(2,1)=1,IPLOT(3,1)=1,IPLOT(4,1)=1,
INLP(1,1)=8,INLP(2,1)=6,
INLPC( 1,1,1)= 1,INLPC(1,2,1)=2,
INLPC( 2,1,1)= 2,INLPC(2,2,1)=5,
INLPC( 3,1,1)= 3,INLPC(3,2,1)=9,
INLPC( 4,1,1)= 4,INLPC(4,2,1)=12,
INLPC( 5,1,1)= 5,INLPC(5,2,1)=15,
INLPC( 6,1,1)= 6,INLPC(6,2,1)=18,
INLPC( 7,1,1)= 7,
INLPC( 8,1,1)= 8,
IPLOT(1,2)=1,IPLOT(2,2)=1,IPLOT(3,2)=1,IPLOT(4,2)=1,
INLP(1,2)=3,INLP(2,2)=6,
INLPC( 1,1,2)= 1,INLPC(1,2,2)=2,
INLPC( 2,1,2)= 2,INLPC(2,2,2)=5,
INLPC( 3,1,2)= 3,INLPC(3,2,2)=9,
INLPC( 4,2,2)=12,
INLPC( 5,2,2)=15,
INLPC( 6,2,2)=18,          &END
&MDOUT  ISMD=1,IEMD=2,          &END
&TMOUT  ISTM=2,IETM=25,IINT=2,  &END
&FILNAM FNAMIN(1)='J****.#ORD.VESSELMC.DATA',
FNAMIN(2)='J****.#ORD.PFCS.DATA',
FNAMIN(3)='J****.#ORD.CC.DATA',
FNAMIN(4)='J****.#ORD.TFCJB.DATA',
FNAMIN(5)='J****.#ORD.TFC1.DATA',
FNAMIN(6)='J****.#ORD.TFC2.DATA',
FNAMIN(7)='J****.#ORD.TFC3.DATA',
FNAMIN(8)='J****.#ORD.BASE.DATA',
FNAMIN(9)='J****.#ORD.SUPO401.DATA',
FNAMIN(10)='J****.#ORD.SUPO402.DATA',
FNAMMC='J****.#ODD.JT6OZ10.DATA',
FNAMDP='J****.TEST.TEST1.DATA',
FNAMGP='J****.GPCP12.DATA',
FNAMRS(1)='J****.#ODD.NAKAX1.DATA',
FNAMRS(2)='J****.#ODD.NAKAX2.DATA',
USERID='J****',          &END
EXPAND GRNLP
//
/*
**
//

```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュールIDの指定
- ③ ジョブ名, パリティの入力
- ④ リスタートオプション, 時間追跡の実行のための入力
- ⑤ トラス導体数の入力
- ⑥ 外部コイルシリーズの座標, ターン数, 物性値等の入力
- ⑦ モード縮小のための入力
- ⑧ 時間波形, 時間区分領域の分割等時間追跡のための入力
- ⑨ プリント出力の指定
- ⑩ FLDDEC プログラムによる磁場計算のためのファイル作成の指定
- ⑪ プロット出力の指定
- ⑫ ファイルの定義 (全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は, プログラム内で自動的に処理される)

〔2〕 入力の説明

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
JOBNAM	ITITLE(2)	文字定数	本問題のタイトルで、80 語以内の任意の名称を与える。	
	IPARTY	整数	電流関数のパリティ (デフォルト値 = 0) $\begin{cases} =0 & : \text{odd} \\ =1 & : \text{even} \end{cases}$	
RSTOPT	IRST	整数	リスタートオプション $\begin{cases} =0 & : \text{固有値問題を解き、このモード行列をダンプする (FORTRAN 論理機番 2)。} \\ =1 & : \text{モード行列データのファイル (FORTRAN 論理機番 2) を参照し処理を進める。} \end{cases}$	
	ICIT	整数	時間追跡処理のための入力オプション $\begin{cases} =0 & : \text{時間追跡しない。} \\ >0 & : \text{外部起電力係数の計算とこのファイルダンプ (FORTRAN 論理機番 13), 更に時間追跡処理を実施する。} \\ <0 & : \text{ファイル (FORTRAN 論理機番 13) から外部起電力係数を読み取り、時間追跡処理を実施する。} \end{cases}$	
CONDDT	NCOND	整数	トラス導体数: N_1 (10 以下)	
COILD1	NE	整数	外部受動コイルシリーズ数: N_c^e	
	NC	整数	外部能動コイルシリーズ数: N_c^e	
	NB(50)	整数	各コイルシリーズのブロック数 (最大は 50 ブロック) で、外部受動コイルシリーズから先に入力する。	
COILD2	CETA	実数	コイルの導体材料の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot m$)	
	CRO(50)	実数	コイルの外部抵抗 (Ω)	
	CL(50, 50)	実数	コイルの外部インダクタンス (H)	
COILD3	CR(50, 50)	実数	CR(I, J) で、第 J シリーズ、第 I ブロックの中心 R 座標 (単位は m)	

Namelist名	変数	タイプ	説明
	CZ(50, 50)	実数	CZ(L, Z)で、第Jシリーズ、第Iブロックの中心Z座標 (単位は m)
	CTURN(50, 50)	実数	CTURN(L, J)で、第Jシリーズ、第Iブロックのターン数
	CA(50, 50)	実数	CA(L, J)で、第Jシリーズ、第IブロックのR方向寸法 (単位は m)
	CB(50, 50)	実数	CB(L, J)で、第Jシリーズ、第IブロックのZ方向寸法 (単位は m)
REDUCT	IRDOPT	整数	可制御性チェックにより不可制御モードを除去するか否かの入力オプション (デフォルト値=0) $\begin{cases} \neq 0 & : \text{処理する。} \\ = 0 & : \text{処理しない。} \end{cases}$
	ESP	実数	除去処理する場合の不可制御判定値 ϵ (デフォルト値=0.0)
TIMEDT	NTDIV	整数	Fig. 3.12 に示すような外部起電力の時間波形が与えられる時間区分領域数 - 1 (最大3)
	TIME(3)	実数	TIME(1) : 時間追跡の開始時間 (sec) TIME(2) : 時間追跡の終了時間 (sec) TIME(3) : 時間追跡の境界時刻 (sec)
	TSDIV(3)	実数	時間区分領域の境界時刻 (sec)
	CCONST(8, 4, 50)	実数	CCONST(8, J, K)にて第Kコイルシリーズ、第J時間区分領域の時間波形を与えるパラメータを意味する。
	VEIN(50)	実数	VEIN(I)にて $t=0$ における第I外部受動コイルシリーズの起電力値を意味する。
LPOPT	IPK	整数	複合トラス導体系のジュール損失に対して規格化されたインダクタンス行列のプリントオプション (デフォルト値=0)

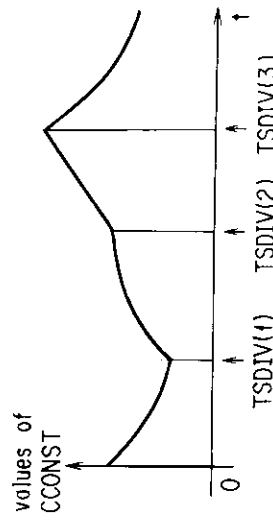


Fig. 3.12 Input parameter CCONST for the transient wave form of coil current or voltage. Time-domain $t \geq 0$ is partitioned into $NTDIV + 1$ subdomains. Time boundary is given by the input parameter TSDIV.

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
	IPVEC	整数	固有ベクトルのプリントオプション (デフォルト値=0)	<p>{ =0 : プリントしない。 { ≠0 : プリントする。</p> <p>{ >10 : 全トーラス導体の固有ベクトルをプリントする。 =導体番号 : 番号の一致するトーラス導体の固有ベクトルのみプリントする。 { =0 : 固有ベクトルをプリントしない。</p>
	IPVEJ	整数	固有モードの電流密度 J_b , J_ϕ のプリントオプション (デフォルト値=0)	<p>{ >10 : 全トーラス導体の電流密度をプリントする。 =導体番号 : 番号の一致するトーラス導体の電流密度をプリントする。 { =0 : 電流密度をプリントしない。</p>
	IPVPT	整数	時間追跡による電流関数のプリントオプション (デフォルト値=0)	<p>{ >10 : 全トーラス導体の電流関数をプリントする。 =導体番号 : 番号の一致するトーラス導体の電流関数をプリントする。 { =0 : 電流関数をプリントしない。</p>
	IPVPJ	整数	時間追跡による電流密度 J_b , J_ϕ のプリントオプション (デフォルト値=0)	<p>{ >10 : 全トーラス導体に対しプリントする。 =導体番号 : 番号の一致するトーラス導体に対してのみプリントする。 { =0 : プリントしない。</p>
	IOUT(10)	整数	IOUT(1): モード行列のプリントオプション (デフォルト値=0)	<p>{ =0 : プリントしない。 { ≠0 : プリントする。</p>

Namelist名	変数	タイプ	説明	明
			IOUT(2): { ϕ } ^T { ϕ } = {I} の正規直交性を確認するために、この結果をプリントする。このときのオペレーションである (デフォルト値=0)。 { =0 : プリントしない。 { ≠0 : プリントする。	
DMPOPT	IDUMOP	整数	FLDDDEC プログラムにより磁場計算を行うが、そのためにファイル (FORTRAN 論理機番 10) にダンプするか否かのオペレーション (デフォルト値=0)。 { =0 : ダンプしない。 { =1 : ダンプする。 ダンプ開始の時間ステップ番号 ダンプ終了の時間ステップ番号 ダンプする時間ステップ間隔	
GPOPT1	IPLTEV IPLTVP	整数 整数	固有ベクトルの等高線図を 'GPCP' プログラム ³⁰⁾ によりプロットするか否かの入/出オペレーションである (デフォルト値=0)。 { >10 : 全トラス導体の等高線図を描く。 { =導体番号 : 番号の一致するトラス導体のみ描く。 { =0 : 描かない。 時間追跡による電流関数の等高線図を 'GPCP' プログラム ³⁰⁾ によりプロットするか否かの入/出オペレーションである (デフォルト値=0)。 { >10 : 全トラス導体の等高線図を描く。 { =導体番号 : 番号の一致するトラス導体のみ描く。 { =0 : 描かない。	

Namelist 名	変数	タイプ	説明
IPLTJE	整数	数	固有モードの電流密度 J_b, J_ϕ の 1 次元プロットをするか否かの入力オプションである (デフォルト値 = 0)。 $\left\{ \begin{array}{l} > 10 : \text{全トラス導体に対してプロットする。} \\ \text{一導体番号} : \text{番号の一致するトラス導体に対してのみプロットする。} \\ = 0 : \text{プロットしない。} \end{array} \right.$
	整数	数	時間追跡による電流密度 J_b, J_ϕ の 1 次元プロットに関するオプションである (デフォルト値 = 0)。 $\left\{ \begin{array}{l} > 10 : \text{全トラス導体に対してプロットする。} \\ \text{一導体番号} : \text{番号の一致するトラス導体に対してのみプロットする。} \\ = 0 : \text{プロットしない。} \end{array} \right.$
GPOPT2	整数	数	等高線の Z 方向の線数 (デフォルト値 = 10) この NZLVL は、電流関数 V_{ij} を Z_{ij} としたとき、等高線の間隔 ΔZ を $\Delta Z = \frac{1}{NZLVL} Z_{ij}^{\max} \div 1, 2, 5 \times 10^n, \quad (n: \text{整数})$ のように規格化して、プログラム内で再定義される。結局、最大 $2 \cdot NZLVL - 1$ 本の等高線図が得られる。 同作図寸法 (単位は cm) (デフォルト値 = 20.0 cm) IGPCP(1) にて、第 1 トラス導体の等高線図の次の出力形式を指定する (デフォルト値 = 0)。 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{投影図} \\ = 1 : \text{展開図} \end{array} \right.$ 等高線図を描くにあたり、特に ℓ, ϕ 方向のメッシュ幅が大きく異なる場合には、満足した等高線図を得られないため、Gauss-Legendre 数値積分における Legendre 多項式の零点上の値を用い補間を行う必要がある。IGPCP(1) にて、第 1 トラス導体に対する補間の有無を意味する。 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{補間を取らない。} \\ = 1 : \text{補間を取る。} \end{array} \right.$

Namelist 名	変数	タイプ	説明
GPOPT3	IPLOTC(4, 10)	整数	電流密度 J_ϕ の 1 次元プロットのためのパラメータで、第 1 トラス導体に対して IPLOTC(1, D) : $J_{\phi-l}$ のプロット制御 IPLOTC(2, D) : $J_{\phi-l}$ のプロット制御 IPLOTC(3, D) : $J_{\phi-\phi}$ のプロット制御 IPLOTC(4, D) : $J_{\phi-\phi}$ のプロット制御 である。 $\left\{ \begin{array}{l} =0: \text{プロットしない。} \\ =1: \text{プロットする。} \end{array} \right.$
MODOUT	INLP(2, 10) INLPC(40, 2, 10)	整数 整数	INLP(1, D) : x 軸が l の図 J_ϕ , $J_{\phi-l}$ のときの ϕ パラメータの数 INLP(2, D) : x 軸が ϕ の図 J_ϕ , $J_{\phi-\phi}$ のときの l パラメータの数 INLPC(N, 1, D) : ϕ パラメータのメッシュ番号 (1 ≤ N ≤ INLP(1, D)) INLPC(N, 2, D) : l パラメータのメッシュ番号 (1 ≤ N ≤ INLP(2, D))
TMOUT	ISMD IEMD ISTM IETM IINT	整数 整数 整数 整数 整数	電流密度 J_ϕ , J_ϕ の 1 次元プロット, 等高線図プロットおよびプリントなどの際の出カモードの開始と終了番号である。 開始番号 終了番号 電流密度 J_ϕ , J_ϕ の 1 次元プロット, 等高線図プロットおよびプリントなどの際の出カ時間に関するパラメータである。 開始時間ステップ番号 終了時間ステップ番号 時間ステップ間隔
FILNAM			本問題で使用するファイル名およびユーザー ID (全てのファイルの割当て開設は IPF コマンドにより自動的に行われる)。

Namelist 名	変数	タイプ	説明	明
	FNAMIN(10)	文字定数	本問題を構成するに必要な全てのトーラス導体毎の入力ファイル名で、トーラス導体順にトーラス導体数必要である。45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。	
	FNAMMC	文字定数	本問題に対して与えられるべき、EM2DEC プログラムにて得られたトーラス導体間相互のモード間結合のファイル名である。45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。	
	FNAMRS(2)	文字定数	FNAMRS(1)： 複合トーラス導体系の渦電流固有値問題を解いた結果得られたモード行列用のファイル名である。45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。 FNAMRS(2)： 複合トーラス導体系の外部起電力係数のためのファイルの名称である。45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。	
	USERID	文字定数	ユーザーの ID 名で (=J×××××) のように 5 語以内である。ファイル名は 'J×××××.○○○○○○.DATA' のように入力する。	

3.3.5 FLDDEC プログラム

〔1〕 ジョブ制御文

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER *****
      T.4 C.6 W.4 I.5 P.O SRP
      OPTP PASSWORD=CON,MSGLEVEL=(1,1),NOTIFY=J****
//GEM EXEC GEM,DSN='J****',Q='F.FORT77'
- G AAA,MODID=(FLDDEC,ESHARE)
- PUT AAA,OUT=OUTDD
- END
//OUTDD DD DSN=&&TMP,DISP=(NEW,PASS,DELETE),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120,DSORG=PS),
//      UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(30,10))
// EXEC FORT77,
// SO='&&TMP',
// Q=,
// OPT=2,
// OBJS='50,10',
// A='NOSOURCE'
// EXEC LKED77,
// PRVLIB='SYS1.IPFLIB',PRVQ=,
// GRLIB=PNL
//RUN EXEC PGM=TEMPNAME,COND=(4,LT),PARM='FLIB(ERRCUT=0)',DYNAMNBR=40
//STEPLIB DD DSN=&&LM,DISP=(OLD,DELETE)
//      DD DSN=SYS1.IPFLIB,DISP=SHR
//CMDIN DD DUMMY
//CMDOUT DD SYSOUT=*
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT05F001 DD *
&CONTDI NCOND=2, NCOIL=1, NE=0,
      IRST=1,ICIT=1, IPGAUS=5, ILGAUS=5, IRDOPT=0,
&REGION RRS=0.62,RRE=1.02,ZZS=0.01, ZZE=0.61,PPS=0.0, PPE=20.0,
&REGNO NR=9, NZ=13,NP=6,
&LPOPT IOUT(1)=1, IOUT(2)=0,IOUT(3)=1,IOUT(4)=0,IOUT(5)=0,
      IOUT(6)=-1,IOUT(7)=0,IOUT(8)=0,
      IETM=21, ISMD=1, IEMD=14,
&ARGOUT IPLTEV=1, IPLTVP=0,
&FILNAM FNAMIN='J3340.SAMPLE.DMP.DATA',
      FLDNAM(1)='J****.SMP01.FILE1.DATA',
      FLDNAM(2)='J****.SMP01.FILE2.DATA',
      FLDNAM(3)='J****.SMP01.FILE3.DATA',
      FLDNAM(4)='J****.SMP01.FILE4.DATA',
      FLDNAM(5)='J****.SMP01.FILE5.DATA',
      FLDNAM(6)='J****.SMP01.FILE6.DATA',
      FLDNAM(7)='J****.SMP01.IOVCP.DATA',
      FNAMGP='J****.SMP01.ARGUS.DATA',
      USERID='J****',
//*
++
//

```

- ① 原研計算センターのジョブマクロコマンド
- ② モジュール ID の指定
- ③ トラス導体数、外部コイルシリーズの諸量、リスタートオプション等の入力
- ④ 空間メッシュ点の指定
- ⑤ プリント出力の指定
- ⑥ 'ARGUS' プログラムによる磁束分布プロットのための入力
- ⑦ ファイルの定義（全てのファイルの割当ておよび閉鎖処理は、プログラム内で自動的に処理される）

〔2〕 入力の説明

Name/変数	変数	タイプ	説明	明
CONTD	NCOND	整数	トラス導体数: N_c (10以下)	
	NCOIL	整数	外部コイルシリーズ数: N_o (50以下)	
	NE	整数	外部受動コイルシリーズ数: N_e	
	IRST	整数	リスタートオプション	
			=0 : 通常の計算を行うが, ファイルに記憶しない。	
			-1 : リスタート計算のため, 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルをファイル(FORTRAN 論理機番 IOVCP)に保存しながら処理する。	
			-1 : 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルをファイル (FORTRAN 論理機番 IOVCP) から読取り, リスタート処理する。	
	ICIT	整数	時間追跡処理をするか否かを指定するためのオプション	
			=0 : 処理しない。	
			=1 : 処理する。	
	IPGAUS	整数	Gauss-Legendre 積分の ϕ 方向積分点数 (10以下)	
	ILGAUS	整数	Gauss-Legendre 積分の ℓ 方向積分点数 (10以下)	
	IRDOPT	整数	モード縮小をするか否かを指定するためのオプション	
			=0 : 縮小しない。	
			-1 : 縮小する。	
			(縮小モードの識別は, EM3DEC プログラムで判別されたパラメータ MREDCT(500) による)	
REGION	RRS	実数	R 方向空間の最小座標値 (単位は m)	
	RRE	実数	R 方向空間の最大座標値 (単位は m)	
	ZZS	実数	Z 方向空間の最小座標値 (単位は m)	
	ZZE	実数	Z 方向空間の最大座標値 (単位は m)	

Namelist名	変数	タイプ	説明	明
	PPS PPE	実数 実数	θ 方向空間点の最小座標値 (単位は m) θ 方向空間点の最大座標値 (単位は m)	
REGNO	NR NZ NP	整数 整数 整数	R 方向空間点数 (20 以下) Z 方向空間点数 (20 以下) θ 方向空間点数 (20 以下)	
LPOPT	IETM ISMD IEMD IOUT(10)	整数 整数 整数 整数	時間追跡時の時間ステップ数 渦電流モード毎の諸量のプリント出力開始番号 渦電流モード毎の諸量のプリント出力終了番号 諸量のプリント出力を制御するためのオプションで、以下特記しない場合、 $\begin{cases} =0 & : \text{プリント出力しない。} \\ \neq 0 & : \text{プリント出力する。} \end{cases}$ と約束する。 IOUT(1) : EM3DEC プログラムで創生されたデータファイルの記憶内容のプリント制御 IOUT(2) : 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルのプリント制御 $\begin{cases} =0 & : \text{プリント出力しない。} \\ =1 & : \text{外部受動コイルシリーズ分+トラス導体系の形にてプリント出力する。} \\ =-1 & : \text{外部受動コイルシリーズ分、トラス導体系を分離してプリント出力する。} \end{cases}$ IOUT(3) : 渦電流モード毎の磁束のプリント出力制御 IOUT(4) : 渦電流モード毎の磁場のプリント出力制御	

Namelist 名	変数	タイプ	説明
			<p> { =0 : プリント出力しない。 =1 : θ 方向の分布を含めプリントを出力する。 =-1 : θ 方向の平均値をプリント出力する。 IOUT(5) : 時間追跡による磁場ベクトルポテンシャルのプリント出力制御 { -0 : プリント出力しない。 -1 : 外部能動コイルシリーズ分および外部受動コイルシリーズを含む複合トランス導体系全体の渦電流 に対してプリント出力する。 =-1 : 外部能動コイルシリーズに対してのものと同電流に対するものとを別々にプリント出力する。 </p>
ARGOUT	IPLTEV	整数	<p> 磁束分布の 'ARGUS' プロット³¹⁾のための制御パラメータ モード毎渦電流の磁束分布用データをダンプするための制御パラメータ { =0 : ダンプしない。 =1 : ダンプする。 時間追跡による磁束分布プロット用データをダンプするための制御パラメータ { =0 : ダンプしない。 -1 : 外部能動コイルシリーズ分+渦電流分の形にてダンプする。 =-1 : 渦電流分のみをダンプする。 </p>
FILNAM	FNAMIN	文字定数	<p> 本問題で使用するファイル名およびユーザー ID である (全てのファイルの割当て開設は IPF コマンドにより自動的に行われる)。 EM3DEC プログラムで創生された本問題のための参照データファイルの名称で、45 語以内の任意のアルファベットおよび数字にて入力する。 </p>

Namelist 名	変数	タイプ	説明
FLDNAM(7)		文字定数	<p>本問題のための作業用ファイルおよびデータファイルの名称で、45 語以内の任意のアルファベットおよび数字子で入力する。</p> <p>FLDNAM(1) : トラス導体上の渦電流による磁場ベクトルポテンシャルを記憶するためのファイルの名称 (FORTRAN 論理機番 21)</p> <p>FLDNAM(2) : 全てのトラス導体の渦電流モードデータを記憶しているファイルの名称 (FORTRAN 論理機番 22)</p> <p>FLDNAM(3) : 全ての外部受動コイルシリーズの渦電流モードデータを記憶しているファイルの名称 (FORTRAN 論理機番 23)</p> <p>FLDNAM(4) : モードの時間応答係数を記憶しているファイルの名称 (FORTRAN 論理機番 24)</p> <p>FLDNAM(5) : FORTRAN 論理機番 25 の作業用ファイルの名称で、処理過程により順に、形状関数、外部受動コイルシリーズ上の渦電流による磁場ベクトルポテンシャル、モード毎渦電流の磁場が記憶される。</p> <p>FLDNAM(6) : 渦電流による磁束を記憶するファイル (FORTRAN 論理機番 26)</p> <p>FLDNAM(7) : 渦電流による磁場ベクトルポテンシャルを記憶するファイルの名称 (FORTRAN 論理機番 27)</p> <p>注: FLDNAM(7) はユーザーファイルとしてカタログ保存されるが、他は全て TSS 作業用ファイルとして処理終了後消去される。</p>
FNAMGP		文字定数	<p>'ARGUS' プロットのためのファイルの名称で、45 語以内の任意のアルファベットおよび数字子を入力する。</p>
USERID		文字定数	<p>ユーザーの ID 名で (=$J \times \times \times \times$) のように 5 語以内である。ファイル名は '$J \times \times \times \times . \text{○○} \dots \text{○○} . \text{DATA}$' のように入力する。</p>

3.4 各プログラムに対する共通記憶領域

この節では、各プログラムの共通記憶領域 (COMMON area) について、アルファベット順の COMMON ラベル名毎にその説明を行う。

[1] COMMON/ ADRESS/

1 ISCORE, LUSE, IRUN

コアサイズおよび処理プロセス識別パラメータ

- 1) ISCORE 作業領域の大きさ
- 2) LUSE 作業領域の使用実績値
- 3) IRUN FLDDEC プログラムにおける処理プロセスを識別するパラメータ

[2] COMMON/ CDREAD/

1 IJBLCK(10,10), MFLAG(10,10)

- 1) IJBLCK(10,10) モード間結合の計算処理の実行およびファイルの参照またはダンプなどを制御する処理パラメータで、当該トーラス導体対 (I;J) に対して以下のようなになる。

IJBLCK(I, J)=0 : 参照ファイルからの読取りもダンプファイルへの書込みもしない。また、モード間結合の計算処理も行なわない。

IJBLCK(I, J)=1 : モード間結合の計算を実行し、ダンプファイルに書込む。

IJBLCK(I, J)=2 : 参照ファイルから読取り、そのデータセットをダンプファイルへ書込む(書き写す)。

IJBLCK(I, J)=3 : 参照ファイルから読取り、このデータセットを再計算による結果に置き換え、ダンプファイルに書込む(書き換える)。

- 2) MFLAG(10,10) モード間結合を計算する際の 2 重表面積分の数値積分法

$$\left\{ \begin{array}{l} =0 : \text{Gauss-Legendre 積分} \\ =1 : \text{重心近似} \end{array} \right.$$

[3] COMMON/ CNTMLT/

1 IDT(10), JDT(10), NDT(10), RDT(10),

2 IPN(10), FORMF(8, 40, 10), PMESHF(4, 40, 10), IMESHF(40, 10)

FLDDEC プログラムで用いられ、トーラス導体の断面形状を与えるメッシュ諸量である。FORM, PMESH, IMESH についての詳しい説明はラベル付 COMMON/ TFORM/を参照のこと。

- 1) IDT(10) ℓ 方向の最大メッシュ番号 : IMAX
- 2) JDT(10) ϕ 方向の最大メッシュ番号 : JMAX
- 3) NDT(10) トーラスの対称性 : N_ϕ
- 4) RDT(10) $\Delta\phi$
- 5) IPN(10) トーラス断面の接続点の数 : IPOINT
- 6) FORMF(8, 40, 10) トーラス導体毎の FORM(8, 40)
- 7) PMESHF(4, 40, 10) トーラス導体毎の PMESH(4, 40)

8) IMESHF(40,10) トーラス導体毎の IMESH(40)

[4] COMMON/ COIL/

1 CETA, CRO(50), CL(50,50), NB(50).
2 CTURN(50,50), CR(50,50), CZ(50,50), CA(50,50).
3 CB(50,50),

コイルに関するデータ

- 1) CETA 外部コイルシリーズの導体材料の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot m$)
2) CRO(50) 外部コイルシリーズの抵抗 (Ω)
3) CL(50,50) 外部コイルシリーズのインダクタンス行列で、入力により CL(I, I)には第 I コイルシリーズの外部インダクタンスが与えられている。
4) NB(50) 各コイルシリーズのブロック数
5) CTURN(50,50) CTURN(I, J)で、第 J コイルシリーズ第 I ブロックのターン数
6) CR(50,50) CR(I, J)で、第 J コイルシリーズ第 I ブロック中心の R 座標 (単位は m)
7) CZ(50,50) CZ(I, J)で、第 J コイルシリーズ第 I ブロック中心の Z 座標 (単位は m)
8) CA(50,50) CA(I, J)で、第 J コイルシリーズ第 I ブロックの R 方向寸法 (単位は m)
9) CB(50,50) CB(I, J)で、第 J コイルシリーズ第 I ブロックの Z 方向寸法 (単位は m)

[5] COMMON/ CONDM/

1 IMAX, JMAX, MN, NMAX,
2 NPFI, IPOINT, NNPHI, DPFI

トーラス導体のメッシュ分割に関する諸量で、ラベル付 COMMON/ CONDM0/とは内容は同じであるが、該当するトーラス導体が異なる。

- 1) IMAX ℓ 方向メッシュ番号の最大値
2) JMAX ϕ 方向メッシュ番号の最大値
3) MN 縮約前のマトリクス {M} および {R} の行列の次数
(= (IMAX+1) * JMAX)
4) NMAX ϕ 方向 π におけるメッシュ番号 (= JMAX + (NPFI-1) * (JMAX-1))
5) NPFI トーラス対称性: N_ϕ
6) IPOINT 始点、終点を含む断面形状の接続点の数
7) NNPHI ϕ 方向の分割数 (= JMAX-1)
8) DPFI $\Delta\phi$ (= $\pi / (NPFI * NNPHI)$)

[6] COMMON/ CONDM0/

1 IMAX0, JMAX0, MN0, NMAX0,
2 NPFI0, IPOIN0, NNPHI0, DPFI0

トーラス導体のメッシュ分割に関する諸量で、ラベル付 COMMON/ CONDM/とは内容は同じであるが、該当するトーラス導体が異なる。

- 1) IMAX0 ℓ 方向メッシュ番号の最大値
2) JMAX0 ϕ 方向メッシュ番号の最小値

- | | | |
|----|--------|---|
| 3) | MN0 | 縮約前のマトリクス{ M } および{ R }の行列の次数
(= $(IMAX0+1) * JMAX0$) |
| 4) | NMAX0 | ϕ 方向 π におけるメッシュ番号 (= $JMAX0 + (NPHI0-1) * (JMAX0-1)$) |
| 5) | NPHI0 | トーラスの対称性: N_ϕ |
| 6) | IPOIN0 | 始点, 終点を含む断面形状の接続点の数 |
| 7) | NNPHI0 | ϕ 方向の分割数 (= $JMAX0+1$) |
| 8) | DPHI0 | $\Delta\phi$ (= $\pi / (NPHI * NNPHI0)$) |

〔7〕 COMMON/ CPM/

- | | | | | |
|---|-----------|---------------|----------|----------|
| 1 | PHIC(25), | CPMESH(3,40), | DLI(40), | PHI(25), |
| 2 | DEGR(25), | DEGRC(25) | | |

メッシュ点間の中心の値等で, ラベル付 COMMON/ CPM0/とは内容は同じであるが, 該当するトーラス導体が異なる。

- | | | |
|----|--------------|---|
| 1) | PHIC(25) | ϕ 方向メッシュ点の中心の ϕ 値 |
| 2) | CPMESH(3,40) | l 方向メッシュ点の中心値
CPMESH(1, I) : r 座標
CPMESH(2, I) : z 座標
CPMESH(3, I) : l_i |
| 3) | DLI(40) | $2 \cdot \Delta l_i$ |
| 4) | PHI(5) | ϕ 方向メッシュ点の値 (radian) |
| 5) | DEGR(25) | ϕ 方向メッシュ点の値 (degree) |
| 6) | DEGRC(25) | ϕ 方向メッシュ点間の中心の値 (degree) |

〔8〕 COMMON/ CPM0/

- | | | | | |
|---|------------|----------------|-----------|-----------|
| 1 | PHIC0(25), | CPMESH0(3,40), | DLI0(40), | PHI0(25), |
| 2 | DEGR0(25), | DEGRC0(25) | | |

メッシュ点間の中心の値等で, ラベル付 COMMON/ CPM/とは内容は同じであるが, 該当するトーラス導体が異なる。

- | | | |
|----|---------------|---|
| 1) | PHIC0(25) | ϕ 方向のメッシュ点の中心の ϕ 値 |
| 2) | CPMESH0(3,40) | l 方向のメッシュ点の中心値
CPMESH0(1, I) : r 座標
CPMESH0(2, I) : z 座標
CPMESH0(3, I) : l_i |
| 3) | DLI0(40) | $2 \cdot \Delta l_i$ |
| 4) | PHI0(25) | ϕ 方向メッシュ点の値 (radian) |
| 5) | DEGR0(25) | ϕ 方向メッシュ点の値 (degree) |
| 6) | DEGRC0(25) | ϕ 方向メッシュ点間の中心の値 (degree) |

〔9〕 COMMON/ CRDUMP/

- | | | | | |
|---|---------|--------|--------|-------|
| 1 | IDUMOP, | IDMPS, | IDMPE, | IDMPI |
|---|---------|--------|--------|-------|
- 1) IDUMOP EM3DEC プログラムで得られた結果を FLDDEC プログラムの実行のためにファイルダンプする。これをするか否かのオプションである。
- { = 0: ダンプしない。
 = 1: ダンプする。
- 2) IDMPS ダンプ開始の時間ステップ番号
- 3) IDMPE ダンプ終了の時間ステップ番号
- 4) IDMPI ダンプする時間ステップ間隔

〔10〕 COMMON/ DSNAM/

- | | | | | |
|---|---------|---------|---------|--------|
| 1 | FNAMDP, | FNAMGP, | FNAMWK, | USERID |
|---|---------|---------|---------|--------|
- EDTDEC プログラムで使用するファイルのデータセット名およびユーザー ID
- 1) FNAMDP リスタート用または EM1DEC プログラム用のファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 3)
- 2) FNAMGP 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのためのファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 11)
- 3) FNAMWK EDTDEC プログラムにおける作業用ファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 4)
- 4) USERID 問題実行時のユーザー ID

〔11〕 COMMON/ DSNAMF/

- | | | | | |
|---|---------|------------|---------|--------|
| 1 | FNAMIN, | FLDNAM(7), | FNAMGP, | USERID |
|---|---------|------------|---------|--------|
- FLDDEC プログラムで使用するファイルのデータセット名およびユーザー ID
- 1) FNAMIN EM3DEC プログラムで作成された複合トラス導体系の渦電流データのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 20)
- 2) FLDNAM(7) 作業用ファイルのデータセット名。ただし、FLDNAM(7)はオプションによりユーザーファイルとしてカタログ保存され、リスタート計算に用いることができる (FORTRAN 論理機番 21~29)。
- 3) FNAMGP 'ARGUS' プログラム³¹⁾による磁束分布のプロットのためのファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 29)
- 4) USERID 問題実行時のユーザー ID

〔12〕 COMMON/ DSNAM1/

- | | | | |
|---|-------------|-------------|--------|
| 1 | FNAMIN(10), | FNAMDP(10), | USERID |
|---|-------------|-------------|--------|
- EM1DEC プログラムで使用するファイルのデータセット名およびユーザー ID
- 1) FNAMIN(10) EDTDEC プログラムで作成された最大 10 本の入力データファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 11 ~ 20)
- 2) FNAMDP(10) EM2DEC プログラムのためのダンプファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 21 ~ 30)

3) USERID 問題実行時のユーザー ID

[13] COMMON/ DSNAM2/

1 FNAMIN(10), FNAMDP, FNAMRS, USERID

EM2DEC プログラムで使用するファイルのデータセット名およびユーザー ID

- 1) FNAMIN(10) EM1DEC プログラムで作成されたモード縮小処理後の入力データファイルのデータセット名で、複合トラス導体系に対応して最大 10 本のファイル (FORTRAN 論理機番 21 ~ 30) が必要となる。
- 2) FNAMDP 計算されたトラス導体相互のモード間結合をダンプするためのファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 11)
- 3) FNAMRS トラス導体間相互のモード間結合を参照する際に必要となるファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 12)
- 4) USERID 問題実行時のユーザー ID

[14] COMMON/ DSNAM3/

1 FNAMIN(10), FNAMMC, FNAMRS(2), FNAMDP,

2 FNAMGP, USERID

EM3DEC プログラムで使用するファイルのデータセット名およびユーザー ID

- 1) FNAMIN(10) EM1DEC プログラムで作成されたモード縮小処理後の入力データファイルのデータセット名で、複合トラス導体系に対応して最大 10 本のファイル (FORTRAN 論理機番 21 ~ 30) が必要となる。
- 2) FNAMMC EM2DEC プログラムで作成されたトラス導体間相互のモード間結合を記憶しているデータファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 12)
- 3) FNAMRS(2) 複合トラス導体系の固有値問題を解いて得たモードデータを記憶するファイルのデータセット名および外部起電力係数を記憶するファイルのデータセット名 (それぞれ FORTRAN 論理機番 2 および 13)
- 4) FNAMDP FLDDEC プログラムのためのダンプファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 10)
- 5) FNAMGP 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのためのファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 11)
- 6) USERID 問題実行時のユーザー ID

[15] COMMON/ ETAC0/

1 R00, ASIGM0, AD0, BR00,

2 BSIGM0, BD0, IAOPT0, BSIG20,

3 NNSS0, IBLL0, IBS0(20)

抵抗 { R } の算出のための物性値等で、ラベル付 COMMON/ ETAC1/とは内容は同じであるが、該当するトラス導体が異なる。

- 1) R00 円環トラスの断面中心の r 座標で、すなわち主半径 (単位は m)
- 2) ASIGM0 厚肉部の体積固有抵抗: ρ_a ($\Omega \cdot m$)

- 3) AD0 厚肉部の厚さ (単位は m)
- 4) BR00 ベローズ部の異方抵抗の係数 (Fig. 3.10 参照) : f_b
- 5) BSIGM0 ベローズ部の体積固有抵抗 : ρ_b ($\Omega \cdot m$)
- 6) BD0 ベローズ部の厚さ (単位は m)
- 7) IAOPT0 r 座標による厚肉部の抵抗分布を考慮するか否かのオプション
 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : r \text{ による抵抗分布を考慮しない。} \\ = 1 : r \text{ による抵抗分布を考慮する。} \end{array} \right.$
- 8) BSIG20 ワンターン抵抗修正用係数 : f_{bb}
- 9) NNSS0 ベローズ部と厚肉部の境界数
- 10) IBLL0 ベローズと厚肉の順序
 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \dots \text{の順} \\ = 1 : \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \dots \text{の順} \end{array} \right.$
 NNSS=0 のときは, IBSS=0 で全て厚肉, IBSS=1 で全てベローズとなる。
- 11) IBS0(20) ベローズ・厚肉境界の位置を与える ϕ 方向メッシュ点番号

[16] COMMON/ ETAC1/

1	R0,	ASIGMA,	AD,	BR0,
2	BSIGMA,	BD,	IAOPT,	BSIG2F,
3	NNSS,	IBLL,	IBS(20)	

抵抗 { R } の算出のための物性値等で, ラベル付 COMMON/ ETAC0/とは内容は同じであるが, 該当するトラス導体が異なる。

- 1) R0 円環トラスの断面中心の r 座標で, すなわち主半径 (単位は m)
- 2) ASIGMA 厚肉部の体積固有抵抗 : ρ_a ($\Omega \cdot m$)
- 3) AD 厚肉部の厚さ (単位は m)
- 4) BR0 ベローズ部の異方抵抗の係数 (Fig. 3.10 参照) : f_b
- 5) BSIGMA ベローズ部の体積固有抵抗 : ρ_b ($\Omega \cdot m$)
- 6) BD ベローズ部の厚さ (単位は m)
- 7) IAOPT r 座標による厚肉部の抵抗分布を考慮するか否かのオプション
 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : r \text{ による抵抗分布を考慮しない。} \\ = 1 : r \text{ による抵抗分布を考慮する。} \end{array} \right.$
- 8) BSIG2F ワンターン抵抗修正用係数 : f_{bb}
- 9) NNSS ベローズ部と厚肉部の境界数
- 10) IBLL ベローズと厚肉の順序
 $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \dots \text{の順} \\ = 1 : \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \dots \text{の順} \end{array} \right.$
 NNSS=0 のときは, IBSS=0 で全て厚肉, IBSS=1 で全てベローズとなる。
- 11) IBS(20) ベローズ・厚肉境界の位置を与える ϕ 方向メッシュ点番号

[17] COMMON/ GAUSDT/

1 IX, IY, ZX(10), WX(10),
2 ZY(10), WY(10)

Gauss-Legendre 積分に対するデータで、ラベル付 COMMON/ GAUSD0/とは内容は同じであるが、該当するトーラス導体が異なる。

- | | |
|-----------|--|
| 1) IX | Gauss-Legendre 積分の ϕ 方向積分点数 |
| 2) IY | Gauss-Legendre 積分の ℓ 方向積分点数 |
| 3) ZX(10) | ϕ 方向 Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点の局所座標 |
| 4) WX(10) | ϕ 方向 Gauss-Legendre 積分の重み |
| 5) ZY(10) | ℓ 方向 Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点の局所座標 |
| 6) WY(10) | ℓ 方向 Gauss-Legendre 積分の重み |

[18] COMMON/ GAUSD0/

1 IX0, IY0, ZX0(10), WX0(10),
2 ZY0(10), WY0(10)

Gauss-Legendre 積分に対するデータで、ラベル付 COMMON/ GAUSDT/とは内容は同じであるが、該当するトーラス導体が異なる。

- | | |
|------------|--|
| 1) IX0 | Gauss-Legendre 積分の ϕ 方向積分点数 |
| 2) IY0 | Gauss-Legendre 積分の ℓ 方向積分点数 |
| 3) ZX0(10) | ϕ 方向 Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点の局所座標 |
| 4) WX0(10) | ϕ 方向 Gauss-Legendre 積分の重み |
| 5) ZY0(10) | ℓ 方向 Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点の局所座標 |
| 6) WY0(10) | ℓ 方向 Gauss-Legendre 積分の重み |

[19] COMMON/ GAUSTB/

1 PN(5,10), WEIGHT(5,10), IPGAUS, ILGAUS

FLDDEC プログラムの Gauss-Legendre 積分に対するデータ

- | | |
|-----------------|--|
| 1) PN(5,10) | Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点の局所座標 |
| 2) WEIGHT(5,10) | Gauss-Legendre 積分の重み |
| 3) IPGAUS | Gauss-Legendre 積分の ϕ 方向積分点数 |
| 4) ILGAUS | Gauss-Legendre 積分の ℓ 方向積分点数 |

[20] COMMON/ GPCPZ/

1 NZLVL, GPCPSZ, IGPCP(10), IGPOL(10)

'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのための制御データ

- | | |
|----------|--|
| 1) NZLVL | 等高線の間隔を決定するための値で、電流関数を V とし、その間隔を BLEV とすると、 |
|----------|--|

$$\text{BLEV} = |V|_{\max} / \text{NZLVL},$$

のように決定される。結局、最大 $2 \cdot \text{NZLVL} - 1$ 本の等高線が得られる。

- | | |
|-----------|--|
| 2) GPCPSZ | 等高線図の大きさを決める値（単位は cm）で、標準値は 20 cm である。 |
|-----------|--|

- 3) IGPCP 等高線図が投影図であるか展開図であるかを指定するための入力オプション。IGPCP(I)で第1トラス導体のものを意味する。

$$\begin{cases} = 0: \text{展開図} \\ = 1: \text{投影図} \end{cases}$$

- 4) IGPOL 等高線図を描くにあたり、特に ℓ , ϕ 方向のメッシュ幅が大きく異なる場合には、満足した等高線図を得られないため、Gauss-Legendre 数値積分における Legendre 多項式の零点上の値を用い補間を行う必要がある。これを行うか否かのオプションで、IGPOL(I)で第1トラス導体のものを意味する。

$$\begin{cases} = 0: \text{補間を取らない。} \\ = 1: \text{補間を取る。} \end{cases}$$

[21] COMMON/ GSVAl/

- 1 RGS(10, 40), ZGS(10, 40), DRLGS(10, 40), DZLGS(10, 40),
2 WPHI(10, 4), WL(10, 4), DL(40), COSPHI(10, 400),
3 SINPHI(10, 400)

Gauss-Legendre 積分のための変換諸量。ラベル付 COMMON/ GSVAl0/とは内容は同じであるが、該当するトラス導体が異なる。

- 1) RGS(10, 40) 数値積分点の r 座標
2) ZGS(10, 40) 数値積分点の z 座標
3) DRLGS(10, 40) 数値積分点の $dr/d\ell$
4) DZLGS(10, 40) 数値積分点の $dz/d\ell$
5) WPHI(10, 4) 有限要素回路 $\bar{\Omega}$ の4つのゾーン①, ②, ③, ④毎に与えられる $W_\phi (= (\partial V / \partial \phi) \Delta \phi)$
6) WL(10, 4) 有限要素回路 $\bar{\Omega}$ の4つのゾーン①, ②, ③, ④毎に与えられる $W_\ell (= (\partial V / \partial \ell) \Delta \ell_i)$
7) DL(40) $\Delta \ell_i$
8) COSPHI(10, 400) $\cos \phi_j (-\Delta \phi \leq \phi_j \leq \pi + \Delta \phi)$
9) SINPHI(10, 400) $\sin \phi_j (-\Delta \phi \leq \phi_j \leq \pi + \Delta \phi)$
ただし、 ϕ_j の上限は EM2DEC プログラムにおいて ϕ 方向に拡張される (詳しくは付録 A .3 のサブルーチンの記述 'AKIJ' を参照のこと)。

[22] COMMON/ GSVAl0/

- 1 RGS0(10, 40), ZGS0(10, 40), DRLGS0(10, 40), DZLGS0(10, 40),
2 WPHI0(10, 4), WL0(10, 4), DL0(40), COSPHI0(10, 400),
3 SINPHI0(10, 400)

Gauss-Legendre 積分のための変換諸量。ラベル付 COMMON/ GSVAl/とは内容は同じであるが、該当するトラス導体が異なる。

- 1) RGS0(10, 40) 数値積分点の r 座標
2) ZGS0(10, 40) 数値積分点の z 座標
3) DRLGS0(10, 40) 数値積分点の $dr/d\ell$

- | | | |
|----|------------------|--|
| 4) | DZLGS0(10, 40) | 数値積分点の $dz/d\ell$ |
| 5) | WPHI0(10, 4) | 有限要素回路 $\bar{\Omega}$ の 4 つのゾーン①, ②, ③, ④毎に与えられる $W_\phi (= (\partial V / \partial \phi) \Delta \phi)$ |
| 6) | WL0(10, 4) | 有限要素回路 $\bar{\Omega}$ の 4 つのゾーン①, ②, ③, ④毎に与えられる $W_\ell (= (\partial V / \partial \ell) \Delta \ell_i)$ |
| 7) | DL0(40) | $\Delta \ell_i$ |
| 8) | COSPHI0(10, 400) | $\cos \phi_j (-\Delta \phi \leq \phi_j \leq \pi + \Delta \phi)$ |
| 9) | SINPHI0(10, 400) | $\sin \phi_j (-\Delta \phi \leq \phi_j \leq \pi + \Delta \phi)$ |
- ただし, ϕ_j の上限は EM2DEC プログラムにおいて ϕ 方向に拡張される (詳しくは付録 A. 3 のサブルーチンの記述 'AKIJ' を参照のこと)。

[23] COMMON/ IDFILE/

1	IOMLT,	IFCNEV,	IFTFAC,	IFCLEV,
2	IOVCP,	IOFLX,	IOFLD,	IFSHP,
3	IOVCPE,	IOVCPC,	IRGUS,	IFILE(10)

FLDDEC プログラムで使用するファイルの FORTRAN 論理機番

- | | | |
|-----|-----------|---|
| 1) | IOMLT | 入力データファイル機番 (= 20) |
| 2) | IFCNEV | トーラス導体上の渦電流モードデータのファイル機番 (= 21) |
| 3) | IFTFAC | モードの時間応答係数のファイル機番 (= 24) |
| 4) | IFCLEV | 外部受動コイルシリーズ上の渦電流モードデータのファイル機番 (= 23) |
| 5) | IOVCP | 渦電流によるモード毎の磁場ベクトルポテンシャルデータのファイル機番 (= 27) |
| 6) | IOFLX | 渦電流によるモード毎の磁束データのファイル機番 (= 26) |
| 7) | IOFLD | 渦電流によるモード毎の磁場データのファイル機番 (= 25) |
| 8) | IFSHP | 形状関数を記憶するための作業用ファイル機番 (= 25) |
| 9) | IOVCPE | トーラス導体上の渦電流によるモード毎の磁場ベクトルポテンシャルデータのファイル機番 (= 21) |
| 10) | IOVCPC | 外部受動コイルシリーズ上の渦電流によるモード毎の磁場ベクトルポテンシャルデータのファイル機番 (= 25) |
| 11) | IRGUS | 'ARGUS' プログラム ³¹⁾ による磁束分布プロットのためのダンプファイルの機番 (= 29) |
| 12) | IFILE(10) | 作業用のファイル機番 (= 30 ~ 39) |

[24] COMMON/ IOUNIT/

1	IF02,	IF03,	IF04,	IF10,
2	IF11,	IF12,	IF13,	INDXF(10)

ファイルの FORTRAN 論理機番で, EDTDEC, EM2DEC, EM3DEC 各プログラムでそれぞれ異なった使い方をしている。

(1) EDTDC プログラム

- | | | |
|----|------|----------------------------------|
| 1) | IF03 | EM1DEC プログラムのためのダンプファイルの機番 (= 3) |
|----|------|----------------------------------|

- 2) IF04 作業用ファイルの機番 (=4)
- 3) IF11 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのためのファイルの機番 (=11)
- (2) EM2DEC プログラム
- 1) IF02 作業用ファイルの機番 (=2)
- 2) IF10 形状関数を記憶するためのファイルの機番 (=10)
- 3) IF11 トーラス導体間相互のモード間結合をダンプするためのファイルの機番 (=11)
- 4) IF12 トーラス導体間相互のモード間結合を参照するためのファイルの機番 (=12)
- 5) INDXF(10) トーラス導体毎の渦電流データを記憶しているファイルの機番 (=21 ~ 30)
- (3) EM3DEC プログラム
- 1) IF02 複合トーラス導体系のモード行列のためのファイルの機番 (=2)
- 2) IF04 作業用のファイル機番 (=4)
- 3) IF10 FLDDDEC プログラム用のダンプファイルの機番 (=10)
- 4) IF11 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのためのダンプファイルの機番 (=11)
- 5) IF12 トーラス導体間相互のモード間結合を記憶している入力ファイルの機番 (=12)
- 6) IF13 外部起電力係数を記憶するためのファイルの機番 (=13)
- 7) INDXF(10) トーラス導体毎の渦電流データを記憶しているファイルの機番 (=21 ~ 30)
- [25] COMMON/ JPLOT/
- 1 ISTM, IETM, IINT, ISMD,
- 2 IEMD, IPLOT(4,10), INLP(2,10), INLPC(40,2,10)
- 電流密度 J_ℓ , J_ϕ の1次元プロットおよび電流関数の等高線図プロットのための諸量
- 1) ISTM プロット開始の時間ステップ番号
- 2) IETM プロット終了の時間ステップ番号
- 3) IINT プロットの時間ステップ間隔
- 4) ISMD プロット開始のモード番号
- 5) IEMD プロット終了のモード番号
- 6) IPLOT(4,10) J_ℓ , J_ϕ プロットのためのパラメータで、第Iトーラス導体に対して次のようになる。
- | | |
|---|--|
| $\left. \begin{array}{l} \text{IPLOT}(1,I) : J_{\ell-\ell} \text{ のプロットオプション} \\ \text{IPLOT}(2,I) : J_{\phi-\ell} \text{ のプロットオプション} \\ \text{IPLOT}(3,I) : J_{\ell-\phi} \text{ のプロットオプション} \\ \text{IPLOT}(4,I) : J_{\phi-\phi} \text{ のプロットオプション} \end{array} \right\}$ | $\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{しない。} \\ = 1 : \text{する。} \end{array} \right.$ |
|---|--|

- 7) INLP(2,10) ϕ, ℓ パラメータのメッシュ点数で、第 I トーラス導体に対して次のようになる。
 INLP(1,I) : x 軸が ℓ の区 $J_\ell, J_{\ell-1}$ のときの ϕ パラメータの数
 INLP(2,I) : x 軸が ϕ の区 $J_\phi, J_{\phi-1}$ のときの ℓ パラメータの数
- 8) INLPC(40,2,10) ϕ, ℓ パラメータのメッシュ点番号で、第 I トーラス導体に対して次のようになる。
 INLPC(N,1,I) : ϕ パラメータのメッシュ点番号 ($N=1, 2, \dots, \text{INLP}(1,I)$)
 INLPC(N,2,I) : ℓ パラメータのメッシュ点番号 ($N=1, 2, \dots, \text{INLP}(2,I)$)

[26] COMMON/ PHYSCC/

- | | | | | |
|-----------|---------------------|---------|------|-----|
| 1 | PAI, | PADDEG, | UM1, | UM4 |
| 1) PAI | $\pi (= 3.1415926)$ | | | |
| 2) RADDEG | $\pi/180.0$ | | | |
| 3) UM1 | $\mu_0/4\pi$ | | | |
| 4) UM4 | μ_0/π | | | |

[27] COMMON/ PORTC/

- | | | |
|---|--------------------|----------|
| 1 | NP, INFDEG(100,5), | IRW(500) |
|---|--------------------|----------|

EDTDEC プログラムのみにて使用されるポート穴に関するデータ

- 1) NP ポート穴の数
- 2) INFDEG(100,5) ポート穴毎の情報。ただし、内容については処理過程で異なるが、最終的にはサブルーチン 'EIGEN' で必要な次の情報が求まる。ここで、ポート穴の種類は最大 5 個である。
 INFDEG(1,I) : INFDEG(1,I)-2 でその穴のメッシュ数を表わす (メッシュ原点をポート穴が含む場合はこの原点を除いた数)。ただし零のとき、入力したが無らかのエラーチェックにより誤りがあり、そのポート穴は存在しないことになる。
 INFDEG(2,I) : そのポート穴の状態が記憶されている。
 INFDEG(3,I) : ポート穴のメッシュ点 $(i; j)$ の $i \cdot \text{JMAX} + j$ がこれ以降 INFDEG(1, I) 個記憶されている。
- 3) IRW(500) ポート穴によるマトリクスの縮小条件。境界条件等を考慮した完全なマトリクスの縮小条件はサブルーチン 'EIGEN' にて求められる。詳しくは、サブルーチン 'PORT' の記述参照のこと。

[28] COMMON/ PROGOP/

- | | | | | |
|---|---------|----------|---------|---------|
| 1 | IRST, | ICIT, | IPSK, | IPK, |
| 2 | IPETA, | IPVEC, | IPVEJ, | IPVPT, |
| 3 | IPVPJ, | IPLTEV, | IPLTVP, | IPLTJE, |
| 4 | IPLTJT, | IOUT(10) | | |

リスタートオプションおよび出力のためのオプションで、EDTDEC、EM1DEC、EM2DEC、EM3DEC、FLDDEC 各プログラムでそれぞれ異なった使い方をしている。

- (1) EDTDEC プログラム
- 1) IRST リスタートオプション
 - 2) IPSK 1次独立なインダクタンス $K'_{ij,km}$ のプリントオプション
 - 3) IPK $K_{ij,km}$ のプリントオプション
 - 4) IPETA 抵抗 $R_{ij,km}$ のプリントオプション
 - 5) IPVEC 固有ベクトル V のプリントオプション
 - 6) IPVEJ 固有モードの電流密度 J_ρ, J_ϕ のプリントオプション
 - 7) IPLTEV 固有ベクトル V の 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットのオプション
 - 8) IPLTJE 固有モードの電流密度 J_ρ, J_ϕ の1次元プロットオプション
 - 9) IOUT(10) $\{\Phi\}^T \{\Phi\}$ (= $\{I\}$) のプリントオプション (IOUT(1)のみ使用)
- (2) EM1DEC プログラム
- 1) IRST ファイルのダンプのためのオプション
 - 2) IOUT(10) メッシュ諸量やバリティ条件などトラス導体情報のプリントオプション
- (3) EM2DEC プログラム
- 1) IOUT(10) トラス導体間相互のモード間結合のプリントオプション (IOUT(1)のみ使用)
- (4) EM3DEC プログラム
- 1) IRST リスタートオプション
 - 2) ICIT 時間追跡処理をするか否かのオプション
 - 3) IRDOPT モード縮小処理をするか否かのオプション
 - 4) IDUMOP FLDDEC プログラムのためのファイルダンプのオプション
 - 5) IPK インダクタンス $\{M\}$ のプリントに関するオプション
 - 6) IPVEC 固有ベクトル V のプリントオプション
 - 7) IPVEJ 固有モードの電流密度 J_ρ, J_ϕ のプリントオプション
 - 8) IPVPT 時間追跡による電流関数 V のプリントオプション
 - 9) IPVPJ 時間追跡による電流密度 J_ρ, J_ϕ のプリントオプション
 - 10) IOUT(1) モード行列 $\{\Phi\}$ のプリントオプション
 - 11) IOUT(2) $\{\Phi\}^T \{\Phi\}$ (= $\{I\}$) のプリントオプション
 - 12) IPLTEV 固有ベクトル V の 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットに関するオプション
 - 13) IPLTVP 時間追跡による電流関数 V の 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットに関するオプション
 - 14) IPLTJE 固有モードの電流密度 J_ρ, J_ϕ の1次元プロットに関するオプション
 - 15) IPLTJT 時間追跡による電流密度 J_ρ, J_ϕ の1次元プロットに関するオプション
- (5) FLDDEC プログラム
- 1) IRST リスタートオプション
 - 2) ICIT 時間追跡処理をするか否かのオプション

- | | |
|-------------|----------------------------------|
| 3) IRDOPT | モード縮小処理をするか否かのオプション |
| 4) IOUT(1) | 入力データとして参照したファイルの情報プリントに関するオプション |
| 5) IOUT(2) | 固有モードの磁場ベクトルポテンシャルのプリントオプション |
| 6) IOUT(3) | 固有モードの磁束のプリントオプション |
| 7) IOUT(4) | 固有モードの磁場のプリントオプション |
| 8) IOUT(5) | 時間追跡による磁場ベクトルポテンシャルのプリントオプション |
| 9) IOUT(6) | 時間追跡による磁束のプリントオプション |
| 10) IOUT(7) | 時間追跡によるトロイダル方向に一様な磁場のプリントオプション |
| 11) IOUT(8) | 時間追跡による磁場のプリントオプション |
| 12) IPLTEV | 固有モードの3次元磁束分布のプリントオプション |
| 13) IPLTVF | 時間追跡による3次元磁束分布のプリントオプション |

[29] COMMON/ RDOPT/

- ```

1 IRDOPT, EPS, MREDCT(500), CTABLE(500),
2 MODRED

```

モード縮小処理のためのデータ

- |                |                                                                                                                                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) IRDOPT      | 可制御性チェックによるモード縮小処理をするか否かのオプション<br>$\left\{ \begin{array}{l} = 1: \text{縮小処理を実施する。} \\ = 0: \text{縮小処理を実施しない。} \end{array} \right.$     |
| 2) EPS         | 可制御性判定値 $\epsilon$                                                                                                                     |
| 3) MREDCT(500) | モード毎の縮小処理結果で、MREDCT(I)は第Iモードに対して<br>$\left\{ \begin{array}{l} = 0: \text{縮小対象モード} \\ = 1: \text{非縮小対象モード} \end{array} \right.$<br>である。 |
| 4) CTABLE(500) | 可制御性を意味するモード毎に与えられる実効入力 $u_i^*$                                                                                                        |
| 5) MODRED      | 縮小処理後の生き残ったモード数                                                                                                                        |

## [30] COMMON/ SOLTM/

- ```

1      VEIN(50),      CEIN(50),      NTDIV,      TIME(3),
2      TSDIV(4), CCONST(8, 4, 50)

```

時間追跡用データ

- | | |
|-------------|---|
| 1) VEIN(50) | 外部受動コイルシリーズの $t=0$ での入力により与えられる電源電圧 (Volt) |
| 2) CEIN(50) | 外部コイルシリーズの $t=0$ でのコイル電流値 (Amp) |
| 3) NTDIV | 起電力波形を与える際の時間区分領域の数 - 1 で最大 3 |
| 4) TIME(3) | TIME(1): 時間追跡の開始時間 (sec)
TIME(2): 時間追跡の終了時間 (sec)
TIME(3): 時間追跡の時間ステップ幅 (sec) |
| 5) TSDIV(4) | 4つの時間区分領域毎の各開始時刻 (sec) で、常に TSDIV(1) = 0.0 sec である。 |

- 6) CCONST(8, 4, 50) CCONST(8,I,J) で、第 J コイルシリーズの第 I 時間区分領域での時間波形を与える 8 つのパラメータを意味する。

[31] COMMON/ SPACDT/

1	RR(20),	ZZ(20),	PP(20),	RRC(20),
2	ZZC(20),	PPC(20),	DRR,	DZZ,
3	DPP,	NR,	NZ,	NP

渦電流磁場を計算する際の空間データ

- | | |
|------------|---|
| 1) RR(20) | 磁場ベクトルポテンシャルを計算する空間点の R 座標 (単位は m) |
| 2) ZZ(20) | 磁場ベクトルポテンシャルを計算する空間点の Z 座標 (単位は m) |
| 3) PP(20) | 磁場ベクトルポテンシャルを計算する空間点の θ 座標 (radian) |
| 4) RRC(20) | 磁場を計算する空間点の R 座標 (単位は m) |
| 5) ZZC(20) | 磁場を計算する空間点の Z 座標 (単位は m) |
| 6) PPC(20) | 磁場を計算する空間点の θ 座標 (radian) |
| 7) DRR | 空間メッシュ Ω_s の R 方向幅 ΔR (単位は m) |
| 8) DZZ | 空間メッシュ Ω_s の Z 方向幅 ΔZ (単位は m) |
| 9) DPP | 空間メッシュ Ω_s の θ 方向幅 $\Delta \theta$ (radian) |
| 10) NR | R 方向の空間メッシュ数 |
| 11) NZ | Z 方向の空間メッシュ数 |
| 12) NP | θ 方向の空間メッシュ数 |

[32] COMMON/ SYSST/

1	NCOND,	NCOIL,	NE,	NC,
2	MDTORS,	MDTRNE,	IPARTY	

複合トーラス導体系のシステムデータ

- | | |
|-----------|--|
| 1) NCOND | 複合トーラス導体系のトーラス導体数: N_t |
| 2) NCOIL | 複合トーラス導体系の外部コイルシリーズ数: N_c |
| 3) NE | 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e |
| 4) NC | 外部能動コイルシリーズ数: N_c^e |
| 5) MDTORS | 複合トーラス導体系でのトーラス導体上の渦電流全モード数: $N_s (= \sum_{N_t}^{1, N_t})$ |
| 6) MDTRNE | 外部受動コイルシリーズを含む複合トーラス導体系における渦電流全モード数: $N_s (= \sum_{N_t}^{1, N_t} N_t + N_c^e)$ |
| 7) IPARTY | 電流関数のパリティ |

[33] COMMON/ TFORM/

1	FORM(8, 40),	MESH(40),	PMESH(4, 40),	IMESH(40)
---	--------------	-----------	---------------	-----------

トーラスの断面形状に関する ℓ 方向のメッシュ点の諸量で、ラベル付 COMMON/ TFORM 0 / と内容は同じであるが、該当するトーラス導体異なる。

- 1) FORM(8,40) Fig. 3.13 に示すトーラスの断面図を参照のこと。

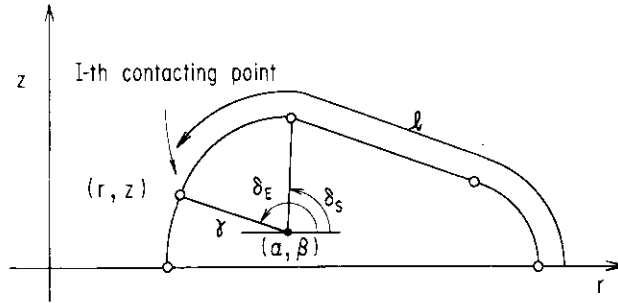


Fig. 3.13 Contacting point (r, z) of a torus cross-section. The (α, β) is the (r, z) coordinate of center of curvature. The γ is the radius of curvature. The δ denotes the angle between the radius of curvature and the r -axis. The l is the length along the cross-section measured from the outermost point of torus.

- FORM(1,I) : 接続点の r 座標 (単位は m)
- FORM(2,I) : 接続点の z 座標 (単位は m)
- FORM(3,I) : 接続点の曲率半径 γ (単位は m) (直線は 0.0)
- FORM(4,I) : 接続点の曲率中心の r 座標 α (単位は m)
- FORM(5,I) : 接続点の曲率中心の z 座標 β (単位は m)
- FORM(6,I) : 前接続点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角 δ_s (radian)
- FORM(7,I) : 接続点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角 δ_E (radian)
- FORM(8,I) : 接続点の始点から断面に沿った長さ (単位は m)

} 入力する。

- 2) MESH(40) 接続点間の分割の仕方
- 3) PMESH(4,40)

- PMESH(1,I) : l 方向メッシュ点の r 座標 (単位は m)
- PMESH(2,I) : l 方向メッシュ点の z 座標 (単位は m)
- PMESH(3,I) : l 方向メッシュ点の δ (radian)
- PMESH(4,I) : l 方向メッシュ点の l (単位は m)

- 4) IMESH(40) そのメッシュ点が属する接続点番号で, FORM (K, I) (K= 1, 2, ..., 8) の I を示す。ただし, 正の場合は円弧, 負の場合は直線を意味する。

[34] COMMON/ TFORM0/

- 1 FORM0(8, 40), MESH0(40), PMESH0(4, 40), IMESH0(40)

トーラスの断面形状に関する l 方向のメッシュ点の諸量で, ラベル付 COMMON/ TFORM/ と内容は同じであるが, 該当するトーラス導体が異なる。

- 1) FORM0(8, 40) Fig. 3.13 に示すトーラスの断面図を参照のこと。

- FORM0(1, I) : 接続点の r 座標 (単位は m)
- FORM0(2, I) : 接続点の z 座標 (単位は m)
- FORM0(3, I) : 接続点の曲率半径 γ (単位は m) (直線は 0.0)
- FORM0(4, I) : 接続点の曲率中心の r 座標 α (単位は m)
- FORM0(5, I) : 接続点の曲率中心の z 座標 β (単位は m)
- FORM0(6, I) : 前接続点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角 δ_s (radian)
- FORM0(7, I) : 接続点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角 δ_E (radian)
- FORM0(8, I) : 接続点の始点から断面に沿った長さ (単位は m)

} 入力する。

- 2) MESH0(40) 接続点間の分割の仕方
- 3) PMESH0(4,40)
- PMESH0(1, I) : ℓ 方向メッシュ点の r 座標 (単位は m)
- PMESH0(2, I) : ℓ 方向メッシュ点の z 座標 (単位は m)
- PMESH0(3, I) : ℓ 方向メッシュ点の δ (radian)
- PMESH0(4, I) : ℓ 方向メッシュ点の ℓ (単位は m)
- 4) IMESH0(40) そのメッシュ点が属する接続点番号で, FORM0 (K,I) (K= 1, 2, ..., 8) の I を示す。ただし, 正の場合は円弧, 負の場合は直線を意味する。

[35] COMMON/ TITLE/

1 ITITLE(2), IDATEN(2), ITITL0(2), IDATE0(2)

問題のタイトル

- 1) ITITLE(2) 本問題のタイトル
- 2) IDATEN(2) 本問題の実行年月日
- 3) ITITL0(2) 参照するデータセットが作成されたときの旧問題のタイトル
- 4) IDATE0(2) 参照するデータセットが作成されたときの旧問題実行年月日

[36] COMMON/ XPROJT/

1 XL(40), XPHI(25), XLPHI(40, 2)

電流密度 J_ℓ , J_ϕ の 1 次元プロットのための領域で, ラベル付 COMMON/ XPROJ0/ とは内容は同じであるが, 該当するトラス導体が異なる。

- 1) XL(40) メッシュ点間の中心の ℓ の値 (単位は m)
- 2) XPHI(25) メッシュ点間の中心の ϕ 値 (radian)
- 3) XLPHI(40, 2) プロット図上の x 軸の実座標
- XLPHI(I, 1) : ℓ の x 軸における実座標 (単位は mm)
- XLPHI(I, 2) : ϕ の x 軸における実座標 (単位は mm)

[37] COMMON/ XPROJ0/

1 XL0(40), XPHI0(25), XLPHI0(40, 2)

電流密度 J_ℓ , J_ϕ の 1 次元プロットのための領域で, ラベル付 COMMON/ XPROJT/ とは内容は同じであるが, 該当するトラス導体が異なる。

- 1) XL0(40) メッシュ点間の中心の ℓ の値 (単位は m)
- 2) XPHI0(25) メッシュ点間の中心の ϕ の値 (radian)
- 3) XLPHI0(40, 2) プロット図上の x 軸の実座標
- XLPHI0(I, 1) : ℓ の x 軸における実座標 (単位は mm)
- XLPHI0(I, 2) : ϕ の x 軸における実座標 (単位は mm)

3.5 各ファイル中のレコード

ここでは, EDDYMULT 計算コードシステムで使用するファイルの中のレコードについて, 5つのプログラム

毎にその内容を説明する。具体的な変数パラメータの意味については、3.3 節入力方法、3.4 節各プログラムに対する共通記憶領域、更に付録 A .3 のサブルーチンの説明のそれぞれ該当部分を参照されたい。

3.5.1 EDTDEC プログラム

[1] EM1DEC プログラム用ファイル (FORTRAN 論理機番 3)

特記以外は全てバイナリーデータである。

1) 第1レコード サイズ: 160 バイト (EBCDIC) + 2 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ TITLE/
ITITLE(2), IDATEN(2)

2) 第2レコード サイズ: 8 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ CONDM/
IMAX, JMAX, MN, NMAX, NPHI, IPOINT, NNPHI, DPHI

3) 第3レコード サイズ: 560 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ TFORM/
FORM(8,40), MESH(40), PMESH(4,40), IMESH(40)

4) 第4レコード サイズ: 42 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ GAUSDT/
IX, IY, ZX(10), WX(10), ZY(10), WY(10)

5) 第5レコード サイズ: 260 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ CPM/
PHIC(25), CPMESH(3,40), DLI(40), PHI(25), DEGR(25), DEGR(25), DEGRC(25)

6) 第6レコード サイズ: 145 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ XPROJT/
XL(40), XPHI(25), XLPHI(40,2)

7) 第7レコード サイズ: 9720 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ GSVAl/
RGS(10,40), ZGS(10,40), DRLGS(10,40), DZLGS(10,40), WPHI(10,4), WL(10,4), DL(40), COSPHI
(10,400), SINPHI(10,400)

8) 第8レコード サイズ: 30 語 (FIXED FIELD)

COMMON/ ETAC1/
R0, ASIGMA, AD, BR0, BSIGMA, BD, IAOPT, BSIG2F, NNSS, IBLI, IBS(20)

9) 第9レコード サイズ: 2 語 (FIXED FIELD)

固有モード数 (MN3), 電流関数のパリティ (IPARTY)

10) 第10レコード サイズ: 2 * MN3 語 (VARIABLE FIELD)

固有値 (EVAL(MN3))

11) 第11レコード サイズ: 2 * MN * MN3 語 (VARIABLE FIELD)

固有ベクトル (SSK(MN, MN3))

ただし, MN = (IMAX + 1) * JMAX である。

〔2〕 作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 4)

全てバイナリーデータで、作業用ファイルのためのレコードの区別はない。

〔3〕 等高線図作成用ファイル (FORTRAN 論理機番 11)

等高線図を描くための 'GPCP' プログラム用入力データで、EBCDIC データである。カードイメージのレコードであり、'JOB' カードから 'END' カードまでの 1 組のデータをいくつか書込んだのち、最後に 'GPCP' の終了を示す 'STOP' カードを書込む。レコードの詳細については、“カルコンプ・アプリケーション・ソフトウェア「GPCP-1」”³⁰⁾を参照すること。

3.5.2 EM1DEC プログラム

〔1〕 EM2DEC, EM3DEC, FLDDEC プログラム用ファイル (FORTRAN 論理機番 21 ~ 30)

全てバイナリーデータであり、ファイルの FORTRAN 論理機番はトラス導体系番号の順に対応する。これら全てのファイルに共通に、第 1 レコードから第 8 レコードまで同様のレコード形式の内容である。本ファイルは EM2DEC, EM3DEC, FLDDEC プログラムが必要であるが、更に必要に応じてそれ自身 EM1DEC (+ ESHARE) プログラムの入力ファイルとしても有効である。

1) 第 1 レコード サイズ: 160 バイト (EBCDIC) + 2 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ TITLE/  
ITITLE(2), IDATEN(2)
```

2) 第 2 レコード サイズ: 8 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ CONDM/  
IMAX, JMAX, MN, NMAX, NPHI, IPOINT, NNPFI, DPHI
```

3) 第 3 レコード サイズ: 560 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ TFORM/  
FORM(8,40), MESH(40), PMESH(4,40), IMESH(40)
```

4) 第 4 レコード サイズ: 42 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ GAUSDT/  
IX, IY, ZX(10), WX(10), ZY(10), WY(10)
```

5) 第 5 レコード サイズ: 260 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ CPM/  
PHIC(25), CPMESH(3,40), DLI(40), PHI(25), DEGR(25), DEGR(25),
```

6) 第 6 レコード サイズ: 145 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ XPROJT/  
XL(40), XPHI(25), XLPHI(40,2)
```

7) 第 7 レコード サイズ: 9720 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ GSVAL/  
RGS(10,40), ZGS(10,40), DRLGS(10,40), DZLGS(10,40), WPHI(10,4), WL(10,4), DL(40), COSPHI  
(10,400), SINPHI(10,400)
```

8) 第 8 レコード サイズ: 30 語 (FIXED FIELD)

```
COMMON/ ETAC1/  
R0, ASIGMA, AD, BR0, BSIGMA, BD, IAOPT, BSIG2F, NNSS, IBLL, IBS(20)
```

- 9) 第9レコード サイズ：2語 (FIXED FIELD)
縮小処理後の固有モード数 (MODRED), 電流関数のパリティ (IPARTY)
- 10) 第10レコード サイズ：2 * MODRED 語 (VARIABLE FIELD)
モード縮小された固有値 (EVAL(MODRED))
- 11) 第11レコード サイズ：2 * MN * MODRED 語 (VARIABLE FIELD)
モード縮小された固有ベクトル (SSK(MN, MODRED))
ただし, MN = (IMAX + 1) * JMAX である。

3.5.3 EM2DEC プログラム

[1] EM3DEC プログラム用ファイル (FORTRAN 論理機番 11)

トーラス導体間相互のモード間結合で, 全てバイナリーデータである。

- 1) 第1レコード サイズ：3語 (FIXED FIELD)
トーラス導体の導体数: N_c (NCOND), トーラスの対称性: N_ϕ (NPFI), 電流関数のパリティ (IPARTY)
- 2) 第2レコード サイズ：2語 (FIXED FIELD)
対となるトーラス導体の縮小されたモード数 N_N, N_N' で, それぞれ IMODE, JMODE である。
- 3) 第3レコード サイズ：IMODE * JMODE 語 (VARIABLE FIELD)
トーラス導体間相互のモード間結合の行列 (SUMKIJ(JMODE, IMODE)) および, FORM(8,40), MESH(40), PMESH(4,40), IMESH(40) のメッシュ諸量
- 4) 第4レコード以下
必要な全てのトーラス導体対の組合せに対し, 第2レコードと第3レコードの内容がこの順に記録される。

[2] 作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 2 および 10)

全てバイナリーデータで, 作業用ファイルのためレコードの区別はない。

3.5.4 EM3DEC プログラム

[1] リスタート用モードデータファイル (FORTRAN 論理機番 2)

外部受動コイルシリーズを含む複合トーラス導体系に対する固有値問題(2.82)式を解いて得られたモード行列が主に記憶されている。これらを含め全てバイナリーデータである。表現の基底は, EDTDEC または EM1DEC プログラムにて求めたトーラス導体毎に与えられる固有関数基底をとっていることに注意のこと。

- 1) 第1レコード サイズ：3語 (FIXED FIELD)
トーラス導体の導体数: N_c (NCOND), 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e (NE), トーラスの対称性: N_ϕ (NPFI)
- 2) 第2レコード サイズ：2語 (FIXED FIELD)
NE ≠ 0 のとき: 外部受動コイルシリーズを含む複合トーラス導体系の渦電流モード総数:
 $N_s (= \sum_{N=1}^{N_c} N_N + N_c^e)$ (MDTRNE), 電流関数のパリティ (IPARTY)
NE = 0 のとき: 外部受動コイルシリーズを含まない複合トーラス導体系の渦電流モード総数: $N_s (= \sum_{N=1}^{N_c} N_N)$
(MDTORS), 電流関数のパリティ (IPARTY)
- 3) 第3レコード サイズ：MDTRNE (NE ≠ 0 のとき)
または MDTORS (NE = 0 のとき) 倍精度語 (VARIABLE FIELD)
NE ≠ 0 のとき: 固有値 (EVAL(MDTRNE))

NE=0 のとき：固有値 (EVAL(MDTORS))

4) 第4レコード サイズ：MDTORS**2*2語 (NE=0 のとき)

または MDTRNE**2*2語 (NE≠0 のとき) (VARIABLE FIELD)

NE=0 のとき：モード行列 (A(MDTORS**2*2))

NE≠0 のとき：モード行列 (A(MDTRNE**2*2))

[2] リスタート用外部起電力係数ファイル (FORTRAN 論理機番 13)

外部受動コイルシリーズを含む複合トラス導体系の渦電流固有モード毎に対する外部起電力係数が記録されている。全てバイナリーデータである。

1) 第1レコード サイズ：6語 (FIXED FIELD)

複合トラス導体系の渦電流モード総数： N_s (NUMSYS)，電流関数のパリティ (IPARTY)，外部受動コイルシリーズ数： N_c^e (NE)，外部能動コイルシリーズ数： N_c^e (NC)，トラス導体数： N_t (NCOND)，トラスの対称性： N_ϕ (NPHI)

2) 第2レコード サイズ：NCOIL*NUMSYS 倍精度語 (VARIABLE FIELD)

外部起電力係数 (CK(NCOIL*NUMSYS))

ただし、大きさ NCOIL*NUMSYS の1次元配列中の最初の NE*NUMSYS 個は、外部受動コイルシリーズの単位電源電圧に対する係数である。残りの NC*NUMSYS 個は、外部能動コイルシリーズの単位電流に対する係数を表わす。

[3] 等高線図作成用ファイル (FORTRAN 論理機番 11)

等高線図を描くための 'GPCP' プログラム用入力データで、EBCDIC データである。カードイメージのレコードであり、'JOB' カードから 'END' カードまでの1組のデータをいくつか書込んだのち、最後に 'GPCP' の終了を示す 'STOP' カードを書込む。レコードの詳細については、“カルコンプ・アプリケーション・ソフトウェア「GPCP-1」”³⁰⁾を参照すること。

[4] 作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 4)

'GPCP' プログラムによる等高線図プロットのための入力データを作成する際に、作業用として使用される。全てバイナリーデータで、作業用ファイルのためのレコードの区別はない。

[5] FLDDEC プログラム用ファイル (FORTRAN 論理機番 10)

FLDDEC プログラムによる磁場計算のためのファイルで、全てバイナリーデータである。

1) 第1レコード サイズ：3語 (FIXED FIELD)

トラス導体数： N_t (NCOND)，外部コイルシリーズ数： $N_c (=N_c^e+N_c^e)$ (NCOIL)，電流関数のパリティ (IPARTY)

2) 第2レコード サイズ：15103語 (FIXED FIELD)

外部コイルシリーズに関する諸量

NE, NC, CETA, CRO(50), CL(50,50), NB(50), CTURN(50,50), CR(50,50), CZ(50,50), CA(50,50), CB(50,50)

3) 第3, 第5, 第7, ..., 第2*NCOND+1レコード サイズ：5語 (FIXED FIELD)

各レコード毎に当該トラス導体のメッシュ諸量が記憶される。

IMAX, JMAX, NPFI, IPOINT, DPHI

4) 第4, 第6, 第8, ..., 第 $2 * NCOND + 2$ レコード サイズ: 520 語 (FIXED FIELD)

各レコード毎に当該トラス導体のメッシュ諸量が記憶される。

FORM(8,40), PMESH(4,40), IMESH(40)

以上までのレコード数を④とする。

5) 第④+1, 第④+3, ..., 第④+ $2 * NCOND - 1$ レコード サイズ: 2 語 (FIXED FIELD)

各レコード毎に当該トラス導体の節点数 (NODE), 複合トラス導体系の渦電流モード総数 $N_s (= \sum_N^{1,N} N_N + N_c^e)$ (NUMSYS) が記憶される。

6) 第④+2, 第④+4, ..., 第④+ $2 * NCOND$ レコード サイズ: NODE * NUMSYS 倍精度語
(VARIABLE FIELD)

各レコード毎に当該トラス導体の固有関数 (VIJ(NODE, NUMSYS)) が記憶される。

以上までのレコード数を⑤とする。

7) 第⑤+1レコード サイズ: 1002 語 (FIXED FIELD)

モード縮小処理のためのデータ

EPS, MODRED, MREDCT(500), CTABLE(500)

以上までのレコード数を⑥とする。

8) 第⑥+1, 第⑥+3, ..., 第⑥+ $2N - 1$ ($N > 0$)レコード サイズ: 2 単精度語 +
NUMSYS 倍精度語 (VARIABLE FIELD)

各レコード毎に当該時間ステップにおける, 時間ステップ番号 (NTS), 時刻 (TS), モードの時間応答係数 (XMODE(NUMSYS)) が組となって記録される。

9) 第⑥+2, 第⑥+4, ..., 第⑥+ $2N$ ($N > 0$)レコード サイズ: NCOIL 語
(VARIABLE FIELD)

各レコード毎に当該時間ステップにおける, 外部コイルシリーズの電流値 (CURRNT(NCOIL)) が記録される。

3.5.5 FLDDEC プログラム

[1] リスタート用渦電流磁場ベクトルポテンシャルファイル (FORTRAN 論理機番 27)

1) 第1, 第2, ..., 第MODENMレコード サイズ: $3 * NR * NZ * NP$ 語 (VARIABLE FIELD)

各レコード毎に当該渦電流モードに関する磁場ベクトルポテンシャル,

NE ≠ 0 のとき: EIGVP(NR, NZ, NP, 3),

NE = 0 のとき: EIGVPN(NR, NZ, NP, 3),

がバイナリーデータ形式で記録される。ただし, MODENM は複合トラス導体系の渦電流モード総数 $N_s (= \sum_N^{1,N} N_N + N_c^e)$, NR, NZ, NP はそれぞれ, R 方向, Z 方向, θ 方向の空間点数である。

[2] トラス導体による渦電流磁場ベクトルポテンシャル用ファイル (FORTRAN 論理機番 21)

1) 第1, 第2, ..., 第MODENMレコード サイズ: $3 * NR * NZ * NP$ 語 (VARIABLE FIELD)

トラス導体分のみの当該渦電流モードに関する磁場ベクトルポテンシャル (B(NR, NZ, NP, 3)) が, バイナリーデータ形式で各レコード毎に記録される。ただし, MODENM は複合トラス導体系の渦電流モード総数 N_s , NR, NZ, NP はそれぞれ, R 方向, Z 方向, θ 方向の空間点数である。

- [3] 外部受動コイルシリーズによる渦電流磁場ベクトルポテンシャル用ファイル (FORTRAN 論理機番 25)
- 1) 第1, 第2, ..., 第 MODENM レコード サイズ: $3 * NR * NZ * NP$ 語 (VARIABLE FIELD)
外部受動コイルシリーズ分のみの当該渦電流モードに関する磁場ベクトルポテンシャル ($A(NR, NZ, NP, 3)$) が、バイナリーデータ形式で各レコード毎に記録される。本来、コイルは軸対称であり磁場ベクトルポテンシャルは θ 方向に一様であるが、処理の便宜上 θ 方向にも分布しているように配列をとってある。MODENM は複合トラス導体系の渦電流モード総数 N_s , NR, NZ, NP はそれぞれ, R 方向, Z 方向, θ 方向の空間点数である。
- [4] モードの時間応答係数用ファイル (FORTRAN 論理機番 24)
- モードの時間応答係数等を全てバイナリーデータ形式にて記録する。
- 1) 第1レコード サイズ: 2 語 (FIXED FIELD)
時間ステップ番号 (NTS), 当該時刻 (TS)
 - 2) 第2レコード サイズ: MODENM 語 (VARIABLE FIELD)
当該時刻における各モードの時間応答係数 (RAREA(MODENM))。ただし, MODENM は複合トラス導体系の渦電流モード総数 N_s である。
 - 3) 第3レコード サイズ: NC 語 (VARIABLE FIELD)
当該時刻における外部能動コイルシリーズの電流値 (RAREA(NC))。ただし, NC は外部能動コイルシリーズのシリーズ数 N_e で, 本レコードは $NC = 0$ のとき記録されない。
 - 4) 第4レコード以下
第1, 第2, 第3レコードと同じレコード内容が同順にて時間ステップ回繰り返して記録される。
- [5] 作業用形状関数ファイル (FORTRAN 論理機番 25)
- トラス導体上の渦電流による磁場ベクトルポテンシャルを得るための形状関数を作業用として一時記憶するためのファイルで, 全てバイナリーデータである。
- 1) 第1, 第2, ..., 第 NP レコード サイズ: $10 * IMAX * JMAXM1$ 語 (VARIABLE FIELD)
SHP(10, IMAX, JMAXM1)
 - 2) 第 NP+1 レコード, ..., 第 $NP * NZ * NR$ レコードまで
1) と同じ内容の形状関数が空間点毎に記録されている。
- [6] 複合トラス導体系の渦電流モード毎の磁束用ファイル (FORTRAN 論理機番 26)
- 1) 第1レコード サイズ: $NR * NZ * MODENM$ 語 (VARIABLE FIELD)
複合トラス導体系の渦電流モード毎の磁束 ($PIJ(NR, NZ, MODENM)$) がバイナリーデータで記録される。
- [7] 複合トラス導体系の渦電流モード毎の磁場用ファイル (FORTRAN 論理機番 25)
- 1) 第1レコード サイズ: $NR1 * NZ1 * NP1 * 3$ 語 (VARIABLE FIELD)
複合トラス導体系の渦電流モード毎の磁場 ($BIJ(NR1, NZ1, NP1, 3)$) がバイナリーデータで記録される。ただし, NR1, NZ1, NP1 はそれぞれ, R 方向, Z 方向, θ 方向の空間メッシュ数である。
 - 2) 第2, ..., 第 MODENM レコードまで
1) と同じ内容のモード毎の磁場が空間点毎に記録されている。

〔8〕 全トラス導体の渦電流固有関数用ファイル (FORTRAN 論理機番 22)

全てバイナリーデータである。

1) 第1レコード サイズ: 2語 (FIXED FIELD)

当該トラス導体の節点数 (NODE), 複合トラス導体系における渦電流モード総数: N_s (MODENM)

2) 第2レコード サイズ: NODE*MODENM語 (VARIABLE FIELD)

当該トラス導体の渦電流固有関数 (EIGF(NODE, MODENM))

3) 第3レコード以下

第1, 第2レコードと同じレコード内容が同順にて, 複合トラス導体系のトラス導体数回繰り返し記録されている。

〔9〕 外部受動コイルシリーズの渦電流固有関数用ファイル (FORTRAN 論理機番 23)

全てバイナリーデータである。

1) 第1レコード サイズ: 2語 (FIXED FIELD)

外部受動コイルシリーズ数: N_e (NE), 複合トラス導体系における渦電流モード総数: N_s (MODENM)

2) 第2レコード サイズ: MODENM語 (VARIABLE FIELD)

当該外部受動コイルシリーズの渦電流固有関数 (EIGF(I, MODENM) ; I=NODE+1)

3) 第3レコード, ..., 第NE+1レコード

第2レコードと同じレコード内容が, 外部受動コイルシリーズ全てに対して繰り返し記録されている。

〔10〕 作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 30 ~ 29 + NCOND)

各ファイルがトラス導体の1つ1つに対応しており, ファイル毎に各トラス導体上の渦電流による磁場ベクトルポテンシャルが記憶されている。全てのファイル共通に, 以下のようなレコード内容がバイナリーデータ形式にて順に記録されている。

1) 第1レコード サイズ: 3*NR*NZ*NP語 (VARIABLE FIELD)

第1渦電流モードによる磁場ベクトルポテンシャル (VCP(NR, NZ, NP, 3))

2) 第2, 第3, ..., 第MODENMレコード サイズ: 3*NR*NZ*NP語 (VARIABLE FIELD)

各々, 第2, 第3, ..., 第MODENM渦電流モードによる各磁場ベクトルポテンシャル (VCP(NR, NZ, NP, 3)) が記録される。

〔11〕 磁場分布の図形出力用ファイル (FORTRAN 論理機番 29)

'ARGUS'³¹⁾による磁場分布の図形出力のための入力データファイルで, バイナリーデータである。入力パラメータが IPLTEV=1 のとき, 渦電流モードに関する磁場分布のデータが記録され, IPLTVP=1 または -1 のとき, 時間追跡解に関する磁場分布のデータが記録される。

IPLTEV=1 のとき

1) 第1レコード サイズ: 8語 (FIXED FIELD)

次の主に空間点データで, NR, NZ, RRS, RRE, ZZS, ZZE, MODENM, IFLAG。ただし, 渦電流モードか時間追跡かの識別パラメータは IFLAG=1 である。

2) 第2レコード サイズ: MODENM語 (VARIABLE FIELD)

R, Z 空間点上のモード毎の渦電流磁束 (PIJ(I, J, MODENM) ; I=1, J=1)

- 3) 第3, 第4, ..., 第 $NZ+1$ レコード サイズ: MODENM 語 (VARIABLE FIELD)
 R, Z 空間点上のモード毎の渦電流磁束 ($PIJ(I, J, MODENM)$; $I=1, J=2, 3, \dots, NZ$)
- 4) 第 $NZ+2, \dots$, 第 $NR*NZ+1$ レコード サイズ: MODENM 語 (VARIABLE FIELD)
 R, Z 空間点上のモード毎の渦電流磁束 ($PIJ(I, J, MODENM)$; $I=2, 3, \dots, NR, J=1, 2, 3, \dots, NZ$)

IPLTVP = 1 または -1 のとき

- 1) 第1レコード サイズ: 8 語 (FIXED FIELD)
 次の主に空間点データで, $NR, NZ, RRS, RRE, ZS, ZZE, IETM, IL2$ 。ただし, $IPLTEV=0$ のとき $IL2=2$, $IPLTEV=1$ のとき $IL2=3$ である。
- 2) 第2レコード サイズ: 1 語 (FIXED FIELD)
 当該時刻 (TS)
- 3) 第3レコード サイズ: 1 語 (FIXED FIELD)
 R, Z 空間点 (1, 1) 上の当該時刻の渦電流磁束 ($IPLTVP=-1$ のとき), または外部能動コイルシリーズを含む全磁束 ($IPLTVP=1$ のとき) で, $AFLUX(1, 1)$ 。
- 4) 第4レコード, ..., 第 $NR*NZ*2$ レコード サイズ: 1 語 (FIXED FIELD)
 当該時刻の渦電流磁束 ($IPLTVP=-1$ のとき), または外部能動コイルシリーズを含む全磁束 ($IPLTVP=1$ のとき) で, R, Z 空間点 (1, 1) を除く全ての R, Z 空間点の $AFLUX(I, J)$ ($I=2, 3, \dots, NR; J=2, 3, \dots, NZ$)。
- 5) 第 $NR*NZ+3$ レコード以下
 第2レコード以下第 $NR*NZ+2$ レコードまでのデータと同様のデータが組となって時間ステップ回繰り返し記録されている。

3.6 使用上の注意

ここでは, 本計算コードシステムを使用するにあたっての使用制限事項および問題毎のコアサイズの推定の仕方について述べる。本節に現れる変数パラメータには一部その具体的な意味を説明してあるが, その他の変数パラメータについては, 3.3 節入力方法, 3.4 節各プログラムに対する共通記憶領域, 更に付録 A. 3 のサブルーチンの説明のそれぞれ該当部分を参照願いたい。

3.6.1 使用上の制限

- 1) トーラス導体のメッシュ分割数
 - ・ ℓ 方向 (トーラス導体のポロイダル断面に沿った方向) の最大メッシュ数は 38 以下に制限される。
 - ・ ϕ 方向 (トロイダル方向) の最大メッシュ数は 24 以下に制限される。
- 2) 渦電流モード数
 - ・ EDTDEC プログラムにおける単一のトーラス導体の渦電流モード解析および EM3DEC プログラムにおける複合トーラス導体系の渦電流モード解析のいずれに対しても最大 500 モードである。
- 3) 複合トーラス導体系のトーラス導体数 N_c
 - ・ 10 トーラス導体が最大である。
- 4) 外部コイルシリーズに関する制限
 - ・ 外部受動, 能動コイルシリーズ数の総和 N_c は 50 以下に制限される。
 - ・ 各コイルシリーズのブロック数は 50 以下に制限される。

- 5) トーラスの対称性 N_ϕ と ϕ 方向のメッシュ点数 JMAX との関係
 - ϕ 方向の分割数を N とすると, $JMAX=N-1$ となる。 ϕ 方向の Gauss-Legendre 数値積分では, $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$ の範囲にある全ての積分点の SIN, COS の値を求める。このとき, $N_\phi \cdot N + 1 \leq 400$ の制限を受ける。実際には複合トーラス導体系での処理の際に, 更に若干の制限追加があるが, 実用上 400 の制限には充分であると考えてよい。
- 6) ポート穴入力に関する制限
 - ポート穴は最大 5 個である。
 - 一個当たりのポート穴頂点の入力数は最大 20 である。
 - 一個のポート穴に含まれるカットは 1 本で, 2 本以上考慮することはできない。
- 7) Gauss-Legendre 積分に関する制限
 - ℓ 方向, ϕ 方向共に積分点である Legendre 多項式の零点は最大 10 点である。
- 8) トーラス導体のベローズ・厚肉境界に関する制限
 - 境界数は最大 20 である。
- 9) 等高線図プロットのときの注意
 - $t=0$ では渦電流は発生しない。したがって, 等高線図プロットのための 'GPCP' プログラム³⁰⁾でのデータ処理に不都合をきたすため, EM3DEC プログラムでは出力プロット開始の時間ステップ (ISTM) を 2 とする必要がある。
- 10) トーラス導体の空間配置
 - トーラス導体は, 互いに交差してはならない。
 - 各トーラス導体は, トーラス赤道面に関し上下対称が仮定される。
- 11) 図形出力枚数に関する制限
 - 電流密度 J_ℓ, J_ϕ の 1 次元プロットおよび等高線図プロットなどの図形出力量は, 記憶容量との関係から制限を受ける。各々 20 枚程度をその目安とする。
- 12) 外部起電力波形に関する制限
 - 外部受動コイル, 能動コイルシリーズ共に 8 つの初等関数の組にて 1 つの起電力波形が与えられる。 $t \geq 0$ の時間領域を最大 4 つの時間区分領域に分け, この領域毎に 4 組の起電力波形を連続して与えることができる。

3.6.2 コアサイズの決め方

EDDYMULT コードシステムの実行にあたっては, 問題毎にソースプログラムの処理用共通記憶領域の大きさを指定してやる必要がある。このため, 問題に見合った合理的な大きさの記憶領域の指定をするのが望ましい。以下に各処理段階毎にコアサイズの算出法を述べる。まず, 多用する記号の説明を行う。

MN : トーラス導体の節点数 (= $(IMAX+1) \cdot JMAX$)

NCOIL : 外部コイルシリーズ数: N_c (= $NE+NC$)

NUMSYS: 複合トーラス導体系の渦電流総数 N_s で, 外部受動コイルシリーズがない場合 ($NE=0$), 全てのトーラス導体上の渦電流総数 (MDTORS) に等しい。

JMODE : 或るトーラス導体 S_N 上の縮小された固有関数基底の数 N_N^*

[1] EDTDEC プログラム

ℓ, ϕ 方向のメッシュの取り方やリスタート計算か否かなどのオプションに主に依存し, 次のように配列

AREA および配列 AREAB の大きさを指定する。

1) 配列 AREA の大きさ

$2 * MN * * 2$ 。ただし、リスタート計算のとき $2 * MN * MN3$ でよい。MN3 は 1 次独立な固有関数の次数で、常に $MN3 < MN$ が成り立つ。

2) 配列 AREAB の大きさ

$2 * MN * * 2$ または $(IMAX + 1) * (IMAX + 2) * \{ JMAX + (NPHI - 1) * (JMAX - 1) \}$ の大きい方を指定する。ただし、リスタート計算のときには本記憶領域は不要である(便宜上、 $= 1$ とおく)。

〔2〕 EM1DEC プログラム

縮小処理を行うトラス導体の ℓ , ϕ 方向メッシュの取り方に主に依存し、倍精度の記憶領域 A に対して、最大の $NMODE * (2 * MN + NCOIL)$ の記憶領域が必要となる。ただし、NMODE は縮小前の当該トラス導体のモード数である。

〔3〕 EM2DEC プログラム

複合トラス導体系のトラス導体の ℓ , ϕ 方向メッシュおよび渦電流モードの数に主に依存する。倍精度の記憶領域 A に対して、以下の 1), 2), 3) の場合で最大の値である。本プログラムではトラス導体対 (S; S') を考えるが、JMODE, JMAX などの諸量に関するトラス導体についての識別は、それぞれ JMODE', JMAX' などのように区別して表わす。

1) $KKK * (JMAX - 1) * (JMAX - 1)' * (2 * NPHI + 1)$ 。ただし、数値積分が Gauss-Legendre 積分のとき $KKK = 16$ であり、重心近似によるとき $KKK = 4$ である。

2) $I42 * JMODE' * (JMAX - 1) * IMAX$ に以下の大きい方を加えたものとする。

2-1) $JMODE' * MN$

2-2) $(JMAX - 1) * (JMAX - 1)' * (KKK + I42 * JMODE')$ 。ただし、数値積分が Gauss-Legendre 積分のとき $I42 = 4$ であり、重心近似によるとき $I42 = 2$ である。

3) $I42 * JMODE * (JMAX - 1)' * IMAX'$ に以下の大きい方を加えたものとする。

3-1) $JMODE' * \{ I42 * JMAX * (JMAX - 1)' + JMODE \}$

3-2) $JMODE * MN'$

ほとんどの場合について、以下の簡略式が成り立つ。すなわち、

$$2 * NPHI * KKK * JMAX * * 2,$$

或いは、

$$JMODE * JMAX * \{ I42 * (JMAX + IMAX) + IMAX \},$$

の大きい方となる。ただし、各変数は複合トラス導体系のトラス導体の内最も大きい値をとる。

〔4〕 EM3DEC プログラム

複合トラスの導体系のメッシュ総数、渦電流モード総数、更に、リスタート計算か否かなどに主に依存し、以下の 2 つの分類の内大きい方となる。

1) モード解析時の記憶領域 A の大きさ

1-1) リスタート計算のとき ($IRST = 1$)

$2 * NUMSYS * (NUMSYS + 1)$ に、トラス導体毎に要する記憶領域で最大の $2 * MN * JMODE + NUMSYS * (MN + NE)$ を加え、更に $2 * IMAX * (JMAX - 1) + NUMSYS$, または $IDUMOP = 1$ のと

きのみ、 $2 * \text{NUMSYS} + 50$ の大きい方を加算したものである。この簡略式は、 $2 * \text{NUMSYS} * (\text{NUMSYS} + \text{JMODE} + \text{IMAX} * \text{JMAX} / 2) + 30000$ である。ただし、各変数は複合トラス導体系のトラス導体の内最大のものとする。

1-2) リスタート計算以外のとき ($\text{IRST} \neq 1$)

1-1) の記憶領域か或いは $2 * \text{NUMSYS} * * 2 + 2 * \text{MDTORS} * * 2$ の大きさの記憶領域かどちらか大きい方に、 $13 * \text{NUMSYS}$ かまたはトラス導体毎に要する記憶領域で最大の $\text{JMODE} * \text{JMODE}'$ または $2 * \text{MDTORS} * \text{NE} + (\text{IMAX} + 1) * \text{JMODE} * (\text{JMAX} + 1) + \text{IMAX} * \text{IY}$ のいずれか大きい方を加算したものとなる。この簡略式は、 $4 * \text{NUMSYS} * * 2 + 100 * \text{NUMSYS} + \text{JMODE} * \text{MN}$ である。ただし、各変数は、複合トラス導体系のトラス導体の内最大のものとする。

2) 時間追跡時の記憶領域 A の大きさ

$2 * \text{NUMSYS} * (\text{NCOIL} + \text{NUMSYS} + \text{NTDIV} + 2)$ に、次の場合のどちらか大きい方を加算した大きさである。

2-1) $2 * \text{NC} * \text{NUMSYS}$ に、次の算出式で与えられるトラス導体毎に要する記憶領域の最大の値を加算したもの。

$$2 * (\text{IMAX} - 1) * \text{JMODE} * (\text{JMAX} + 1) + 2 * \text{IMAX} * \text{IY}。$$

2-2) 以下の大ききでトラス導体の内最大のもの。

$2 * \text{NUMSYS} * (\text{MN} + \text{NE} + 1) + 2 * \text{MN} * \text{JMODE}$ に $2 * \text{IMAX} * (\text{JMAX} - 1) + \text{MN}$ かまたは $2 * \text{NUMSYS}$ ($\text{IDUMOP} = 1$ のときのみ) の大きい方の値を加算したもの。この簡略式は、 $2 * \text{NUMSYS} * (2 * \text{NCOIL} + \text{NUMSYS} + \text{MN} + 5) + 2 * (\text{IMAX} + 1) * (\text{JMAX} + 1) * \text{JMODE} + 3000$ である。ただし、各変数は複合トラス導体系のトラス導体の内最大のものとする。

[5] FLDDEC プログラム

トラス導体系のメッシュの取り方、磁場諸量を求める際の空間点数、リスタート計算か否かなどに依存し、以下の4通りの場合の内でも大きなものである。

1) サブルーチン 'RDFILE' で必要な RAREA の大きさ

$2 * (\text{MN} + \text{NE}) * \text{NUMSYS}$ の最大のものか、或いは $2 * \text{NUMSYS} + \text{NCOIL}$ の大きい方で、一般に前者が大きい場合がほとんどである。

2) サブルーチン 'VECPOT' で必要な RAREA の大きさ

以下の3つの場合の内でも最大のものである。

2-1) $10 * \text{IMAX} * (\text{JMAX} - 1) + 2 * \text{IPGAUS} * \text{MJMAX} * \text{NP} + 4 * \text{ILGAUS} * \text{IMAX} + 2 * (\text{IPGAUS} + \text{ILGAUS}) + \text{IMAX}$ 。ただし、 $\text{MJMAX} = 2 * \text{NPHI} * (\text{JMAX} - 1)$ である。一般に、 $2 * (\text{IPGAUS} + \text{ILGAUS}) + \text{IMAX} = 80$ と定めてよい。

2-2) $\text{MN} * \text{NUMSYS} + 10 * \text{IMAX} * (\text{JMAX} - 1) + 3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP} * \text{NUMSYS}$

2-3) $\text{NR} * \text{NZ} * \text{NUMSYS} * \text{NE}$ に $\text{NUMSYS} + \text{NR} * \text{NZ} * \text{NE}$ を加えた値、または $3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP}$ の大きい方とする。ただし、本ルーチンは $\text{IRST} = -1$ のときパスされるので、この場合 RAREA の大きさは零である。

3) サブルーチン 'CALMAG' で必要な RAREA の大きさ

$3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP} + \text{NR} * \text{NZ} * \text{NUMSYS} + \text{NP}$ または $3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP} + 3 * (\text{NR} - 1) * (\text{NZ} - 1) * (\text{NP} - 1) + 2 * (\text{NR} - 1) * (\text{NZ} - 1) + \text{NP} - 1$ の大きい方とする。

4) サブルーチン 'TMANAL' で必要な RAREA の大きさ

$NR * NZ * NC + 2 * (NR - 1) * (NZ - 1) * NC + NUMSYS + NC$ に $6 * NR * NZ * NP$ かまたは $NR * NZ * (NUMSYS + 1)$ の大きい方を加算したものの。

3.7 計算例

EDDYMULT コードシステムによる解析例として、Fig. 3.14 に示すような2つのトーラス導体と1つの外部能動コイルから構成される簡単な複合トーラス導体系を考えた。計算には、原子力研究所計算センターに設置の FACOM M-380 を用いた。本計算例の場合の各プログラム毎の使用記憶容量、要した計算時間を Table 3.1 に示す。多量の計算時間を要するトーラス導体間相互の磁氣的結合を算出する EM2DEC プログラムの処理には、形状関数を導入して約7秒を要している。形状関数を用いずモード毎の磁氣的結合を直接求めた場合には、これがおよそ10倍の約70秒程度の多量の計算時間を必要とすると考えられる。実際のトカマク装置のような大規模な渦電流問題に対しては、処理時間が膨大になることが予想され、形状関数の導入の効果が著しいことがわかる。また、本計算例では問題が小規模であるため、あえて次元縮小を実施しなかったが、以下の計算結果にみられるように次元縮小の対象となる除去可能な渦電流モードが実際に存在していることがわかる。大規模な渦電流問題に際しては次元縮小処理を実施することにより、Table 3.1 に示す EM2DEC プログラム以後の処理の際の記憶容量を大幅に低減することが期待できる。

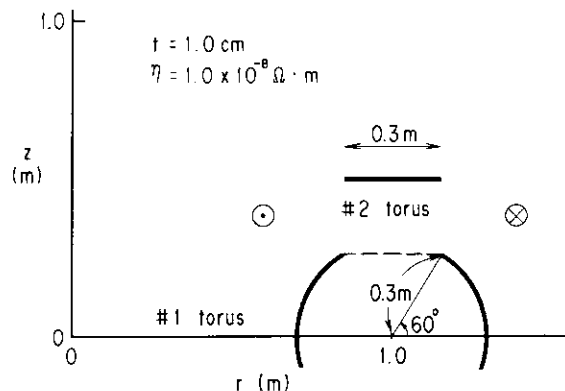


Fig. 3.14 Poloidal cross-section of the multi-torus system for an example problem. The #1 conductor is a torus of the elliptic cross-section with an electrical cut and a port-hole. The #2 conductor is a plate with an electrical cut. Both the conductors are made of a homogeneous plate of 1.0 cm thickness. The eddy current is induced by the dipole current of the current-given coil.

Table 3.1 High speed storage required and typical running time to each step of EDDYMULT code system for the example problem.

Each Step of EDDYMULT Code System	High Speed Storage Required (Kwords)		Typical Running Time (sec)	
	odd	even	odd	even
EDTDEC program for #1 torus (#2 torus)	467 (461)	467 (461)	17.03 (16.01)	17.19 (16.07)
EM1DEC program	547	547	3.16	2.88
EM2DEC program	375	375	7.12	7.09
EM3DEC program	1214	1215	16.69	21.07
FLDDEC program	1468	1468	131.83	131.95

ここでは、トーラス導体毎の渦電流固有モード解析から複合トーラス導体系の磁場構造解析に至るまでの全ての解析をしたので、その結果を要約する。電流関数は odd および even の両パリティに対して考慮した。なお、プリンター出力およびプロッター出力の中には適当に注釈を加え詳細な説明を心掛けた。

複合トーラス導体系のトロイダル方向の対称性は 40° ($N_\phi = 9$) とし、解析対象を $0^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$ のトロイダル区間に限定した。Fig. 3.14 に示すように、#1 トーラスは楕円形断面形状を有し、ポート穴およびカットを持つ主半径 1.0 m のトーラス状導体である。#2 トーラス導体は、カットのみを有する平板状トーラスである。#1、#2 トーラス導体共にその導体材料の体積固有抵抗を $1.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、厚さ 1.0 cm とした。外部能動コイルは、コイルの全アンペア・ターンが零の双極性軸対称コイルである。トーラス導体上の電流関数が even のとき、この外部能動コイルは系の赤道面上下で互いに反対の向きに電流が流れることになる。これらのトーラス導体のメッシュ分割を Fig. 3.15 に示す。#1 トーラスについては、 ϕ 方向に 3 等分割し、 l 方向に 7 分割した。#2 トーラスについては、 ϕ 方向に 3 分割し、 l 方向に 2 分割した。本計算例においては、EDTDEC プログラムで得られた各トーラス導体毎の渦電流固有モードの縮小処理を実施せず、複合トーラス導体系の解析にあたり全てのモードを基底関数として採用した。後述の EM1DEC プログラムの可制御性判定結果によれば、#1 トーラス導体上の #5、8、9、10 モードが縮小対象であることがわかるが、これらのモードを除去した場合、EM2DEC プログラム以後の処理に要する記憶容量はおおよそ 2/3 に減少する。EM2DEC プログラムにおけるトーラス導体間相互のモード間結合は、Gauss-Legendre 数値積分により求めた。EM3DEC プログラムにおける時間追跡では、外部能動コイルのコイル電流 $I(t)$ を

$$I(t) = I_0 \cdot \exp(-t/\tau),$$

I_0 : $t=0$ での初期電流 (= 1 MA), τ : 電流変化の時定数 (= 0.1 sec),

のように与えた。磁場構造の磁束分布図形出力は図形の出力にあたり、対象とする (R, Z) 空間を 2 ブロックに分けて処理を行い、'ARGUS'³¹⁾ 利用のオフライン処理時にこの 2 つの空間ブロックを画面合成した。

EDTDEC プログラムおよび EM3DEC プログラムによる固有値問題の計算では、係数行列 $\{ A \}$ のトレース ($\text{Tr}\{ A \} = \sum_i a_{ii}$) と得られた固有値の総和との比較、および得られたモード行列の正規直交性のチェックにより

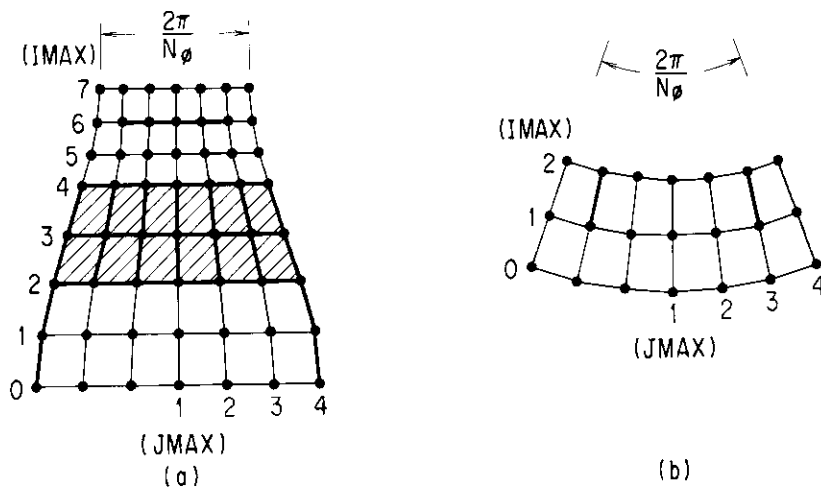


Fig. 3.15 Mesh charts of the tori of the example problem. (a) the #1 torus expanded on a plane, which is divided into finite elements as $JMAX=4$, $IMAX=7$; (b) the projection of the #2 torus, which is divided into finite elements as $JMAX=4$, $IMAX=2$. Here, the thick line denotes the port-hole or cut.

渦電流モード解析の精度評価を行った。本計算例では共に 10^{-14} のオーダーの精度を得ており、理論精度に近い良好なモード解析であることを確認した。

3.7.1 プリンター出力

even パリティの電流関数に関しては全てのプリンター出力を省略する。

(1) EDTDEC プログラム

① #1 トラス導体の主要プリンター出力 (odd パリティ)

NUMBER OF CONTACT POINT 4 NPHI 9

I	R (M)	Z (M)	GAMMER (M)	ALPHA (M)	BETA (M)	DELTA (RADIAN)	DELTAE (RADIAN)	L (M)	MESH
1	1.300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	1.150	0.260	0.300	1.000	0.000	-0.000	1.047	0.314	2
3	0.850	0.260	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.614	2
4	0.700	0.0	0.300	1.000	0.000	2.094	3.142	0.928	3

IMAX= 7 JMAX= 4 DPHI= 0.11635524E+00 (RADIAN)

MESH POINT OF L DIRECTION

MESH NO.	R (M)	Z (M)	DELTA (RADIAN)	L (M)	INDX
0	1.300	0.0	-0.000	0.0	2
1	1.260	0.150	0.524	0.157	2
2	1.150	0.260	0.0	0.314	-3
3	1.000	0.260	0.0	0.464	-3
4	0.850	0.260	2.094	0.614	4
5	0.770	0.193	2.443	0.719	4
6	0.718	0.103	2.793	0.824	4
7	0.700	0.0	3.142	0.928	4

MESH POINT OF PHI DIRECTION

	1	2	3	4
RADIAN	0.0	0.11636	0.23271	0.34907
DEGREE	0.0	6.7	13.3	20.0

1次独立な節点数に対応

ELGENVALUE (FROM 1 TO 10) (even パリティのときは 16)

1 0.2317590E+00 2 0.5099608E-01 3 0.4783254E-01 4 0.3509909E-01 5 0.2897297E-01
6 0.2433786E-01 7 0.2395219E-01 8 0.1941443E-01 9 0.1736004E-01 10 0.1408366E-01

*** EIGEN VECTOR PRINT ***

(0; 1) の原点に接続しているポート穴と
カットであるため縮退している。

I= 1 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		0.0	-3.044E-01	-3.647E-01	-3.734E-01
3		0.0	0.0	0.0	0.0
4		0.0	0.0	0.0	0.0
5		0.0	0.0	0.0	0.0
6		5.209E+01	5.209E+01	5.209E+01	5.209E+01
7		1.147E+02	1.147E+02	1.147E+02	1.147E+02
8		1.824E+02	1.824E+02	1.824E+02	1.824E+02

I= 3 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		0.0	4.073E+01	8.415E+01	1.018E+02
3		0.0	0.0	0.0	0.0
4		0.0	0.0	0.0	0.0
5		0.0	0.0	0.0	0.0
6		9.324E+00	9.266E+00	9.144E+00	9.087E+00
7		1.147E+01	1.140E+01	1.140E+01	1.140E+01
8		1.924E+00	1.924E+00	1.924E+00	1.924E+00

カット上の節点のため
縮退している。

I= 5 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		0.0	-2.613E-01	-6.168E-03	5.651E-01
3		0.0	0.0	0.0	0.0
4		0.0	0.0	0.0	0.0
5		0.0	0.0	0.0	0.0
6		-8.940E+01	-4.430E+01	4.615E+01	8.571E+01
7		-4.897E+01	9.793E+00	9.793E+00	9.793E+00
8		6.881E-05	6.881E-05	6.881E-05	6.881E-05

I= 6 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		0.0	-4.186E+01	6.253E+01	-7.172E+01
3		0.0	0.0	0.0	0.0
4		0.0	0.0	0.0	0.0
5		0.0	0.0	0.0	0.0
6		1.150E+00	1.202E+00	1.311E+00	1.360E+00
7		-1.242E+00	-1.159E+00	-1.159E+00	-1.159E+00
8		1.991E-02	1.991E-02	1.991E-02	1.991E-02

② #2 トーラス導体の主要プリンター出力 (odd パリティ)

NUMBER OF CONTACT POINT 2 NPHI 9

I	R (M)	Z (M)	GAMMER (M)	ALPHA (M)	BETA (M)	DELTAS (RADIAN)	DELTAE (RADIAN)	L (M)	MESH
1	1.150	0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	0.850	0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.300	2

IMAX= 2 JMAX= 4 DPHI= 0.11635524E+00 (RADIAN)

MESH POINT OF L DIRECTION

MESH NO.	R (M)	Z (M)	DELTA (RADIAN)	L (M)	INDX
0	1.150	0.500	0.0	0.0	-2
1	1.000	0.500	0.0	0.150	-2
2	0.850	0.500	0.0	0.300	-2

MESH POINT OF PHI DIRECTION

	1	2	3	4
RADIAN	0.0	0.11636	0.23271	0.34907
DEGREE	0.0	6.7	13.3	20.0

1次独立な節点数に対応
(even パリティのときも同じ)

EIGENVALUE (FROM 1 TO 4)

1 0.1400614E+00 2 0.3916267E-01 3 0.2737578E-01 4 0.2104686E-01

*** EIGEN VECTOR PRINT ***

I= 1 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		9.429E+01	1.225E+02	7.956E+01	6.977E+01
3		1.225E+02	1.225E+02	1.225E+02	1.225E+02

カット上の節点であるため縮退している。

I= 3 EIGENVECTOR

I	J	1	2	3	4
1		0.0	0.0	0.0	0.0
2		-1.284E+02	8.555E+00	-4.177E-01	-4.195E+01
3		8.555E+00	8.555E+00	8.555E+00	8.555E+00

[2] EM1DEC プログラム

*** CONTROL INPUT SYSTEM ***

----- COIL NO. 1 -----

1	6.00000E-01	3.75000E-01	-1.00000E+00
2	1.40000E+00	3.75000E-01	1.00000E+00
	R 座標	Z 座標	ターン数

*** CONTROLLABILITY OF 1-TH CONDUCTOR EIGEN MODE ***

OLD MODE NO. = 1	(NEW) = 1	C-INDEX = 3.748E-04
OLD MODE NO. = 2	(NEW) = 2	C-INDEX = 6.391E-04
OLD MODE NO. = 3	(NEW) = 3	C-INDEX = 8.098E-04
OLD MODE NO. = 4	(NEW) = 4	C-INDEX = 3.132E-04
OLD MODE NO. = 5	(NEW) = 5	C-INDEX = 1.013E-07
OLD MODE NO. = 6	(NEW) = 6	C-INDEX = 1.015E-04
OLD MODE NO. = 7	(NEW) = 7	C-INDEX = 7.809E-04
OLD MODE NO. = 8	(NEW) = 8	C-INDEX = 2.938E-08
OLD MODE NO. = 9	(NEW) = 9	C-INDEX = 3.224E-08
OLD MODE NO. = 10	(NEW) = 10	C-INDEX = 1.307E-09

可制御性

*** CONTROLLABILITY OF 2-TH CONDUCTOR EIGEN MODE ***

OLD MODE NO. = 1	(NEW) = 1	C-INDEX = 3.106E-03
OLD MODE NO. = 2	(NEW) = 2	C-INDEX = 1.651E-03
OLD MODE NO. = 3	(NEW) = 3	C-INDEX = 1.343E-03
OLD MODE NO. = 4	(NEW) = 4	C-INDEX = 6.796E-04

可制御性

(3) EM2DEC プログラム

```

NA = 1      NB = 1
NNAB = 3    JABEQ = 1

--- NBLow(I) ---
      28

      JMAXO      NPPIO      DPHIO      JMAX      NPPI      DPHI
      4          9      0.11636      4          9      0.11636

0
2 ← Gauss-Legendre 積分による形状関数の計算に要した時間 (sec)

I   J       1         2         3         4
1   6.860D-02  3.326D-03  4.773D-03 -2.704D-03
2   1.238D-02  7.394D-04  9.747D-04 -5.412D-04
3  -2.775D-04  2.532D-04  1.523D-04 -7.020D-05
4  -5.101D-04  9.092D-06  2.870D-05 -1.114D-05
5  -2.934D-05 -1.033D-04  3.372D-05 -1.417D-05
6   2.484D-04  1.035D-06 -1.126D-07 -2.527D-06
7  -3.578D-03 -1.919D-04 -2.635D-04  1.479D-04
8  -5.019D-06 -1.611D-05  3.033D-06 -3.576D-06
9   1.854D-06  8.231D-06 -5.222D-06 -4.300D-07
10  -3.873D-08 -3.198D-07  2.389D-07 -1.593D-07
      2

I: #1 トーラス導体のモード番号に対応している。
J: #2 トーラス導体のモード番号に対応している。
    
```

(4) EM3DEC プログラム

```

***** COIL INFORMATION *****
NE = 0      NC = 1 ← 1つの外部能動コイルシリーズ
RESISTIVITY OF CONDUCTOR (OHM*M) = 0.0

--- COIL SERIES NO. 1 ( CURRENT GIVEN ) ---
NUMBER OF BLOCKS = 2  EXTERNAL RESISTANCE(OHM) = 1.00000E-03  EXTERNAL INDUCTANCE(H) = 0.0

NO.  R(M)      Z(M)      NO.OF TURNS  A(M)      B(M)
1   6.00000E-01  3.75000E-01 -1.00000E+00  1.00000E-01  1.00000E-01
2   1.40000E+00  3.75000E-01  1.00000E+00  1.00000E-01  1.00000E-01

*** CONSTANT ***
                               I0exp(-t/τ)の電流波形
*****
*
* X(T) = C1 + C2*T + C3*( EXP(-T / TAU ) - 1 ) + C4*SIN( W1*T ) + C5*( COS( W2*T ) - 1 ) *
*
*****

TIME DOMAIN ( 1 )  TS = 0.0  TE = 0.100000011E+71

NO. 1 COIL SERIES
      C1      C2      C3      C4      C5      TAU      W1      W2
1 (A)  1.000E+06  0.0      1.000E+06  0.0      0.0      1.000E-01  0.0      0.0

                               #1 トーラス導体で10, #2 トーラス導体で4,
                               合わせて14モード

EIGEN VALUE (FROM 1 TO 14)

1 0.2687257D+00  2 0.1057955D+00  3 0.4887052D-01  4 0.4783228D-01  5 0.3900544D-01
6 0.3509552D-01  7 0.2897247D-01  8 0.2720655D-01  9 0.2433735D-01  10 0.2378213D-01
11 0.2097306D-01  12 0.1941441D-01  13 0.1736004D-01  14 0.1408367D-01
    
```

*** EIGEN VECTOR PRINT ***

1 -TH CONDUCTOR M= 11 EIGENVECTOR

EVAL = 0.20973E-01

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	1	2	3	4			
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
2	0.0	-5.478E-01	0.0	1.555E-02	-2.704E-02	-5.065E-02			
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
6	4.815E+01	4.815E+01	0.0	5.944E+00	6.164E+00	6.278E+00			
7	1.030E+02	1.030E+02	0.0	1.403E+00	1.726E+00	1.726E+00			
8	1.609E+02	1.609E+02	0.0	3.791E+00	3.791E+00	3.791E+00			

2 -TH CONDUCTOR M= 1 EIGENVECTOR

EVAL = 0.26873E+00

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	1	2	3	4			
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
2	0.0	4.253E+01	0.0	5.813E+01	3.595E+01	3.146E+01			
3	0.0	5.813E+01	0.0	5.813E+01	5.813E+01	5.813E+01			

2 -TH CONDUCTOR M= 4 EIGENVECTOR

EVAL = 0.47832E-01

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	1	2	3	4			
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
2	0.0	2.352E+00	0.0	2.526E+00	6.386E-02	-9.518E-01			
3	0.0	2.526E+00	0.0	2.526E+00	2.526E+00	2.526E+00			

1 -TH CONDUCTOR M= 1 EIGENVECTOR

EVAL = 0.26873E+00

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	2	3	4				
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	0.0	-5.478E-01	0.0	-6.496E-01	-6.627E-01				
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
6	4.815E+01	4.815E+01	0.0	4.815E+01	4.814E+01				
7	1.030E+02	1.030E+02	0.0	1.030E+02	1.030E+02				
8	1.609E+02	1.609E+02	0.0	1.609E+02	1.609E+02				

1 -TH CONDUCTOR M= 4 EIGENVECTOR

EVAL = 0.47832E-01

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	2	3	4				
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	0.0	4.100E+01	0.0	8.472E+01	1.025E+02				
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
6	3.185E+00	3.122E+00	0.0	2.986E+00	2.923E+00				
7	3.629E+00	3.556E+00	0.0	3.556E+00	3.556E+00				
8	-1.955E-01	-1.955E-01	0.0	-1.955E-01	-1.955E-01				

1 -TH CONDUCTOR M= 7 EIGENVECTOR

EVAL = 0.28972E-01

*****		(I,J)		*****		(A)		*****	
I	J	1	2	3	4				
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	0.0	-2.625E-01	0.0	-9.910E-03	5.613E-01				
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
6	-8.945E+01	-4.437E+01	0.0	4.606E+01	8.561E+01				
7	-4.928E+01	9.465E+00	0.0	9.465E+00	9.465E+00				
8	-1.786E-01	-1.786E-01	0.0	-1.786E-01	-1.786E-01				

以下、#1 トーラス導体の時間追跡

TIME= 1.7499989E-01 TIME STEP= 8

----- COILS -----

NO.	CURRENT (A)	VOLTAGE (V)
1 *	1.73774E+05	*****
***** V (I,J) (A) *****		
I	J	
1	1	2
1	0.0	0.0
2	0.0	6.496E+03
2	0.0	8.046E+03
3	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
5	0.0	0.0
6	1.166E+04	1.167E+04
6	1.166E+04	1.167E+04
7	1.017E+04	1.018E+04
7	1.018E+04	1.018E+04
8	5.654E+03	5.654E+03
8	5.654E+03	5.654E+03

TIME= 2.4999982E-01 TIME STEP= 11

----- COILS -----

NO.	CURRENT (A)	VOLTAGE (V)
1 *	8.20853E+04	*****
***** V (I,J) (A) *****		
I	J	
1	1	2
1	0.0	0.0
2	0.0	2.823E+03
2	0.0	3.641E+03
3	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
5	0.0	0.0
6	1.504E+04	1.504E+04
6	1.504E+04	1.503E+04
7	2.100E+04	2.100E+04
7	2.100E+04	2.100E+04
8	2.358E+04	2.358E+04
8	2.358E+04	2.358E+04

以下、#2 トーラス導体の時間追跡

TIME= 1.7499989E-01 TIME STEP= 8

----- COILS -----

NO.	CURRENT (A)	VOLTAGE (V)
1 *	1.73774E+05	*****
***** V (I,J) (A) *****		
I	J	
1	1	2
1	0.0	0.0
2	1.180E+05	1.431E+05
2	1.180E+05	1.431E+05
3	1.431E+05	1.431E+05
3	1.431E+05	1.431E+05

TIME= 2.4999982E-01 TIME STEP= 11

----- COILS -----

NO.	CURRENT (A)	VOLTAGE (V)
1 *	8.20853E+04	*****
***** V (I,J) (A) *****		
I	J	
1	1	2
1	0.0	0.0
2	8.517E+04	1.057E+05
2	8.517E+04	1.057E+05
3	1.057E+05	1.057E+05
3	1.057E+05	1.057E+05

(5) FLDDEC プログラム

① 第1空間ブロックの空間点データ

```

R - COORDINATE START POINT      0.6010000E+00
R - COORDINATE END POINT        0.1000000E+01
Z - COORDINATE START POINT      0.1000000E-02
Z - COORDINATE END POINT        0.5990000E+00
P - COORDINATE START POINT      0.0
P - COORDINATE END POINT        0.2000000E+02

NO.      .... R ..... Z ..... P .....
1         0.60100      0.00100      0.0
2         0.65087      0.05083      4.00000
3         0.70075      0.10067      8.00000
4         0.75062      0.15050      12.00000
5         0.80050      0.20033      16.00000
6         0.85037      0.25017      20.00000
7         0.90025      0.30000      *****
8         0.95012      0.34983      *****
9         1.00000      0.39967      *****
10        *****      0.44950      *****
11        *****      0.49933      *****
12        *****      0.54917      *****
13        *****      0.59900      *****
    
```

② 第2空間ブロックの空間点データ

```

R - COORDINATE START POINT      0.104988E+01
R - COORDINATE END POINT        0.139900E+01
Z - COORDINATE START POINT      0.100000E-02
Z - COORDINATE END POINT        0.599000E+00
P - COORDINATE START POINT      0.0
P - COORDINATE END POINT        0.200000E+02

NO.      .... R ..... Z ..... P .....
1         1.04988      0.00100      0.0
2         1.09975      0.05083      3.33333
3         1.14962      0.10067      6.66667
4         1.19950      0.15050      10.00000
5         1.24937      0.20033      13.33333
6         1.29925      0.25017      16.66666
7         1.34912      0.30000      19.99999
8         1.39900      0.34983      19.99998
9         *****      0.39967      *****
10        *****      0.44950      *****
11        *****      0.49933      *****
12        *****      0.54917      *****
13        *****      0.59900      *****
    
```

3.7.2 プロッター出力

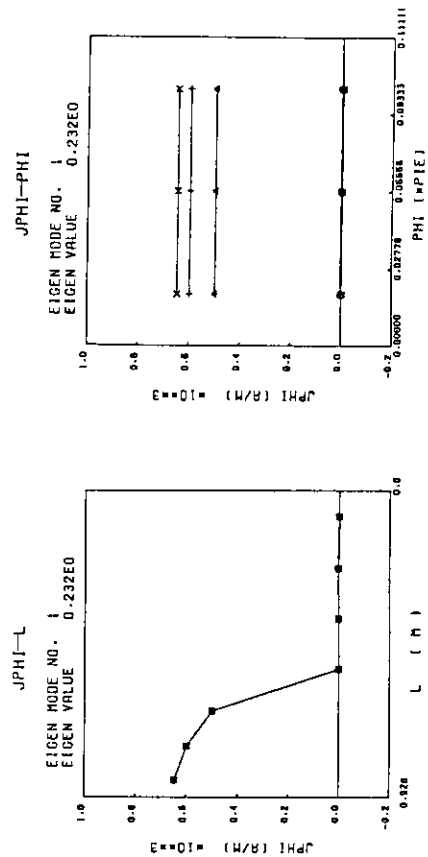
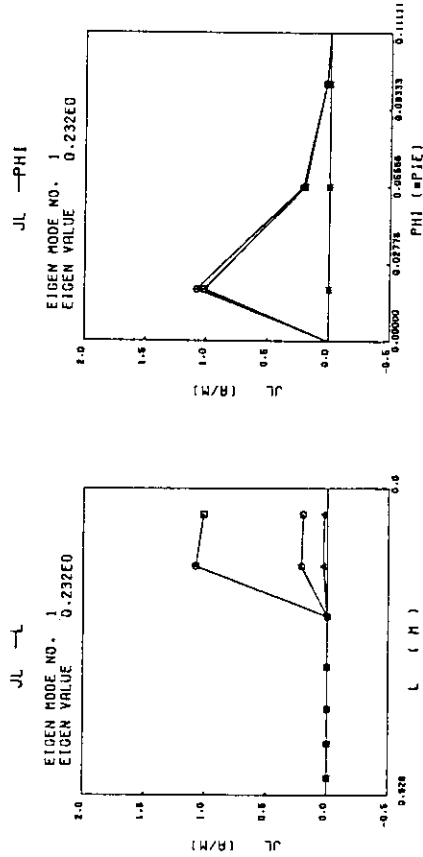
(1) EDTDEC プログラム

① #1 トラス導体のモード毎1次元 J_θ J_θ のプロットの結果 (odd パリティ)

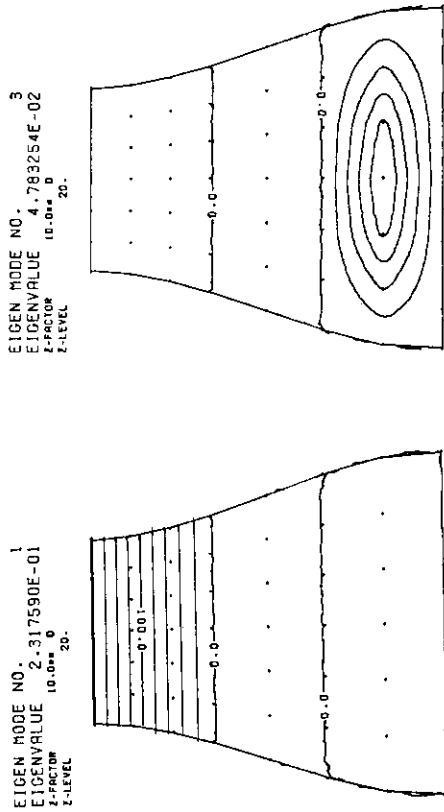
```

PARAMETER PHI (PIE)
MARK MESH VALUE
M 1 0.01852
M 2 0.05586
M 4 0.09259
M 7 0.14111

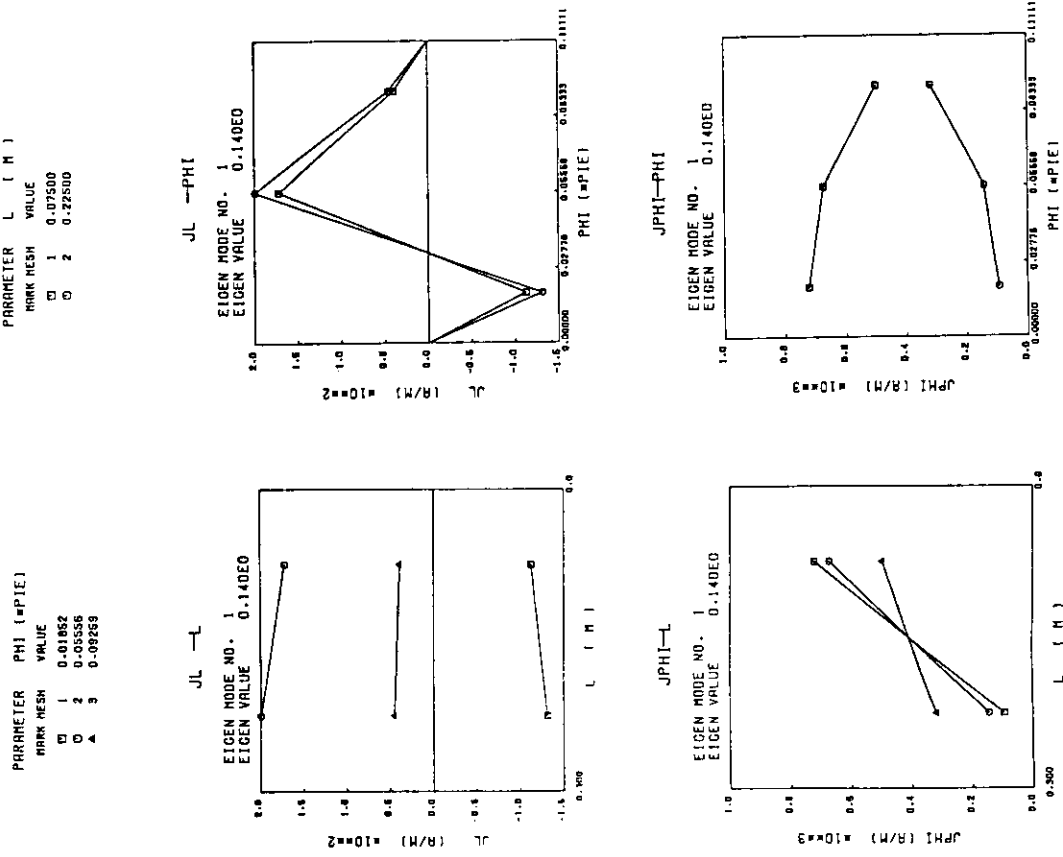
PARAMETER L (M)
MARK MESH VALUE
M 1 0.07654
M 2 0.23562
M 4 0.46652
M 6 0.77124
M 7 0.07596
    
```



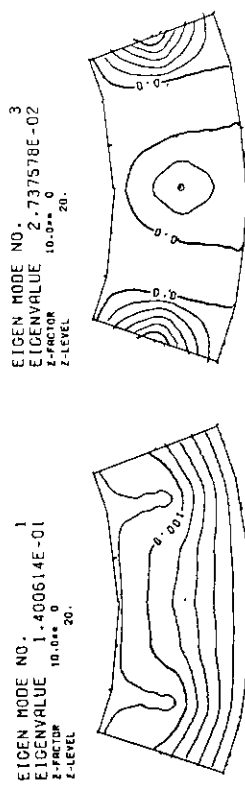
③ #1 トーラス導体の固有ベクトル等高線図 (odd パリティ)



④ #2 トーラス導体のモード毎1次元 J_θ , J_ϕ のプロットの結果 (odd パリティ)



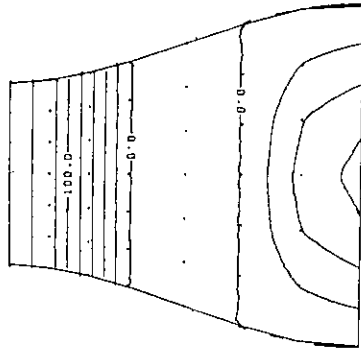
④ #2 トーラス導体の固有ベクトル等高線図 (odd パリティ)



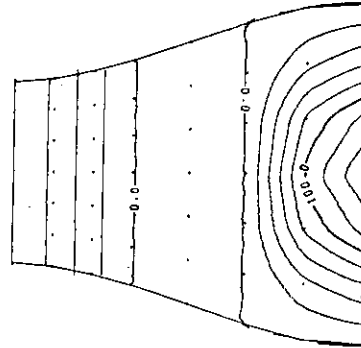
(2) EM3DEC プログラム

⑤ #1 トラス導体の固有ベクトル等高線図 (even パリティ)

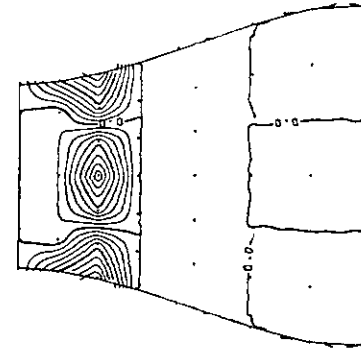
EIGEN MODE NO. 1
EIGENVALUE 9.099734E-02
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 20.



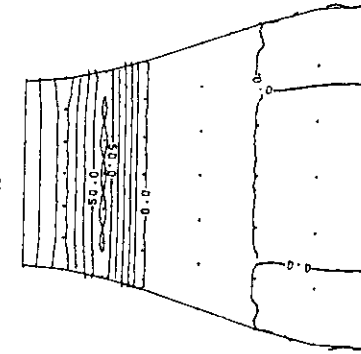
EIGEN MODE NO. 2
EIGENVALUE 7.300198E-02
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 20.



EIGEN MODE NO. 7
EIGENVALUE 2.897247E-02
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 10.

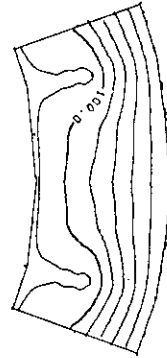


EIGEN MODE NO. 11
EIGENVALUE 2.097308E-02
Z-FACTOR 10.000 -1
Z-LEVEL 10.

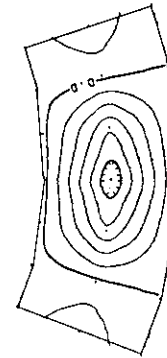


⑥ #2 トラス導体の固有ベクトル等高線図 (even パリティ)

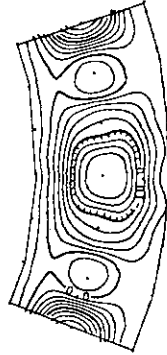
EIGEN MODE NO. 1
EIGENVALUE 1.076218E-01
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 20.



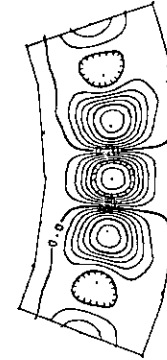
EIGEN MODE NO. 2
EIGENVALUE 3.907412E-02
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 20.



EIGEN MODE NO. 7
EIGENVALUE 2.897247E-02
Z-FACTOR 10.000 -1
Z-LEVEL 2.



EIGEN MODE NO. 11
EIGENVALUE 2.097308E-02
Z-FACTOR 10.000 0
Z-LEVEL 10.

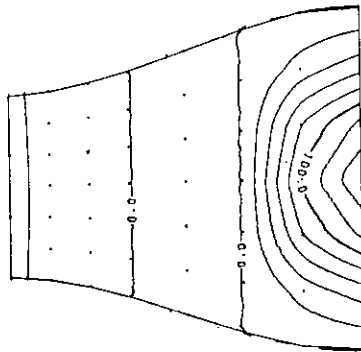


⑦ #2 トラス導体の固有ベクトル等高線図 (odd パリティ)

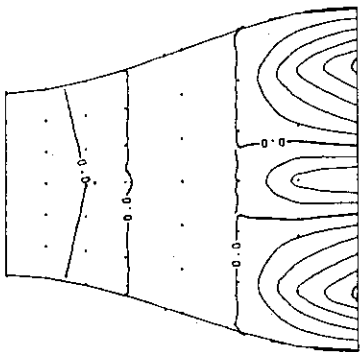
⑧ #1 トラス導体の固有ベクトル等高線図 (odd パリティ)

③ #1 トーラス導体の固有ベクトル等高線図 (even パリティ)

EIGEN MODE NO. 3
EIGENVALUE 6.886834E-02
Z-FACTOR 10.0** 0
Z-LEVEL 20.

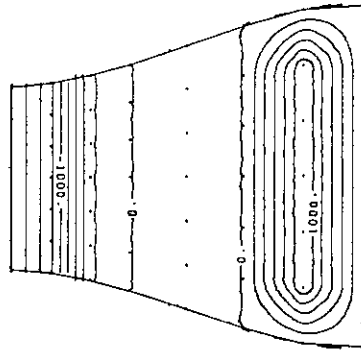


EIGEN MODE NO. 4
EIGENVALUE 4.112854E-02
Z-FACTOR 10.0** 0
Z-LEVEL 20.

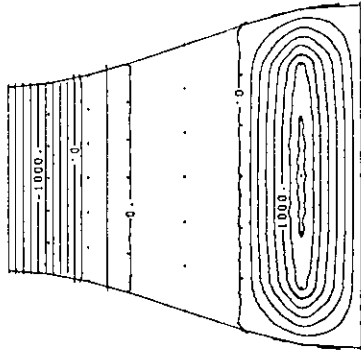


⑤ #1 トーラス導体の時間追跡電流関数等高線図 (odd パリティ)

TIME STEP NO. 2
TIME 2.500000E-02
Z-FACTOR 10.0** 1
Z-LEVEL 200.

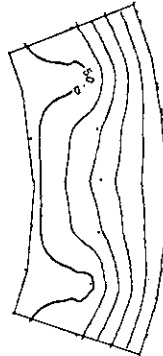


TIME STEP NO. 5
TIME 9.99996E-02
Z-FACTOR 10.0** 1
Z-LEVEL 200.

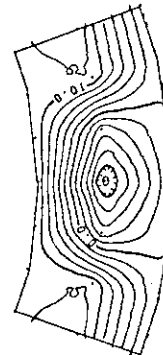


④ #2 トーラス導体の固有ベクトル等高線図 (even パリティ)

EIGEN MODE NO. 3
EIGENVALUE 6.886834E-02
Z-FACTOR 10.0** 0
Z-LEVEL 10.

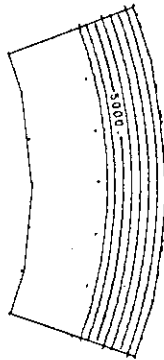


EIGEN MODE NO. 4
EIGENVALUE 4.112854E-02
Z-FACTOR 10.0** 2
Z-LEVEL 2.

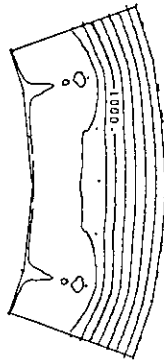


⑥ #2 トーラス導体の時間追跡電流関数等高線図 (odd パリティ)

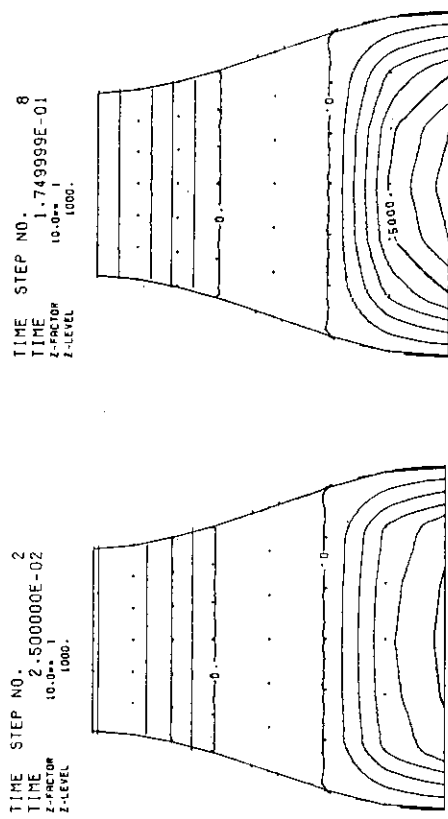
TIME STEP NO. 2
TIME 2.500000E-02
Z-FACTOR 10.0** 1
Z-LEVEL 1000.



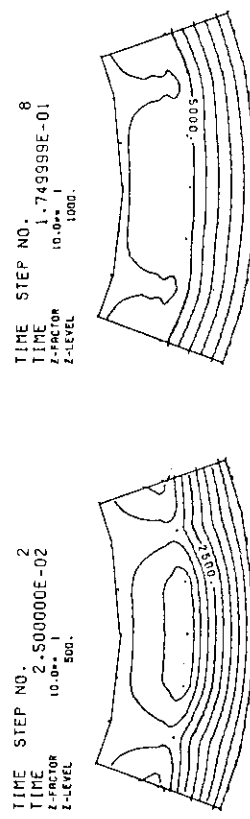
TIME STEP NO. 5
TIME 9.99996E-02
Z-FACTOR 10.0** 2
Z-LEVEL 200.



⑦ ① 1 トラス導体の時間追跡電流関数等高線図 (even パリティ)

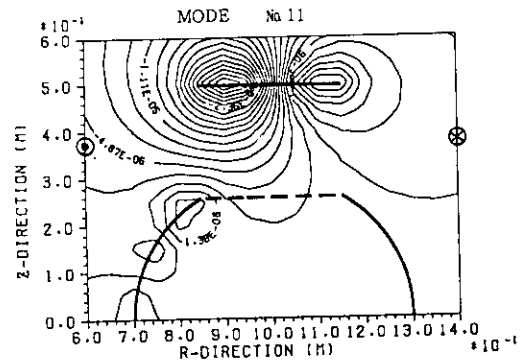
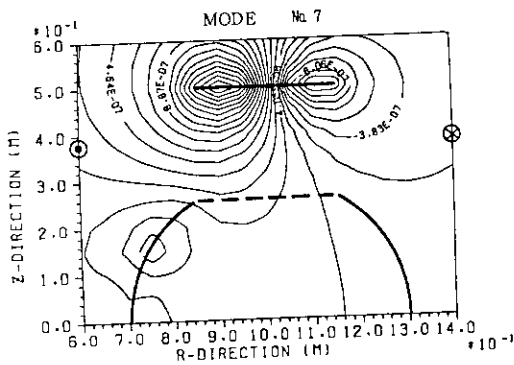
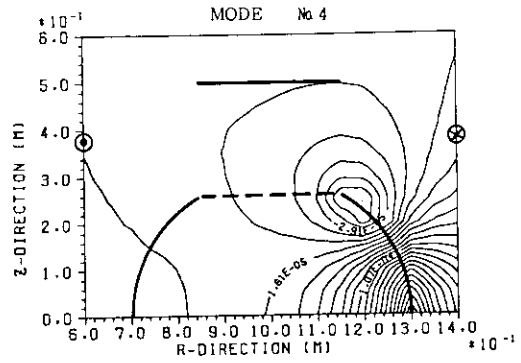
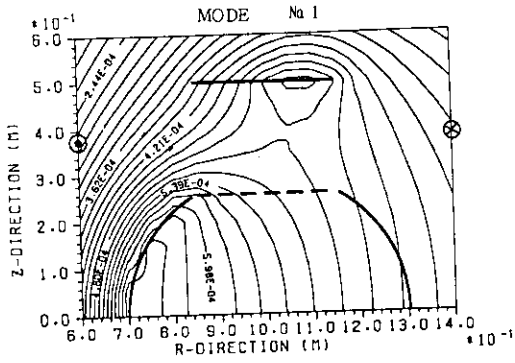


⑧ ② 2 トラス導体の時間追跡電流関数等高線図 (even パリティ)

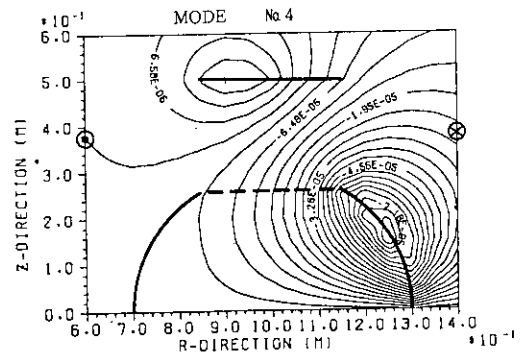
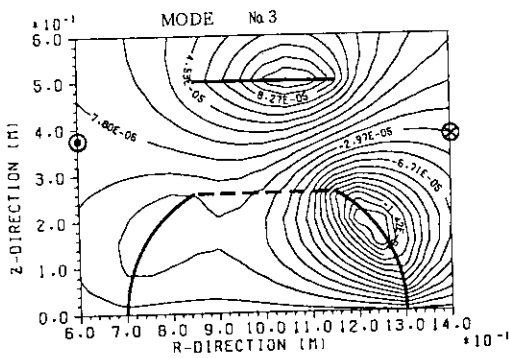
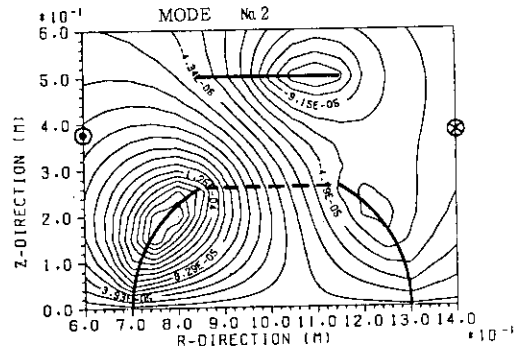
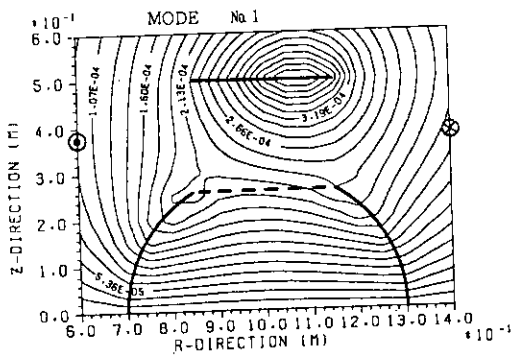


(3) FLDDEC プログラム

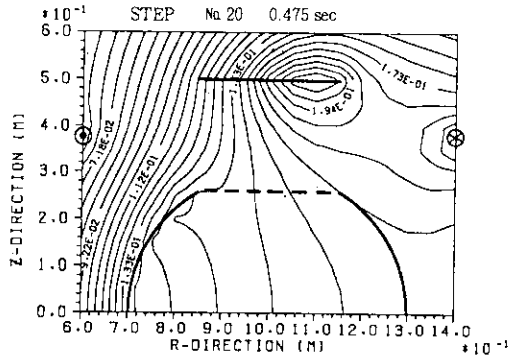
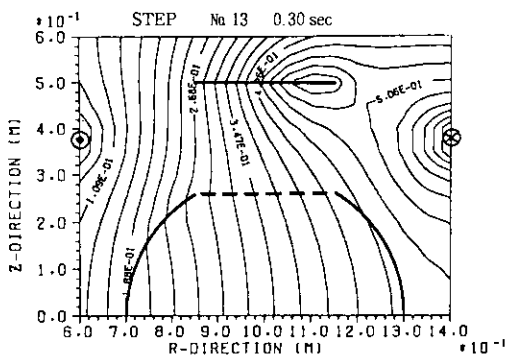
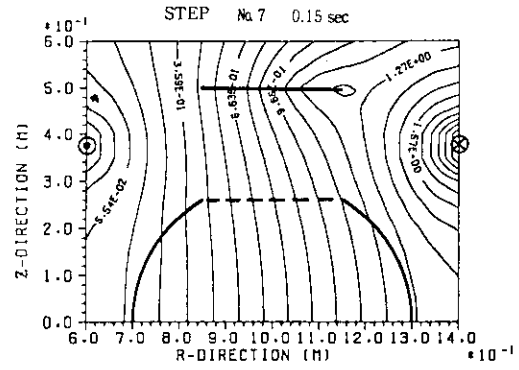
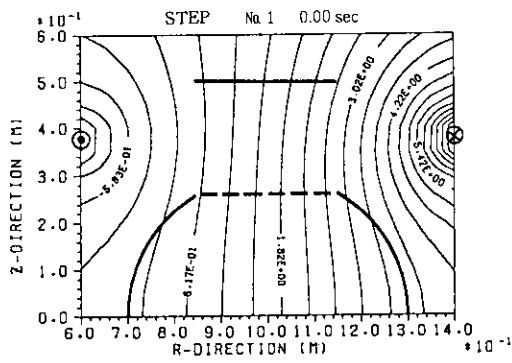
① モード毎の磁束分布 (odd パリティ)



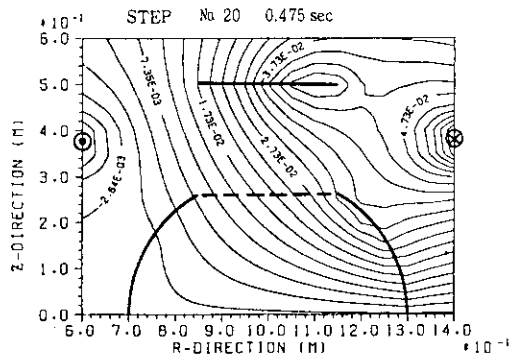
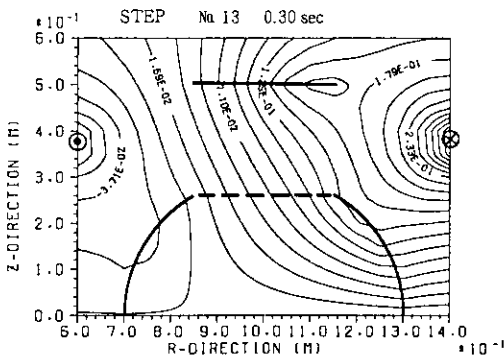
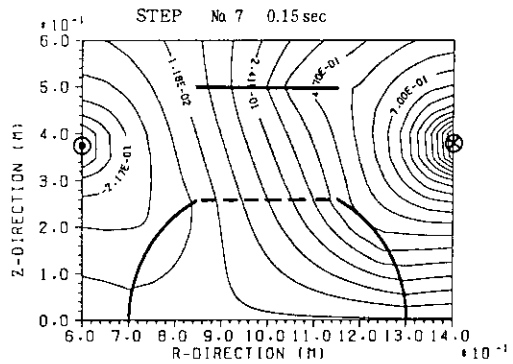
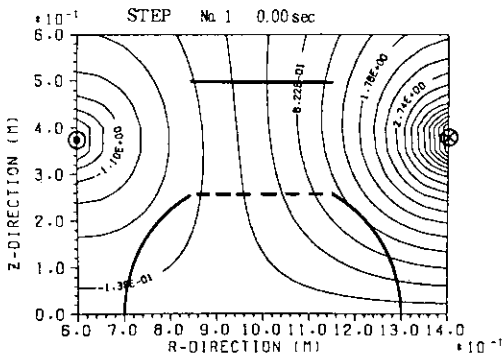
② モード毎の磁束分布 (even パリティ)



③ 時間追跡の磁束分布 (odd パリティ)



④ 時間追跡の磁束分布 (even パリティ)



4. 計算とモデル実験との比較

EDDYMULT コードシステムの妥当性を検証するため、厚肉部とベローズ部から成る簡単な平板状トーラスを用いたモデル実験を行った³²⁾。Fig. 4.1 に装置の概要を示す。実験に用いた平板状トーラスは通常の電気銅でできており、この平板状トーラス上に誘起された渦電流密度を測定し、計算コードシステムによる計算値と比較検討した。渦電流は双極性の外部コイルに正弦波電圧を与えることによって誘起される。したがって、この外部コイルは第2章で定義した外部電圧が既知の受動コイルとみなすことができ、可変周波数の正弦波交流電流が供給されることになる。これにより平板状トーラス上に垂直方向の磁場が生成される。主な測定結果は、周波数をパラメータとした誘導電流密度の振幅および位相差の形で与えられる。

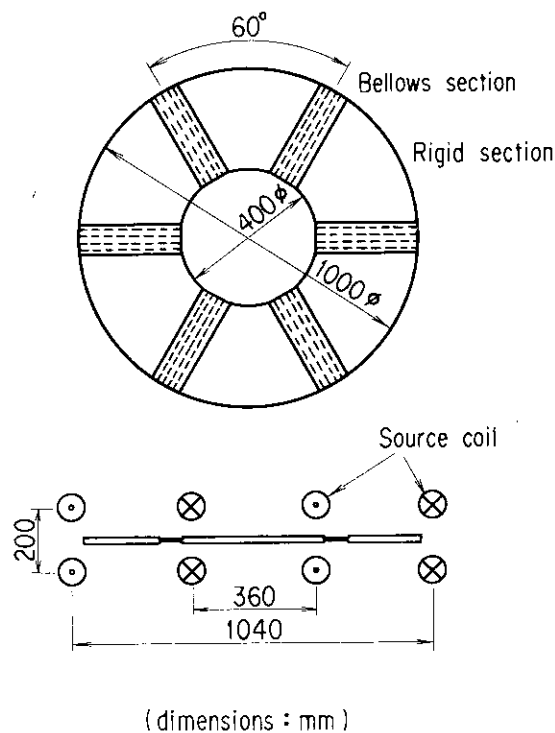


Fig. 4.1 Schematic view of the planar torus model: the upper figure is the top view of the apparatus; the lower the side view. The source field for inducing eddy current is produced by the sinusoidal current through axisymmetrical dipole coils.

EDDYMULT コードシステムを用いた計算では、ベローズ部は面抵抗率が異方性を有する等価な薄板導体としてモデル化し、厚肉部はこれと等価な面抵抗率を有する均質な薄板導体としてモデル化した。Fig. 4.2 いくつかの周波数の正弦波コイル電流によって平板状トーラスに誘起された渦電流密度 j_{ϕ} を示す。Fig. 4.2(a) は、厚肉部の中央部におけるトロイダル方向電流密度成分の振幅 $|j_{\phi}|$ を主半径位置に対して示したもので、実験値と計算値について比較してある。Fig. 4.2(b) は、Fig. 4.2(a) と同じ位置における同じ電流密度成分の位相角 ϕ_{ϕ} を

比較したものである。大まかに言って、10 kHz の高周波数域では渦電流は、ほぼ誘導的に振舞うが、これに対して、100 Hz の低周波数域ではより抵抗的に振舞う様子がみられる。

モデル実験では、渦電流密度の測定のために $8\text{ mm}^{\phi} \times 5\text{ mm}^h$ の大きさの磁気プローブを用いており、実験と計算の比較においては数 mm 以下の空間精度を議論することはできない。しかしながらこの範囲において、電流密度の振幅および位相差ともに実験と計算とは全体的に良く一致していると考えてよい。たとえば Fig. 4.2(a) に示すように、100 Hz の低周波数域では、 $|j_{\phi}|$ が全領域で常に有限の値を有しているが、これは渦電流の渦中心が時間的に動き回っている様子を示唆している。本計算コードによる結果をみてもこの現象が忠実に再現されていることが理解できる。本モデル実験は単層のトラス平板を用いた簡単なものであり、EDDYMULT コードシステム全体の完全な検証には、別途、何等かの多層トラス導体を用いたより複雑なモデル実験が必要とされるが、これは今後の課題である。しかしながら、以上に述べたモデル実験の結果から、我々が本コードシステムで仮定したペローズ部の等価異方性板によるモデル化および導体の薄板近似の妥当性については確認をとることができたと考える。

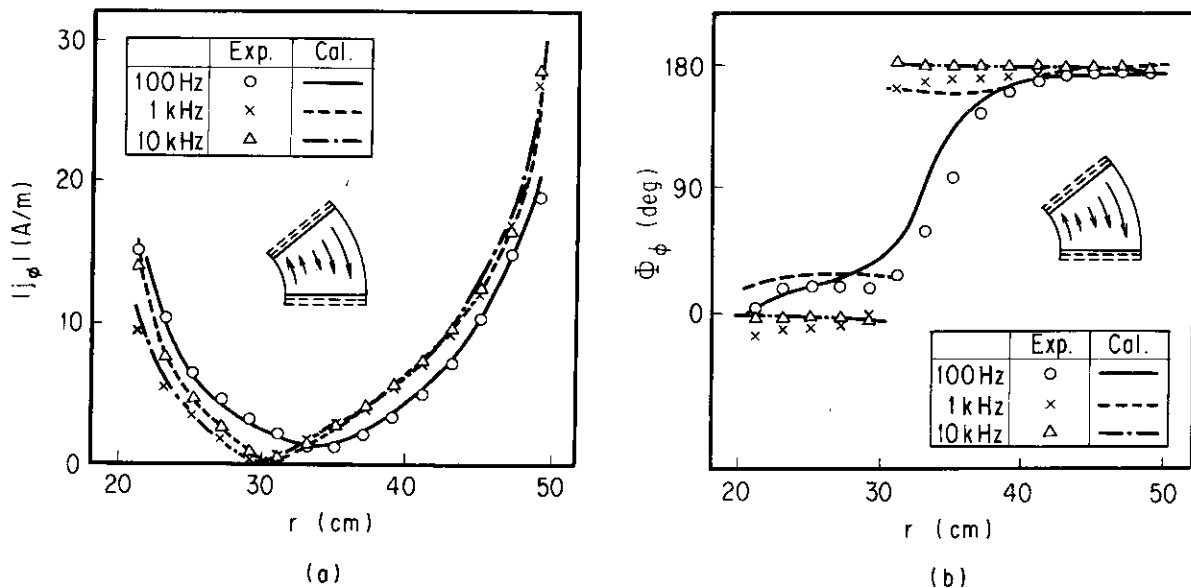


Fig. 4.2 Comparison between the experimental results and the numerically computed results on the eddy current density j_{ϕ} flowing in the ϕ -direction: (a) The amplitude $|j_{\phi}|$ of eddy current density versus the radial position along the middle line of a rigid section; (b) The phase shift angle Φ_{ϕ} of eddy current density versus the same radial position.

5. 結 論

多数のトーラス状導体および軸対称ポロイダル磁場コイル群から成る複合トーラス導体系に対する実際的な渦電流問題を解くため、有限要素回路法を応用した計算コードシステム EDDYMULT を開発した。本コードシステムの開発により、多数の複雑な構造物から成るトカマク型核融合実験装置の渦電流問題を総合的に解くことが可能となった。これにより、渦電流、電磁力評価などの渦電流問題をはじめ、トカマク装置の設計の際に常に問題となるポロイダル磁場コイル電源の設計およびプラズマ位置制御法の検討など、渦電流関連の諸問題を精度良く検討することができるようになった。したがって、核融合開発の中で勢力的に進められてきた渦電流に関する研究は、今後、たとえば本コードシステムを用いて実際のトカマク装置の渦電流問題を具体的に解き、得られた結果を、先に述べたようなコイル電源設計の最適化およびプラズマ位置制御法の最適化など、核融合開発の中で重要な各種の設計工学へ応用する方向に重点が移るものと考えられる。

複合トーラス導体系の渦電流問題を解くためには、大型化した計算を実際的な計算時間内に実行できるように数値解析上の新しい工夫が必要であった。これに対しても従来の有限要素回路法に、積極的な次元縮小法を導入したり、回路定数の求解の際の形状関数の導入を工夫するなど新しい手法を開発した。これらの手法の有効性は、例として与えた簡単な体系に対する計算結果にみることができる。ここでは、極端に可制御性の弱い渦電流モードが存在しているのがみられ、これらに対して次元縮小を実施することで計算機の記憶容量を $2/3$ 以下に低減できることがわかった。また、多量の計算時間を要するトーラス導体間相互の磁氣的結合の算出の際に、形状関数を導入したため、磁氣的結合を直接求めた場合と比較して、 $1/10$ 程度の非常に経済的な処理時間内で目的を達成することができた。実際のトカマク装置における大規模な渦電流問題に対しては、これら数値解析上の工夫が、本計算例でみられた以上に顕著な効果を発揮するものと予想され、計算機の記憶容量や計算時間の軽減が期待される。

モデル実験によっても確かめられたように、我々が開発した手法は高い信頼性を有しており、本コードシステムを用いた計算により複雑なトカマク装置の渦電流現象を精度良くシミュレートすることができるものと考えられる。ただ、実施したモデル実験は比較的単純な単層の平板状トーラスであり、EDDYMULT コードシステム全体の完全な検証のためには、別途、何等かの多層トーラス導体を用いたより複雑なモデル実験を実施することが望ましい。

EDDYMULT コードシステムでは、トーラス導体は全て軸対称トーラス面上にあると仮定したが、実際の装置では局所的なポート管やポロイダル面内の構造物など軸対称トーラス面に交差する部分が存在する。したがって、ポート管に直接働く電磁力評価などの場合には、このような特殊な部分についての別途の取扱いが必要である。しかしながら、複合トーラス導体系における総合的な渦電流効果を考えた場合には、これら局所的な構造物は大局的效果を持たないであろう。導体の厚みが問題となる場合、本コードシステムを適用することはできないが、これは今後の課題である。しかしながら、この場合、現有の計算機の処理能力からみて、全てのトーラス導体についてその厚みの効果を充分取り入れることは不可能に近く、また厚みの効果を忠実に評価した結果の工学的利用価値がいかほどのものか、議論の余地がある。いずれにせよ、先の局所的な構造物に関する評価、厚みの効果に対する評価は、現実的にはこれらの問題に特に着目した個別の検討が必要であろう。EDDYMULT コードシステムはこの種の問題を取り扱うことはできない。

謝 辞

本報告書のまとめにあたり、多忙を極める JT-60 の建設、実験業務の最中にその意義を認め時間を与えて下さった臨界プラズマ研究部臨界プラズマ計測室長船橋昭昌氏、JT-60 試験部第 2 試験室長近藤育朗氏、前臨界プラズマ計測室長鈴木康夫氏（現在物理部大型放射光研究特別プロジェクトチームリーダー）、前同室長代理前田彦祐氏（現在核融合研究部プラズマ実験研究室長）に感謝する。また、常に暖かい援助をいただいた計測室の諸氏に心から御礼を申し上げる。

本コードシステム中のいくつかのモジュールには、本コードシステムの意義を認め寛大にもその使用を認めていただいた多数の方々からの提供によるものが含まれている。固有値問題の solver 'DEIGRS' は核融合研究部理論解析研究室常松俊秀氏から提供のものであり、磁場構造図のオフライン処理用プログラムは同じく理論解析研究室長竹田辰興氏の御理解の下に、汎用図形処理プログラム 'ARGUS' を使用することを前提としている。尚氏に深く感謝する。'EDDYMULT' コードシステムは有限要素回路法を基調としているが、この方法は三菱原子力工業(株)の亀有昭久氏が考案されたもので、氏等はこの方法に基づき単一トラス導体の渦電流問題を解くプログラム 'EDDYTORS' を開発しておられる。'EDDYMULT' の中での第 1 段階に相当する EDTDEC プログラムの大部分は 'EDDYTORS' の各種モジュールを多用させていただいた。こういったモジュールの提供がなかったら 'EDDYMULT' の開発はおぼつかなかったであろうと考えられ、亀有氏の御好意に感謝する。ただ引用の責任は全て筆者らに帰すものであり、万が一の誤りがあったとしても筆者らの責任である。

本報告書の中のモデル実験は、静岡大学工学部の染谷太郎教授によって実施されたものである。公表前のこれらの成果の引用を快諾していただいたことに深く感謝する。

本プログラムは JT-60 本体の電磁力設計、誤差磁場評価の中で開発したものであり、当時の JT-60 本体グループの諸氏の御協力に感謝する。特に当時の JT-60 第 1 開発室長飯島勉氏（現在 JT-60 試験部長）、太田充グループリーダー（現在 JT-60 試験部第 3 試験室長）には終止暖かいはげましと建設的な御意見、御指導をいただいた。両氏に心から謝意を表す。

最後に、臨界プラズマ研究部長田村早苗氏、那珂研究所長吉川允二氏、前那珂研究所長苦米地顕氏（現在特別研究員）の御理解に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Shimizu M., Ohkubo M., Yamamoto M., Takatsu H., Ando T., Nakamura H., Akino N., Kawasaki K., Urakawa H., Ohtsu K., Ohta M., Owada K., Sato H. and Kajiura S. : "Design, Fabrication and Performance Test of JT-60 Structural and Thermal Aspects," Nucl. Engrg. Des./Fusion, **3**, 249 (1986) .
- 2) Suzuki Y., Ninomiya H., Ogata A., Kameari A. and Aikawa A. : "Tokamak Circuit," Jpn. J. Appl. Phys., **16**, 2237 (1977) .
- 3) Iso Y. and Ohta M. : "The JT-60 Tokamak Machine," 6th SMiRT, Paris (1981) .
- 4) 亀有昭久 : "核融合炉における渦電流解析の現状," 日本原子力学会誌, **28**, 487 (1986).
- 5) Fukuyama A., Seki S., Momota H. and Itatani R. : "Positional Instabilities in A Tokamak with A Resistive Shell," Jpn. J. Appl. Phys., **14**, 871 (1975) .
- 6) Nakamura Y. : "Positional Instabilities in An Iron-Cored Tokamak," Jpn. J. Appl. Phys., **25**, 1575 (1986) .
- 7) 高野一郎, 鈴木康夫 : "有限要素法による3次元渦電流解析," JAERI-M 7062 (1977).
- 8) Miya K., Takagi T. and Tabata Y. : "Three-Dimensional Analysis of Magnetic Field and Magnet Stress Induced into Vessel by Plasma Motion," Proc. 7th Symp. Eng. Probs. Fusion Research, 1371 (1977) .
- 9) Takahashi T., Takahashi G., Kazawa Y. and Suzuki Y. : "Numerical and Experimental Analysis of Eddy Currents Induced in Tokamak Machine," Proc. 7th Symp. Eng. Probs. Fusion Research, 1393 (1977) .
- 10) Kobayashi T. : "Analysis of Eddy Current Induced in The Vacuum Vessel of A Tokamak Device," Jpn. J. Appl. Phys., **18**, 2003 (1979) .
- 11) Christensen U.R. : "Time Varing Eddy Currents on A Conducting Surface in 3-D Using A Network Mesh Method," PPPL-1516 (1979) .
- 12) Weissenburger D.W. and Christensen U.R. : "Transient Eddy Currents on Finite Plane and Toroidal Conducting Surfaces," PPPL-1517 (1979) .
- 13) Weissenburger D.W. : "SPARK Version One: Referencc Manual," PPPL-2040 (1983) .
- 14) 亀有昭久, 鈴木康夫 : "有限要素回路法による渦電流解析," JAERI-M 7020 (1977).
- 15) Kameari A. : "Transient Eddy Current Analysis on Thin Conductors with Arbitrary Connections and Shapes," J. Comp. Phys., **42**, 124 (1981) .
- 16) 中村幸治, 小関隆久 : "多連続導体トラス系における渦電流解析," JAERI-M 9612 (1981).
- 17) Nakamura Y. and Ozeki T. : "Finite Element Circuit Theory of The Numerical Code EDDYMULT for Solving Eddy Current Problems in A Multi-Torus System," JAERI-M 86-096 (1986) .
- 18) Ozeki T. and Nakamura Y. : "Modal Analysis of Eddy Current in JT-60 Multi-Torus System," JAERI -M 83-159 (1983) .
- 19) Nakamura Y. and Ozeki T. : Eddy Current Analysis in JT-60," Proc. 12th Symp. Fusion Tech., 339 (1982) .

- 20) Ando T., Ohkubo M., Nakamura Y., Shimizu M., Ohta M., Watanabe T. and Teruyama K. : "Design and Related Experiments of JT-60 Divertor Coils," J. Nucl. Sci. Technol., **24**, 730 (1987) .
- 21) Nakamura Y. : "Eddy Current Analysis in A Multi-Tours System," Proc. of The International Workshop for Eddy Current Code Comparison, Tokyo (1986) .
- 22) Ogata A and Ninomiya H. : "Use of Modern Control Theory in Plasma Control at Neutral Beam Injection," Proc. 8th Symp. Eng. Probs. Fusion Research, 1879 (1979) .
- 23) 森止武 : "有限要素法とその応用," 岩波書店 (1983).
- 24) 松本考裕, 池田雅夫 : "中間標準形表現に基づく構造可制御性," 計測自動制御学会論文集, **19**, 601 (1983).
- 25) 有本卓 : "線形システム理論," 産業図書 (昭和 54 年).
- 26) 細江繁幸 : "構造可制御性," 計測と制御, **20**, 672 (昭和 56 年).
- 27) 森口繁一, 宇田川久, 一松信 : "数式公式 I," 岩波書店 (1981).
- 28) ランダウ, リフシッツ : "電磁気学 I," 東京図書 (1974).
- 29) Grabow B.S., Boyle J.M., Dongarra J.J. and Moler C.B. : "Matrix Eigensystem Routines-EISPACK Guide Extension," Springer-Verlag (1977) .
- 30) カルコンプ・アプリケーション・ソフトウェア「GPCP-1」.
- 31) Takoda T., Tsunematsu T. and Tokuda S. : "Integrative Graphic Subroutine Package ARGUS-V4," Comput. Phys. Commun. **34**, 15 (1984) .
- 32) 中村幸治, 染谷太郎 : to be published.
- 33) Bulirsch R. : "Numerical Calculation of Elliptic Integrals and Elliptic Functions," Handbook Series Special Functions, Numerische Mathematik, Vol.7, pp.78-90 (1965) .

付 録

A.1 境界条件, 対称性のための1次変換

ここでは, 導体曲面に電氣的絶縁やポート穴などが存在する場合, その曲面の境界条件を導入したり, 更に考慮している複合導体系が或る幾何学的な対称性を有する場合, その対称条件を導入する方法を詳しく述べる。第2章において説明したように, 渦電流問題は曲面を要素分割した有限要素回路系に対する行列形式で与えられているものとする。このとき, 境界条件, 対称条件は共に適当な1次変換を用いて表わすことができるが, この変換行列{A}の具体的な形を以下に述べる。

外部境界 ∂C^{out} の場合についてまず考える。このとき, $V_k = 0$ とすると, $V^T = (V_1, V_2, \dots, V_{k-1}, V_k, V_{k+1}, \dots, V_N)$ に対応して, $V'^T = (V_1, V_2, \dots, V_{k-1}, V_{k+1}, \dots, V_N)$ となる。変換行列 $\{A_{\partial C^{out}}\}$ は

$$\{A_{\partial C^{out}}\} = \left. \begin{array}{cc} \overbrace{\begin{matrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{matrix}}^{k-1 \text{ 列}} & \overbrace{\begin{matrix} & & & 0 \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{matrix}}^{N-k \text{ 列}} \\ \left. \begin{array}{c} \left. \begin{array}{c} \left. \begin{matrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & 1 \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} \end{array} \right\} \begin{array}{l} k-1 \text{ 行} \\ \text{第 } k \text{ 行} \\ N-k \text{ 行} \end{array} \end{array} \right\} \quad (A1.1)$$

で, この行列 $\{A_{\partial C^{out}}\}$ により (2.40) 式の行列演算を実行すると, $\{M'\}$ は $\{M\}$ の k 行と k 列を消去した $(N-1)$ 行 $\times (N-1)$ 列の行列となる。また, $\{R'\}$ についても同様である。 E' は E の第 k 要素を消去した $(N-1)$ 行の列ベクトルとなる。

次に, 内部境界 ∂C^{in} について考える。このとき, $V_k = V_\ell$ とすると, $V^T = (V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{\ell-1}, V_\ell, V_{\ell+1}, \dots, V_N)$ に対応して, $V'^T = (V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{\ell-1}, V_{\ell+1}, \dots, V_N)$ となる。変換行列 $\{A_{\partial C^{in}}\}$ は

$$\{A_{\partial C^{in}}\} = \left. \begin{array}{cc} \overbrace{\begin{matrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{matrix}}^{\ell-1 \text{ 列}} & \overbrace{\begin{matrix} & & & 0 \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{matrix}}^{N-\ell \text{ 列}} \\ \left. \begin{array}{c} \left. \begin{array}{c} \left. \begin{matrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & 1 \end{matrix} \right\} \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \ell-1 \text{ 行} \\ \text{第 } \ell \text{ 行} \\ N-\ell \text{ 行} \end{array} \end{array} \right\} \quad (A1.2)$$

第 k 列

で与えられる。この行列 $\{A_{\partial C^{in}}\}$ を用いて (2.40) 式の演算を実行すると, $\{M'\}$ は $\{M\}$ の k 行に ℓ 行を加え, ℓ 行を消去し, その結果得られた $(N-1)$ 行 $\times N$ 列の行列に対してその k 列に ℓ 列を加え, ℓ 列を消去することにより得られる。新しい行列 $\{M'\}$ は $(N-1)$ 行 $\times (N-1)$ 列の行列となる。また, $\{R'\}$ についても同様である。 E' は E の第 k 要素に第 ℓ 要素を加え, その後第 ℓ 要素を消去した $(N-1)$ 行の列ベクトルである。内部境界 C^{in} についても ∂C^{in} と同様で, (A1.2) 式と同形式の $\{A_{C^{in}}\}$ を考えればよい。

このように境界条件を導入した方法と同様に、対称性の条件に対しても行列形式を用いた1次変換を導入することができる。例として $V_k = -V_\ell$ の場合を考える。このとき、 $V^T = (V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{\ell-1}, V_\ell, V_{\ell+1}, \dots, V_N)$ に対して、 $V'^T = (V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{\ell-1}, V_{\ell+1}, \dots, V_N)$ であり、変換行列 $\{A_{as}\}$ は

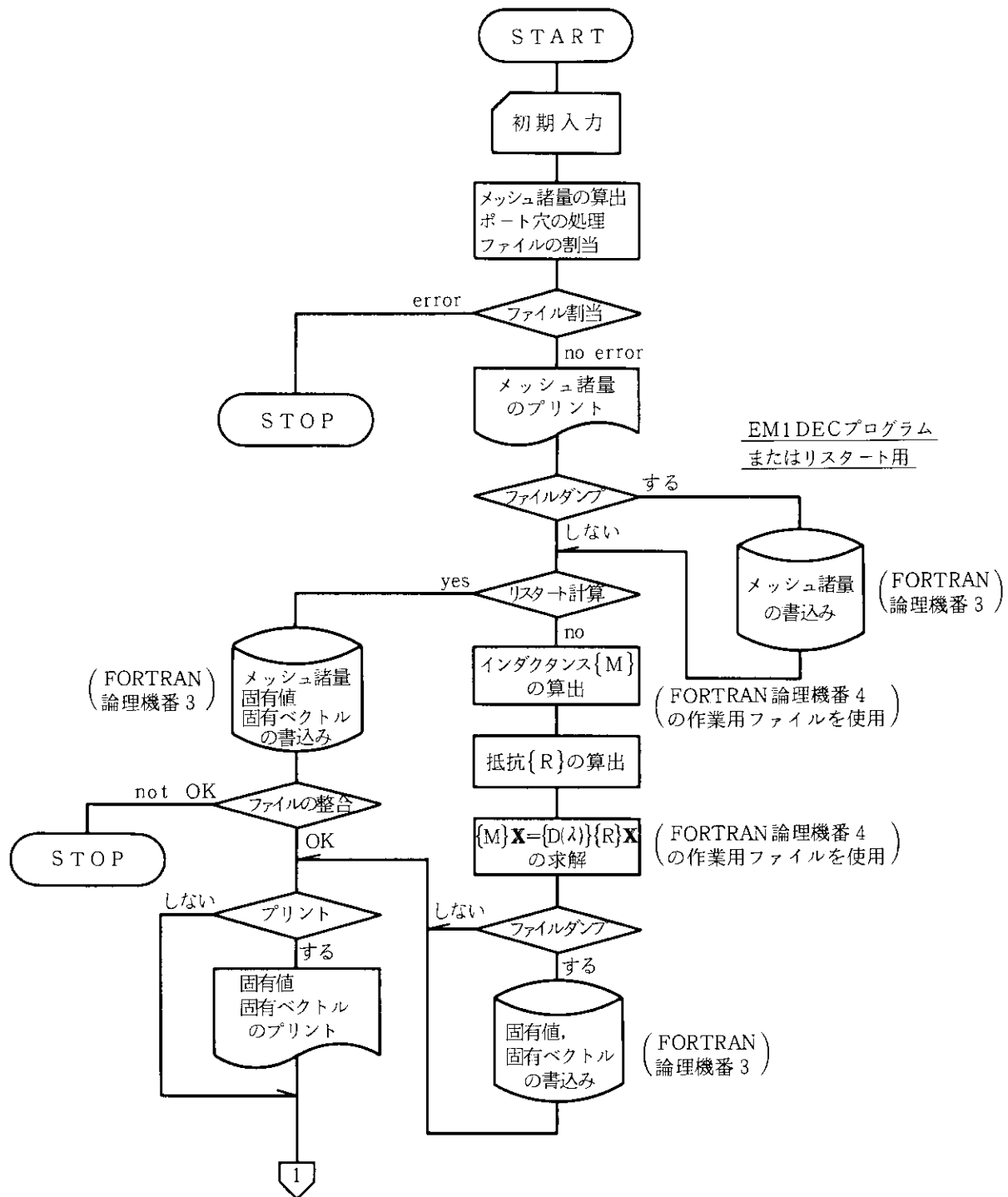
$$\{A_{as}\} = \begin{array}{c} \left. \begin{array}{c} \overbrace{\begin{array}{ccc} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 0 \end{array}}^{\ell-1 \text{ 列}} \quad \overbrace{\begin{array}{ccc} & & 0 \\ & & \\ & & \end{array}}^{N-\ell \text{ 列}} \\ \left. \begin{array}{c} \left. \begin{array}{ccc} 0 & \dots & 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \ell-1 \text{ 行} \\ \text{第 } \ell \text{ 行} \\ \left. \begin{array}{ccc} 1 & \dots & 0 \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ N-\ell \text{ 行} \end{array} \end{array} \right\} \end{array} \quad (A1.3) \\ \uparrow \\ \text{第 } k \text{ 列} \end{array}$$

である。この行列 $\{A_{as}\}$ を用い (2.40) 式の行列演算を実行すると、 $\{M\}$ の k 行から ℓ 行を差し引き、 ℓ 行を消去し、その結果得られた $(N-1)$ 行 \times N 列の行列に対してその k 列から ℓ 列を差し引き、 ℓ 列を消去することにより、新たな行列 $\{M'\}$ が得られる。新しい行列 $\{M'\}$ は $(N-1)$ 行 \times $(N-1)$ 列の行列となる。また、 E' は E の第 k 要素から第 ℓ 要素を差し引き、 ℓ 要素を消去した $(N-1)$ 行の列ベクトルである。 $V_k = V_\ell$ の場合は、(A1.3) 式の ℓ 行 k 列要素の値を 1 に置き換えた変換行列 $\{A_s\}$ を用い (2.40) 式の行列演算を実行すればよい。また、複合導体系が周期性を有する場合、 $V_k = V_\ell$ となる変数が存在することになり、周期性に対しても対応する適当な変換行列 $\{A_s\}$ を考慮し、上記と全く同様の操作を実行すればよい。

A.2 処理の流れの概要

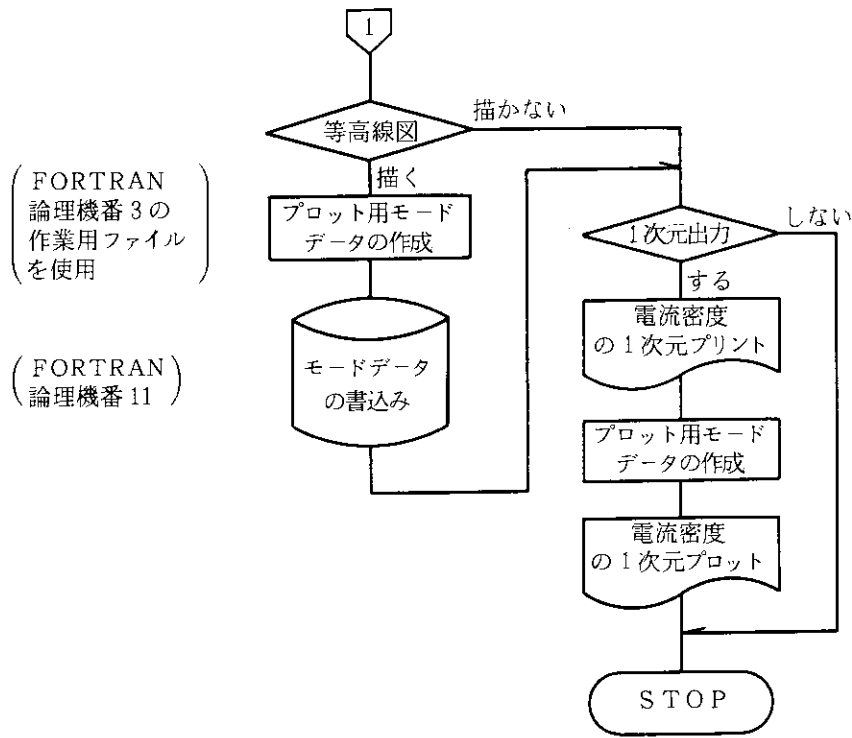
ここでは、本計算コードシステムの各処理ステップ毎に、入出力の体系、リスタートオプションおよび主たる処理機能について、その概要をフローチャートを用いて説明する。

〔1〕 EDTDEC (ESHARE) プログラムによる第1段階の処理



注1：等高線図の図形出力は、オフライン処理である。

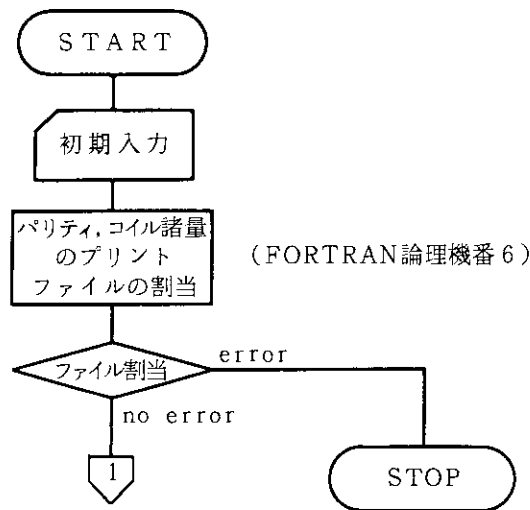
注2：対象とする複合トラス導体全てについて、本段階の処理を実行する必要がある。



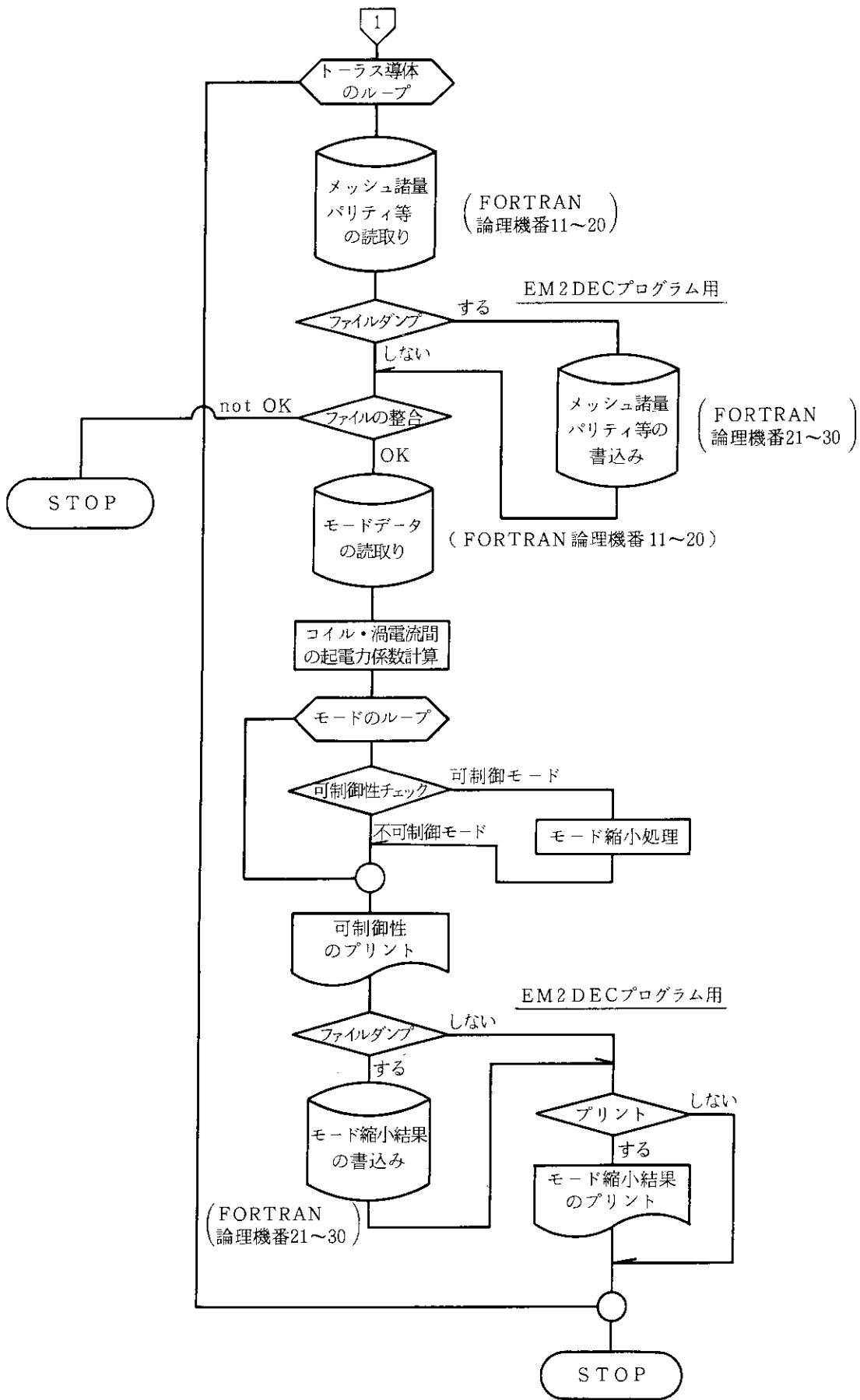
注3：初期入力は、a) タイトル、b) パリティ条件、領域指定、c) メッシュの分割法、物性値、ポート穴条件、d) 出力指定のためのオプションなどから成る。

注4：第2段階以後のプログラムで使用するのは FORTRAN 論理機番 3 のファイルであり、そのレコード内容は、a) トラス導体のメッシュ諸量、b) 固有値、固有ベクトルから成る。

(2) EMIDEC (ESHARE) プログラムによる第2段階の処理

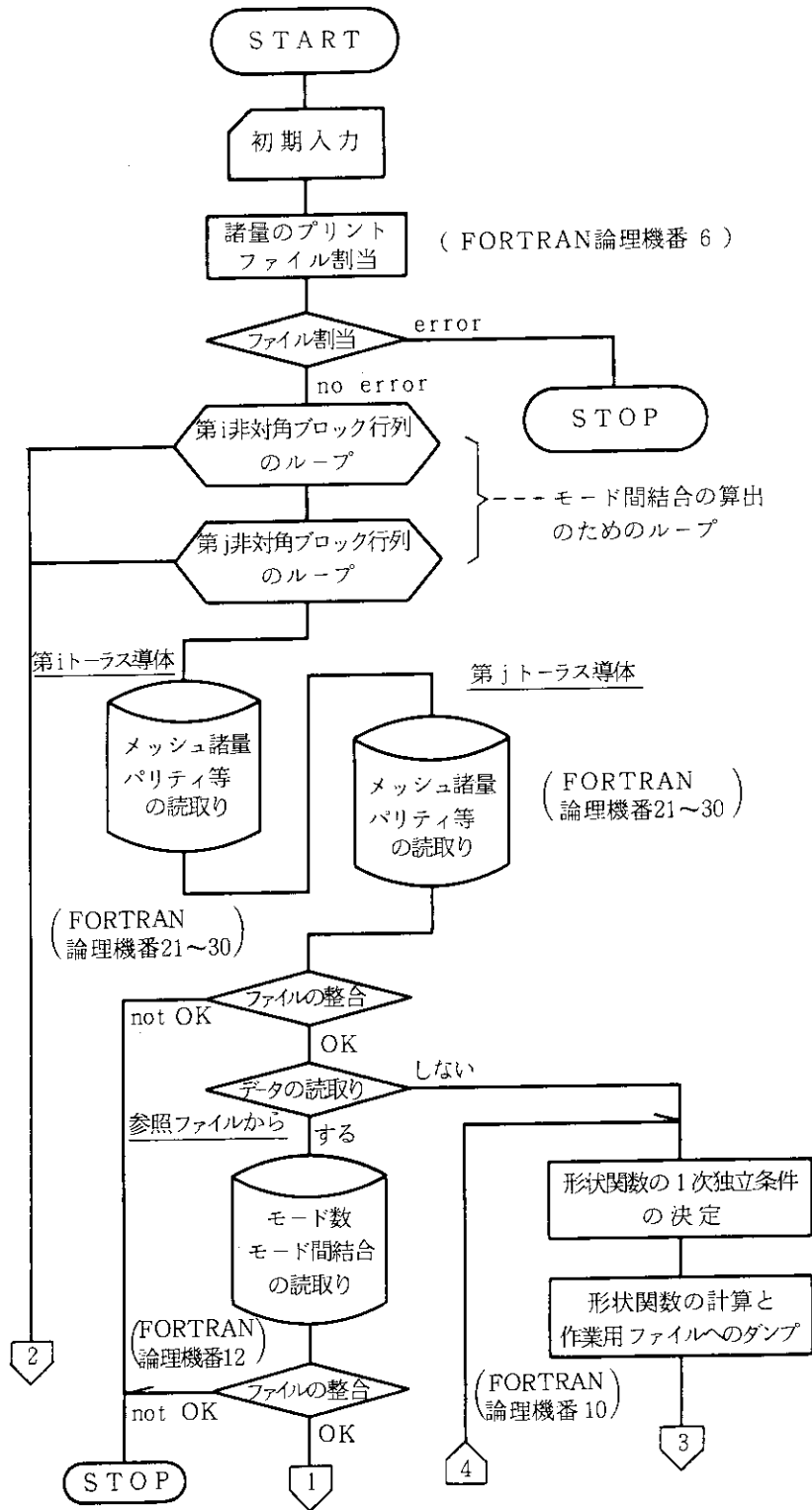


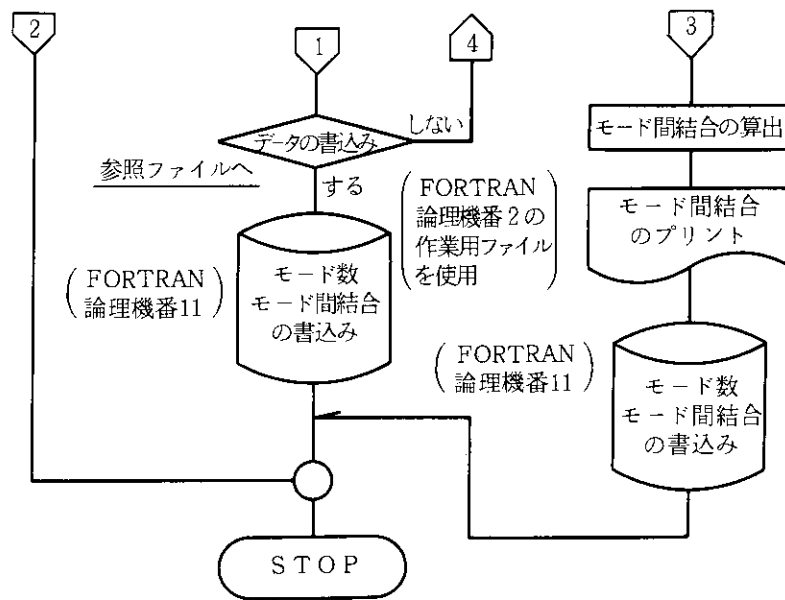
注1：初期入力は、a) タイトル、b) トラス導体数、パリティ条件、c) コイル情報、モード縮小のための諸量、d) 出力指定のためのオプションなどから成る。



注2: 1回の処理で最大10個のトラス導体のモード縮小が可能であり、モード縮小後のファイルのFORTRAN論理機番は、11→21, 12→22, ..., 20→30のように対応する(入出力ファイルは、それぞれEDTDECプログラムで得られるFORTRAN論理機番3のダンプファイルである)。

[3] EM2DEC (ESHARE) プログラムによる第3段階の処理

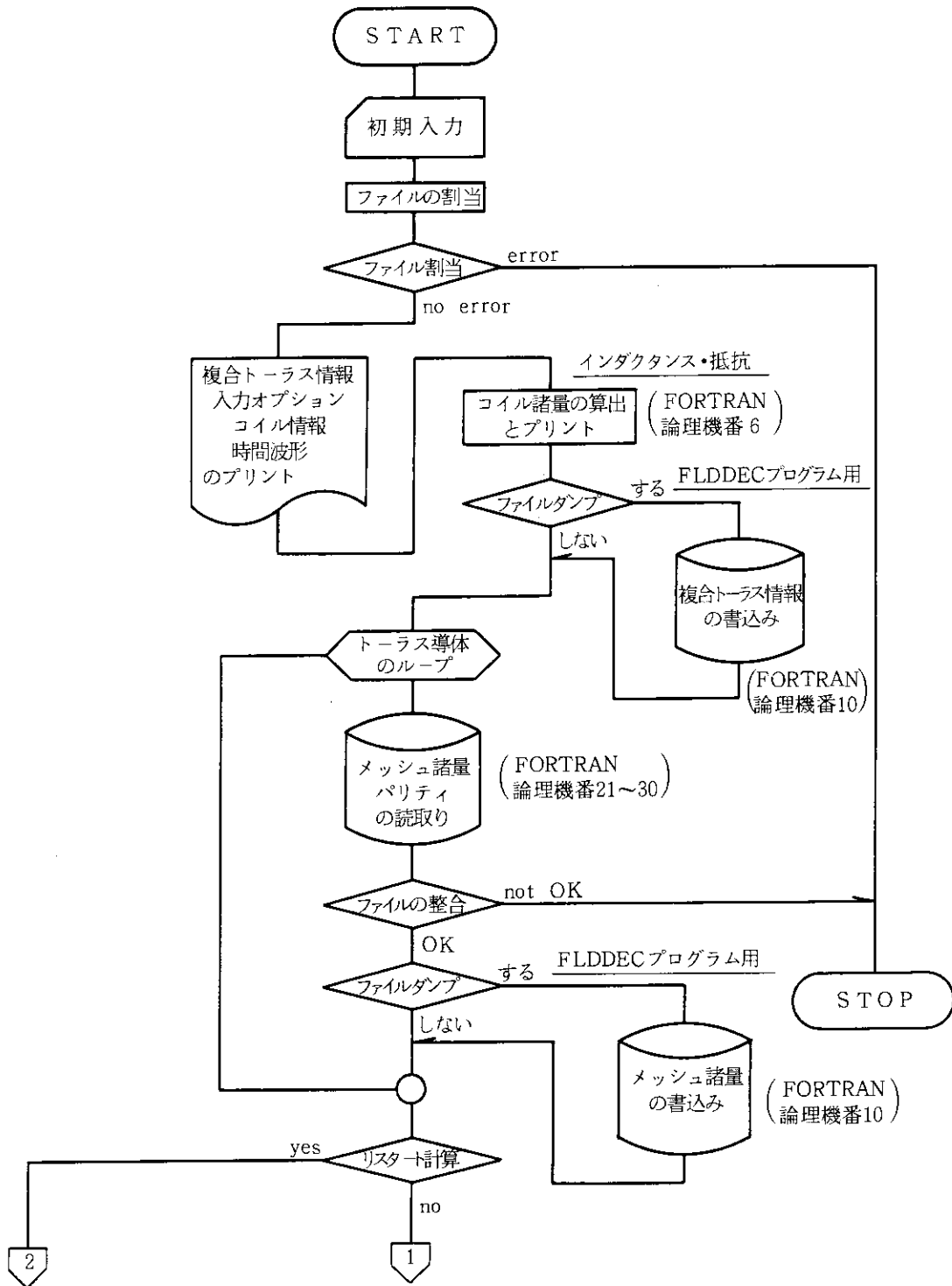


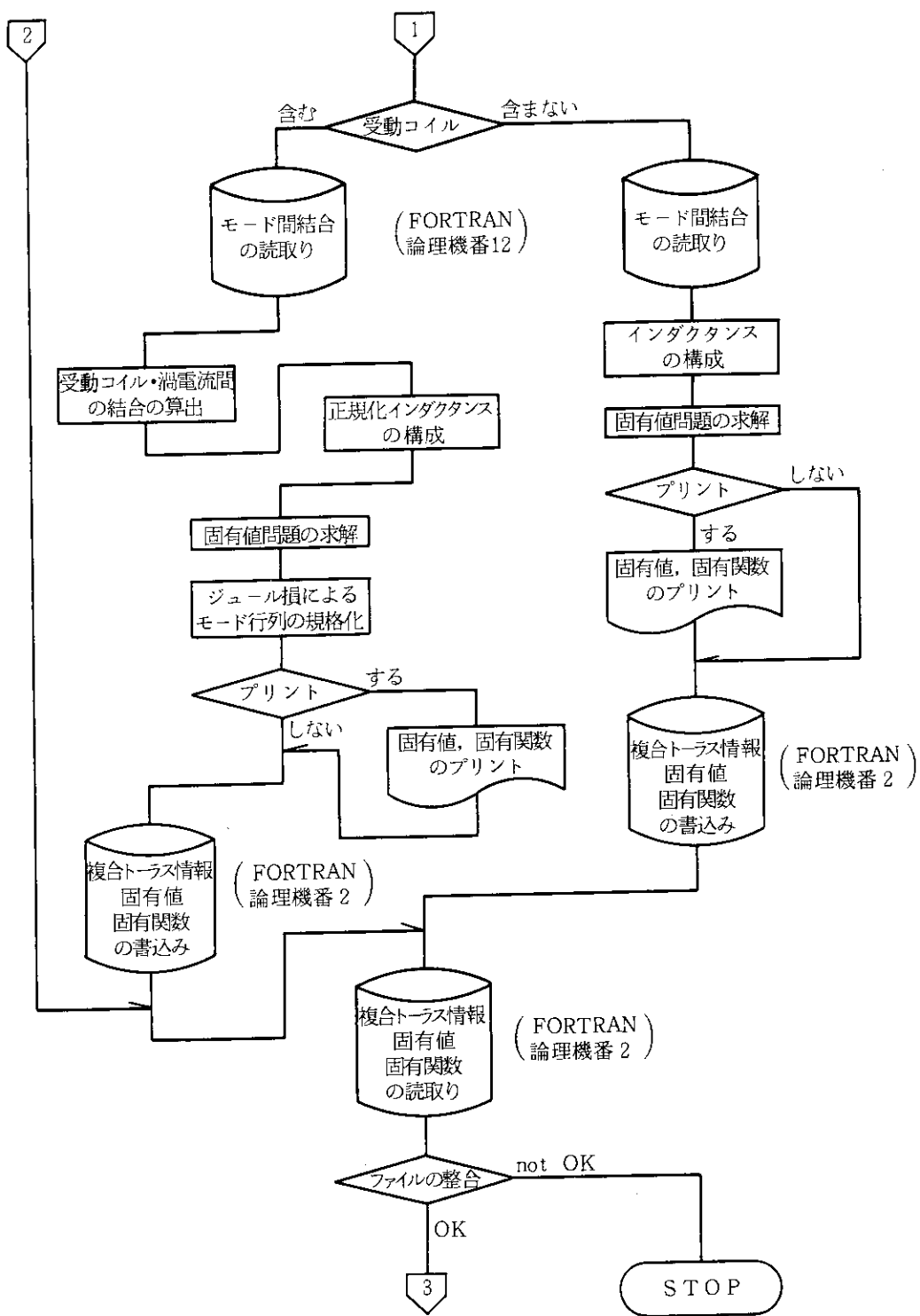


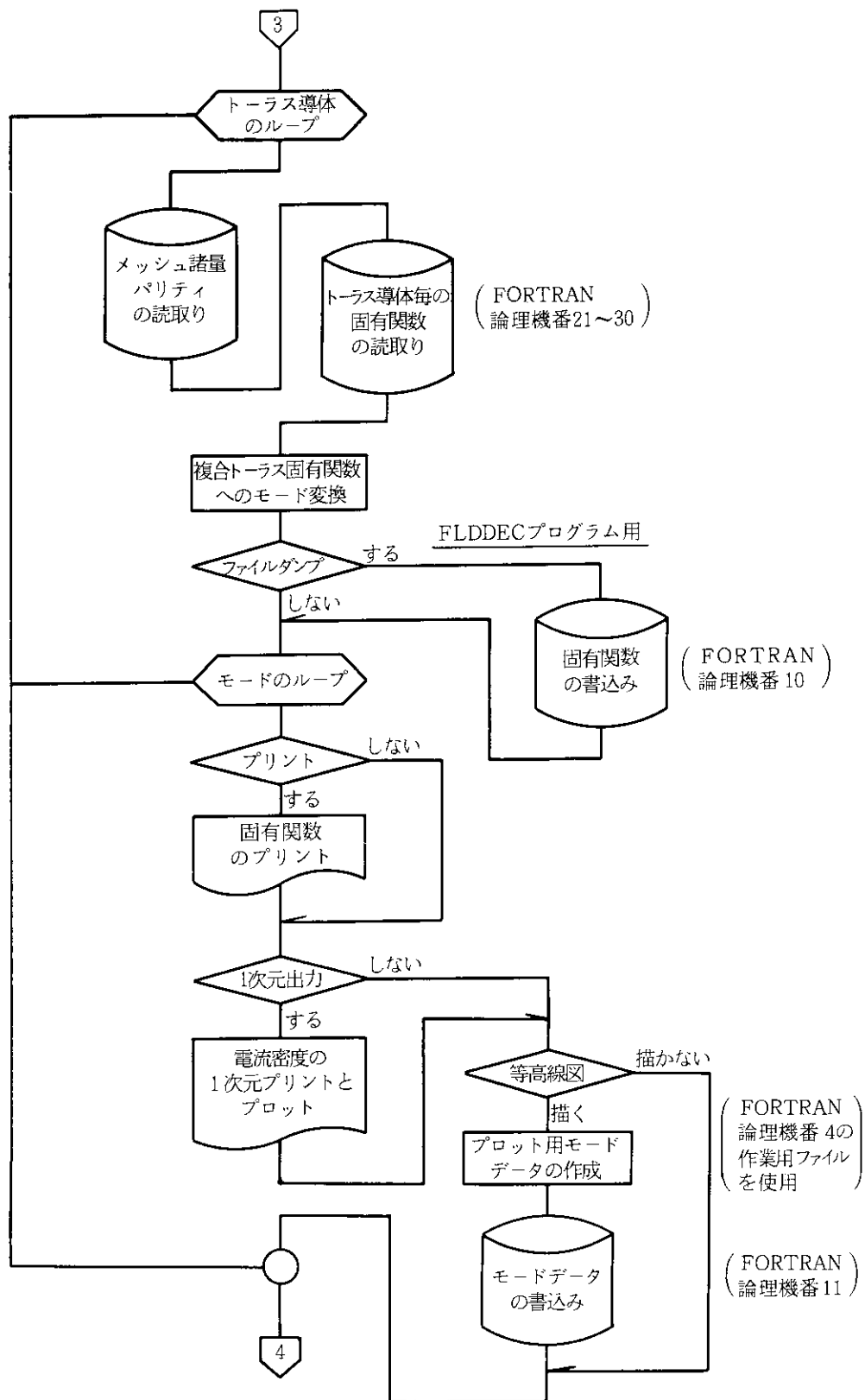
注1：初期入力は、a) タイトル、パリティ条件、b) トーラス導体数、c) 数値積分の方法に関する制御パラメータ、d) 出力指定のためのオプションなどから成る。

注2：ここでは、初回の実行の場合を除き、モード間結合のデータを保存するバックアップファイルが1本必要である。

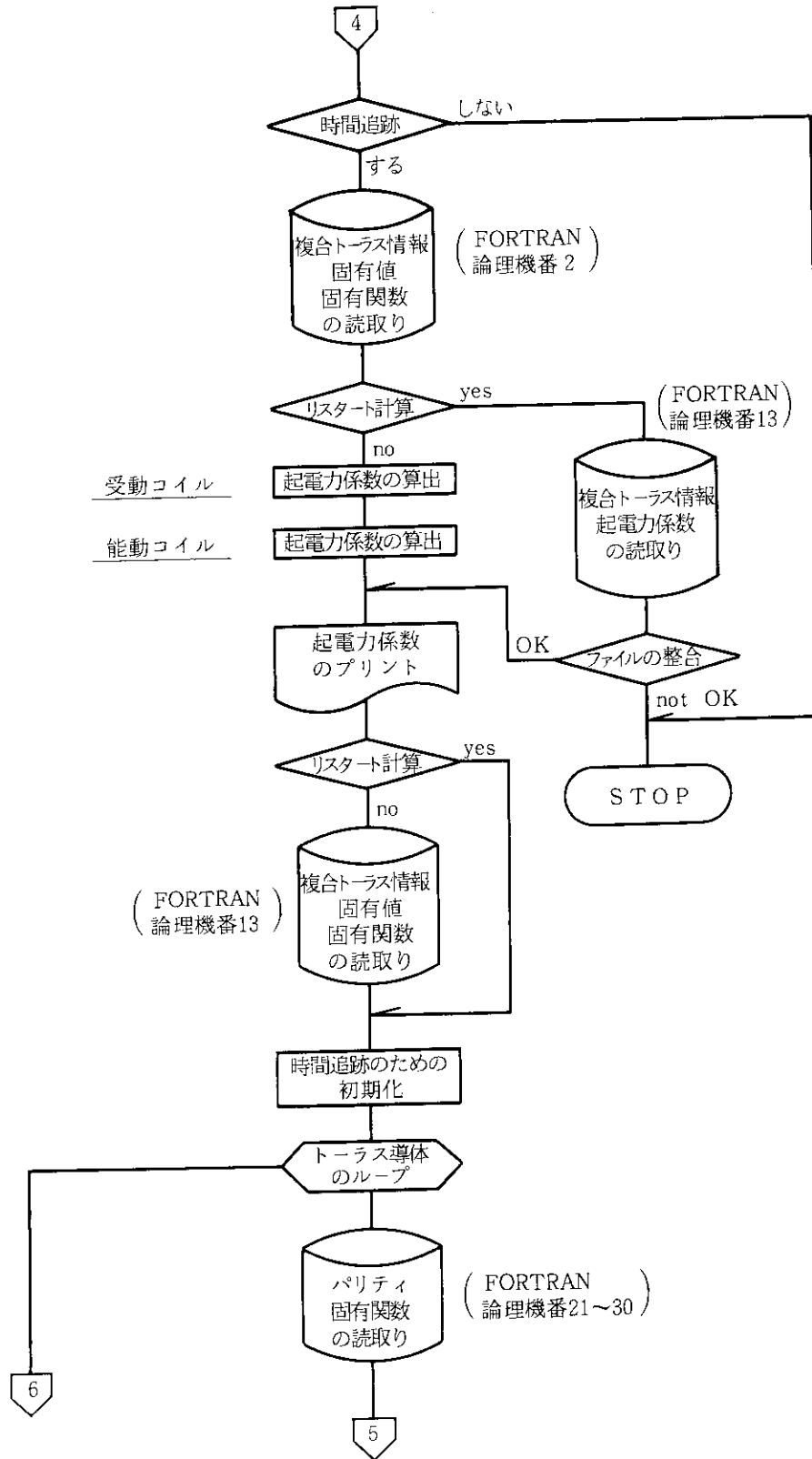
[4] EM3DEC (ESHARE) プログラムによる第4段階の処理



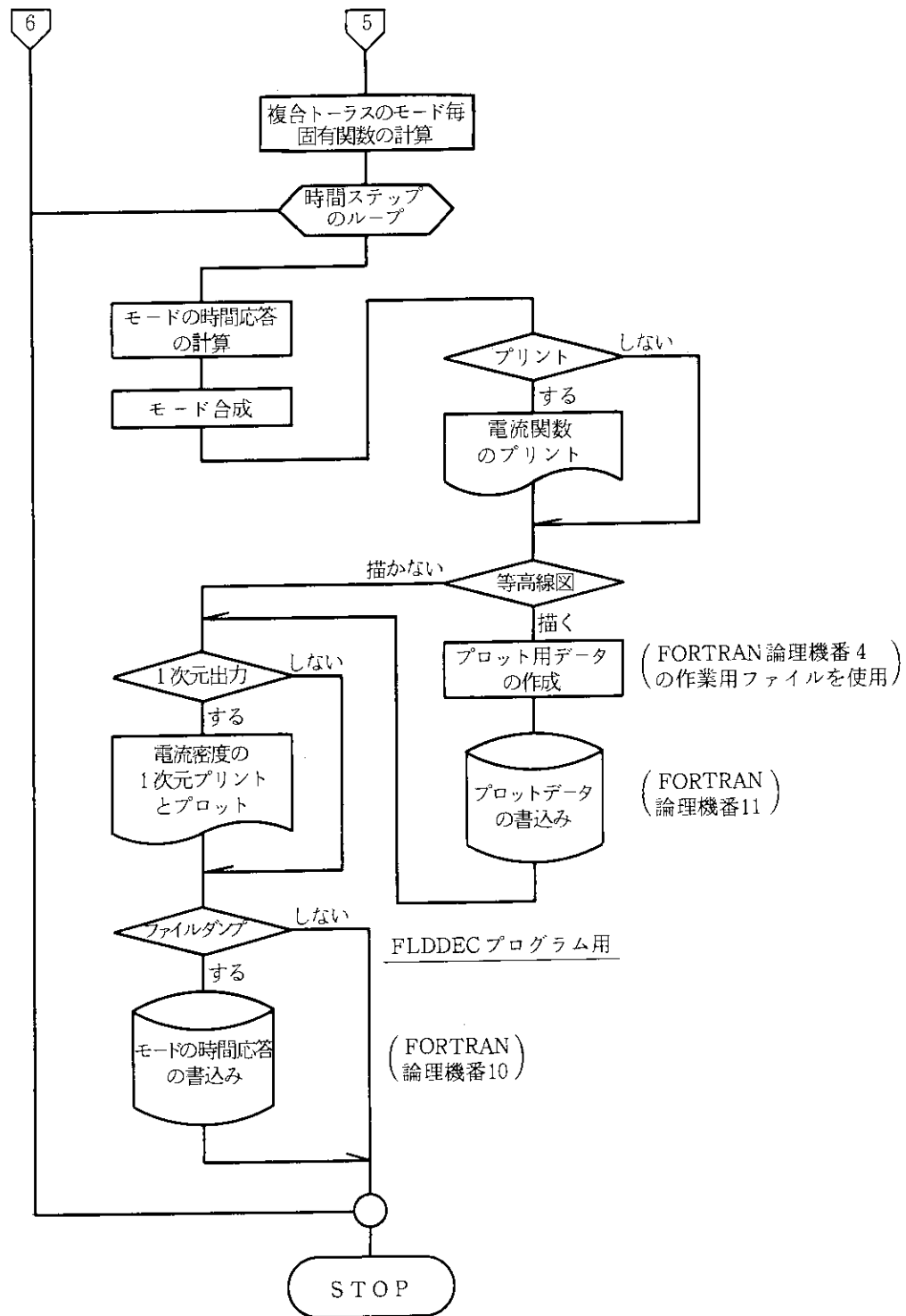




注1: 等高線図のプロットは、オフライン処理である。



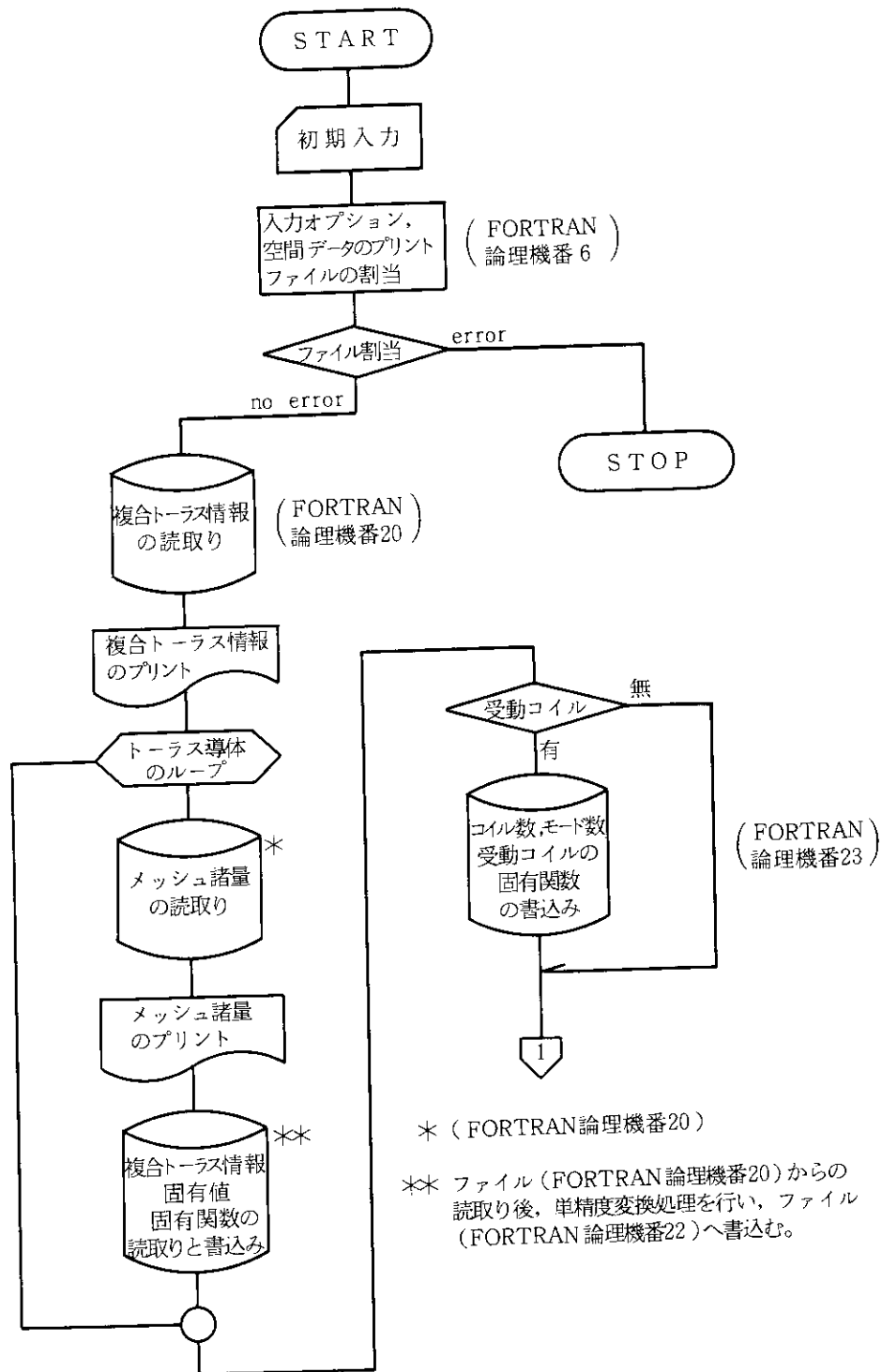
注2：本プログラムでは、複数のトラス導体の他に新たに外部受動コイルを取り込むことができる。
 この受動コイルには外部電源による電流が流れることはないが、外部磁場により渦電流を流すことができるように設計されている。

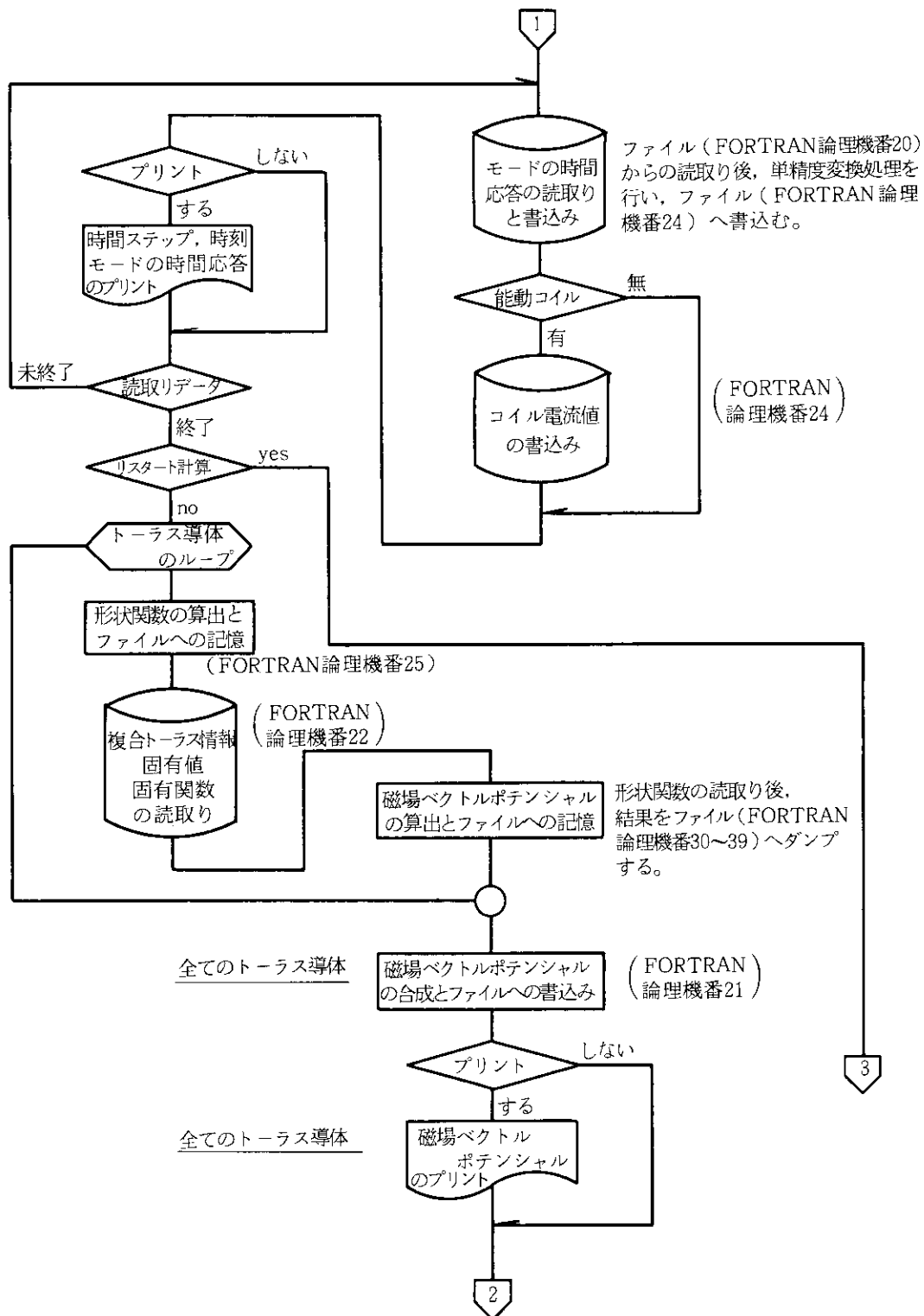


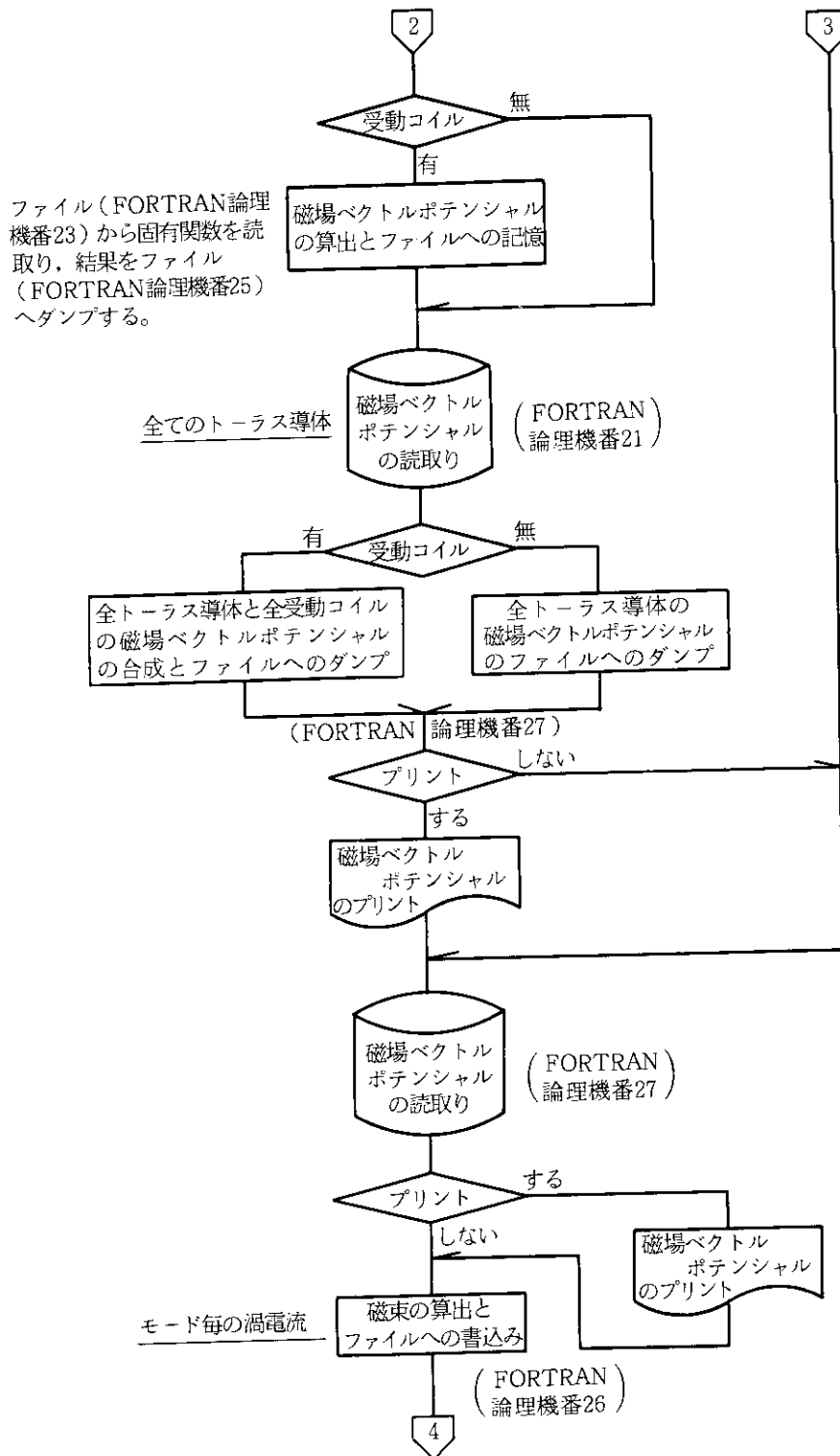
注3：初期入力は、a) タイトル、b) リスタート用入力オプション、c) 複合トラス導体系の諸情報、d) 時間追跡用諸量、e) プロットやプリント出力およびファイルダンプなどの出力指定のためのオプションから成る。

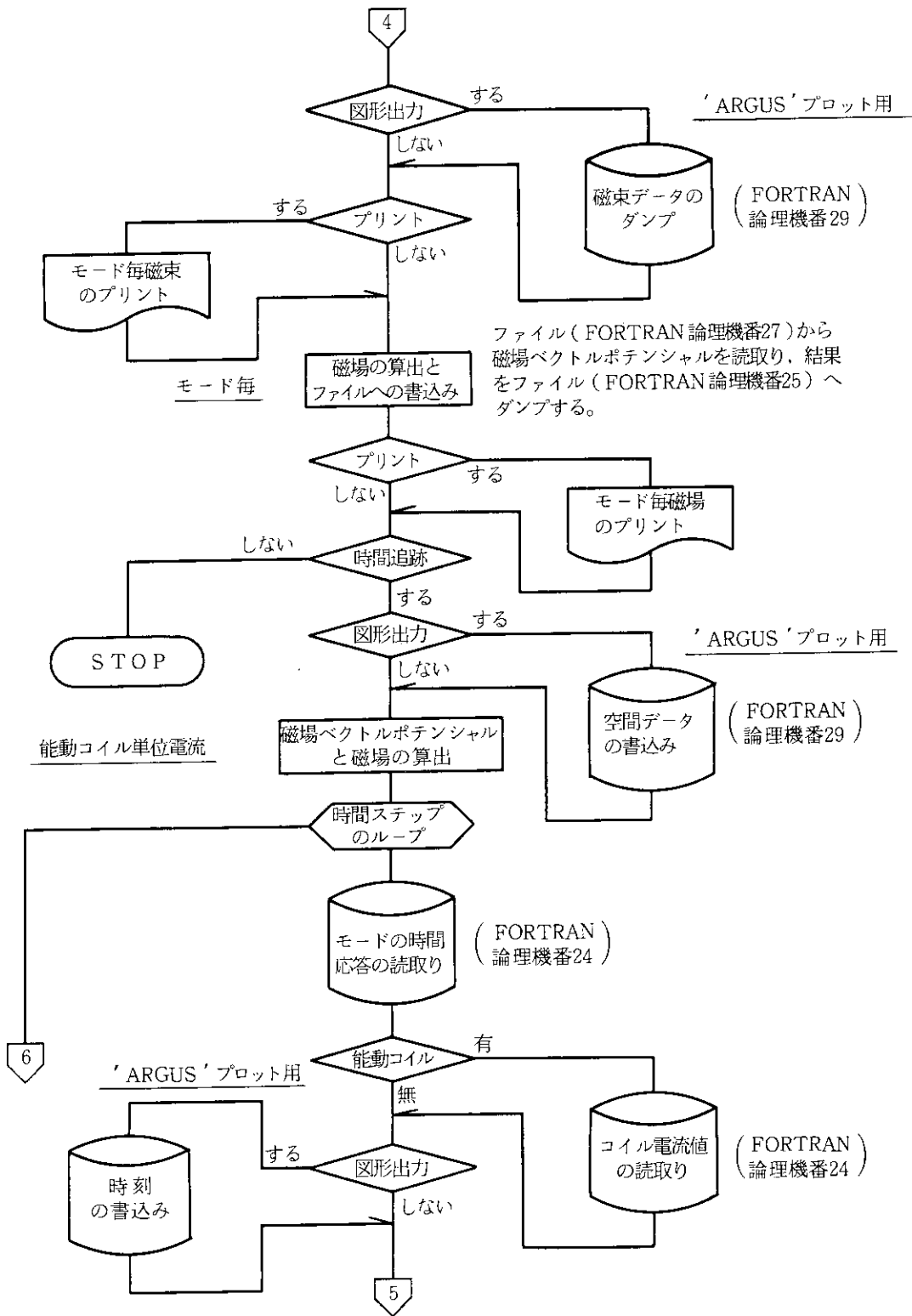
注4：次のFLDDECプログラムで使用するのは、FORTRAN 論理機番10のファイルである。そのレコード内容は、a) 複合トラス導体系の諸情報、b) トラス導体系メッシュ情報、c) 渦電流固有モードの固有関数、d) モード縮小用諸量、e) モードの時間応答から成る。

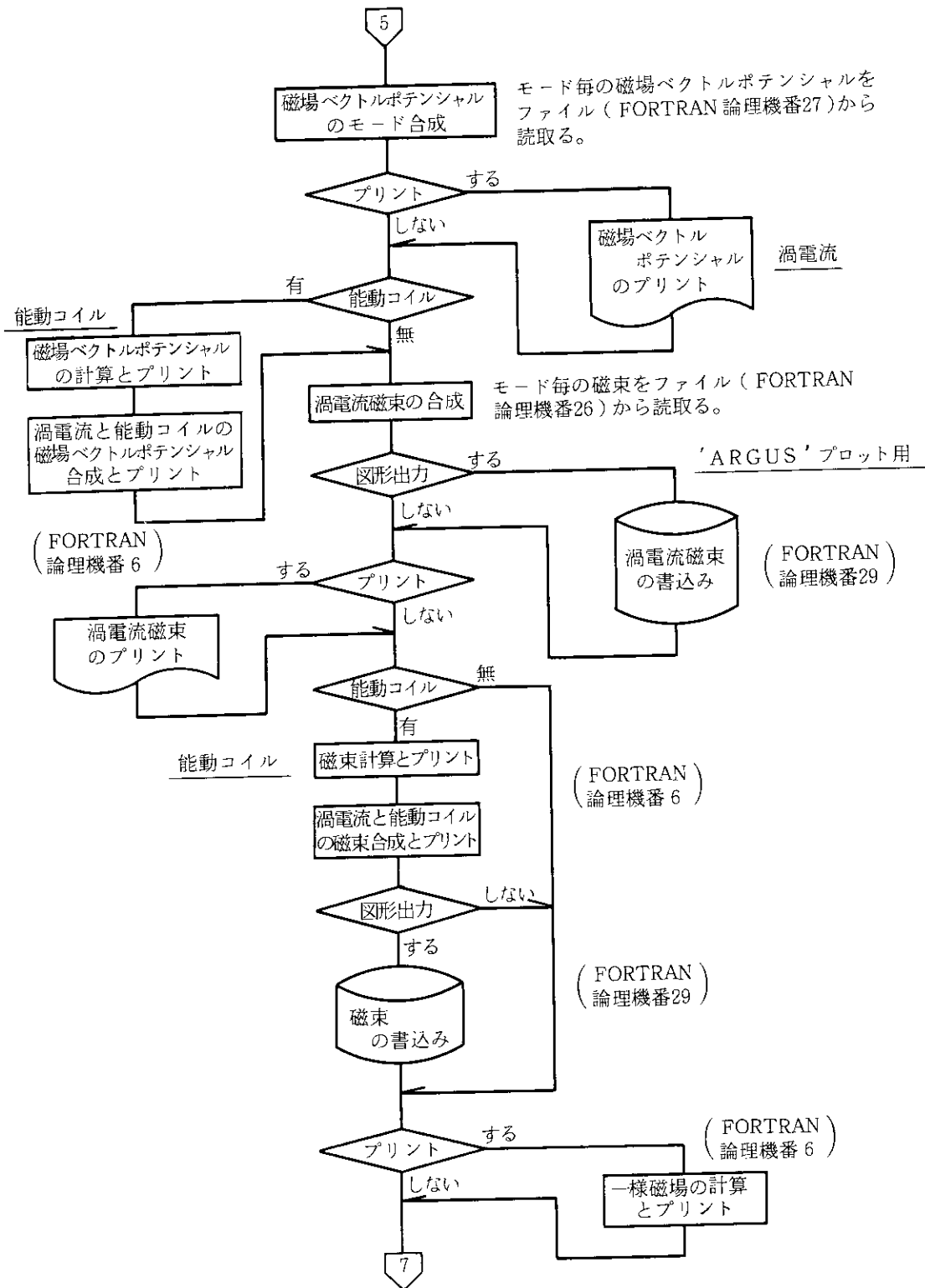
〔5〕 FLDDEC (ESHARE) プログラムによる第5段階の処理

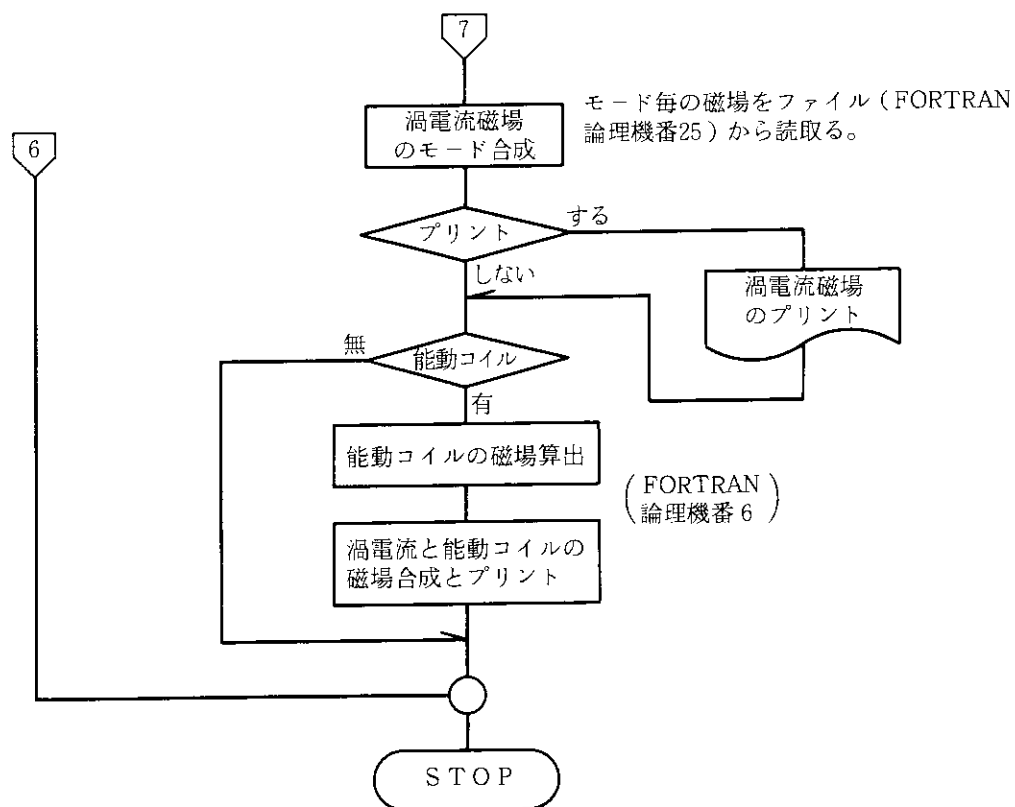












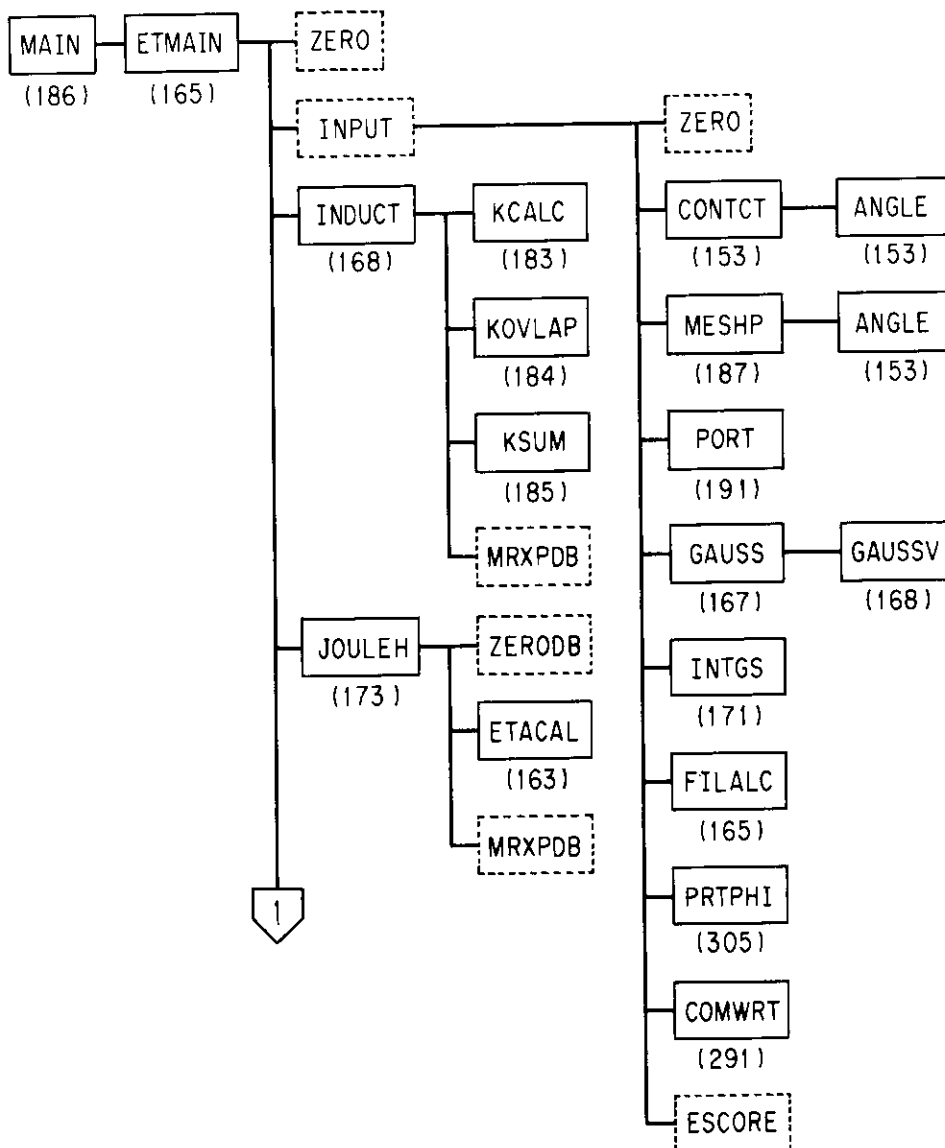
注1: 'ARGUS' プロット³¹⁾は、オフライン処理である。

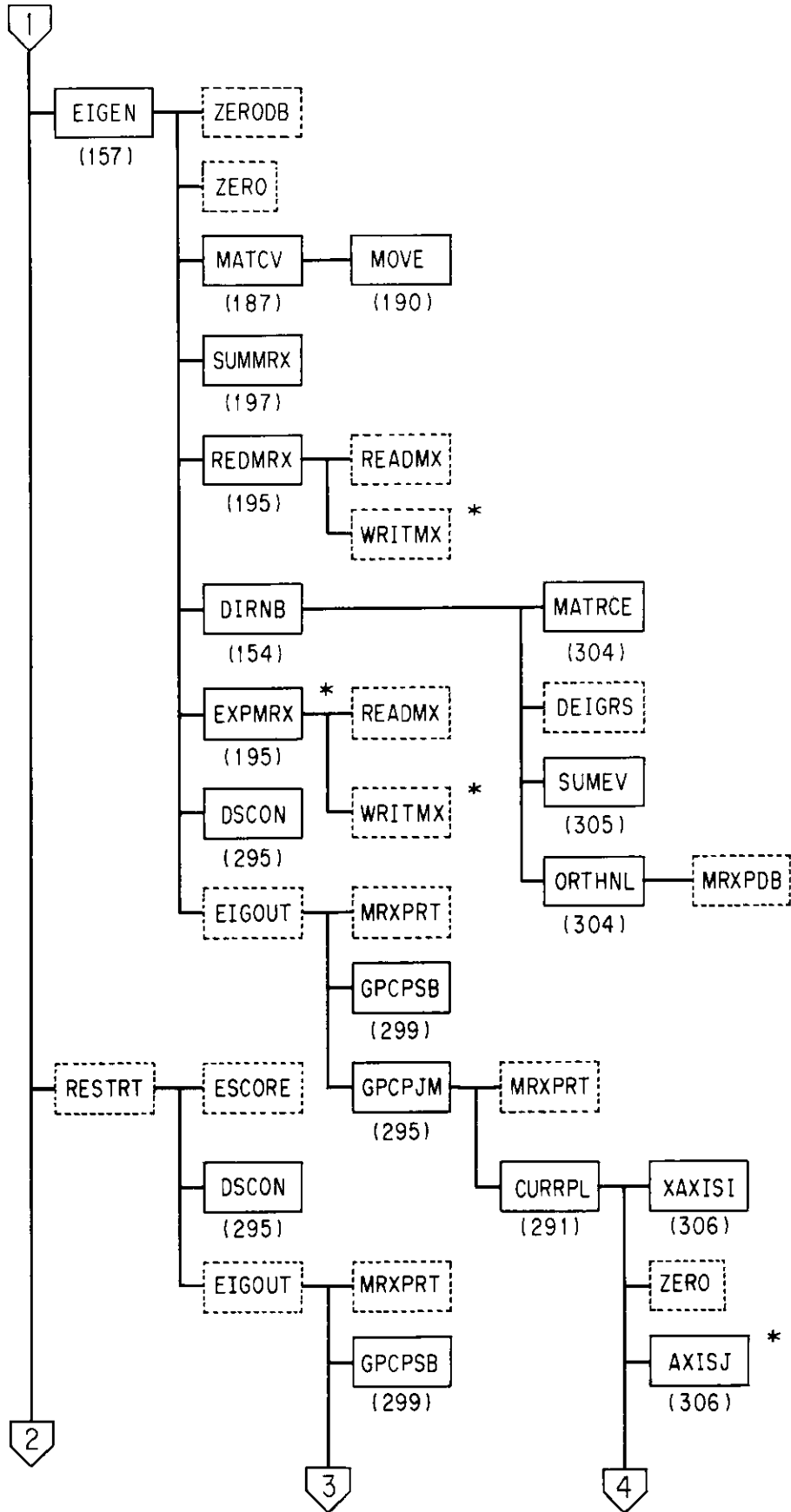
注2: 初期入力は、a) 複合トラス導体系の諸情報、リスタートオプション、b) 空間データ、c) 出力指定のためのオプションから成る。

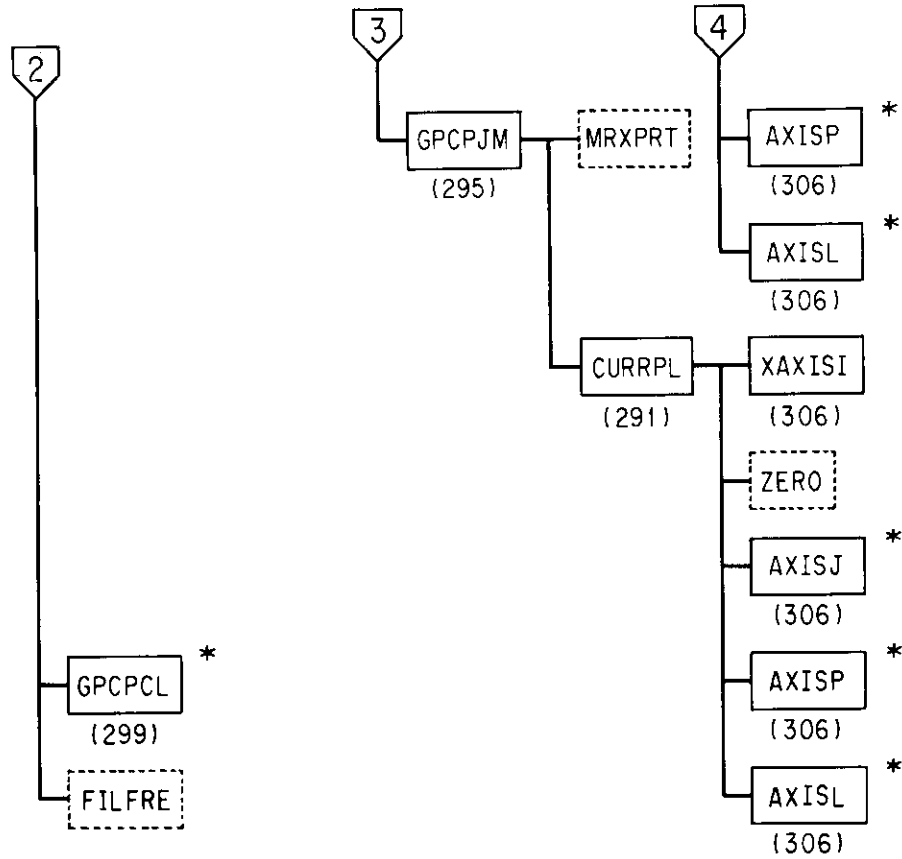
A.3 各プログラムで用いられるサブルーチンの説明

ここでは、本計算コードシステムで使用するほぼ全ての主要サブルーチンについて、5つの計算プログラムと ESHARE プログラム毎に、処理機能および変数パラメータ、記号の説明を行う。それぞれのプログラム内で使用するサブルーチンは、アルファベット順に解説してあるが、引用の便を考慮し各プログラム記述の初めにプログラムツリーを与えた。ツリーの各モジュール名の下段の数字は、該当するモジュール説明が与えられている本報告書におけるページ番号を表わす。特に*印で識別したものは、2次入口名を意味する。破線の枠で与えられているモジュールの説明は省略してあり、ツリーの上位近傍のモジュールにおいて簡単な処理機能の説明を行っている。

A.3.1 EDTDEC プログラム







サブルーチン ANGLE

Fig. B1.1 に示すように、ここでは、直線 \overline{AB} が r 軸となす角 θ を求める。ただし、AとBの r 座標が同じとき $\theta = \pi/2$ とし、AとBの z 座標が等しいとき $\theta = 0$ ($r_2 > r_1$) または $\theta = \pi$ ($r_1 > r_2$) とする。以下に記号の説明を与える。

- | | |
|-------------|--|
| 1) $R1, Z1$ | 点Aの各々 r 座標, z 座標 |
| 2) $R2, Z2$ | 点Bの各々 r 座標, z 座標 |
| 3) $THET$ | 線分 \overline{AB} と r 軸のなす角度 (radian) |

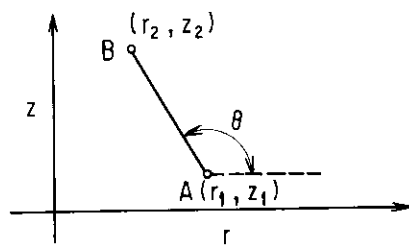


Fig. B1.1 The angle θ between the line segment \overline{AB} and the r -axis.

サブルーチン CONTACT

ここでは、トーラス断面形状を与える各円弧、直線の接続点の座標 (r, z) と曲率半径 (ただし直線の場合は0) により Fig. B1.2 の諸量を算出する。

隣り合う接統点を (r_3, z_3) , (r_4, z_4) とし、曲率半径を ρ_4 としたとき、諸量は以下のように求まる。

- 1) 曲率中心 C の座標 (α, β) (ただし、直線の場合は共に 0 とする。)

Fig. B1.3 に示す 2 直線

$$(L1) \quad \frac{r-r_1}{r_2-r_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \quad (L2) \quad \frac{r-r_0}{\alpha-r_0} = \frac{z-z_0}{\beta-z_0},$$

の直交条件より、直線 $L2$ の方程式は

$$r-r_0 = \frac{z_2-z_1}{r_2-r_1}(z-z_0),$$

となり、 $\rho^2 = (b/2)^2 + (\alpha-r_0)^2 + (\beta-z_0)^2$ が成り立つ。ただし、 $b^2 = (r_2-r_1)^2 + (z_2-z_1)^2$ であるから、

$$\alpha = r_0 - (z_2-z_1) \frac{\sqrt{\rho^2 - (b/2)^2}}{b}, \quad \beta = z_0 + (r_2-r_1) \frac{\sqrt{\rho^2 - (b/2)^2}}{b},$$

により曲率中心 C の座標 (α, β) が求まる。ここで、円弧はトーラス赤道面からみて常に凸になるように与えられる。

- 2) 各接統点と曲率中心 C を結ぶ各線分が r 軸となす角度 δ_s および δ_e

δ_s : 円弧の始点の角度

δ_e : 円弧の終点の角度

- 3) 円弧の終点までの長さ ℓ_4

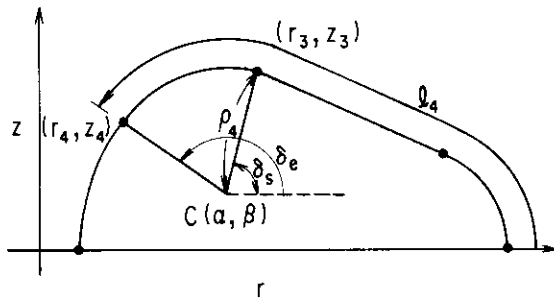


Fig. B1.2 Poloidal cross-section of a torus. The (r_3, z_3) and (r_4, z_4) are the neighboring contacting points; The ρ_4 the radius of curvature. The ℓ is the length along the cross-section measured from the outermost point of the torus; The δ the angle between the radius of curvature ρ_4 and the r -axis. The (α, β) represents the (r, z) coordinate of the center of curvature C .

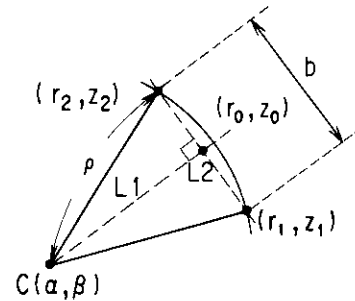


Fig. B1.3 Coordinate (α, β) of the center of curvature C ; The b is the distance between two points (r_1, z_1) and (r_2, z_2) and the ρ the radius of curvature. The lines $L1$ and $L2$ intersect perpendicularly at the point (r_0, z_0) .

サブルーチン DIRNB

ここでは、次の一般化固有値問題

$$\{M\}X = \{D(\lambda)\}\{R\}X, \quad (B1.1)$$

を解く。ただし、 $\{M\} \in R^{N \times N}$ および $\{R\} \in R^{N \times N}$ は共に正定値実対称行列であり、以下の 2 段の処理課程

$$[P.1] \quad \{R\}X = \{D(\tau)\}X, \quad (B1.2)$$

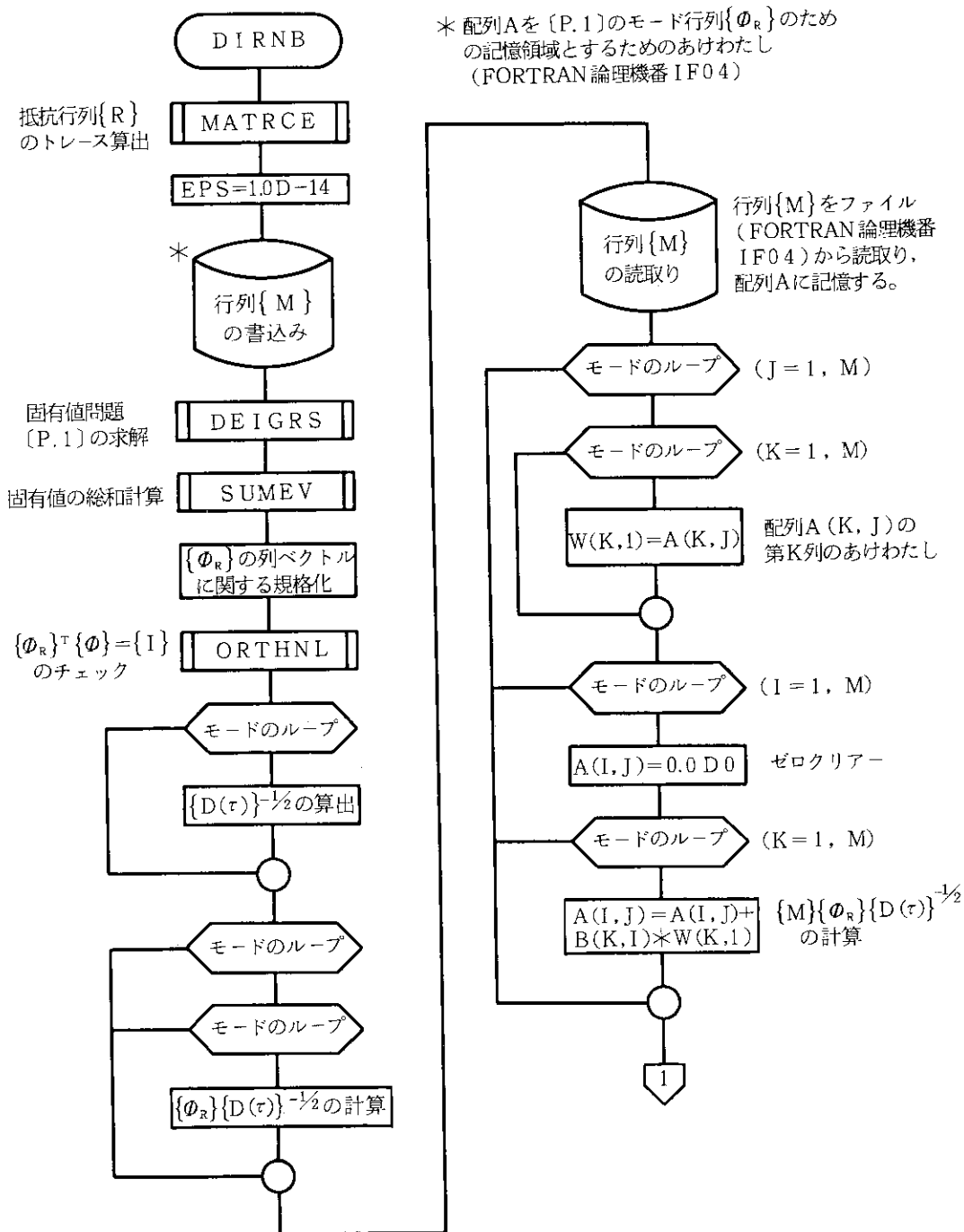
ここで、 τ は固有値であり、規格化されたモード行列を $\{\Phi_R\}$ とすると、 $\{\Phi_R\}^{-1} = \{\Phi_R\}^T$ が成り立つ。

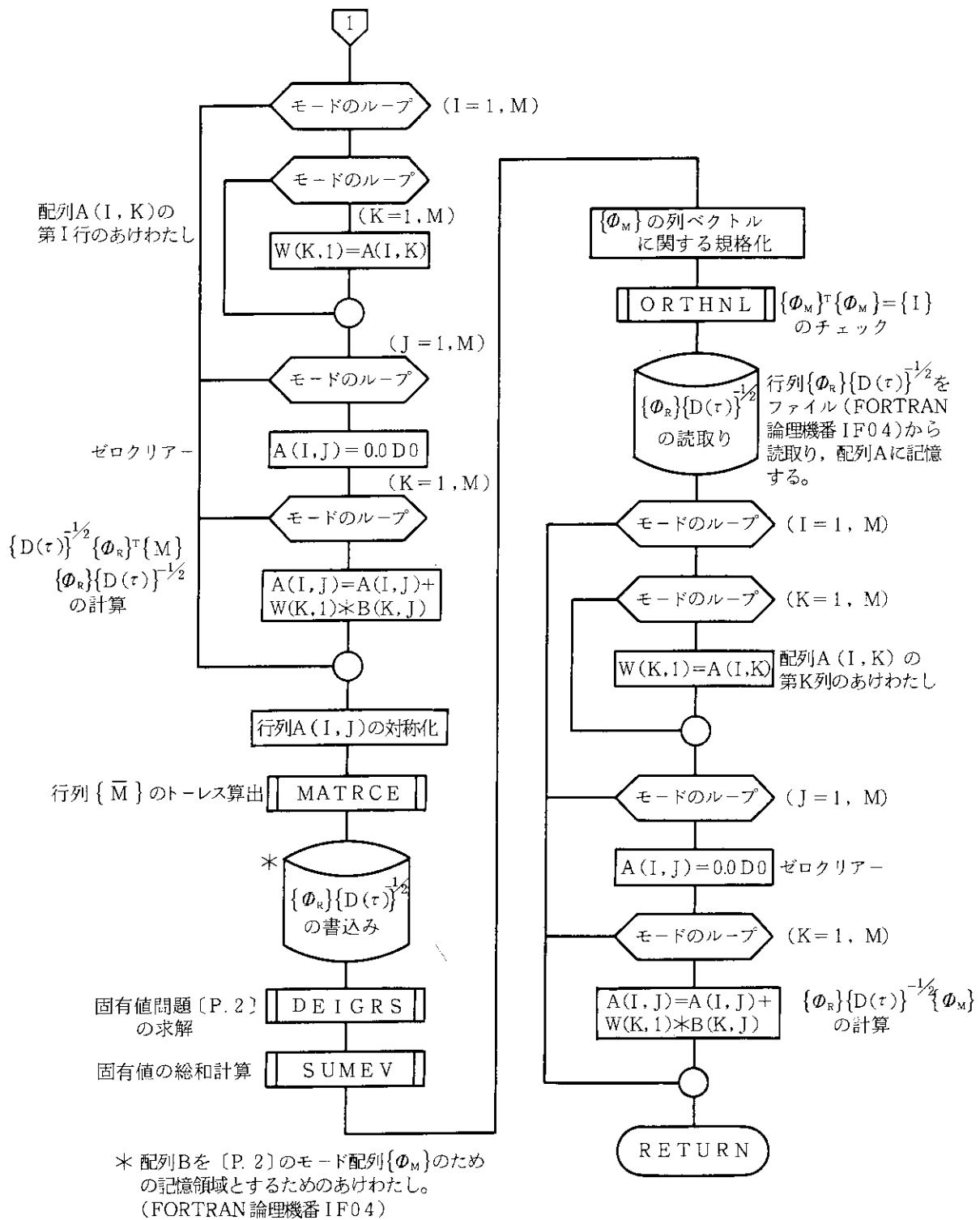
$$[P.2] \quad \{\bar{M}\}X = \{D(\lambda)\}X, \quad (B1.3)$$

ただし、 $\{\bar{M}\} = \{D(\tau)\}^{-1/2} \{\Phi_R\}^T \{M\} \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2}$ である。 λ は固有値であり、規格化されたモード行列を $\{\Phi_M\}$ とすると、 $\{\Phi_M\}^{-1} = \{\Phi_M\}^T$ が成り立つ。

に分離し処理を実施する。本モジュールでの実数型変数は全て倍精度である。配列A(M0, M0), B(M0, M0) は、それぞれインダクタンス行列および抵抗行列のための領域であるが、処理途中において固有値問題を解いて得たモード行列のための配列変数として共通領域化される。

〔1〕 フローチャート





[2] 主な記号の説明

- | | |
|------------|---|
| 1) M, M0 | 固有値問題の次数 (M=M0) |
| 2) W(M0,6) | 本ルーチンおよびサブルーチン 'DEIGRS' のための作業領域 |
| 3) IOUT(1) | モード行列の正規直交性をプリント出力するための入力オプション |
| 4) XL(M0) | [P.1] の固有値 $\{D(\tau)\}$, [P.2] の固有値 $\{D(\lambda)\}$ のための共通記憶領域 |

- 5) A(M0, M0) フローチャートに示す処理の流れと共に、以下のようにその記憶内容が変化する共通作業領域である。

$$\{M\} \rightarrow \{\Phi_R\} \rightarrow \{M\} \rightarrow \{M\} \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2} \rightarrow \{\bar{M}\} (= \{D(\tau)\}^{-1/2} \{\Phi_R\}^T \{M\} \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2}) \\ \rightarrow \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2} \rightarrow \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2} \{\Phi_M\}$$

- 6) B(M0, M0) フローチャートに示す処理の流れと共に、以下のようにその記憶内容が変化する共通作業領域である。

$$\{R\} \rightarrow \{\Phi_R\} \{D(\tau)\}^{-1/2} \rightarrow \{\Phi_M\}$$

サブルーチン EIGEN

ここでは、計算対象領域 ($0 \leq i \leq \text{IMAX}$; $1 \leq j \leq \text{JMAX}$) 内に存在する有限要素回路に関するインダクタンス行列 SSX(MN, MN), 抵抗行列 ET(MN, MN) を、ポート穴条件や電流関数のパリティに依存した境界条件を用いて縮約させる。その後、一般化固有値問題

$$\{A\} X = \{D(\lambda)\} \{B\} X, \quad (\text{B1.4})$$

を解き、得られた固有関数を再びポート穴条件や境界条件を用いて展開し縮約を解く。更に、指定された入力オプションにしたがい、電流密度の1次元プロットやモード毎の等高線図を出力するサブルーチン'EIGOUT'を呼び出す。

(1) 処理機能

A. マトリクスの縮約条件 IRW(500) の作成

サブルーチン'PORT'において、ポート穴毎の縮約情報 INFDEG(100,5) と縮約先の有限要素参照番地 IRW が得られているが、その要点を整理すると以下ようになる。

(初期設定)

$$\text{IRW}(\text{INDX}) = \text{INDX}, \quad (1 \leq \text{INDX} \leq \text{MN}),$$

ここで、 $\text{INDX} = i * \text{JMAX} + j$ であり、 $\text{IRW}(1) = 0$ である。

(ポート穴による設定)

$(i_L; j_L)$ をポートの最下位のメッシュ点とすると、ポート穴の全ての要素に対して $\text{IRW}(\text{INDX}) = i_L * \text{JMAX} + j_L$ と設定されている。

本ルーチンでは、これらの設定に加えてトーラスの境界条件やパリティ条件により IRW を再定義する。再定義の必要が生じる場合として、以下の3通りを考慮することができる。ただし、電流関数が even パリティでトーラス導体のポロイダル断面の始点 ($i=0$) および終点 ($i=\text{IMAX}$) 共に上下に接続している場合には、再定義の必要はない。

- (1) odd パリティの場合かまたは even パリティであってもトーラス断面の始点 ($i=0$) が上下に接続していない場合の処理

$i=0$ 上の全要素およびポート穴が $i=0$ に接続しているときの全ポート穴要素に対して、 $\text{IRW}(\text{INDX}) = 0$ とする。

- (2) odd パリティの場合かまたは even パリティであってもトーラス断面の終点 ($i=\text{IMAX}$) が上下に接続していない場合の処理

$i=\text{IMAX}$ 上の全要素に対して、 $\text{IRW}(\text{INDX}) = \text{IRW}(\text{IMAX} * \text{JMAX} + 1)$ とする。ただし、 $i=\text{IMAX}$ 上の要素の内1つでも $\text{IRW}(\text{INDX}) = 0$ を満たすものがあれば、全要素に対して、 $\text{IRW}(\text{INDX}) = 0$ とする。

(3) (2)の条件を満たしており、更にポート穴が $i=IMAX$ 上に接続している場合の処理

ポート穴の全要素に対して、 $IRW(INDX)=IRW(IMAX*JMAX+1)$ とする。ところで、 IRW を再定義するときの手順は(1)→(2)→(3)と進めるため、この場合であってもポート穴が境界条件を考慮した結果、ポート穴の或る要素がメッシュ原点(0;1)に接続していることになることがある。このときは、全要素に対して $IRW(INDX)=0$ が優先されることになる。

以上、(1)、(2)、(3)の全ての処理を行った結果得られた縮約先参照番地 IRW は、サブルーチン‘REDMAX’における不要行列要素の除去処理の際に用いられる。更に次に述べるように、固有値問題処理後の固有関数の展開に必要な展開先参照番地の作成に用いられる。

B. マトリクスの展開条件 $IRW(500)$ の作成

固有値問題を解いた結果得られた固有関数は、ポート穴条件や境界条件により縮約されている。このため、固有関数の縮約を解き全節点に展開する必要があるが、この固有関数の展開に際し、 $IRW(500)$ によりベクトル要素の展開先参照番地を与えるように定義し直す。その方法を以下のように例を用いて説明する。Fig. B1.4は、ポート穴やカットを有するトーラス導体のポロイダル断面が $i=0$ で、ポロイダル断面周長方向に上下に接続しない場合($FORM(2,1) \neq 0$)を示す。

(1) 例1： $i=IMAX$ にて縮約が存在しない場合

Fig. B1.4(a)に示すように、evenパリティでかつ $i=IMAX$ にてトーラスのポロイダル断面周長方向にトーラスの断面が上下に接続している場合。

展開先参照番地： IRW

0 0 0 0 0 1 0 2 3 4 5 0 6 6 6 7 0 6 6 6

縮退先参照番地： IRW

0 0 0 0 0 6 0 8 9 10 11 0 13 13 13 16 0 13 13 13

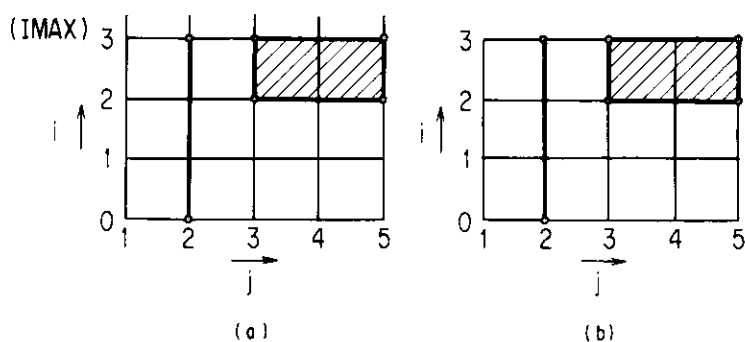


Fig. B1.4 Example of mesh charts for description of the eigenvector expansion: a torus for the case of a different condition of contraction at $i=IMAX$ and a same condition of port-hole. Note (a) indicating that the innermost point of torus cross-section lies on the equatorial plane; and (b) the innermost point does not lie on the equatorial plane.

(2) 例2： $i=IMAX$ にて縮約が存在する場合

Fig. B1.4(a)に示すように、 $i=IMAX$ でトーラス断面が上下に接続しているがoddパリティである場合、またはevenパリティでかつFig. B1.4(b)に示すように $i=IMAX$ でトーラスのポロイダル断面

周長方向にトーラスの断面が上下に接続していない場合。

展開先参照番地：IRW

0 0 0 0 0 1 0 2 3 4 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0

縮退先参照番地：IRW

0 0 0 0 0 6 0 8 9 10 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0

C. ポート穴の状態パラメータ ISTAT の処理

(1) ISTAT = 0

サブルーチン 'PORT' における定義と同じであって、Fig. B1.5 に示すようなメッシュ原点 (0;1) を含むポート穴の状態をいう。

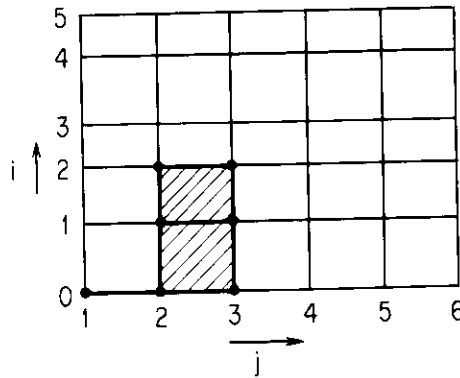


Fig. B1.5 Mesh chart of the torus with a port-hole connecting to the mesh origin (0;1).

(2) ISTAT = 1

Fig. B1.6 の㉑のポート穴や㉒のポート穴の場合に相当し、even パリティかつ $i=IMAX$ においてトーラスのポロイダル断面周長方向に導体が接続している状態をいう。すなわち、パリティ条件や境界条件による本モジュールでの新たな縮退がない場合のことをいう。

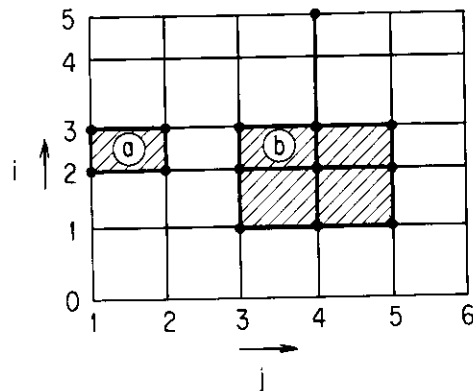
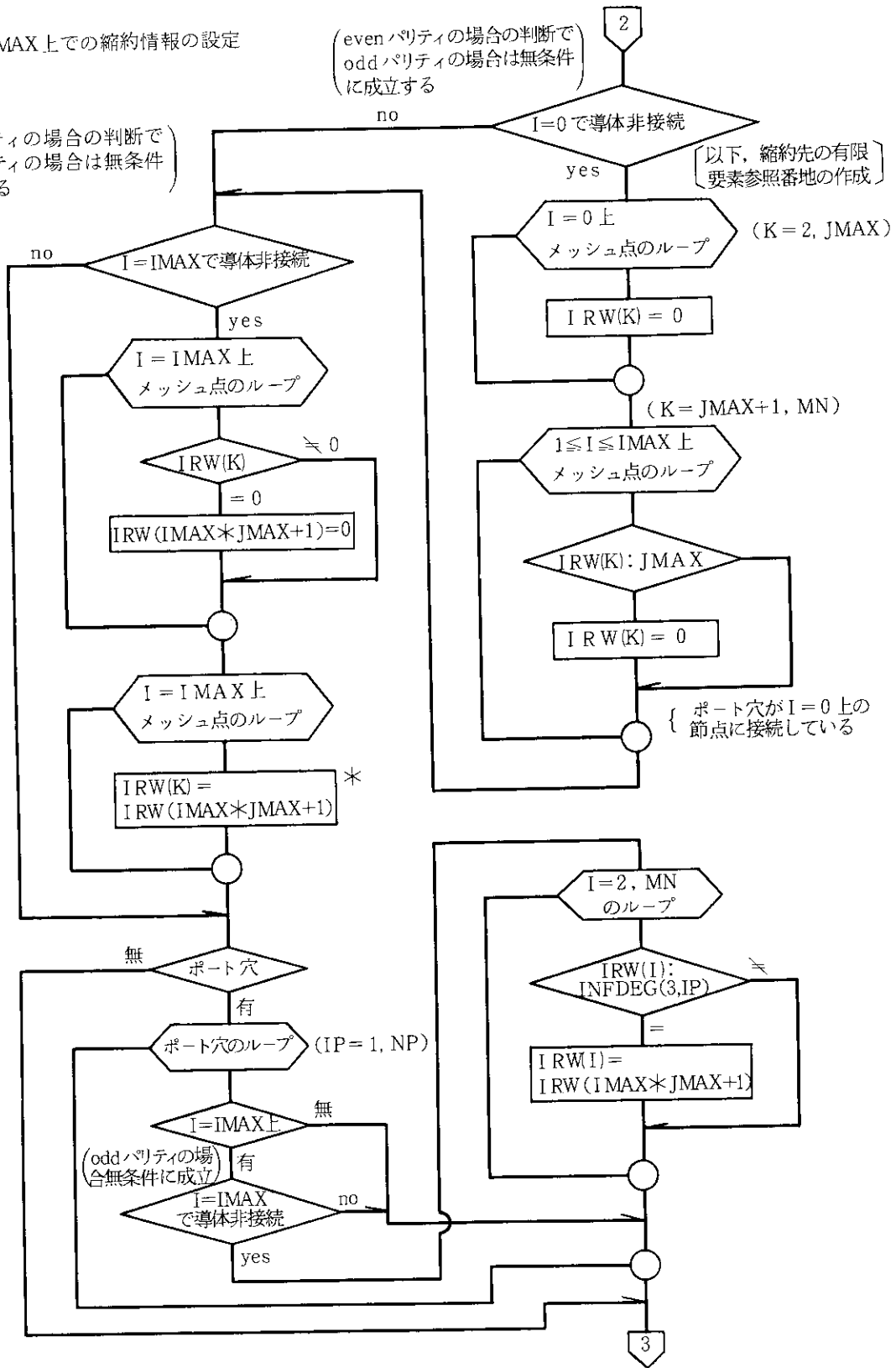


Fig. B1.6 Mesh chart of the torus with port-holes ㉑ and ㉒.

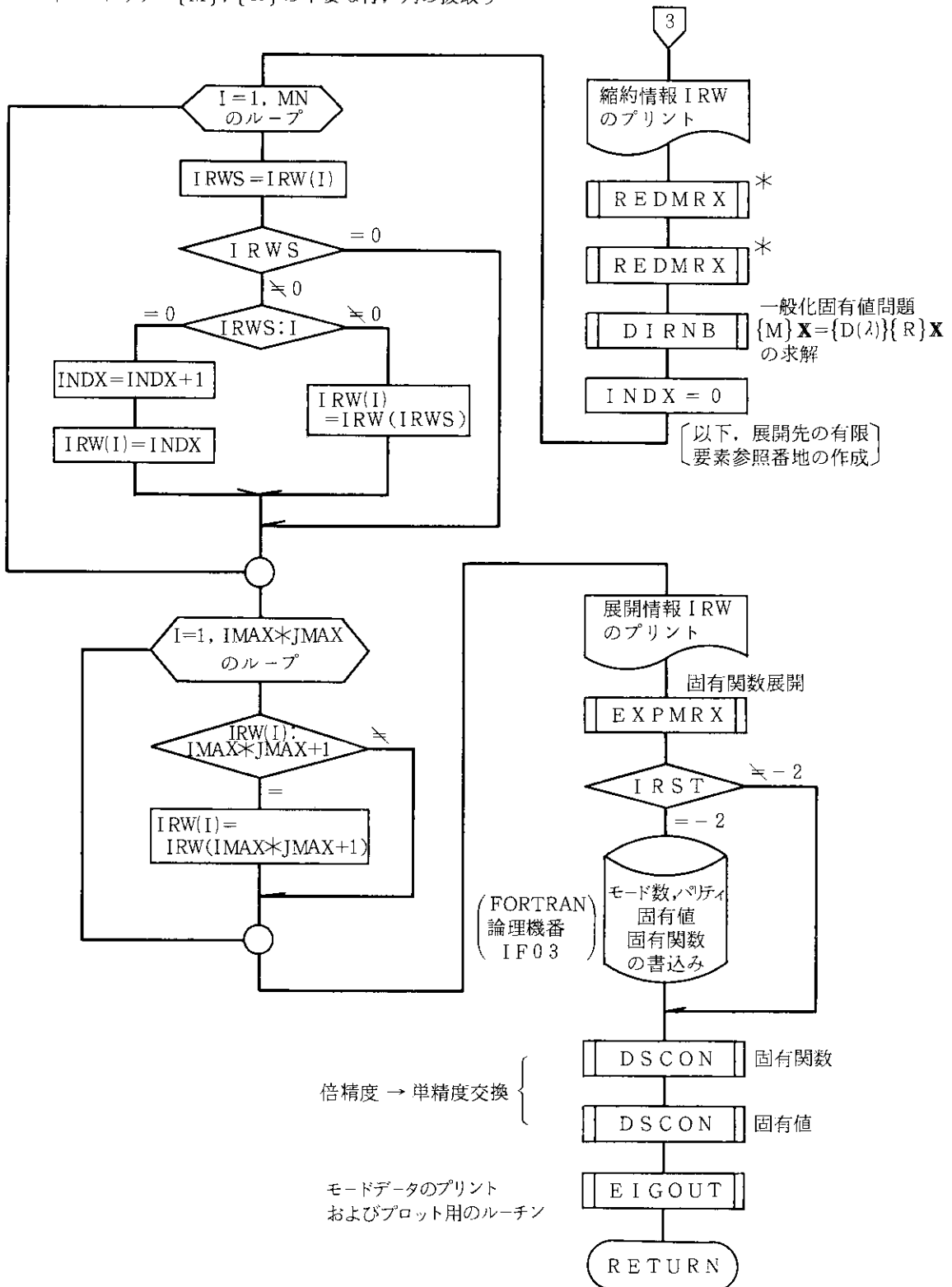
* I=IMAX上での縮約情報の設定

(evenパリティの場合の判断で
oddパリティの場合は無条件
に成立する)

(oddパリティの場合の判断で
evenパリティの場合は無条件
に成立する)



* マトリクス{M}, {R}の不要な行, 列の抜取り



〔3〕 記号の説明

- | | |
|-----------|---|
| 1) ET | {R} のマトリクス |
| 2) SSK | {M} のマトリクス。ただし、QR 法 ²⁹⁾ によって一般化固有値問題を解いた後では固有ベクトルが記憶される。 |
| 3) EVEL | 固有値 |
| 4) WORK | QR 法による一般化固有値問題の求解のための作業領域 |
| 5) IPARTY | 電流関数のパリティ (= 0 : odd, = 1 : even) |
| 6) MN | {M}, {R} の元のマトリクスの行, 列の次数 (= (IMAX+1)*JMAX) |
| 7) MN1 | {M}, {R} の元のマトリクスの行, 列の次数で, i=IMAX; j=1, 2, ..., JMAX 上での縮退がある場合 MN1=IMAX*JMAX+1, そうでない場合 MN1=MN となる。 |
| 8) MN3 | 1 次独立な固有関数の次数 (固有値問題の次数) |
| 9) INFDEG | ポート穴毎の情報で, 詳しくはサブルーチン 'PORT' の説明を参照のこと。 |
| 10) INDXS | 当核ポート穴に含まれる節点の数 |

サブルーチン ETACAL

ここでは, 抵抗のマトリクス {R} の要素となるジュール熱 $\eta (= \int J^2 / \sigma \, dS)$ を数値積分によって求める。1 次独立なジュール熱 η' は, Fig. B1.7 に示すように, 有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$, $\bar{\Omega}_{km}$ に関して次のようになる。

$$\eta'_{ij, km} = \iint \left\{ \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial \phi} \right)' \frac{1}{r^2 \sigma_\ell} + \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \right)' \frac{1}{\sigma_\phi} \right\} dS, \quad dS = r d\ell d\phi. \quad (B1.5)$$

積分範囲は, $\bar{\Omega}_{ij}$ については $\phi_{j-1} \leq \phi \leq \phi_{j+1}$; $l_{i-1} \leq l \leq l_{i+1}$ のゾーン, $\bar{\Omega}_{km}$ については $\phi_{m-1} \leq \phi \leq \phi_{m+1}$; $l_{k-1} \leq l \leq l_{k+1}$ のゾーンの重なった部分 (Fig. B1.7 では斜線部) である。(B1.5) 式は, Gauss-Legendre 積分のために変数変換を行うと,

$$\eta'_{ij, km} = \frac{1}{2^2} \sum_{IGS}^{1, IY} W_y^{IGS} \sum_{JGS}^{1, IX} W_x^{JGS} \left\{ W_\phi^{IS1} \cdot W_\ell^{IS2} \frac{\Delta \ell_i}{r \sigma_\ell \Delta \phi} + W_\ell^{IS1} \cdot W_\phi^{IS2} \frac{r \Delta \phi}{\sigma_\phi \Delta \ell_i} \right\}, \quad (B1.6)$$

となる。

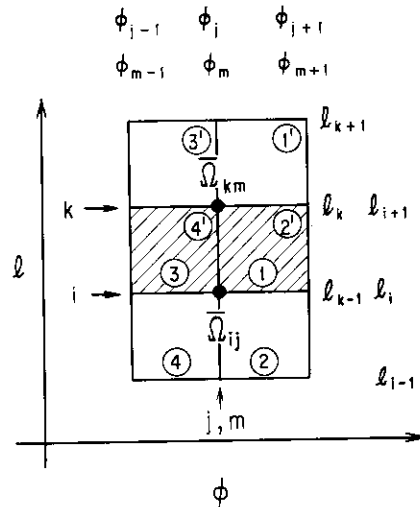
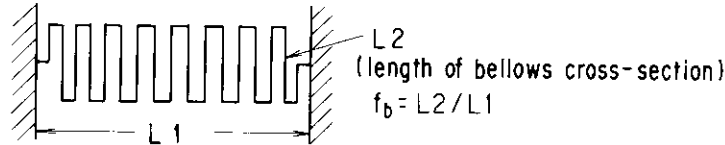


Fig. B1.7 Finite element circuits $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$ for Joule heat $\eta_{ij, km}$. ①, ②, ③ and ④ are the zone numbers of the finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$ and ①, ②, ③ and ④ the ones of $\bar{\Omega}_{km}$. The shadowed part shows the overlapped zone between $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$.

〔1〕 σ についての説明

ここで、 σ_ℓ 、 σ_ϕ はベローズ部においては無条件に r 座標に依存する。厚肉部においては入力オプションにより r 座標に依存する場合 (IAOPT=1) と、そうでない場合 (IAOPT=0) とに分けられる。ただし、厚肉部の場合は $\sigma_\ell = \sigma_\phi$ である。いま、厚肉部とベローズ部の抵抗率を各々 ρ_a および ρ_b とし、更に厚肉部とベローズ部の厚さを各々 d_a および d_b とすると、下図のベローズ部係数 f_b を用いて

1) 厚肉部の $\sigma_a (=d_a/\rho_a)$

$$\begin{cases} \text{IAOPT} = 1 \text{ のとき} : (\sigma_a)_\ell = \sigma_a \cdot \frac{r}{r_0} = (\sigma_a)_\phi & (r_0 : \text{トラス主半径}) \\ \text{IAOPT} = 0 \text{ のとき} : (\sigma_a)_\ell = \sigma_a = (\sigma_a)_\phi \end{cases}$$

2) ベローズ部の $\sigma_b (=d_b/\rho_b)$

$BR0 = f_b \cdot r_0$ (r_0 : トラスの主半径) として、

$$\begin{cases} \sigma_\phi = \sigma_b \frac{f_{bb}}{f_b} \left(\frac{r}{r_0} \right) = \sigma_b \frac{r}{BR0} f_{bb}, \\ \sigma_\ell = \sigma_b f_b \left(\frac{r_0}{r} \right) = \sigma_b \frac{BR0}{r}, \end{cases}$$

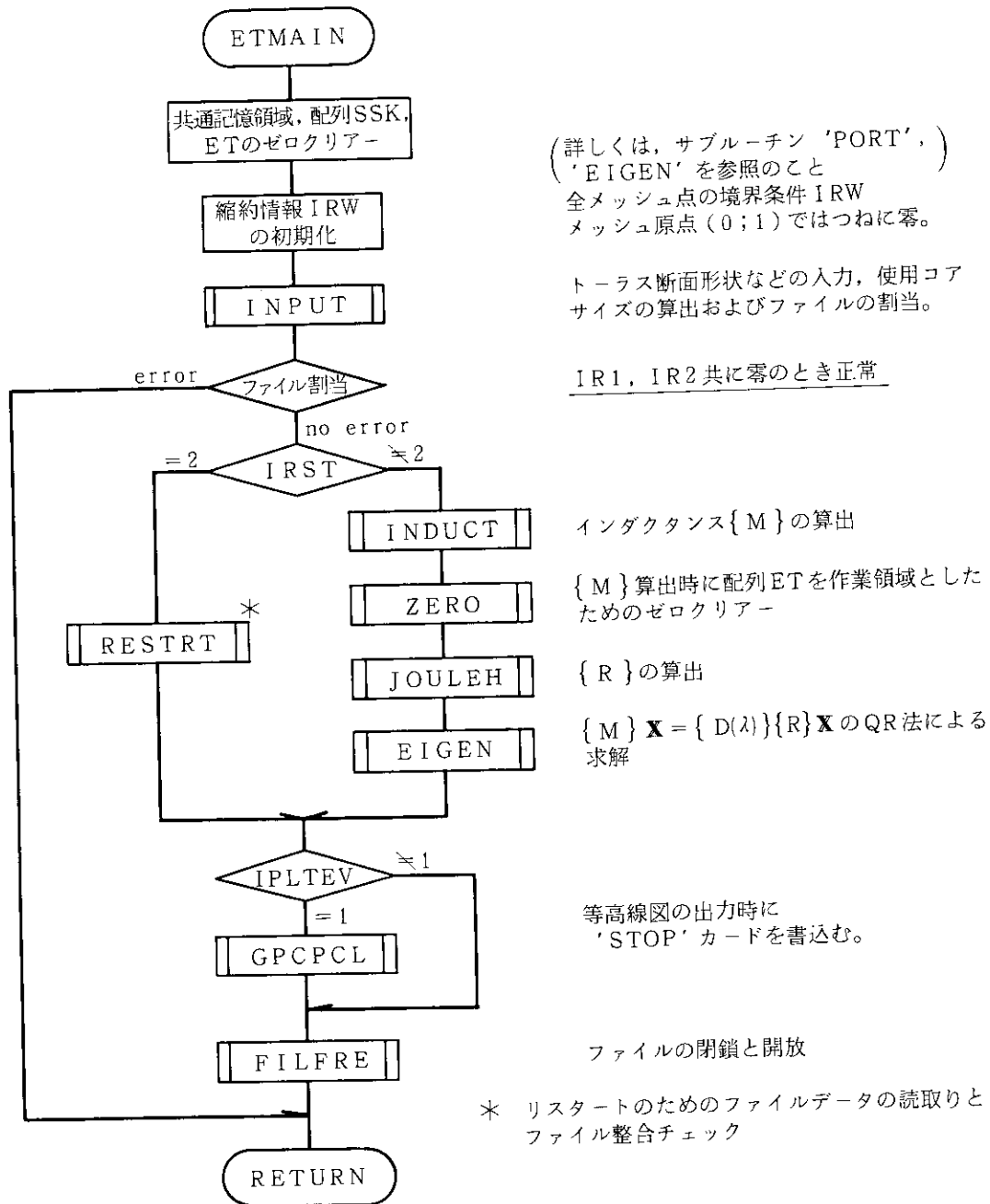
のように表わすことができる。

〔2〕 主な記号の説明

記載のない記号については、サブルーチン 'KCALC' を参照すること。

- | | |
|-------------------|---|
| 1) IST | ベローズ部か厚肉部かの識別パラメータ |
| | $\begin{cases} = 1 : \text{ベローズ部の計算} \\ = 0 : \text{厚肉部の計算} \end{cases}$ |
| 2) ASIGMA, BSIGMA | それぞれ、厚肉部体積導電率 σ_a 、ベローズ部体積導電率 σ_b (ASIGMA は IAOPT=1 の場合サブルーチン 'INPUT' にて既に $1/r_0$ を乗じてある)。 |
| 3) SIGPHI, SIGL | σ_ϕ, σ_ℓ |
| 4) DLDP, DPDL | $\Delta \ell_i / \Delta \phi, \Delta \phi / \Delta \ell_i$ |
| 5) BSIG2F | f_{bb} : ワンターン抵抗修正用係数 |

サブルーチン ETMAIN



サブルーチン FILALC

ここでは, EDTDEC プログラムの実行に必要な全てのファイルの割当てを IPF コマンドを用いて行い, 更に OPEN 文によりデータセット識別番号 (FORTRAN 論理機番) とデータセット名を結合する。

問題入力のオプションにより必要なファイルが異なり, 次のようなファイル処理を行う。

(1) IRST = -2 のとき

FORTRAN 論理機番 3 (IF03) のファイルの割当て, およびこれとデータセット名との結合。本ファイルはユーザーファイルとしてカタログ保存される。

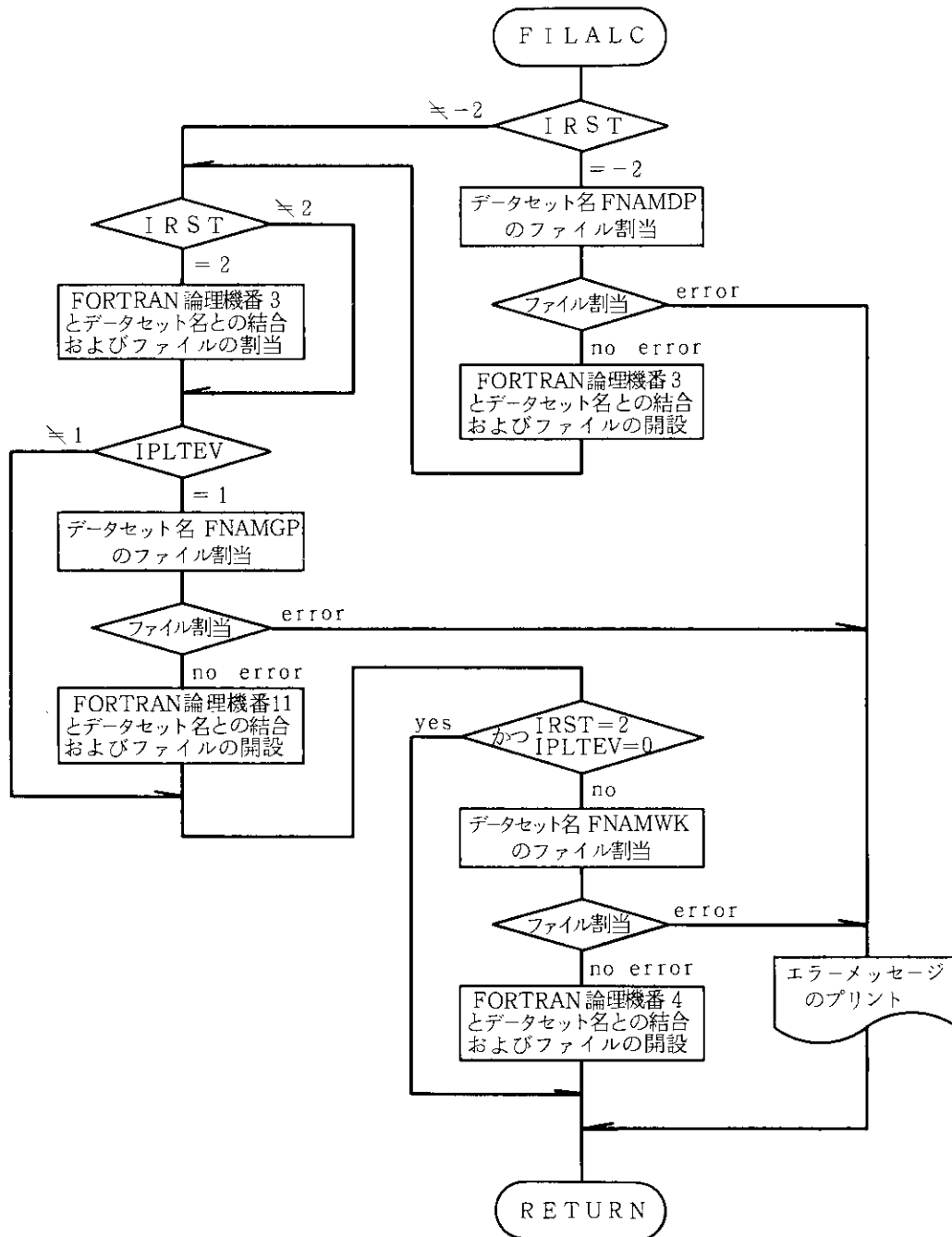
(2) IPLTEV = 1 のとき

固有ベクトルの等高線図（オフライン処理の 'GPCP' プログラム³⁰⁾使用）のため FORTRAN 論理機番 11 (IF11) のダンプファイルの割当て、およびこれとデータセット名との結合。本ファイルは TSS 作業用ファイルとして当日のみ有効である。

(3) 常時作成 (IRST = 2 でかつ IPLTEV = 0 のときを除く)

作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 4) の割当てとこれをデータセット名との結合。本ファイルは実行終了時に必ず消去される。

〔1〕 フローチャート



〔2〕 記号の説明

- 1) IR1, IR2 共に IPF コマンドによるファイル割当て時のエラーコード (= 0 のとき正常)
- 2) FNAMDP FORTRAN 論理機番 3 の EM1DEC プログラムまたはリスタート計算用ファイルのデータセット名
- 3) FNAMGP FORTRAN 論理機番 11 の等高線図プロットのための 'GPCP' プログラム³⁰⁾ 用ファイルのデータセット名
- 4) FNAMWK FORTRAN 論理機番 4 の作業用ファイルのデータセット名
- 5) FNAMM1 各データセット名の作業領域
- 6) USERID 問題実行時のユーザー ID

サブルーチン GAUSS

ここでは、Gauss-Legendre 数値積分のための横座標と重み係数を入力の要求積分点数にしたがい、 ℓ 方向、 ϕ 方向について求めるものである。ただし、2 点から 10 点までとし、入力が 2 点未満或いは 10 点を超える場合は、各々 2 点、10 点として処理する。データの配置は各点数の横座標の正の値 (独立な値) の小さいものより格納し、重み係数は各々横座標に対応するように格納してある。サブルーチン 'GAUSSV' を呼び出し、 ℓ 方向、 ϕ 方向の横座標および重み係数を各々決定する。

- 1) IX, ZX(10), WX(10) 各々 ϕ 方向の点数, 横座標, 重み係数
- 2) IY, ZY(10), WY(10) 同様に ℓ 方向の点数, 横座標, 重み係数
- 3) GSVZ(5,9), GSVW(5,9) 2 点から 10 点の各々横座標, 重み係数のデータ用配列。ここで GSVZ, GSVW の添字 (m, n) の m はデータ数, n は点数に対応する。

GSVZ, GSVW の DATA 文

点 数	各点数における独立な値				
2 点	○	×	×	×	×
3 点	○	○	×	×	×
4 点	○	○	×	×	×
5 点	○	○	○	×	×
6 点	○	○	○	×	×
7 点	○	○	○	○	×
8 点	○	○	○	○	×
9 点	○	○	○	○	○
10 点	○	○	○	○	○

○存在する
×存在しない

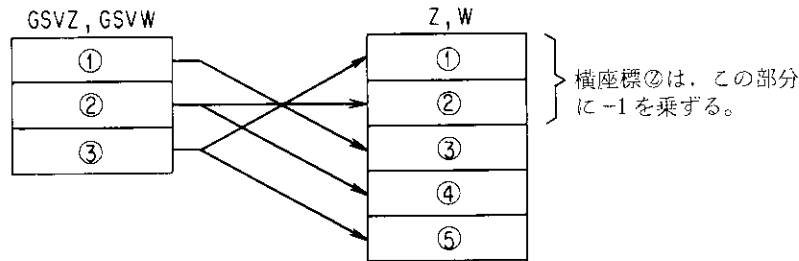
- 4) IX1, IY1 各々, $IX1=IX-1$, $IY1=IY-1$ で、 ϕ 方向、 ℓ 方向のデータ領域の先頭番地を示す。

サブルーチン GAUSSV

ここでは、Gauss-Legendre 数値積分に関する Legendre 多項式の零点の座標および重みの配列を作成する。積分の零点数が偶数か奇数かによって異なる。

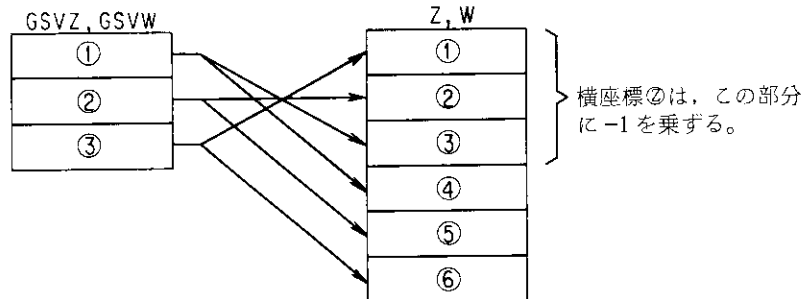
(1) 積分の零点数が奇数の場合、次のように置き換える。

(例えば、5点の場合)



(2) 積分の零点数が偶数の場合、次のように置き換える。

(例えば、6点の場合)



1) Z(1), W(1)

積分の零点数に対応した各々横座標、重み係数の配列

2) GSVZ(1), GSVW(1)

共に仮引数で、作成すべき配列のためのデータが格納されている先頭番地を示す。

サブルーチン INDUCT

ここでは、インダクタンスマトリクス $\{M\}$ のための 1 次独立なインダクタンス $K'_{ij, km}$ を計算する。1 次独立なインダクタンス $K'_{ij, km}$ を求めるため、Fig. B1.8 に示すように、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ については $j=1$ に固定し、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{km}$ については $1 \leq m \leq NMAX$ の範囲を考える。算出法の詳細については、2.2 節を参照されたい。

(1) 主な記号の説明

1) AK

1 次独立なインダクタンス $K'_{ij, km}$ のための記憶領域 (この領域における各番地の求め方は、サブルーチン 'KSUM' を参照のこと)

2) SSK

有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ ($1 \leq i \leq IMAX+1, 1 \leq k \leq IMAX+1; 1 \leq j \leq JMAX, 1 \leq m \leq JMAX$) とのインダクタンス $K_{ij, km}$ つまり $\{M\}$ のマトリクスのための記憶領域である。 $MN = (IMAX+1) * JMAX$ とすると、 $\{M\}$ のマトリクスは $SSK(MN, MN)$ となる。 $K_{ij, km}$ と SSK との関係は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} K_{1,1;1,1} &= SSK(1,1) \\ K_{1,1;1,2} &= SSK(2,1) \\ K_{1,1;1,3} &= SSK(3,1) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{1,1;1,JMAX} &= \text{SSK}(JMAX, 1) \\
 K_{1,1;2,1} &= \text{SSK}(JMAX+1, 1) \\
 &\vdots \\
 K_{1,j;IMAX+1,JMAX} &= \text{SSK}(MN, 1) \\
 &\vdots \\
 K_{IMAX+1,JMAX;1,1} &= \text{SSK}(1, MN) \\
 &\vdots \\
 K_{IMAX-1,JMAX;IMAX-1,JMAX} &= \text{SSK}(MN, MN)
 \end{aligned}$$

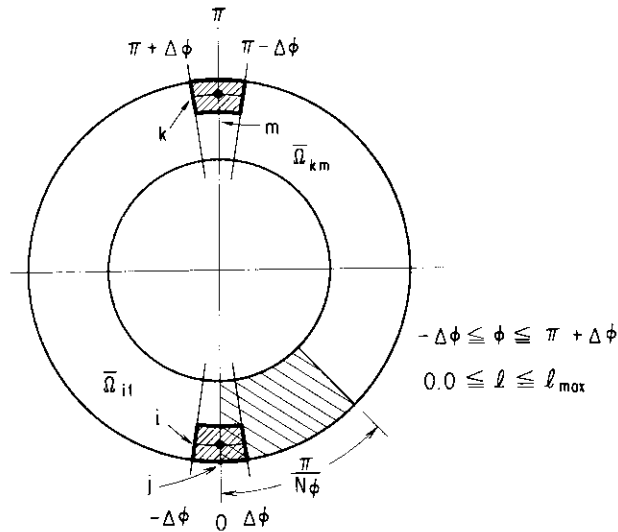


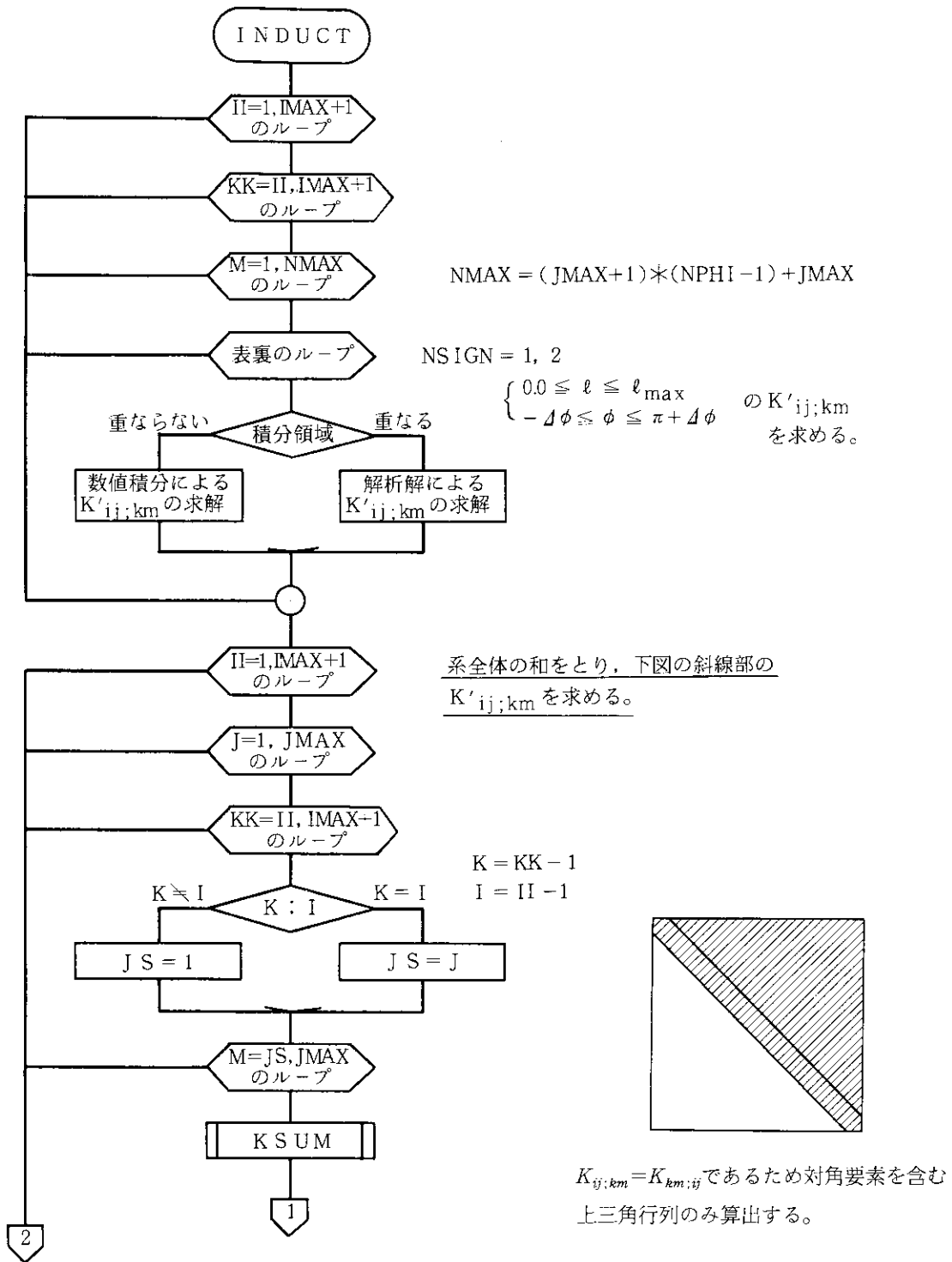
Fig. B1.8 Finite element circuits $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$ for independent inductance $K'_{ij, km}$ on a torus whose toroidal symmetry is $N_\phi=4$. Here, the position of $\bar{\Omega}_{ij}$ is always fixed as $j=1$ and $\bar{\Omega}_{km}$ ranges over the torus area $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$; $0.0 \leq l \leq l_{max}$.

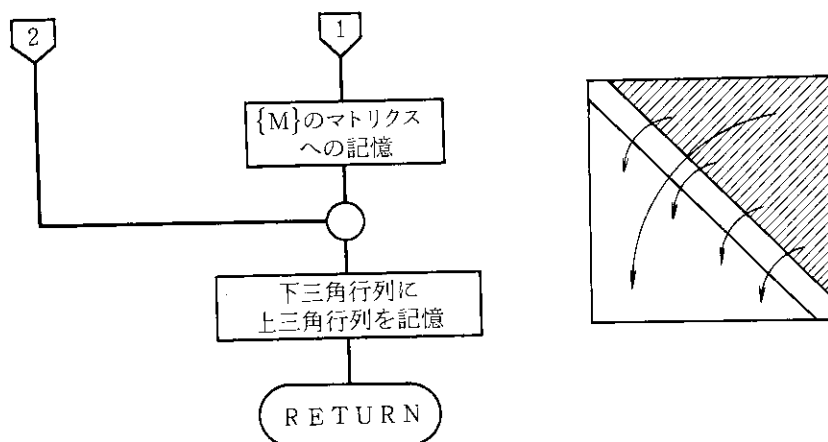
- 3) INDX1 $K'_{ij, km}$ の番地を示す。INDX1 の最大値は $\{(JMAX-1) * NPHI + 1\} * (IMAX+1) * (IMAX+2) / 2$ である。
- 4) IZ1S, IZ2S 16通りの積分の和を求めるときのゾーン番号の制御を行う。通常は、IZ1S = IZ2S = 1である。
- 5) ISKIP1, ISKIP2 ゾーン番号の制御のための DO ループの増分指定パラメータであり、通常は、ISKIP1 = ISKIP2 = 1である。
- 6) NSIGN トーラスの断面の表裏、つまり上側 ($z > 0$) と下側 ($z < 0$) の制御を行う (= 1: 表, = 2: 裏)。
- 7) IST $K'_{ij, km}$ を数値積分によって求める場合の重なり方の状態を表わす。
 場合 0.1 → IST = 1, 場合 0.2 → IST = 2,
 場合 0.4 → IST = 3, 場合 0.3; 場合 0.5 → IST = 4,
 他の状態では、常に IST = 0 である。
- 8) IZ1, IZ2 共に DO ループ変数で、IZ1 は $\bar{\Omega}_{ij}$ のゾーン番号, IZ2 は $\bar{\Omega}_{km}$ のゾーン番号を表わす。

9) FNPPI

$K_{ij;km}$ をサブルーチン 'KSUM' により求めるとき、 $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$; $0 \leq \ell \leq \ell_{\max}$ の計算対象領域のみしか考慮していないため、系全体では表裏などを考慮し $8 \cdot N_\phi$ とする必要がある。

(2) フローチャート





サブルーチン INTGS

ここでは、Gauss-Legendre 数値積分のための初期値設定を行う。

(1) 処理の方法

(1) $r, z, dr/dl, dz/dl$ の初期値設定

1) l_i から l_{i+1} までが円弧のとき

Fig. B1.9(a)に示すように、曲率中心の座標 (α_i, β_i) 、曲率半径 γ_i 、 l 方向第 i メッシュ点の角度 δ_i およびポロイダル断面に沿った長さ l_i を用いて、次のように表わされる。

$$r = \alpha_i + \gamma_i \cos((l - l_i)/\gamma_i + \delta_i), \quad z = \beta_i + \gamma_i \sin((l - l_i)/\gamma_i + \delta_i), \quad (B1.7)$$

$$\frac{dr}{dl} = -\sin((l - l_i)/\gamma_i + \delta_i), \quad \frac{dz}{dl} = \cos((l - l_i)/\gamma_i + \delta_i). \quad (B1.8)$$

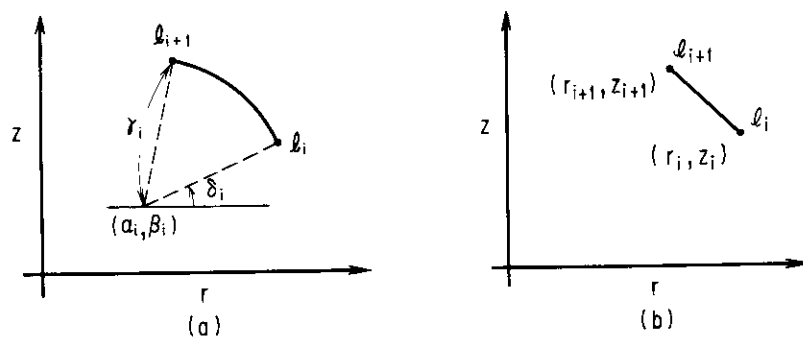


Fig. B1.9 Poloidal cross-section of the i -th finite element for obtaining the local coordinates and weights for Gauss-Legendre quadrature: (a) the finite elements given by a circular arc; (b) a straight line.

2) l_i から l_{i+1} までが直線のとき

Fig. B1.9(b)に示すように、 l 方向メッシュ点の座標と直線のメッシュ間隔 $\Delta l_i = l_{i+1} - l_i = \sqrt{(r_i - r_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2}$ を用いて、次のように表わされる。

$$r = r_i + (r_{i+1} - r_i) \frac{l - l_i}{\Delta l_i}, \quad z = z_i + (z_{i+1} - z_i) \frac{l - l_i}{\Delta l_i}, \quad (B1.9)$$

$$\frac{dr}{dl} = \frac{r_{i+1} - r_i}{\Delta l_i}, \quad \frac{dz}{dl} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta l_i}. \quad (B1.10)$$

(2) $W_\phi(\phi, \ell)$, $W_\ell(\phi, \ell)$ の初期値設定

Fig. B1.10 に、或る有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ とそのゾーンを示す。いま、 $\Delta\phi = \pi/(N_\phi \cdot N)$, $\Delta\ell = \ell_{i-1} - \ell_i$ とし、①, ②, ③, ④をゾーン番号とする。このとき、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ の電流関数 $V(\phi, \ell)$ は、そのゾーン毎に

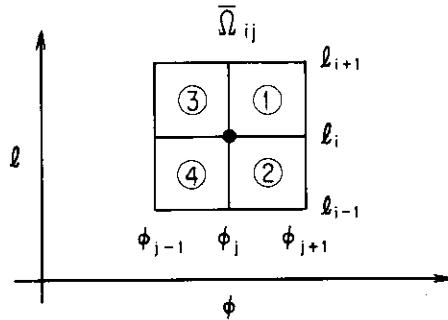


Fig. B1.10 Finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$ and the zones ①, ②, ③, ④.

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{1}{\Delta\phi\Delta\ell_i} (\ell_{i+1} - \ell) (\phi_{j+1} - \phi) && \text{(ゾーン①において),} \\ V &= -\frac{1}{\Delta\phi\Delta\ell_{i-1}} (\ell - \ell_{i-1}) (\phi_{j-1} - \phi) && \text{(ゾーン②において),} \\ V &= \frac{1}{\Delta\phi\Delta\ell_i} (\ell_{i-1} - \ell) (\phi - \phi_{j-1}) && \text{(ゾーン③において),} \\ V &= \frac{1}{\Delta\phi\Delta\ell_{i-1}} (\ell - \ell_{i-1}) (\phi - \phi_{j-1}) && \text{(ゾーン④において),} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B1.11})$$

である。

$$W_\ell = \frac{\partial V}{\partial \ell} \Delta\ell_i, \quad W_\phi = \frac{\partial V}{\partial \phi} \Delta\phi, \quad (\text{B1.12})$$

と置き、更に $x = \frac{\ell - \ell_i}{\Delta\ell_i}$, $y = \frac{\phi - \phi_j}{\Delta\phi}$ などと置くと、それぞれのゾーンにおいて、

$$W_\phi = \begin{cases} x-1 & \text{(①において),} \\ -x & \text{(②において),} \\ 1-x & \text{(③において),} \\ x & \text{(④において),} \end{cases} \quad W_\ell = \begin{cases} y-1 & \text{(①において),} \\ 1-y & \text{(②において),} \\ -y & \text{(③において),} \\ y & \text{(④において),} \end{cases} \quad (\text{B1.13})$$

となる。

また、ここで Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の零点を z_0 ($-1 \leq z_0 \leq 1$) とすると、 ℓ と z_0 , ϕ と z_0 の変換は以下のようなになる。

$$\ell = \frac{(\ell_{i+1} - \ell_i)z_0 + \ell_{i+1} + \ell_i}{2}, \quad \phi = \frac{(\phi_{j+1} - \phi_j)z_0 + \phi_{j+1} + \phi_j}{2}. \quad (\text{B1.14})$$

したがって、この零点と x , y の関係は

$$x = \frac{1}{2}(z_0 + 1), \quad y = \frac{1}{2}(z_0 + 1), \quad (\text{B1.15})$$

となり、 W_ϕ , W_ℓ は表面上、 ϕ , ℓ に依らず、有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ の選び方に依存しないことになる。

(3) $\cos\phi$, $\sin\phi$ の初期値設定

これらはインダクタンス K の積分において、 $\cos(\phi_1 - \phi_2)$ などの形で使用し、EDTDEC プログラムにおいてのみ $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$ の範囲の値となる。

〔2〕 記号の説明

以下の2次元配列の10は Gauss-Legendre 積分の積分点に対応し、40は l 方向のメッシュ数に対応する。ただし、 l 方向のメッシュ数の最大値は35であり、メッシュ番号 i とインデックスの関係は、 $i+1$ =インデックス ($0 \leq i \leq \text{IMAX}$ で $i=0$ は $l=0$; $i=\text{IMAX}$ は $l=l_{\text{max}}$)である。COSPHI, SINPHIの400については、 ϕ 方向の積分領域を $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$ とし、 $\text{JMAX} \leq 20$, $\text{NPHI} \leq 21$ の制限により400個としてある。 $\text{NMAX} = (\text{JMAX}-1) * \text{NPHI} + 1$ とすると $\phi_{\text{NMAX}} = \pi$ である。

- | | |
|--|--|
| 1) RGS(10, 40),
ZGS(10, 40) | Legendre 多項式の零点数と l 方向のメッシュ数に対応した各々 r 座標, z 座標 |
| 2) DRLGS(10, 40),
DZLGS(10, 40) | Legendre 多項式の零点数と l 方向のメッシュ数に対応した各々 dr/dl , dz/dl |
| 3) WPHI(10, 4),
WL(10, 4) | Legendre 多項式の零点数とゾーン番号に対応する各々 W_ϕ , W_l |
| 4) DL(40) | l 方向のメッシュに対応する $\Delta l_i (= l_{i+1} - l_i)$ |
| 5) COSPHI(10, 400),
SINPHI(10, 400) | Legendre 多項式の零点数と ϕ 方向の π までのメッシュ数に対応する各々 $\cos\phi$, $\sin\phi$ |

サブルーチン JOULEH

ここでは、ジュール損失 η のマトリクス $\{R\}$ の計算を行う。処理の方法については、2.2節を参照願いたい。

〔1〕 処理機能

(1) ゾーン番号の制御

有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ のゾーン番号をあらかじめDATA文で持っておき、 l 方向の全てのメッシュ点においてジュール損失 η を算出する。このためのゾーン番号の領域をIZONE(2,10)とするが、この値をTable B1.1に示す。

(2) 記憶領域ETAの説明

2.2節で述べたベローズ・厚肉の境界条件に関する場合分けにしたがい、場合B.1、B.2では場合B.3.1のループを1回、場合B.3ではその場合分け通りに場合B.3.1～場合B.3.4に相当するループを合計4回行うことにより、 $\eta_{ij,km}$ を決める全ての量が求まる。全ての $\eta_{ij,km}$ を求めるための生成元となる値の記憶領域は、ETA(4,10,50)であって、ETA(I,J,K)とすると

I: 最大のループ回数である場合B.3の4通り

J: 有限要素の重なりに関する場合分け場合O.1～場合O.4の合計10通り

K: l 方向のメッシュ数の最大値

である。これらの各分類を更に詳しく説明すると、以下のようになる。

1) Iについて

• 場合B.1と場合B.2では $I=1$ のみ

• 場合B.3では $I=1, 2, 3, 4$ で、その対応は

$I=1$: 場合B.3.1, $I=2$: 場合B.3.2, $I=3$: 場合B.3.3, $I=4$: 場合B.3.4

である。

2) Jについては、Table B1.1のJに対応する。

3) Kについては、 l 方向のメッシュ番号(0～IMAX)に対応する。

Table B1.1 Zone number: I=1 and I=2 denote the respective zone numbers of finite element circuits $\bar{\Omega}_{ij}$ and $\bar{\Omega}_{km}$

IZONE(I, J)	I		
	1	2	
IZNOE(I, 2)	1	1	} <u>Case O.1</u>
IZONE(I, 2)	2	2	
IZONE(I, 3)	3	3	
IZONE(I, 4)	4	4	
IZONE(I, 5)	1	3	} <u>Case O.2</u>
IZONE(I, 6)	2	4	
IZONE(I, 7)	3	2	} <u>Case O.3</u>
IZONE(I, 8)	1	2	} <u>Case O.4</u>
IZONE(I, 9)	3	4	
IZONE(I, 10)	1	4	} <u>Case O.5</u>

(3) ベローズ部分と厚肉部の境界条件の制御

1) ベローズ部分と厚肉部の境界数は、入力データ NNSS にて制御する。ただし、NNSS=0 のときは、

$$\begin{cases} \text{IBS}(1) = 0 \text{ で全て厚肉部,} \\ \text{IBS}(1) = 1 \text{ で全てベローズ部,} \end{cases}$$

とする。

2) ベローズ部分と厚肉部の境界のメッシュ番号 (1~JMAX) は、IBS(20)にて制御する。ただし、NNSS=0 のときは(3)の1) のように用いられる。

3) ϕ 方向のメッシュ番号の小さい順から

$$\begin{cases} \text{IBLL} = 0 : \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \cdots \text{の順} \\ \text{IBLL} = 1 : \text{ベローズ} \cdot \text{厚肉} \cdot \text{ベローズ} \cdots \text{の順} \end{cases}$$

のように入力データ IBLL にて制御する。

(4) ベローズ部分と厚肉部についての識別

記号 IST で表わし、IST=0 ならば厚肉部、IST=1 ならばベローズ部を表わしており、以下のようになる。

1) B.1 の場合は IST=1 で固定

2) B.2 の場合は IST=0 で固定

3) B.3 の場合で

• B.3.1 の場合、IST=1

• B.3.2 の場合、IST=0

• B.3.3 の場合は、Table B1.1 の J に対応して制御パラメータ ISTAT が 0, 1 の値を DATA 文により持つ。

ISTAT(10)および Table B1.1 の IZONE と J の関係は以下のようになる。

	J									
IZONE(I, J)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ISTAT(J)	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0

・ B.3.4 の場合, ISTAT は B.3.3 の場合と正に正反対の DATA を持つ。

(5) 有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ に対する $\eta_{ij,km}$ の存在判別およびゾーンの組合わせの判別

計算対象領域の扇形を四角形とし, Fig. B1.11 のように表わす。まず, この領域内での等しい $\eta_{ij,km}$ の見つけ方を述べる。

1) 等しい $\eta_{ij,km}$ の制御

Fig. B1.11 に示すように, ϕ 方向メッシュに関して, ベローズ, 厚肉, またはこれらの境界を識別するパラメータ JMN を次のように定義する。その後, JMN が変化したときに $\eta_{ij,km}$ の基礎となる値 ETA5~ETA9 を決定する。

i) Fig. B1.11 のように厚肉部とベローズ部が存在したとき

- ① $j = 1$ のとき JMN = 1
- ② $\begin{cases} 1 < j < \text{IBS}(1) \\ \text{IBS}(2n) < j < \text{IBS}(2n+1) \end{cases}$ のとき JMN = 2
- ③ $j = \text{IBS}(2n+1)$ のとき JMN = 3
- ④ $\text{IBS}(2n+1) < j < \text{IBS}(2n+2)$ のとき JMN = 4
- ⑤ $j = \text{JMAX}$ のとき JMN = 5
- ⑥ $j = \text{JMAX}(2n)$ のとき JMN = 6

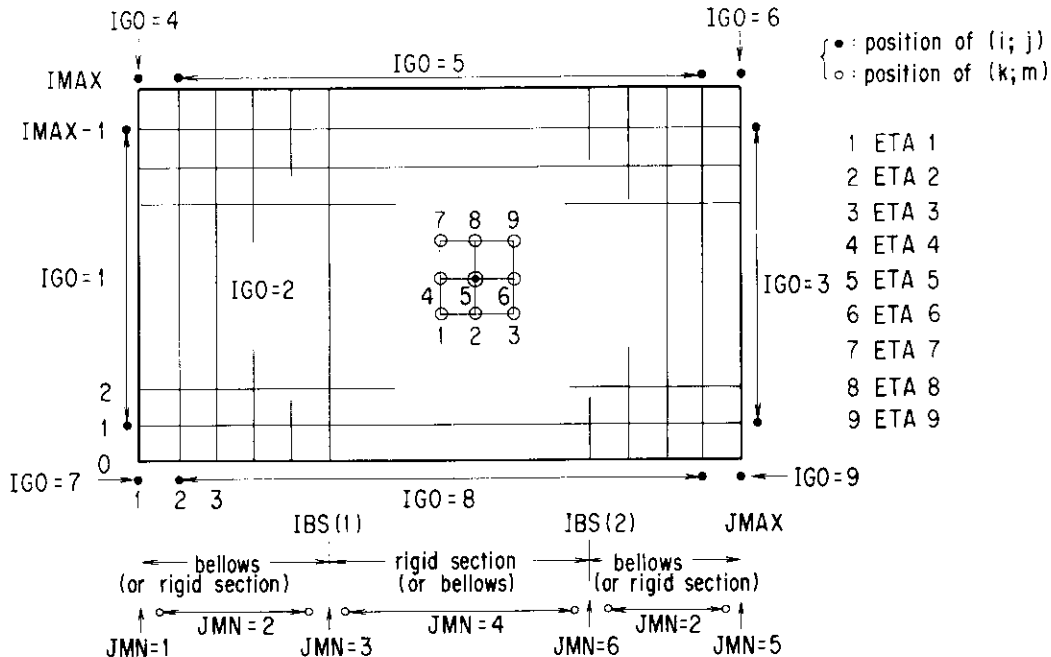


Fig. B1.11 Mesh chart of the torus composed of bellows and rigid section for Joule heat η . The JMN is the parameter for distinguishing between the boundary conditions of bellows and rigid section. The IGO is the parameter for distinguishing between the positions of the finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$: if $\bar{\Omega}_{ij}$ is the boundary element, then IGO=1, 3, 4, 5, 6, 7 or 9; if $\bar{\Omega}_{ij}$ is the inner element, then IGO=2.

ii) 厚肉部のみ或いはベローズ部のみの場合のとき

- ① $j=1$ のとき $JMN=1$
 ② $1 < j < JMAX-1$ のとき $JMN=2$
 ③ $j=JMAX$ のとき $JMN=5$

2) 有限要素回路 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ に対する $\eta_{ij;km}$ の存在判別およびゾーンの組合わせの判別

次のパラメータ IGO を決定し、これによる処理を行う。IGO はメッシュ点の場所のみに依存し IBS(N) とは無関係であり、以下の 9 通りの場合がある。

- ① $j=1$ で $1 \leq i < IMAX$ のとき $IGO=1$
 ② $1 < j < JMAX$ で $1 \leq i < IMAX$ のとき $IGO=2$
 ③ $j=JMAX$ で $1 \leq i < IMAX$ のとき $IGO=3$
 ④ $j=1$ で $1 \leq i < IMAX$ のとき $IGO=4$
 ⑤ $1 < j < JMAX$ で $i=IMAX$ のとき $IGO=5$
 ⑥ $j=JMAX$ で $i=IMAX$ のとき $IGO=6$
 ⑦ $j=1$ で $i=0$ のとき $IGO=7$
 ⑧ $1 < j < JMAX$ で $i=0$ のとき $IGO=8$
 ⑨ $j=JMAX$ で $i=0$ のとき $IGO=9$

今後、重なりに関する分類、場合 0.1、場合 0.2、場合 0.3、場合 0.4、場合 0.5 の各場合の $\eta_{ij;km}$ を、それぞれ SETA5, SETA6, SETA7, SETA8, SETA9 と置く。これと IGO との関係は以下の通りであるが、記憶領域 ETA(I, J, K) の 4 つの I の値に相当するパラメータ IL1 を以下のように定義しておく。

i) $JMN < 3$ のとき $IL1=1$

ベローズ部に相当 (厚肉部またはベローズ部の場合にも用いられる)

ii) $JMN=3$ のとき $IL1=2$

ベローズ部・厚肉部の境界

iii) $JMN=4, 5$ のとき $IL1=3$

厚肉部に相当

iv) $JMN=6$ のとき $IL1=4$

厚肉部・ベローズ部の境界

① IGO=1 のとき

$$SETA 5 = \textcircled{1-1'} + \textcircled{2-2'}$$

$$SETA 6 = \textcircled{1-3'} + \textcircled{2-4'}$$

$$SETA 7 = \text{存在しない (0.0)}。$$

$$SETA 8 = \textcircled{1-2'}$$

$$SETA 9 = \textcircled{1-4'}$$

③ IGO=3 のとき

$$SETA 5 = \textcircled{3-3'} + \textcircled{4-4'}$$

$$SETA 6 = \text{存在しない (0.0)}。$$

$$SETA 7 = \textcircled{3-2'}$$

$$SETA 8 = \textcircled{3-4'}$$

$$SETA 9 = \text{存在しない (0.0)}。$$

② IGO=2 のとき

$$SETA 5 = \textcircled{1-1'} + \textcircled{2-2'} + \textcircled{3-3'} + \textcircled{4-4'}$$

$$SETA 6 = \textcircled{1-3'} - \textcircled{2-4'}$$

$$SETA 7 = \textcircled{3-2'}$$

$$SETA 8 = \textcircled{1-2'} + \textcircled{3-4'}$$

$$SETA 9 = \textcircled{1-4'}$$

④ IGO=4 のとき

$$SETA 5 = \textcircled{2-2'}$$

$$SETA 6 = \textcircled{2-4'}$$

$$SETA 7 = \left. \begin{array}{l} \text{存在しない (0.0)} \\ \text{存在しない (0.0)} \\ \text{存在しない (0.0)} \end{array} \right\}$$

$$SETA 9 =$$

⑤ IGO = 5 のとき

$$\begin{aligned} \text{SETA } 5 &= (2-2') + (4-4') \\ \text{SETA } 6 &= (2-4') \\ \text{SETA } 7 &= \\ \text{SETA } 8 &= \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{存在しない (0.0)}. \\ \text{SETA } 9 &= \end{aligned}$$

⑥ IGO = 6 のとき

$$\begin{aligned} \text{SETA } 5 &= (4-4') \\ \text{SETA } 6 &= \\ \text{SETA } 7 &= \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{存在しない (0.0)}. \\ \text{SETA } 8 &= \\ \text{SETA } 9 &= \end{aligned}$$

⑦ IGO = 7 のとき

$$\begin{aligned} \text{SETA } 5 &= (1-1') \\ \text{SETA } 6 &= (1-3') \\ \text{SETA } 7 &= \text{存在しない (0.0)}. \\ \text{SETA } 8 &= (1-2') \\ \text{SETA } 9 &= (1-4') \end{aligned}$$

⑧ IGO = 8 のとき

$$\begin{aligned} \text{SETA } 5 &= (1-1') + (3-3') \\ \text{SETA } 6 &= (1-3') \\ \text{SETA } 7 &= (3-2') \\ \text{SETA } 8 &= (1-2') + (3-4') \\ \text{SETA } 9 &= (1-4') \end{aligned}$$

⑨ IGO = 9 のとき

$$\begin{aligned} \text{SETA } 5 &= (3-3') \\ \text{SETA } 6 &= \text{存在しない (0.0)}. \\ \text{SETA } 7 &= (3-2') \\ \text{SETA } 8 &= (3-4') \\ \text{SETA } 9 &= \text{存在しない (0.0)}. \end{aligned}$$

[2] $\eta_{ij;km}$ とマトリクス $\{R\}$ の要素番地 $(i; j)$, $(k; m)$ の関係

$\eta_{ij;km}$ もインダクタンス $\{M\}$ の $K_{ij;km}$ と同様に、上三角マトリクスの要素のみを求め、その後下三角マトリクスの対称部分に再記憶する。 $\eta_{ij;km}$ のマトリクス $\{R\}$ の構成を Fig. B1.12 に示す。

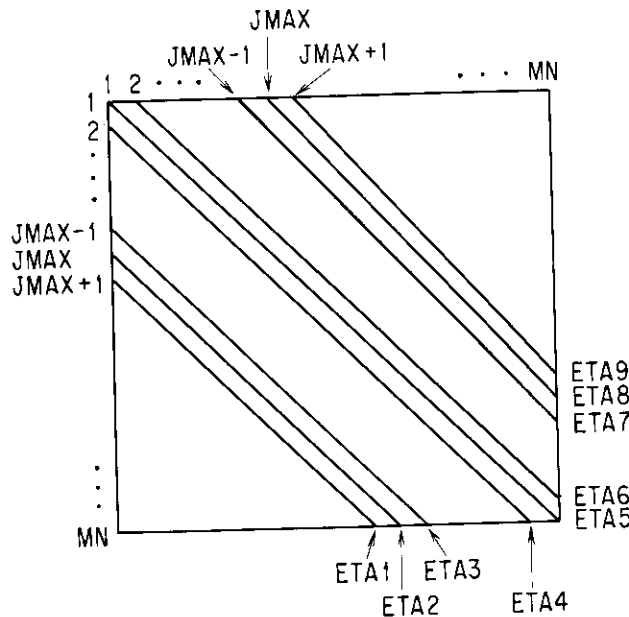
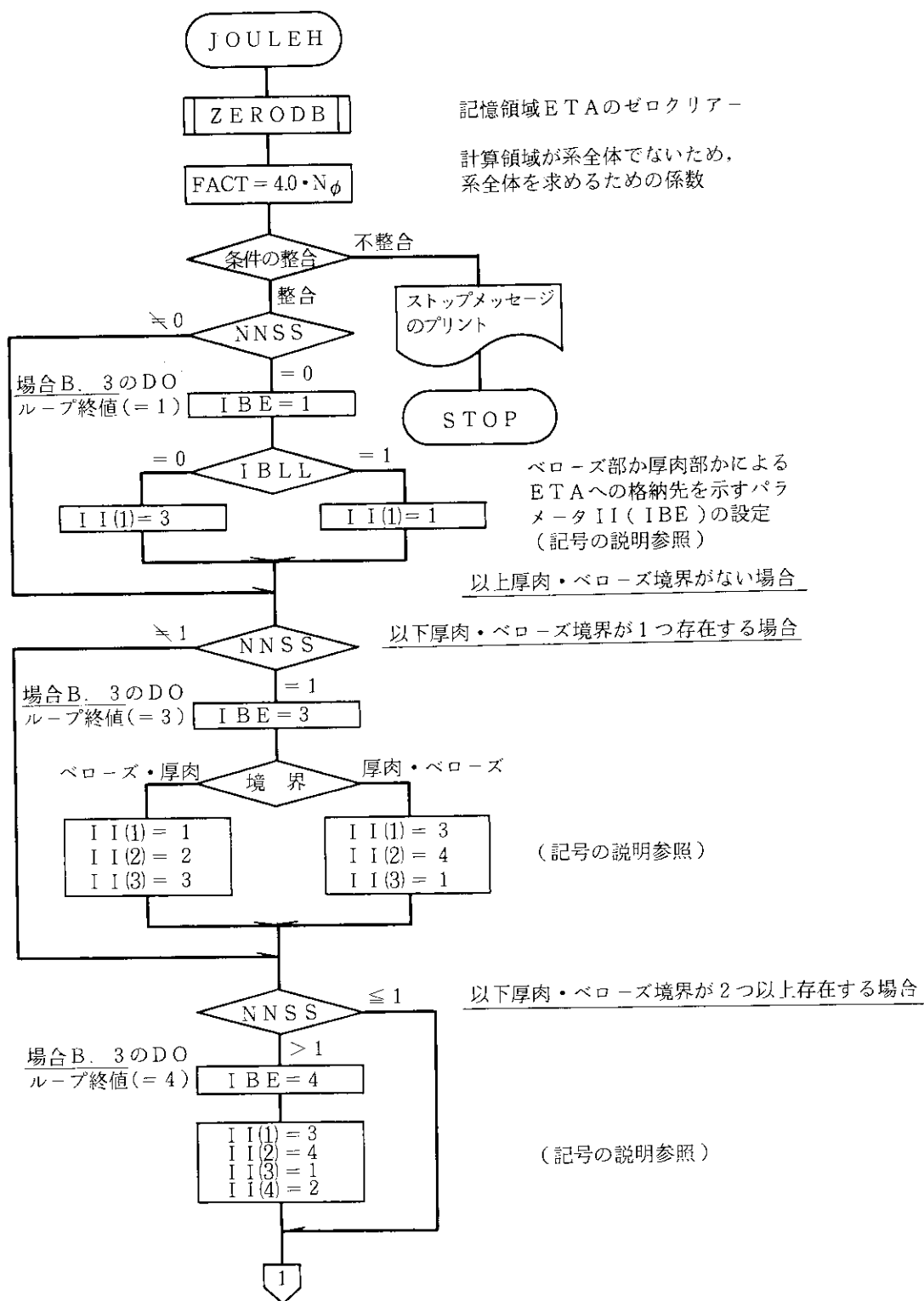


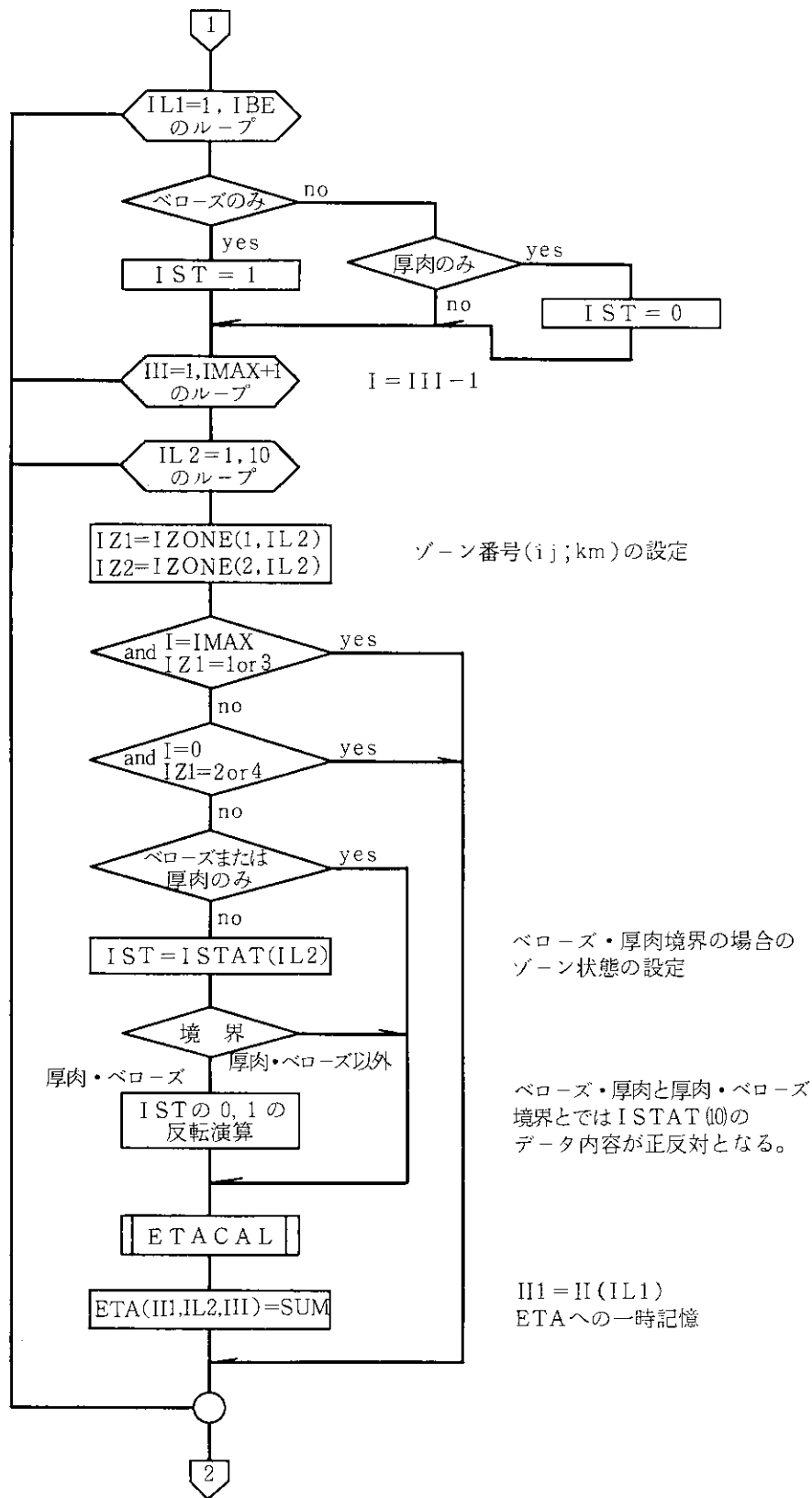
Fig. B1.12 Structure of the resistance matrix $\{R\}$ of Joule heat η ; $\{R\} \in R^{MN \times MN}$ is the positive real and symmetry. As shown in this figure, the banded matrix elements with 9 oblique lines have finite value and all the others are zero. ETA1~ETA9 are Joule heats η of Fig. B1.11.

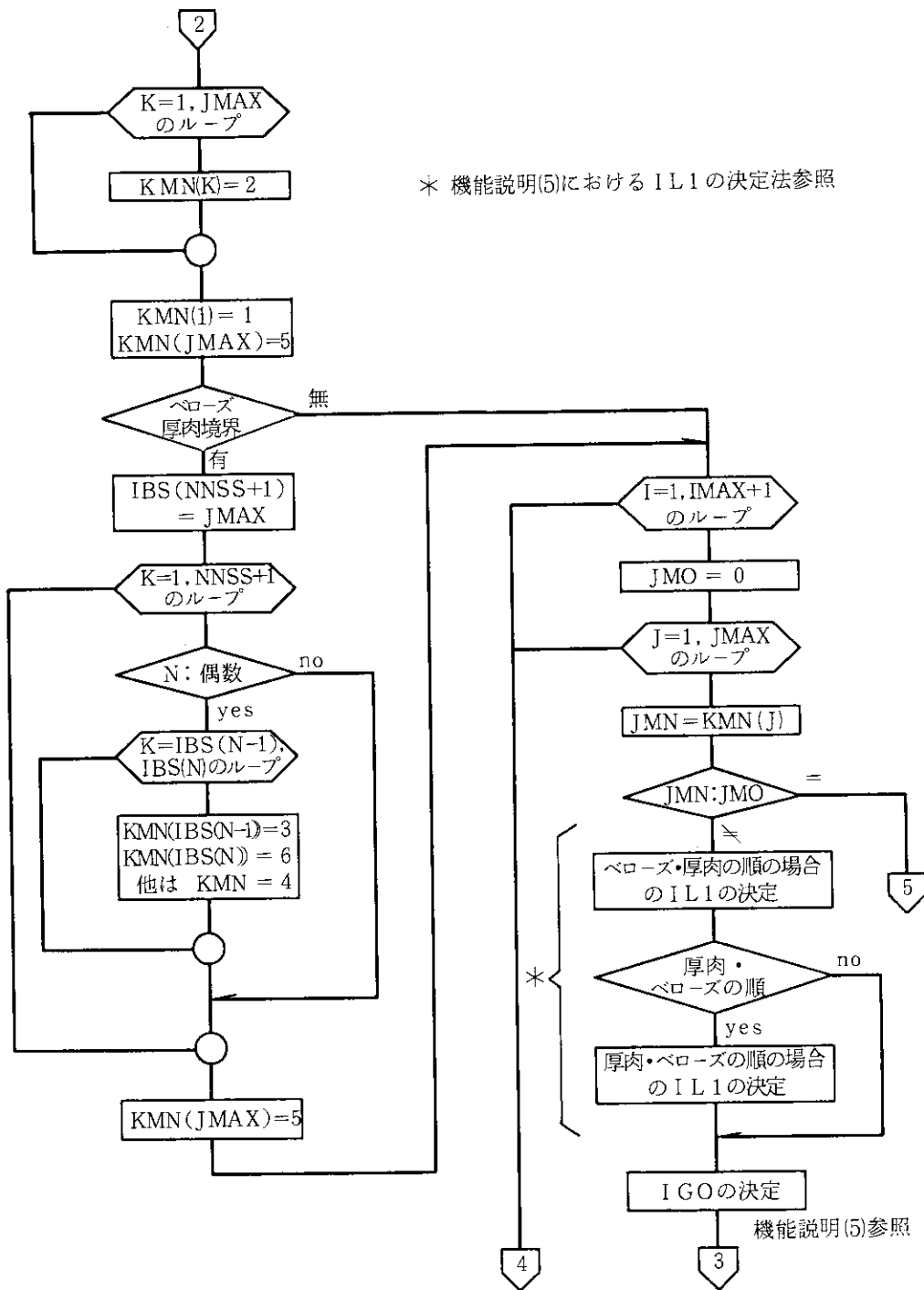
〔3〕 記号の説明

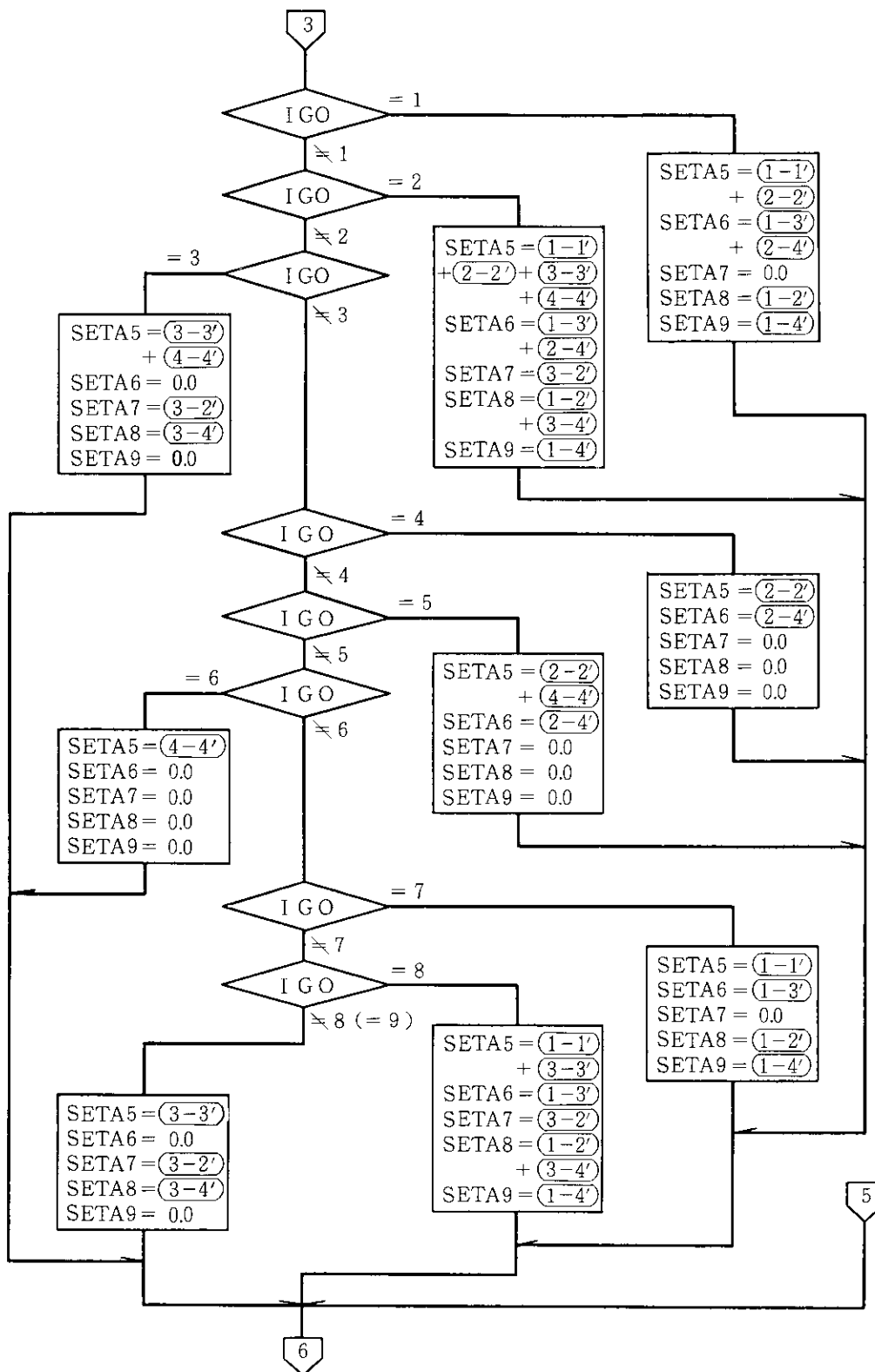
- 1) IZONE(I, J) ゾーン番号
 I = 1: $\bar{\Omega}_{ij}$ 側でのゾーン番号
 I = 2: $\bar{\Omega}_{km}$ 側でのゾーン番号
 J : 10通りの組合せ
- 2) ISTAT(ISTと同じ) 左側がベローズの場合に相当する10通りの組合せの厚肉・ベローズ境界での状態を示す。
 { = 0: 厚肉部
 { = 1: ベローズ部
- 3) II(4) ETA(4, 10, 50)の格納先を示すパラメータ。境界条件に関する場合分け場合 B.3の4通りに対応し、それぞれ、1: ベローズ部, 2: ベローズ・厚肉境界, 3: 厚肉部, 4: 厚肉・ベローズ境界である。
- 4) IBE 場合 B.3 の分類場合 B.3.1 ~ 場合 B.3.4 に対応した数の DO ループの終値
- 5) FACT 計算領域が系全体でないため、系全体を求めるための係数 (= $4.0 \cdot N_\phi$)
- 6) ETA(4, 10, 50) $\eta_{ij,km}$ を求める基礎となる生成元のための作業領域 (〔1〕 処理機能の説明参照)
- 7) JMN, JMO JMN は〔1〕, (5)参照のこと。JMO は1つ前の ϕ 方向メッシュ番号の JMN の値であり、JMN \neq JMO のとき ETA5, ETA6, ..., ETA9 を新たに決定する必要がある。JMN = JMO のとき既成の ETA5, ETA6, ..., ETA9 を使用する。
- 8) IGO 〔1〕, (5)を参照のこと。
- 9) IZ1, IZ2 IZ 1: $\bar{\Omega}_{ij}$ のゾーン番号, IZ 2: $\bar{\Omega}_{km}$ のゾーン番号
- 10) IBLL { = 0: 厚肉・ベローズ・厚肉...の順
 { = 1: ベローズ・厚肉・ベローズ...の順
- 11) NNSS ベローズ・厚肉境界の数であり、NNSS = 0 のときは
 { IBS(1) = 0 で全て厚肉部
 { IBS(1) = 1 で全てベローズ
 である。
- 12) IBS(10) ベローズ厚肉境界の ϕ 方向メッシュ番号 (1 ~ JMAX)。ただし、NNSS = 0 のとき上記のように用いられる。

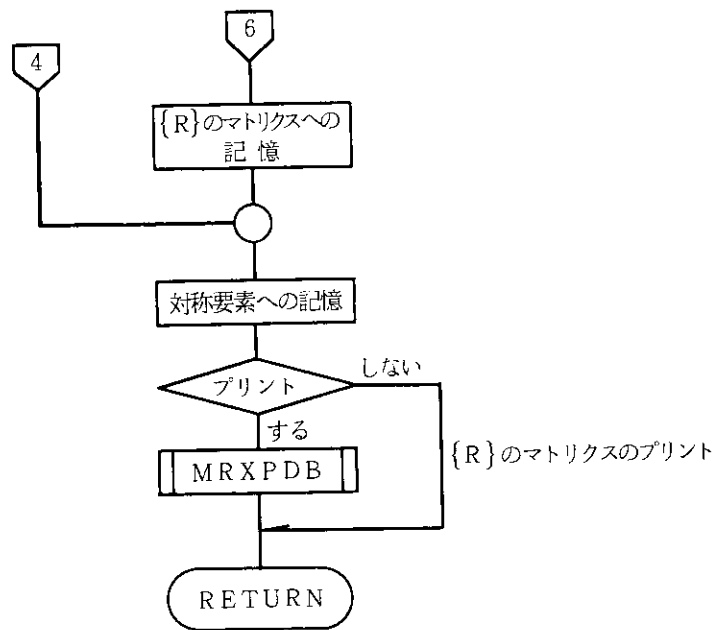
〔4〕 フローチャート











サブルーチン KCALC

ここでは、インダクタンス K を数値積分により求める。計算手法については、2.2節を参照願いたい。

[1] 記号の説明 (添え字はそれぞれ 1: dS_1 , 2: dS_2 のように対応する。)

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1) $R1, R2, R12$ | r_1, r_2, r_{12} |
| 2) $Z1, Z2$ | z_1, z_2 |
| 3) $RL1, RL2$ | $(dr/d\ell)_1, (dr/d\ell)_2$ |
| 4) $ZL1, ZL2$ | $(dz/d\ell)_1, (dz/d\ell)_2$ |
| 5) $VPH1, VPH2$ | それぞれ, $(\partial V/\partial\phi)_1, (\partial V/\partial\phi)_2$ |
| 6) $VL1, VL2$ | それぞれ, $(\partial V/\partial\ell)_1, (\partial V/\partial\ell)_2$ |
| 7) $COSP1\ 2, SINP1\ 2, SINP1\ 2$ | $\cos(\phi_1 - \phi_2), \sin(\phi_1 - \phi_2), \sin(\phi_2 - \phi_1)$ |
| 8) $COSP1, COSP2, SINP1, SINP2$ | $\begin{cases} \cos(\phi_1 - \phi_2) = \cos\phi_1\cos\phi_2 + \sin\phi_1\sin\phi_2 \\ \text{COSP12} = \text{COSP1} \cdot \text{COSP2} + \text{SINP1} \cdot \text{SINP2} \\ \sin(\phi_1 - \phi_2) = \sin\phi_1\cos\phi_2 - \cos\phi_1\sin\phi_2, \\ \text{SINP12} = \text{SINP1} \cdot \text{COSP2} - \text{COSP1} \cdot \text{SINP2} = -\text{SINP21} \end{cases}$ |
| | のための作業領域 |
| 9) $IS1, IS2$ | 各々 $IZ1, IZ2$ のゾーンを表わす。 |
| 10) $NSIGN$ | トーラスの表と裏の識別パラメータ (= 1: 表, = 2: 裏) |
| 11) $DPHI$ | $\Delta\phi$ |
| 12) I, K, M | i, k, m |
| 13) $IPARTY$ | = 0: odd パリティ, = 1: even パリティ |

〔2〕 制御パラメータ I1, J1, M1, K1, DL1, DL2の説明

どのゾーンの積分かにより, $\Delta l_i (= l_{i+1} - l_i)$, $\Delta l_k (= l_{k+1} - l_k)$ が異なる。このため, l , ϕ の積分範囲が異なる。

(1) IZ1について

$$\begin{aligned} \text{IZ1} \begin{cases} = 1 \text{ or } 3 \text{ のとき} : l_i \leq l^1 \leq l_{i+1}, & \text{DL1} = l_{i+1} - l_i = \Delta l_i \\ = 2 \text{ or } 4 \text{ のとき} : l_{i-1} \leq l^1 \leq l_i, & \text{DL1} = l_i - l_{i-1} = \Delta l_{i-1}. \end{cases} \\ \text{IZ1} \begin{cases} = 1 \text{ or } 2 \text{ のとき} : \phi_j \leq \phi^1 \leq \phi_{j+1}, & \text{DL1} = \phi_{j+1} - \phi_j = \Delta \phi \\ = 3 \text{ or } 4 \text{ のとき} : \phi_{j-1} \leq \phi^1 \leq \phi_j, & \text{DL1} = \phi_j - \phi_{j-1} = \Delta \phi. \end{cases} \end{aligned}$$

(2) IZ2について

(1)の場合を $i \rightarrow k$, $j \rightarrow m$ とすれば全く同様であり, $\text{DL1} \rightarrow \text{DL2}$, $l^1 \rightarrow l^2$, $\phi^1 \rightarrow \phi^2$ である。ここで, ゾーン番号の増分パラメータを

$$\text{IKPLAS} \quad / 1, 0, 1, 0 /,$$

$$\text{JMPLAS} \quad / 1, 1, 0, 0 /,$$

とすれば, 各々ゾーン番号は,

$$\text{I1} = \text{I} + \text{IKPLAS}(\text{IS1}),$$

$$\text{J1} = \text{J} + \text{JMPLAS}(\text{IS1}),$$

$$\text{K1} = \text{K} + \text{IKPLAS}(\text{IS2}),$$

$$\text{M1} = \text{M} + \text{JMPLAS}(\text{IS2}),$$

となり, 積分範囲がゾーンパラメータ IS1, IS2によって各々の配列から取り出すことができる。

サブルーチン KOVLAP

ここでは, 積分領域が重なる場合のインダクタンス K を, 2.2節 (2.63)式により解析的に求める。ゾーンの重なり方①-④, ①-③, ①-②, ①-④をそれぞれ D1D1, D1D3, D1D2, D1D4 と名付ける。このとき,

$$\text{(D1D1)} \quad \text{IST} = 1 \quad \text{SUM} = (S_{x_2} + S_{y_2}) / (\Delta \phi r_i \Delta l_i)^2,$$

$$\text{(D1D3)} \quad \text{IST} = 2 \quad \text{SUM} = (-S_{x_2} - S_{y_2} + \Delta \phi r_i S_y) / (\Delta \phi r_i \Delta l_i)^2,$$

$$\text{(D1D2)} \quad \text{IST} = 3 \quad \text{SUM} = (-S_{x_2} - S_{y_2} + \Delta l_i S_x) / (\Delta \phi r_i \Delta l_i)^2,$$

$$\text{(D1D4)} \quad \text{IST} = 4 \quad \text{SUM} = (-S_{x_2} - S_{y_2} - \Delta l_i S_x - \Delta \phi r_i S_y) / (\Delta \phi r_i \Delta l_i)^2,$$

で, $\text{SUM} = \text{SUM} * \mu_0 / 4\pi$ となる。

〔1〕 主な記号および文関数の説明

文関数

1) HSIN(X, Y)	$\sinh^{-1} y/x$
2) S0(A, B)	$S_0(a, b)$
3) SX(A, B)	$S_x(a, b)$
4) SY(A, B)	$S_y(a, b)$
5) SX2(A, B)	$S_{x_2}(a, b)$
6) SY2(A, B)	$S_{y_2}(a, b)$

記号

- 1) IST どの重なりの場合かを示すもので, 1, 2, 3, 4により, 各々 D1D1, D1D3, D1D2, D1D4の場合の計算をする。

- 2) RCDP r_c を $(l_i + \Delta l_i) / 2$ における r 座標の値としたときの $r_c \Delta \phi$
- 3) DL $\Delta l_i (= l_{i+1} - l_i)$

サブルーチン KSUM

ここでは、1次独立なインダクタンス $K'_{ij; km}$ を生成元にして系全体の和 $K_{ij; km}$ を求める。和の取り方を Fig. B 1.13 に示すが、これは 2.2 節の Fig. 2.14 および Fig. 2.15 に示す処理をそれぞれ Fig. B1.13(a), (b) として再び図示したものである。有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ に関する [CHAIN] の或る [BLOCK] に着目した和の取り方を示している。共に $K'_{ij; km}$ の生成元 $K'_{ij; km}$ は $j=1$ のように $\bar{\Omega}_{ij}$ の ϕ 方向位置を固定して求めてあるため、2.2 節で説明したように、 $\bar{\Omega}_{ij}$ と $\bar{\Omega}_{km}$ の相対位置を考慮しながら系全体の和を求めることになる。更に詳しい求め方については、2.2 節を参照のこと。

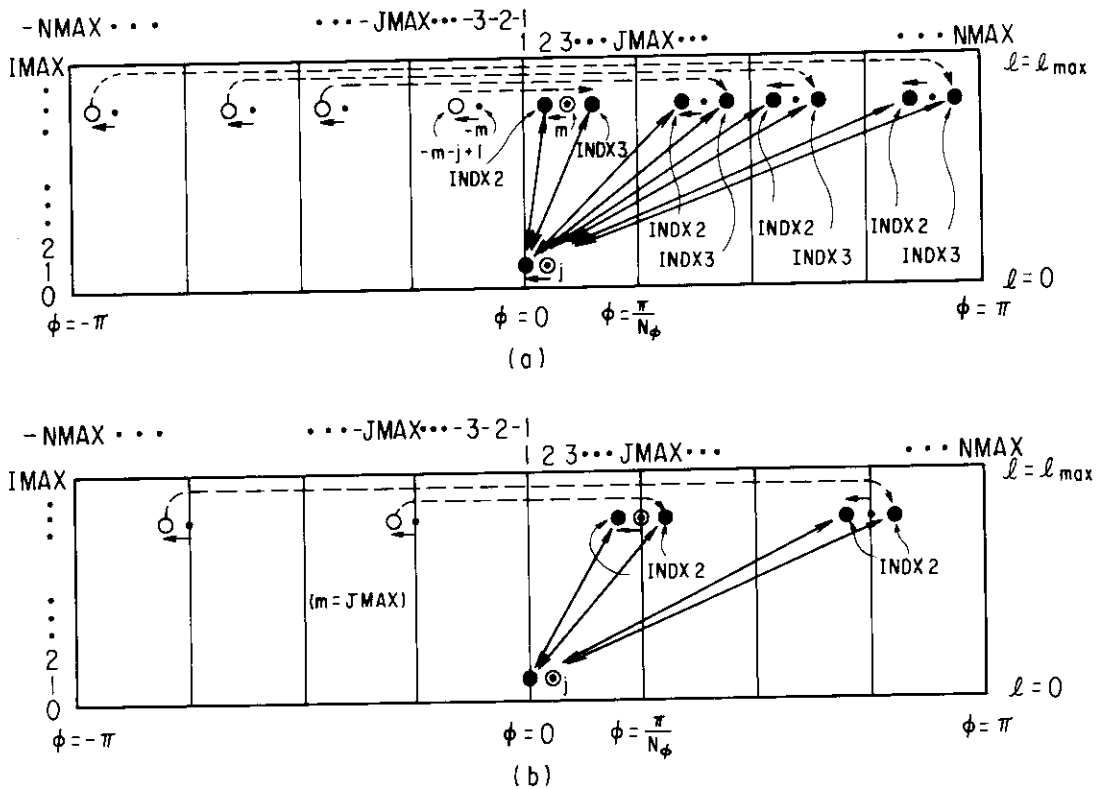
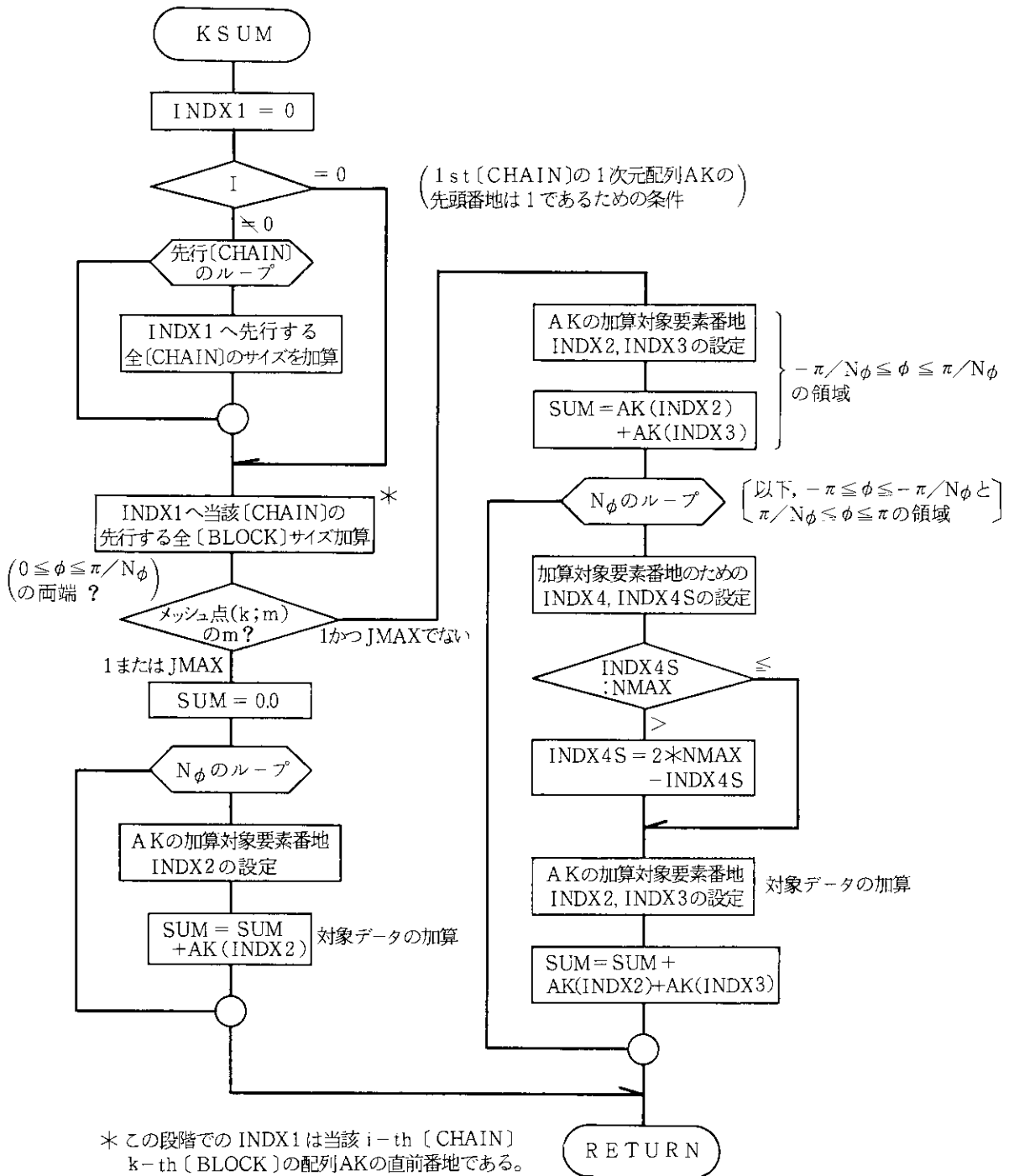


Fig. B1.13 Mesh chart for obtaining a total inductance $K_{ij; km}$. \odot denotes the finite element circuit $\bar{\Omega}_{ij}$ or $\bar{\Omega}_{km}$. Subfigure (a) shows the summation operation when $\bar{\Omega}_{km}$ lies on the general position as $\phi \neq n\pi/N_\phi$ and (b) the summation operation when $\bar{\Omega}_{km}$ lies on the boundary position as $\phi = n\pi/N_\phi$. \bullet represents the position of the pairing finite element circuits $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ of the independent inductance $K'_{ij; km}$. The broken line with an arrow head indicates a shifting of $\bar{\Omega}_{km}$ to the position corresponding to the independent inductance $K'_{ij; km}$. Each of the solid line with arrows shows $K'_{ij; km}$. Parameter INDX2 or INDX3 is the ϕ -directional address of $\bar{\Omega}_{km}$ for $K'_{ij; km}$. The summation operation must be carried out over an entire torus.



メイン・ルーチン MAIN01

ここでは、単にマトリクス{M}と{R}のための記憶領域の宣言をし、サブルーチン'ETMAIN'を呼び出すものである。

[1] ソースプログラム

```
DIMENSION AREA(60000), AREAB(60000)
ISIZEA = 60000
```

```

ISIZEB = 60000
CALL ETMAIN(AREAA, ISIZEA, AREAB, ISIZEB)
STOP
END

```

〔2〕 記号の説明

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1) AREAA | {M}のマトリクスおよび固有ベクトルのための配列 |
| 2) AREAB | {R}のマトリクスのための配列 |
| 3) ISIZEA, ISIZEB | 各々, AREAA, AREAB の配列の大きさを表わす。 |

〔3〕 その他

これらの配列 AREAA, AREAB は, l 方向, ϕ 方向のメッシュの取り方によりその配列の大きさが大きく異なる。このため, 必要に応じて配列の大きさを求めて, RB の一時的置き換えをするために作成したルーチンである。なお, 配列の使用実績量は, サブルーチン 'ESCORE' にて算出されプリント出力される。

サブルーチン MATCV

ここでは, マトリクス {M} および {R} の次元変換のため, 下記のような和を取り次元変換をしている。このように {M} および {R} の次元変換が必要となる場合として,

- 1) 電流関数が odd の場合。

2) 電流関数が even でかつ $l=l_{\max}$ においてトーラス導体がポロイダル断面方向に接続していない場合がある。すなわち, これらの場合共に $l=l_{\max}$ を横切る電流がなく, $l=l_{\max}$ 上で V = 一定である。MN = (IMAX+1)*JMAX, MN1 = IMAX*JMAX+1 とすると, {M} および {R} は最初は各々 M(MN, MN), R(MN, MN) のサイズのマトリクスとなる。ここでは, $l=l_{\max}$ 上の各メッシュ点の電流関数が縮約することになる。したがって, {M} のマトリクスを例にとると,

$$K(I, MN1) = \sum_J^{MN1, MN} K(I, J), \quad \text{次に, } K(MN1, J) = \sum_I^{MN1, MN} K(I, J),$$

のようにマトリクス要素についての和を取るため, M(MN1, MN1) となる。マトリクス {R} についても同様にして R(MN1, MN1) のマトリクスとなる。

サブルーチン MESHP

ここでは, トーラス導体の断面形状を与える接続点に関する入力データから, ポロイダル断面方向 (l 方向) メッシュ点の (r, z) 座標, メッシュ点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角度 δ (ただし直線は 0) およびポロイダル断面に沿った長さ l を決定する。このメッシュ点は, 隣り合う接続点間の円弧または直線を以下のように分割することにより与えられる。このため, これら接続点は必ずメッシュ点となる。

〔1〕 分割点の求め方

分割の方法には次の 2 通りがある。

- (1) 接続点間を等分割
- (2) 接続点間の分割点の r 座標を入力

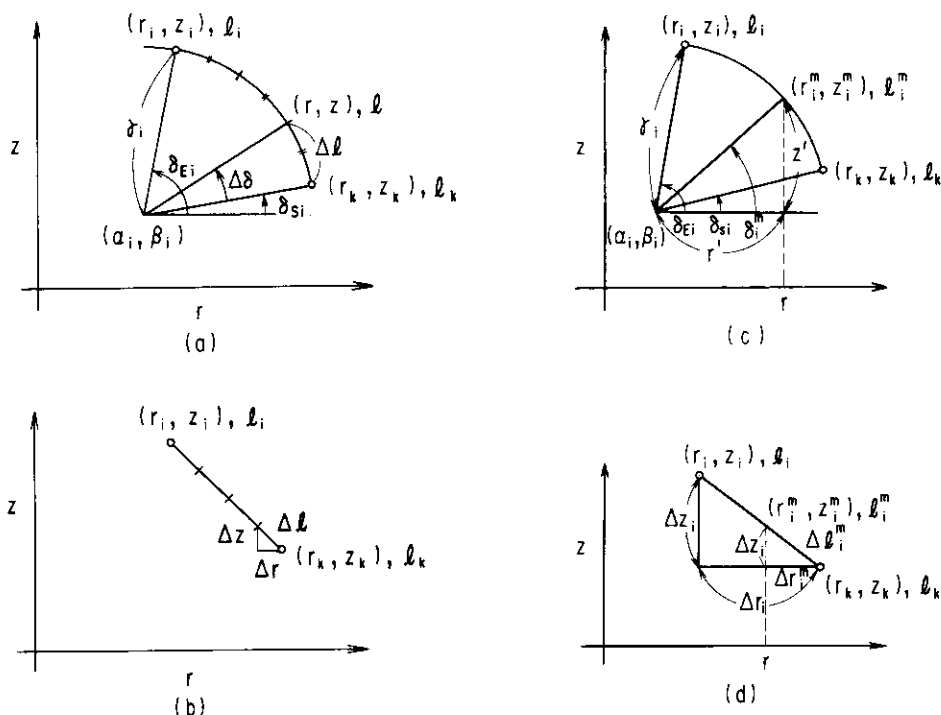


Fig. B1.14 Poloidal cross-section of a torus showing the method of mesh-generation. The l_i (l_k) is a length of cross-section measured from the outermost point; The (α, β) the (r, z) coordinate of a center of curvature of arc; The γ_i a radius of curvature; The δ the angle at the circumference of the contacting point. The mesh-generations (a) and (c) are shown for the case of circular arcs, and (b) and (d) for straight lines on the other hand. The (a) and (b) are given for the case of division into equal parts, and the (c) and (d) are for the case of division into arbitrary parts.

(1) 接続点間を等分割

1) 接続点間が円弧の場合 (Fig. B1.14(a))

隣り合う接続点の (r, z) 座標を、それぞれ (r_i, z_i) , (r_k, z_k) ($k=i-1$) とする。また、ポロイダル断面に沿った長さを、それぞれ l_i , l_k ($k=i-1$) とし、更に接続点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸と成す角度を、それぞれ δ_{S_i} および δ_{E_i} とする。いま、この接続点間を M 等分するとき、 $l^i = l_i - l_k$, $\Delta l = l^i/M$, $\Delta \delta = (\delta_{S_i} - \delta_{E_i})/M$ である。この分割点に対して、求める第 m ($m=2, 3, \dots, M$) メッシュ点の (r, z) 座標、ポロイダル断面に沿った長さおよびメッシュ点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角度を、それぞれ (r_i^m, z_i^m) , l_i^m および δ_i^m とする。このとき、これらの諸量は以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} r_i^m &= \alpha_i + \gamma_i \cos(\delta_{S_i} + \Delta \delta(m-1)), & z_i^m &= \beta_i + \gamma_i \sin(\delta_{S_i} + \Delta \delta(m-1)), \\ \delta_i^m &= \delta_{S_i} + \Delta \delta(m-1), & l_i^m &= l_k + \Delta l(m-1), \end{aligned} \right\} \quad (\text{B1.16})$$

($2 \leq m \leq M$ で、 m はメッシュ番号)。

2) 接続点間が直線の場合 (Fig. B1.14(b))

明らかに、 $\Delta l = (l_i - l_k)/M$, $\Delta r = (r_i - r_k)/M$, $\Delta z = (z_i - z_k)/M$ であり、

$$r_i^m = r_k + \Delta r(m-1), \quad z_i^m = z_k + \Delta z(m-1), \quad l_i^m = l_k + \Delta l(m-1), \quad (\text{B1.17})$$

($2 \leq m \leq M$ で、 m はメッシュ番号) となる。

(2) 接続点間の分割点の r 座標を入力

1) 接続点間が円弧の場合 (Fig. B1.14(c))

r 座標を入力とし, $r' = r - \alpha_i$, $z' = z_i^m - \beta_i$ とする。このとき, 以下のようになる。

$$r_i^m = r, \quad z_i^m = \beta_i + \sqrt{\gamma_i^2 + (r - \alpha_i)^2}, \quad (B1.18)$$

δ_i : 2点 (α_i, β_i) と (r_i^m, z_i^m) との関係から, サブルーチン 'ANGLE' により求める。

$$l_i^m = l_k + (\delta_i^m - \delta_{s_i})\gamma_i.$$

2) 接続点間が直線の場合 (Fig. B1.14(d))

$\Delta r_i^m = r - r_k$, $\Delta z_i^m = \Delta z_i \Delta r_i^m / \Delta r_i$, $(\Delta l_i^m)^2 = (\Delta r_i^m)^2 + (\Delta z_i^m)^2$ などの関係を用いると, 以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} r_i^m &= r, \quad z_i^m = z_k + \frac{(z_i - z_k)}{(r_i - r_k)}(r - r_k), \\ l_i^m &= l + \sqrt{(r - r_k)^2 + (z_i^m - z_k)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (B1.19)$$

(2) 記号の説明

1) R(40)

接続点間の分割点を入力により与える場合の r 座標で, l の小さい方から順に連続して入力する。

2) NMESH

l 方向のメッシュ点の数で, $l = 0$ および仮想メッシュ点を含むため, NMESH-2 が l 方向メッシュ番号の最大値となる。

3) IPOINT

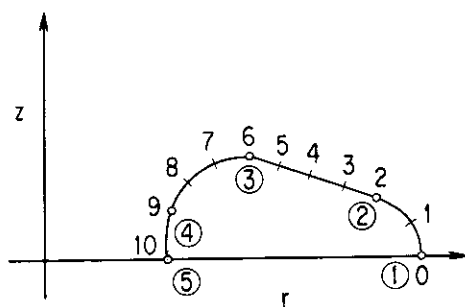
断面形状を与える接続点の数 (始点, 終点を含む)

4) MESH(40)

接続点間の分割の仕方を与えるパラメータで, 接続点が必ずメッシュ点となるため, MESH(N) ($N > 1$) は接続点 $N-1$ から接続点 N の間の分割条件に対応する。接続点間の分割方法には次の2通りがある。

- ① 接続点間の l に沿って等分割する。
- ② 接続点間の分割点の r 座標を入力する。

指定方法は①の場合, MESH(N)を正, ②の場合, MESH(N)を負にする。したがって, $M_i = \text{MESH}(i)$ とすると, $|M_i| = 1$ のときその接続点間が1つのメッシュ幅となり, $|M_i| > 1$ かつ $M_i > 0$ ならその接続点間を M_i 分割し, 接続点を除くと $M_i - 1$ 点のメッシュ点が求まる。次に, $|M_i| > 1$ で $M_i < 0$ なら, $|M_i| - 1$ 個のメッシュ点の r 座標が必要となる。すなわち, 始点を含む l 方向の分割点は, $\sum_{i=2}^N |M_i| + 1$ (N : 始点, 終点を含む接続点



①	r	z	r	MESH
①	r_1	z_1	x	x
②	r_2	z_2	γ_2	2
③	r_3	z_3	0.0	-4
④	r_4	z_4	γ_4	3
⑤	r_5	z_5	γ_5	1

Fig. B1.15 Example of mesh division. ① is the contacting point number; n the mesh point number. The MESH is the input parameter to give the way how to generate meshes.

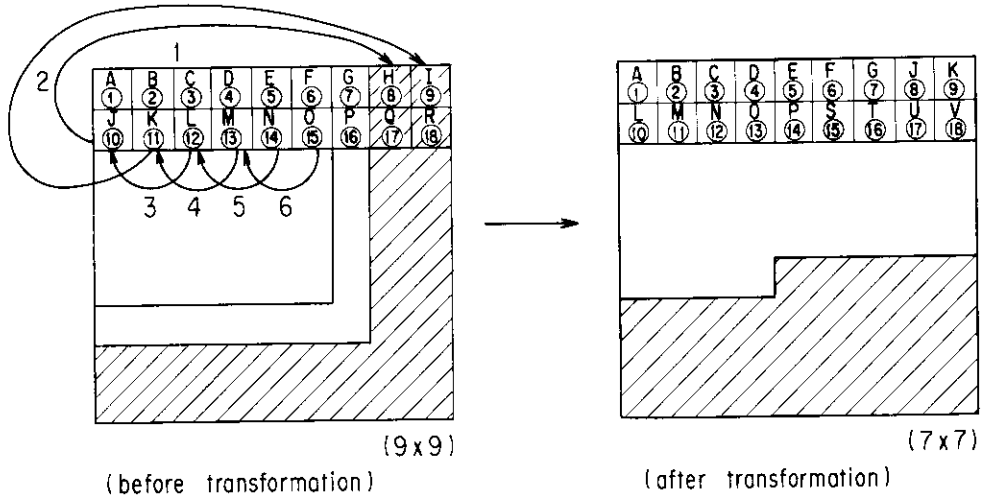


Fig. B1.17 Illustrating the transformation of matrix $\{M\}$ and $\{R\}$: $MN=9$, $MN1=7$. The alphabet indicates matrix element and \textcircled{n} is the sequence of one-dimensional array. The shadowed portion is a part of matrix element to be removed.

サブルーチン PORT

ここでは、ポート穴のメッシュ番号 $(i;j)$ を入力し、 $\{M\}$ および $\{R\}$ のマトリクスの次元変換のための情報を得る。次元変換のための情報は本モジュールによるものだけでは不十分で、 $i=0$ および $i=IMAX$ における境界条件や電流関数のパリティ条件を考慮して始めて完全なものとなる。ここでは、まずメッシュ原点 $(0;1)$ における電流関数の零固定、各ポート穴がこのメッシュ原点に接続しているか否かの状態決定およびポート穴のみによるメッシュの縮約条件を決定する。境界条件やパリティ条件に対する次元変換は、サブルーチン 'EIGEN' で実施する。

ポート穴 $(i;j)$ の入力は、多角形（四角形を超えるもの）については四角形の集合として入力する。更に、メッシュの取り方により1次直線としての入力も可能である。Fig. B1.18 に、以下のような2つの例をあげる。

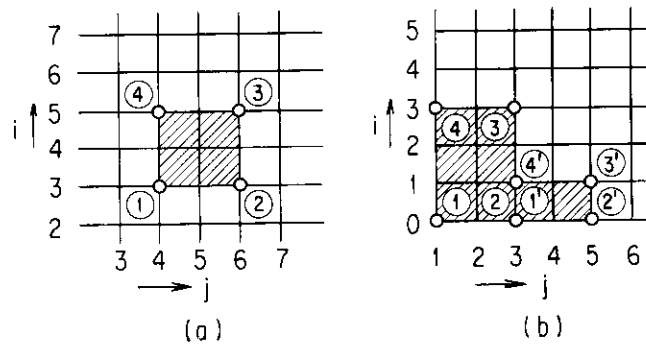


Fig. B1.18 Port-hole condition showing: (a) A port-hole on the usual position; (b) A port-hole contacting to the mesh origin $(0;1)$. \textcircled{n} means the node for designating a port-hole, which should be given by the input parameter.

(1) 単一の四角形で4つの頂点として入力する場合

$(3;4)\textcircled{1}$, $(3;6)\textcircled{2}$, $(5;6)\textcircled{3}$, $(5;4)\textcircled{4}$ より $(3;5)$, $(4;4)$, $(4;5)$, $(4;6)$, $(5;5)$ の5点を計算プログラム内で求める。

(2) 二つの四角形で8つの頂点として入力する場合

(0;1)^①, (0;3)^②, (3;3)^③, (3;1)^④より(0;2), (1;1), (1;2), (1;3), (2;1), (2;2), (2;3), (3;2)の8点を、また、(0;3)^①, (0;5)^②, (1;5)^③, (1;3)^④より(0;4), (1;4)の2点を各々計算プログラム内で求める。

以上のように、ポート穴の数にみあう必要なデータを入力し、対象となるメッシュ点の(*i*;*j*)を導いた後、ポート穴のみによるマトリクスの縮約条件を以下の手順にて求める。

(i) Fig. B1.18のように、当該ポート穴がメッシュ原点(0;1)に属するかどうかを調べ、Fig. B1.18(a)か或いはFig. B1.18(b)かの状態を決定する。この状態識別は以下に述べる理由により必要となる。まず、Fig. B1.18(a)の場合、そのポート穴の最下位のメッシュ点(3;4)にポート穴全体のメッシュ点を代表させる。一方、Fig. B1.18(b)の場合、代表メッシュ点が $V_{01}=0$ のメッシュ原点(0;1)に属するため、そのポート穴内の全てのメッシュ点(*i*;*j*)で $V_{ij}=0$ となるためである。したがって、後者の場合は当該ポート穴に属する全てのメッシュ点は無視される。以上2つの状態のうちどの状態のポート穴であるかを決定する。

(ii) Fig. B1.18(b)のように、四角形等の集合としてポート穴の頂点を入力した場合、得られるポート穴のメッシュ点の情報が重複する。このため、同一メッシュ点(*i*;*j*)の取り除きをするためのフラグを立てる。

(iii) Fig. B1.18(b)のように、メッシュ原点に対応するマトリクス{*M*}および{*R*}の要素((*i*)の状態決定のときにそのようなものはフラグを立ててある)や、(ii)の条件決定によりフラグを立てた重複要素について取り除き作業をする。

(iv) 以上のように、最終的に必要となる(*i*;*j*)のみを残した情報から、{*M*}および{*R*}のマトリクスのどの行、列が次元変換の対象になるかを下記のように決定し、各々のポート穴毎に状態決定とその対象要素の数を求める。このため、*l*方向の最大のメッシュ番号をIMAX、*φ*方向のそれをJMAXとし、インデックスINDXを

$$\text{INDX} = i * \text{JMAX} + j,$$

として求める。ただし、行、列に関しては全く同様のインデックスとなる。

(v) 上記のINDXを各ポート毎に昇順に並べ換える。

(vi) 最後に、サブルーチン'SUMMRX'で必要な次元操作のための情報を以下のように決定する。{*M*}および{*R*}のマトリクスは(MN, MN)の配列で、MN(=(IMAX+1)*JMAX)個の情報が必要であり、これを次のように、配列IRWに記憶する。

1) IRW(INDX) (INDX=1, 2, ..., MN)の内容とINDXが等しいとき、その行、列の全ての要素についてはマトリクスより取り除く対象とならない。

2) IRW(INDX)の内容とINDXが等しくなくIRW(INDX)が零の場合は、単にINDX番目の行および列が取り除かれる。また、零以外のときはその値の行、列に当該要素の値を加算しINDXの行、列の全ての要素を取り除く。

すなわち、Fig. B1.18(a)の場合、ポート穴の最下位のメッシュ点を(*i_L*; *j_L*)とすると、そのポート穴に属する全ての(*i*;*j*)により求まるINDXに対して

$$\text{IRW}(\text{INDX}) = i_L * \text{JMAX} + j_L (= \text{INDX}1),$$

のように記憶される。

Fig. B1.18(b)の場合のとき、処理手順(v)までの課程で求められたINDXに対して

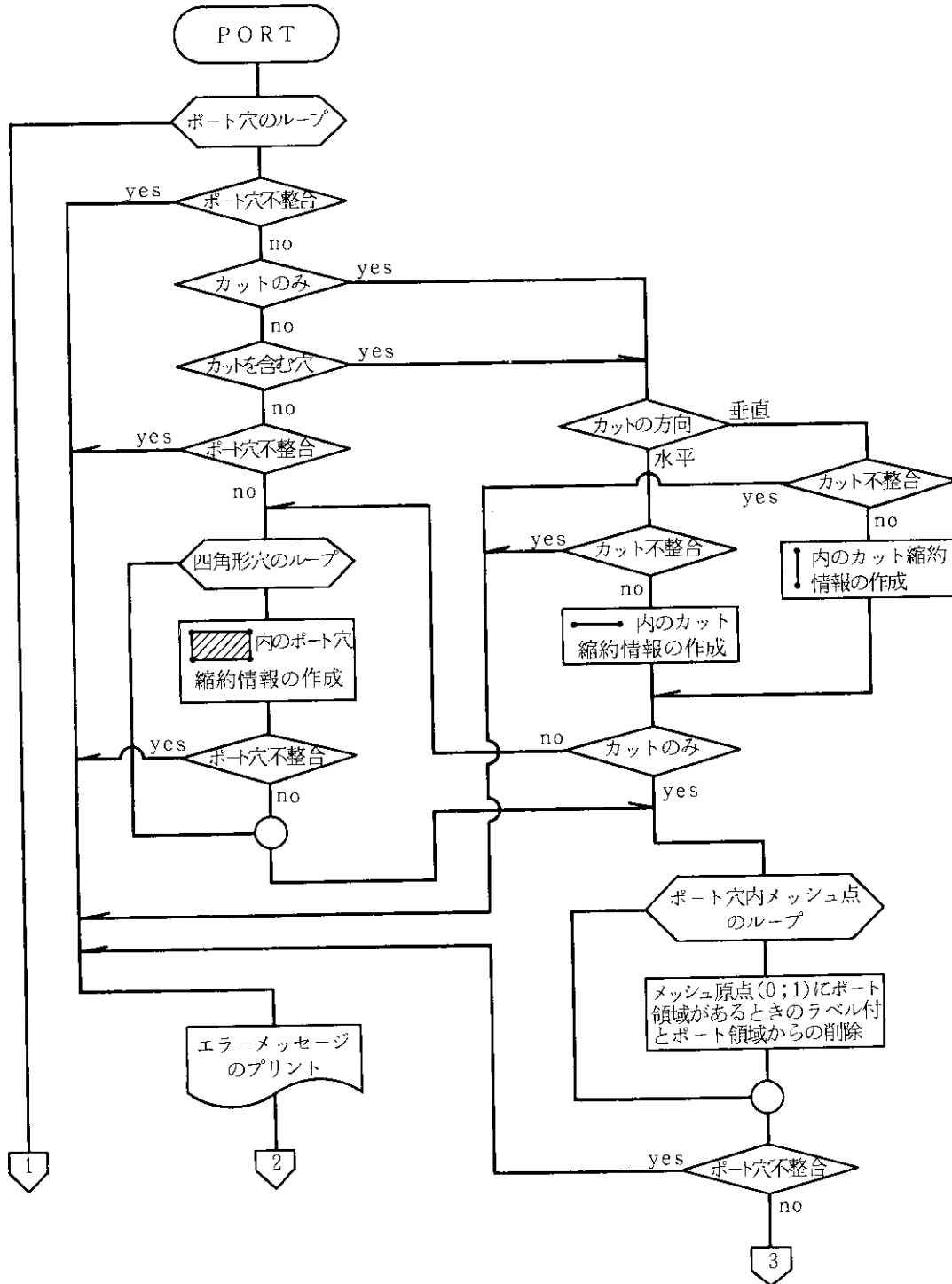
$$\text{IRW}(\text{INDX}) = 0,$$

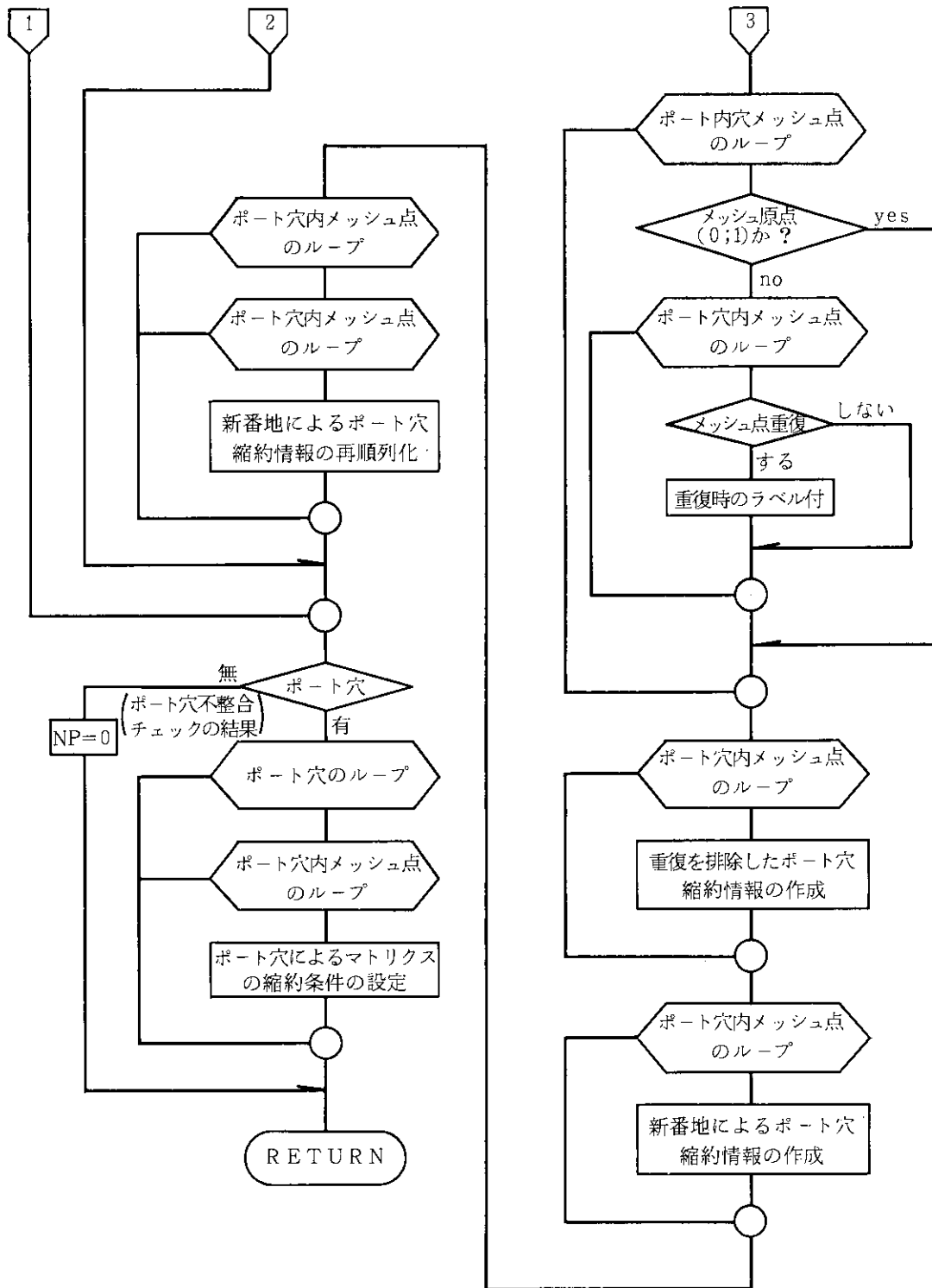
のように零を記憶する。

最後に、どのポート穴にも属さないメッシュ点についてはIRW(INDX)=INDXのように記憶される。最下位メッシュ点(*i_L*; *j_L*)の情報IRWは、1次独立なメッシュ点の場合と同様の意味を有

するが、別のポート穴情報によって、それが最下位のポート穴のメッシュ点であることが認識される。

(1) フローチャート





〔2〕 記号の説明

- | | |
|-------------------|--|
| 1) INPORT(2, 20) | ポート穴の頂点データのための作業領域 |
| 2) NP | ポート穴の数 |
| 3) INFDEG(100, 5) | ポート穴毎の情報で、処理過程によりその内容が異なるが、最終的にはサブルーチン'EIGEN'において、必要な次の情報が求まる。ここで、ポート穴の種類は最大5個である。 |

- INFDEG(1, I) : INFDEG(1, I) - 2 でその穴のメッシュ点数を表わす (メッシュ原点をポート穴が含む場合はこの原点を除いた数)。ただし、零のときは入力したものの何らかのエラーチェックの結果、誤りがあることが判明したもので、そのポート穴は存在しないことになる。
- INFDEG(2, I) : その穴の状態が記憶されている。
- INFDEG(3, I) : ポート穴のメッシュ情報 (i, j) の $i * JMAX + j$ がこれ以降 INFDEG(1, I) 個記憶されている。
- 4) NPC(5) 各ポート穴の頂点の数で、2, 6 或いは4の倍数および4の倍数プラス2しか許されない。
- 5) INVERT(2, 20) ポート穴の頂点を入力する作業領域で、ポート穴毎の頂点データ INPORT が組となって連続して入力されている。
- 6) NPS 入力したポート穴が何らかのエラーチェックにより誤りであるとき、このポート穴は削除される。エラー処理後の有効なポート数を表わす。
- 7) IPMAX, IPMIN 四角形または1次直線のポート穴の最小構成単位毎に与えられる ℓ 方向メッシュの各々最大値, 最小値である。
- 8) JPMAX, JPMIN 四角形または1次直線のポート穴の最小構成単位毎に与えられる ϕ 方向メッシュの各々最大値, 最小値である。
- 9) ISTAT ポート穴がメッシュ原点(0;1)を含むか否かの識別パラメータ (= 0 : 含む; = 1 : 含まない)
- 10) IRW(500) ポート穴によるマトリクスの縮約条件。境界条件などを考慮した完全なマトリクスの縮約条件は、サブルーチン 'EIGEN' にて求められる。

サブルーチン REDMRX (エントリー EXPMRX)

ここでは、ポート穴が存在するときのマトリクスの次元縮約 (REDMRX) と次元拡張 (EXPMRX) とを行う。固有値問題の求解のためには、 $\{M\}$ および $\{R\}$ のマトリクスに対して次元縮約を行い、次元拡張は固有ベクトルに対して行う。サブルーチン 'MOVE' においても次元縮約を行うが、'MOVE' では $i=IMAX$ の電流関数 V_{ij} が必ず等しいため固定した操作が必要である。これに対し、本ルーチンではポート穴による次元縮約処理となるため、 ℓ 方向のメッシュ番号が固定されていない一般の要素に対して縮約処理が可能となるように機能拡張したものである。

[A] REDMRX についての説明

配列 IRW(500) の番地参照インデックスを INDX とする。これとメッシュ点 (i, j) との関係は、 ℓ 方向のメッシュ点数を $IMAX+1$, ϕ 方向のメッシュ点数を $JMAX$ とすると $INDX = i * JMAX + j$ の関係が成り立つ。INDX の最大値 $MN1$ は、一般に $(IMAX+1) * JMAX (= MN)$ となる。 $i=IMAX$ における境界条件による次元縮約は、縮約が必要な場合サブルーチン 'MATCV' にて実施済みである。ここでは縮約条件は全て IRW(500) に記憶されており、以下の要請が考慮されている。

- 1) メッシュ原点 (0;1) における電流関数 V の零固定
- 2) odd パリティの場合の $i=0$ および $i=IMAX$ における境界条件
- 3) ポート穴の縮約条件
- 4) 各ポート穴の $i=0$ および $i=IMAX$ への接続条件

一般に、ポート穴に属さないメッシュ点の IRW (INDX) の値は、

$$\text{IRW}(\text{INDX}) = \text{INDX},$$

となり、2), 3), 4) の場合もこの条件を満たすものである。当然のことながら、この場合はそのメッシュ点をそのポート穴の代表とするものであるから、縮約の対象とならない。以上の結果、IRW (INDX) の内容が INDX と等しくない場合には不要の行と列になり、マトリクスより取り除く必要がある。

[1] 手 法

Fig. B1.19 の斜線部が不要な行と列となる。ここでは、処理の簡素化のため、作業用ファイルを使用し、行単位毎に一時領域 WORK に記憶しファイルへ出力する。それを全ての行につき出力した後、配列の DIMENSION 宣言の関係上サブルーチン 'READMX' を使用し、整合配列にて1次元的に連続した元のマトリクスの領域へ再記憶を行っている。

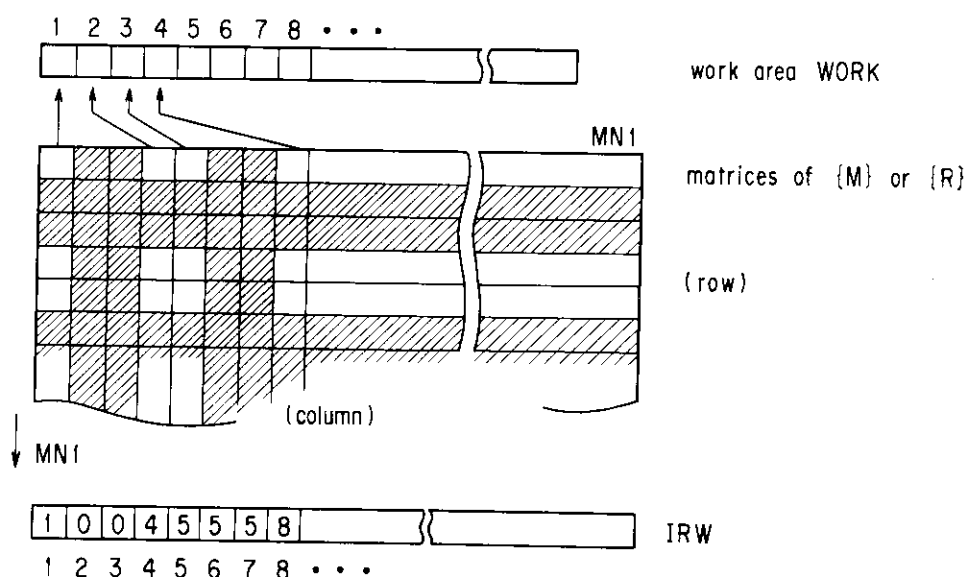


Fig. B1.19 Illustrating contraction of matrices $\{M\}$ and $\{R\}$. The WORK is the one-dimensional work area; The IRW the condition index of contraction for matrices $\{M\}$ and $\{R\}$. The MN1 is the matrix size of $\{M\}$ or $\{R\}$. The shadowed area of $\{M\}$ or $\{R\}$ indicates the matrix element to be removed.

[2] 記号の説明

- | | |
|--------------|---|
| 1) MN1, MN3 | それぞれ、次元変換前、次元変換後の次元数 |
| 2) INOUT | 作業用ファイルの FORTRAN 論理機番 |
| 3) WORK(500) | ファイルとの入出力のための作業領域であり、500 は $(\text{IMAX}+1) * \text{JMAX} < 500$ の条件により定められている。 |
| 4) IRW(500) | 行と列のための縮約情報。IRW (INDX) \neq INDX の場合、縮約対象となる。 |

[B] エントリー EXPMRX についての説明

ここでは、'REDMRX' と全く反対の働きをし、マトリクスの次元拡張を固有ベクトルについて行う。実際には、或る固有モードの固有ベクトルは列ベクトルとして記憶されているため行についての次元復元を行う。しかしこの場合、固有モードすなわち固有値の数には変化がないので列についての復元は不用である。

配列 IRW の内容は、サブルーチン 'REDMRX' で使用したものは次のように異なる。IRW は、サブルーチン 'EIGEN' において、読取りのための作業領域のインデックスを指すように記憶されている。'REDMRX' における Fig. B1.19 についての例をあげると、 $IRW(1) = 1$, $IRW(2) = 0$, $IRW(3) = 0$, $IRW(4) = 2$, $IRW(5) = 3$, $IRW(6) = 3$, $IRW(7) = 3$, $IRW(8) = 4$, ...と記憶されている。

(1) 手 法

Fig. B1.20 の斜線部は、ポート穴が直接または境界条件を介し間接にメッシュ原点 (0;1) に接続しているため、零を記憶する。第 6 行と第 7 行の各要素は、 $IRW(INDX)$ によって与えられる拡張元であるそれぞれ第 3 行と第 3 行の各要素の値を使用し再定義される。これらの各要素の値は、作業領域 WORK に一時記憶されている。ここでは、固有ベクトルのファイル出力のため、サブルーチン 'WRITMX' を呼び出す。

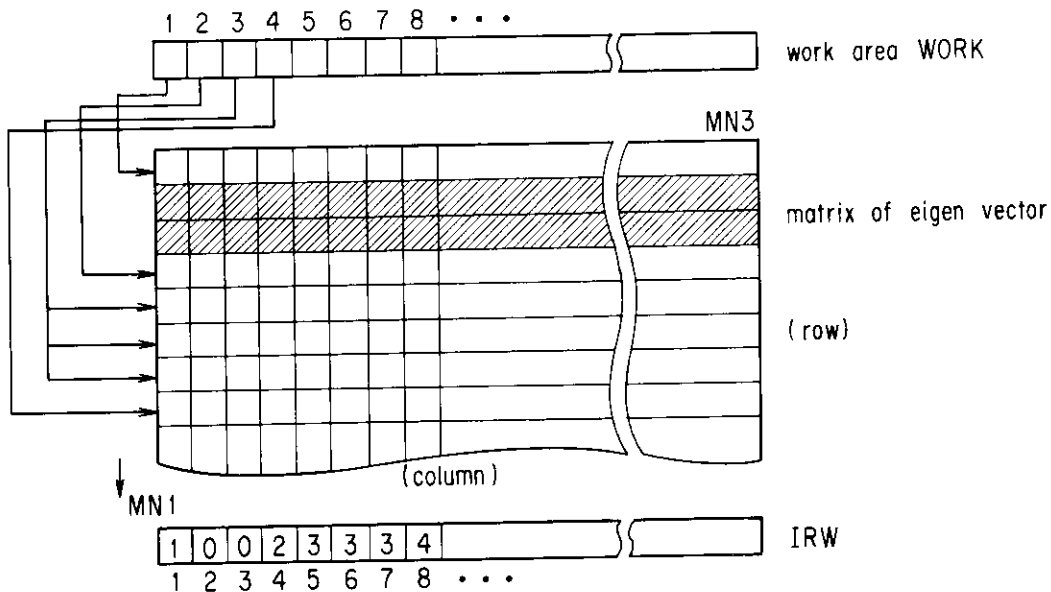


Fig. B1.20 Illustrating expansion of eigen vector. The WORK is the one-dimensional work area; The IRW the condition index of expansion for eigenvector. The MN3 is the column size; the MN1 the row size of modal matrix of eigenvector. The shadowed area of eigenvector indicates the matrix element to be expanded corresponding to the contraction given by Fig. B1.19. The 6-th and 7-th rows are commonly given by use of the 5-th row of matrix of eigenvector.

サブルーチン SUMMRX

ここでは、固有値問題を解き、固有値および固有ベクトルを求めるため、インダクタンス $\{M\}$ および抵抗 $\{R\}$ のマトリクスに対してポート穴による縮約 (次元縮約) を行う。ポート穴においては電流関数 V の値が一定であるため、このポート穴に含まれるマトリクスの対象要素について和を取り、これを代表の要素とする必要がある。この処理に際しては、下記の条件により和を求めるが、一般の場合のポート穴の例として Fig. B1.21 に示す場合を考え、詳しく説明する。

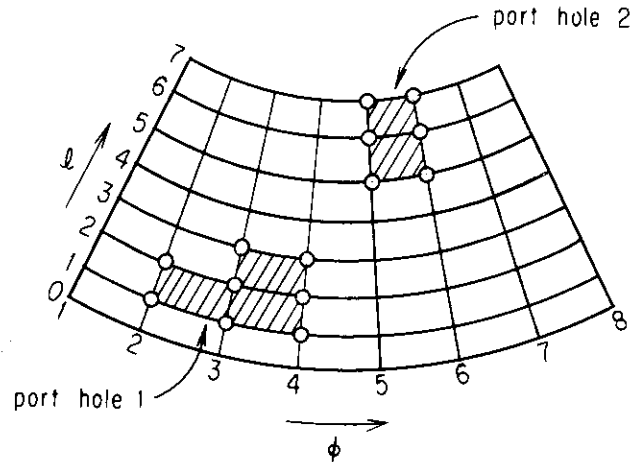


Fig. B1.21 Example of contraction of matrix due to port-holes.

ポート穴の条件とは無関係に、電流関数が odd の場合や、たとえ even であってもこのトーラス断面の終点が赤道面の上下で接続していない場合、 $i=IMAX$ 上の全ての要素が縮約する。この縮約については、本ルーチン呼び出す上位のサブルーチン 'EIGEN' およびサブルーチン 'MATCV' にて既に考慮済みである。マトリクス $\{M\}$, $\{R\}$ の次元は本来共に (MN, MN) であるが、この場合、 $MN1=IMAX * JMAX + 1$ とすると $(MN1, MN1)$ のサイズのマトリクスとなる。言い換えれば、 $V_{IMAX,j}=V_{IMAX,1}$ ($2 \leq j \leq JMAX$) の境界条件は、 $i=IMAX$; $j=1, 2, \dots, JMAX$ の要素に関する電流関数の縮約により、マトリクス $\{M\}$ および $\{R\}$ の代表要素 $K_{IMAX,1;k,m}$ および $\eta_{IMAX,1;k,m}$ に含まれていることになる。

次に、ポート穴によるマトリクスの縮約の手順を述べる。Fig. B1.21 の場合には、以下ようになる。

- 1) ポート穴 1 (ISTAT=1) では、マトリクスの最下位の要素を代表する $i=1$ と $j=2$ にそのポート穴に属する要素の和を代表させることになる。残りのポート穴の要素については、マトリクスより取り除く。
- 2) 一般に、ポート穴 2 では本来 1) の条件を採用しなければならないが、 $i=IMAX$ 上での縮約が生じている (この状態を ISTAT=2 とする)。また、マトリクスの次元を $(MN1, MN1)$ としたため、この $i=IMAX$ 上の要素についてこれを $K_{IMAX,1;k,m}$ または $\eta_{IMAX,1;k,m}$ に加算しその要素は取り除く。
- 3) Fig. B1.21 では例を省いたが、次の場合特別の考慮が必要である。すなわち、odd パリティか或いは even パリティであってもトーラス断面の始点 ($l=0$) が上下で接続しておらず、更にポート穴が $i=0$ 上の要素を有する場合である。このときは、 $i=0$ 上の電流関数 V を零と定義したため、このポート穴に属する要素は全て取り除くことになる。ただし、この場合要素の和を取る必要がないため、本サブルーチンは呼び出されない。

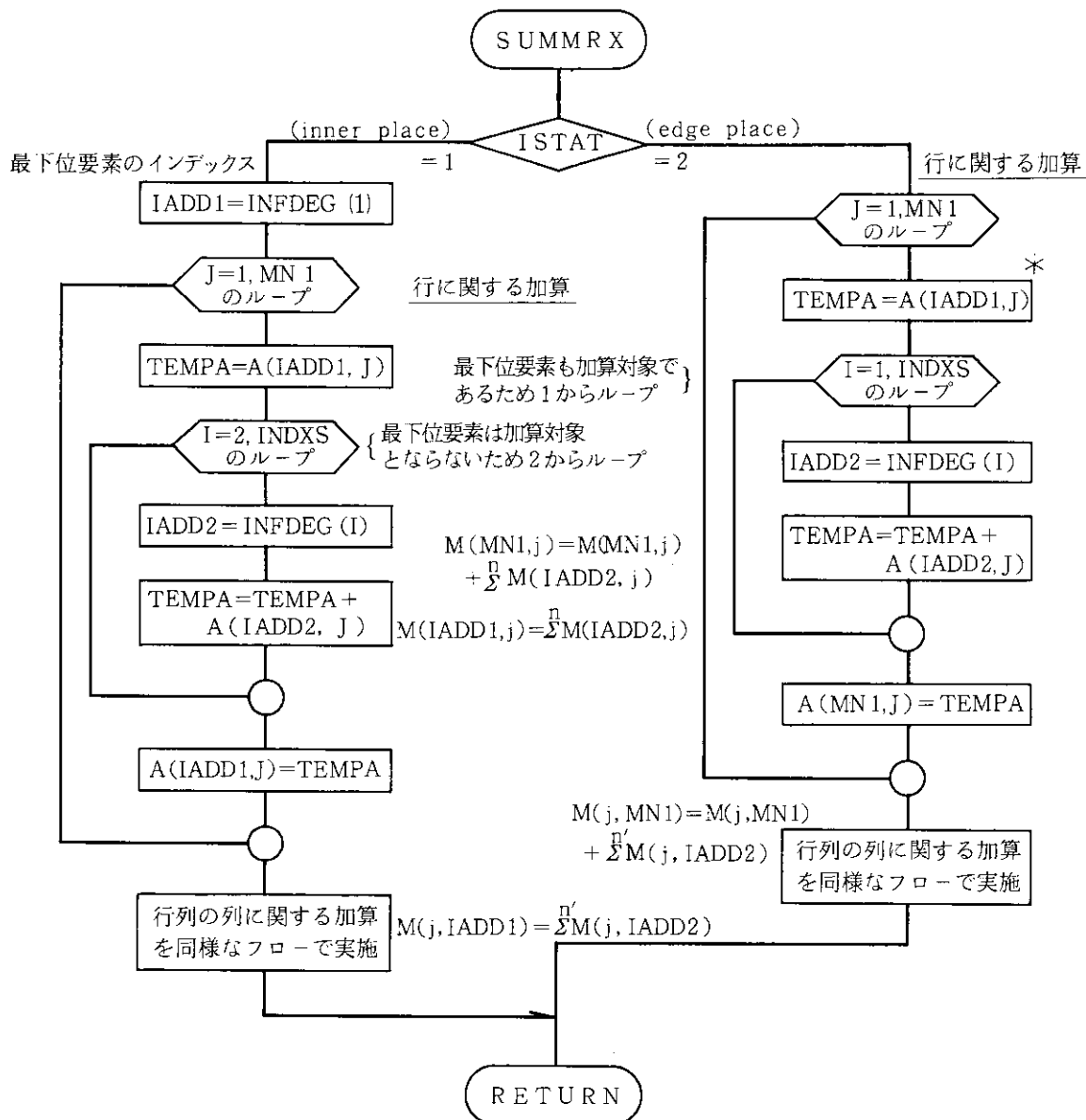
以上の手順を式を用いて $\{M\}$ について説明すると、以下ようになる。ここで、メッシュ点 (i,j) と $(MN1, MN1)$ のサイズの対称マトリクス $\{M\}$ のインデックス (INDEX) の関係は、 $INDEX=i * JMAX + j$ である。最下位の要素の INDEX を IADD1 とし、加算される対象要素の INDEX を IADD2 とする。

ポート穴 1 では下記のような和を取る。

$$\begin{aligned} \bullet M(IADD1, j) &= \sum_i^{1, n} M(IADD2(i), j), \\ \bullet M(j, IADD1) &= \sum_i^{1, n} M(j, IADD2(i)) \end{aligned}$$

($j: 1, 2, \dots, MN1$, および n : 対象となる要素の数)

(2) フローチャート



* i = IMAXに属するポート穴であるため、
i = IMAX, j = 1の要素に加算する。

(3) 補足説明

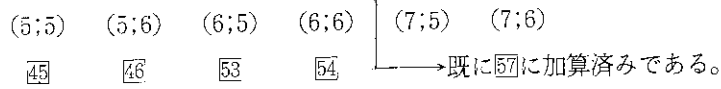
Fig. B1.21 に示すポート穴2が ISTAT=2 の条件の場合について、マトリクスを Fig. B1.22 のように図示し処理の概要を説明する。

1) ポート穴1についてメッシュ点 (i,j) と INDEX の関係を表わすと、

(1;2)	(1;3)	(1;4)	(2;2)	(2;3)	(2;4)	(3;3)	(3;4)
⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰

である。最下位の要素が⑰であり、Fig. B1.22 での○数字で表現している。

3) ポート穴2についてメッシュ点 $(i;j)$ と INDEX の関係を表わすと、



である。Fig. B1.22 での□数字で表現している。

図の斜線部が対象要素の中で最終的に残る部分である。

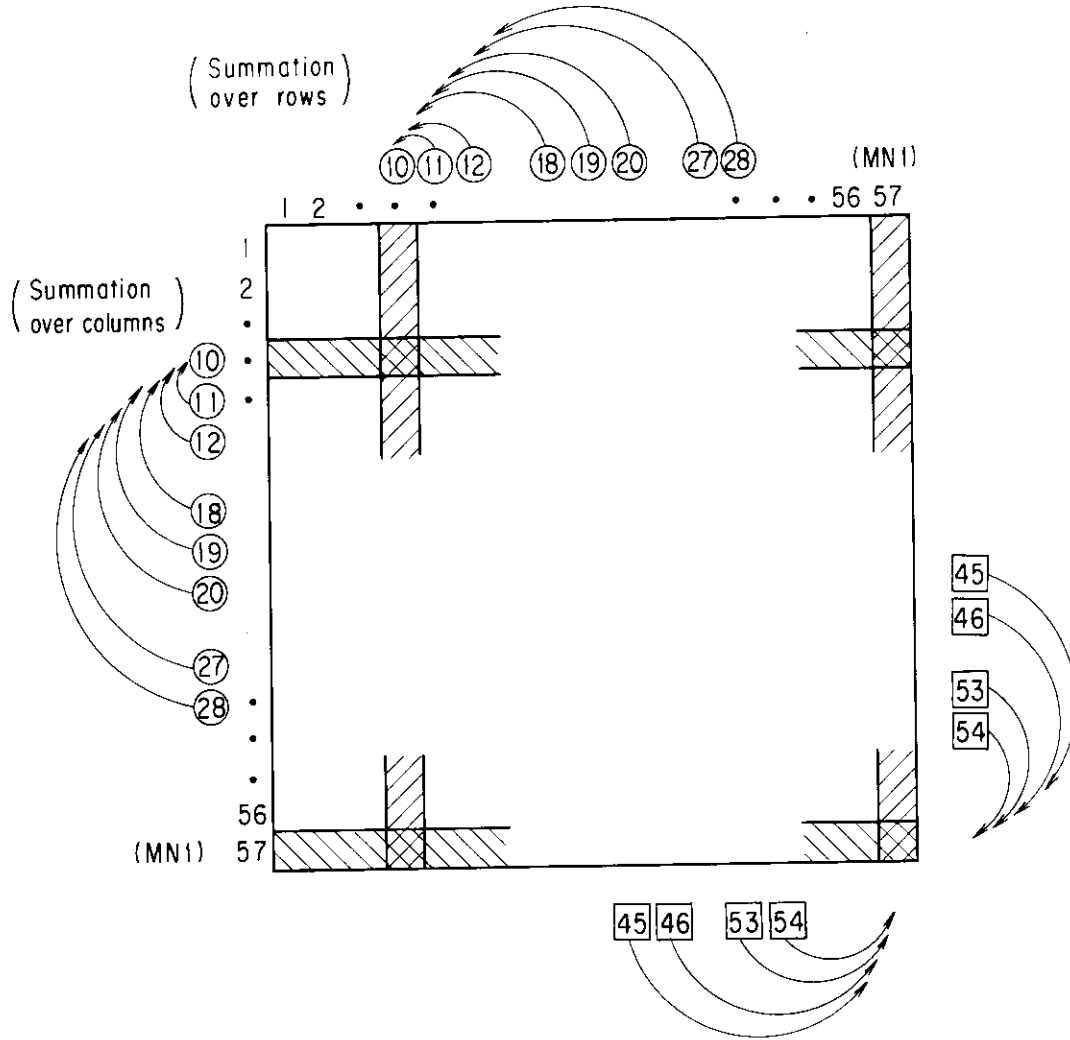
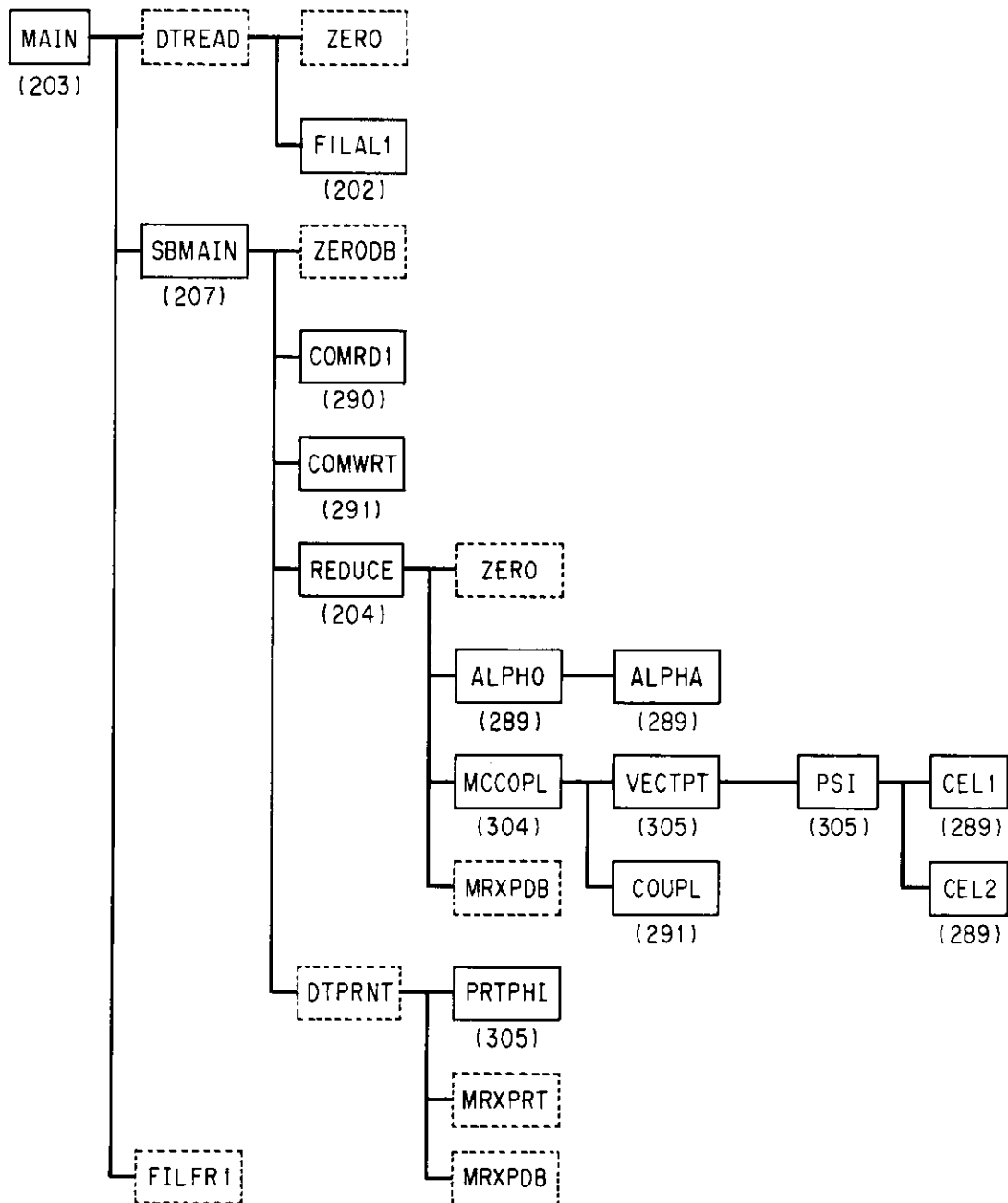
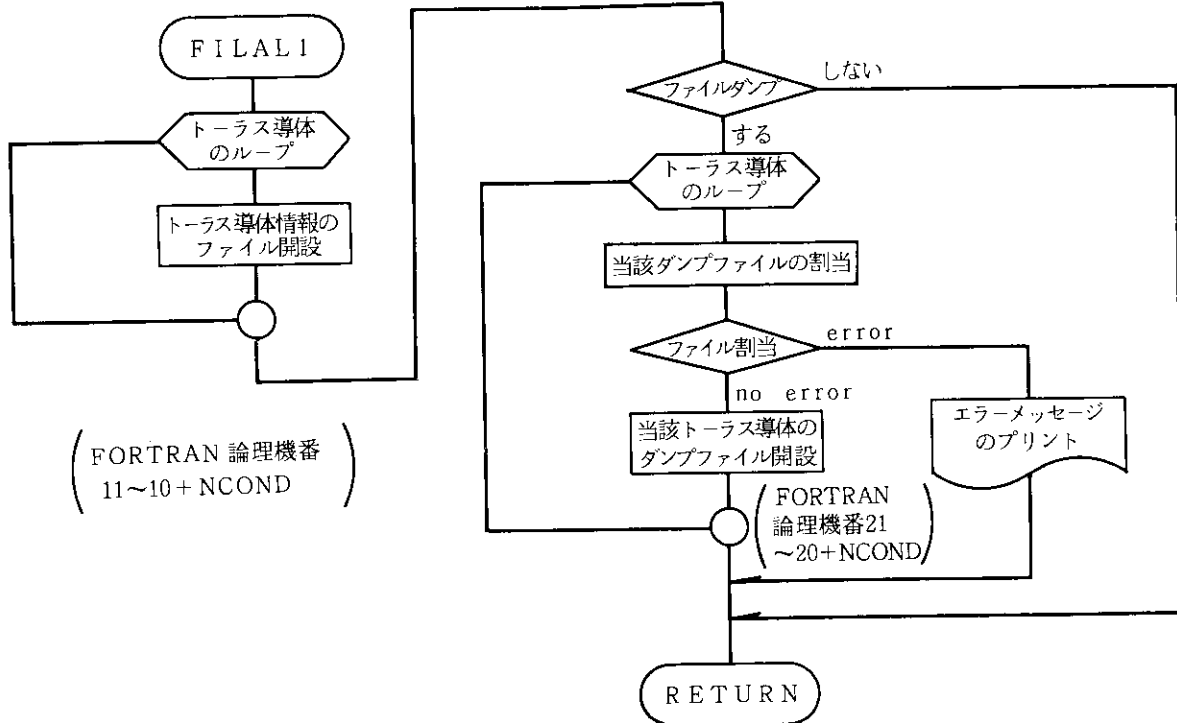


Fig. B1.22 Illustrating the method of matrix contraction due to the port-hole condition of Fig. B1.21. Summation over columns and rows with respect to the port-hole 1 is shown by \odot_n and summation with respect to the port-hole 2 is shown by \square_n .

A.3.2 EM1DEC プログラム

サブルーチン FILAL1

ここでは、EM1DECプログラムの実行にあたり、EDTDECプログラムにより作成されたトラス導体毎のモードデータファイル上のデータセットを、OPEN文によりデータセット識別番号(FORTRAN論理機番)と結合する。またモード縮小処理後のデータをダンプする場合(IRST≠0を入力したとき)、これに必要な全てのファイルの割当てをIPFコマンドにより行い、FORTRAN論理機番21から最大30までのデータセット識別番号とデータセットを結合する。なお、参照のためのオリジナルファイルのFORTRAN論理機番は11から最大20までである。

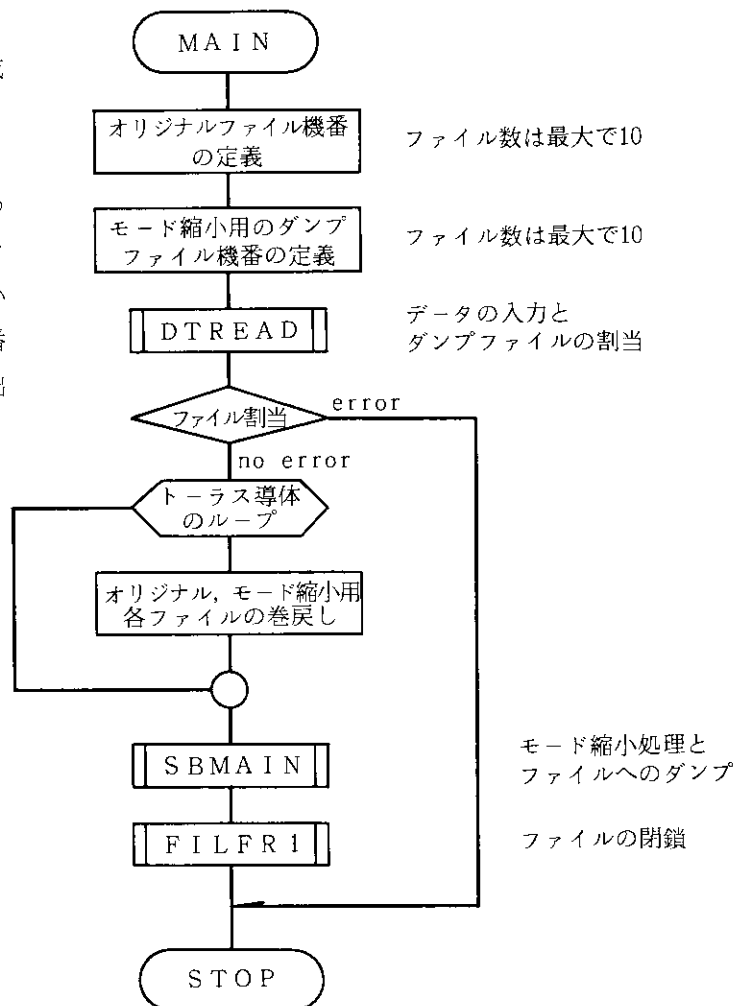


(FORTRAN 論理機番
11~10+NCOND)

(FORTRAN
論理機番21
~20+NCOND)

メイン・ルーチン MAIN1

ここでは、DETDEC プログラムにより作成されたトラス導体毎の渦電流モードデータを、複合トラス導体系の渦電流モード解析、更にこれに続く時間追跡など以後の計算のためにモード縮小する。このため、これらオリジナルファイルの FORTRAN 論理機番および縮小用の各ダンプファイルの FORTRAN 論理機番を定義し、サブルーチン 'SBMAIN' を呼び出す。



モード縮小処理と
ファイルへのダンプ
ファイルの閉鎖

サブルーチン REDUCE

第2章で説明したように、多種多様のトラス導体を含む渦電流問題は必然的にその次数が高くなり、現実問題として解くことができない。そこで、何らかの方法によりモード縮小する必要があるが、やみくもにモードを切りすててしまうと主要なモードを無視するなど本来の目的からはずれた渦電流問題を取り扱いかねない。このため、合理的で明確な縮小基準が必要となるが、これに対しては多変数制御系の設計の際の理論的背景となっている線形システム理論²⁴⁻²⁶⁾の結果を用いることが考えられる。しかしながら、これらの結果は線形システムが標準形(Standard Form)と呼ばれ、我々が渦電流問題を考えるときの(2.24)式のような中間標準形(Intermediate Standard Form)とは異なる表現形式で議論されていることが多い。本プログラムでは、2.1節で説明した中間標準形における次元縮小の考えにしたがい処理を行う。以下に、EDDYMULTコードシステムで実施しているモード縮小のための簡易アルゴリズムを説明する。

いま、各トラス導体毎にジュール損失に対して規格化された固有関数基底を得たとし、この基底を用いて表現された有限次元の定係数線形システム(2.44)式を考える。2.1節で定義したように、まず外部入力 U によって直接可制御な状態ベクトルのクラスとそうでない間接可制御または不可制御な状態ベクトルのクラスとに類別する。このため、初めにトラス導体間相互のモード間結合を無視し、近似的に各モードの時間応答 $x(t)$ を次のように書き表わす。

$$x(t) = x_0 \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) + \frac{1}{\lambda} \int_0^t \sum_j c_j u_j(\tau) \exp\left(\frac{\tau-t}{\lambda}\right) d\tau. \quad (B2.1)$$

ここで、 c_j は当該モードに対する第 j 外部入力 u_j の外部入力係数で、外部入力係数のマトリクス $\{C\}$ の或る行列要素である。更に、外部入力 $u_j(t) = u_0 \sin(\omega t + \phi_j)$ が与えられたとする。ここで、 ϕ_j は第 j 外部入力の位相で任意の値を取り得るものとする。入力の開始から充分時間が経った後の応答(B2.1)式は

$$x(t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + \lambda^2 \omega^2}} \sum_j c_j \sin(\omega t + \phi_j'),$$

となる。 $\lambda \omega \gg 1$ と仮定すると、上式は

$$x(t) = \frac{u_0}{\lambda \omega} \sum_j c_j \sin(\omega t + \phi_j'),$$

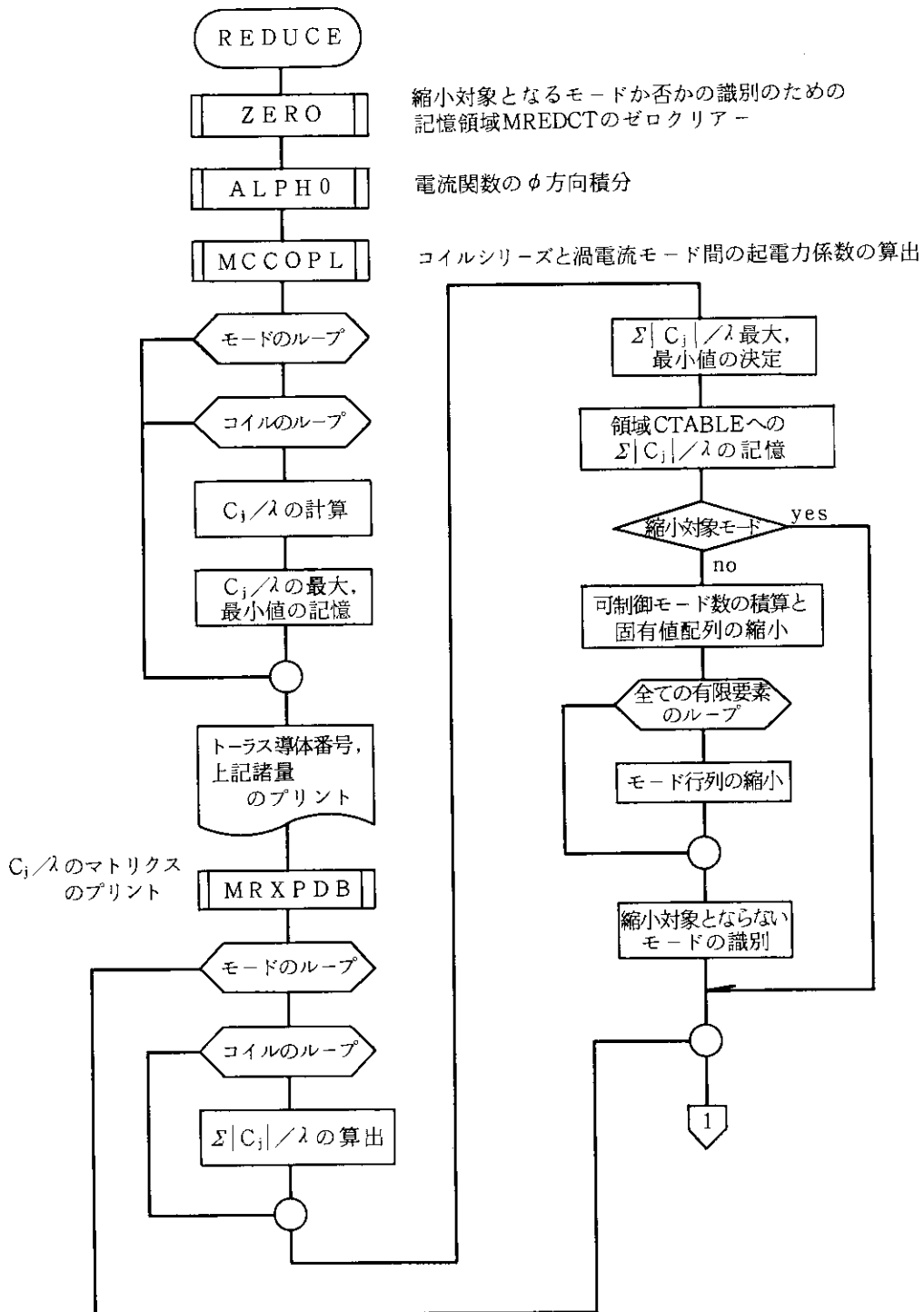
となる。 $\lambda \rightarrow \infty$ または $\omega \rightarrow \infty$ のとき、このモードは入力に対して応答しない。 ϕ_j' は任意の位相を取り得るため、総和は $\sum |c_j|$ と等価である。更に、外部入力の u_0 を $u_0 = 1$ のように単位入力として、各モードに対する可制御性を意味する次の実効入力 u^* を定義する。

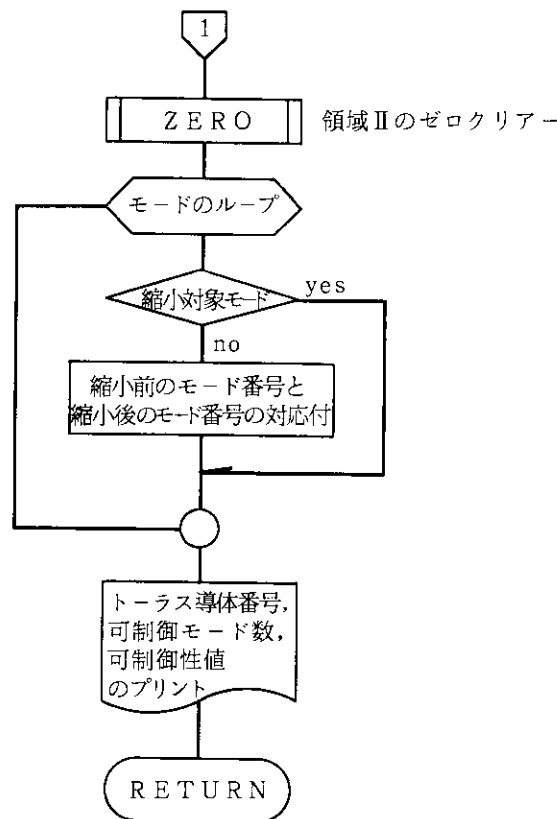
$$u^* = \frac{1}{\lambda} \sum_j |c_j|. \quad (B2.2)$$

この実効入力 u^* は、複数の外部入力 $u_j(t)$ が与えられたときのモードの応答 $x(t)$ の大きさを特徴づける。たとえば、全ての外部入力 u_j に対して $c_j = 0$ であれば、このモードは少なくとも直接可制御でない。実効入力が $u^* > 0$ であれば、このときのモードは直接可制御であり、系から除外することはできない。 $u^* = 0$ であれば、このときのモードは他のトラス導体上の直接または間接可制御なモードを介する間接可制御なモードであるか或いは不可制御であるかのどちらかである。一般には、渦電流が各トラス導体毎の固有関数基底で表現されたとき、直接可制御でないモードの内の比較的低次のモードは間接可制御である。これに対して直接可制御でないモードの内の高次のモードは間接にも可制御でない。これを正確に判別するためにはトラス導体間相互のモード間結合の大きさを調べる必要がある。本プログラムに引き続くEM2DECプログラムではトラス導体間相互のモード間結合を算出するが、本ルーチンで類別した直接可制御でないモードに対してモード間結合の大きさを調べ、他のトラス導体上の直接または間接可制御なモードを介しての間接可制御な低次部分とそうでない高次部分とに類

別する。このように、 $u^* = 0$ の直接可制御でないクラスで、更に間接にも可制御でない部分のモードを系から除外する。

〔1〕 フローチャート





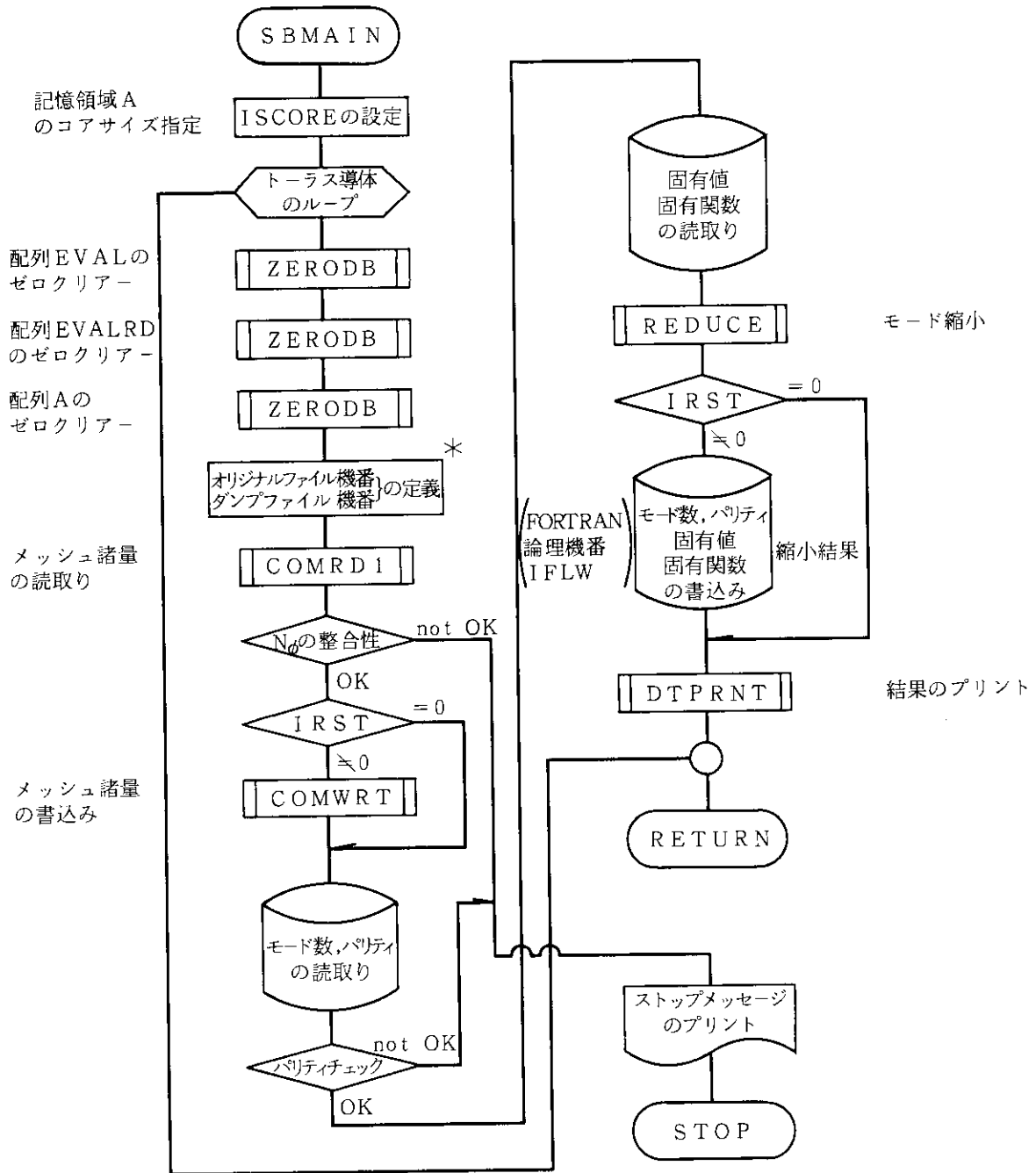
〔2〕 主な記号の説明 (本説明に述べる実数型変数の内特記のないものは、全て倍精度である)

- 1) CK(NMODE, NCOIL) N_e (NCOIL)個の外部コイルシリーズによる NMODE 個の渦電流モードに対する起電力係数
- 2) SSK(MN, NMODE), SSKRED(MN, NMODE)
それぞれ、モード縮小処理前、処理後の固有ベクトル
- 3) EMAX, EMIN 外部入力係数のマトリクス{C}の要素のそれぞれ絶対値最大、最小値
- 4) MN トーラス導体上の全節点数 (=JMAX*(IMAX+1))
- 5) CMAX, CMIN 外部入力係数のマトリクス{C}の実効入力 u^* のそれぞれ最大、最小値
- 6) CMAX0, CMIN0 縮小対象モードに対する実効入力 u^* のそれぞれ最大、最小値
- 7) EVAL(500), EVALRD(500)
それぞれ縮小前、縮小後の固有値
- 8) CTABLE(500) モード毎の可制御性である実効入力 u^*
- 9) II(500) II(J)で、第J縮小後モードの縮小処理前モード番号を示す。この配列順に MODRED 個の縮小処理後モードの処理前番号が記憶されている。
- 10) EPS 可制御性の判定基準値 (単精度)
- 11) MDLIMT(10) 縮小対象とならない最大モード番号 (トーラス導体毎に定められている)
- 12) MREDCT(500) 縮小対象モードか否かの識別パラメータ (縮小対象モードでない場合=1)
- 13) MODRED モード縮小処理の結果生き残ったモード数

サブルーチン SBMAIN

ここでは、処理のための共通作業領域 A (ISCORE) を宣言し、各トラス導体毎に縮小処理を実行するためのモジュールを呼び出す。

[1] フローチャート

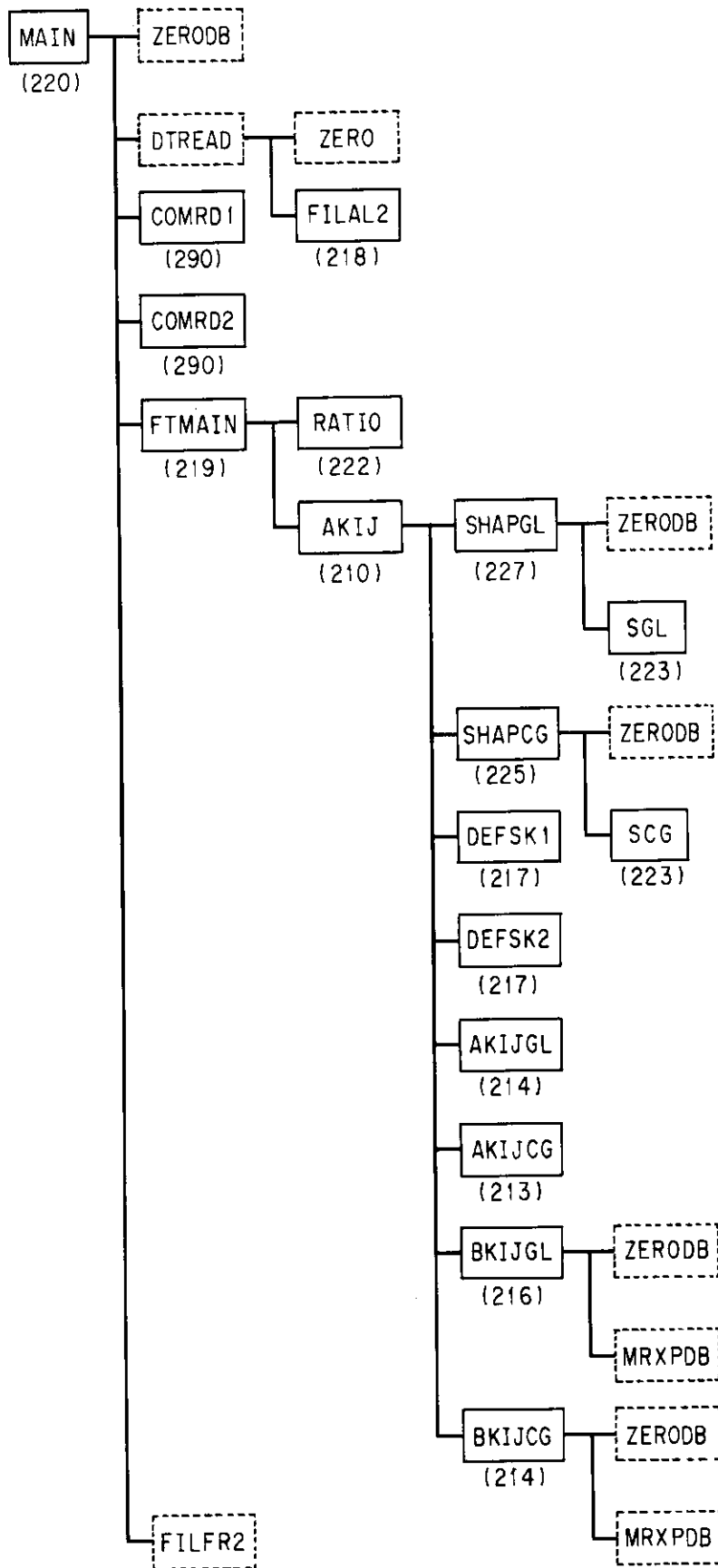


*(FORTRAN 論理機番各 IFLR, IFLW)

〔2〕 主な記号の説明

- | | |
|---------------------------|--|
| 1) ISCORE | 記憶領域 A のコアサイズで, DIMENSION A(××××)と同一にする。 |
| 2) LUSE | 記憶領域 A のコア使用実績値 |
| 3) EVAL(500), EVALRD(500) | それぞれ, モード縮小処理前, 処理後の固有値 (倍精度) |
| 4) A(ISCORE) | 固有ベクトル, 外部起電力係数などの縮小処理に必要な共通記憶領域 (倍精度) |
| 5) IFLR, IFLW | それぞれ, オリジナルファイル, ダンプ用ファイルの FORTRAN 論理機番 |
| 6) NCOND, NCOIL | トーラス導体数: N_t , 外部コイルシリーズ数: N_c |
| 7) MODRED, MMODE | それぞれ, モード縮小処理後, 処理前のトーラス導体毎のモード数 |

A.3.3 EM2DEC プログラム



サブルーチン AKIJ

ここでは、トラス導体間の磁気的結合をモード間結合の形で得るための各種モジュールを呼び出す。まず初めに、以下のプログラミング手法で説明するように、2重表面積分に際しての ϕ 方向積分点の \sin , \cos 値を、これらを必要とする有限要素の全領域に拡張する。

共通の作業領域Aの利用の仕方は、処理対象のトラス導体メッシュ条件や数値積分法により大きく異なるため、下位モジュールの呼び出しに際して常に経済的な領域割当てを行っている。

〔1〕 プログラミング手法

(1) COSPHI(10,400), SINPHI(10,400)の拡張

トラス導体 S' のラベル付COMMON/GSVAL/のCOSPHI, SINPHIは、EDTDECプログラムにおいて、
COSPHI(M,J), SINPHI(M,J) : $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$ の範囲での第 m Legendre 多項式の零点、 ϕ 方向に数えて $\phi = -\Delta\phi$ を起点とする第 j 番目要素に対応する各々 $\cos\phi$, $\sin\phi$ 値、が既に算出されている。このように ϕ 方向積分が $-\Delta\phi \leq \phi \leq \pi + \Delta\phi$ の範囲だけでよかった理由は、EDTDECプログラムにおいては当然のことながら同一トラス導体の2重表面積分で与えられ、また ϕ 方向のメッシュ分割が等間隔であるためであった。このとき、インダクタンス $K_{ij,km}$ の積分は、有限要素回路対 $(\bar{\Omega}_{ij}; \bar{\Omega}_{km})$ の $\bar{\Omega}_{ij}$ を $j=1$ のように固定し、一方で $\bar{\Omega}_{km}$ については、 $m=1, 2, \dots, NMAX$ に対して処理を実行すればよかった。NMAXは、 $\phi=\pi$ におけるメッシュ点番号で $JMAX+(NPHI-1)*(JMAX-1)$ である。

これに対して、EM2DECプログラムで実施する2重表面積分では、一般に導体Sと S' の ϕ 方向メッシュ分割幅が異なることに注意する必要がある。このため、導体Sに対しては、 $j=1, 2, \dots, NA; i=1, 2, \dots, IMAX$ の1次独立な有限要素 Ω_{ij} 、導体 S' に関しては、導体Sの有限要素 Ω_{ij} の各々に対してやはり1次独立な有限要素 Ω'_{km} を考える必要がある。NAは1次独立な有限要素対 $(\Omega; \Omega')$ に関する導体Sの有限要素 Ω の数で、サブルーチン'RATIO'にその求め方についての詳しい説明を与えてある。2.2節で説明したように、導体Sの ϕ 方向要素番地NAに対する導体 S' の1次独立な要素 Ω' の起点番地を $N_\ell(NA)$ とする。このとき、導体 S' についてはこれを含め $NMAX-1$ 個の有限要素が1次独立であり、その結果、導体 S' の1次独立な要素 Ω' の終点番地は $N_\ell(NA) - NMAX - 2$ となる。ただし、この終点番地は $N_\ell(NA) - NMAX - 2 > 2*(NMAX-1)$ のようになるため、第2章、Fig. 2.19の番地の定義にしたがって再定義すると、 $N_\ell(NA) - NMAX$ である。以上の説明から、EDTDECプログラムで既に算出済みの結果を用いて、以下のように導体 S' のCOSPHI, SINPHIを拡張する。ここで、右側の番号はFig. 2.19の番地の定義にしたがい、 $-\pi \leq \phi \leq -\pi + \Delta\phi$ の要素 Ω' を起点番地1とした場合の有限要素 Ω' の ϕ 方向番地である。したがって、拡張すべき導体 S' のCOSPHI(M,J), SINPHI(M,J)の ϕ 方向番地Jは、 $NMAX+2, NMAX+3, \dots, N_\ell(NA)$ となる。ここで、COSPHI(M,J)→COSPHI(M*,J)の拡張においてM*はLegendre多項式の零点に対する順序を逆転させることを意味し、一方、SINPHIの拡張に対しては-SINPHI(M,J)→SINPHI(M*,J)のように同様の順序の逆転とともに符号が反転する。

$\frac{\text{COSPHI}(M, 2*NMAX - N_\ell(NA) + 1)}{\text{COSPHI}(M, 2*NMAX - N_\ell(NA) + 2)}$	$\frac{-\text{SINPHI}(M, 2*NMAX - N_\ell(NA) + 1)}{-\text{SINPHI}(M, 2*NMAX - N_\ell(NA) + 2)}$	$\frac{3*NMAX - N_\ell(NA) - 1}{3*NMAX - N_\ell(NA)}$
⋮	⋮	⋮
$\frac{\text{COSPHI}(M, NMAX - 1)}{\text{COSPHI}(M, NMAX)}$	$\frac{-\text{SINPHI}(M, NMAX - 1)}{-\text{SINPHI}(M, NMAX)}$	$\frac{2*NMAX - 3}{2*(NMAX - 1)}$
$\frac{\text{COSPHI}(M, NMAX + 1)}{\text{COSPHI}(M^*, NMAX + 2)}$	$\frac{\text{SINPHI}(M, NMAX + 1)}{\text{SINPHI}(M^*, NMAX + 2)}$	$\frac{1}{2}$
⋮	⋮	⋮

$$\begin{array}{lll} \text{COSPFI}(M^*, N_\ell(\text{NA}) - 1) & \text{SINPHI}(M^*, N_\ell(\text{NA}) - 1) & N_\ell(\text{NA}) - \text{NMAX} - 1 \\ \text{COSPFI}(M^*, N_\ell(\text{NA})) & \text{SINPHI}(M^*, N_\ell(\text{NA})) & N_\ell(\text{NA}) - \text{NMAX} \end{array}$$

ここで、 μ_0 の諸量は EDTDEC プログラムにて既に算出済みのものである。

(2) 計算式

計算式は (2.70) 式により与えられる。特に、被積分関数が各有限要素の重心値により近似的に表わされる場合には、(2.70) 式は次のように簡単になる。

$$\begin{aligned} \Delta M = & \frac{\mu_0}{4\pi} (V(\text{L}, \text{L})' - V(\text{L}, \text{U})' + V(\text{U}, \text{L})' - V(\text{U}, \text{U})') \\ & \times \{ \alpha (V(\text{L}, \text{L}) - V(\text{L}, \text{U}) + V(\text{U}, \text{L}) - V(\text{U}, \text{U})) + \gamma (V(\text{L}, \text{L}) + V(\text{L}, \text{U}) - V(\text{U}, \text{L}) - V(\text{U}, \text{U})) \} \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} (V(\text{L}, \text{L})' + V(\text{L}, \text{U})' - V(\text{U}, \text{L})' - V(\text{U}, \text{U})') \\ & \times \{ \beta (V(\text{L}, \text{L}) - V(\text{L}, \text{U}) + V(\text{U}, \text{L}) - V(\text{U}, \text{U})) + \delta (V(\text{L}, \text{L}) + V(\text{L}, \text{U}) - V(\text{U}, \text{L}) - V(\text{U}, \text{U})) \}. \end{aligned} \tag{B3.1}$$

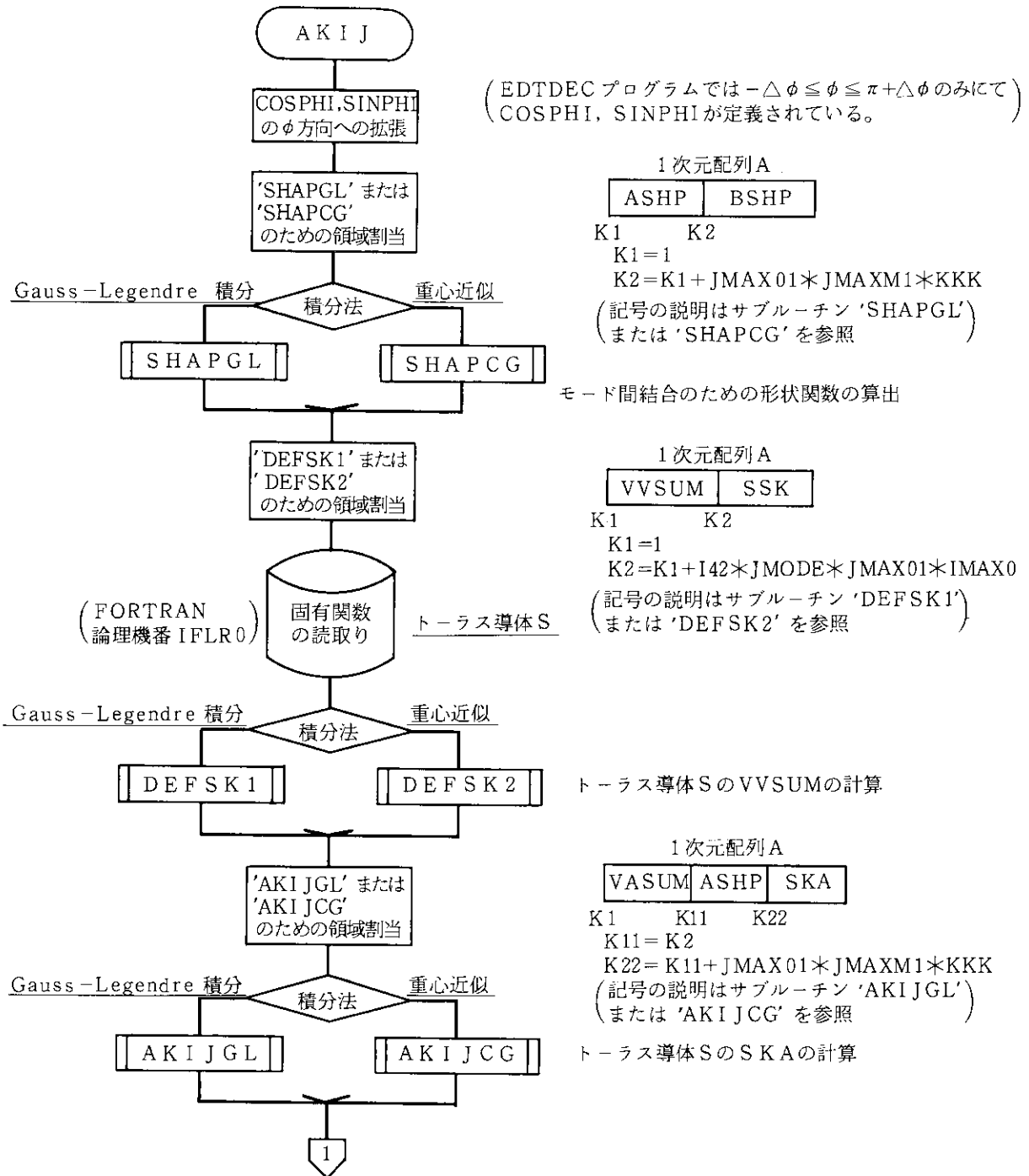
このときの形状関数 α , β , γ , δ は、サブルーチン 'SCG' にて計算される。本ルーチンでは、モード間結合を Gauss-Legendre 数値積分によるか、或いは上記の重心近似によるかの判別を行い処理を進める。

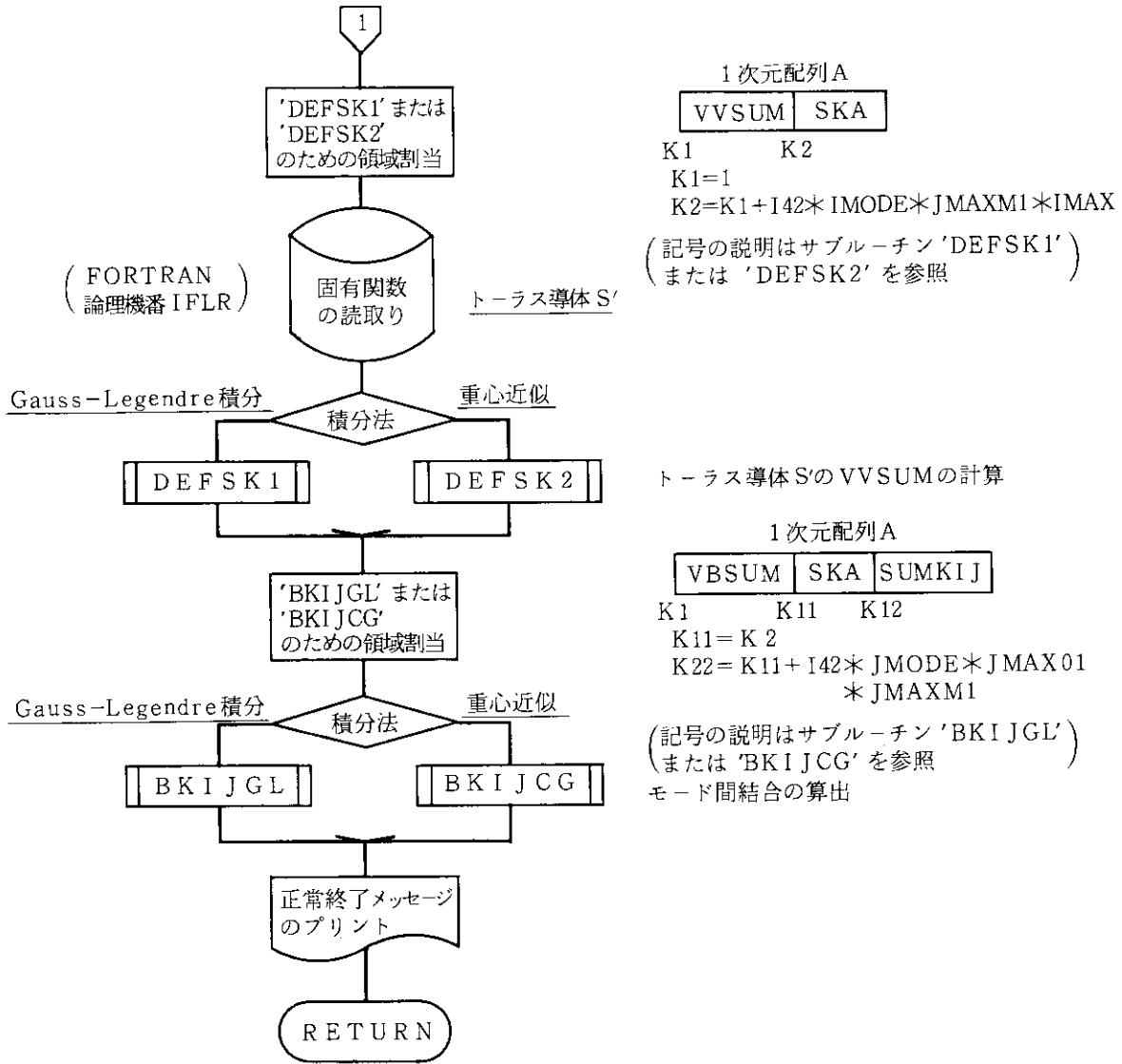
[2] 主な記号の説明

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1) A | 計算のための共通記憶領域 (倍精度) |
| 2) ICOND, JCOND | それぞれ、トーラス導体 S', トーラス導体 S の識別番号 |
| 3) METHOD | 2重表面積分の積分法
$\left\{ \begin{array}{l} = 0: \text{ Gauss-Legendre 積分} \\ = 1: \text{ 重心近似} \end{array} \right.$ |
| 4) NA, NB, NBLOW, JABEQ, NNAB | 1次独立な有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) を求めるための諸量。詳しくは、サブルーチン 'RATIO' の記号の説明を参照のこと。 |
| 5) MJMAX | $\phi = [-\pi, \pi]$ の範囲にある導体 S' の ϕ 方向の有限要素数 (= $2 * \text{NPHI} * (\text{JMAX} - 1)$) |
| 6) COSPHI, SINPHI | Gauss-Legendre 積分に関するトーラス導体 S' の ϕ 方向の Legendre 多項式零点での \cos , \sin 値 (プログラミング手法を参照のこと) |
| 7) JMODE, IMODE | それぞれ、トーラス導体 S, トーラス導体 S' に対して与えられているモード数 |
| 8) MN, MN0 | それぞれ、トーラス導体 S', トーラス導体 S 上の全節点数 (= $(\text{IMAX} - 1) * \text{JMAX}$; = $(\text{IMAX0} + 1) * \text{JMAX0}$) |
| 9) KKK | $\left\{ \begin{array}{l} = 16: \text{ Gauss-Legendre 積分} \\ = 4: \text{ 重心近似} \end{array} \right.$ |
| 10) I42 | $\left\{ \begin{array}{l} = 4: \text{ Gauss-Legendre 積分} \\ = 2: \text{ 重心近似} \end{array} \right.$ |

- 11) JMAXM1, JMAX01 それぞれ, トーラス導体 S', トーラス導体 S の ϕ 方向有限要素数 ($0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$)

[3] フローチャート





サブルーチン AKIJCG

ここでは、サブルーチン 'SHAPCG' において重心近似を用いて求めた形状関数をファイル (FORTRAN 論理機番 10) から読取り、これとサブルーチン 'DEFSK2' で求めたトーラス導体 S の電流関数 VASUM を用いて、トーラス導体 S' の電流関数を含まない次のモード間結合の中間形を得る。

$$\left. \begin{aligned}
 &SKA(1, I, M1, M2) \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \alpha(V(L, L) - V(L, U) + V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \gamma(V(L, L) + V(L, U) - V(U, L) - V(U, U)) \}, \\
 &SKA(2, I, M1, M2) \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \beta(V(L, L) - V(L, U) + V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \delta(V(L, L) + V(L, U) - V(U, L) - V(U, U)) \}.
 \end{aligned} \right\} \tag{B3.2}$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, JMODE; m1 = 1, 2, \dots, JMAX01; m2 = 1, 2, \dots, JMAXM1$ である。SKA(1, I, M1,

M2) および SKA(2, I, M1, M2) は、トラス導体 S の ϕ 方向第 m_1 要素 Ω とトラス導体 S' の ϕ 方向第 m_2 要素 Ω' の有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に対して与えられた、トラス導体 S の第 i 渦電流固有モードに関するそれぞれモード間結合の中間形を意味する。これらの結果は、作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 2) に記憶される。

- | | |
|----------|--|
| 1) ASHP | サブルーチン 'SHAPCG' にて得られた形状関数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ |
| 2) JMODE | トラス導体 S の渦電流固有モード数 |
| 3) VASUM | サブルーチン 'DEFSK2' にて得られたトラス導体 S の電流関数の 1 次結合 |
| 4) SKA | 求めるモード間結合形 |

サブルーチン AKIJGL

ここでは、サブルーチン 'SHAPGL' において Gauss-Legendre 積分公式を用いて求めた形状関数をファイル (FORTRAN 論理機番 10) から読取り、これとサブルーチン 'DEFSK1' で求めたトラス導体 S の電流関数 VASUM を用いて、トラス導体 S' の電流関数を含まない次のモード間結合の中間形を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{SKA}(1, J, M1, M2) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \alpha_{LL}(V(L, L) - V(L, U)) + \alpha_{UL}(V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \gamma_{LL}(V(L, L) - V(U, L)) + \gamma_{UL}(V(L, U) - V(U, U)) \}, \\
 \text{SKA}(2, J, M1, M2) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \alpha_{LU}(V(L, L) - V(L, U)) + \alpha_{UU}(V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \gamma_{LU}(V(L, L) - V(U, L)) + \gamma_{UU}(V(L, U) - V(U, U)) \}, \\
 \text{SKA}(3, J, M1, M2) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \beta_{LL}(V(L, L) - V(L, U)) + \beta_{UL}(V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \delta_{LL}(V(L, L) - V(U, L)) + \delta_{UL}(V(L, U) - V(U, U)) \}, \\
 \text{SKA}(4, J, M1, M2) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \{ \beta_{LU}(V(L, L) - V(L, U)) + \beta_{UU}(V(U, L) - V(U, U)) \\
 &\quad + \delta_{LU}(V(L, L) - V(U, L)) + \delta_{UU}(V(L, U) - V(U, U)) \}.
 \end{aligned}
 \tag{B3.3}$$

ここで、 $j=1, 2, \dots, JMODE; m_1=1, 2, \dots, JMAX01; m_2=1, 2, \dots, JMAXM1$ である。SKA(1, J, M1, M2), SKA(2, J, M1, M2), SKA(3, J, M1, M2) および SKA(4, J, M1, M2) は、トラス導体 S の ϕ 方向第 m_1 要素 Ω とトラス導体 S' の ϕ 方向第 m_2 要素 Ω' の有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に対して与えられた、トラス導体 S の第 j 渦電流固有モードに関するそれぞれモード間結合の中間形を意味する。これらの結果は、作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 2) に記憶される。

- | | |
|----------|--|
| 1) ASHP | サブルーチン 'SHAPGL' にて得られた形状関数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ |
| 2) JMODE | トラス導体 S の渦電流固有モード数 |
| 3) VASUM | サブルーチン 'DEFSK1' にて得られたトラス導体 S の電流関数の 1 次結合 |
| 4) SKA | 求めるモード間結合形 |

サブルーチン BKIJCG

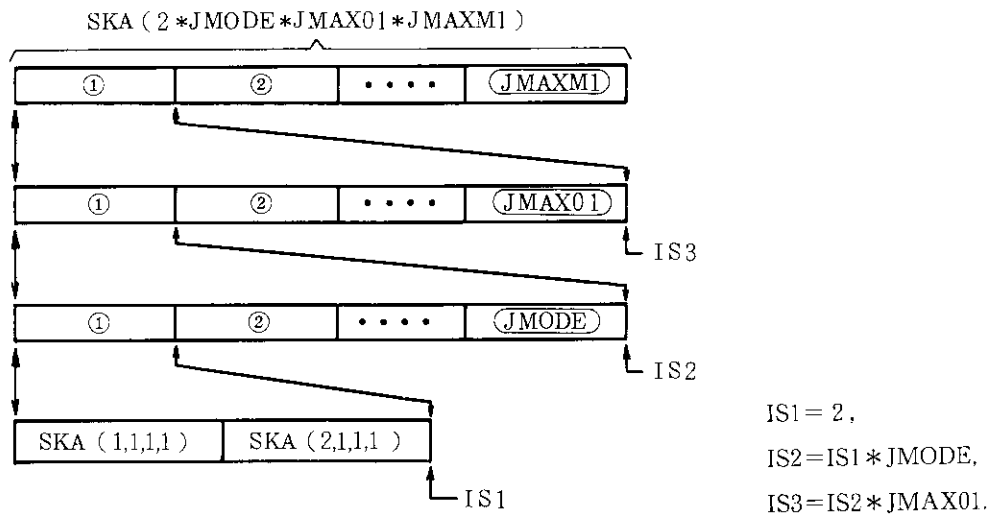
ここでは、トラス導体 S とトラス導体 S' の有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に関するモード間結合 (部分インダクタンス) ΔM を算出し、作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 11) にダンプする。一般には、このモード間結合 Δ

M は 2.2 節 (2.70) 式により与えられるが、有限要素の大きさがトーラス導体の曲率や幾何学的な大きさに比べ充分小さく、更に対となる $(\Omega; \Omega')$ の有限要素が互いに充分離れている場合、形状関数の 2 重表面積分を重心近似で精度良く表わすことができる。このとき、(2.70) 式は

$$\begin{aligned} \Delta M = & \frac{\mu_0}{4\pi} \{ ((V(L,L)' - V(L,U)' + V(U,L)' - V(U,U)') \\ & \times \{ \alpha(V(L,L) - V(L,U) + V(U,L) - V(U,U)) + \gamma((V(L,L) + V(L,U) - V(U,L) - V(U,U)) \\ & + (V(L,L)' + V(L,U)' - V(U,L)' - V(U,U)') \\ & \times \{ \beta(V(L,L) - V(L,U) + V(U,L) - V(U,U)) + \delta(V(L,L) + V(L,U) - V(U,L) - V(U,U)) \} \}, \end{aligned} \tag{B3.4}$$

のように簡単に表現できる。ここでは、トーラス導体 S' の電流関数 V' に関する項以外は全てサブルーチン 'AKIJCG' にて算出済みであって、作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 2) に記憶されている。更に、 V' に相当する項はサブルーチン 'DEFSK2' にて算出済みであるので、本ルーチンでは単に両者の積を計算する。なお、本ルーチンでは、トーラス導体 S' の電流関数 V' に関する項を除く SKA をファイルから読取る際に要する計算時間を短縮するため、記号の説明にあるように、これを 1 次元配列の形でファイルから読取るようにしている。

- 1) JMAXM1, JMAX01 それぞれ、トーラス導体 S' 、トーラス導体 S の ϕ 方向有限要素数 ($0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$)
- 2) JMODE, IMODE それぞれ、トーラス導体 S 、トーラス導体 S' のモード数
- 3) VBSUM(K, M, J, I) トーラス導体 S' の l 方向第 i 、 ϕ 方向第 j 有限要素に対する第 m 渦電流モードの電流関数 1 次結合 (倍精度)
 $VBSUM(1, M, J, I) = V(L, L)' - V(L, U)' + V(U, L)' - V(U, U)'$,
 $VBSUM(2, M, J, I) = V(L, L)' - V(U, L)' + V(L, U)' - V(U, U)'$.
- 4) SUMKIJ(J, I) トーラス導体 S の第 j 渦電流モードとトーラス導体 S' の第 i 渦電流モードとのモード間結合 (倍精度)
- 5) SKA 1 次元配列の形でトーラス導体 S' の電流関数 1 次結合 (モード間結合 (B 3.4) 式参照) で、以下のように記憶されている (倍精度)。



- 6) ITOP1, ITOP3 1次元配列 SKA のための番地インデックスで、この1次元配列を同等の4次の整合配列としたとき、SKA(1, J, M1, M2) に対応する番地を意味する。

サブルーチン BKIJGL

ここでは、トーラス導体 S とトーラス導体 S' の有限要素対(Ω; Ω')に関するモード間結合(部分インダクタンス) ΔM を算出し、作業用のファイル(FORTRAN 論理機番 11) にダンプする。このとき、(2.70)式は

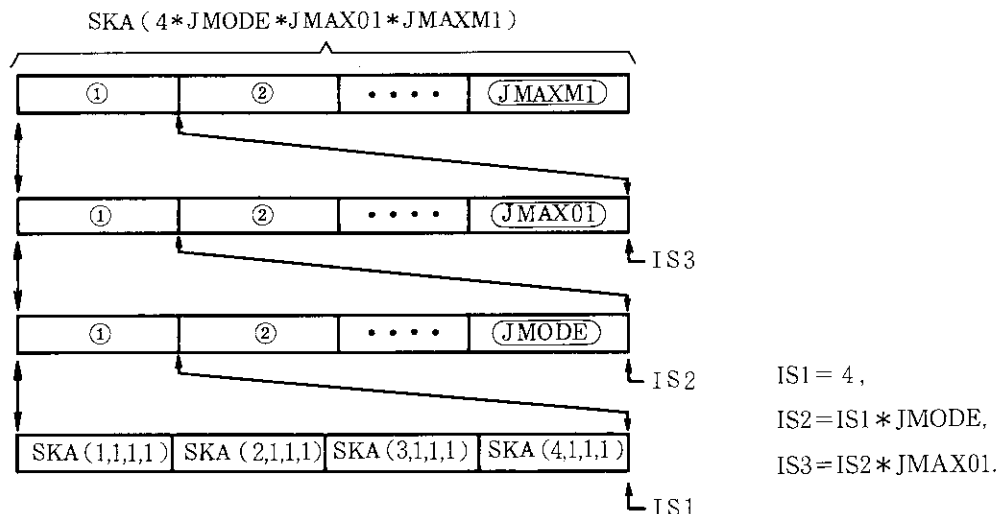
$$\Delta M(\Omega; \Omega') = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma_1}^{L,U} \sum_{\mu_1}^{L,U} \sum_{\sigma_2}^{L,U} \sum_{\mu_2}^{L,U} \{ \varepsilon(\mu_1)\varepsilon(\mu_2)\alpha_{\sigma_1\sigma_2} + \varepsilon(\mu_1)\varepsilon(\sigma_2)\beta_{\sigma_1\mu_2} + \varepsilon(\sigma_1)\varepsilon(\mu_2)\gamma_{\mu_1\sigma_2} - \varepsilon(\sigma_1)\varepsilon(\sigma_2)\delta_{\mu_1\mu_2} \} V(\sigma_1, \mu_1) V'(\sigma_2, \mu_2), \tag{B3.5}$$

である。ここでは、トーラス導体 S' の電流関数 V' に関する項以外は全てサブルーチン 'AKIJGL' にて算出済みであって、作業用ファイル(FORTRAN 論理機番 2) に記憶されている。更に、V' に相当する項はサブルーチン 'DEFK1' にて算出済みであるので、本ルーチンでは単に両者の積を計算する。なお、本ルーチンでは、トーラス導体 S' の電流関数 V' に関する項を除く項 SKA をファイルから読取る際に要する計算時間を短縮するため、記号の説明にあるように、これを1次元配列の形でファイルから読取るようにしている。

- 1) JMAX1, JMAX01 それぞれ、トーラス導体 S', トーラス導体 S の φ 方向有限要素数 (0 ≤ φ ≤ π/N_φ)
- 2) JMODE, IMODE それぞれ、トーラス導体 S, トーラス導体 S' のモード数
- 3) VBSUM(K, M, J, I) トーラス導体 S' の l 方向第 i, φ 方向第 j 有限要素に対する第 m 渦電流モードの電流関数 1 次結合 (倍精度)

$$\begin{aligned} \text{VBSUM}(1, M, J, I) &= V(L, L)' - V(L, U)' \\ \text{VBSUM}(2, M, J, I) &= V(U, L)' - V(U, U)' \\ \text{VBSUM}(3, M, J, I) &= V(L, L)' - V(U, L)' \\ \text{VBSUM}(4, M, J, I) &= V(L, U)' - V(U, U)' \end{aligned}$$

- 4) SUMKIJ(J, I) トーラス導体 S の第 j 渦電流モードとトーラス導体 S' の第 i 渦電流モードとのモード間結合 (倍精度)
- 5) SKA 1次元配列の形でトーラス導体 S' の電流関数 1 次結合 (モード間結合 (B 3.5) 式参照) で、以下のように記憶されている (倍精度)。



6) ITOPI, ITOPI3

1次元配列 SKA のための番地インデックスで、この1次元配列を同等の4次の整合配列としたとき、SKA(1, J, M1, M2) に対応する番地を意味する。

サブルーチン DEFSK1

このルーチンは2重表面積分法が Gauss-Legendre 積分のとき呼び出され、単に以下の計算をする。Fig. B3.1 に示すように、有限要素 Ω_{ij} に関する4頂点の電流関数 $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, L)$, $V(U, U)$ に対し

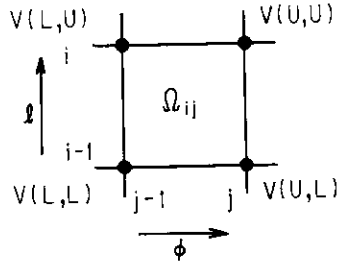


Fig. B3.1 Finite element Ω_{ij} and the nodal values of current function $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, L)$, $V(U, U)$ at the four vertices.

$$\left. \begin{aligned} \text{VVSUM}(1, M, J, I) &= V(L, L) - V(L, U), \\ \text{VVSUM}(2, M, J, I) &= V(U, L) - V(U, U), \\ \text{VVSUM}(3, M, J, I) &= V(L, L) - V(U, L), \\ \text{VVSUM}(4, M, J, I) &= V(L, U) - V(U, U), \end{aligned} \right\} \quad (\text{B3.6})$$

を計算する。ここで、 m は当該トラス導体の渦電流モード番号であり、 l 方向第 i 、 ϕ 方向第 j 有限要素 Ω_{ij} に対する諸量（倍精度）を示す。

- 1) SSK(J, I, M) l 方向第 i (0 を含む)、 ϕ 方向第 j 節点上の第 m 渦電流モードの電流関数 (倍精度)
- 2) VVSUM(4, NMODE, JJ, II) 定義 (B3.6) 式による値 (倍精度)
- 3) NMODE 渦電流モード数
- 4) JJ, II 各々、 $\phi = \pi/N_\phi$ におけるメッシュ番号、 $l = l_{\max}$ におけるメッシュ番号

サブルーチン DEFSK2

このルーチンは2重面積分が重心近似によって行われるとき呼び出され、単に以下の計算をする。Fig. B3.1 に示すように、有限要素 Ω_{ij} に関する4頂点の電流関数 $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, L)$, $V(U, U)$ に対し

$$\left. \begin{aligned} \text{VVSUM}(1, M, J, I) &= V(L, L) - V(L, U) + V(U, L) - V(U, U), \\ \text{VVSUM}(2, M, J, I) &= V(L, L) - V(U, L) + V(L, U) - V(U, U), \end{aligned} \right\} \quad (\text{B3.7})$$

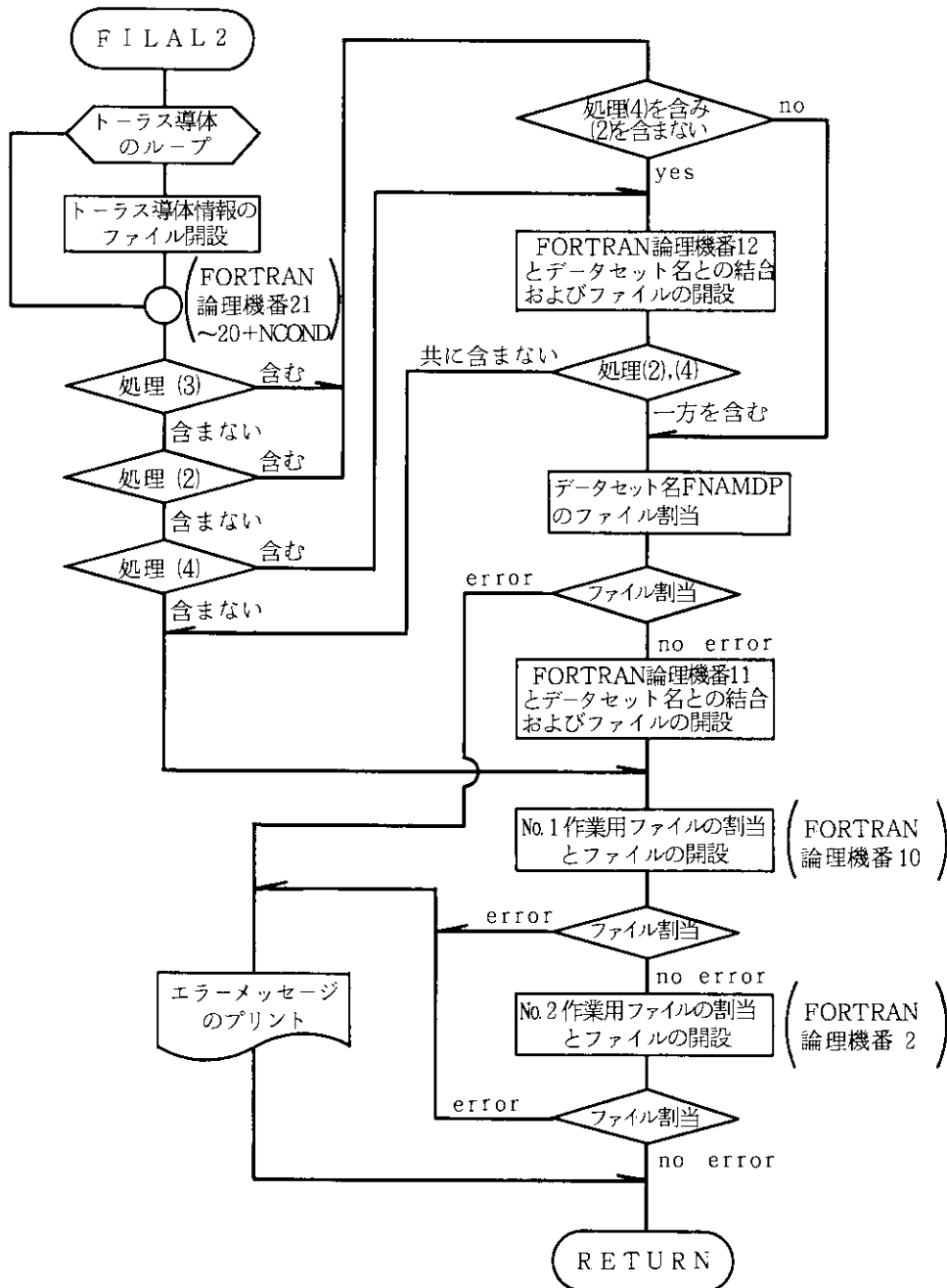
を計算する。ここで、 m は当該トラス導体の渦電流モード番号であり、 l 方向第 i 、 ϕ 方向第 j 有限要素 Ω_{ij} に対する諸量（倍精度）を示す。

- 1) SSK(J, I, M) l 方向第 i (0 を含む)、 ϕ 方向第 j 節点上の第 m 渦電流モードの電流関数 (倍精度)
- 2) VVSUM(2, NMODE, JJ, II) 定義 (B3.7) 式による値 (倍精度)

- 3) NMODE 渦電流モード数
 4) JJ, II 各々, $\phi = \pi/N_\phi$ におけるメッシュ番号, $l = l_{\max}$ におけるメッシュ番号

サブルーチン FILAL2

ここでは, EM2DEC プログラムの実行に必要な全てのファイルの割当てを IPF コマンドを用いて行い, 更に OPEN 文によりデータセット識別番号(FORTRAN論理機番)とデータセット名を結合する。



問題入力のオプションにより必要なファイルが異なるが、ここではモード間結合の計算処理を制御するため、更にファイルの参照またはダンプなどを制御するために入力によるパラメータ IJBLCK を設け、次のようなファイル処理を行う。

第 i トーラス導体と第 j トーラス導体との間のモード間結合に対応するパラメータ IJBLCK(L, J) の値の各々について、複合トーラス導体系のモード間結合の当該非対角ブロック行列に関するデータ処理を、

(1) IJBLCK = 0

参照ファイルからの読取りもダンプファイルへの書き込みもしない。また、モード間結合の計算処理も行わない。

(2) IJBLCK = 1

モード間結合の計算を実行し、ダンプファイルに書込む。

(3) IJBLCK = 2

参照ファイルから読取り、そのデータセットをダンプファイルへ書込む（書き写す）。

(4) IJBLCK = 3

参照ファイルから読取り、このデータセットを再計算により置き換えダンプファイルに書き込む（書き換える）。

のように行う。

サブルーチン FTMAIN

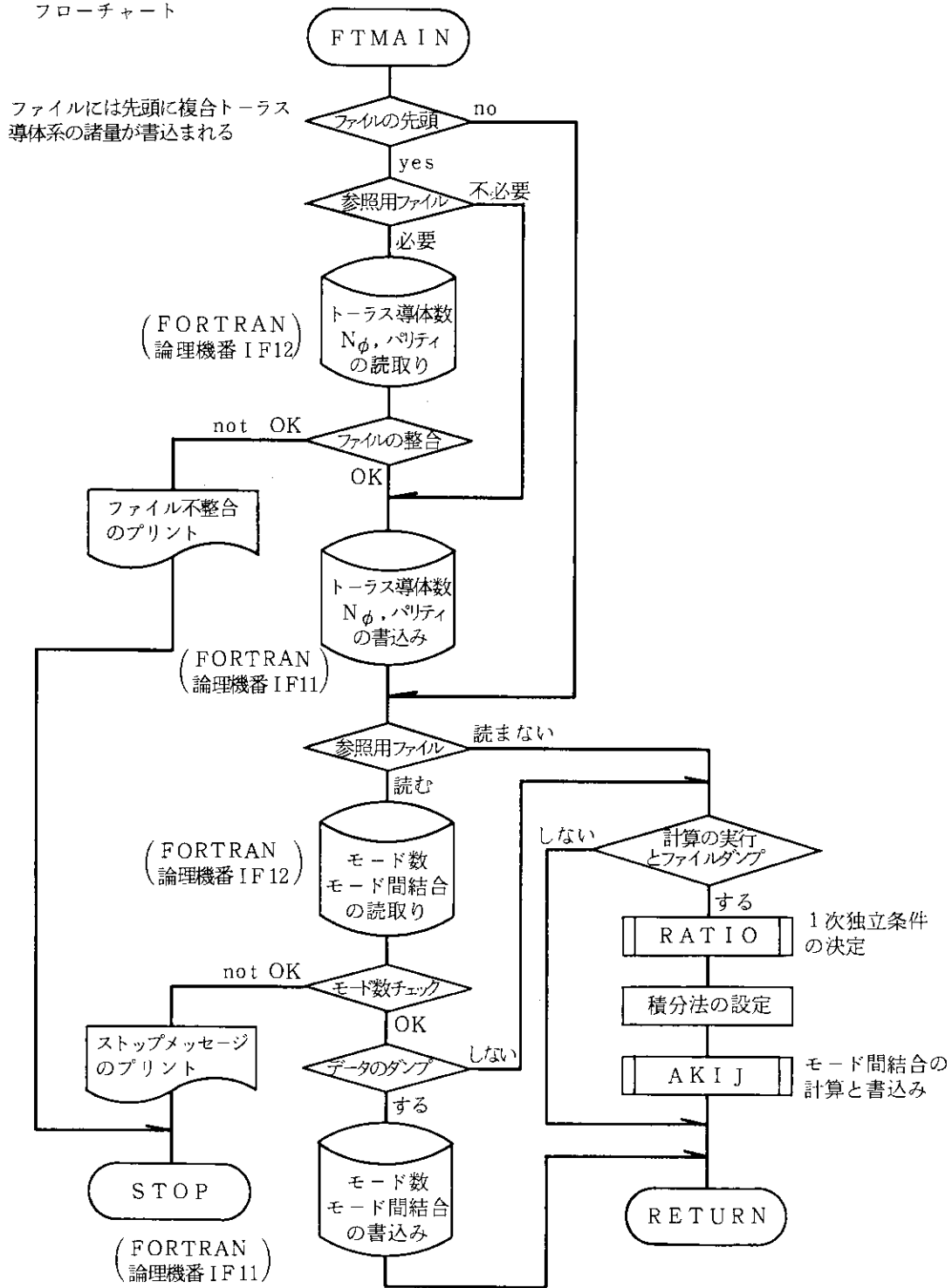
モード間結合を求める際に行う 2 重表面積分は、大量の計算時間を必要とするため、1 回の処理では考慮した複合トーラス導体系全体に対する処理が完結しないことが起り得る。得られた結果はファイルに保存されるが、ABEND 時にはせっかく得たデータセットは全て無効になってしまい計算資源の労費でもあるため、比較的短い計算時間内に処理が完結する 1 組の導体間結合に対する小行列毎にデータを保存し、ABEND 時においても直前までのデータセットを確実に保護しながら段階的に処理を進めるのがよい。すなわち、常にファイルを 2 本用意しておき、1 つを参照用 1 つをダンプ用とし、処理が進む毎に参照用とダンプ用を交互に入れ換える。

ここでは、或るトーラス導体対 ($S_i; S_j$) に対する参照用、ダンプ用各ファイル記録を読取り、ファイルの不整合チェックを実施する。その後、モード間結合を計算するモジュール 'AKIJ' を呼び出す。

[1] 記号の説明

- | | |
|-------------------|--|
| 1) ICOND, JCOND | トーラス導体対 ($S_i; S_j$) のそれぞれ第 i , 第 j トーラス導体識別番号 |
| 2) IMODE, JMODE | それぞれ、トーラス導体 S_i, S_j 上のモード数 |
| 3) IJBLCK(10, 10) | モード間結合の計算処理の実行とファイルの参照またはダンプなどを制御する処理パラメータ。詳しくは、3.3 節入力方法またはサブルーチン 'FILAL2' の記述を参照のこと。 |
| 4) MFLAG(10, 10) | モード間結合計算の表面積分法 (デフォルト値 = 0)
$\begin{cases} = 0: \text{Gauss-Legendre 積分} \\ = 1: \text{重心近似} \end{cases}$ |
| 5) IF11, IF12 | それぞれ、ダンプ用、参照用ファイルの FORTRAN 論理機番 (=11, =12) |
| 6) A | モード間結合などの共通領域 (倍精度) |

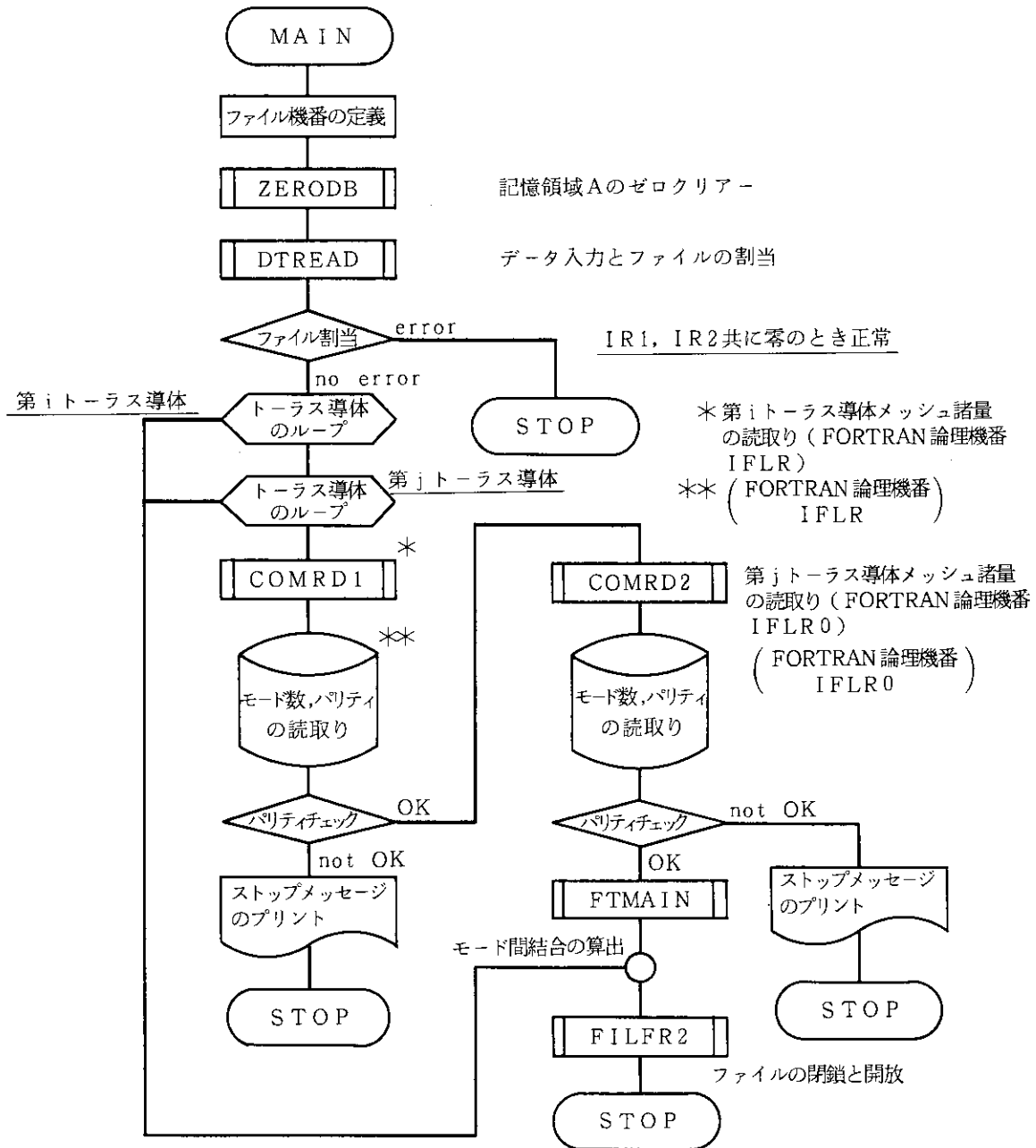
〔2〕 フローチャート



メイン・ルーチン MAIN2

ここでは、トラス導体間結合をモード間結合の形で得るため、処理に必要な領域 A (倍精度配列) を宣言し、各種の計算処理モジュールを呼び出す。求める導体間結合は、それぞれのトラス導体上でその固有ベクトルを基底に取っているため、Fig. 2.16 のような形となる。抵抗行列は導体が互いに電氣的に連っておらず、更に各モードがジュール損失に対して規格化されているので単位行列となっている。本プログラムで求められるモード間結合は、Fig. 2.16 の行列の内の非対角ブロック行列に相当する。

[1] フローチャート



[2] 記号の説明

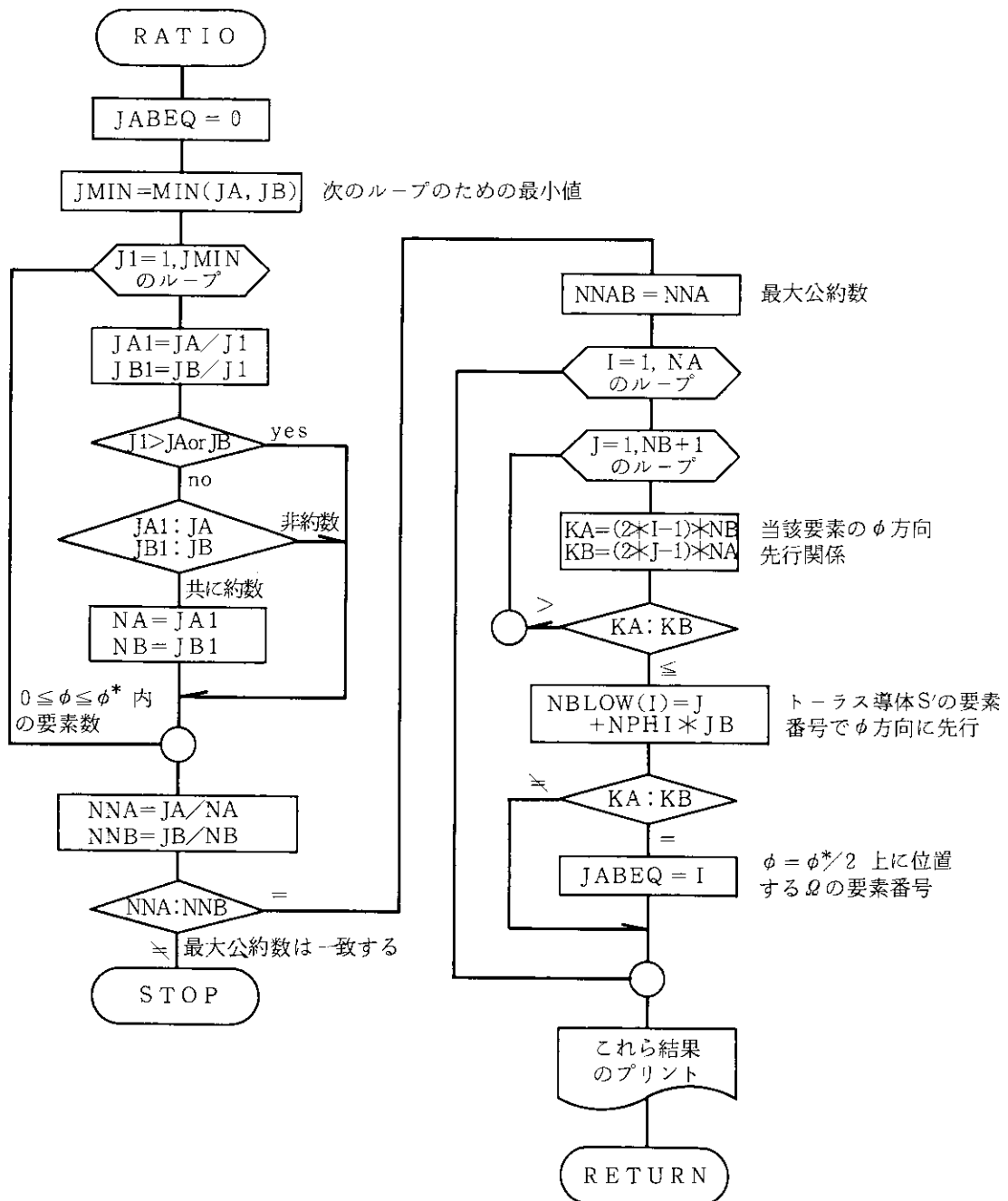
- | | |
|--------------|--|
| 1) ISCORE | 配列 A のサイズ (=ISMAX) |
| 2) A(ISCORE) | 本プログラムでの処理に必要な共通の作業領域 (倍精度) |
| 3) IF10 | 作業用ファイルの FORTRAN 論理機番 (=10) |
| 4) IF11 | 当該ジョブによる結果をダンプするためのファイルの FORTRAN 論理機番 (=11) |
| 5) IF12 | 当該ジョブに対するリスタート用ファイルの FORTRAN 論理機番 (=12) |
| 6) INDX(10) | トーラス導体のメッシュ情報、モードデータなどのファイルの FORTRAN 論理機番 (第 i トーラス導体に対しては = 20 + i) |

- 7) NCOND トーラス導体の数: N_i (最大で 10)
- 8) IFLR, IFLR0 それぞれ, 第 i トーラス, 第 j トーラス導体のファイル FORTRAN 論理機番
- 9) NMODE1, NMODE0 それぞれ, 第 i トーラス導体, 第 j トーラス導体上のモード数

サブルーチン **RATIO**

ここでは, 1次独立な形状関数を求めるにあたり, トーラス導体がそれぞれ ϕ 方向に等分割されていることを利用し, 必要最小限の積分領域を見付ける。これにより手間のかかる 2重表面積分を合理的に実行するための諸量を求める。手法についての詳しい説明は, 2.2 節を参照されたい。

[1] フローチャート



[2] 記号の説明

- 1) JMIN $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ 内の ϕ 方向分割数の最小値
- 2) JA, JB $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ 内のそれぞれトーラス導体 S, トーラス導体 S' 上の有限要素 ϕ 方向数
- 3) NA, NB 各々トーラス導体 S, トーラス導体 S' の $0 \leq \phi \leq \phi^*$ 内にある有限要素 ϕ 方向数
- 4) NNAB $= \pi / (N_\phi \cdot \phi^*)$
- 5) KA, KB 有限要素中心点の ϕ 方向座標 ϕ_a (トーラス導体 S) と ϕ_b (トーラス導体 S') に相当する量
- 6) NBLOW(I) パラメータ N_ϕ で, ϕ 方向メッシュ番地が $i=1, 2, \dots, NA$ の Ω 毎に定義され, 当該有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) での ϕ 方向の先行関係を示す。 Ω と比較し先行する Ω' の内当該 Ω に最も近い $\phi = -\pi$ を起点とする有限要素番地を意味する。
- 7) JABEQ $\phi = \phi^* / 2$ に関して折り返し対称な有限要素対 ($\Omega^*; \Omega'^*$) がもとの有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) と重なる場合の Ω の $\phi = 0$ を起点とする有限要素番地である。重ならない場合, 本変数は必要でない。

サブルーチン SCG

ここでは, 有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に対する形状関数を, それぞれ有限要素の重心量を用いて算出する。もし, 有限要素の大きさがトーラス導体の大きさに比べ充分小さく, また, 曲率が有限要素の大きさに比べ充分大きければ, この近似は精度良く成り立つ。このとき, 2重表面積分は次式のように簡単な形状関数

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^2} \frac{\bar{r}_1\bar{r}_2}{\bar{\rho}_{12}} \overline{\cos(\phi_2 - \phi_1)} & (\equiv \alpha_{\sigma_1\sigma_2}), \\
 \beta &= \frac{\Delta\phi\Delta\ell'}{2^2} \frac{\bar{r}_1}{\bar{\rho}_{12}} \left(\frac{\overline{dr}}{d\ell} \right)_2 \overline{\sin(\phi_2 - \phi_1)} & (\equiv \beta_{\sigma_1\mu_2}), \\
 \gamma &= \frac{\Delta\ell\Delta\phi'}{2^2} \frac{\bar{r}_2}{\bar{\rho}_{12}} \left(\frac{\overline{dr}}{d\ell} \right)_1 \overline{\sin(\phi_1 - \phi_2)} & (\equiv \gamma_{\mu_1\sigma_2}), \\
 \delta &= \frac{\Delta\ell\Delta\ell'}{2^2} \frac{1}{\bar{\rho}_{12}} \left\{ \left(\frac{\overline{dr}}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{\overline{dr}}{d\ell} \right)_2 \overline{\cos(\phi_2 - \phi_1)} + \left(\frac{\overline{dz}}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{\overline{dz}}{d\ell} \right)_2 \right\} & (\equiv \delta_{\mu_1\mu_2}),
 \end{aligned} \right\} \quad (B3.8)$$

により算出することができる。ここで, $\bar{*}$ は重心における * の値を意味する。記号の説明については, サブルーチン 'SGL' を参照のこと。

サブルーチン SGL

ここでは, 有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に対する形状関数を, Gauss-Legendre 積分公式により数値計算する。トーラス導体の表と裏を考慮した Gauss-Legendre 積分による形状関数は, 次の重みつき有限和

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_{\sigma_1\sigma_2} &\doteq \frac{\Delta\phi\Delta\phi'}{2^4} \sum_{11GS}^{1,1Y1} \sum_{12GS}^{1,1Y2} \sum_{11GS}^{1,1X1} P(\sigma_1)_{11GS} \sum_{12GS}^{1,1X2} (P(\sigma_2)_{12GS} H), \\
 \beta_{\sigma_1\mu_2} &\doteq \frac{\Delta\phi\Delta\ell'}{2^4} \sum_{11GS}^{1,1Y1} \sum_{12GS}^{1,1Y2} Q(\mu_2)_{12GS} \sum_{11GS}^{1,1X1} P(\sigma_1)_{11GS} \sum_{12GS}^{1,1X2} P, \\
 \gamma_{\mu_1\sigma_2} &\doteq \frac{\Delta\ell\Delta\phi'}{2^4} \sum_{11GS}^{1,1Y1} Q(\mu_1)_{11GS} \sum_{12GS}^{1,1Y2} \sum_{11GS}^{1,1X1} \sum_{12GS}^{1,1X2} (P(\sigma_2)_{12GS} Q), \\
 \delta_{\mu_1\mu_2} &\doteq \frac{\Delta\ell\Delta\ell'}{2^4} \sum_{11GS}^{1,1Y1} Q(\mu_1)_{11GS} \sum_{12GS}^{1,1Y2} Q(\mu_2)_{12GS} \sum_{11GS}^{1,1X1} \sum_{12GS}^{1,1X2} S,
 \end{aligned} \right\} \quad (B3.9)$$

により計算される。ここで、 $P = 1$ (even パリティのとき)、 $P = -1$ (odd パリティのとき) とすると

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H} &= \left(\frac{1}{\rho_{12}} + \frac{P}{\rho_{12}^*} \right) r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) W_{11GS}^{Y1} W_{12GS}^{Y2} W_{11GS}^{X1} W_{12GS}^{X2}, \\ \mathbf{P} &= \left(\frac{1}{\rho_{12}} + \frac{P}{\rho_{12}^*} \right) r_1 \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \sin(\phi_2 - \phi_1) W_{11GS}^{Y1} W_{12GS}^{Y2} W_{11GS}^{X1} W_{12GS}^{X2}, \\ \mathbf{Q} &= \left(\frac{1}{\rho_{12}} + \frac{P}{\rho_{12}^*} \right) \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 r_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) W_{11GS}^{Y1} W_{12GS}^{Y2} W_{11GS}^{X1} W_{12GS}^{X2}, \\ \mathbf{S} &= \left\{ \left(\frac{1}{\rho_{12}} + \frac{P}{\rho_{12}^*} \right) \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dr}{d\ell} \right)_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + \left(\frac{1}{\rho_{12}} - \frac{P}{\rho_{12}^*} \right) \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_1 \left(\frac{dz}{d\ell} \right)_2 \right\} \\ &\quad \times W_{11GS}^{Y1} W_{12GS}^{Y2} W_{11GS}^{X1} W_{12GS}^{X2}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{B3.10})$$

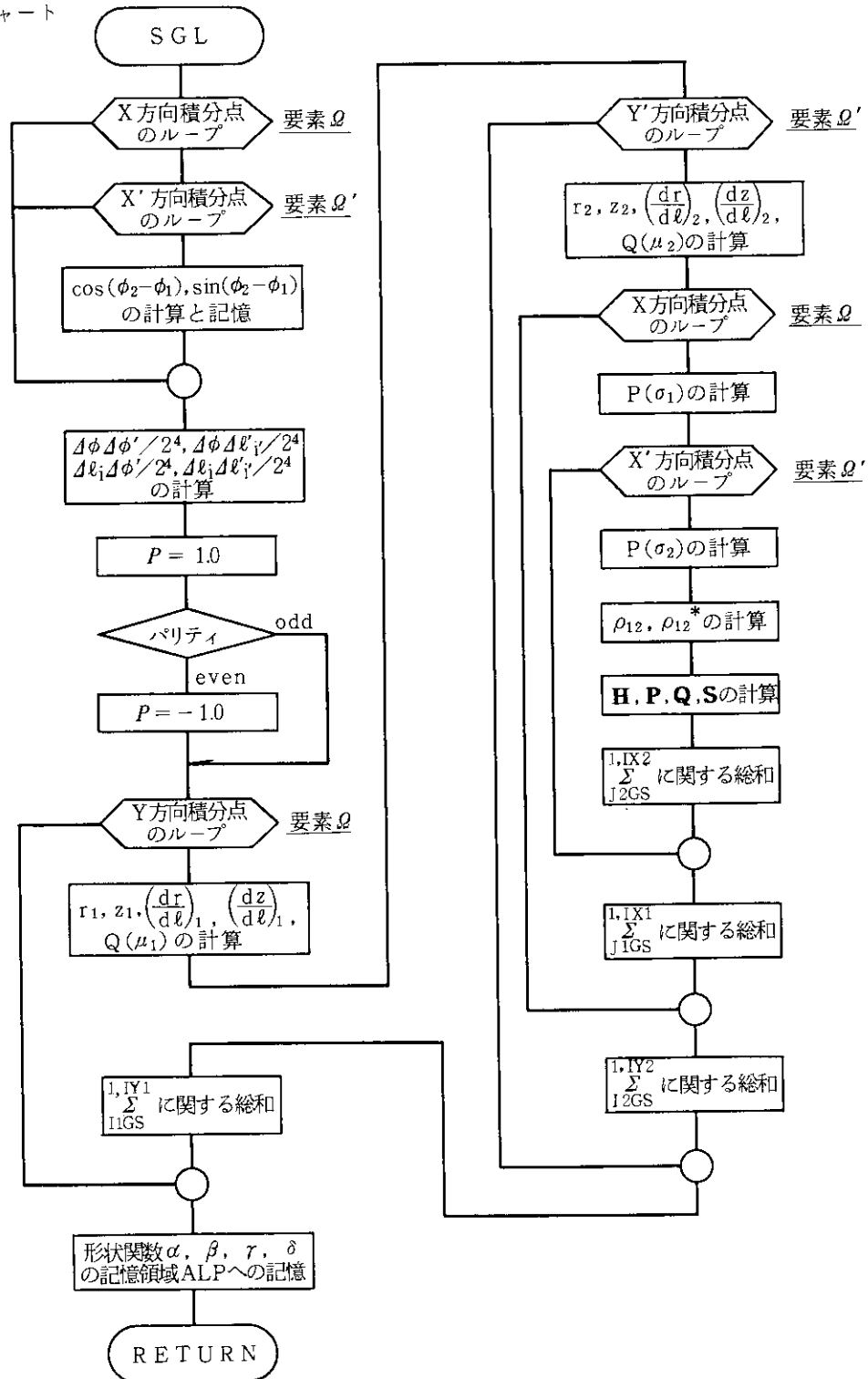
である。

〔1〕 主な記号の説明

- | | |
|---|--|
| 1) COS12(10, 10),
SIN12(10, 10) | Ω, Ω' 毎の ϕ 方向 Legendre 多項式の零点に対する $\cos(\phi_2 - \phi_1), \sin(\phi_2 - \phi_1)$ |
| 2) DP0DP, DP0DL, DL0DP, DL0DL | それぞれ, $\Delta\phi\Delta\phi'/2^4, \Delta\phi\Delta\ell'/2^4, \Delta\ell\Delta\phi'/2^4, \Delta\ell\Delta\ell'/2^4$ |
| 3) SIGN | <p>導体 S' の表と裏では積分の符号が電流関数のパリティにより反転する。</p> $\begin{cases} = 1.0 & : \text{ odd パリティ} \\ = -1.0 & : \text{ even パリティ} \end{cases}$ |
| 4) WY0(10), WY(10) | それぞれ, トーラス導体 S とトーラス導体 S' に対する Gauss-Legendre 積分の重み (ℓ 方向積分) |
| 5) RGS0(10), ZGS0(10) | トーラス導体 S に対する Legendre 多項式の零点の (r, z) 座標 |
| 6) DRLGS0(10),
DZLGS0(10) | トーラス導体 S に対する Legendre 多項式の零点上の $dr/d\ell, dz/d\ell$ |
| 7) YW1(10), Y1(10) | トーラス導体 S に対するそれぞれ $Q(L), Q(U)$ |
| 8) RGS(10), ZGS(10) | トーラス導体 S' に対する Legendre 多項式の零点の (r, z) 座標 |
| 9) DRLGS(10), DZLGS(10) | トーラス導体 S' に対する Legendre 多項式の零点上の $dr/d\ell, dz/d\ell$ |
| 10) YM2(10), Y2(10) | トーラス導体 S' に対するそれぞれ $Q(L), Q(U)$ |
| 11) RZ12, RZS12 | それぞれ, $r_1^2 + r_2^2 + (z_1 - z_2)^2, r_1^2 + r_2^2 + (z_1 + z_2)^2$ |
| 12) R1R2, R1RL2, RL1R2,
RL1RL2, ZL1ZL2 | それぞれ, $r_1 r_2, r_1 (dr/d\ell)_2, r_2 (dr/d\ell)_1, (dr/d\ell)_1 (dr/d\ell)_2, (dz/d\ell)_1 (dz/d\ell)_2$ |
| 13) WX0(10), WX(10) | それぞれ, トーラス導体 S とトーラス導体 S' に対する Gauss-Legendre 積分の重み (ϕ 方向積分) |
| 14) XM1(10), X1(10) | トーラス導体 S に対するそれぞれ $P(L), P(U)$ |
| 15) XM2(10), X2(10) | トーラス導体 S' に対するそれぞれ $P(L), P(U)$ |
| 16) R12 | $\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + (z_1 - z_2)^2}$ |
| 17) RS12 | $\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + (z_1 + z_2)^2}$ |

18) ALP(1), ..., ALP(16) それぞれ順に, $\alpha_{LL}, \alpha_{LU}, \alpha_{UL}, \alpha_{UU}, \beta_{LL}, \beta_{LU}, \beta_{UL}, \beta_{UU}, \gamma_{LL}, \gamma_{LU}, \gamma_{UL}, \gamma_{UU}, \delta_{LL}, \delta_{LU}, \delta_{UL}, \delta_{UU}$ の形状関数用配列

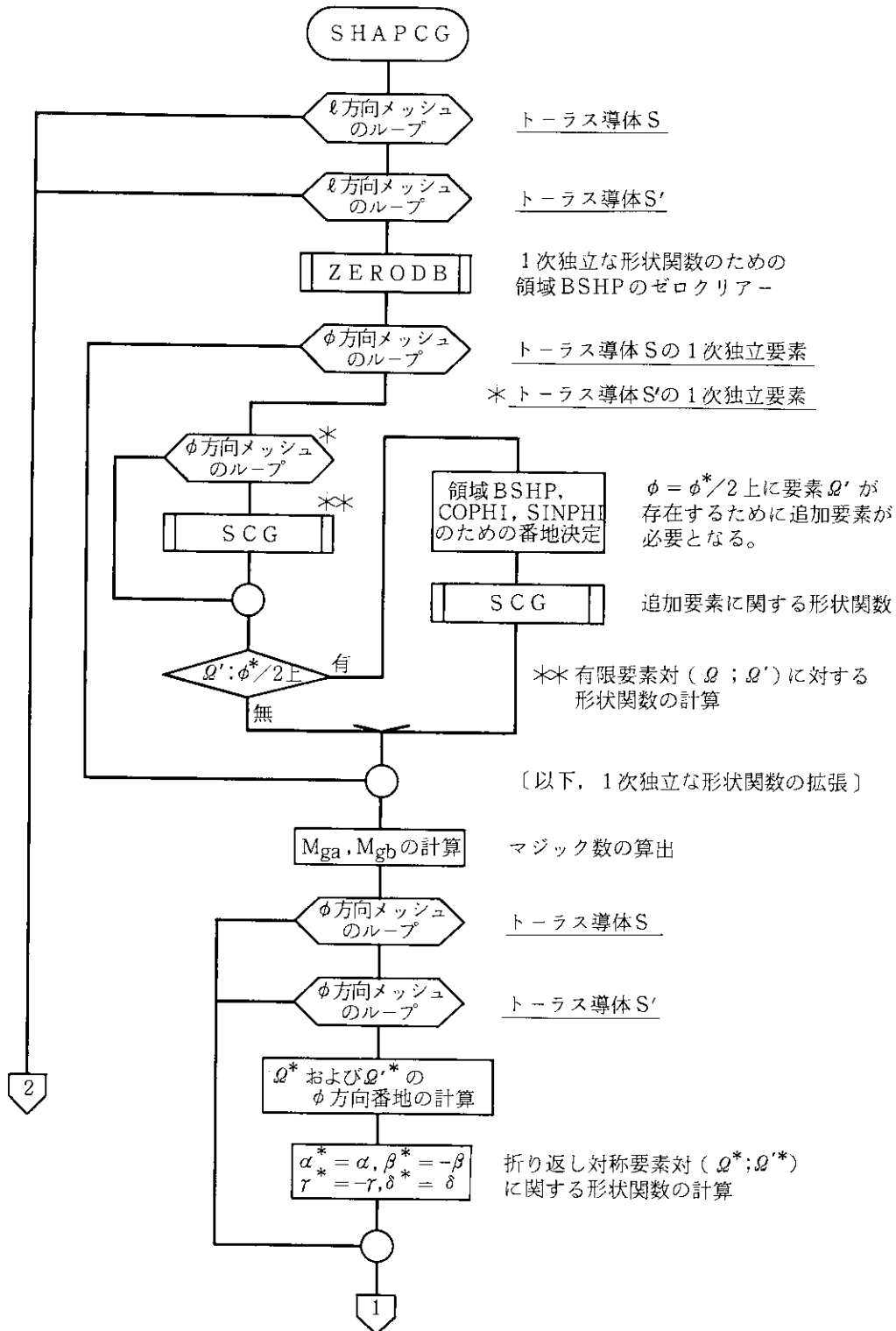
(2) フローチャート

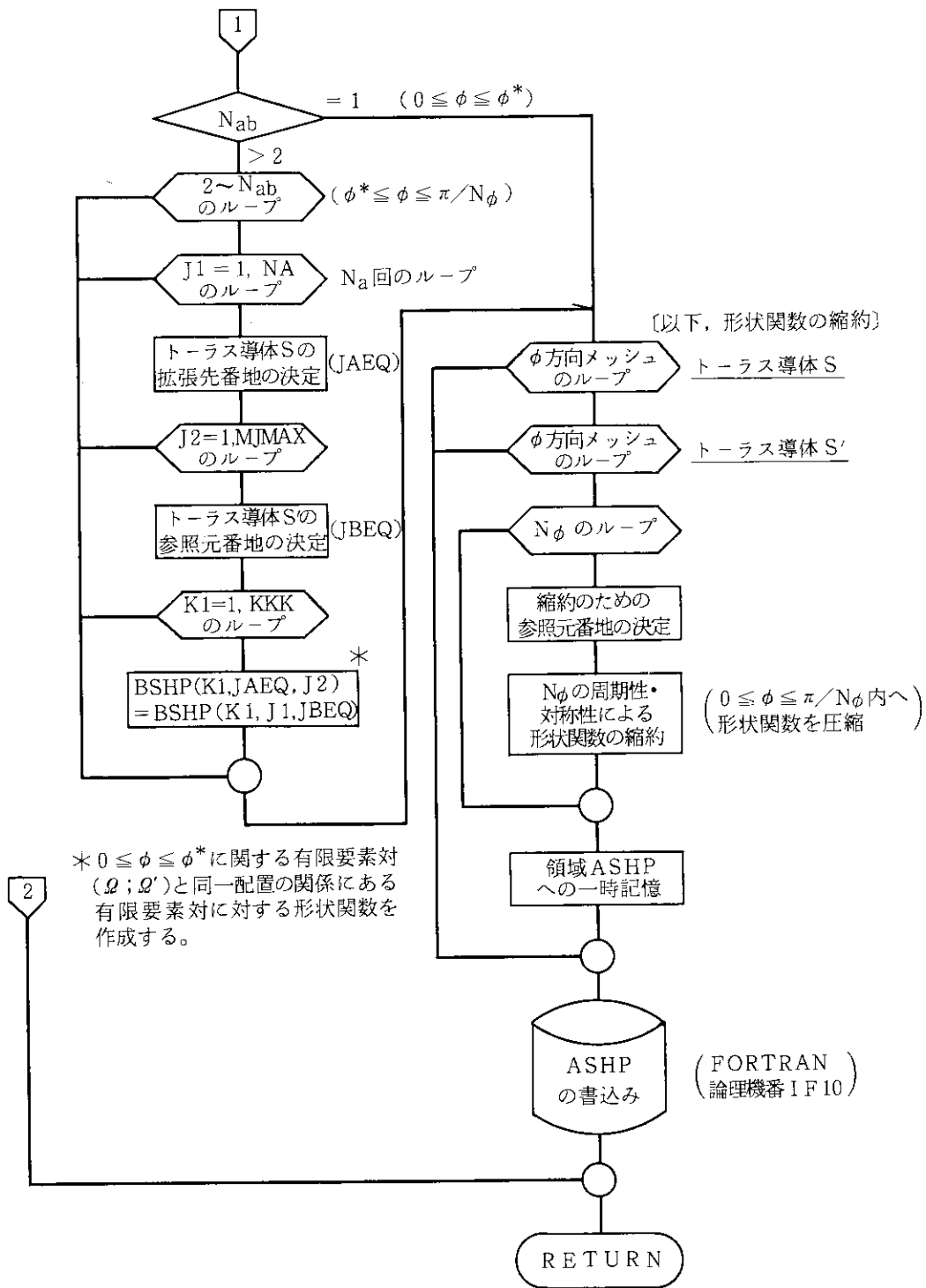


サブルーチン SHAPCG

ここでは、モード間結合を求める上で必要となる電流関数に依存しない形状関数を重心近似により求め、作業

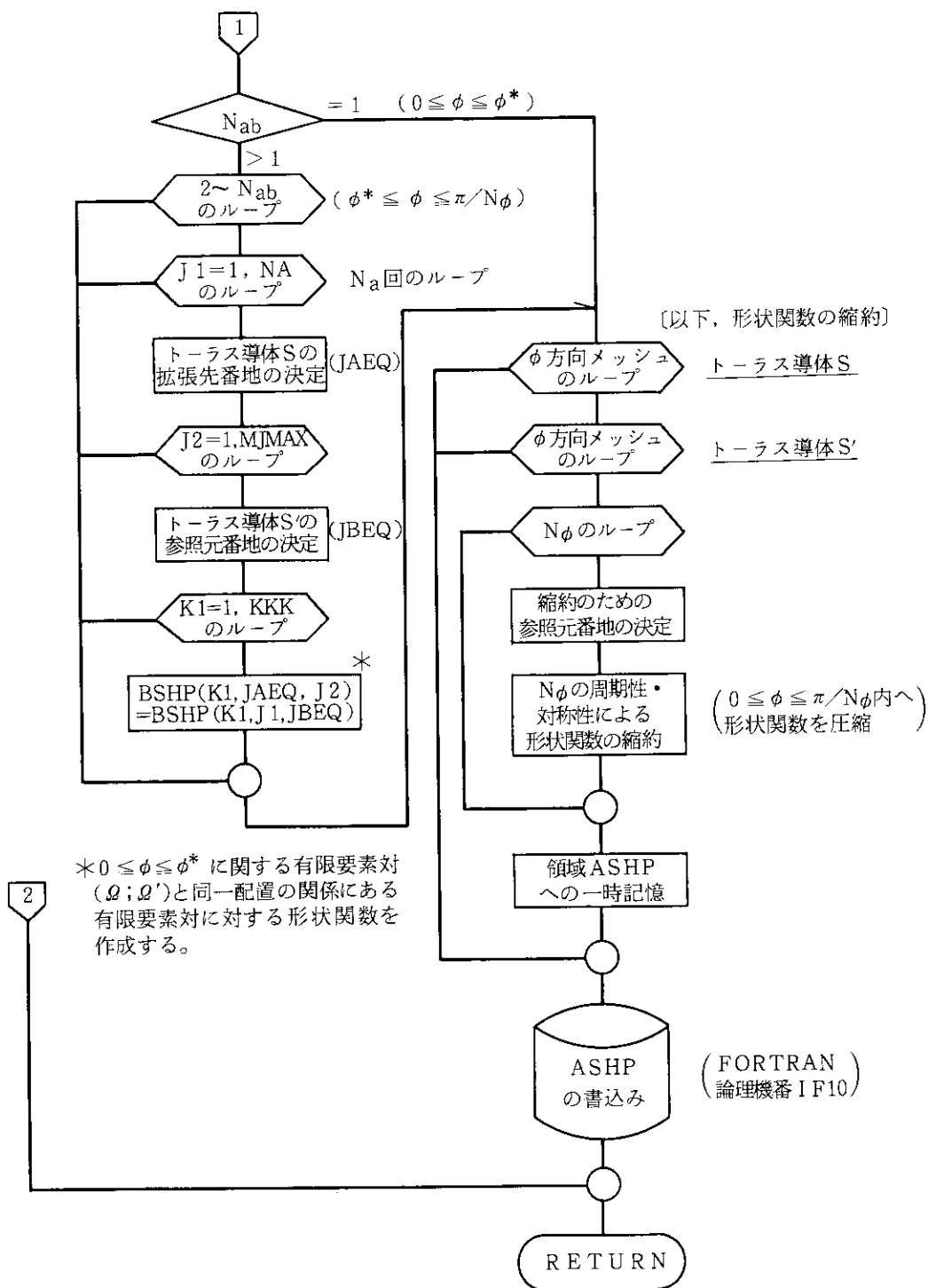
用ファイル (FORTRAN 論理機番 10) に記憶する。サブルーチン 'SHAPGL' での処理と同様に、初めにサブルーチン 'RATIO' にて求めた積分を必要最小限にする条件を用いて 1 次独立な形状関数を求める。その後、これらを用いてトーラス導体の全領域に形状関数を拡張する。最後に、トーラス導体全領域に拡張された形状関数をトーラス導体 S とトーラス導体 S' の最小の計算対象領域である $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$; $z \geq 0$ の範囲に縮約させる。この縮約処理にあたっては、電流関数のトロイダル方向の対称性や周期性、更にトーラス赤道面上下に関する電流関数のパリティ条件を用いる。1 次独立な形状関数の見付け方やこれを生成元として系全体の形状関数を求める方法、更にパリティ条件や幾何学的性質を用いた縮約法については、2.2 節を参照願いたい。本ルーチンの記号の説明については、サブルーチン 'SHAPGL' を参照のこと。





サブルーチン SHAPGL

ここでは、モード間結合を求める上で必要となる電流関数に依存しない形状関数を Gauss-Legendre 型の 2 重表面積分により求め、作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 10) に記憶する。初めに、サブルーチン 'RATIO' にて求めた積分を必要最小限にする条件を用いて 1 次独立な形状関数を求める。その後、これらを用いてトーラス導体の全領域に形状関数を拡張する。最後に、トーラス導体全領域に拡張された形状関数をトーラス導体 S と



〔2〕 記号の説明

1) ASHP(KKK, JMAX01, JMAXM1)

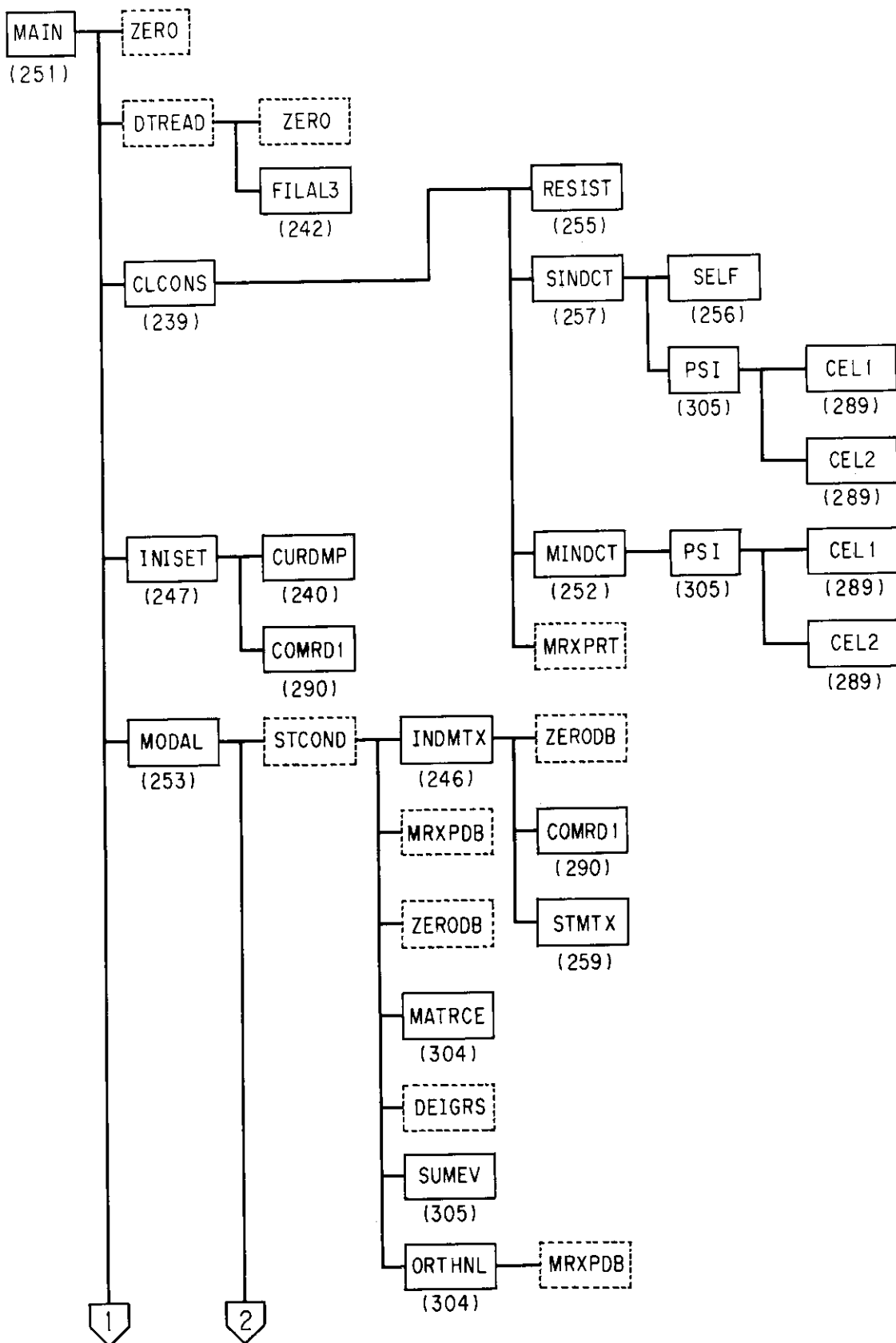
番地 $JA = 1, 2, \dots, JMAX01; JB = 1, 2, \dots, JMAXM1$ で指定される $0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$ 内の有限要素対 ($\Omega; \Omega'$) に対する形状関数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ (倍精度)

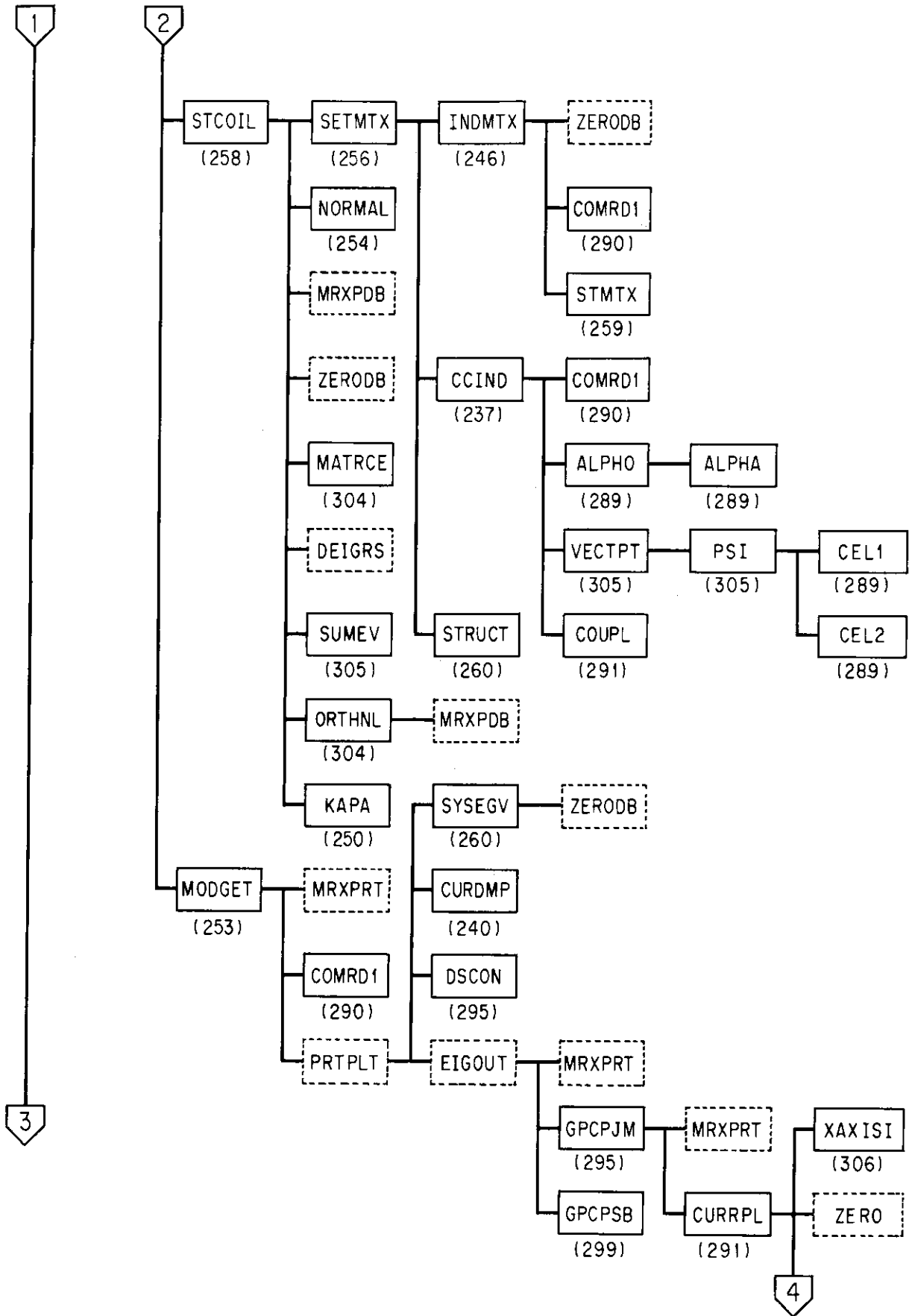
2) BSHP(KKK, JMAX01, MJMAX)

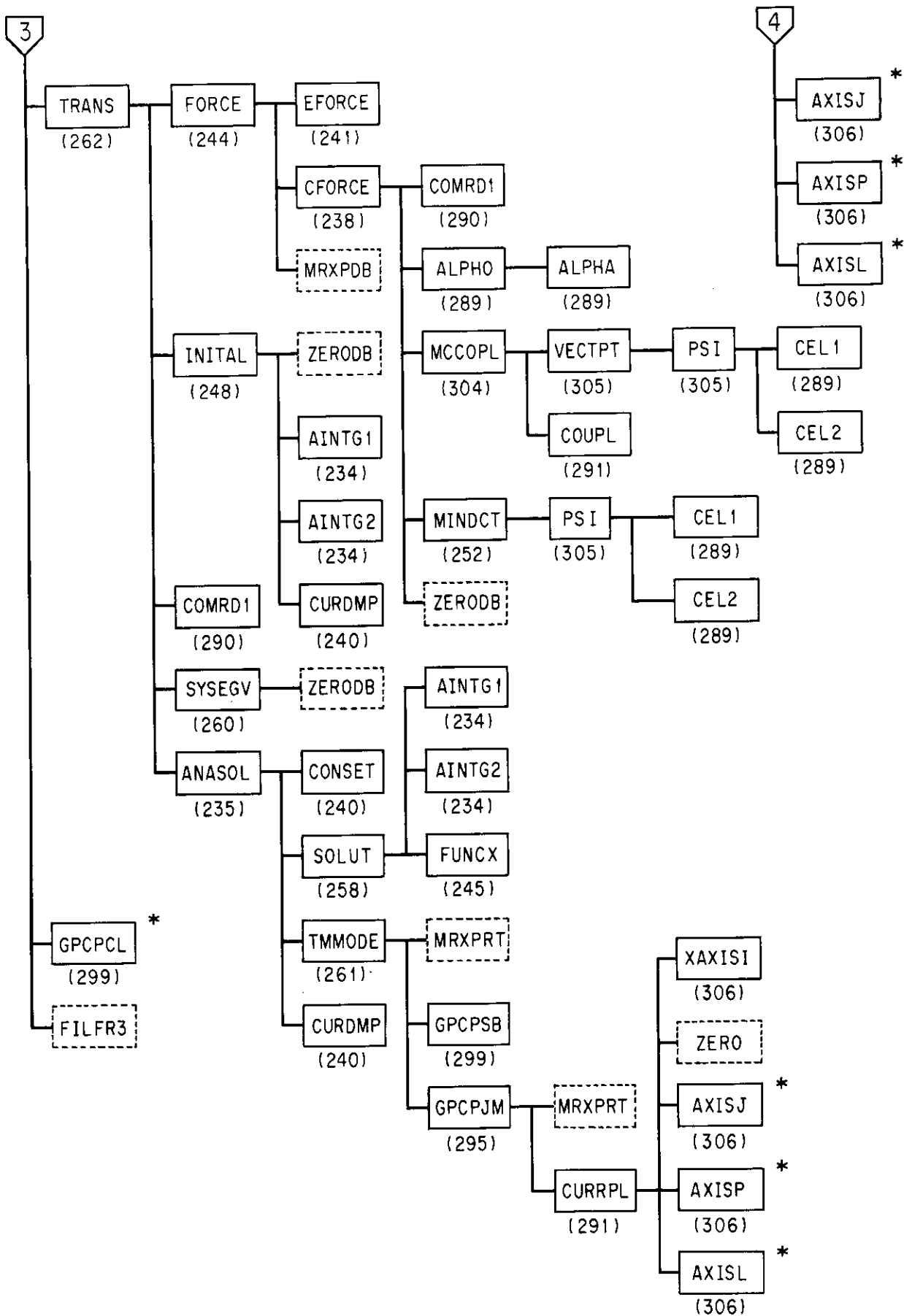
ASHP 計算のための作業領域。 Ω' に対しては $-\pi \leq \phi \leq \pi$ の全領域を含む (倍

- 精度)
- 3) JMAX01, JMAXM1 JMAX 01 = JMAX1 - 1, JMAXM1 = JMAX - 1
 - 4) MJMAX = 2 * NPFI * JMAXM1
 - 5) NA, NB それぞれ, トーラス導体 S とトーラス導体 S' の $0 \leq \phi \leq \phi^*$ 内にある有限要素 ϕ 方向数
 - 6) MGICA, MAICB $\phi = \phi^*/2$ に関して折り返し対称な有限要素対 (Ω^* ; Ω'^*) の Ω^* の番地を求めるためのマジック数 (=NA+1), および Ω'^* の番地を求めるためのマジック数 (=NB+MJMAX+1)
 - 7) NNAB = $\pi / (N_\phi \cdot \phi^*)$
 - 8) NBLOW(25) パラメータ N_ϕ で ϕ 方向メッシュ番地が $i = 1, 2, \dots, NA$ の Ω 毎に定義され, 当該有限要素対 (Ω ; Ω') での ϕ 方向の先行関係を示す。 Ω と比較し先行する Ω' の内当該 Ω に最も近い $\phi = -\pi$ を起点とする有限要素番地を意味する。
 - 9) JABEQ $\phi = \phi^*/2$ に関して折り返し対称な有限要素対 (Ω^* ; Ω'^*) がもとの有限要素対 (Ω ; Ω') と重なる場合の Ω の $\phi = 0$ を起点とする有限要素番地である。重ならない場合, 本変数は必要でない。
 - 10) XM1(10), X1(10) トーラス導体 S に対するそれぞれ $P(L), P(U)$
 - 11) YM1(10), Y1(10) トーラス導体 S に対するそれぞれ $Q(L), Q(U)$
 - 12) XM2(10), X2(10) トーラス導体 S' に対するそれぞれ $P(L), P(U)$
 - 13) YM2(10), Y2(10) トーラス導体 S' に対するそれぞれ $Q(L), Q(U)$
 - 14) JB0, JA0 それぞれ, トーラス導体 S' の Ω'^* とトーラス導体 S の Ω^* の ϕ 方向拡張先番地。
 - 15) NP1, MP1 形状関数の縮約時に用いるそれぞれ対称性に基づく縮約要素 Ω'^* ; 周期性に基づく縮約要素 Ω' の ϕ 方向参照番地。

A.3.4 EM3DEC プログラム







関数副プログラム AINTG1

ここでは、モードに外部起電力 $e(t)$ が与えられたときのモードの時間応答 $x(t)$ を求める。ここで

$$\lambda \dot{x}(t) + x(t) = e(t), \quad (\text{B4.1})$$

であり、外部起電力として

$$e(t) = C_1 + C_2 + C_3 \{\exp(-t/\tau) - 1\} + C_4 \sin(\omega_1 t) + C_5 \{\cos(\omega_2 t) - 1\}, \quad (\text{B4.2})$$

を考える。 $C_1 \sim C_5$, τ , ω_1 , ω_2 は定数で、コイルシリーズ、時間区分領域毎に与えられている。なお、時刻 t は当該時間区分領域内における局所時刻であることに注意されたい。(B4.1)式一般解は

$$x(t) = x(0) \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) + \frac{1}{\lambda} \int_0^t e(t') \exp\left(\frac{t' - t}{\lambda}\right) dt', \quad (\text{B4.3})$$

にて与えられるが、ここで、(B4.3)式右辺の第2項のみを計算すると、

$$\left. \begin{aligned} & C_1 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} + C_2 t + C_2 \lambda \left\{ \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) - 1 \right\} \\ & + \frac{C_3}{\tau - \lambda} \left\{ \lambda - \tau + \tau \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) - \lambda \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} \\ & - \frac{C_4}{1 + \lambda^2 \omega_1^2} \left\{ \omega_1 \lambda \cos(\omega_1 t) - \sin(\omega_1 t) - \omega_1 \lambda \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} \\ & + \frac{C_5}{1 + \lambda^2 \omega_2^2} \left\{ \omega_2 \lambda \sin(\omega_2 t) + \cos(\omega_2 t) - (1 + \lambda^2 \omega_2^2) \lambda^2 \omega_2^2 \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B4.4})$$

となる。ただし、この式の第4項はプログラミング上の問題から、 $\tau = \lambda$ のときのみ、 $C_3 \{-1 + \exp(-t/\tau) \cdot (1 + t/\tau)\}$ と書き換えておく。

関数副プログラム AINTG2

ここでは、外部コイルシリーズに電流が与えられる場合に、電流 $i(t)$ によるモードの時間応答を計算する。ここで、

$$\lambda \dot{x}(t) + x(t) = \dot{i}(t), \quad (\text{B4.5})$$

であり、コイル電流が

$$\dot{i}(t) = C_1 + C_2 t + C_3 \{\exp(-t/\tau) + 1\} + C_4 \sin(\omega_1 t) + C_5 \{\cos(\omega_2 t) - 1\}, \quad (\text{B4.6})$$

により与えられるとする。 $C_1 \sim C_5$, τ , ω_1 , ω_2 は定数で、コイルシリーズ、時間区分領域毎に与えられている。なお、時刻 t は当該時間区分領域内における局所時刻であることに注意されたい。各モードの初期値は常に零とし、実際の起電力係数についてはサブルーチン 'SOLUT' にて考慮する。

(B4.5)式一般解は

$$x(t) = \frac{1}{\lambda} \int_0^t \dot{i}(t') \exp\left(\frac{t' - t}{\lambda}\right) dt', \quad (\text{B4.7})$$

にて与えられ、(B4.6)式より $\dot{i}(t)$ は

$$\dot{i}(t) = C_2 - \frac{C_3}{\tau} \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + C_4 \omega_1 \cos(\omega_1 t) - C_5 \omega_2 \sin(\omega_2 t), \quad (\text{B4.8})$$

である。したがって、

$$\begin{aligned}
 x(t) = & C_2 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right\} - \frac{C_3}{\lambda - \tau} \left\{ \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) - \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} \\
 & + \frac{C_4 \omega_1}{1 + \lambda^2 \omega_1^2} \left\{ \omega_1 \lambda \sin(\omega_1 t) + \cos(\omega_1 t) - \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\} \\
 & + \frac{C_5 \omega_2}{1 + \lambda^2 \omega_2^2} \left\{ \omega_2 \lambda \cos(\omega_2 t) - \sin(\omega_2 t) - \omega_2 \lambda \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right\},
 \end{aligned} \tag{B4.9}$$

となる。この式の第2項はプログラミング上の問題から、 $\tau = \lambda$ のときのみ、 $-C_3 t / \lambda^2 \exp(-t/\lambda)$ と書き換えておく。

サブルーチン ANASOL

ここでは、当該トーラス導体上の渦電流を時間追跡するための各種モジュールを呼び出す。求解に先立ち、サブルーチン 'CONSET' にて全時間ステップの決定、各種定数の設定、パラメータの初期化などの準備を行う。時間ステップのループの中では、最初にサブルーチン 'SOLUT' にてモードの時間応答を算出し、その後サブルーチン 'TMMODE' にてモード合成を行う。

〔1〕 記号の説明

- 1) VIJ 外部受動コイルシリーズを含む当該トーラス導体の渦電流固有関数 (倍精度)
- 2) LAMDA 固有値 (倍精度)
- 3) BM 渦電流モードに対する外部起電力係数行列 (倍精度) で、記憶内容を Fig. B 4.1 に示す。

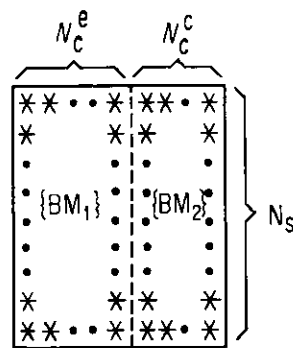


Fig. B4.1 Two-dimensional matrix of area BM for the coefficient of electromotive forces on the eigen modes of eddy current. The {BM₁} is the submatrix for voltage-given coils and the {BM₂} the submatrix for current-given coils. The N_s is the number of eigen modes in the multi-torus system with voltage-given coils in total, the N_c^e the number of voltage-given coils and the N_c^c the number of current-given coils.

- 4) XMODE0, XMODE 各々、時間区分領域毎のモードの初期値 (倍精度)、モードの時間応答 (倍精度) で、モードの初期値は既にサブルーチン 'INITAL' にて算出済みである。
- 5) TS, NTS 計算時刻 (sec), 計算ステップ数
- 6) LIUSE 本ルーチンでの共通領域 A の使用コアサイズ

7) IFIRST, JFIRST, JJEND, ITSP, JTSP

主に図形出力のための制御パラメータで、詳しくはサブルーチン 'CONSET' の記号説明を参照のこと

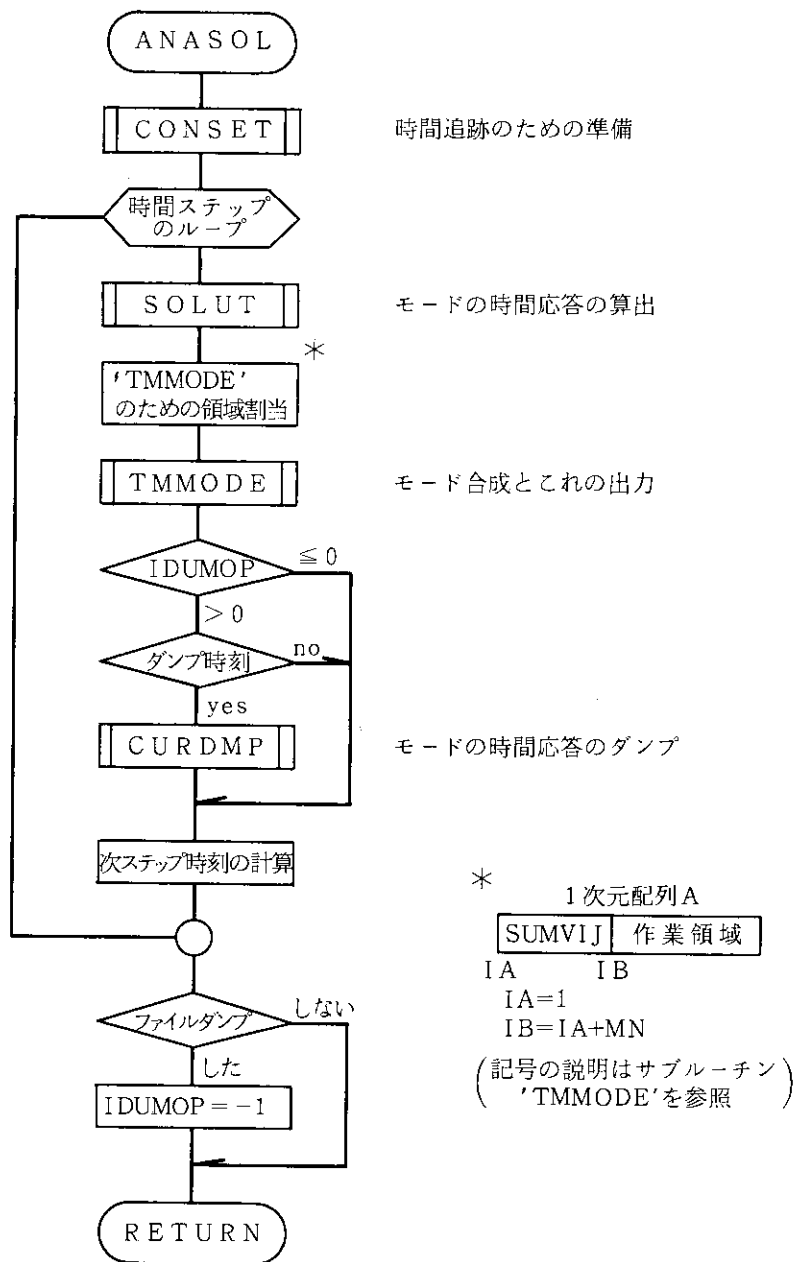
8) CURRNT, VOLTAG

外部コイルシリーズのそれぞれ電流値 (Amp), 電圧値 (Volt)

9) MN

当該トランス導体上の全節点数 (= (IMAX+1) * JMAX)

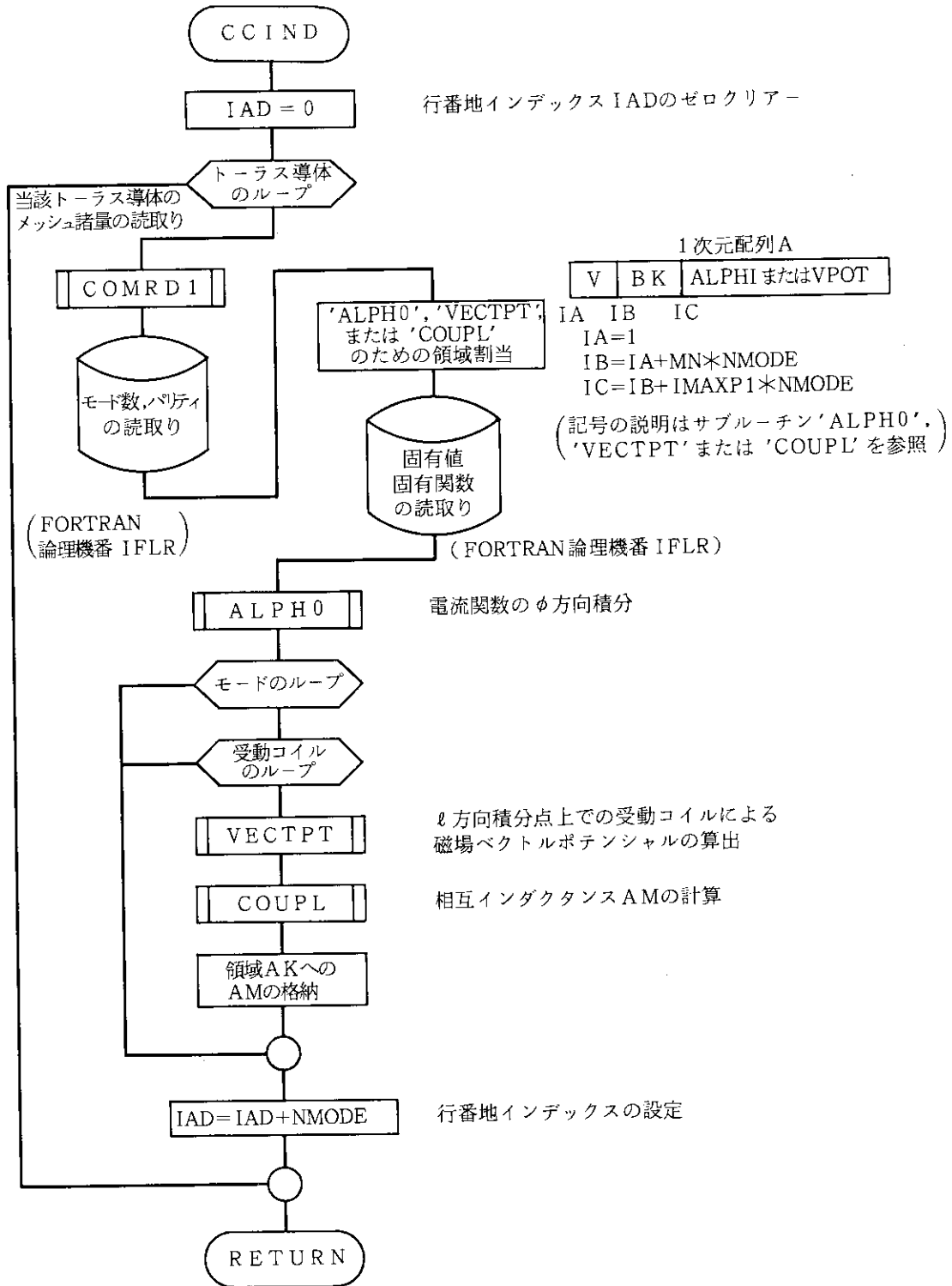
(2) フローチャート



サブルーチン CCIND

ここでは、単一トーラス導体上の固有関数を基底とする渦電流固有モードと、単位電流 (Amp) の外部受動コイルシリーズとの相互インダクタンスを計算する。

(1) フローチャート



〔2〕 主な記号の説明

- 1) NMODE トーラス導体 S_N 上の渦電流モード数: N_N
- 2) IMAX $\ell = \ell_{\max}$ におけるメッシュ番号
- 3) MN 当該トーラス導体上の全節点数 (= (IMAX+1) * JMAX)
- 4) IY ℓ 方向積分点数
- 5) MDTORS 外部受動コイルシリーズを除く複合トーラス導体系の, 全トーラス導体モード総数: $N_s (= \sum_{N=1}^{N_t} N_N)$
- 6) A 処理用の共通作業領域
- 7) AKCOIL (MDTORS, NE) 求める相互インダクタンスで, トーラス導体順毎に記憶されている。当該トーラス導体上の渦電流モードと外部受動コイルシリーズとの間の相互インダクタンスのための本配列の行番地インデックス IAD との関係を図. B 4.2 に示す

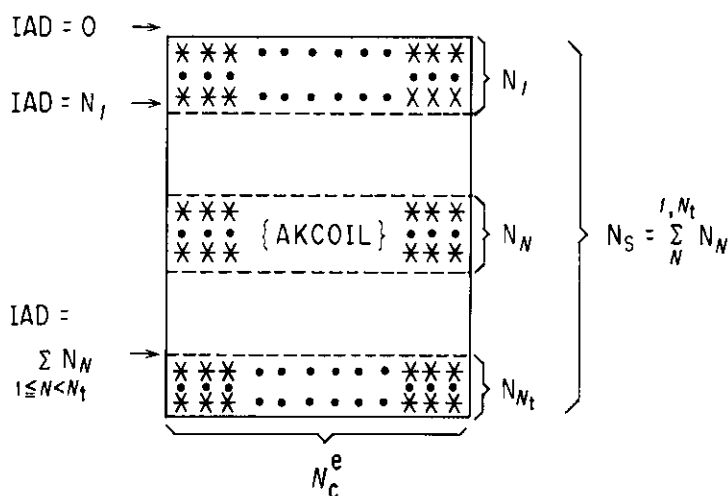


Fig. B4.2 Two-dimensional matrix of area AKCOIL for the mutual inductance between the eigen modes of eddy current on each torus and current-given coils. The N_N is the number of eigen mode on the torus S_N and the IAD indicates the row address index of the matrix AKCOIL for distinguishing between the individual tori.

サブルーチン CFORCE

ここでは, 外部受動コイルシリーズを含む複合トーラス導体系の各渦電流モードに対して, 単位電流 (Amp) の外部能動コイルシリーズによる外部起電力係数を計算する。便宜上本モジュールでは, EDTDEC プログラムで得られたトーラス導体毎の渦電流固有関数基底および単位電流を基底とした外部受動コイルに対して, 外部起電力係数 $\{E'\} \in R^{N_s \times N_c}$ を求める。その後, 複合トーラス導体系の固有値問題を解いて得たモード行列 $\{\Phi\} \in R^{N_s \times N_s}$ によりこれをモード変換する。求める外部起電力係数を $\{E\} \in R^{N_s \times N_c}$ とすると,

$$\{E\} = \{\Phi\}^T \{R\}^{-1/2} \{E'\}, \tag{B4.10}$$

となる。ここで, $\{R\} \in R^{N_s \times N_s}$ は, (2.81)式で与えられる外部受動コイルを含む抵抗行列である。トーラス導体 S_N 上の渦電流固有モードと外部能動コイルシリーズとの間の外部起電力係数を $\{m_N\} \in R^{N_s \times N_c}$, 外部受動, 能動

コイルシリーズ間の相互インダクタンスを $\{M_c\} \in R^{N_c \times N_c}$ とすると、モード変換前の外部起電力係数 $\{E'\} \in R^{N_s \times N_c}$ は、

$$\{E'\} = \begin{Bmatrix} \{m_1\} \\ \{m_2\} \\ \vdots \\ \{m_{N_c}\} \\ \{M_c\} \end{Bmatrix}, \quad (\text{B4.11})$$

となる。トーラス導体上の渦電流 V と外部能動コイルとの相互インダクタンス M は、コイルによる当該トーラス導体上の磁束を $\Psi (=rA_\phi)$ とすると、

$$M = 4N_\phi \int_0^{\frac{\pi}{N_c}} \int_0^{\ell_{\max}} \Psi \frac{\partial V}{\partial \ell} d\phi d\ell, \quad (\text{B4.12})$$

のように与えられる。

- | | |
|-----------|---|
| 1) NMODE | トーラス導体 S_N 上の渦電流モード数: N_N |
| 2) IMAX | $\ell = \ell_{\max}$ におけるメッシュ番号 |
| 3) MN | 当該トーラス導体上の全節点数 (= (IMAX+1) * JMAX) |
| 4) IY | ℓ 方向積分点 |
| 5) MDTORS | 外部受動コイルシリーズを除く複合トーラス導体系の、全トーラス導体モード総数: $N_s (= \sum_{N=1}^{N_c} N_N)$ |
| 6) AK | 複合トーラス導体系におけるジュール損失で規格化されたモード行列 $\{\Phi\}$ |
| 7) CCK | 外部起電力係数を求める際の一時記憶領域 |
| 8) CK | 求める外部能動コイルシリーズによる外部起電力係数 $\{E\}$ |

サブルーチン CLCONS

ここでは、外部受動コイルシリーズおよび能動コイルシリーズ間相互のインダクタンスやコイル抵抗を求める。本モジュールが呼び出される以前においては、抵抗 CRO(50)、インダクタンス CL(50,50) には、それぞれ外部抵抗、外部インダクタンスが入力により与えられ記憶されている。これらは、本ルーチンでの処理によりそれぞれ外部抵抗+内部抵抗、外部インダクタンス+内部インダクタンスに置き換えられる。

- | | |
|---------------------------|---|
| 1) NCOIL | 外部コイルシリーズ数: $N_c (=N_c^e + N_c^c)$ |
| 2) NE(50) | 各コイルシリーズ毎のブロック数 (最大は 50 ブロック) |
| 3) CETA | コイルの導体材料の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}$) |
| 4) CRO(50), CL(50, 50) | 各々、コイルの抵抗 (Ω), コイルのインダクタンス (H) |
| 5) CR(50, 50), CZ(50, 50) | CR(I, J), CZ(I, J)で、第 J シリーズ第 I ブロック中心点の各々 R 座標, Z 座標 (単位は m) |
| 6) CTURN(50, 50) | CTURN(I, J)で、第 J シリーズ第 I ブロックのターン数 |
| 7) CA(50, 50), CB(50, 50) | CA(I, J), CB(I, J)で、第 J シリーズ第 I ブロックの各々 R 方向, Z 方向寸法 (単位は m) |

サブルーチン CONSET

ここでは、時間追跡の実行のための初期化を行う。

- | | |
|-------------------------|--|
| 1) TS, TE | それぞれ、計算開始時刻、計算終了時刻 (sec) |
| 2) DT | 時間刻み (sec) |
| 3) MAXTS | 時間追跡の追跡計算回数 |
| 4) IFIRST, JFIRST | サブルーチン 'GPCPSB', サブルーチン 'GPCPJM' における図形出力処理では、最初の時間ステップに関して座標をプロットする必要がある。最初の出力処理であることを識別するための制御フラグである。 |
| 5) IINT | 図形出力の間隔を与えるための入力パラメータ |
| 6) IDMPI | FLDDEC プログラムのためのファイルダンプ間隔を指定する入力パラメータ |
| 7) IGPPL, IDUMP, ICURPL | それぞれ 'GPCP' プログラム ³⁰⁾ による等高線図の作図, FLDDEC プログラム用ファイルダンプ, 電流密度 J_z , J_ϕ の 1 次元プロット出力のための出力回数カウント用のパラメータ |
| 8) JJEND | 電流密度 J_z , J_ϕ の 1 次元プロット終了時に行う作図終了処理のため、最終図面であることをこれにて指定する (全作図枚数)。 |

サブルーチン CURDMP

ここでは、複合トラス導体系における磁場解析を FLDDEC プログラムにて実施するために諸データをファイル (FORTRAN 論理機番 10) にダンプする。下記に示すように、5つのグループに分かれてダンプされる。

(1) IOPT=0 (サブルーチン 'INISSET' にて1回呼び出される)

- NCOND, NCOIL, IPARTY
- NE, NC, CETA, CRO, CL, NB, CTURN, CR, CZ, CA, CB

(記号については、ラベル付 COMMON ブロック名/SYSDT/および/COIL/の説明を参照のこと)

(2) IOPT=1 (サブルーチン 'INISSET' にて全トラス導体系数の回数呼び出される)

- IMAX, JMAX, NPHI, IPOINT, DPHI
- FORM, PMESH, IMESH

(記号については、ラベル付 COMMON ブロック名/CONDM/および/TFORM/の説明を参照のこと)

(3) IOPT=2 (サブルーチン 'MODGET' にて全トラス導体系数の回数呼び出される)

- NODE, NUMSYS
- VIJ(NODE, NUMSYS)

NODE : 外部受動コイルシリーズ数と当該トラス導体系の全節点数との和

NUMSYS : 複合トラス導体系における渦電流モード総数: N_s

VIJ : 固有関数

(4) IOPT=3 (サブルーチン 'INITAL' にて1回呼び出される)

- EPS, MODRED, MREDCT, CTABLE

(記号については、ラベル付 COMMON ブロック名/RDOPT/の説明を参照のこと)

(5) IOPT=4 (サブルーチン 'ANASOL' にて時間ステップの回数呼び出される)

- NTS, TS, XMODE(NUMSYS)
- CURRNT(NCOIL)

- NTS, TS : 当該時間ステップ番号, 当該時刻 (sec)
- XMODE : モードの時間応答係数
- CURRNT : 外部コイルシリーズの電流値 (Amp)

サブルーチン EFORCE

ここでは, 外部受動コイルシリーズに単位電圧 (Volt) の起電力が与えられたときの各渦電流固有モードに対する外部起電力係数 $\{E\} \in R^{N_s \times N_c^e}$ を計算する。外部受動コイルシリーズを含む場合の回路方程式は

$$\{M\}\dot{X} + \{R\}X = F \tag{B4.13}$$

である。ただし, $\{M\} \in R^{N_s \times N_s}$ は (2.80) 式, $\{R\} \in R^{N_s \times N_s}$ は (2.81) 式で与えられる各々系のインダクタンス行列, 抵抗行列である。 $F \in R^{N_s}$ は, 外部電圧を表わす電圧ベクトルであり,

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ F_1 \\ \vdots \\ F_{N_c^e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & & & & \\ & & & & \\ 1 & 1 & & & \\ & & \ddots & & 0 \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_{N_c^e} \end{bmatrix} \equiv \{I\} \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_{N_c^e} \end{bmatrix}, \tag{B4.14}$$

である。このことから, 外部受動コイルシリーズを含む場合の複合トーラス導体系の渦電流モードに対する外部起電力係数 $\{E\}$ は

$$\{E\} = \{\Phi\}^T \{R\}^{-1/2} \{I\}, \tag{B4.15}$$

となる。ここで, $\{\Phi\} \in R^{N_s \times N_s}$ は, ジュール損失に対し規格化された複合トーラス導体系の固有値問題のモード行列である。ここでは, モード行列 AK が $\{R\}^{-1/2} \{\Phi\}$ であるため, Fig. B4.3 に示すように, 配列 AK の一部を外部起電力係数用配列 CK に再記憶するだけでよい。記号の説明はサブルーチン 'FORCE' を参照のこと。

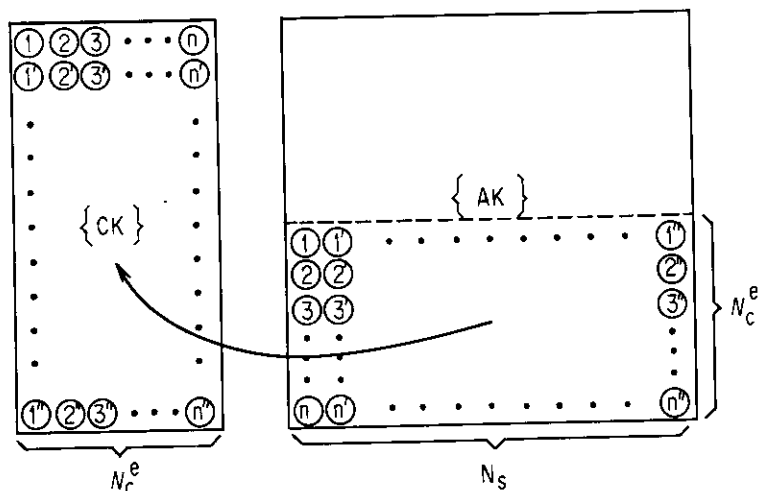


Fig. B4.3 Illustrating the procedure for making up the coefficient CK of electro-motive force due to the voltage-given coils from the modal matrix AK. The N_s is the number of eigen modes in the multi-torus system with voltage-given coils in total and the N_c^e the number of voltage-given coils. \textcircled{n} indicates the matrix element.

サブルーチン FILAL3

ここでは、EM3DEC プログラムの実行に必要な全てのファイル割当てを IPF コマンドを用いて行い、更に OPEN 文によりデータセット識別番号 (FORTRAN 論理機番) とデータセット名を結合する。

問題入力のオプションにより必要なファイルが異なり、次のようなファイル処理を行う。

(1) IRST = 0 のとき

複合トラス導体系の渦電流固有値問題を解くため、モード間結合のデータファイル (FORTRAN 論理機番 12) の開設、更に複合トラス導体系モードデータ用ファイル (FORTRAN 論理機番 2) の割当、およびこれらとデータセット名との結合を行う。本ファイルはユーザーファイルとしてカタログ保存される。

(2) IRST = 1 のとき

FORTRAN 論理機番 2 の複合トラス導体系のモードデータファイルとデータセット名との結合を行う。

(3) IDUMOP ≠ 0 のとき

FLDDEC プログラムの実行のために、磁場計算に必要な全てのデータをダンプする。このため、FORTRAN 論理機番 10 のファイルの割当て、およびこれとデータセット名との結合を行う。本ファイルは TSS 作業用ファイルとして当日のみ有効である。

(4) 'GPCP' プロットするとき (すなわち、 $1 \leq \text{IPLTEV} \leq N_1$, $1 \leq \text{IPLTVP} \leq N_2$ または $\text{IPLTEV} > 10$, $\text{IPLTVP} > 10$ のとき)

固有モード毎の或いは時間追跡の電流関数の等高線図作図 (オフライン処理の 'GPCP' プログラム³⁰⁾ 使用) のため、FORTRAN 論理機番 11 (IF11) のダンプファイルの割当て、およびこれとデータセット名との結合を行う。本ファイルは TSS 作業用ファイルとして当日のみ有効である。このとき、'GPCP' プロット処理に必要な作業用ファイルの割当てとデータセット名との結合も行う。

(5) ICIT > 0 のとき

このとき、時間追跡のための外部起電力係数を計算し、これを FORTRAN 論理機番 13 にダンプする。このためのファイルの割当て、およびこれとデータセット名との結合を行う。本ファイルはユーザーファイルとしてカタログ保存される。

(6) ICIT < 0 のとき

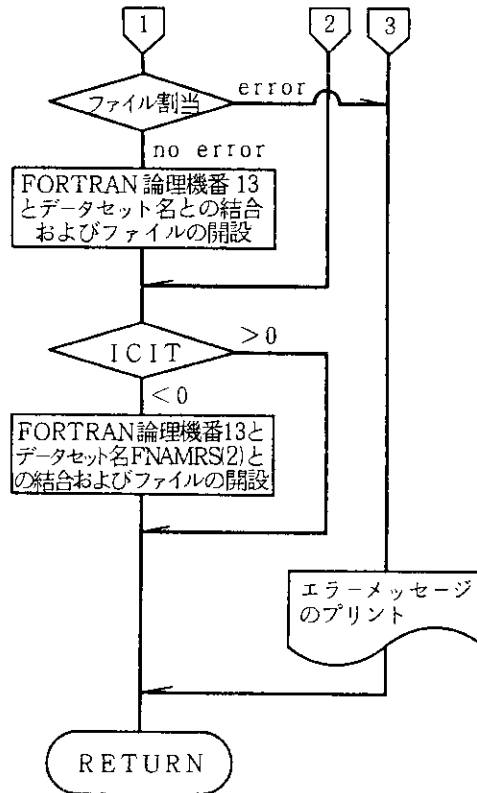
時間追跡のための FORTRAN 論理機番 13 の外部起電力係数用データファイルとデータセット名との結合を行う。

(7) 常時作成

トラス導体系モードデータの各ファイル (FORTRAN 論理機番 21 ~ 20 + N_3) とデータセット名との結合を行う。

〔1〕 記号の説明

- | | |
|-------------|---|
| 1) IR1, IR2 | 共に IPF コマンドによるファイル割当て時のエラーコード (= 0 のとき, 正常) |
| 2) FNAMGP | FORTRAN 論理機番 11 の 'GPCP' プロット用ファイルのデータセット名 |
| 3) FNAMDP | FORTRAN 論理機番 10 の FLDDEC プログラム用ファイルのデータセット名 |
| 4) FNAMMC | FORTRAN 論理機番 12 のモード間結合データファイルのデータセット名 |



サブルーチン FORCE

ここでは、複合トラス導体系の渦電流固有モードに対して外部起電力係数を求める。この外部起電力係数は、外部受動コイルおよび外部能動コイルシリーズ毎に別々に得られ、計算結果は必ずファイル(FORTRAN 論理機番 13)にダンプされる。

(1) 記号の説明

1) ICIT

時間追跡処理のための入力オプション

- { = 0 : 時間追跡しない。
- { > 0 : 新たに外部起電力係数を計算し、ファイル (FORTRAN 論理機番 13) にダンプ後、時間追跡する。
- { < 0 : ファイル (FORTRAN 論理機番 13) から外部起電力係数を読み取り、時間追跡する。

2) NE, NC

外部受動, 外部能動コイルシリーズ数: N_c^e, N_c^c

3) A(1)

サブルーチン 'CFORCE' における処理のための作業用領域

4) NUMSYS

複合トラス導体系のモード総数: N_s (外部受動コイルシリーズが存在しない場合は $MDTORS (= \sum_{N=1}^{1, N_1} N_N)$ に、存在する場合は $MDTRNE (= \sum_{N=1}^{1, N_1} N_N + N_c^e)$ に等しい)

5) AK(NUMSYS, NUMSYS)

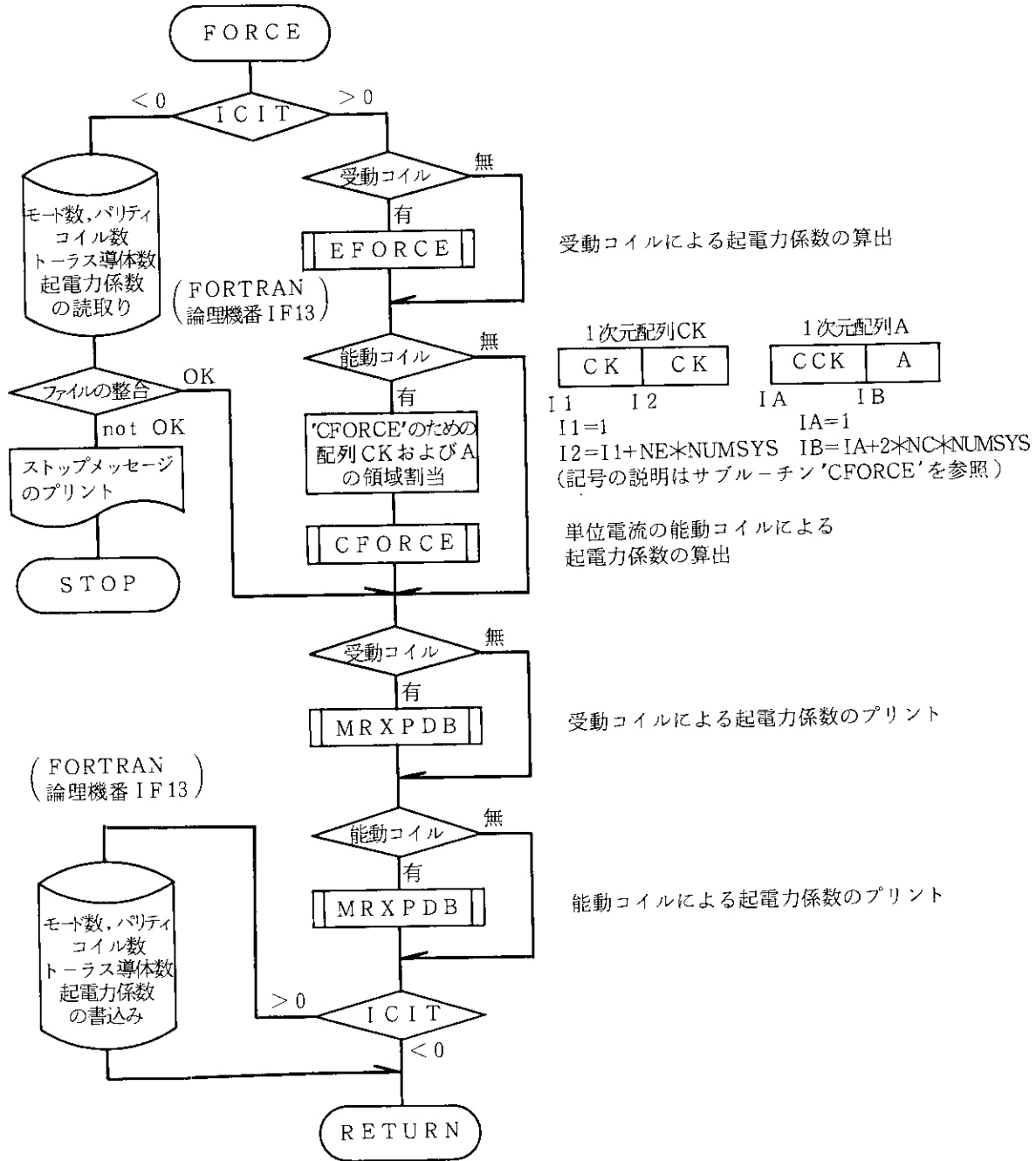
ジュール損失に対して規格化された複合トラス導体系のモード行列

6) CK(1)

求める外部起電力係数で、本 1 次元配列の初めの NUMSYS 個には第 1 受動コイルの外部起電力係数が記憶され、以下 $NE * NUMSYS$ 個には全外部受

動コイルシリーズの起電力係数が、更に NC*NUMSYS 個には全外部能動コイルシリーズの外部起電力係数がこの順に記憶されている。

[2] フローチャート

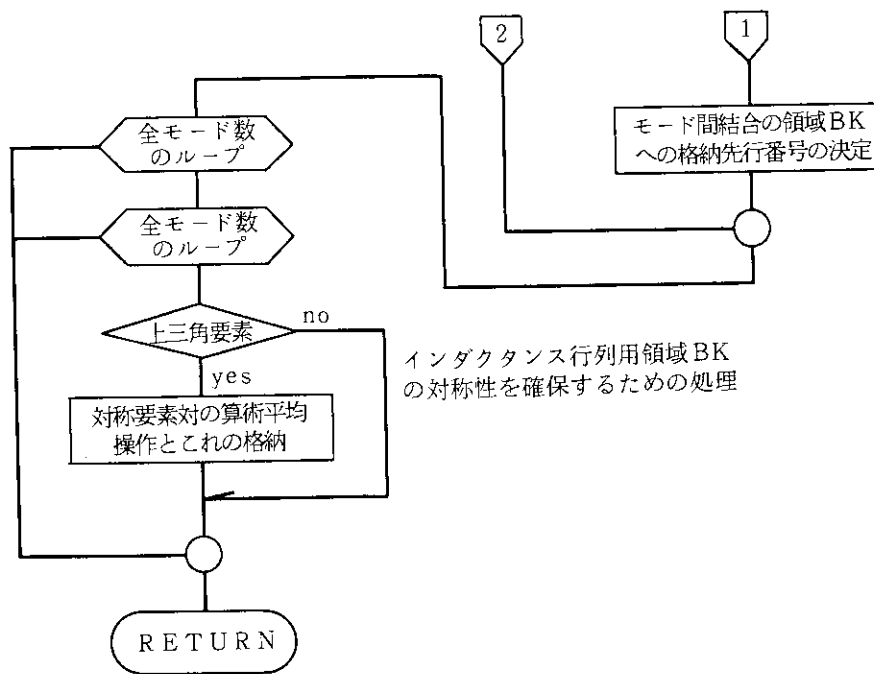


関数副プログラム FUNCX

ここでは、単に時刻 t における関数

$$f(t) = C_1 + C_2 t + C_3 \{ \exp(-t/\tau) - 1 \} + C_4 \sin(\omega_1 t) + C_5 \{ \cos(\omega_2 t) + 1 \}, \tag{B4.16}$$

の値を計算する。 $C_1 \sim C_5$, τ , ω_1 , ω_2 は定数で、コイルシリーズ、時間区分領域毎に与えられている。なお、時刻 t は当該時間区分領域内での局所時刻であることに注意すること。



〔2〕 記号の説明

- 1) EVAL 全トラス導体の固有値用領域 (倍精度)
- 2) BUF サブルーチン 'STMTX' における作業用領域 (倍精度)
- 3) MDTORS 全トラス導体上のモード総数: $N_s (= \sum_N^{1, N_s} N_N)$
- 4) BK(MDTORS, MDTORS) 求める複合トラス導体系のインダクタンス行列 $\{M\}$
- 5) MODE(10) 各トラス導体毎のモード数: N_N
- 6) NCOND 複合トラス導体系のトラス導体数: $N_t (\leq 10)$
- 7) IFLR トラス導体情報, モードデータなどのデータファイルの FORTRAN 論理機番 (21 ~ 20 + NCOND)
- 8) M1, N1 領域 BK におけるそれぞれ行番地, 列番地で, 当該トラス導体対 (S_N ; $S_{N'}$) に関するモード間結合の非対角ブロック行列が格納されるべき位置を示す。
- 9) LOUSE 本ルーチンにおける最大使用コアサイズ

サブルーチン INISET

ここでは, 本プログラムの実行にあたり, 複合トラス導体系のモード総数 N_s の算出や各種条件, 諸量の初期化を行う。更に, 当該使用ファイルの整合性のチェック, FLDDEC プログラムのためのシステムデータのダンプなどを行う。

- 1) MDTORS, NMODE それぞれ, 全トラス導体のモード総数: N_s , 各トラス導体のモード数: N_N
- 2) NCOND, NE 全トラス導体数: N_t , 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e
- 3) MDTRNE MDTORS + NE: $N_s (= \sum_N^{1, N_s} N_N + N_c^e)$

- | | |
|-----------------------|---|
| 4) ISMD, IEMD | 出力開始のモード番号, 出力終了のモード番号 |
| 5) VEIN(50), CEIN(50) | $t=0$ で外部受動コイルシリーズの入力電圧値 (Volt), 電流値 (Amp) |
| 6) CRO(50) | 外部受動コイルシリーズの抵抗 (Ω) |
| 7) NPFI | トーラスの対称性: N_ϕ |
| 8) IPARTY | 電流関数のパリティ |
| 9) IDUMOP | FLDDEC プログラム実行のためのファイルのダンプ入力オプション
$\left\{ \begin{array}{l} = 0: \text{ダンプしない。} \\ = 1: \text{ダンプする。} \end{array} \right.$ |
| 10) IRST | リスタートオプション
$\left\{ \begin{array}{l} = 0: \text{固有値問題を解き, モード行列をファイル(FORTRAN論理機番2)} \\ \quad \text{にダンプする。} \\ = 1: \text{モード行列のデータファイル (FORTRAN 論理機番2) を参照し,} \\ \quad \text{処理を進める。} \end{array} \right.$ |
| 11) IPLTEV, IPLTVP | それぞれ, 固有モード, 時間追跡の電流関数の 'GPCP' プロット ³⁰⁾ オプション (デフォルト値=0)
$\left\{ \begin{array}{l} > 10 \quad : \text{全トーラス導体の等高線図をプロット出力する。} \\ = \text{導体番号} \quad : \text{当該番号のトーラス導体についてのみプロット出力する。} \\ \leq 0 \quad : \text{等高線図プロット出力しない。} \end{array} \right.$ |

サブルーチン INITAL

ここでは, 渦電流の時間追跡に先立ち, 入力により与えられる外部起電力に対して各時間区分領域のモードの初期値を求める。特に, 外部受動コイルシリーズに対しては, これが $t=0$ で或る有限の定常入力であるとしており, また渦電流が定常状態にあると仮定しているため, そのときの定常解をモード毎に求めておく。 $\{\Phi\}$ を固有値問題

$$\{\bar{M}\}X = \{D(\lambda)\}X, \quad \{\bar{M}\} = \{R\}^{-1/2}\{M\}\{R\}^{-1/2}, \quad (\text{B4.17})$$

を解いて得たジュール損失に対して規格化されたモード行列(固有ベクトル列から成る解行列), E_0 を入力電圧ベクトルとする。このとき, $t=0$ でのモード毎の初期値 X_0 は,

$$X_0 = \{\Phi\}^T \{R\}^{-1/2} E_0, \quad (\text{B4.18})$$

となる。いま, M を全トーラス導体上のモード総数, N を N_e 個の外部受動コイルシリーズを含む複合トーラス導体系の渦電流の全モード総数とする。更に, 規格化されたモード行列の i 行 j 列要素を ϕ_j^i とすると, (B4.18)式は

$$\begin{pmatrix} x_0(1) \\ x_0(2) \\ \vdots \\ x_0(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1^{M+1}/\sqrt{R_1} & \phi_1^{M+2}/\sqrt{R_2} & \cdots & \phi_1^N/\sqrt{R_{N_e}} \\ \phi_2^{M+1}/\sqrt{R_1} & \phi_2^{M+2}/\sqrt{R_2} & \cdots & \phi_2^N/\sqrt{R_{N_e}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_N^{M+1}/\sqrt{R_1} & \phi_N^{M+2}/\sqrt{R_2} & \cdots & \phi_N^N/\sqrt{R_{N_e}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{N_e} \end{pmatrix}, \quad (\text{B4.19})$$

のように具体的に表現できる。

一方、時間区分領域 I の終端でのモードの時間応答は、初期値 x_0 を用いて

$$x(t) = x_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) + \frac{1}{\lambda} \int_0^t e'(\tau) \exp\left(\frac{\tau-t}{\lambda}\right) d\tau, \tag{B4.20}$$

となる。ここで、 $e'(\tau)$ は固有値問題 (B 4.17) 式を用いて得た互に直交する複合トランス導体系の渦電流モードに対する外部起電力で、

$$E' = \{\Phi\}^T \{R\}^{-1/2} E, \tag{B4.21}$$

の或る要素である。この解は次の時間区分領域 I+1 での当該モードに対する初期値となっている。

以上のほかに、本ルーチンの後半ではモード縮小のための処理を行っている。縮小処理の方法は、EM1DEC プログラムのサブルーチン 'REDUCE' で実施した次元縮小についての考えと同様である。ここでは、複合トランス導体系での互いに直交する渦電流モードが得られているため、全ての渦電流モードは直接可制御か不可制御であるかの 2 通りに類別される。モード間結合が存在しないため、間接可制御部分は存在しない。この類別を実施するために、第 i モードに対する可制御性の測度を与える次の実効入力 u^* を定義する。

$$u^*_i = \frac{1}{\lambda_i} \sum_j^{L, N} |\phi_i^{M+j} R_j^{-1/2}|. \tag{B4.22}$$

もし、この第 i モードの u^*_i がこれ以外の他のモードの u^*_j と比較して極めて小さい場合、近似として第 i モードを除く次元縮小された渦電流問題を考えてよいことになる。

- | | |
|-----------------|---|
| 1) TMODE0 | 時間区分領域毎のモードの初期値 : x_0 |
| 2) AK | 渦電流モード行列 |
| 3) BM | 外部起電力係数行列 |
| 4) LAMDA | 固有値 (λ) |
| 5) VEIN | 外部受動コイルの $t=0$ での定常入力電圧 (Volt) |
| 6) TIME1, TIME2 | 時間区分領域の開始時刻 : t_1 , 終了時刻 : t_2 (Fig. B4.5 参照) |

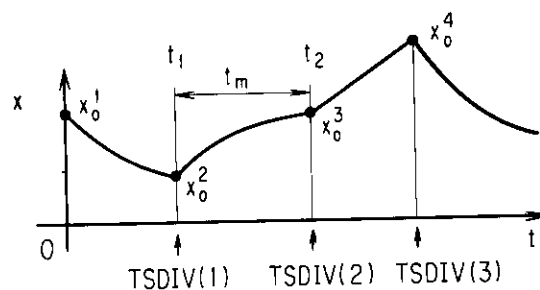


Fig. B4.5 Start-time t_1 , end-time t_2 and interval t_m of a time domain. The x_0 represents the initial value of eigen mode for each time domain.

- | | |
|-------------------|---------------------------------------|
| 7) TM | 時間区分領域の間隔 : t_m (sec) (Fig. B4.5参照) |
| 8) AINTG1, AINTG2 | 関数副プログラム 'AINTG1', 関数副プログラム 'AINTG2' |
| 9) CMAX, CMIN | 実効入力 u^*_i の最大値, 最小値 |
| 10) MODRED | ϵ 可制御なモード数 |

- 11) MREDCT(500) MREDCT(M)で、第Mモードの可制御判定結果を示す。
 $\begin{cases} = 0 : \text{不可制御} \\ = 1 : \text{可制御} \end{cases}$
- 12) EPS 可制御性判定値 ε (入力)
- 13) CTABLE u_i^* ($i=1, 2, \dots, N_s$)

サブルーチン KAPA

ここでは、複合トランス導体系が外部受動コイルシリーズを含む場合について、渦電流各モードのモード行列がジュール損失に対して規格化されるようにモード変換する。いま、 $\{\bar{M}\} = \{R\}^{-1/2} \{M\} \{R\}^{-1/2}$ とし、固有値問題

$$\{\bar{M}\} X = \{D(\lambda)\} X, \quad (\text{B4.23})$$

を解いて、 $\{\Phi\}^T \{\Phi\} = \{I\}$ のように規格化されたモード行列 $\{\Phi\}$ を得たとする。これを更に、ジュール損失に対して規格化するためには

$$\{\Phi\} = \{R\}^{-1/2} \{\Phi\}, \quad (\text{B4.24})$$

のように変換し、新たなモード行列 $\{\Phi\}$ を求めればよい。この操作をプログラム上で行うと、Fig. B4.6 に示すようになる。すなわち、2次元配列のモード行列 $\{\Phi\}$ の N_e 個の最終行に対して、行毎に対応する外部受動コイルの抵抗 R を用いて、各行の行列要素を \sqrt{R} で割ればよい。

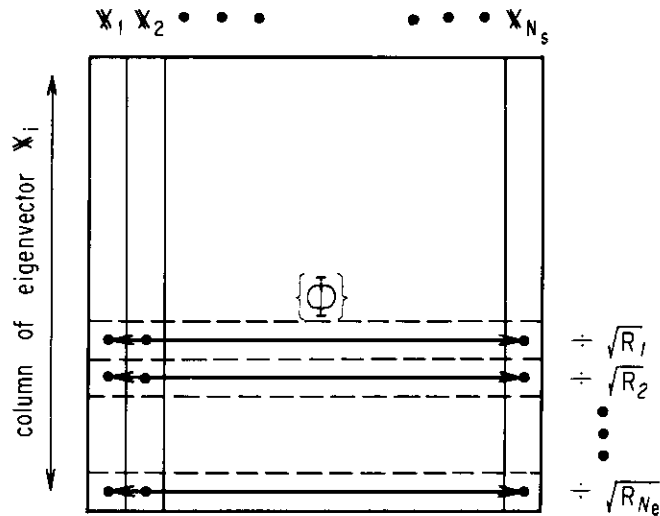
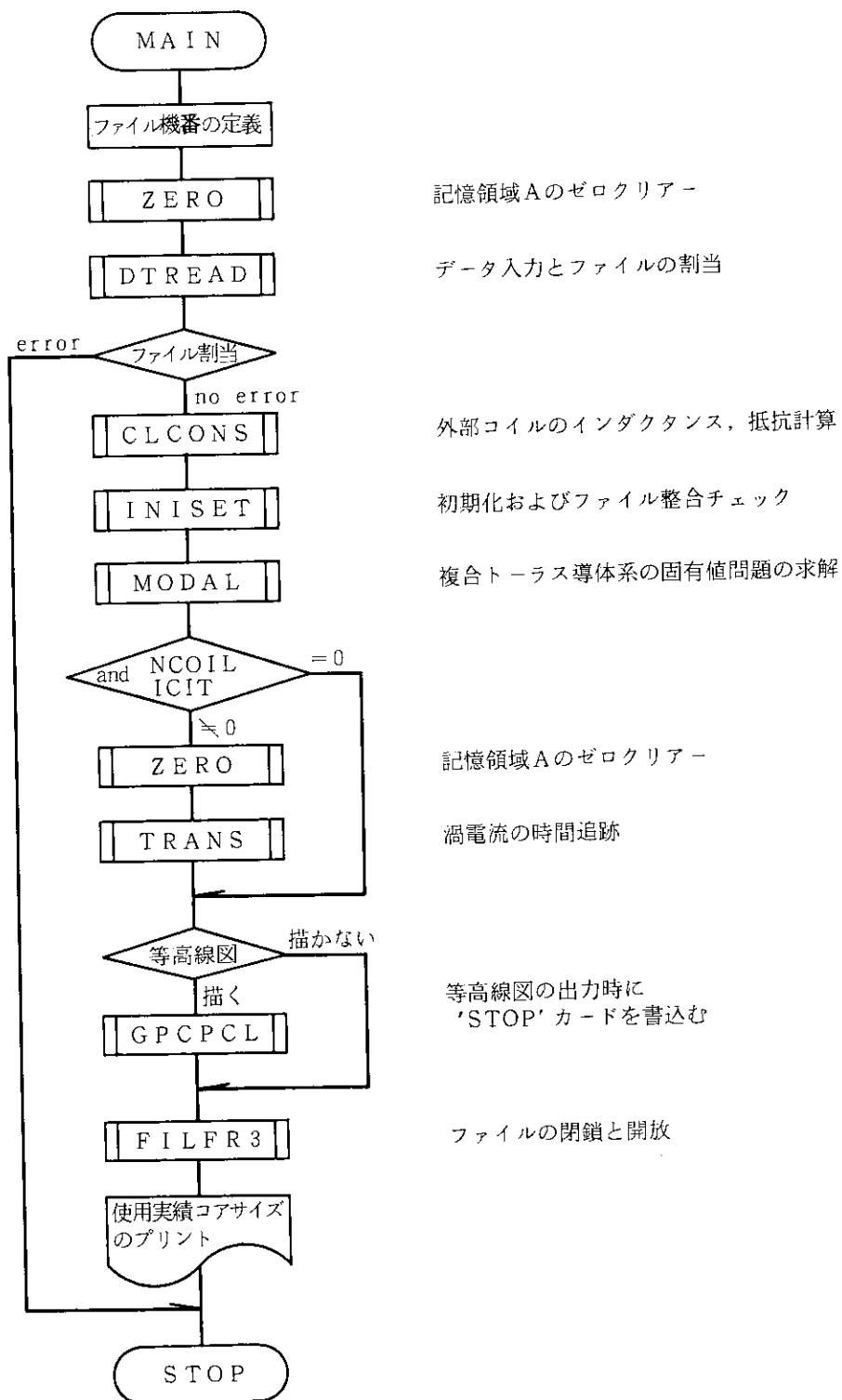


Fig. B4.6 Normalization of the modal matrix $\{\Phi\}$ by Joule loss. The X_i is the column-eigenvector of the i -th eigen mode of the modal matrix $\{\Phi\}$ and the R_j the resistance of the j -th voltage-given coil.

メイン・ルーチン MAIN2

ここでは、コアサイズの大半を決定する共通領域の宣言をし、更に入力により指定されるプログラムオプションにしたがい、当該モジュールを呼び出す。

[1] フローチャート



1) N1, T11, R11, Z11, N2, T22, R22, Z22

対となるコイルシリーズの各々#1コイルシリーズのブロック数, ターン数, R座標, Z座標, および#2コイルシリーズのブロック数, ターン数, R座標, Z座標

2) AM12

求める相互インダクタンス

3) PSI

関数副プログラム 'PSI' で, 空間点 (R, Z) に位置する軸対称コイルが空間点 (r, z) に作る磁束 rA_ϕ を計算する。K(κ), E(κ) を, それぞれ母数 κ の第1種, 第2種完全楕円積分とすると, この磁束は,

$$rA_\phi = \frac{\mu_0 \sqrt{Rr}}{\pi \kappa} \left\{ \left(1 - \frac{\kappa^2}{2} \right) K(\kappa) - E(\kappa) \right\},$$

$$\kappa^2 = \frac{4Rr}{(R+r)^2 + (Z-z)^2}.$$

である。

サブルーチン MODAL

ここでは, 複合トーラス導体系の渦電流に関する固有値問題を解き, 固有モードを得るためのモジュールを呼び出す。主な処理機能は, i) 計算のための共通領域の割当て, ii) 外部受動コイルシリーズを含む場合と含まない場合の識別, iii) 下位モジュールの呼び出しの制御, および iv) 渦電流固有値問題の求解に関するリスタート制御である。更に, 本モジュールでは, 固有値問題を解いて得た固有モードをプリント, プロット出力するためのモジュールを呼び出す。

サブルーチン MODGET

ここでは, まずサブルーチン 'STCOIL' または 'STCOND' にて得られた複合トーラス導体系のモードデータを, ファイル(FORTRAN 論理機番2)から読取る。次に, これと EDTDEC プログラムにおいて得られたトーラス導体毎の渦電流固有関数基底を用いて, 複合トーラス導体系における渦電流の固有関数を求めるためのモジュールを呼び出す。

1) AK, EVAL

複合トーラス導体系のモード行列 (倍精度), 同じく固有値 (倍精度)

2) NUMSYS, MDTORS

複合トーラス導体系の渦電流モード総数: $N_s (= \sum_{i, M_i} N_N + N_c^0)$, トーラス導体の全モード数: $N_s (= \sum_{i, N_i} N_N)$

3) A

サブルーチン 'PRTPLT' で必要となる作業領域, および外部受動コイルシリーズの固有関数をプリントするための作業領域

4) NMODE

各トーラス導体毎のモード数: N_N

5) IAD

複合トーラス導体系のモード行列(AK)における当該トーラス導体の要素番地を示すインデックスである。トーラス導体 S_j に対して

$$IAD = \sum_{i, j=1}^N N_N$$

にて与えられる。

6) IPARTY

電流関数のパリティ

7) IF02

複合トーラス導体系のモードデータファイルの FORTRAN 論理機番 (= 2)

- 8) IDUMOP FLDDEC プログラム実行のためのファイルダンプに関する入力オプション
 { = 0 : ダンプしない。
 { = 1 : ダンプする。
- 9) IPVEC, IPLTEV それぞれ, 固有関数のプリントに関する入力オプション, 等高線図の 'GPCP'
 プロット³⁰⁾に関する入力オプション (デフォルト値=0)
 { > 10 : 全トラス導体の固有関数をプリント出力 (等高線図出
 力) する。
 { = 導体番号 : 当該番号のトラス導体についてのみプリント出力 (等高
 線図出力) する。
 { ≤ 0 : 固有関数をプリント出力 (等高線図出力) しない。
- 10) IPVEJ, IPLTJE それぞれ, 固有モードの電流密度 J_e , J_ϕ のプリントオプション, プロットオ
 プション (デフォルト値=0)
 { > 10 : 全トラス導体の J_e , J_ϕ をプリント出力 (プロット出力)
 する。
 { = 導体番号 : 当該番号のトラス導体についてのみプリント出力 (プ
 ロット出力) する。
 { ≤ 0 : J_e , J_ϕ プリント出力 (プロット出力) しない。
- 11) MN 当該トラス導体の全節点数 (= (IMAX+1)*JMAX)
- 12) NE, NCOND 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e , 複合トラス導体系の導体数: N_c
- 13) MNNE MN+NE
- 14) ISMD, IEMD 出力の開始と終了のモード番号

サブルーチン NORMAL

本ルーチンは, 複合トラス導体系が外部受動コイルシリーズを含む場合に呼び出される。この場合, 渦電流固有値問題 (B 4.23)式を解く必要があるが, この処理に先立ち Fig. B4.8 に示すように規格化されたインダクタンス行列 $\{\bar{M}\} (= \{R\}^{-1/2} \{M\} \{R\}^{-1/2})$ を求める。

[1] プログラミング手法

(1) 処理ステップ1

全ての外部受動コイルシリーズに対し, 行列 $\{M\}$ の第 k コイルシリーズ ($k=1, 2, \dots, N_c^e$) に対応する行の全要素を $\sqrt{R_k}$ で割る。

(2) 処理ステップ2

全ての外部受動コイルシリーズに対し, 行列 $\{M\}$ の第 k コイルシリーズ ($k=1, 2, \dots, N_c^e$) に対応する列の全要素を $\sqrt{R_k}$ で割る。

(3) 処理ステップ3

本来, $\{\bar{M}\}$ は対称行列であるので, 行列の対称位置にある非対角要素に対して平均操作を行い, 対称行列を確保する。

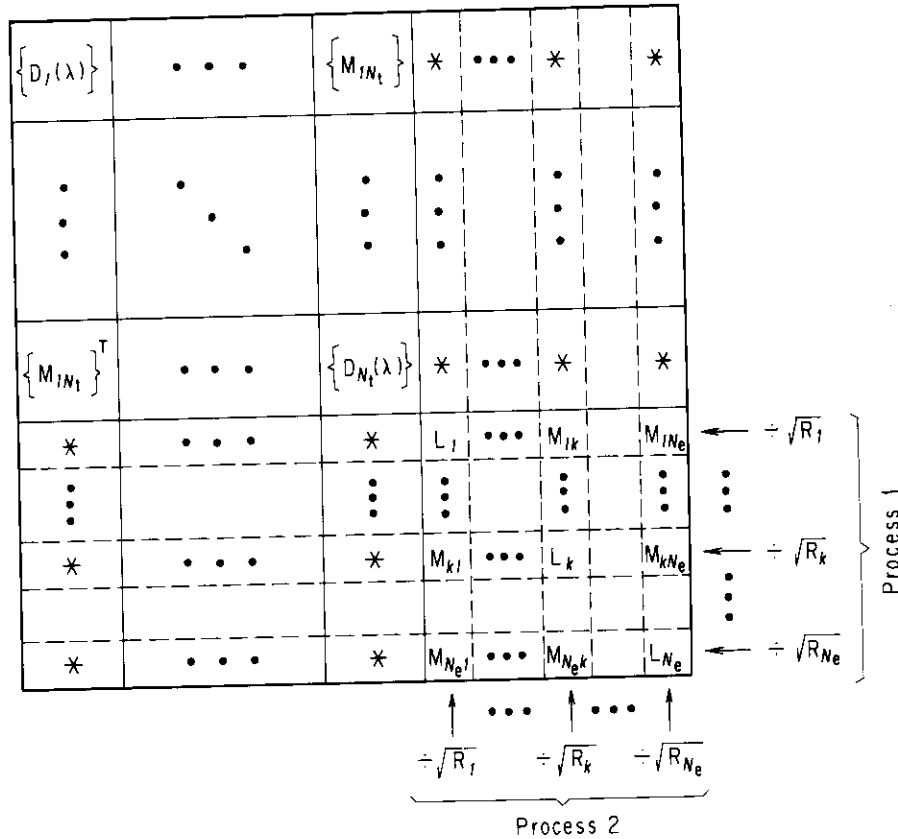


Fig. B4.8 Illustrating the procedure to obtain the normalized matrix $\{\bar{M}\}$. The $\{D_N(\lambda)\}$ is the diagonal matrix with the diagonal element λ for the torus S_N and the $\{M_{ij}\}$ the submatrix of the mode coupling between the tori S_N and $S_{N'}$. The L_k is the self-inductance of the k -th voltage-given coil series and the M_{jk} the mutual inductance between the j -th and k -th voltage-given coil series. The process 1 indicates the division of row elements by \sqrt{R} of coil resistance R and the process 2 the division of column elements by \sqrt{R} .

(2) 主な記号の説明

- 1) AK トーラス導体毎に定義される固有関数および外部受動コイルシリーズ上の単位電流を基底とするインダクタンス行列 $\{M\}$
- 2) CRO 外部受動コイルシリーズの抵抗値 (Ω)
- 3) MDTORS, NE 全トーラス導体の固有モード数: $N_s (= \sum_N^{L, N_1} N_N)$, 外部受動コイルシリーズ数: N_e
- 4) MDTRNE MDTORS+NE

サブルーチン RESIST

ここでは、以下のように外部コイルの抵抗 R を求める。

$$R = 4\pi\eta \sum_i^{L, N} R_i T_i^2 / (A_i B_i), \tag{B4.25}$$

ただし、 $Z=0$ 上にあるコイルブロックは、上下2重に評価することになるので、0.5の重みを乗じる。ここで、

- N : コイルブロック数
- T_i, R_i, A_i, B_i : 第 i コイルブロックのターン数, R 座標, R 方向ブロック寸法 (単位は m), Z 方向

- 3) NE 外部受動コイルシリーズ数: N_e^e
- 4) AK(MDTRNE, MDRNE) 求める外部コイルシリーズを含む複合トーラス導体系のインダクタンス行列 $\{M\}$
- 5) ISMAX, LOUSE 共通領域の使用可能なコアサイズ, および共通領域の使用実績コアサイズ

サブルーチン SINDCT

ここでは, 或るコイルシリーズ ($Z \geq 0$ にあるコイルブロック数が N) の自己インダクタンス L を計算する。

Fig. B4.9 に示すように, 第 i コイルブロックと第 j コイルブロックとの相互インダクタンスを M_{ij} , 第 i コイルブロックの自己インダクタンスを L_i とする。このとき, 当該コイルシリーズの自己インダクタンス L は

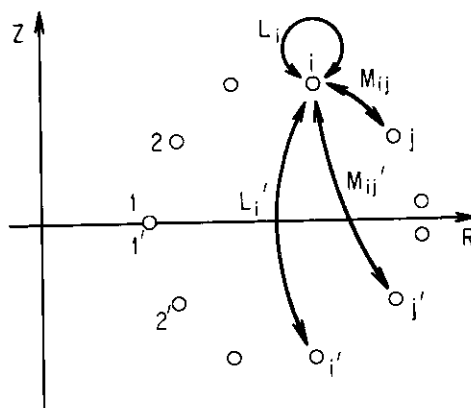


Fig. B4.9 Poloidal cross-section of axisymmetric coil series arranged symmetrically with respect to the equatorial plane $Z=0$. The i and j mean the parameters for distinguishing between blocks of the coil series. The L_i ($L_{i'}$) is the self-inductance of the i -th block and the M_{ij} is the mutual inductance between the i -th and j -th blocks.

$$L = \sum_i^{1,N} (L_i + 2 \sum_j^{i < j} M_{ij}), \tag{B4.29}$$

である。外部コイルシリーズ電流の赤道面に関するパリティは, トーラス導体上の渦電流の電流関数のパリティにより一義的に決定される。このため, 実際のプログラミングでは, $Z=0$ の赤道面を狭み上下対称な位置にあるコイルブロックの電流のパリティを自動的に選択するようにしている。

- 1) T1, R1, Z1, A1, B1 第 i コイルブロックのそれぞれのターン数, R 座標, Z 座標, R 方向コイルブロック寸法, Z 方向コイルブロック寸法
- 2) T2, R2, Z2 第 j コイルブロックのそれぞれターン数, R 座標, Z 座標
- 3) AL 求める自己インダクタンス (倍精度)
- 4) N $Z \geq 0$ にあるコイルブロック数
- 5) IPARTY 渦電流の電流関数のパリティで, 外部コイルの上下のパリティとは反対である。
- 6) PSI 関数副プログラム 'PSI' で, 空間点 (R, Z) に位置する軸対称コイルが空間点 (r, z) に作る磁束 rA_ϕ を計算する。 $K(\kappa)$, $E(\kappa)$ を, それぞれ母数 κ の第 1 種, 第 2 種完全楕円積分とすると, この磁束は,

$$rA_{\phi} = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{\sqrt{Rr}}{\kappa} \left\{ \left(1 - \frac{\kappa^2}{2} \right) K(\kappa) - E(\kappa) \right\},$$

$$\kappa^2 = \frac{4Rr}{(R+r)^2 + (Z-z)^2},$$

である。

サブルーチン SOLUT

ここでは、或る時刻における複合トラス導体系の渦電流モード毎の時間応答を求める。初期条件 x_0 と外部起電力 $e(t)$ が与えられたとき、この時間応答は、

$$x(t) = x_0 \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) + \frac{1}{\lambda} \int_0^t e(\tau) \exp\left(\frac{\tau-t}{\lambda}\right) d\tau, \quad (\text{B4.30})$$

にて与えられる。本プログラムでは、外部起電力は初等関数の重ね合わせの形にて各時間区分領域毎に定義されている。このため、本ルーチンの初めにおいて、まず当該時刻が属する時間区分領域を決定する。この時間区分領域における各モードの初期値は、サブルーチン 'INITAL' にて既に求められている。

- | | |
|---------------------------|---|
| 1) LAMDA | 固有値 (倍精度) |
| 2) XMODE0, XMODE | 各時間区分領域におけるモードの初期値 x_0 およびモードの時間応答 $x(t)$ |
| 3) BM(NUMSYS, NCOIL) | 外部起電力係数行列で、記憶内容は Fig. B4.1 に示すものと同じである。 |
| 4) TS, TTS | 各々、計算時刻 (sec), 当該時間区分領域における TS の局所時刻 (sec) |
| 5) VOLTAG(50), CURRNT(50) | コイルの電圧 (Volt), 電流 (Amp) |
| 6) TIME1, TIME2 | 各時間区分領域の開始時刻: t_1 , 終了時刻: t_2 |
| 7) ITDOMN | 時刻 TS が属する当該時間区分領域識別番号 |
| 8) AINTG1, AINTG2, FUNCX | |

関数副プログラム 'AINTG1', 関数副プログラム 'AINTG2' および関数副プログラム 'FUNCX' で、それぞれのルーチンの説明を参照のこと。

サブルーチン STCOIL

ここでは、複合トラス導体系が外部受動コイルシリーズを含む場合について、渦電流固有値問題を解くための各種モジュールの呼び出しを制御する。更に、トラス導体系数、パリティなどの複合トラス導体系情報、および得られた固有値、固有関数などのモードデータを、リスタート計算を想定しファイル (FORTRAN 論理機番 2) にダンプする。本モジュールはサブルーチン 'STCOND' と異なり、外部受動コイルシリーズを含むため、コイル抵抗についての規格化のための処理を実施する。

- | | |
|--------------|---|
| 1) A(ISMAX) | 共通の記憶領域 |
| 2) EVAL | 固有値 (倍精度) |
| 3) MDTRNE | 外部受動コイルシリーズを含む複合トラス導体系のモード総数: $N_s (= \sum_{N=1}^{1, N_c} N_N + N_c^e)$ |
| 4) NCOND, NE | 複合トラス導体系のトラス導体系数: N_t , 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e |

- 5) NPHI トーラスの対称性: N_ϕ
- 6) IPK 規格化されたインダクタンス行列 $\{M\}$ のプリントオプション
 $\begin{cases} = 0: \text{プリントしない} \\ \neq 0: \text{プリントする} \end{cases}$
- 7) IOUT(1), IOUT(2) それぞれ, モード行列 $\{\Phi\}$, 行列 $\{\Phi\}^T\{\Phi\} (= \{I\})$ のプリントオプション
 $\begin{cases} = 0: \text{プリントしない} \\ \neq 0: \text{プリントする} \end{cases}$

サブルーチン STMTX

ここでは, EM2DEC プログラムにて計算されファイル (FORTRAN 論理機番 12) に記憶されたモード間結合を, 該当するトーラス導体対 $(S_N; S_{N'})$ 毎に導体から読取り, 複合トーラス導体系に対するインダクタンス行列 BK を構成する。インダクタンス行列 BK の構成法を Fig. B4.10 に示す。 $\{D_N(\lambda)\}$ ($1 \leq N \leq N_t$) は各トーラス導体の固有値を対角成分とする対角行列であり, サブルーチン 'INDMTX' において全トーラス導体に対する値が配列 BK に格納されている。したがってここでは, まず FORTRAN 論理機番 12 のファイルから, 或るトーラス導体対 $(S_N; S_{N'})$ に関するモード間結合 BUF を読取る。その後, インダクタンス行列用配列 BK の該当する非対角ブロック行列部分に, 全てのトーラス導体毎のモード間結合を順に格納する。

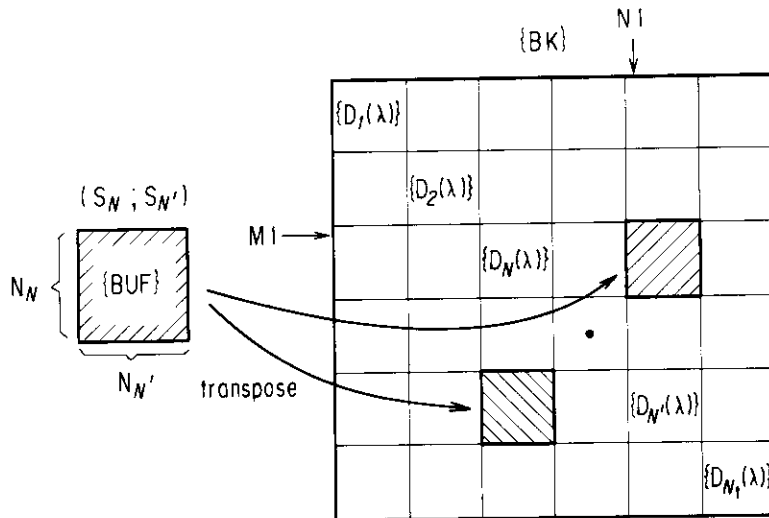


Fig. B4.10 Illustrating the constitution of the inductance matrix $\{M\}$ of the multi-torus system. The area BUF indicates the submatrix of mode coupling between the tori S_N and $S_{N'}$, and the $\{D_N(\lambda)\}$ the diagonal matrix with the diagonal element λ for the torus S_N . The parameter N1 designates the column address of area BK where the mode coupling BUF should be re-arranged and the M 1 the row address of area BK.

- 1) LA, LB 或るトーラス導体対 $(S_N; S_{N'})$ のモード間結合を一時記憶するための 2 次元配列のそれぞれ行サイズ N_N , 列サイズ $N_{N'}$
- 2) MSIZE 複合トーラス導体系の全モード総数で, MDTORS に等しい。 $N_S = \sum_N^{1, N_t} N_N$ である。
- 3) BK(MSIZE, MSIZE) 複合トーラス導体系のインダクタンス行列 $\{M\}$

- 4) M1, N1 或るトラス導体対($S_N; S_{N'}$)のモード間結合が格納されるべき位置を示す, 2次元配列 BK(MSIZE, MSIZE) のそれぞれ行番地, 列番地 (Fig. B4.10 参照) である。
- 5) BUF(LA, LB) 当該トラス導体対 ($S_N; S_{N'}$) のモード間結合をファイルから読取るための作業領域

サブルーチン STRUCT

ここでは, 複合トラス導体系が外部受動コイルシリーズを含む場合について, そのインダクタンス行列 $\{M\}$ を構成する。トラス導体間相互のモード間結合は, EM2DEC プログラムにて各単一トラス導体上の渦電流モードを基底として計算済みで, ファイル (FORTRAN 論理機番 12) に格納されている。また, サブルーチン 'STMTX' において, このファイルから複合トラス導体系の導体間相互のモード間結合を構成し, 配列 AKCOND に格納されている。一方, トラス導体と外部受動コイルシリーズ間との結合および外部受動コイルシリーズ間相互のインダクタンスは, それぞれサブルーチン 'CCIND' およびサブルーチン 'CLCONS' にて計算済みで, それぞれ配列 AKCOIL, CL に格納されている。本ルーチンでは, これらの部分行列 AKCOND, AKCOIL および CL を用いて, 外部受動コイルシリーズを含む場合の複合トラス導体系のインダクタンス行列を構成する。

サブルーチン SYSEGV

ここでは, 複合トラス導体系の固有値問題を解いて得られたモード行列 $\{\Psi\} \in R^{N_s \times N_s}$ と, 単一トラス導体毎に EDTDEC プログラムにて得られているトラス導体 S_N の固有関数基底 $\{\Phi_N\} \in R^{M_N \times N_N}$ とを用いて, 複合トラス導体系における固有ベクトルを計算する。 M_N はトラス導体 S_N 上の $JMAX * (IMAX + 1)$ 個の全節点である。

一般に, EM3DEC プログラムで得られたモード行列 $\{\Psi\}$ は

$$\{\Psi\} = \begin{Bmatrix} \{\Psi_1\} \\ \{\Psi_2\} \\ \vdots \\ \{\Psi_{N_t}\} \\ \{\Psi_e\} \end{Bmatrix}, \quad (B4.31)$$

である。ここで, $\{\Psi_N\} \in R^{N_N \times N_s}$ はトラス導体 S_N に対するモード行列 $\{\Psi\}$ の部分モード行列であり, $\{\Psi_e\} \in R^{N_e \times N_s}$ は外部受動コイルシリーズに対するモード行列 $\{\Psi\}$ の部分モード行列である。したがって, 2.2 節 (2.79) 式より, トラス導体 S_N の全節点に対するモード行列 $\{\overline{\Phi}_N\} \in R^{M_N \times N_s}$ は

$$\{\overline{\Phi}_N\} = \{\Phi_N\} \{\Psi_N\}, \quad (B4.32)$$

で与えられる。 $\{\overline{\Phi}_N\}$ の列ベクトルが固有ベクトルである。一方, 外部受動コイルシリーズのモード行列は, コイルシリーズに対しては単位電流を基底に取っているため, $\{\Psi_e\}$ そのものである。外部受動コイルシリーズを含む場合, トラス導体 S_N の固有ベクトルのプリント出力に引き続き, コイルシリーズの固有ベクトルも添えて出力する。

- 1) MN トラス導体 S_N の全節点数: $M_N = (IMAX + 1) * JMAX$

- 2) NE 外部受動コイルシリーズ数: N_e
- 3) MDTORS 複合トラス導体系のモード総数: $N_s (= \sum_N^{1, N_s} N_N)$ で, 外部受動コイルシリーズが存在する場合はこれを除いた値である。
- 4) IMODE トラス導体 S_N の元の固有関数基底の数: N_N
- 5) MNNE $MN + NE$
- 6) NUMSYS 複合トラス導体系のモード総数: $N_s (= \sum_N^{1, N_s} N_N + N_e)$ で, 外部受動コイルシリーズが存在しない場合は MDTORS に, 存在する場合は MDTRNE に等しい。
- 7) SSK(MNNE, NUMSYS) 当該トラス導体上の全節点に対する求めるモード行列 $\{\overline{\phi}_N\}$ である。ただし, $MN + 1$ 行 ~ $MNNE$ 行までは外部受動コイルシリーズの部分モード行列が記憶されている。
- 8) VIJ(MN, IMODE) EDTDEC プログラムにて得られ, EM1DEC プログラムでモード縮小処理された当該トラス導体の固有関数基底 $\{\phi_N\}$ である。
- 9) AK(NUMSYS, NUMSYS) 全てのトラス導体の部分モード行列 $\{\psi_N\}$ および外部受動コイルシリーズの部分モード行列 $\{\psi_e\}$ から構成される EM3DEC プログラムにて得られたモード行列 $\{\psi\}$ である。
- 10) IAD 2次元配列 AK の内の行番地 $IAD + 1$ 行 ~ $IAD + IMODE$ 行の部分行列がトラス導体 S_N に対する部分モード行列 $\{\psi_N\}$ である。

サブルーチン TMMODE

ここでは, 或るトラス導体に関して渦電流の時間追跡解を求め, 入力オプションにしたがいプリント, プロット出力を行う。更に, 外部受動コイルシリーズについても時間追跡解を求め, これを同じく出力する。

- 1) IMAX, JMAX それぞれ, $\ell = \ell_{\max}$ における ℓ 方向メッシュ番号, $\phi = \pi/N_\phi$ における ϕ 方向メッシュ番号
- 2) MREDCT(600) MREDCT(M) で, 第 M モードの可制御性判定結果を示す。
 $\left\{ \begin{array}{l} = 0: \text{不可制御} \\ = 1: \text{可制御} \end{array} \right.$
- 3) TS, NTS 計算時間 (sec), 計算ステップ
- 4) XMODE 渦電流モードに対する時間応答係数
- 5) MN 当該トラス導体の全節点数 ($= (IMAX + 1) * JMAX$)
- 6) NE 外部受動コイルシリーズ数: N_e
- 7) MNNE $ME + NE$
- 8) NUMSYS 複合トラス導体系のモード総数: $N_s (= \sum_N^{1, N_s} N_N + N_e)$
- 9) VOLTAG(50), CURRNT(50) コイルの電圧 (Volt), 電流 (Amp)
- 10) VIJ(MNNE, NUMSYS) トラス導体上の渦電流固有関数
- 11) SUMVIJ(JMAX, IMAX + 1) 渦電流時間追跡解

- 12) ITSP 電流関数の 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロット, および電流密度 J_θ, J_ϕ の1次元プロット, プリントの出力間隔 (ITSP=IINT-1)
- 13) A(1) サブルーチン 'GPCPJM' における作業領域
- 14) ISTM, IETM それぞれ, 電流関数の 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロット, および電流密度 J_θ, J_ϕ の1次元プロット, プリントなどの出力開始時間ステップおよび出力終了時間ステップ番号
- 15) IPVPJ, IPLTJT 電流密度 J_θ, J_ϕ のそれぞれプリントまたはプロットオプション (デフォルト値=0)
- | | | |
|--------|---|--|
| > 10 | : | 全トラス導体の J_θ, J_ϕ をプリントまたはプロット出力する。 |
| = 導体番号 | : | 当該番号のトラス導体についてのみプリントまたはプロット出力する。 |
| ≤ 0 | : | J_θ, J_ϕ プリントおよびプロット出力しない。 |
- 16) IPLTVP, IPVPT 電流関数のそれぞれ 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットまたはプリントオプション (デフォルト値=0)
- | | | |
|--------|---|---------------------------------------|
| > 10 | : | 全トラス導体の等高線図をプロットまたはプリント出力する。 |
| = 導体番号 | : | 当該番号のトラス導体についてのみ等高線図をプロットまたはプリント出力する。 |
| ≤ 0 | : | 等高線図プロットおよびプリント出力しない。 |

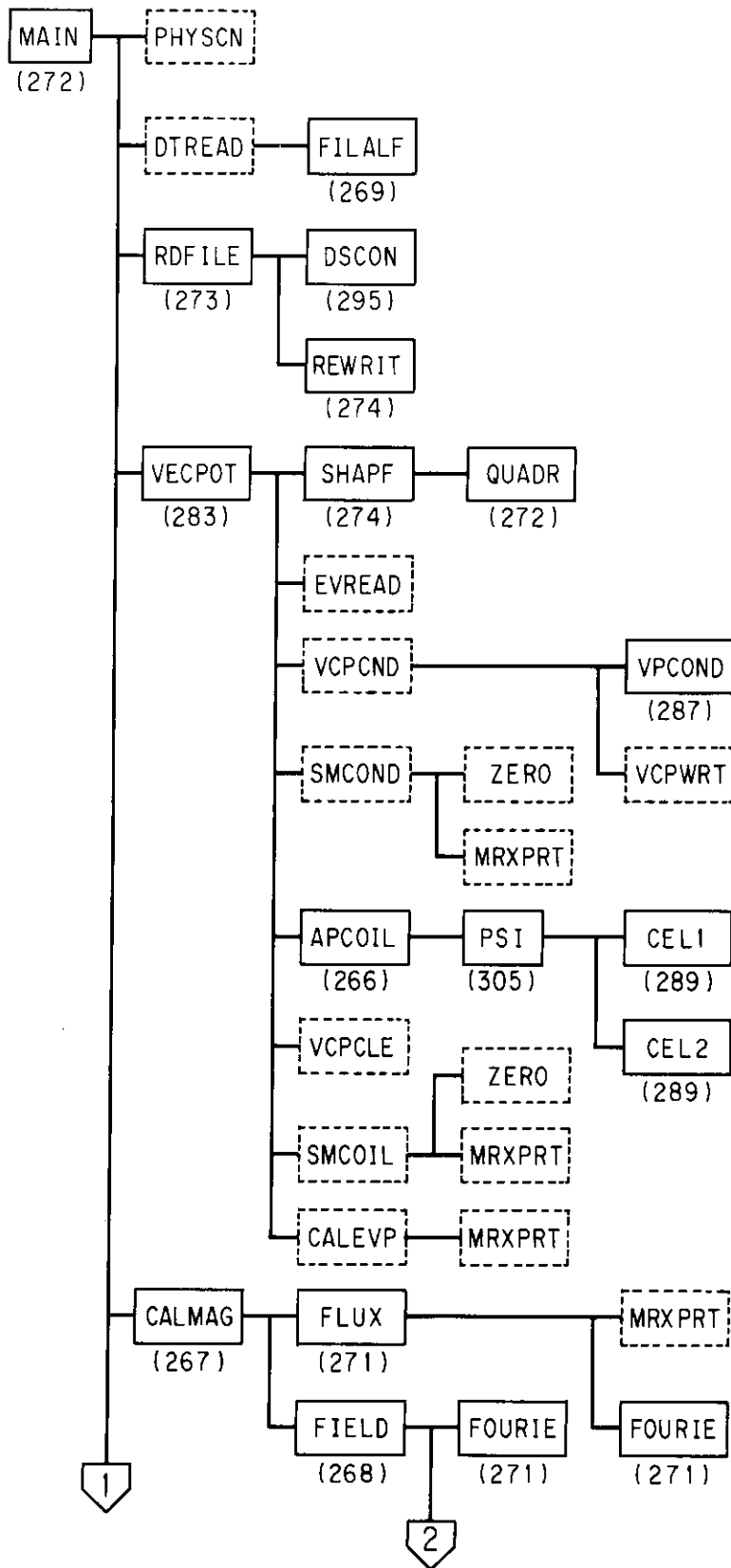
サブルーチン TRANS

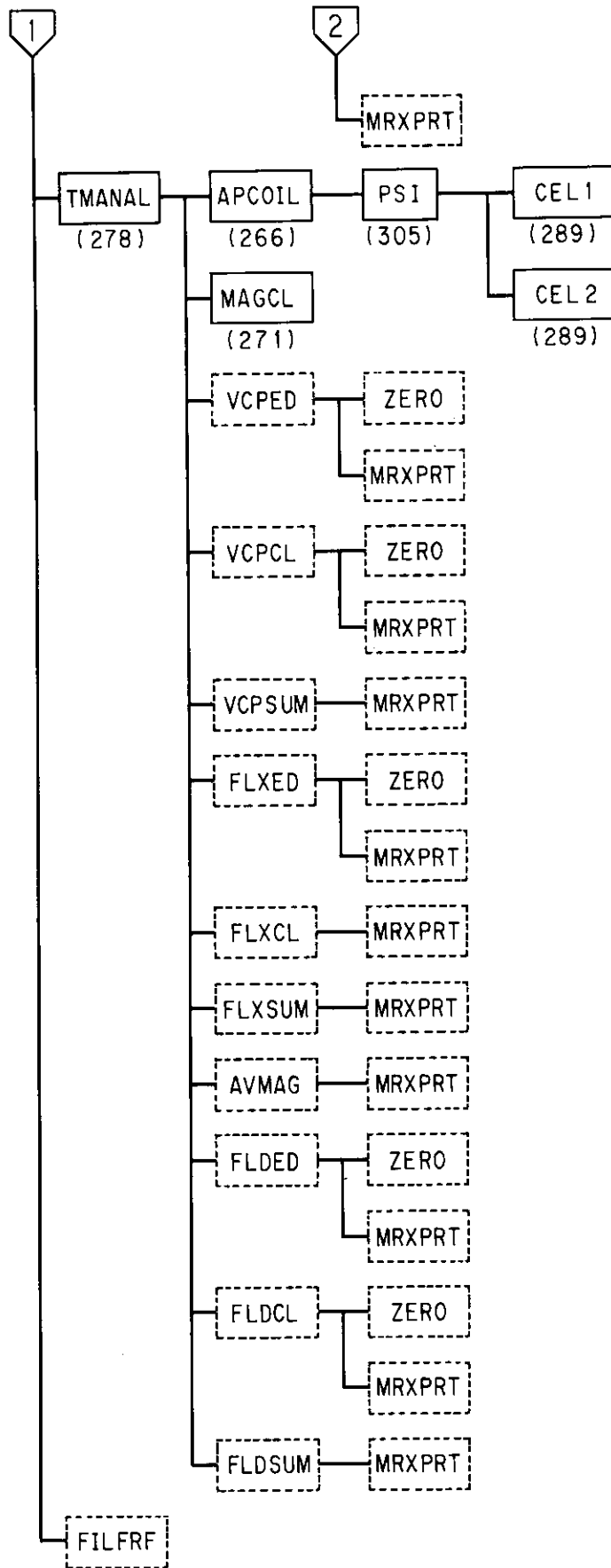
ここでは, 複合トラス導体系の渦電流を時間追跡するための各種モジュールの呼び出しを制御する。このモジュールでは, 計算のための比較的大きな領域を必要とするため, 共通領域の経済的な割当てを行っている。

- 1) A 時間追跡処理のための共通領域 (倍精度)
- 2) IDUMOP FLDDEC プログラム実行のためのファイルダンプに関する入力オプション
- | | | |
|-----|---|---------|
| = 0 | : | ダンプしない。 |
| = 1 | : | ダンプする。 |
- 3) IPVPJ, IPLTJT 電流密度 J_θ, J_ϕ のそれぞれプリントまたはプロットオプション (デフォルト値=0)
- | | | |
|--------|---|--|
| > 10 | : | 全トラス導体の J_θ, J_ϕ をプリントまたはプロット出力する。 |
| = 導体番号 | : | 当該番号のトラス導体についてのみプリントまたはプロット出力する。 |
| ≤ 0 | : | J_θ, J_ϕ プリントおよびプロット出力しない。 |
- 4) IPLTVP, IPVPT 電流関数のそれぞれ 'GPCP' プログラム³⁰⁾による等高線図プロットまたはプリントオプション (デフォルト値=0)

- | | | |
|-----------|--|--|
| | $\left\{ \begin{array}{l} > 10 \\ = \text{導体番号} \\ \leq 0 \end{array} \right.$ | <p>: 全トラス導体の等高線図をプロットまたはプリント出力する。</p> <p>: 当該番号のトラス導体についてのみ等高線図をプロットまたはプリント出力する。</p> <p>: 等高線図プロットおよびプリント出力しない。</p> |
| 5) NUMSYS | | <p>複合トラス導体系のモード総数: $N_s (= \sum_N^{1, N_1} N_N + N_e)$ で, 外部受動コイルシリーズが存在しない場合は MDTORS に, 存在する場合は MDTRNE に等しい。</p> |
| 6) MN | | <p>当該トラス導体の全節点数 (= (IMAX+1)*JMAX)</p> |
| 7) NE | | <p>外部受動コイルシリーズ数: N_e</p> |
| 8) MNNE | | <p>MN - NE</p> |
| 9) IAD | | <p>サブルーチン 'SYSEGV' において使用される行列要素の番地を与えるパラメータで, 複合トラス導体系のモード行列 {Ψ} の中で当該トラス導体に相当する部分行列要素を指定するための行番地である。</p> |
| 10) NMODE | | <p>当該トラス導体の固有関数基底の数: N_N</p> |

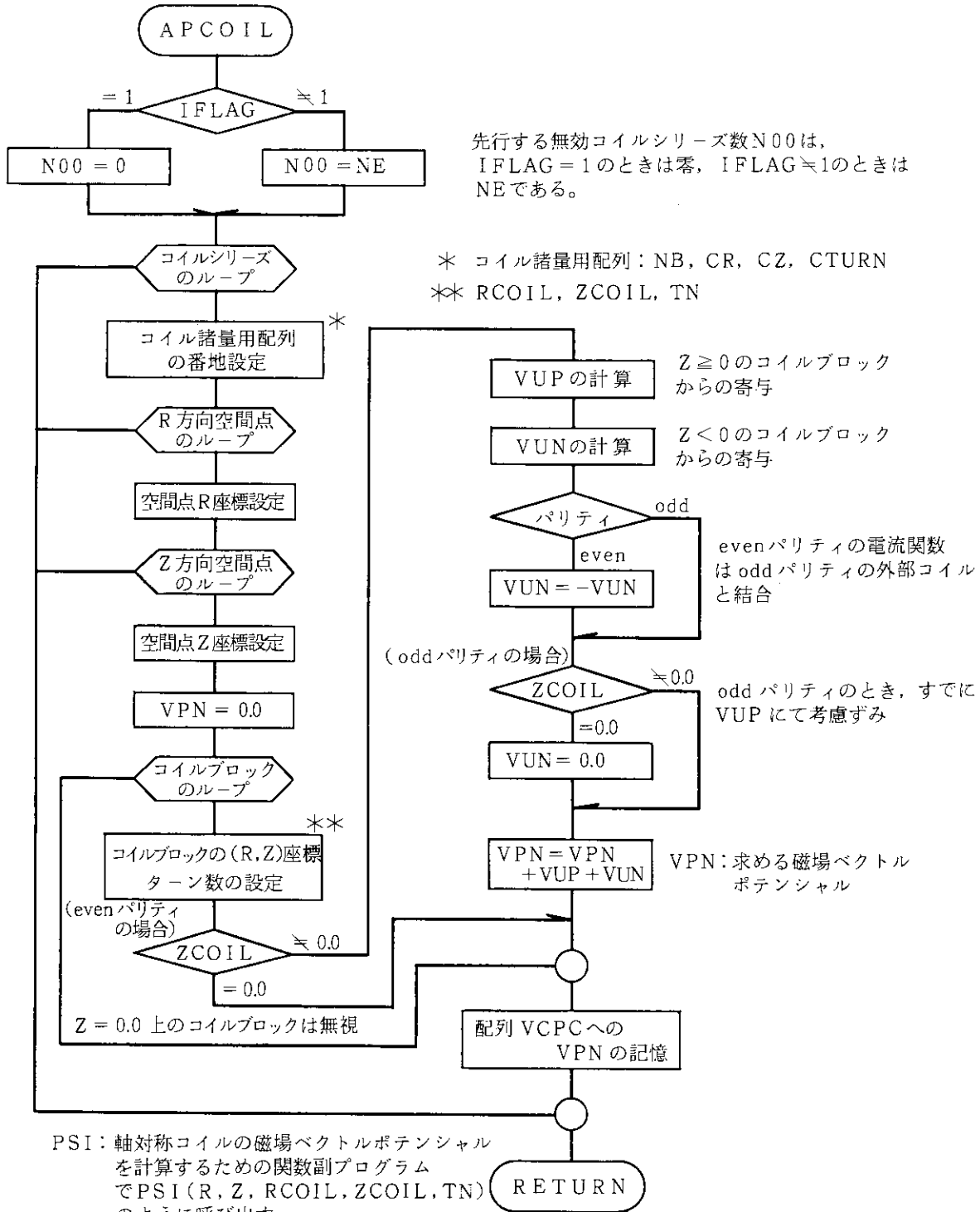
A.3.5 FLDDEC プログラム





サブルーチン APCOIL

ここでは、外部コイルシリーズによる単位電流当たりの磁場ベクトルポテンシャルを空間点 (R, Z) に対して求める。本モジュールの呼び出しに際しては、当該コイルシリーズが受動コイルシリーズか或いは能動コイルシリーズかの種別が識別されており、これをフラグ変数 (IFLAG) により制御し処理を実施する (それぞれ、IFLAG = 1; IFLAG ≠ 1)。



ブロックデータ・ルーチン BLOCKD

以下のブロックデータを定義するルーチンである。

```

DATA PN/ 1.00000, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.57735, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.77459, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.86113, 0.33998, 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.90617, 0.53846, 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.93246, 0.66120, 0.23861, 0.0 , 0.0
, 0.94910, 0.74153, 0.40584, 0.0 , 0.0
, 0.96028, 0.79666, 0.52553, 0.18343, 0.0
, 0.96816, 0.83603, 0.61337, 0.32425, 0.0
, 0.97390, 0.86506, 0.67940, 0.43339, 0.14887 /

DATA WEIGHT/ 2.00000, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0
, 1.00000, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.55555, 0.88888, 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.34785, 0.65214, 0.0 , 0.0 , 0.0
, 0.23692, 0.47862, 0.56888, 0.0 , 0.0
, 0.17132, 0.36076, 0.46791, 0.0 , 0.0
, 0.12948, 0.27970, 0.38183, 0.41795, 0.0
, 0.10122, 0.22238, 0.31370, 0.36268, 0.0
, 0.08127, 0.18064, 0.26061, 0.31234, 0.33023
, 0.06667, 0.14945, 0.21908, 0.26926, 0.29552 /

```

サブルーチン CALMAG

外部受動コイルシリーズを含む複合トラス導体系の渦電流固有モードに対して、その磁束関数、磁場を計算するためのモジュール 'FLUX', 'FIELD' を呼び出すルーチンである。このため、本ルーチンでは主に処理のための共通領域の割当てを行っている。これらの諸量は、磁場ベクトルポテンシャルデータを格納している参照用ファイル (FORTRAN 論理機番 IOVCP) を用いて算出される。特に、磁束関数については3次元の構造を有する磁場ベクトルポテンシャルのトロイダル方向に一様な成分に対して定義される。

- | | |
|------------------|---|
| 1) NR, NZ, NP | 磁場諸量を計算する際の空間点数で、それぞれ R, Z, θ 方向数 |
| 2) NR1, NZ1, NP1 | NR1=NR-1, NZ1=NZ-1, NP1=NP-1 |
| 3) MODENM | 渦電流モード数: N_s |
| 4) RAREA | 処理のための作業用共通領域 |
| 5) IOVCP | 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルを読み取る際のファイルの FORTRAN 論理機番 (= 29) |
| 6) IOFLX, IOFLD | それぞれ、算出された磁束関数、磁場を書込むためのファイルの FORTRAN 論理機番 (=26, =25) |
| 7) ISMD, IEMD | プリントの開始モード番号, 終了モード番号 |

- 8) IRDOPT プリント時のモード縮小のための制御フラグ
 { = 1 : 縮小する。
 { ≠ 1 : 縮小しない。
- 9) MREDCT(500) 縮小対象モードか否かを判別するパラメータで、モード毎に与えられる。
 { = 1 : 非縮小対象モード
 { = 0 : 縮小対象モード
- 10) LPOUT1 渦電流モード毎の磁場のプリント制御のための論理変数
 { = TRUE : IOUT(4) = 1 のとき
 { = FALSE : IOUT(4) ≠ 1 のとき
- 11) LPOUT2 渦電流モード毎の一樣磁場のプリント制御のための論理変数
 { = TRUE : IOUT(4) = -1 のとき
 { = FALSE : IOUT(4) ≠ -1 のとき
- 12) RC, ZC, PC 直方体有限要素 Ω_s の重心点 (R, Z, θ) 座標
- 13) WKB, BIJ 渦電流モード毎の各々磁場ベクトルポテンシャル, 磁場の記憶領域
- 14) FCBR, FCBZ それぞれ, 一樣磁場 \bar{B}_R, \bar{B}_Z のための記憶領域
- 15) BUFF 作業用領域
- 16) IRGUS 'ARGUS' プロット³¹⁾のためのデータをダンプする際のファイルの FORTR-
 AN 論理機番 (= 29)
- 17) PAI = π
- 18) RR(NR) 空間点の R 座標
- 19) COEFF 磁場ベクトルポテンシャルの θ 方向成分をトロイダル方向に平均した値
- 20) VCP(NR, NZ, NP, 3) 磁場ベクトルポテンシャルの R, Z, θ 方向各成分
- 21) APHAI(NP) 磁場ベクトルポテンシャルの θ 方向成分の一時記憶領域
- 22) PIJ(NR, NZ, MODENM) モード毎の磁束関数
- 23) IPLTEV モード毎の磁束分布を 'ARGUS' プログラムによりプロットするための入力
 オプション
 { = 1 : プロットする。
 { = 0 : プロットしない。
- 24) LPOUT モード毎の磁束関数をプリントするか否かの制御用論理変数
 { = FALSE : IOUT(3) ≠ 1 のとき
 { = TRUE : IOUT(3) = 1 のとき
- 25) IPOUT モード毎の渦電流ベクトルポテンシャルをプリントするか否かの制御用論
 理変数
 { = TRUE : IOUT(2) = 1 かつ IRST = -1 のとき
 { = FALSE : IOUT(2) ≠ 1 または IRST ≠ -1 のとき

サブルーチン FIELD

ここでは、渦電流固有モード毎の磁場ベクトルポテンシャルを用いて、3次元空間 (R, θ, Z) における直方体有限要素 Ω_s の重心位置での磁場を計算する。更に、トロイダル方向に一樣な R, Z 方向成分 \bar{B}_R, \bar{B}_Z を求める。明らかに、磁場の θ 方向成分はトロイダル方向に平均を取ると常に零である。

Fig. 2.26 に示すような直方体の有限要素 Ω_s を考える。このとき、2.2 節で行った説明にしたがい、重心点 (R_0, θ_0, Z_0) における磁場 (B_R, B_θ, B_Z) は

$$\left. \begin{aligned} B_R &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \sum_{\nu}^{L,U} \left\{ \frac{1}{R_0 \Delta \theta} \varepsilon(\mu) A_Z(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) A_\theta(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_\theta &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \sum_{\nu}^{L,U} \left\{ -\frac{1}{\Delta Z} \varepsilon(\nu) A_R(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{\Delta R} \varepsilon(\sigma) A_Z(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \\ B_Z &= \frac{1}{4} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \sum_{\nu}^{L,U} \left\{ \left(\frac{1}{2R_0} + \frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta R} \right) A_\theta(\sigma, \mu, \nu) - \frac{1}{R_0 \Delta \theta} \varepsilon(\mu) A_R(\sigma, \mu, \nu) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (B5.1)$$

によって求まる。

サブルーチン FILALF

ここでは、FLDDEC プログラムの実行に必要な全てのファイルの割当てを IPF コマンドを用いて行い、更に OPEN 文によりデータセット識別番号 (FORTRAN 論理機番) とデータセット名を結合する。

問題入力のオプションにより必要なファイルが異なり、次のようなファイル処理を行う。

(1) IRST=1 のとき

FORTRAN 論理機番 27 (IOVCP) のファイルの割当ておよびこれとデータセット名との結合を行う。本ファイルはユーザーファイルとしてカタログ保存される。

(2) IRST=0 のとき

FORTRAN 論理機番 27 (IOVCP) のファイルの割当ておよびこれとデータセット名との結合を行う。本ファイルは実行終了時には消去される。

(3) IPLTEV ≠ 0 または IPLTVP ≠ 0 のとき

磁束分布プロット (オフライン処理の 'ARGUS' プログラム³¹⁾ 使用) のために FORTRAN 論理機番 29 (IRGUS) のダンプファイルの割当てを行う。更に、これとデータセット名との結合を行う。本ファイルは TSS 作業用ファイルとして当日のみ有効である。

(4) 常時作成

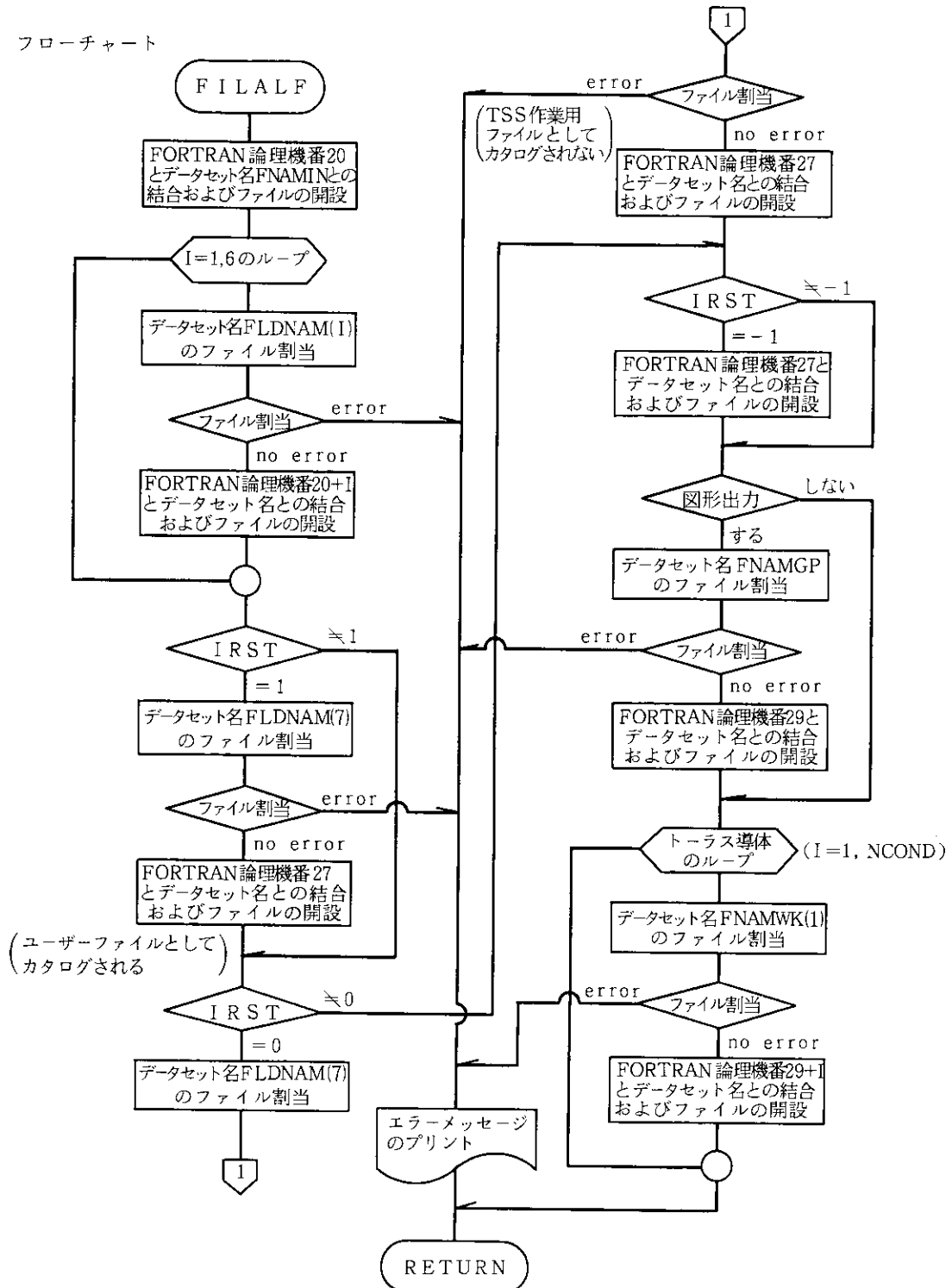
本プログラムの処理のための作業用ファイルとして FORTRAN 論理機番 21 ~ 26, およびトラス導体数 N_t (NCOND) の作業用ファイル (FORTRAN 論理機番 31 ~ 29 + NCOND) の割当てとこれらデータセット名との結合を行なう。本ファイルは実行終了時には必ず消去される。

[1] 主な記号の説明

- | | |
|-------------|--|
| 1) IR1, IR2 | 共に IPF コマンドによるファイル割当て時のエラーコード (共に = 0 のとき正常) |
| 2) USERID | 問題実行時のユーザー ID |
| 3) IRST | リスタートオプションのための入力パラメータで、渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルのデータファイル (FORTRAN 論理機番 27) を
$\left\{ \begin{array}{l} = 1 : \text{新たに作成し, ユーザーファイルとしてカタログ保存する。} \\ = -1 : \text{以前に作成された参照用ファイルを利用して処理を進める。} \\ = 0 : \text{作業用ファイルとして作成し, 実行終了時消去する。} \end{array} \right.$ |
| 4) FNAMEGP | 'ARGUS' プログラム ³¹⁾ による磁束分布プロットのためのダンプファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 29) |

- 5) FNAMIN EM3DEC プログラムで得られた参照用ファイルのデータセット名 (FORTRAN 論理機番 20)
- 6) FLDNAM FORTRAN 論理機番 21 ~ 27 の作業用ファイルのデータセット名である。ただし、FLDNAM(7)は入力オプションによりユーザーファイルとしてカタログ保存される場合がある。
- 7) FNAMWK 各トラス導体系作業ファイル (FORTRAN 論理機番 30 ~) のデータセット名 (プログラム内部で DATA 文により自動的に与えられる)

(2) フローチャート



サブルーチン FLUX

ここではまず、入力オプションにしたがい渦電流固有モード毎の磁場ベクトルポテンシャルをプリントする。更に、モード毎の磁束関数を(R,Z)面内で求めるが、このため、ベクトルポテンシャルのθ方向成分A_θをフーリエ分解するモジュール'FOURIE'を呼び出す。本ルーチンの後半において、磁束関数の'ARGUS'プロットのためのファイルダンプおよび磁束関数のプリント出力などを入力の指定にしたがい実施する。

サブルーチン FOURIE

ここでは、1変数関数F(z)の或る区間内での平均量 \bar{F} を計算する。ただし、以下に述べる2つの場合についてこれを求める。

[IFLAG≠1のとき]

Fig. B5.1(a)のように、データ点が区間の境界上に存在する場合であって、このとき、

$$\bar{F} = \left\{ \frac{1}{2}F(1) + \sum_1^{2N-1} F(I) + \frac{1}{2}F(N) \right\} / (N-1),$$

となる。

[IFLAG=1のとき]

Fig. B5.1(b)のように、データが区間に対して与えられており、このとき、

$$\bar{F} = \sum_1^{1,N} F(I) / N,$$

となる。

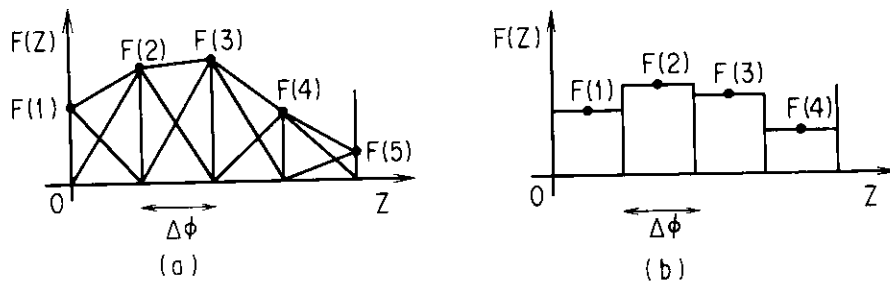


Fig. B5.1 Fourier decomposition of the one variable function F(z). In the subfigure (a), a set of data F(z) is given at the boundaries of each domain Δφ. On the otherhand, a set of data F(z) is given at the each domain Δφ (see the subfigure (b)).

サブルーチン MAGCL

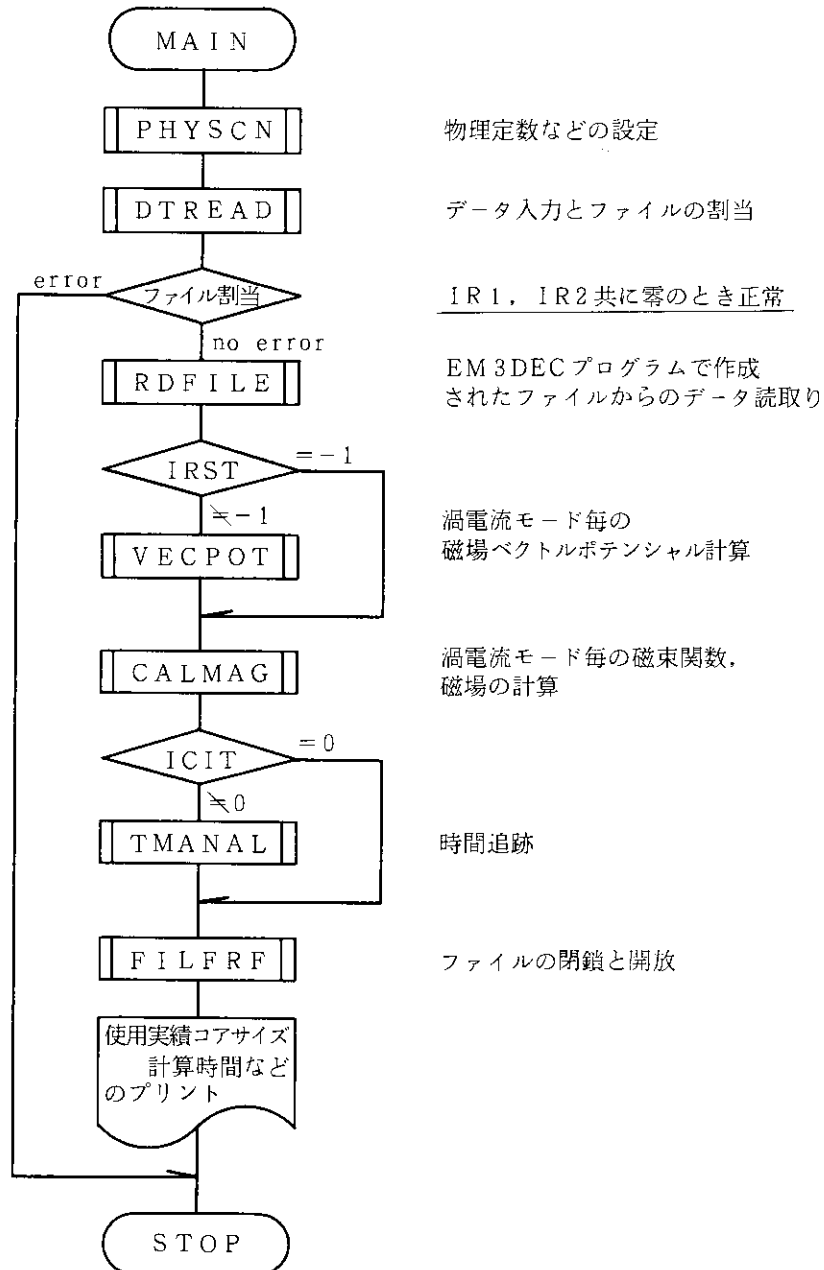
ここでは、軸対称な磁場ベクトルポテンシャルA_θから、ポロイダル面内に生成される磁場を算出する。特に、ポロイダル面内の四角形要素に対して、その4頂点で磁場ベクトルポテンシャルがA_θ(σ,μ) (σ=L,U; μ=L,U)のように与えられたとする。このとき、四角形要素の重心点(R₀, Z₀)において、これら磁場諸量は

$$\left. \begin{aligned} B_R &= \frac{-1}{2} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \frac{\varepsilon(\mu)}{\Delta Z} A_{\theta}(\sigma, \mu), \\ B_Z &= \frac{1}{2} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \left(\frac{1}{2R_0} + \frac{\varepsilon(\sigma)}{\Delta R} \right) A_{\theta}(\sigma, \mu), \end{aligned} \right\} \quad (B5.2)$$

により与えられる。

メイン・ルーチン MAINF

ここでは、複合トーラス導体系における渦電流および外部コイルシリーズによる磁場諸量を求めるための各種モジュールの呼び出しを制御する。



サブルーチン QUADR

ここでは、空間点 (R, θ, Z) における磁場ベクトルポテンシャルを求めるため、トーラス導体上の或る有限要素 Ω に対する形状関数を (2.19) 式を用いて計算する。ただし、トーラス導体赤道面の上下に関するパリティによる縮約を考慮した形状関数である。計算式について詳しい説明は、2.2 節を参照願いたい。また、記号の説明はサブルーチン 'VECPOT' を参照されたい。

サブルーチン RDFILE

ここでは、EM3DEC プログラムにて得られた複合トーラス導体系における渦電流モードデータ、モードの時間応答を記憶しているファイル (FORTRAN 論理機番 IOMLT) から、これら諸量を読み取り、プリント出力する。更に、本プログラムでの以後の処理の都合から、これらを3つのデータファイルに分離し書き換える (Fig. B5.2 参照)。

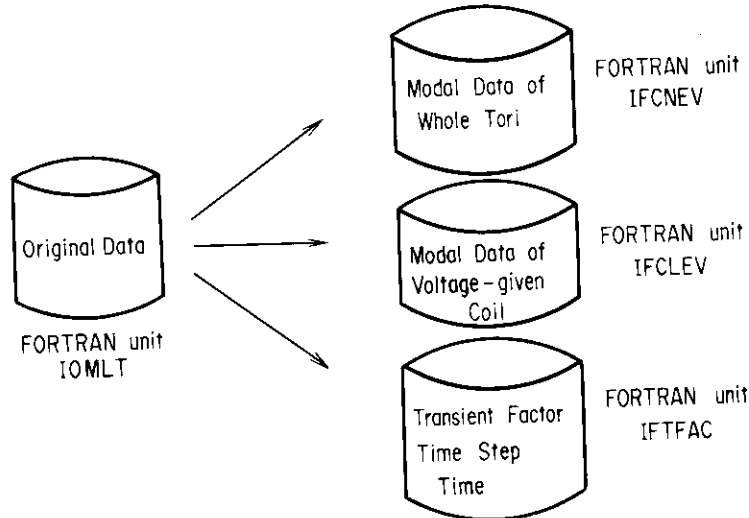


Fig. B5.2 Rewriting of the data set obtained by EM3DEC program into three distinct data files (FORTRAN unit IFCNEV, IFCLEV and IFTFAC).

- | | |
|--|--|
| 1) RAREA | 処理のための作業用共通領域 |
| 2) MODENM | 渦電流モード総数: N_s |
| 3) NE, NC | 外部受動コイルシリーズ数: N_c^e , 外部能動コイルシリーズ数: N_c^e |
| 4) NCOND, NCOIL, IPARTY | トーラス導体数: N_t , 外部コイルシリーズ数: $N_c (=N_c^e + N_c^e)$, 電流関数のパリティ |
| 5) IMAX, JMAX, NPHI, DPHI, LPOINT, FORMF, PMESHF, IMESHF | トーラス導体の断面形状, メッシュ点などの情報であり, 詳しくはサブルーチン 'VECPOT' を参照すること。 |
| 6) IOMLT | 複合トーラス導体系の渦電流モードデータ, モードの時間応答係数など EM3DEC プログラムで作成された参照のためのデータを記憶するファイルの FORTRAN 論理機番 (= 20) |
| 7) IFCNEV, IFCLEV | それぞれ, 全トーラス導体, 外部受動コイルシリーズの渦電流モードデータをダンプするためのファイルの FORTRAN 論理機番 (=22, =23) |
| 8) IFTFAC | モードの時間応答をダンプするためのファイルの FORTRAN 論理機番 (= 24) |
| 9) LPOUT | モードの時間応答をプリント出力するか否かを制御するための論理変数
$\begin{cases} =\text{FALSE: IOUT}(1) = 0 \text{ のとき} \\ =\text{TRUE: IOUT}(1) \neq 0 \text{ のとき} \end{cases}$ |
| 10) NB, CETA, CRO, CL | それぞれ, 各コイルシリーズのブロック数 (最大は 50 ブロック), 導体材料の体積固有抵抗 ($\Omega \cdot m$), 抵抗 (Ω), インダクタンス (H) |

- 11) CR, CZ CR(I, J), CZ(I, J) で, 第 j シリーズ, 第 i ブロック中心の各々 R 座標, Z 座標 (単位は m)
- 12) CTURN CTURN(I, J) で, 第 j シリーズ, 第 i ブロックのターン数
- 13) CA, CB CA(I, J), CB(I, J) で, 第 j シリーズ, 第 i ブロックの各々 R 方向寸法, Z 方向寸法 (単位は m)

サブルーチン REWRIT

ここでは, Fig. B5.3 に示すように, 外部受動コイルシリーズを含む渦電流モードデータを外部受動コイルシリーズのモードデータとトーラス導体のモードデータとに分離し, それぞれを FORTRAN 論理機番 IFCLEV, IFCLEV に別々に書込む。本ルーチンはトーラス導体のモードデータを必要とするたび毎に呼び出されるが, モードデータ用領域 EIGF には常に当該トーラス導体のモードデータと外部受動コイルシリーズのモードデータとが一体となって記憶されている。したがって, トーラス導体群と外部受動コイルシリーズのモードデータとの分離にあたっては, 最終のトーラス導体分について本ルーチンが呼び出される際に, 外部受動コイル分のモードデータをファイル (FORTRAN 論理機番 IFCLEV) に書込めばよい。

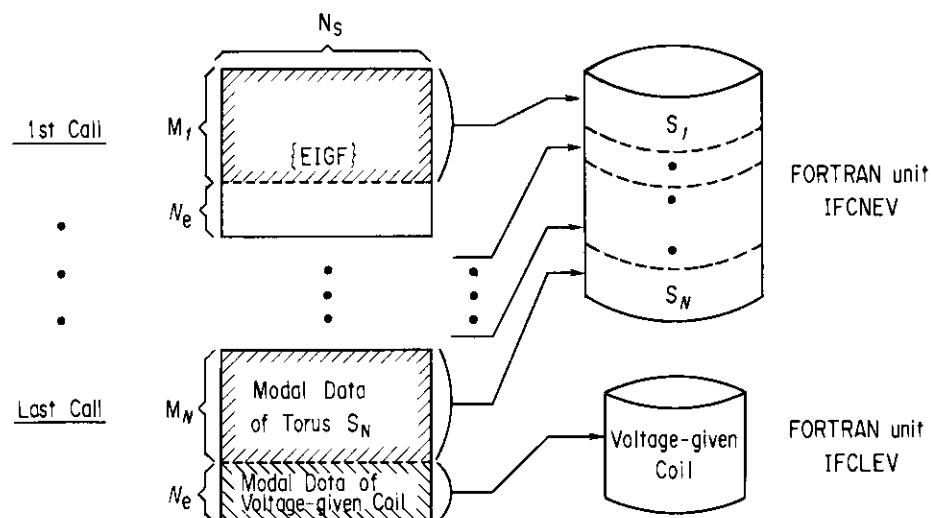


Fig. B5.3 Separation of the modal data EIGF into modal data of tori and voltage-given coils. The N_s is the total number of eigen modes of eddy current. The M_N is the number of nodal points on the torus S_N and the N_e the number of voltage-given coil series.

サブルーチン SHAPF

複合トーラス導体系における渦電流によるモード毎の磁場諸量を求めるためには, 膨大な表面積分を実施する必要がある。したがって, この数値積分をモード毎に毎回求めるのは得策ではない。一般に, トーラス導体上の或る長方形要素内において, 電流関数が該当する4つの頂点量を用いた適当な内挿関数により表現されているとき, 渦電流モードに関係しない形状関数が定義できる。この場合, 求める磁場ベクトルポテンシャルは, この形状関数とモード毎の節点量との単純な1次結合の形で与えることができる。

形状関数は (2.91) 式で与えられるが, ここではまず計算のためのメッシュ点諸量, Gauss-Legendre 数値積分のための積分データなどを算出し, 形状関数を数値計算するための準備を行う。トーラス導体の全領域に対して1次独立な形状関数を求めた後, 2.2節の説明にしたがって ϕ 方向に形状関数を縮約させる。記号の説明については, サブルーチン 'VECPOT' を参照されたい。

〔1〕 Gauss-Legendre 積分のための初期化

本ルーチンでは、最初に以下の諸量の初期化を行う。

(1) Legendre 多項式の零点の局所座標, 重み

- PINTP(IPGAUS), PINTL(ILGAUS)

BLOCK DATA にて与えられた数値テーブル PN(5, 10)を用いて、それぞれ ϕ 方向: $X [-1, 1]$, l 方向: $Y [-1, 1]$ における Legendre 多項式の零点を定義する。この局所座標 X, Y は、有限要素 Ω の全てに対して共通である。

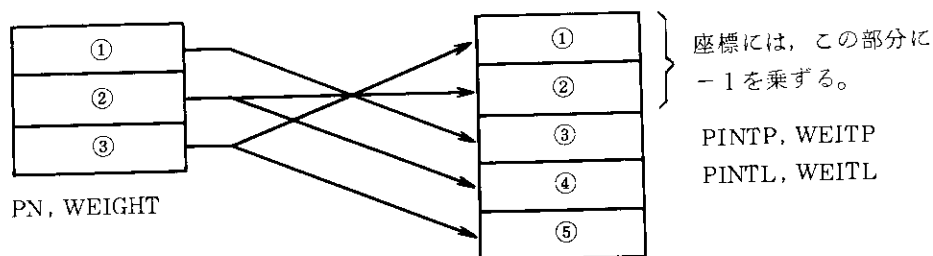
- WEITP(IPGAUS), WEITL(ILGAUS)

BLOCK DATA にて与えられた数値テーブル WEIGHT(5, 10)を用いて、それぞれ ϕ 方向および l 方向の Legendre 多項式の零点に対して重みを定義する。この重みは、有限要素 Ω の全てに対して共通である。

これらの諸量の定義の仕方は、積分の零点数が奇数か偶数かによって以下のように異なる。

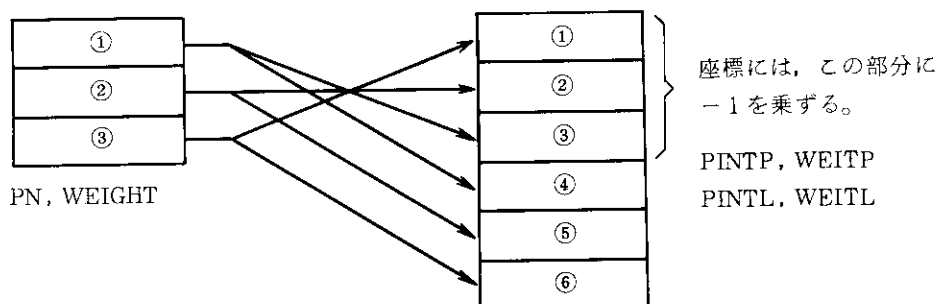
(a) Legendre 多項式の零点数が奇数の場合、次のように置き換える。

(例えば、5点の場合)



(b) Legendre 多項式の零点数が偶数の場合、次のように置き換える。

(例えば、6点の場合)



(2) トーラス断面形状に関する諸量

- R(ILGAUS, IMAX), Z(ILGAUS, IMAX)

それぞれ、トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ毎に与えられる Legendre 多項式の零点の r 座標, z 座標である。

- DL(IMAX)

トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ i の l 方向幅 Δl_i である。

- DRDL(ILGAUS, IMAX), DZDL(ILGAUS, IMAX)

それぞれ、トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ毎に与えられる Legendre 多項式の零点の $dr/dl, dz/dl$ である。

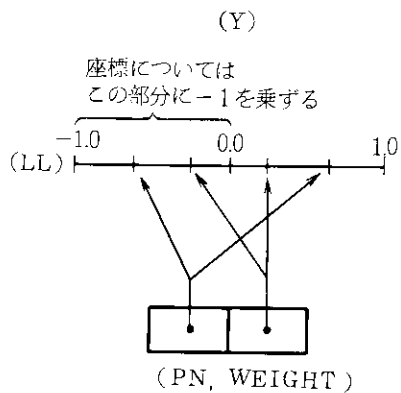
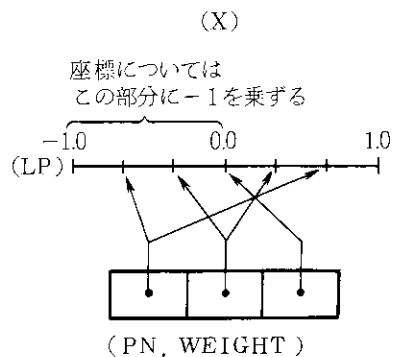
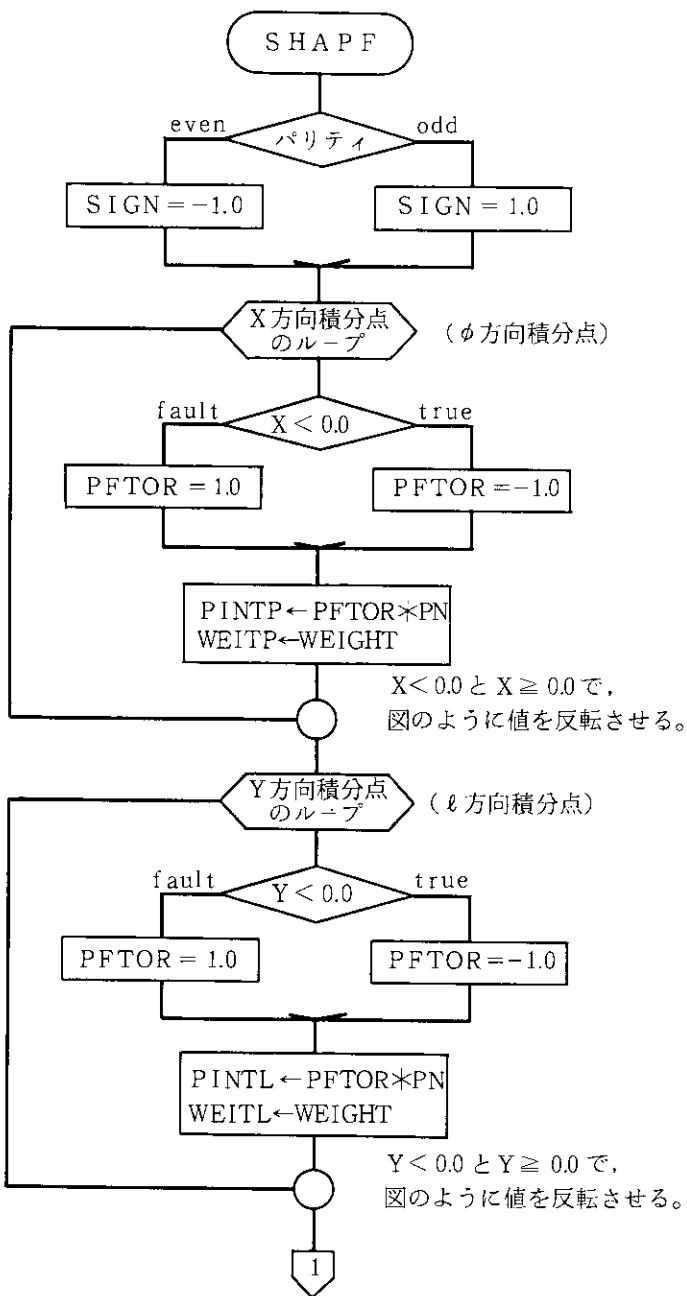
これら諸量の与え方は、メッシュ点が円弧に属するか、直線に属するかで2通りに分けられる。求め方は、付録A .3.1 サブルーチン 'INTGS' で説明した方法と同じである。

(3) ϕ 方向に関する諸量

- GLSIN(IPGAUS, MJMAX, NP), GLCOS(IPGAUS, MJMAX, NP)

それぞれ、トーラス導体の ϕ 方向メッシュ Ω , 当該積分点 ϕ に対する θ 方向空間点 θ での $\sin(\theta - \phi)$, $\cos(\theta - \phi)$ を意味する。

(2) フローチャート



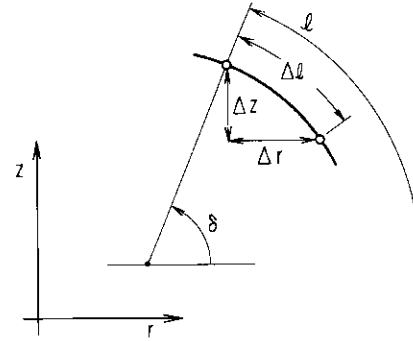
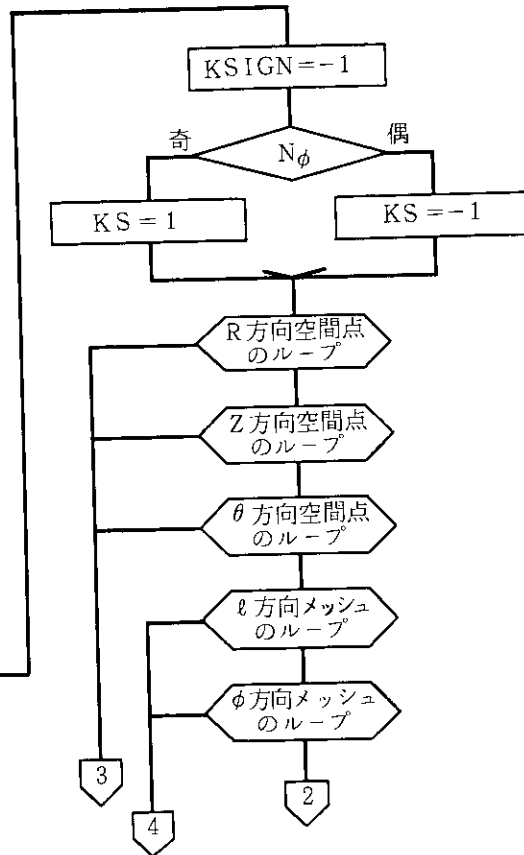
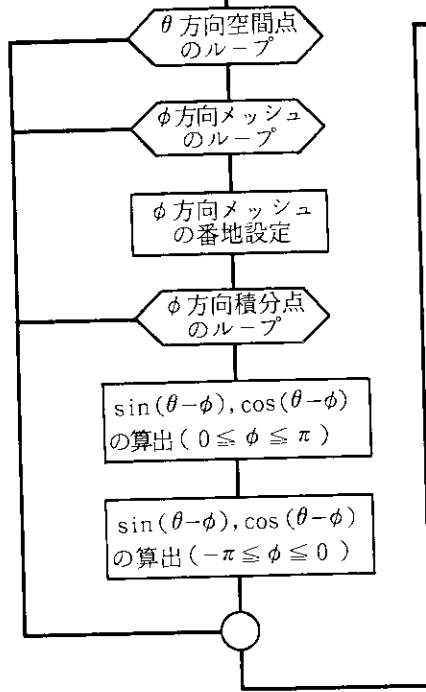
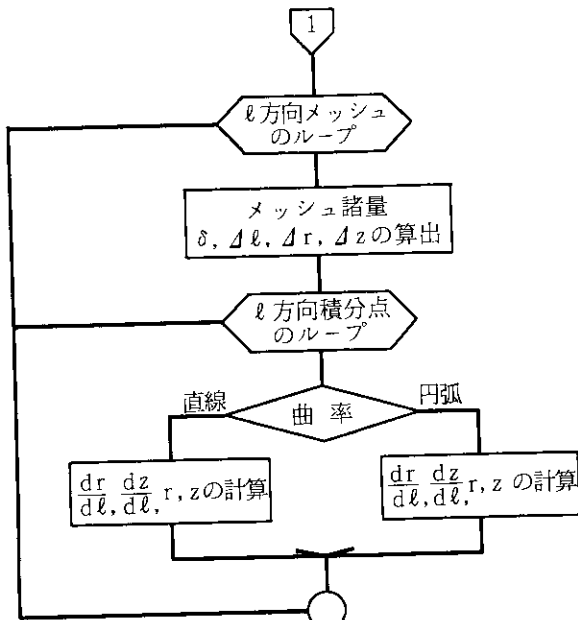
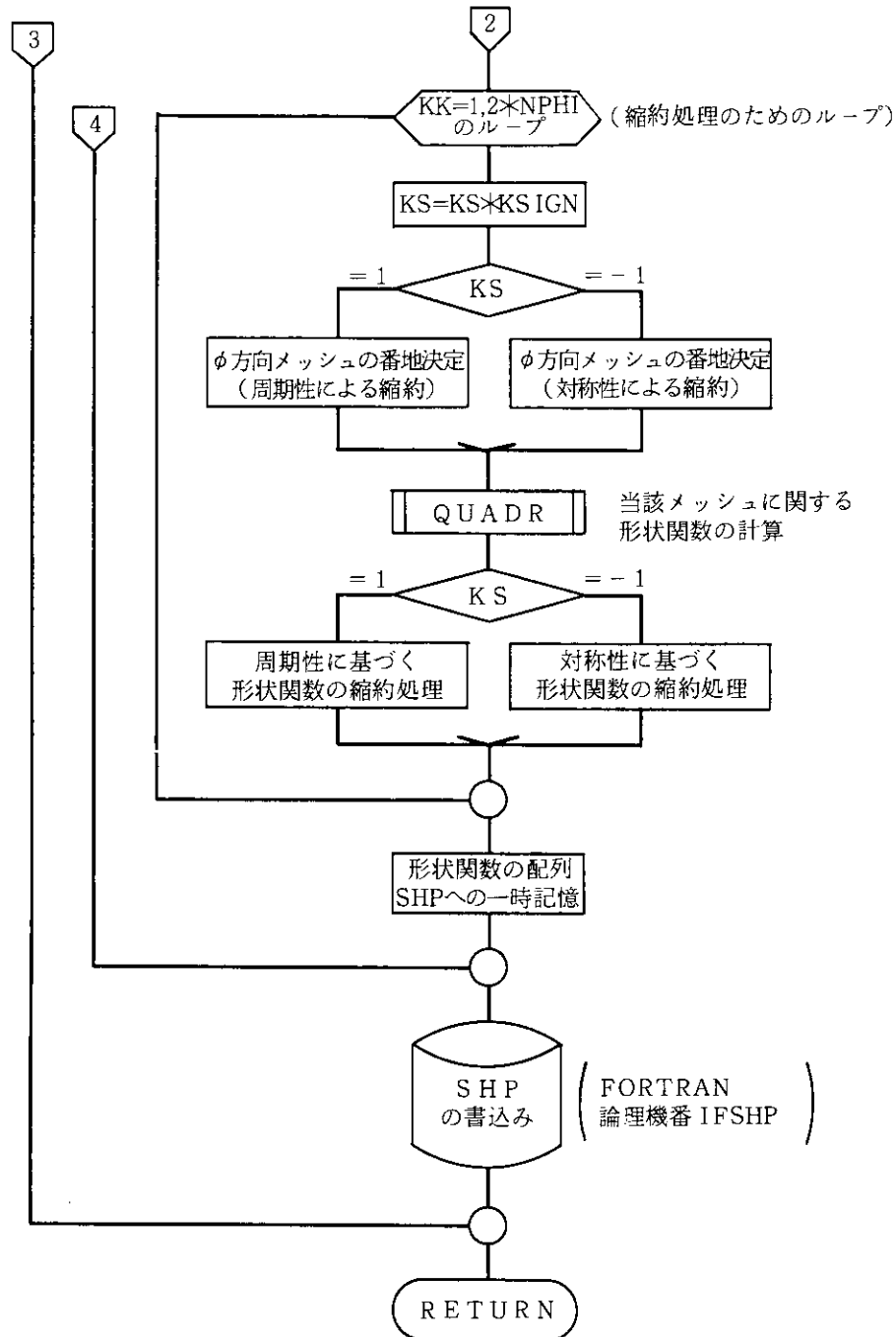


Fig. B5.4 $\delta, \Delta r, \Delta z, \Delta l$ of the l -directional mesh.

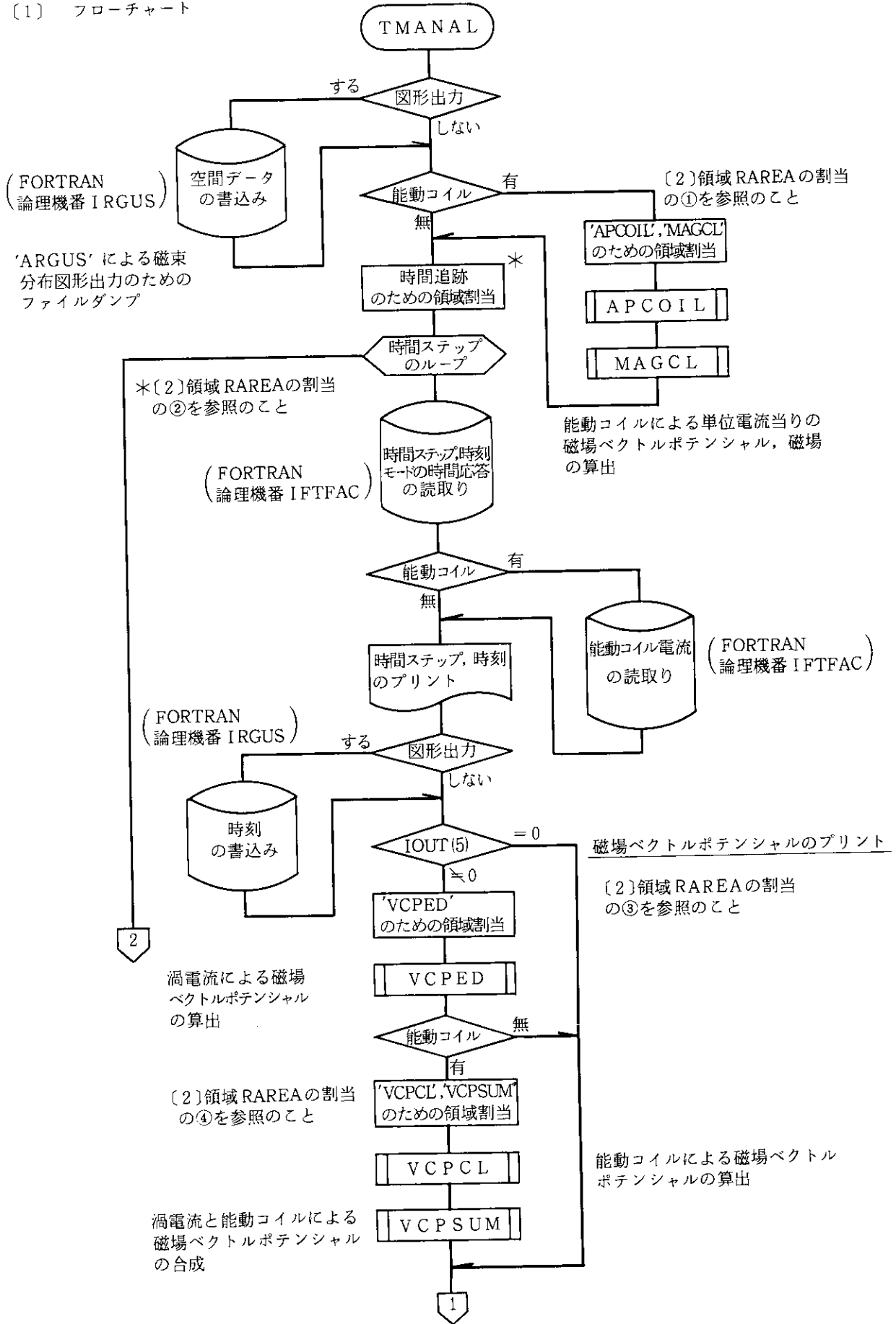


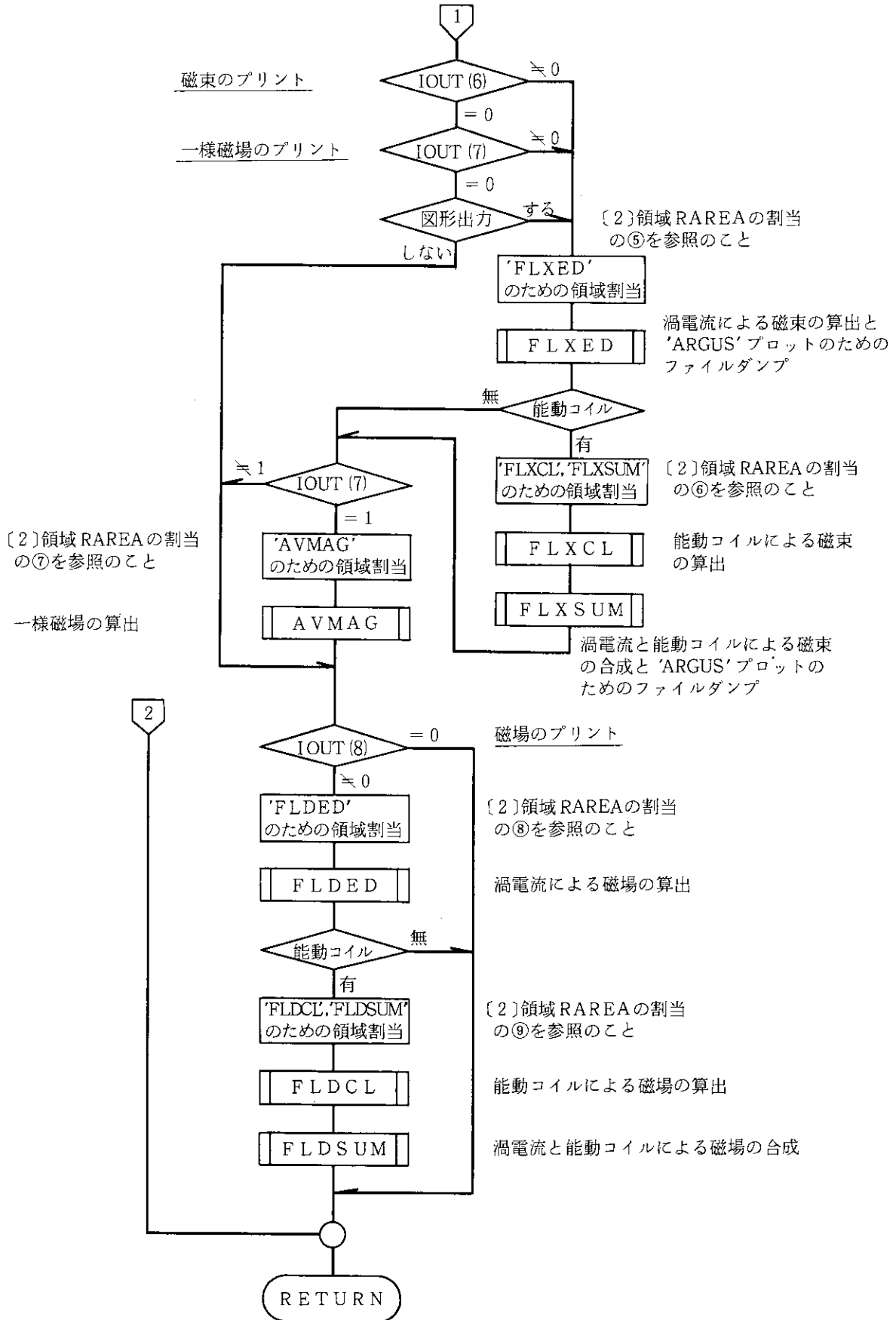


サブルーチン TMANAL

ここでは、複数のトラス導体群や外部受動コイルシリーズの渦電流および外部能動コイルシリーズの電流に対して、3次元空間点での磁場ベクトルポテンシャル、磁束、磁場を時間追跡する。渦電流モード毎の時間応答係数はEM3DECプログラムにて求められており、更に渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャル、磁束、磁場などの諸量は本プログラムでの先の処理にて全て得られており、それぞれファイルに記憶されている。したがって、ここでの処理は単にモードに対して時間応答係数の重みを考慮し、これらモードの線形結合を計算するだけである。本モジュールでは、作業のための共通領域の割当てを行い、上記の処理を行う各種モジュールを呼び出す。

(1) フローチャート





〔2〕 領域 RAREA の割当て

- ① サブルーチン 'APCOIL', 'MAGCL' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST0 LAST1

VCPC	BRZC
------	------

$$\text{LAST0} = \text{NR} * \text{NZ} * \text{NC},$$

$$\text{LAST1} = \text{LAST0} + 2 * \text{NR1} * \text{NZ1} * \text{NC}.$$

- ② 時間追跡のための割当て (本モジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST1 LAST2 LAST3

XMODE	CUR
-------	-----

$$\text{LAST2} = \text{LAST1} \div \text{MODENM},$$

$$\text{LAST3} = \text{LAST2} + \text{NC}.$$

- ③ サブルーチン 'VCPED' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST1 LAST2 LAST3 LAST4 LAST5

XMODE		VSUM	VCPN
-------	--	------	------

$$\text{LAST4} = \text{LAST3} + 3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP},$$

$$\text{LAST5} = \text{LAST4} + 3 * \text{NR} * \text{NZ} * \text{NP}.$$

- ④ サブルーチン 'VCPCL', 'VCPSUM' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST0 LAST2 LAST3 LAST4 LAST6

VCPC		CUR	VSUM	VCPCC
------	--	-----	------	-------

$$\text{LAST6} = \text{LAST4} + \text{NR} * \text{NZ}.$$

- ⑤ サブルーチン 'FLXED' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST1 LAST2 LAST3 LAST7 LAST8

XMODE		AFLUX	PRZ
-------	--	-------	-----

$$\text{LAST7} = \text{LAST3} + \text{NR} * \text{NZ},$$

$$\text{LAST8} = \text{LAST7} + \text{NR} * \text{NZ} * \text{MODENM}.$$

- ⑥ サブルーチン 'FLXCL', 'FLXSUM' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST0 LAST2 LAST3 LAST7 LAST9

VCPC		CUR	AFLUX	CFLUX
------	--	-----	-------	-------

- ⑦ サブルーチン 'AVMAG' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST3 LAST7 LAST10

AFLUX	BRZAV
-------	-------

$$\text{LAST10} = \text{LAST7} + 2 * \text{NR1} * \text{NZ1}.$$

- ⑧ サブルーチン 'FLDED' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST1 LAST2 LAST3 LAST11 LAST12

XMODE		BSUM	BRZPN
-------	--	------	-------

$$\text{LAST11} = \text{LAST3} + 3 * \text{NR1} * \text{NZ1} * \text{NP1},$$

$$\text{LAST12} = \text{LAST11} + 3 * \text{NR1} * \text{NZ1} * \text{NP1}.$$

⑨ サブルーチン 'FLDCL', 'FLDSUM' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

LAST0 LAST1 LAST2 LAST3 LAST11 LAST12

BRZC		CUR	BSUM	BRZPC
------	--	-----	------	-------

[3] 主な記号の説明

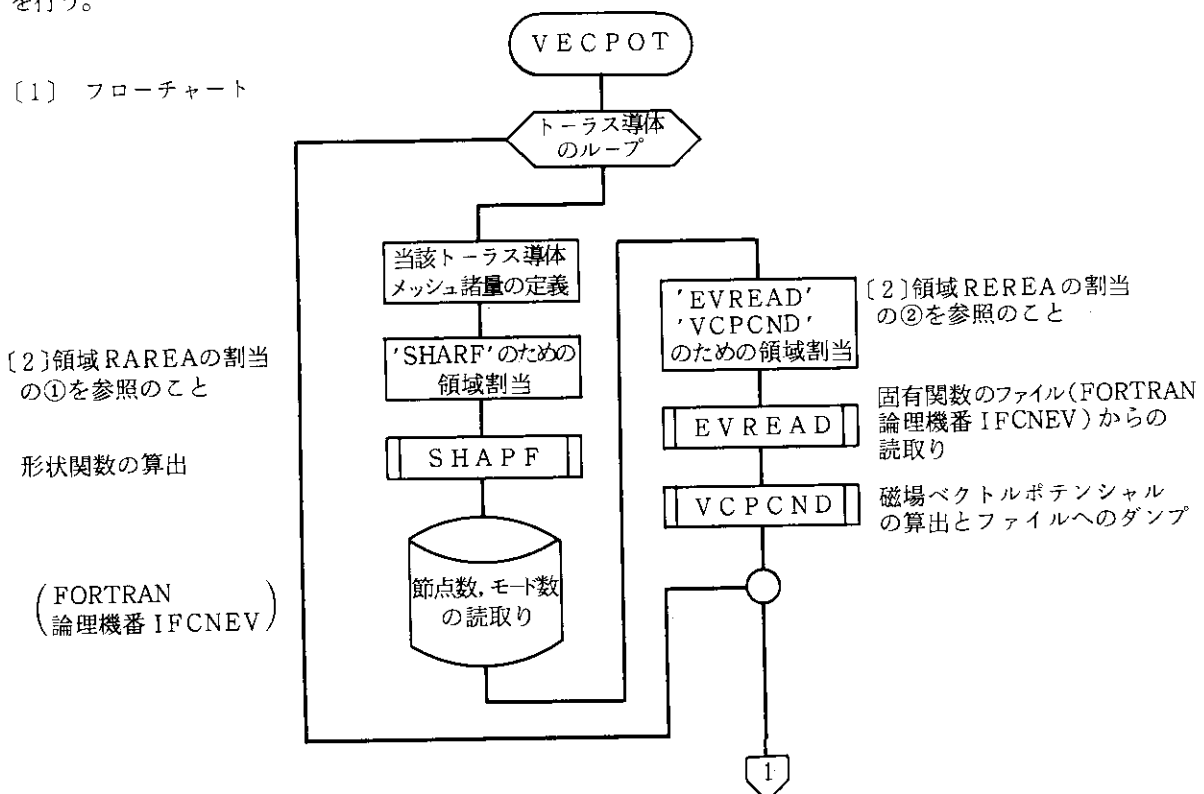
- 1) RAREA 処理のための作業領域
- 2) MODENM 渦電流モード総数: N_s
- 3) NR, NZ, NP 磁場諸量を計算する際の空間点数で, それぞれ R, Z, θ 方向数
- 4) NR1, NZ1, NP1 $NR1=NR-1, NZ1=NZ-1, NP1=NP-1$
- 5) NC 外部能動コイルシリーズ数: N_c°
- 6) RM, RM1, RC それぞれ, 直方体有限要素 Ω_s の R_L, R_U, R_0
- 7) IFLAG コイルが能動コイルか受動コイルかの識別のためのフラグ
 $\begin{cases} = 1: \text{受動コイルシリーズ} \\ \neq 1: \text{能動コイルシリーズ} \end{cases}$
- 8) PSI 或る軸対称コイルのつくる磁場ベクトルポテンシャルを計算する関数副プログラムで, $PSI(R, Z, RCOIL, ZCOIL, TN)$ のように呼び出す。
- 9) CUR(NC) 外部能動コイルシリーズの当該時刻での電流値
- 10) XMODE(MODENM) 当該時刻でのモード毎の時間応答係数
- 11) IRDOPT モード合成時のモード縮小制御のためのフラグ
 $\begin{cases} = 1: \text{縮小する。} \\ \neq 1: \text{縮小しない。} \end{cases}$
- 12) MREDCT(500) モード毎に与えられる縮小対象か否かを判別するパラメータ
 $\begin{cases} = 1: \text{非縮小対象モード} \\ \neq 1: \text{縮小対象モード} \end{cases}$
- 13) ISTM, IESM それぞれ, 時間ステップの開始番号 (常に = 1), 終了番号
- 14) IOVCP, IOFLX, IOFLD それぞれ, 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャル, 磁束, 磁場を讀取するための各ファイルの FORTRAN 論理機番 (= 27, = 26, = 25)
- 15) IRGUS 磁束分布を 'ARGS' プログラム³¹⁾により図形出力するためのダンプファイルの FORTRAN 論理機番 (= 29)
- 16) IPLTVP 磁束分布を 'ARGUS' プログラムとの合成値をファイルダンプする。
 $\begin{cases} = 1: \text{外部能動コイルとの合成値をファイルダンプする。} \\ = -1: \text{渦電流のみをファイルダンプする。} \\ = 0: \text{ファイルダンプしない。} \end{cases}$
- 17) IFTFAC モードの時間応答係数を讀取るファイルの FORTRAN 論理機番 (= 24)
- 18) VCPN(NR, NZ, NP, 3) 渦電流モード毎の磁場ベクトルポテンシャルで, 空間点での R, Z, θ 成分を示す ($NE=0$ のときはトラス導体群による磁場ベクトルポテンシャルを示す)。
- 19) VCPC(NR, NZ, NC) 外部能動コイルシリーズ毎の単位電流当たりの A_s

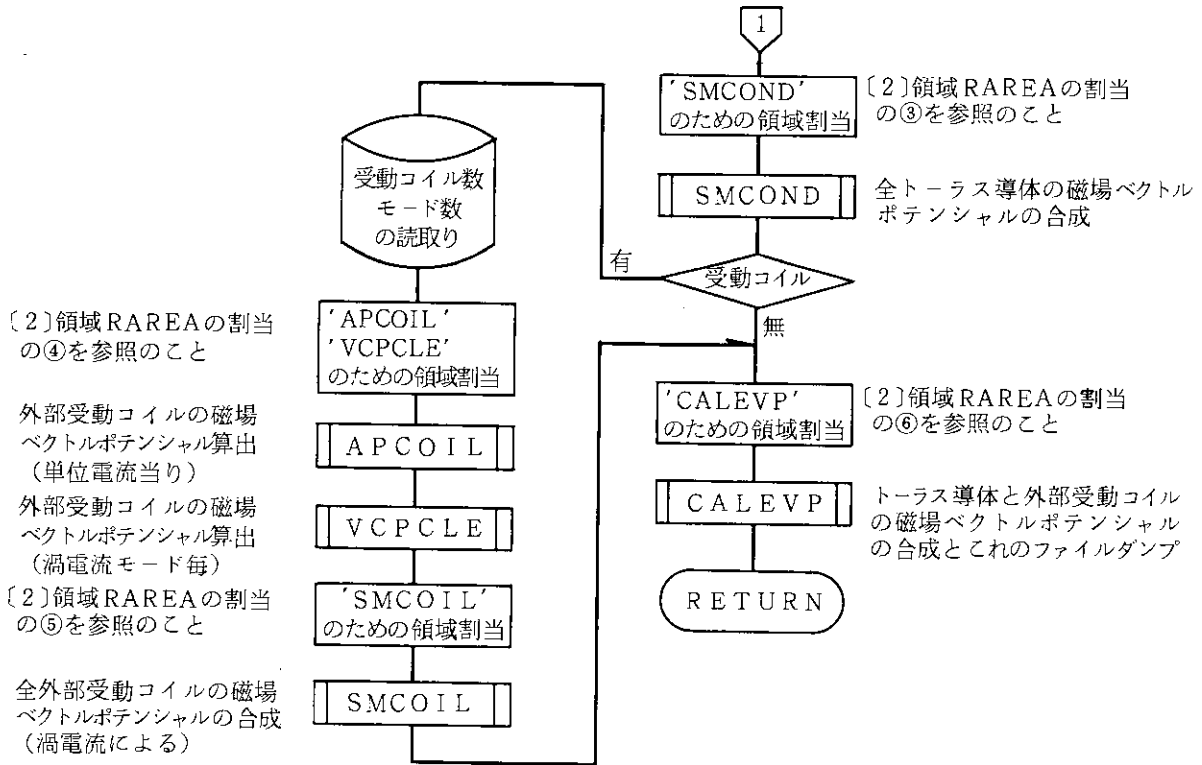
- 20) BRZC(NR1, NZ1, 2, NC) 単位電流当たりの外部能動コイルシリーズがつくる磁場で, BRZC(I, J, K, L) で, R 方向第 I, Z 方向第 J 空間点, 第 L 外部能動コイルの B_R 成分 (K=1), B_z 成分 (K=2) を示す。
- 21) BRZPC(NR1, NZ1, NP1, 3) 当該時刻での外部能動コイルシリーズによる磁場で, B_θ 成分は零である。
- 22) BRZPN(NR1, NZ1, NP1) 渦電流モード毎の磁場を読取るための作業領域
- 23) BSUM(NR1, NZ1, NP1) 当該時刻での全磁場
- 24) AFLUX(NR, NZ) 始めは渦電流の磁束が記憶されているが, これに外部能動コイルシリーズの磁束が加わる。
- 25) CFLUX 外部能動コイルシリーズによる磁束
- 26) IOUT(5), IOUT(6), IOUT(8) それぞれ, 磁場ベクトルポテンシャル, 磁束, 磁場のプリントオプション
 { = 1 : 渦電流と能動コイルとの合成値をプリントする。
 { = -1 : 渦電流と能動コイルによる値を分離してプリントする。
 { = 0 : プリントしない。
- 27) IOUT(7) θ 方向に一樣な磁場プリントオプション
 { = 1 : プリントする。
 { = 0 : プリントしない。
- 28) NTS, TS 時間ステップ番号, 時刻 (sec)

サブルーチン VECPOT

ここでは, トーラス導体群および外部受動コイルシリーズの渦電流固有モード毎に, 磁場ベクトルポテンシャルを計算するため, 必要となる各種モジュールを呼び出す。本モジュールでは, 主に作業用の共通領域の割当てを行う。

[1] フローチャート





〔2〕 領域 RAREA の割当て

① サブルーチン 'SHAPF' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LASTA LASTB LASTC LASTD LASTE LASTF LASTG LASTH LASTI

SHP	GLCOS	GLSIN	DRDL	DZDL	R	Z	PINTP	PINTL
-----	-------	-------	------	------	---	---	-------	-------

LASTI LASTJ LASTK LASTL

WEITP	WEITL	DL
-------	-------	----

$LASTA = 10 * IMAX * JMAXM1,$

$LASTC = LASTB + IPGAUS * MJMAX * NP,$

$LASTE = LASTD + ILGAUS * IMAX,$

$LASTG = LASTF + ILGAUS * IMAX,$

$LASTI = LASTH + ILGAUS,$

$LASTK = LASTJ + ILGAUS,$

$LASTB = LASTA + IPGAUS * MJMAX * NP,$

$LASTD = LASTC + ILGAUS * IMAX,$

$LASTF = LASTE + ILGAUS * IMAX,$

$LASTH = LASTG + IPGAUS,$

$LASTJ = LASTI + IPGAUS,$

$LASTL = LASTK + IMAX.$

ただし, $JMAXM1 = JMAX - 1,$ $MJMAX = 2 * NPHI * JMAXM1$ である。

② サブルーチン 'EVREAD', 'VCPCND' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST2 LAST3 LAST4

EIGF	SHP	VCP
------	-----	-----

$LAST2 = JMAX * IMAXP1,$

$LAST3 = LAST2 + 10 * IMAX * JMAXM1,$

$LAST4 = LAST3 + 3 * NR * NZ * NP * MODENM.$

ただし, $IMAXP1=IMAX+1$ である。

- ③ サブルーチン 'SMCOND' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST5 LAST6



$$LAST5=NR*NZ*NP*3,$$

$$LAST6=LAST5+NR*NZ*NP*3.$$

- ④ サブルーチン 'APCOIL', 'VCPCLE' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST7 LAST8 LAST9



$$LAST7=NR*NZ*MODENM*NE,$$

$$LAST8=LAST7+MODENM,$$

$$LAST9=LAST8+NR*NZ*NE.$$

- ⑤ サブルーチン 'SMCOIL' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST10 LAST11



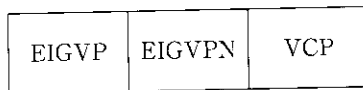
$$LAST10=LAST7,$$

$$LAST11=LAST10+NR*NZ*NP*3.$$

(=LAST7)

- ⑥ サブルーチン 'CALEVP' のための割当て (該当するモジュールの記号の説明を参照のこと)

0 LAST12 LAST13 LAST14



$$LAST12=NR*NZ*NP*3,$$

$$LAST13=LAST12+NR*NZ*NP*3,$$

$$LAST14=LAST13+NR*NZ*NP*3.$$

[3] 主な記号の説明

- | | |
|--------------------|---|
| 1) RAREA | 処理のための作業用共通領域 |
| 2) MODENM | 渦電流モード総数: N_s |
| 3) NR, NZ, NP | 磁場諸量を計算する際の空間点数で, それぞれ R, Z, θ 方向数 |
| 4) NE, NCOND | それぞれ, 外部受動コイルシリーズ数: N_e , トーラス導体数: N_t |
| 5) IPARTY | 電流関数のトーラス赤道面に関するパリティ (= 0: odd, = 1: even) |
| 6) IMAX, JMAXM1 | トーラス導体のポロイダル断面 l 方向メッシュ数, ϕ 方向メッシュ数 (= $JMAX-1$) |
| 7) NPHI | トーラスの対称性: N_ϕ |
| 8) DPHI | $\Delta\phi$ ($=\pi/(NPHI*JMAXM1)$) |
| 9) MJMAX | $2 * JMAXM1 * NPHI$ |
| 10) IMESH | メッシュ点が属する接続点番号 |
| 11) PMESH | メッシュ点の (r, z) 座標, メッシュ点と曲率中心を結ぶ直線が r 軸となす角度, トーラス導体のポロイダル断面に沿った長さ |
| 12) FORM | 接続点の (r, z) 座標, 曲率半径, 曲率中心の (r, z) 座標等 |
| 13) ILGAUS, IPGAUS | それぞれ, Gauss-Legendre 積分における Legendre 多項式の l 方向, ϕ 方向の零点数 |

- 14) MN 当該トーラス導体上の全節点数 (= (IMAX+1)*JMAX)
- 15) IFCNEV, IFCLEV, IOVCPE, IOVCPC
それぞれ、全トーラス導体の渦電流モードデータ、外部受動コイルシリーズの渦電流モードデータ、全トーラス導体の渦電流による磁場ベクトルポテンシャルデータ、外部受動コイルシリーズの渦電流による磁場ベクトルポテンシャルデータの各ファイルの FORTRAN 論理機番 (= 22, = 23, = 21, = 25)
- 16) IOVCP 磁場ベクトルポテンシャル (EIGVP) のデータファイルの FORTRAN 論理機番 (= 27)
- 17) LPOUT 外部受動コイルシリーズを含む磁場ベクトルポテンシャルをプリント出力するか否かの制御のための論理変数

$$\begin{cases} = \text{FALSE} & : \text{IOUT}(2) \neq 1 \text{ のとき} \\ = \text{TRUE} & : \text{IOUT}(2) = 1 \text{ のとき} \end{cases}$$
- 18) ISMD, IEMD プリント開始モード番号, 終了モード番号
- 19) IRDOPT プリント時のモード縮小制御のためのフラグ

$$\begin{cases} = 1 & : \text{縮小する。} \\ \neq 1 & : \text{縮小しない。} \end{cases}$$
- 20) MREDCT(500) モード毎に与えられる縮小対象モードか否かを判別するパラメータ

$$\begin{cases} = 1 & : \text{非縮小対象モード} \\ = 0 & : \text{縮小対象モード} \end{cases}$$
- 21) EIGVPN(NR, NZ, NP, 3), EIGVPC(NR, NZ, NP, 3), EIGVP(NR, NZ, NP, 3)
各々、トーラス導体群の渦電流による磁場ベクトルポテンシャル、外部受動コイルシリーズの渦電流による磁場ベクトルポテンシャル、更に、これらトーラス導体群と受動コイルシリーズを合成した磁場ベクトルポテンシャルで、 R , Z , θ 成分を示す。
- 22) IFLAG コイルが能動コイルか受動コイルかを識別するためのフラグ

$$\begin{cases} = 1 & : \text{受動コイルシリーズ} \\ \neq 1 & : \text{能動コイルシリーズ} \end{cases}$$
- 23) VCPC 外部コイルシリーズの単位電流当たりの磁場ベクトルポテンシャル
- 24) PSI 或る軸対称コイルのつくる磁場ベクトルポテンシャルを計算する関数副プログラムで、PSI(R, Z, RCOIL, ZCOIL, TN) のように呼び出す。
- 25) ALP1, ALP2, BET1, BET2, GAM1, GAM2, GZI1, GZI2, ETA1, ETA2
トーラス導体赤道面に関する縮約処理後の当該空間点(R, θ, Z)に対する形状関数で、 $\alpha_L, \alpha_U, \beta_L, \beta_U, \gamma_L, \gamma_U, \delta_L, \delta_U, \eta_L, \eta_U$ である。
- 26) RRR, ZZZ 当該空間の(R, Z)座標
- 27) SIGN パリティ: P (= 1: odd, = -1: even)
- 28) PINTL(ILGAUS), WEITL(ILGAUS)
Gauss-Legendre 積分のための ℓ 方向 Legendre 多項式の零点横座標, 同じく重み。

- 29) PINTP(IPGAUS), WEITP(IPGAUS)
Gauss-Legendre 積分のための ϕ 方向 Legendre 多項式の零点横座標, 同じく重み。
- 30) R(ILGAUS, IMAX), Z(ILGAUS, IMAX)
それぞれ, トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ毎に与えられる Legendre 多項式の零点における r 座標, z 座標
- 31) DL(IMAX)
トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ i の ℓ 方向幅 $\Delta \ell_i$
- 32) DRDL(ILGAUS, IMAX), DZDL(ILGAUS, IMAX)
それぞれ, トーラス導体のポロイダル断面に沿うメッシュ毎に与えられる Legendre 多項式の零点における $dr/d\ell$, $dz/d\ell$
- 33) GLSIN(IPGAUS, MJMAX, NP), GLCOS(IPGAUS, MJMAX, NP)
それぞれ, トーラス導体の ϕ 方向メッシュ, 当該積分点 ϕ に対する θ 方向空間点 θ での $\sin(\theta-\phi)$, $\cos(\theta-\phi)$ を意味する。
- 34) SHP(10, IMAX, JMAXM1)
当該空間点 (R, θ, Z) に対する或る有限要素 Ω の縮約処理後の形状関数 α , β , γ , δ , η
- 35) M1P, M1M
 $\sin(\theta-\phi)$, $\cos(\theta-\phi)$ を求める際の ϕ 方向メッシュ番地 (基点は $\phi=-\pi$) で, 各々 $\phi \geq 0$, $\phi \leq 0$ の ϕ 方向メッシュ番地に該当する。
- 36) KS
トロイダル方向の周期性, 対称性に基づく縮約処理時に用いるパラメータで, $KS=1$ のときの有限要素は周期性に基づき, $KS=-1$ のときの有限要素は対称性に基づく縮約処理を実施する。
- 37) IFSHP
形状関数をダンプするための作業用ファイルの FORTRAN 論理機番 (= 25)
- 38) MJS
トロイダル方向の周期性, 対称性に基づく縮約処理をする際の ϕ 方向メッシュ番地で, 基点は $\phi=-\pi$ である。

サブルーチン VPCOND

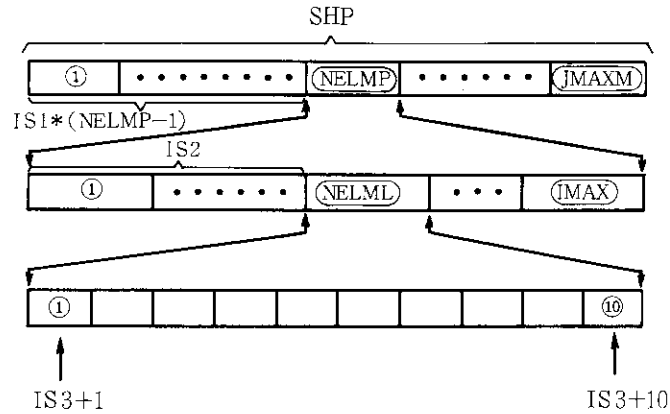
ここでは, 或る渦電流モードに対し, 有限要素 Ω についての次の磁場ベクトルポテンシャルを求める。

$$\left. \begin{aligned} A_R(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \{ \varepsilon(\mu) \alpha_{\sigma} - \varepsilon(\sigma) \beta_{\mu} \} V(\sigma, \mu), \\ A_{\theta}(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \{ \varepsilon(\mu) \gamma_{\sigma} + \varepsilon(\sigma) \delta_{\mu} \} V(\sigma, \mu), \\ A_Z(R, \theta, Z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\sigma}^{L,U} \sum_{\mu}^{L,U} \varepsilon(\sigma) \eta_{\mu} V(\sigma, \mu). \end{aligned} \right\} \quad (B5.3)$$

更に, トーラス導体の全ての有限要素に関するこれらの和を計算する。形状関数はサブルーチン 'SHAPF' にて既に求められている。本ルーチンが呼び出す下位のサブルーチン 'VCPWRT' は, 単にベクトルポテンシャルをファイルに書込むためのものであり, 整合配列の関係上別ルーチンとしたものである。

- 1) IMAX, JMAX ℓ 方向, ϕ 方向メッシュ番号の最大値
- 2) JMAXM1, IMAXP1 それぞれ, =JMAX-1, =IMAX+1

- 3) NR, NZ, NP 磁場ベクトルポテンシャルを計算する際の空間点数で、それぞれ、 R , Z , θ 方向の最大数
- 4) LR, LZ, LP 当該空間点のそれぞれ R , Z , θ 方向のメッシュ点番号
- 5) UM1 $=\mu_0/4\pi$
- 6) IS0, IS1, IS2, IS3 形状関数の1次元配列 SHP(1)のための番地インデックス



$$IS0 = 10,$$

$$IS1 = 10 * IMAX,$$

$$IS2 = IS0 * (NELML - 1),$$

$$IS3 = IS2 + IS1 * (NELMP - 1).$$

- 7) EIGF 当該モードの電流関数固有ベクトル
- 8) VCP 空間点毎の磁場ベクトルポテンシャルで、次の各成分である。
 $VCP(LR, LZ, LP, 1) = A_R(R, \theta, Z)$
 $VCP(LR, LZ, LP, 2) = A_Z(R, \theta, Z)$
 $VCP(LR, LZ, LP, 3) = A_\theta(R, \theta, Z)$
- 9) SHP(IS3+1), SHP(IS3+2), ..., SHP(IS3+10)
 順に、 $\alpha_L, \alpha_U, \beta_L, \beta_U, \gamma_L, \gamma_U, \delta_L, \delta_U, \eta_L, \eta_U$ の形状関数
- 10) VIJ1, VIJ2, VIJ3, VIJ4 トーラス導体の或る有限要素 Ω の4頂点に対する、それぞれ、 $V(U, L)$, $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, U)$ の電流関数

A.3.6 ESHARE プログラム

本プログラムは、EDTDEC, EM1DEC, EM2DEC, EM3DEC, FLDDEC の各プログラムで共通に使用されるサブルーチン群をまとめたものである。したがって、これらサブルーチンの使用のされ方については、各プログラムの説明の冒頭にあるツリー構造を参照されたい。

サブルーチン ALPHA

ここでは、サブルーチン 'COUPL' における外部コイルシリーズとトーラス導体上の渦電流との相互インダクタンスの計算にあたり、エネルギー積分の ϕ 方向積分を実施する。このため、 l = 一定の帯状有限要素列 $\{\Omega\}$ に関し、

$$\sum_{\sigma} V(\sigma, \mu) = \frac{1}{2} V(0, l) + V(\Delta\phi, l) + \dots + V\left(\frac{\pi}{N_{\phi}} - \Delta\phi, l\right) + \frac{1}{2} V\left(\frac{\pi}{N_{\phi}}, l\right), \quad (\text{B6.1})$$

を計算する。ここで、 $V(\phi, l)$ は当該 l 方向メッシュ点、 ϕ 方向メッシュ点の電流関数である。計算式の詳しい説明は、サブルーチン 'COUPL' の記述を参照のこと。

サブルーチン ALPHO

ここでは単に、(B6.1)式の $\sum V(\sigma, \mu)$ を計算するモジュール 'ALPHA' をモード毎に呼び出し、その結果を作業領域 BK に格納する。処理機能の詳細な説明については、サブルーチン 'COUPL' の説明を参照のこと。

1) V	トーラス導体上の全モード電流関数のための記憶領域
2) MN	トーラス導体上の全メッシュ点数 (=JMAX*(IMAX+1))
3) NMODE	トーラス導体の固有モード数
4) ALPHI	$\sum_{\sigma} V(\sigma, \mu)$ (全てで IMAX+1 個ある)
5) BK	$\sum_{\sigma} V(\sigma, \mu)$ のための記憶領域

サブルーチン CEL1

ここでは、Landen 変換³³⁾を用い、次の第1種完全楕円積分 $K(\kappa)$ を数値計算する。

$$K(\kappa) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta}}. \quad (\text{B6.2})$$

1) RES	$K(\kappa)$ (IER=1のときは 1.0 E75となる)
2) AK	母数 κ
3) IER	エラーコード
	$\begin{cases} = 0: \text{正常} \\ = 1: \text{AK} \geq 1 \text{でエラー} \end{cases}$

サブルーチン CEL2

ここでは、Landen 変換³³⁾を用い、次の第2種完全楕円積分 $E(\kappa)$ を数値計算する。

$$E(\kappa) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta} d\theta. \quad (\text{B6.3})$$

1) RES	$E(\kappa)$ (IER=1のとき、Bが正なら 1.0 E75, Bが負なら -1.0 E75となる。)
--------	--

2) AK	母数 κ	
3) A	$= 1$ (定数)	
4) B	$= \kappa'^2 (= 1 - \kappa^2)$	κ' : 補助母数
5) IER	エラーコード	
	{ $= 0$: 正常	
	{ $= 1$: $ AK \geq 1$ でエラー	

サブルーチン COMRD1

ここでは、各種プログラムの実行または同一プログラムのリスタートに際し、トーラス導体メッシュデータを収納するデータファイルから導体の COMMON 情報を読み取る。これと反対に、導体の COMMON 情報をデータファイルに書込むサブルーチンは 'COMWRT' である。

サブルーチン 'COMRD2' は読み取りに関しては本ルーチンと同じ機能であるが、ラベル付 COMMON 名の異なる各種領域に格納する点が異なる。記号の詳細な説明は、3.4 節各プログラムに対する共通記憶領域を参照のこと。

[読み取るラベル付 COMMON ブロック名]

1) TITLE (ITITLE0, IDATE0を除く)	旧問題タイトル名
2) CONDM	トーラス導体のメッシュ等の次元
3) TFORM	トーラス導体の断面形状
4) GAUSDT	Gauss-Legendre 積分のための Legendre 多項式の零点と重み
5) CPM	ℓ と ϕ のメッシュの中心点諸量
6) XPROJT	電流密度 J_ℓ , J_ϕ の 1 次元プロット用メッシュデータ
7) GSVAL	Gauss-Legendre 積分用データ
8) ETAC1	トーラス物性値等

サブルーチン COMRD2

ここでは、各種プログラムの実行または、同一プログラムのリスタートに際し、トーラス導体メッシュデータを収納するデータファイルから導体の COMMON 情報を読み取る。これと反対に、導体の COMMON 情報をデータファイルに書込むサブルーチンは 'COMWRT' である。

サブルーチン 'COMRD1' は読み取りに関しては本ルーチンと同じ機能であるが、ラベル付 COMMON 名の異なる各種領域に格納する点が異なる。記号の詳細な説明は、3.4 節各プログラムに対する共通記憶領域を参照のこと。

[読み取るラベル付 COMMON ブロック名]

1) TITLE0 (ITITL, IDATEを除く)	旧問題タイトル名
2) CONDM0	トーラス導体のメッシュ等の次元
3) TFORM0	トーラス導体の断面形状
4) GAUSD0	Gauss-Legendre 積分のための Legendre 多項式の零点と重み
5) CPM0	ℓ と ϕ のメッシュの中心点諸量
6) XPROJ0	電流密度 J_ℓ , J_ϕ の 1 次元プロット用メッシュデータ

- 7) GSVL0 Gauss-Legendre 積分用データ
- 8) ETAC0 トーラス物性値等

サブルーチン COMWRT

ここでは、各種プログラムの実行または同一のプログラムのリスタートに際し、トーラス導体メッシュデータを収納するデータファイルへ導体の COMMON 情報を書き込む。

これと反対に、導体の COMMON 情報をデータファイルから読取るサブルーチンは 'COMRD1' および 'COMRD2' である。記号の詳細な説明は、3.4 節プログラムに対する共通記憶領域を参照のこと。

〔書込むラベル付 COMMON ブロック名〕の詳細については、サブルーチン 'COMRD1' の説明を参照願いたい。

サブルーチン COUPL

ここでは、2.2 節で説明したコイルによる起電力の計算と同様にして、軸対称外部コイルとトーラス導体上の渦電流モードとの相互インダクタンスを算出する。コイルの磁場 A_ϕ は軸対称であるため、表面積分の ℓ 方向積分を $\ell_{i-1} \leq \ell \leq \ell_i$ に制限すると

$$\Delta W = \frac{4N_\phi \Delta\phi}{\Delta\ell_i} \left(\sum_\sigma V(\sigma, U) - \sum_\sigma V(\sigma, L) \right) \int_{\ell_{i-1}}^{\ell_i} r A_\phi d\ell, \tag{B6.4}$$

のように部分インダクタンス ΔW が求まる。ここで、 $\sum_\sigma V(\sigma, \mu)$ は、 $\ell = \text{一定}$ の帯状有限要素 $\{\Omega\}$ ($0 \leq \phi \leq \pi/N_\phi$) に関する電流関数の重みつき有限和で、(B6.1)式で与えられる。 w_i を Gauss-Legendre 数値積分の際の Legendre 多項式の零点 i における重みとし、更に、 ℓ に関する局所座標 Y を

$$\ell = \ell_L + \frac{1}{2} \Delta\ell (1 + Y), \tag{B6.5}$$

と定義する。このとき、(B6.4)式の積分は Gauss-Legendre 数値積分公式を用いて次のようになる。

$$\int_{-1}^1 r(Y) A_\phi(Y) dY = \sum_i^{1,1Y} w_i (r A_\phi)_i. \tag{B6.6}$$

本プログラムでは、 $\sum_\sigma V(\sigma, \mu)$ はサブルーチン 'ALPHA' にて、 $w_i (r A_\phi)_i$ はサブルーチン 'VECTPT' にてそれぞれ得られるようになっている。その結果、部分インダクタンス ΔW は

$$\Delta W = 2N_\phi \Delta\phi \left(\sum_\sigma V(\sigma, U) - \sum_\sigma V(\sigma, L) \right) \sum_i^{1,1Y} w_i (r A_\phi)_i, \tag{B6.7}$$

となる。

- | | |
|------------------|---|
| 1) ALPHAI | $\sum_\sigma V(\sigma, \mu)$ (サブルーチン 'ALPHA' にて求められている) |
| 2) VPOT | $w_i (r A_\phi)_i$ (サブルーチン 'VECTPT' にて求められている) |
| 3) ECOUPL | 求める相互インダクタンス W で、 ΔW の ℓ 方向に関する総和となる。 |
| 4) ALPHI, ALPHII | 各々、 $\sum_\sigma V(\sigma, L)$, $\sum_\sigma V(\sigma, U)$ |
| 5) DPHI | $\Delta\phi$ |

サブルーチン CURRPL

ここでは、電流密度 J_ℓ , J_ϕ の 1 次元プロットを行う。データ J_ℓ , J_ϕ は、Fig.B6.1 のメッシュ図において、* で示す各メッシュ重心位置で与えられている。ここでは、Fig.B6.2 のような ϕ をパラメータとする $J_\ell - \ell$ および J_ϕ

- l と l をパラメータとする $J_l-\phi$, $J_\phi-\phi$ の 4 種類の 1 次元プロットをする。

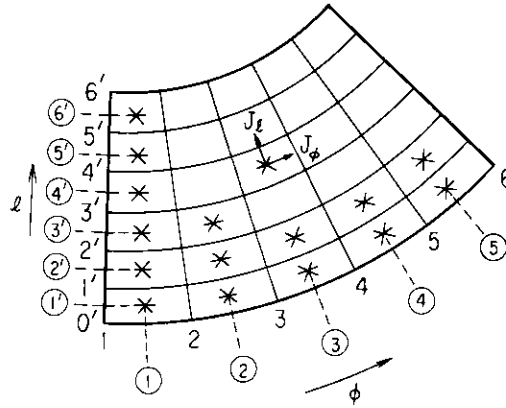


Fig. B6.1 Mesh chart for plotting J_l, J_ϕ . The J_l is the l -directional current at the center point of mesh *, and the J_ϕ the ϕ -directional current. $\textcircled{1}$ is the parameter of J_l, J_ϕ plotting along the ϕ -direction and $\textcircled{2}$ the parameter along the l -direction.

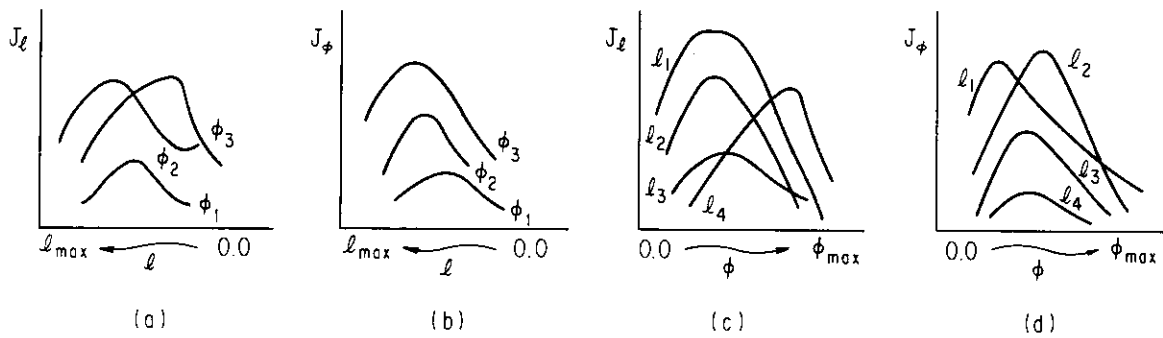


Fig. B6.2 J_l, J_ϕ plotting for the distinct ϕ_i ($i=1, 2, 3$) and l_j ($j=1, 2, 3, 4$) parameters. (a) the J_l versus l and (b) the J_ϕ versus l , with distinct ϕ_i parameters; (c) the J_l versus ϕ and (d) the J_ϕ versus ϕ with distinct l_j parameters.

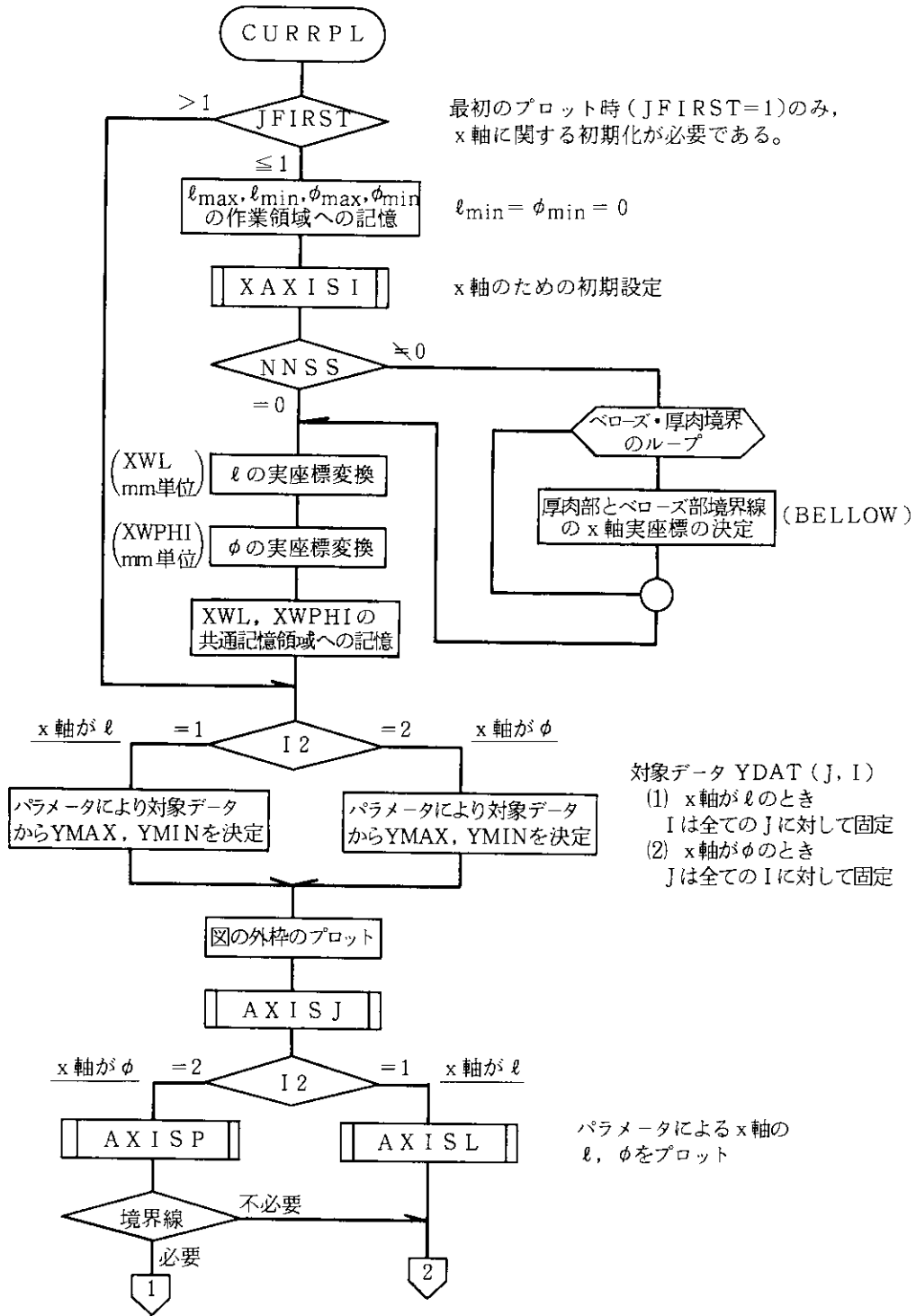
[1] 記号の説明

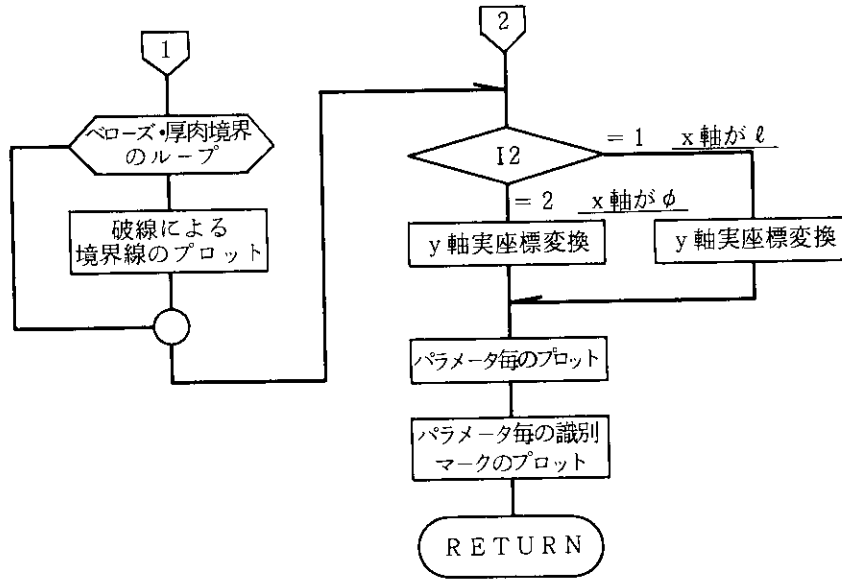
- | | |
|---------|--|
| 1) IOPT | 固有モードの J_l, J_ϕ プロットか, 時間追跡の J_l, J_ϕ プロットかを与える識別パラメータ
$\left\{ \begin{array}{l} = 0 : \text{固有モード} \\ = 1 : \text{時間追跡} \end{array} \right.$ |
| 2) YDAT | y 軸データで, (JMAXM1, IMAX) の配列である J_l, J_ϕ の値 |
| 3) TIME | 固有値 (sec) (IOPT = 0 のとき)
時刻 (sec) (IOPT = 1 のとき) |
| 4) ITS | モード番号 (IOPT = 0 のとき)
時間ステップ番号 (IOPT = 1 のとき) |
| 5) 11 | y 軸の識別のためのオプション
$\left\{ \begin{array}{l} = 1 : J_l \\ = 2 : J_\phi \end{array} \right.$ |

- 6) I2 x 軸の識別のためのオプション

$$\begin{cases} = 1: \ell (\phi \text{ をパラメータとする}) \\ = 2: \phi (\ell \text{ をパラメータとする}) \end{cases}$$
- 7) NPM パラメータの数
- 8) IPAPAM パラメータの値で、メッシュ点間の中心のメッシュ番号
- 9) XCOORD x 軸データで、 x 軸用オプション I2 により ℓ か ϕ かいずれかの規格化された実座標である(ラベル付 COMMON /XPROJT/の XLPHI)。
- 10) YCOORD y 軸データで、規格化された実座標の作業領域
- 11) XWL x 軸データで、 ℓ 方向の実座標 (単位は mm) である。I2 = 1 のとき、この COMMON 領域 XLPHI(I, 1) が仮引数の XCOORD となる。
- 12) XWPHI x 軸データで、 ϕ 方向の実座標 (単位は mm) である。I2 = 2 のとき、この COMMON 領域 XLPHI(I, 2) が仮引数の XCOORD となる。
- 13) NNSS ベローズ・厚肉の境界数
- 14) IBS 各ベローズ・厚肉境界の ϕ 方向メッシュ番号
- 15) BELLOW ベローズ・厚肉部の境界線をプロットするための x 軸の実座標で、 x 軸が ϕ 方向の場合のみ NNSS 個の境界の数だけである。
- 16) VALUE 次のパラメータの値である。I2 = 1 のときは、 ϕ の値で、計算上 ϕ は radian であるがプロットの場合は全て π 単位とする。I2 = 2 のときは、 ℓ の値そのものである。
- 17) YNMIN 規格化された最小の Y
- 18) YNDEL 規格化されたデルタ Y (単位は /mm)

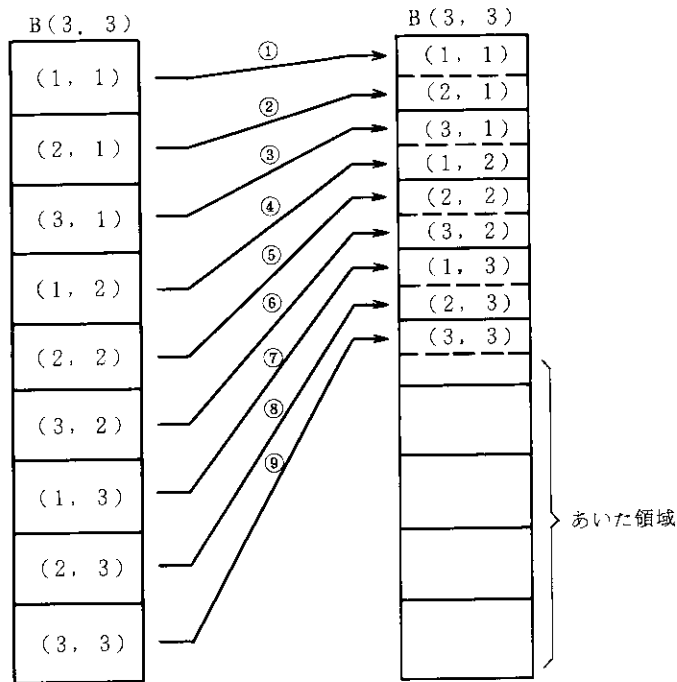
[2] フローチャート





サブルーチン DSCON

本ルーチンは、本来は倍精度の2次元配列データを、同じ記憶領域において単精度の2次元配列データに変換するものである。データ変換は下図のように行われるが、変換に際しては同一配列内でこれを実施するため、①→⑨の順にデータ変換を行う。



サブルーチン GPCPJM

ここでは、固有モードまたは時間追跡による電流関数 $V(\phi, \ell)$ を用いて電流密度 J_ℓ, J_ϕ を計算し、更にプリントおよびプロット出力を行う。Fig.B6.3のように、或る有限要素 Ω 内の電流関数 $V(\phi, \ell)$ が、

$$V(\phi, \ell) = \frac{1}{\Delta\phi\Delta\ell} \left[(\phi_U - \phi) \{ (\ell_U - \ell) V(L, L) + (\ell - \ell_L) V(L, U) \} + (\phi - \phi_L) \{ (\ell_U - \ell) V(U, L) + (\ell - \ell_L) V(U, U) \} \right], \quad (B6.8)$$

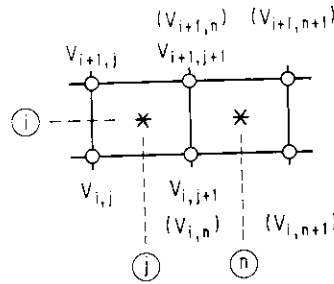


Fig. B6.4 Adjacent finite elements Ω_{ij} and Ω_{in} ($n=j+1$), and the current functions V of their vertices. The V in parentheses refers to the value with respect to \textcircled{n} . $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, L)$ and $V(U, U)$ in the finite element Ω_{ij} are $V_{i,j}$, $V_{i+1,j}$, $V_{i,j+1}$ and $V_{i+1,j+1}$, respectively. $V(L, L)$, $V(L, U)$, $V(U, L)$ and $V(U, U)$ in the finite element Ω_{in} are $V_{i,n}$ ($=V_{i,j+1}$), $V_{i+1,n}$ ($=V_{i+1,j+1}$), $V_{i,n+1}$ and $V_{i+1,n+1}$, respectively.

- 7) DLI2, RDPHI2 $2 \Delta \ell_i, 2 r \Delta \phi$
- 8) TVIJ, TVIJ1, TVIJ1, TVIJ1J1

$$V_{i,j}, V_{i+1,j}, V_{i,j+1}, V_{i+1,j+1}$$

- 9) TEMPV1, TEMPV2 $V_{i+1,j+1} - V_{i,j}, V_{i+1,j} - V_{i,j-1}$

- 10) XORG(4), YORG(4) 再原点化のための x 座標, y 座標の移動量であり, 定数のため以下の量として DATA 文で与える。単位は mm で, 実寸法は $*3/4$ である。

$$\begin{cases} \text{XORG}(1) = 0.0, \\ \text{XORG}(2) = 0.0, \\ \text{XORG}(3) = 215.0, \\ \text{XORG}(4) = 0.0, \end{cases} \quad \begin{cases} \text{YORG}(1) = 155.0, \\ \text{YORG}(2) = -155.0, \\ \text{YORG}(3) = 155.0, \\ \text{YORG}(4) = -155.0. \end{cases}$$

- 11) IORG

作図順番を記憶するためのカウンターで, 下図の数を表わす。

数: 作図順番

O_N : 各作図順番 N での原点の位置

1 ページの最初の論理原点は O_2 にある。したがって, 1 ページの作図終了時に次のページの O_2 の位置に再原点化する必要がある。ここでは, 図の種類は 4 通りで, これと作図順番との対応を表わすと以下のようなになる。

①	③
• O_1	• O_3
②	④
• O_2	• O_4

順 番	y 座標- x 座標
①	$J_\ell - \ell$
②	$J_\phi - \ell$
③	$J_\ell - \phi$
④	$J_\phi - \phi$

- 12) YORGIN

1 ページ内の最初の原点からの原点移動に伴う y 座標の移動量を表わす。したがって, 次ページの O_2 に再原点化するためには, 前ページの原点から YORGIN の y 座標の移動をする必要がある。

- 13) IPLOT

プロットオプション (=0: プロットしない, =1: プロットする)

IPLOT(1): $J_\ell - \ell$ のプロットオプション, IPLOT(3): $J_\ell - \phi$ のプロットオプション

IPLOT(2): $J_\phi - \ell$ のプロットオプション, IPLOT(4): $J_\phi - \phi$ のプロットオプション

- 14) INLP

ϕ, ℓ パラメータの数

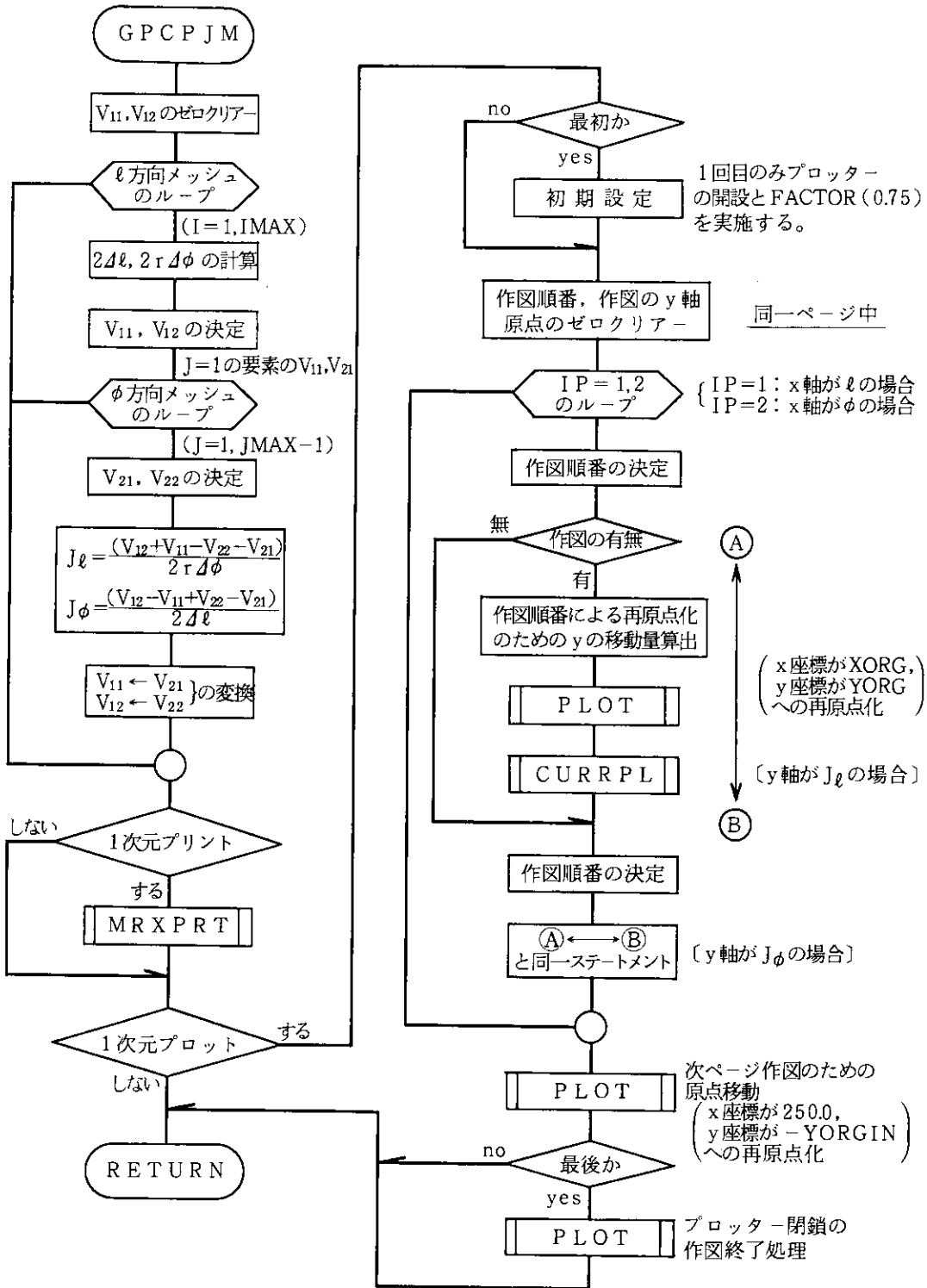
INLP(1): x 軸が ℓ の図のときの ϕ パラメータの数

INLP(2): x 軸が ϕ の図のときの ℓ パラメータの数

- 15) INLPC ϕ, ℓ パラメータの各メッシュ点番号
 INLPC(N, 1) : ϕ パラメータのメッシュ点番号 (N=1, INLP(1))
 INLPC(N, 2) : ℓ パラメータのメッシュ点番号 (N=1, INLP(2))

[2] フローチャート

本チャートにおいては、 $V_{11}=V(L, L)$, $V_{12}=V(L, U)$, $V_{21}=V(U, L)$, $V_{22}=V(U, U)$ と略記してある。



サブルーチン GPCPSB (エントリー GPCPCL)

ここでは、オフラインの原研カルコンシステム 'GPCP' プログラム³⁰⁾を使用して等高線図を得るため、必要となる諸データを作成する。Fig.B6.5(a)の斜線部を計算対象領域とすると、Fig.B6.5(b)の点部の全範囲に対して、トーラスの投影図または展開図を作図する。ここで、等高線図の種類には、各固有モードの等高線図、時間追跡による或る時刻における電流関数の等高線図の2通りがある。

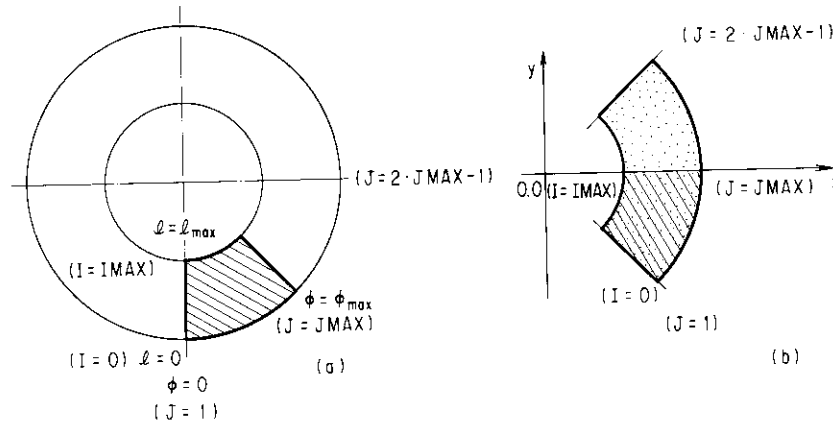




Fig. B6.5 Toroidal section of contour plotting.  of the subfigure (a) gives the area where the current function V must be calculated. The contour is mapped over the entire area  like the subfigure (b).

[1] 記号の説明

1) IOPT

- = 1: 固有ベクトルの等高線図の場合
- = 2: 時間追跡による等高線図の場合

2) VIJ

等高線図作成のためのデータ (Fig.B6.5(b)のz方向)

3) NZLVL

等高線の間隔を決定するための入力パラメータで、いま間隔を BLEV とすると

$$BLEV = \frac{|Z_{max}|}{NZLVL}$$

のように決定される。したがって、最大 $2 * NZLVL - 1$ の等高線が得られることになる。

4) NTS, TIME

IOPT = 1 のとき: 固有モード番号および固有値

IOPT = 2 のとき: 時間ステップ番号および時刻

5) WORKX(25,40)

各メッシュに対応したx座標で、WORKX(J,I) は $1 \leq j \leq JMAX$, $1 \leq i \leq IMAX + 1$ の各々 i, j のメッシュのx座標に対応する。

6) MORKY(25,40)

各メッシュに対応したy座標で、WORKXと同様の意味を持つ。y座標は $y = 0.0$ に関して対称なため、 $y \leq 0.0$ に対する値のみを持つ。

7) BLNKNG(2,100)

ブランクにするためのx,y座標の作業領域で、BLNKNG(I1,I2)のI1=1はx座標、I1=2はy座標の値である。

8) XULS, XLUE, YLWS, YLWE, YUPS, YUPE

ベローズ部と厚肉部の境界を直線で結ぶための(x,y)座標値である。 $y = 0.0$ に関して対称な1組のベローズ部と厚肉部との境界線を、 $y < 0.0$ では (XULS, YLWS) と (XULE, YLWE) を結んで引き、更に、(XULS, YUPS)

と (XULE, YUPE) を結んで $y > 0.0$ の線を引き。

9) BLEV, FACT, IFACT

BLEV : 等高線の間隔

FACT : Z の FACTOR (高さ方向の係数)

IFACT : FACT = 10.0 * * (-IFACT)

BLEV は 'GPCP' プログラムの制限上 5 桁の数のため、1000.0 以上または 1.0 未満の場合、各々の FACTOR を $0.1 * * N$, $10 * * N$ とし、Z も同様に扱う。また、BLEV は 1.0, 2.0, $5.0 * 10^N$ に規格化される。

10) IGPOL

ℓ , ϕ 方向のメッシュ点間を、Legendre 多項式の零点により補間するか否かを指定するための入力パラメータである。IGPOL(N) で、トラス導体 S_N のものを意味する。

{ = 1 : 補間を取る。

{ = 0 : 補間を取らない。

11) IGPCP

等高線図が投影図であるか展開図であるかを指定する入力オプションである。IGPCP(N) で、トラス導体 S_N のものを意味する。

{ = 1 : 展開図

{ = 0 : 投影図

12) GPCPSZ

等高線図の大きさを決める値 (単位は cm) で、標準値は 20 cm である。

13) XPOLAT(10,10,25)

補間のための Legendre 多項式の零点の x 座標値である。XPOLAT(I1, I2, I3) の I1 は ℓ 方向の点数 (IY), I2 は ϕ 方向の点数 (IX), I3 は JMAX - 1 つまり ϕ 方向のメッシュ中心点の数で、 $y = 0.0$ で対称なため片側のみの値を持つ。

14) YPOLAT(10,10,25)

13) の XPOLAT と同様の y 座標の値である。

15) RWORK(10)

ℓ 方向メッシュ点間の補間点上の r 座標のための作業領域

16) ALWORK(10)

ℓ 方向メッシュ点間の補間点上の $\ell = 0$ を起点としたトラス導体断面周長のための作業領域

17) NNSS, IBS

ベローズ部・厚肉部の境界数、およびベローズ部・厚肉部境界の ϕ 方向メッシュ番号で、IBS は NNSS 個必要である。

[2] メッシュ点 ($i; j$) 上の (x, y) 座標の算出

Fig.B6.6 に、等高線図のための図の枠と、メッシュ点 ($i; j$) の (x, y) 座標への投影の際の座標 (x_{ij}, y_{ij}) を示す。

$$x_{ij} = r_i \cos \phi_j, \quad y_{ij} = \pm r_i \sin \phi_j, \quad (\text{B6.11})$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \phi_j &= -\frac{\pi}{N_\phi} + \Delta\phi(j-1), \quad \Delta\phi = \frac{\pi}{N_\phi(N-1)}, \\ &(0 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N), \end{aligned} \right\} \quad (\text{B6.12})$$

である。

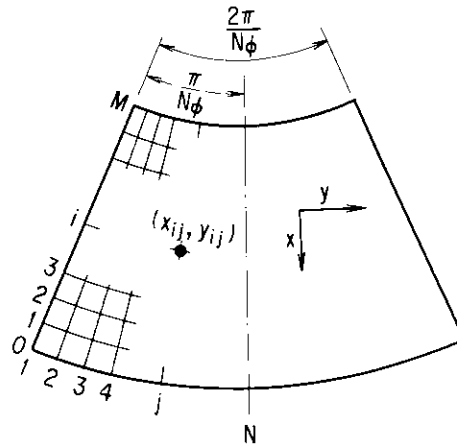


Fig. B6.6 Frame of contour map and (x_{ij}, y_{ij}) coordinate; $M=IMAX$ and $N=JMAX$. The (x_{ij}, y_{ij}) is the coordinate of mesh point $(i; j)$ on the projected plane (x, y) .

〔3〕 補間のための諸量の算出

メッシュの取り方により、 l, ϕ 方向のメッシュ点間の大さが大巾に異なり、図が歪んでしまうため、Gauss-Legendre 積分の際の Legendre 多項式の零点上での電流関数を 1 次補間により求める。いま、Fig. B6.7 のように、補間点 (n, m) 上での電流関数 $V_{i,j}(n, m)$ を求める。

$$V_{i,j}(n, m) = W_\phi(n, 1)W_\ell(m, 1)V_{i,j} - W_\phi(n, 2)W_\ell(m, 2)V_{i+1,j} - W_\phi(n, 3)W_\ell(m, 3)V_{i,j+1} + W_\phi(n, 4)W_\ell(m, 4)V_{i+1,j+1} \tag{B6.13}$$

W_ϕ, W_ℓ 等については、サブルーチン 'INTGS' を参照のこと。次に、補間点の x, y 座標を以下のように求める。

$$x_{i,j}(n, m) = r_i(n) \cos \phi_j(m), \quad y_{i,j}(n, m) = \pm r_i(n) \sin \phi_j(m) \tag{B6.14}$$

補間点 $r_i(n)$ は積分点の r 座標であるため、既に求められている。更に、 $\phi_j(m) = -\frac{\pi}{N_\phi} + \phi_j(m)$ の $\phi_j(m)$ の

\cos, \sin も同じく既に求められているため、

$$\begin{aligned} \cos \phi_j(m) &= \cos \left(-\frac{\pi}{N_\phi} + \phi_j(m) \right) \\ &= \cos \left(-\frac{\pi}{N_\phi} \right) \cos \phi_j(m) - \sin \left(-\frac{\pi}{N_\phi} \right) \sin \phi_j(m), \end{aligned} \tag{B6.15}$$

$$\sin \phi_j(m) = \sin \left(-\frac{\pi}{N_\phi} \right) \cos \phi_j(m) + \cos \left(-\frac{\pi}{N_\phi} \right) \sin \phi_j(m), \tag{B6.16}$$

のように諸量を求めることができる。

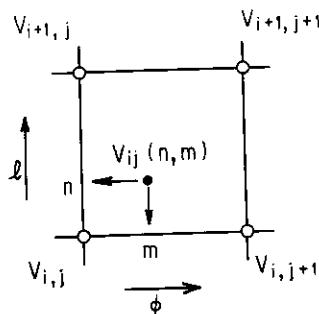
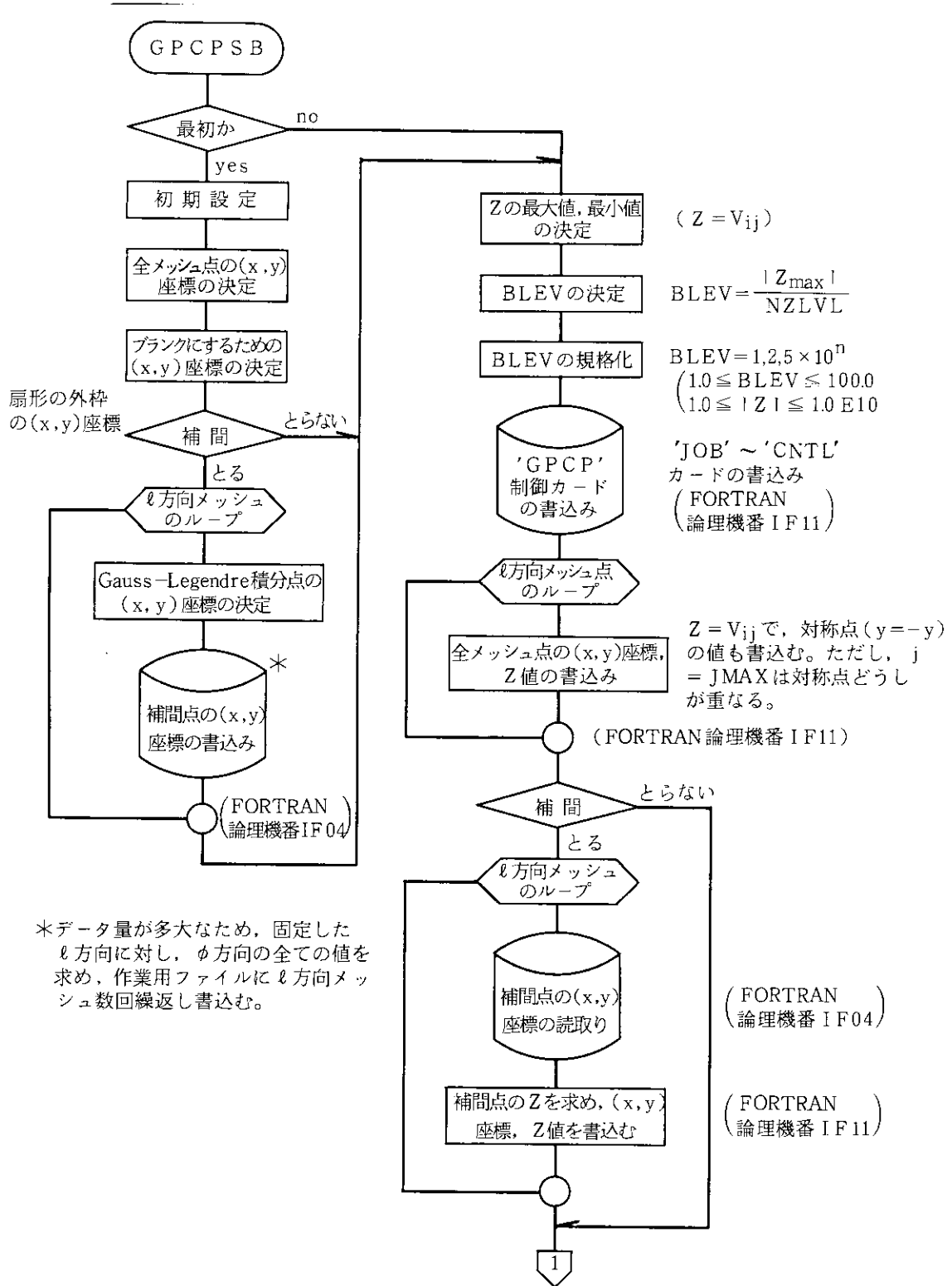


Fig. B6.7 Interpolation for contour plotting. The (n, m) is the interpolation-point in the finite element and the $V_{ij}(n, m)$ the interpolated current function by Eq. B6.13.

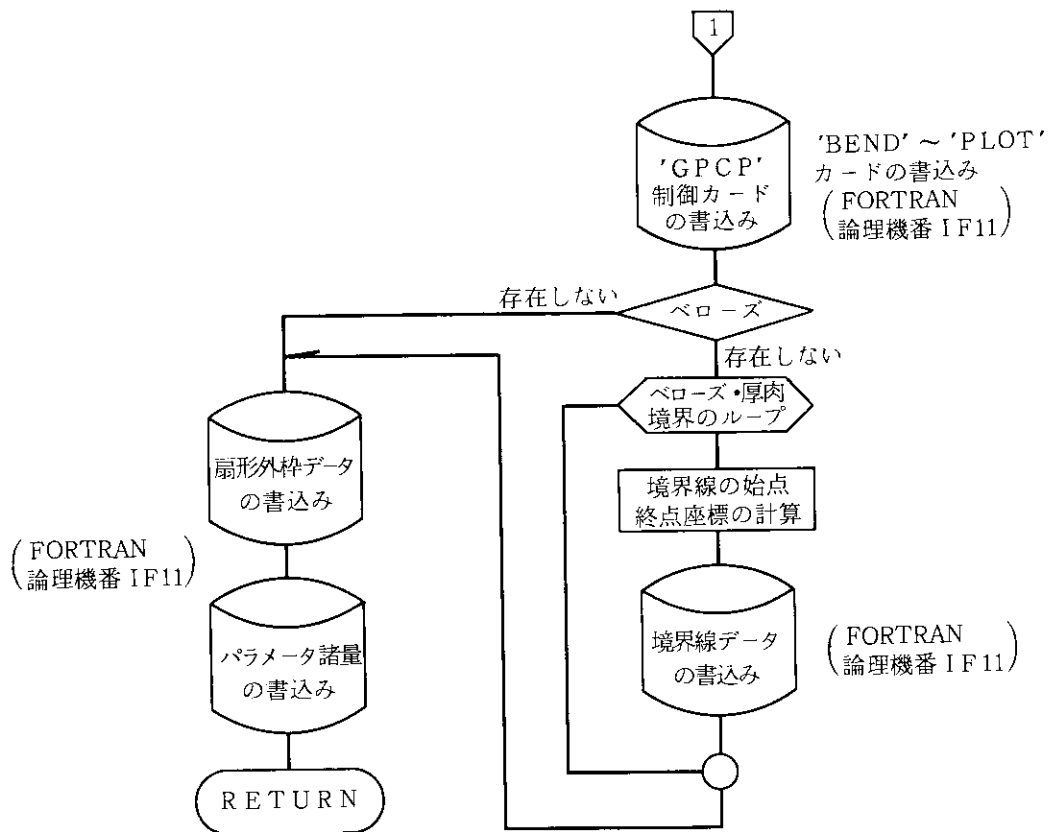
〔4〕 エントリー GPCPCL

'GPCP' プログラムによる等高線図プロットの際には、常にデータの終了を示す 'STOP' カードをファイルに書込む。

〔5〕 フローチャート



*データ量が多大なため、固定したφ方向に対し、θ方向の全ての値を求め、作業用ファイルにφ方向メッシュ数回繰返し書込む。



〔6〕 等高線図

Fig.B6.8 に、等高線図のプロット例を示す。

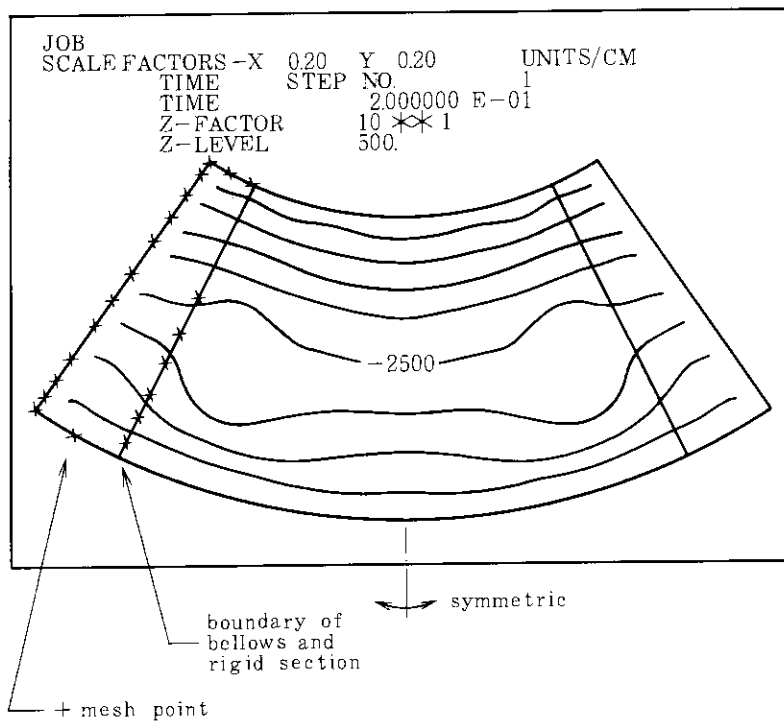


Fig. B6.8 Example of the contour plotting for the torus with bellows.

1) 固有ベクトルの場合

EIGEN MODE NO. **←固有モード番号
EIGENVALUE *.***E-***←そのモードの固有値

2) 時間追跡による電流関数の場合

TIME STEP NO. **←時間ステップ番号
TIME *.****E-***←その時刻

3) Z-FACTOR 10**M (Fig. B6.8 では M=1)

'GPCP' プロットの際の制限から、z 座標は或る範囲内の値におさえる必要があり、その係数である。実際の値を Z_R とし、規格化された値を Z_N とすると、 $Z_R = Z_N * 10^M$ であり、Fig. B6.8 の -2500 は実際には -25000 である。

4) Z-LEVEL BLEV (Fig. B6.8 では 500.)

等高線の間隔であり、3) の Z-FACTOR を乗ずる必要がある。Fig. B6.8 では、実際には 5000. となる。

サブルーチン MATRCE

本ルーチンはサブルーチン 'STCOND' または 'STCOIL' で呼び出され、固有値問題が正しく解かれたか否かの判定のため、このときの正方 2 次元配列 $\{A\}$ のトレース ($\text{Tr}\{A\} = \sum_i a_{ii}$) を計算する。正方 2 次元配列の対角項の総和を計算し、後に固有値の総和と比較される。

サブルーチン MCCOPL

ここでは、外部能動コイルとトラス導体上の渦電流各モードとの相互インダクタンス $\{m\}$ を計算するモジュールを呼び出す。ただし、このときの渦電流モードはトラス導体毎に求めた固有関数基底を取っている。このため、複合トラス導体系の渦電流固有モードに対する相互インダクタンス $\{m'\}$ は、複合トラス導体系の固有値問題のモード行列 $\{\psi\}$ を用いて

$$\{m'\} = \{\psi\}^T \{m\}, \quad (\text{B6.17})$$

で与えられる。初めに、当該トラス導体 l 方向の積分点における外部能動コイルのベクトルポテンシャル (ただし Gauss-Legendre 積分における重みを乗じたもの) を計算するモジュール 'VECTPT' を呼び出し、その後全モードに対して、このモードと外部能動コイルとの相互インダクタンスを計算するモジュール 'COUPL' を呼び出す。

サブルーチン ORTHNL

ここでは、固有値問題

$$\{A\} \mathbf{X} = \{D(\lambda)\} \mathbf{X}, \quad (\text{B6.18})$$

を解いて得た規格化されたモード行列 $\{\psi\}$ に対して、 $\{\psi\}$ の正規直交性をチェックする。 $\{I\}$ を同じサイズの単位行列としたとき

$$\{\psi\}^T \{\psi\} = \{I\}, \quad (\text{B6.19})$$

が成り立つ。

サブルーチン PRTPHI

ここでは、 ϕ 方向メッシュ点の角度 (radian と degree), およびメッシュ点間の中心の角度をプリント出力する。1 ラインに 10 メッシュ点の情報を出力する。

- 1) RADIAN(1) radian 単位の ϕ
- 2) DEGREE(1) degree 単位の ϕ

関数副プログラム PSI

空間点(R, Z)に位置する軸対称コイルが空間点(r, z)につくる次の磁束 rA_ϕ

$$rA_\phi = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{\sqrt{Rr}}{\kappa} \left\{ \left(1 - \frac{\kappa^2}{2} \right) K(\kappa) - E(\kappa) \right\}, \quad (\text{B6.20})$$

を計算するルーチンである。ここで、 $K(\kappa)$ は第 1 種完全楕円積分 (サブルーチン 'CEL1' にて計算される), $E(\kappa)$ は第 2 種完全楕円積分 (サブルーチン 'CEL2' にて計算される) であり、

$$\kappa^2 = -\frac{4Rr}{(R+r)^2 + (Z-z)^2},$$

である。

サブルーチン SUMEV

本ルーチンはサブルーチン 'STCOND' または 'STCOIL' で呼び出され、固有値問題が正しく解かれたか否かの判定のため得られた固有値の総和を計算する。後にこれと行列のトレースとを比較する。

サブルーチン VECPT

ここでは、外部コイルとトーラス導体との相互インダクタンスを求めるため、 ℓ 方向積分点における外部コイルによる磁場ベクトルポテンシャル rA_ϕ を求める。ただし、この磁場ベクトルポテンシャルには Gauss-Legendre 積分のための重みを乗じてある。

トーラス導体の電流関数のパリティが赤道面に関し odd の場合には、even の rA_ϕ と、even の場合には、odd の rA_ϕ とのみ結合する。本モジュールの処理では、もし電流関数が even であるなら、 $Z=0$ の赤道面上にある外部コイルのコイルブロックは自動的に無視される。

〔1〕 記号の説明

- 1) NB, CT, CR, CZ 外部コイルのブロック数, ターン数, R 座標, Z 座標
- 2) VPOT Gauss-Legendre 積分における重みを乗じた磁場ベクトルポテンシャル rA_ϕ
- 3) R, Z トーラス導体の r 座標, z 座標
- 4) WY ℓ 方向の積分点における Gauss-Legendre 積分の重み

[A] XAXISI

x 軸は1つの実行内で ℓ , ϕ 共に一定であるため、軸をプロットする諸量を最初に決定すればよい。ここでは、 $J_\ell - \ell$, $J_\phi - \ell$, $J_\ell - \phi$ 或いは $J_\phi - \phi$ などの作図要求の如何にかかわらず、 ℓ と ϕ の初期設定を行う。

1) ϕ の場合

Fig. B6.9(a)に示すように、x 軸を4等分、それに伴い ϕ の値も4等分し、5つの値をグラフ上に書込む。ただし、radian を π 単位で表わす ($\pi/2$ は 0.5 と表わす)。

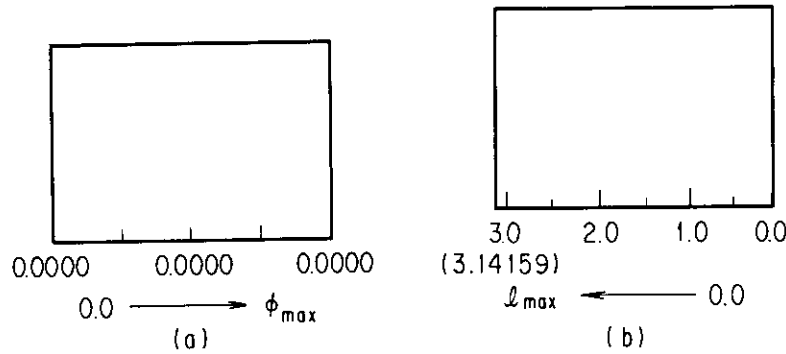


Fig. B6.9 Frame of J_ℓ, J_ϕ plotting. The abscissa of the subfigure (a) is the ϕ -direction and the abscissa of the subfigure (b) the ℓ -direction.

2) ℓ の場合

Fig. B6.9(b)に示すように、x 軸の方向を取り、軸上の値は 1.0 m 単位に、合い印は 0.5 m 単位にプロットする。

(1) 記号の説明

- | | |
|-----------------|---|
| 1) XLENG, YLENG | x 軸の長さ, y 軸の長さ |
| 2) XMAXL, XMAXP | ℓ_{max}, ϕ_{max} |
| 3) DL, DP | $\Delta \ell ((\ell_{max} - \ell_{min}) / XLENG), \Delta \phi ((\phi_{max} - \phi_{min}) / XLENG)$ |
| 4) XPV, XPC | ϕ の x 軸の値 (π 単位), ϕ の x 軸上の実座標 x |
| | $\left\{ \begin{array}{l} XPC(1) = 0.0 \\ XPC(2) = 1/4 * XLENG \\ XPC(3) = 2/4 * XLENG \\ XPC(4) = 3/4 * XLENG \\ XPC(5) = 4/4 * XLENG \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} XPV(1) = 0.0 \\ XPV(2) = 1/4\pi * \phi_{max} \\ XPV(3) = 2/4\pi * \phi_{max} \\ XPV(4) = 3/4\pi * \phi_{max} \\ XPV(5) = 4/4\pi * \phi_{max} \end{array} \right.$ |
| 5) XL | ℓ の x 軸上の値のプロットのための y 実座標 |
| 6) XLINT | ℓ の 0.5 m 単位の合い印のプロットのための実座標間隔 |
| 7) YPOINT | y 軸上の J_ℓ, J_ϕ の値のプロットのための実座標である。[AXISJ] の説明を参照のこと。 |
| 8) XP | y 軸上の値をプロットするときの始点の x 実座標 |
| 9) PINS, PINE | 合い印の始点と終点の実座標 |
| 10) SYMHT | 文字の高さ |

[B] AXISL

x 軸が ℓ の場合の軸の作成ルーチンである。

- 1) LABELX x 軸上のラベル

[C] AXISP

x 軸が ϕ の場合の軸の作成ルーチンである。

[D] AXISJ

ここでは、 y 軸つまり J_ℓ , J_ϕ の軸を作成すると共に、規格化された y_{\max}^n , y_{\min}^n , y_{del}^n を算出する。

〔1〕 y 軸上の J_ℓ , J_ϕ の値の規格化1) Y_{\max} , Y_{\min} の決定

y 軸上に必ず 0.0 値を入れるため、次の 3 つの方法を取る。

- (1) $y_{\max} > 0.0$, $y_{\min} \geq 0.0$ のとき

$$Y_{\max} = y_{\max}, Y_{\min} = 0.0$$

- (2) $y_{\max} \leq 0.0$, $y_{\min} < 0.0$ のとき

$$Y_{\max} = |y_{\min}|, Y_{\min} = 0.0$$

- (3) $y_{\max} > 0.0$, $y_{\min} < 0.0$ のとき

$y_{\max} \geq |y_{\min}|$ ならば、 $Y_{\max} = y_{\max}$, $Y_{\min} = |y_{\min}|$ である。また、 $y_{\max} < |y_{\min}|$ ならば、 $Y_{\max} = |y_{\min}|$, $Y_{\min} = y_{\max}$ である。ただし、この場合は Y_{\min} を規格化する必要がある。

2) Y_{\max} の規格化

Y_{\max} を $1.0, 2.0$ or 5.0×10^n (n : 整数) と規格化する。

- (1) $Y_{\max} = 1.0 \times 10.0^n$ の場合

Y_{\max} と 0.0 の間を 5 分割し、

0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0×10.0^n とする。

- (2) $Y_{\max} = 2.0 \times 10.0^n$ の場合

Y_{\max} と 0.0 の間を 4 分割し、

0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0×10.0^n とする。

- (3) $Y_{\max} = 5.0 \times 10.0^n$ の場合

Y_{\max} と 0.0 の間を 5 分割し、

0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0×10.0^n とする。

3) 1) の(3)の場合の Y_{\min} の規格化

2) の 3 条件の分割により Y_{\min} も規格化するが、それによる分割の値の最小値を新たに y_{\min}^n とする。

4) y_{\max}^n , y_{\min}^n , y_{del}^n の決定

- (1) 1) の(1)のとき

$$\begin{cases} y_{\max}^n = Y_{\max} \\ y_{\min}^n = Y_{\min} (=0.0) \\ y_{\text{del}}^n = (Y_{\max} - Y_{\min}) / \text{YLENG} \end{cases}$$

(2) 1) の(2)のとき

$$\begin{cases} y_{\max}^n = Y_{\min} (=0.0) \\ y_{\min}^n = -Y_{\max} \\ y_{\text{del}}^n = (Y_{\max} - Y_{\min}) / \text{YLENG.} \end{cases}$$

(3) 1) の(3)のとき

$$y_{\max} \geq |y_{\min}| \text{ のとき } \begin{cases} y_{\max}^n = Y_{\max} \\ y_{\min}^n = -Y_{\min} \\ y_{\text{del}}^n = (Y_{\max} - Y_{\min}) / \text{YLENG.} \end{cases}$$

$$y_{\max} < |y_{\min}| \text{ のとき } \begin{cases} y_{\max}^n = Y_{\min} \\ y_{\min}^n = -Y_{\max} \\ y_{\text{del}}^n = (Y_{\max} - Y_{\min}) / \text{YLENG.} \end{cases}$$

5) y 軸の分割の方法

(1) 1) (1)と1) の(2)の場合は, 2) の3通りの分割を採用する。

(2) 1) の(3)の場合の方法は, Y_{\max} と 0.0の間については2) の3通りの分割, Y_{\min} と 0.0の間については3) の方法で得た分割とし, その和を全体の分割の数とする。

(2) 記号の説明

- | | |
|---------------|---|
| 1) YMAX, YMIN | 規格化されていない y_{\max} , y_{\min} |
| 2) YNMIN, DNY | 規格化された y_{\min} (y_{\min}^n), 規格化された y_{del} (y_{del}^n) |
| 3) LABELY | y 軸のラベル |
| 4) YPOINT | 1) の(1)と1) の(2)すなわち5) の(1)の場合には, 正負の違い如何にかかわらず各々の場合の分割方法は固定しているため, [A]の XAXISI で設定したこの値をそのまま使用することが可能である (実座標)。 |

YPOINT(6,3)

- { 6: 最大5分割であり, 6個の値が必要である。
- { 3: 2) の3通りであり, 順序の通りである。

5) IYDIG

分割点の値をプロットするための初期設定領域である。既に決っている値であり, 処理の簡素化のため, EBCDIC による正負の値の DATA 文である。

IYDIG(6,3,2)

- { 6: 最大5分割であり, 6個の領域が必要である。
- { 3: 2) の3通りであり, 順序の通りである。
- { 2: 正, 負の2通りである。

6) AYMAX

Y_{\max}

7) IA

Y_{\max} の引用の仕方

- { = 1: $Y_{\max} \leftarrow y_{\max}$
- { = 2: $Y_{\max} \leftarrow |y_{\min}|$

8) IB

1.0, 2.0, 5.0×10^n の規格化のための 1.0, 2.0, 5.0 の整数値 (10^n は因子)

- 9) IC,IL YPOINT(I,J), IYDIG(I,J,K) の各々 J,I を表わすインデックスで, IL は DO ループ制御を行う。
- 10) IYS 3) の方法における Y_{\min} から 0.0 の間の分割の数

〔3〕 図の説明

Fig.B6.10 は, ϕ パラメータのメッシュ番号が 1, 3, 5, 7 のときの $J_{\ell}-\ell$ 1 次元プロットの例である。時間ステップ番号が 1, 時刻が 0.2 秒であり, y 軸因子は 10.0^4 を示す。

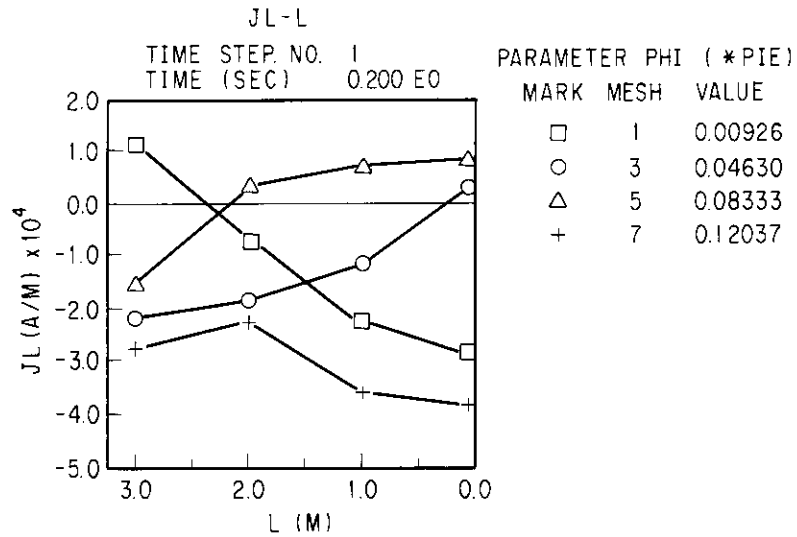


Fig. B6.10 Example of $J_{\ell}-\ell$ plotting. The ϕ mesh parameters are 1, 3, 5, 7; time step is #1; time is 0.2 sec.