

JAERI-M
7062

有限要素法による三次元渦電流解析
(臨界プラズマ試験装置設計報告・XXXVII)

1977年5月

高野 一郎*・鈴木 康夫

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

有限要素法による三次元渦電流解析
(臨界プラズマ試験装置設計報告・XXXVII)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
高野 一郎*・鈴木 康夫

(1977年4月4日受理)

臨界プラズマ試験装置(JT-60)の各部に誘起される渦電流を三次元的に解析するために有限要素法を適用した。解析方法として、外部供給電流を発生源とするベクトル・ポテンシャル法の他に、新たに、外部印加磁界を発生源とする変形ベクトル・ポテンシャル法を考案し、この二つの方法について、主として、理論的検討を行った。

変形ベクトル・ポテンシャル法に関しては、正方形断面の円形ループにおける電流の表皮効果を調べ、すでに知られている解析解と比較・検討した。その結果、この解析方法には問題がないことが判った。

* 外来研究員：東京芝浦電気株式会社 総合研究所

Three-Dimensional Analysis of Eddy Current with the Finite Element Method

Ichiro TAKANO* and Yasuo SUZUKI

Division of Large Tokamak, Development, Tokai, JAERI

(Received April 4, 1977)

The finite element method is applied to three-dimensional analysis of eddy current induced in a large Tokamak device (JT-60).

Two techniques to study the eddy current are presented: those of ordinary vector potential and modified vector potential. The latter is originally developed for decreasing dimension of the global matrix. Theoretical treatment of these two is given.

The skin effect for alternate current flowing in the circular loop of rectangular cross section is examined as an example of the modified vector potential technique, and the result is compared with analytical one. This technique is useful in analysis of the eddy current problem.

* Tokyo Shibaura Electric Co. Inc., Toshiba Research & Development Center, Kawasaki

目 次

| | 頁 |
|---|----|
| 第1章 はじめに | 1 |
| 第2章 解析方法 | 3 |
| 2.1 基礎方程式 | 3 |
| 2.1.1 ベクトル・ポテンシャル法 | 3 |
| 2.1.2 変形ベクトル・ポテンシャル法 | 6 |
| 2.2 有限要素法の導入 | 9 |
| 2.2.1 ベクトル・ポテンシャル法 | 9 |
| 2.2.2 変形ベクトル・ポテンシャル法 | 13 |
| 2.3 形状関数 | 16 |
| 第3章 計算結果と検討 | 21 |
| 3.1 臨界プラズマ試験装置における周期条件及び上下対称境界条件 | 21 |
| 3.2 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算コード | 23 |
| 3.3 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算例とその計算結果 | 25 |
| 3.4 検 討 | 30 |
| 第4章 ま と め | 36 |
| 謝 辞 | 36 |
| 参 考 文 献 | 37 |
| 付録I ゲージと境界条件 | 38 |
| 付録II 形状関数の積分 | 40 |
| 付録III 外部磁界 $H^{(e)}$ 、外部ベクトル・ポテンシャル $A^{(e)}$ の表式 | 46 |
| 付録IV 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算コード | 49 |
| 付録V ベクトル・ポテンシャル法の改良 | 86 |

1 はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60)を設計するにあたり、この装置を構成する種々の機構、すなわち、トロイダル・コイル、ポロイダル・コイル、真空容器、ライナー等において誘起される渦電流、およびこの電流がつくる磁界を解析することが重要になっている。渦電流がつくる磁界は、プラズマに影響を及ぼし、プラズマを上下左右に変位させたり、プラズマの断面形状を変えたりする。又、この磁界は、各種コイルに誘起電圧を発生させ、電源電圧を変動させる。さらに、JT-60の種々の機構には、この渦電流に働く電磁力に耐える様な構造強度を持たせておかねばならない。この様に、渦電流とこの電流がつくる磁場を解析することは、JT-60のプラズマ位置断面制御設計、電源設計、及び本体の機械設計において、非常に重要な要素のひとつとなっている。

今までに、JT-60のひとつの機構(たとえば、真空容器)に誘起される渦電流については検討が成されている^{(1),(2)}。ところが、JT-60の構造は非常に複雑で、JT-60の各部において誘起される渦電流同志が相互に作用し合う。この状態に対処するため、すでに、構造解析の分野でその手法が確立されている有限要素法を、JT-60の渦電流解析に適用することが考えられる。

有限要素法の渦電流解析への適用については、すでに、J. Donea⁽³⁾やM.V.K. Chari⁽⁴⁾が試みている。さらに、有限要素法を磁場解析や電気機器の解析に応用することも行われている^{(5),(6)}。上記の文献では、解析の対象として、二次元の問題を取り扱っている。

JT-60の渦電流解析も、J. Doneaらの文献に従って、まず二次元問題から始められた⁽⁷⁾。この場合、JT-60の構造はトロイダル方向に一樣であるという制限が付くため、真空容器の厚肉部とベローズ部、あるいはトロイダル・コイルのポロイダル・カット等を解析の対象にすることができない。

以上のことを考慮して、本報告では、有限要素法の三次元渦電流解析への適用について述べる。解析方法としては、外部供給電流を発生源とするベクトル・ポテンシャル法の他に、新たに、外部印加磁界を発生源とする変形ポテンシャル法を考案し、この二つの方法について述べる。ベクトル・ポテンシャル法では、 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ より、 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ なるベクトル・ポテンシャル \mathbf{A} が定義される。他方、変形ポテンシャル法では、 $\nabla \cdot \mathbf{i} = 0$ より、 $\mathbf{i} = \nabla \times \mathbf{F}$ なるベクトル・ポテンシャル \mathbf{F} を定義する。このようなベクトル・ポテンシャルを電磁気の解析に導入する方法は、S. CaeymaexやC.W. Trowbridgeの文献^{(8),(9)}に見られる。これらの文献では、加速器用のマグネットを設計するために、鉄心を有する場合の静磁界について解析を行っており、このベクトル・ポテンシャルを変形ベクトル・ポテンシャル(Modified vector potential)、これに付随して導びき出されるスカラー・ポテンシャルを変形スカラー・ポテンシャル(Modified scalar potential)と呼んでいる。本報告においても、この名称を用いることにする。

JT-60の渦電流解析に変形ベクトル・ポテンシャルを用いた場合、境界条件がどうなる

かについては、筆者の知る限りにおいて、明らかではない。又、ベクトル・ポテンシャルの境界条件については、通常、あるゲージを指定した上で決められる⁽¹⁰⁾。ところが、後述するように、有限要素法を適用する場合、ゲージに検討を加えておく必要がある。従って、ベクトル・ポテンシャルの境界条件についても検討を要することになる。以上のことから、ベクトル・ポテンシャル法ともに、境界条件を明確にしておく必要がある。従って、本報告では、境界条件の導出過程も述べることにする。

有限要素法に関しては、文献(11)、(12)を参考にし、すでに確立された手法に従って、定式化を進めて行く。

以下、第2章に解析方法を述べ、最終的に、要素方程式を導く。第3章では、主に、変形ベクトル・ポテンシャル法の計算コード、及び計算例について述べ、検討を行う。第4章はまとめである。

なお、使用する単位系はすべてMKS有理単位系とする。また、記号に付される・はこの記号が複素数であることを意味するものとする。たとえば、 $\dot{\mathbf{x}}$ は、ベクトル \mathbf{x} の成分が複素数であることを意味する。

2 解 析 方 法

2.1 基礎方程式

等方でかつ均質な電磁的性質を有する（導電性）媒質，すなわち磁気透磁率 μ ，導電率 σ ，誘電率 ϵ が一定である媒質を含む系に，外部から複素表示で $\dot{i}^{(e)} e^{j\omega t}$ の電流密度が供給されているものとする。ここに $\dot{i}^{(e)}$ は位置にのみ依存する複素関数である。この時，Maxwellの電磁方程式は，変位電流を無視すると，次のように表わされる。

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{i}} + \dot{i}^{(e)} \quad (1)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{B}} \quad (2)$$

さらに，

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{D}} = \dot{\rho} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu \dot{\mathbf{H}} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{D}} = \epsilon \dot{\mathbf{E}} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{i}} = \sigma \dot{\mathbf{E}} \quad (7)$$

が成り立つ。電界 $\dot{\mathbf{E}}$ ，磁界 $\dot{\mathbf{H}}$ ，磁束密度 $\dot{\mathbf{B}}$ ，電気変位 $\dot{\mathbf{D}}$ ，電流密度 $\dot{\mathbf{i}}$ ，電荷密度 $\dot{\rho}$ は，いずれも， $\dot{i}^{(e)}$ と同様，位置にのみ依存する複素関数であって， $e^{j\omega t}$ の振幅を与える。さらに，外部供給電流密度 $\dot{i}^{(e)}$ に対して，

$$\nabla \cdot \dot{i}^{(e)} = 0 \quad (8)$$

が成り立つものとする。 $\dot{\mathbf{i}}$ は $\dot{i}^{(e)}$ により誘起される電流密度であって，渦電流そのものである。

以下に，ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル・ポテンシャル法に対する基礎方程式を導く。

2.1.1 ベクトル・ポテンシャル法

式(3)は考えている電磁系の至る所で成り立つ。従って，通常の電気磁気学の通り，

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (9)$$

により、ベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{A}}$ を定義する。この時、式(2)より、

$$\dot{\mathbf{E}} = -j\omega\dot{\mathbf{A}} - \nabla\dot{\phi} \quad (10)$$

が導びかれる。 $\dot{\phi}$ はスカラー・ポテンシャルである。本報告では、表式を簡便にするため、 $\dot{\phi}$ の代りに、

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{\phi}}{j\omega} \quad (11)$$

を用いる。従って、

$$\dot{\mathbf{E}} = -j\omega(\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi}) \quad (12)$$

となる。式(1)、式(5)、式(7)、式(9)、式(12)を用いて、次式が得られる。

$$\frac{1}{\mu}\nabla\times\nabla\times\dot{\mathbf{A}} + j\omega\sigma(\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi}) = \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \quad (13)$$

媒質の表面を除いて、式(1)より

$$\nabla\cdot\dot{\mathbf{i}} = 0 \quad (14)$$

従って、

$$\nabla\cdot\dot{\mathbf{E}} = 0 \quad (15)$$

が成り立つ。式(12)を上式に代入して、

$$\nabla\cdot\dot{\mathbf{A}} + \nabla^2\dot{\Phi} = 0 \quad (16)$$

が得られる。媒質中では、ベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{A}}$ とスカラー・ポテンシャル $\dot{\Phi}$ を、式(13)と式(16)を連立させて解かねばならない。

真空中の基礎方程式としては、式(13)の導電率 σ を零とおくだけでよく、

$$\frac{1}{\mu}\nabla\times\nabla\times\dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \quad (17)$$

となる。 $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ を伝導電流(conduction current)によるものと考え、真空中ではこの電流は流れ得ず、 $\dot{\mathbf{i}}^{(e)} \equiv 0$ となる。しかし、本報告では、この様に $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ の物理的性質を限定する必要はなく、真空中でも $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ が存在しうるものとして取り扱うこともできる。この取り扱いは、 $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ をあくまで伝導電流と見なし、 $\dot{\mathbf{i}}^{(e)} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma \times \lim_{\dot{\mathbf{E}}^{(e)} \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{E}}^{(e)}$ が有限の確定値を持つ⁽¹³⁾と考えることと同等である。

真空中の基礎方程式としては、式(17)の他に、媒質中と同様、式(16)が得られる。これは、真空中では、電荷が存在し得ず、式(4)の ρ が零となることより、導びかれる。真空中では、式(17)の中に $\dot{\Phi}$ の項がないため、媒質中のように二つの方程式を連立させて解く必要はない。 $\dot{\mathbf{A}}$ が式(17)より確定した後に、式(16)を解いて、 $\dot{\Phi}$ を求める。真空中の $\dot{\mathbf{E}}$ を求める必要がある場合には、式(16)を解かねばならないが、真空中の $\dot{\mathbf{B}}$ あるいは $\dot{\mathbf{H}}$ だけを求める

場合には、式(16)を解く必要はない。

今、任意に関数 χ を選び、 $\dot{\mathbf{A}}' = \dot{\mathbf{A}} - \nabla\chi$ 、 $\dot{\Phi}' = \dot{\Phi} + \chi$ とおく。すると、 $\dot{\mathbf{A}}'$ 、 $\dot{\Phi}'$ も媒質中および真空中の基礎方程式の解となる(ゲージ不変性)。従って、二つの基礎方程式だけでは、 $\dot{\mathbf{A}}$ 、 $\dot{\Phi}$ は一意的に決まらない。このため、通常、ローレンツ・ゲージ、あるいはクーロン・ゲージが用いられる。しかし、本報告のように有限要素法を適用する場合には、有限要素内で $\dot{\mathbf{A}}$ 、 $\dot{\Phi}$ に何らかの近似を行うため、上の二つのゲージとは全く別のゲージが選ばれることもある。このゲージについては第3章で検討することにする。

この節の最後に境界条件について述べる。境界には、媒質と真空との境界、媒質と媒質との境界の二つの境界がある。

媒質と真空との境界条件

媒質中と真空中との区別を付けるために、媒質中では添字 m 、真空中では添字 v を用いる。たとえば、 $\dot{\mathbf{E}}_m$ は媒質中の電界、 $\dot{\mathbf{E}}_v$ は真空中の電界を意味するものとする。すでに良く知られている通り、

$$\dot{\mathbf{H}}_{m\parallel} = \dot{\mathbf{H}}_{v\parallel} \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{B}}_{m\perp} = \dot{\mathbf{B}}_{v\perp} \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{m\parallel} = \dot{\mathbf{E}}_{v\parallel} \quad (20)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{m\perp} = 0, \quad \dot{\mathbf{E}}_{v\perp} = (\dot{\mathbf{w}} / \epsilon_0) \mathbf{n} \quad (21)$$

ここに、添字 \parallel と添字 \perp は、それぞれ、境界面に平行な成分と垂直な成分を意味する。 \mathbf{n} は境界面に垂直な単位ベクトル、 $\dot{\mathbf{w}}$ は境界面上の表面電荷密度である。

$\dot{\mathbf{A}}$ と $\dot{\Phi}$ に対する境界条件は次の様になる。前述した様に Φ は任意の関数 χ だけの不定性を持つから、媒質中の $\dot{\chi}_m$ 、真空中の $\dot{\chi}_v$ を適当に選ぶことにより、

$$\dot{\Phi}_m = \dot{\Phi}_v \quad (22)$$

$$\dot{\mathbf{A}}_{m\perp} = \dot{\mathbf{A}}_{v\perp} \quad (23)$$

とすることができる(付録I)。

式(22)より $(\nabla\dot{\Phi}_m)_{\parallel} = (\nabla\dot{\Phi}_v)_{\parallel}$ が得られ、式(12)と式(20)を用いると、

$$\dot{\mathbf{A}}_{m\parallel} = \dot{\mathbf{A}}_{v\parallel} \quad (24)$$

が得られる。式(21)、式(22)、式(23)を用いて

$$\frac{\partial \dot{\Phi}_m}{\partial n} - \frac{\partial \dot{\Phi}_v}{\partial n} = \frac{\dot{\mathbf{w}}}{j\omega\epsilon_0} \quad (25)$$

となる。ここに、 $\partial/\partial n$ は境界面に垂直な方向の勾配を取ることを意味する。

媒質と媒質との境界条件

$\dot{\mathbf{H}}_{//}$, $\dot{\mathbf{B}}_{\perp}$, $\dot{\mathbf{E}}_{//}$, $\dot{\Phi}$, $\dot{\mathbf{A}}$ の境界条件は媒質と真空中との境界条件と全く同様で、 $\dot{\mathbf{E}}_{\perp}$ の境界条件だけが異なる。媒質が異なることを示すために添字 1, 2 を用いる。たとえば $\dot{\mathbf{i}}_1$ は媒質 1 における電流密度、 $\dot{\mathbf{i}}_2$ は媒質 2 における電流密度を意味するものとする。新たな境界条件は、

$$\dot{\mathbf{i}}_{1\perp} = \dot{\mathbf{i}}_{2\perp} \quad (26)$$

従って、

$$\sigma_1 \dot{\mathbf{E}}_{1\perp} = \sigma_2 \dot{\mathbf{E}}_{2\perp} \quad (27)$$

となる。この場合、

$$\sigma_1 \frac{\partial \dot{\Phi}_1}{\partial n} - \sigma_2 \frac{\partial \dot{\Phi}_2}{\partial n} = \sigma_2 \dot{\mathbf{A}}_{2\perp} - \sigma_1 \dot{\mathbf{A}}_{1\perp} = (\sigma_2 - \sigma_1) \dot{\mathbf{A}}_{1\perp} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{w}} &= \dot{\mathbf{D}}_{2\perp} - \dot{\mathbf{D}}_{1\perp} \\ &= j\omega \left\{ (\epsilon_1 - \epsilon_2) \dot{\mathbf{A}}_{1\perp} + \epsilon_1 \frac{\partial \dot{\Phi}_1}{\partial n} - \epsilon_2 \frac{\partial \dot{\Phi}_2}{\partial n} \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

の関係が成り立つ。 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ の場合には、

$$\dot{\mathbf{w}} = j\omega\epsilon \left(\frac{\partial \dot{\Phi}_1}{\partial n} - \frac{\partial \dot{\Phi}_2}{\partial n} \right) \quad (30)$$

となる。このように、境界面には、常に、電荷密度が存在することになる。

$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ の場合、明らかに次式が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{E}}_{2\perp} - \dot{\mathbf{E}}_{1\perp} = j\omega \left(\frac{\partial \dot{\Phi}_1}{\partial n} - \frac{\partial \dot{\Phi}_2}{\partial n} \right) = \frac{\dot{\mathbf{w}}}{\epsilon} \quad (31)$$

2.1.2 変形ベクトル・ポテンシャル法

変形ベクトル・ポテンシャル法で渦電流を求める際には、媒質はすべて単連結であることが条件になる。以下に、媒質中と真空中において成り立つ基礎方程式を与える。

媒質中の基礎方程式

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}}^{(e)} = \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \quad (32)$$

とおき、新たに、磁界 $\dot{\mathbf{h}}$ を

$$\dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{H}} - \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \quad (33)$$

と定義する。この時、式(1)より

$$\nabla \times \dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{i}} \quad (34)$$

が得られる。この式より

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{i}} = \nabla \cdot (\nabla \times \dot{\mathbf{h}}) \equiv 0 \quad (35)$$

となる。 $\nabla \cdot \dot{\mathbf{B}} = 0$ よりベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{A}}$ を定義した様に、式(35)より、変形ベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{F}}$ を定義することができる。

$$\dot{\mathbf{i}} = \nabla \times \dot{\mathbf{F}} \quad (36)$$

式(34)と式(36)より

$$\dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{F}} + \nabla \dot{\Omega}_m \quad (37)$$

が得られる。ここに $\dot{\Omega}_m$ を変形スカラー・ポテンシャルと呼ぶ。式(2)、式(5)、式(7)、式(33)式(37)より、

$$\dot{p} \nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{F}} - \dot{\mathbf{F}} - \nabla \dot{\Omega}_m = \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \quad (38)$$

$$\dot{p} = \frac{j}{\omega \mu \sigma} \quad (39)$$

が得られる。ベクトル・ポテンシャル法では外部供給電流密度が発生源であったが、変形ベクトル・ポテンシャル法では磁界 $\dot{\mathbf{H}}^{(e)}$ が発生源となる。基本方程式としては、式(38)の他に、

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{h}} = 0 \quad (40)$$

すなわち、

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{F}} + \nabla^2 \dot{\Omega}_m = 0 \quad (41)$$

が加わる。式(40)は、

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{H}}^{(e)} = 0 \quad (42)$$

と式(33)より導びかれる。 $\dot{\mathbf{F}}$ と $\dot{\Omega}_m$ には、ベクトル・ポテンシャル法の場合と同様、 $\dot{\mathbf{F}}' = \dot{\mathbf{F}} - \nabla \chi$ 、 $\dot{\Omega}_m' = \dot{\Omega}_m + \chi$ のゲージ不変性がある。

真空中の基礎方程式

真空中では渦電流 $\dot{\mathbf{i}}$ が存在せず、式(34)より

$$\nabla \times \dot{\mathbf{h}} = 0 \quad (43)$$

同時に、媒質が単連結であることより、

$$\oint_l \dot{\mathbf{h}} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \dot{\mathbf{i}} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (44)$$

ここに、 l は媒質表面上にある任意の閉曲線、 s は l を外縁とする面とする。式(43)と式(44)より、真空中では、

$$\dot{\mathbf{h}} = \nabla \dot{\Omega}_v \quad (45)$$

とおける。真空中の基礎方程式は、媒質中の場合と同様、式(40)が成り立たねばならないことから導びかれる。

$$\nabla^2 \dot{\Omega}_v = 0 \quad (46)$$

媒質と真空との境界条件

媒質中の $\dot{\Omega}_m$ には、任意の関数 χ の不定性があることを利用して、境界表面で $\dot{\Omega}_m$ と $\dot{\Omega}_v$ を等しくすることができる(付録I)。

$$\dot{\Omega}_m = \dot{\Omega}_v \quad (47)$$

この様にするると、 $(\nabla \dot{\Omega}_m)_n = (\nabla \dot{\Omega}_v)_n$ が成り立つ。このことと、 $\dot{\mathbf{h}}_n$ の連続性より、境界面では、

$$\dot{\mathbf{F}}_n = 0 \quad (48)$$

となる。次に $\dot{\mathbf{B}}_1$ の連続性より、

$$\mu \left(\dot{\mathbf{F}}_1 + \frac{\partial \dot{\Omega}_m}{\partial n} \mathbf{n} \right) = \mu_0 \frac{\partial \dot{\Omega}_v}{\partial n} \mathbf{n} \quad (49)$$

が得られる。上式より、

$$\mu_0 \frac{\partial \dot{\Omega}_v}{\partial n} - \mu \frac{\partial \dot{\Omega}_m}{\partial n} = \mu \dot{\mathbf{F}}_1 \quad (50)$$

となる。式(48)より、境界面では、

$$\dot{\mathbf{i}}_1 = 0 \quad (51)$$

が満足される(式(57)参照)。

媒質と媒質との境界条件

ベクトル・ポテンシャル法の場合と同様、

$$\dot{\Omega}_1 = \dot{\Omega}_2 \quad (52)$$

$$\dot{\mathbf{F}}_{11} = \dot{\mathbf{F}}_{21} \quad (53)$$

と選ぶことができる。 $\dot{\mathbf{h}}_n$ の連続性より

$$\dot{\mathbf{F}}_{1n} = \dot{\mathbf{F}}_{2n} \quad (54)$$

$\dot{\mathbf{B}}_1$ の連続性より,

$$\mu_1 \left(\dot{\mathbf{F}}_{11} + \frac{\partial \dot{\Omega}_1}{\partial \mathbf{n}} \mathbf{n} \right) = \mu_2 \left(\dot{\mathbf{F}}_{21} + \frac{\partial \dot{\Omega}_2}{\partial \mathbf{n}} \mathbf{n} \right) \quad (55)$$

さらに \mathbf{F}_n の連続性より,

$$\dot{\mathbf{i}}_{11} = \dot{\mathbf{i}}_{21} \quad (56)$$

が得られる。なぜなら, 境界面で

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{i}}_1 &= \mathbf{n} \cdot \nabla \times \dot{\mathbf{F}} \\ &= \lim_{\delta S \rightarrow 0} \oint_{\delta l} \dot{\mathbf{F}} \cdot d\mathbf{l} / \delta S \end{aligned} \quad (57)$$

が成り立つからである。上式で δS は境界面上の微小面積, δl は δS を囲む微小閉曲線である。

2.2 有限要素法の導入

前節で与えた基礎方程式を定められた境界条件の下に解くために, 変分法を適用する。このためにはエネルギー汎関数を求める必要がある。実際は基礎方程式と境界条件からエネルギー汎関数を組み上げるのであるが, ここではその過程を省略し, 結果のみを記すと次の様になる。

$$\dot{\mathbf{i}}^T = \dot{\mathbf{i}} + \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \quad (58)$$

として,

$$\dot{\mathbf{I}}_0(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T) = \sum_{V^{(e)}} \dot{\mathbf{I}}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T) \quad (59)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T) = \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} \dot{\mathbf{B}}^2 - \frac{j}{2\omega\sigma} (\dot{\mathbf{i}}^T)^2 \right] dV \quad (60)$$

$\dot{\mathbf{I}}_0(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T)$ は全系のエネルギー汎関数, $\dot{\mathbf{I}}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T)$ は有限要素内のエネルギー汎関数である。式(59)の $\sum_{V^{(e)}}$ は全系内のすべての有限要素に関する総和を意味し, 式(60)の $\int_{V^{(e)}}$ は有限要素の占める領域に関する積分を意味する。なお, 一つの有限要素内では, μ, σ, ϵ は一定であるとしておく。

2.2.1 ベクトル・ポテンシャル法

式(7), 式(9), 式(12), 式(58)を用いると, 式(60)は次の様になる。

$$\dot{I}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) = \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times \dot{\mathbf{A}})^2 - \frac{j}{2\omega\sigma} \{ -j\omega\sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi}) + \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \}^2 \right] dV \quad (61)$$

$\dot{I}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi})$ の変分を取る時に, $(\dot{\mathbf{i}}^{(e)})^2$ の項は完全に消失するため, 新たに

$$\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) = \dot{I}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) + \int_{V^{(e)}} \frac{j}{2\omega\sigma} (\dot{\mathbf{i}}^{(e)})^2 dV \quad (62)$$

と定義すると,

$$\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) = \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times \dot{\mathbf{A}})^2 + \frac{j\omega\sigma}{2} (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi})^2 - (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi}) \cdot \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \right] dV \quad (63)$$

$$= \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times \dot{\mathbf{A}})^2 + \frac{j\omega\sigma}{2} (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi})^2 - \dot{\mathbf{A}} \cdot \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \right] dV \quad (64)$$

式(63)において, 閉じた電流源 $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ を考えれば,

$$\int_{V^{(e)}} \nabla\dot{\Phi} \cdot \dot{\mathbf{i}}^{(e)} dV = \int_{V^{(e)}} \nabla \cdot (\dot{\Phi} \dot{\mathbf{i}}^{(e)}) dV = \int_{S^{(e)}} \dot{\Phi} \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (65)$$

となるため, 式(64)ではこの項を省略してある。

全系のエネルギー汎関数も新しく,

$$\dot{I}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) = \sum_{V^{(e)}} \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) \quad (66)$$

と再定義しておく。

次に, $\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi})$ の変分をとると次の様になる。

$$\begin{aligned} \delta \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) &= \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{A}} + j\omega\sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi}) - \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \right] \cdot \delta \dot{\mathbf{A}} \\ &\quad - j\omega\sigma (\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} + \nabla^2 \dot{\Phi}) \delta \dot{\Phi} dV + \int_{S^{(e)}} [\delta \dot{\mathbf{A}} \times \dot{\mathbf{H}} - \dot{\mathbf{i}} \delta \dot{\Phi}] \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad (67)$$

有限要素内では, 基礎方程式(式(13), 式(16), 式(17))により, 式(67)の体積積分は零となる。 $\delta \dot{\mathbf{A}}, \dot{\mathbf{H}}$ が任意の境界面で連続であることより, 境界面を共有する有限要素の寄与同志が打ち消し合って, $\delta \dot{\mathbf{A}}, \dot{\mathbf{H}}$ の表面積分の項はなくなる。さらに, $S^{(e)}$ が真空

中との境界面であれば、 $\dot{i}_1 = 0$ より、 $\dot{i} \partial \dot{\Phi}$ の表面積分の項はなくなる。又 $S^{(e)}$ が媒質同志の境界面の場合も、 \dot{i}_1 、 $\dot{\Phi}$ の連続性より、この項はなくなる（無限速で $\dot{H}_n = 0$ の仮定が含まれている）。従って、

$$\partial \dot{I}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) = 0 \quad (68)$$

逆に、 $\dot{I}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi})$ を停留とする $\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}$ は基礎方程式と境界条件を満足する。

次に、あるひとつの有限要素に関する要素方程式を導出する。円筒座標系を採用し、図 1 に示される領域をひとつの有限要素と決める。有限要素内で $\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}$ を r, θ, z に関して線型と近似すると、この有限要素によって決まる形状関数 $N_i(r, \theta, z)$ が導びかれる。この形状関数を用いて、 $\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}$ は次の様に表わされる。

$$\dot{\mathbf{A}}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) \dot{\mathbf{A}}_i \quad (69)$$

$$\dot{\Phi}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) \dot{\Phi}_i \quad (70)$$

ここに、 $\dot{\mathbf{A}}_i, \dot{\Phi}_i$ は $\dot{\mathbf{A}}(r, \theta, z), \dot{\Phi}(r, \theta, z)$ の節点における値である。 $\dot{i}^{(e)}$ は有限要素内で一定と考えておくことにする。形状関数 $N_i(r, \theta, z)$ と式 (69), 式 (70) については第 2, 3 節で詳述する。

式 (69), 式 (70) を式 (64) に代入すると次の様になる。

$$\dot{c} = j \omega \sigma \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{A}}, \dot{\Phi}) &= \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} \left\{ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \dot{A}_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{A}_r}{\partial z} - \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \dot{A}_\theta)}{\partial r} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{A}_r}{\partial \theta} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \dot{c} \left\{ \left(\dot{A}_r + \frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial r} \right)^2 + \left(\dot{A}_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\dot{A}_z + \frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ &\quad - \left(\dot{i}_r^{(e)} \dot{A}_r + \dot{i}_\theta^{(e)} \dot{A}_\theta + \dot{i}_z^{(e)} \dot{A}_z \right) \right] r dr d\theta dz \quad (72) \\ &= \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} \left\{ \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \dot{A}_{zi} - \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial z} \dot{A}_{\theta i} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial z} \dot{A}_{ri} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial r} \dot{A}_{zi} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial (r N_i)}{\partial r} \dot{A}_{\theta i} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \dot{A}_{ri} \right)^2 \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{c} \left\{ \left(\sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{ri} + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial r} \dot{\Phi}_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{\theta i} + \frac{1}{r} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \dot{\Phi}_i \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{zi} + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial z} \dot{\Phi}_i \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

$$- \left(i_r^{(e)} \sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{ri} + i_\theta^{(e)} \sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{\theta i} + i_z^{(e)} \sum_{i=1}^6 N_i \dot{A}_{zi} \right)] r dr d\theta dz \quad (73)$$

式(73)の体積積分を実行すると $\dot{A}_i, \dot{\Phi}_i$ は r, θ, z に依存しないため積分外に出る。積分内に残るのは形状関数 $N_i(r, \theta, z)$ とその偏微分のみとなる。エネルギー汎関数を停留とする $\dot{A}_i, \dot{\Phi}_i$ ($i=1 \sim 6$)は、

$$\frac{\partial \dot{I}^{(e)}}{\partial \dot{A}_{ri}} = 0, \quad \frac{\partial \dot{I}^{(e)}}{\partial \dot{A}_{\theta i}} = 0, \quad \frac{\partial \dot{I}^{(e)}}{\partial \dot{A}_{zi}} = 0, \quad \frac{\partial \dot{I}^{(e)}}{\partial \dot{\Phi}_i} = 0, \quad i=1 \sim 6 \quad (74)$$

の24個の連立一次方程式から得られる。これを実行すると計算が複雑となるので、新たに $\dot{A}_i, \dot{\Phi}_i$ ($i=1 \sim 6$)を独立変数とみなし、式(74)の変分をとり、その結果あらわれる $\delta A_i, \delta \Phi_i$ ($i=1 \sim 6$)の係数を零として、要素方程式を得る。結果のみを記すと次の様になる。

$i=1 \sim 6$ に対して、

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{A}_{rj} \left(\frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \frac{1}{\mu} \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV + \dot{c} \int N_i N_j dV \right) \right. \\ \left. + \dot{A}_{\theta j} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial (rN_j)}{\partial r} dV \right) + \dot{A}_{zj} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV \right) \right. \\ \left. + \dot{\Phi}_j \dot{c} \int N_i \frac{\partial N_j}{\partial r} dV \right\} = i_r^{(e)} \int N_i dV \quad (75) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{A}_{rj} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right) + \dot{A}_{\theta j} \left(\frac{1}{\mu} \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial (rN_j)}{\partial r} dV + \dot{c} \int N_i N_j dV \right) \\ \left. + \dot{A}_{zj} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right) + \dot{\Phi}_j \dot{c} \int \frac{1}{r} N_i \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right\} = i_\theta^{(e)} \int N_i dV \quad (76) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{A}_{rj} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) + \dot{A}_{\theta j} \left(-\frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) \right. \\ \left. + \dot{A}_{zj} \left(\frac{1}{\mu} \int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV + \frac{1}{\mu} \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \dot{c} \int N_i N_j dV \right) \right. \\ \left. + \dot{\Phi}_j \dot{c} \int N_i \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right\} = i_z^{(e)} \int N_i dV \quad (77) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{A}_{rj} \dot{c} \int \frac{\partial N_i}{\partial r} N_j dV + \dot{A}_{\theta j} \dot{c} \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} N_j dV + \dot{A}_{zj} \dot{c} \int \frac{\partial N_i}{\partial z} N_j dV \right. \\ \left. + \dot{\Phi}_j \dot{c} \left(\int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV + \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) \right\} = 0 \quad (78)$$

式(75)～式(78)の体積積分は有限要素の領域 $V^{(e)}$ にわたって行う。この積分に関しては付録Ⅱに示す。

式(75)～式(78)により、24個の連立一次方程式(未知数24個)が得られた。この連立一次方程式の係数行列は要素マトリクスと呼ばれている。このマトリクスは24行24列の対称行列となる。要素マトリクスをすべての有限要素に関して組み上げることにより、全行列方程式(global matrix equation)が与えられる。

2.2.2 変形ベクトル・ポテンシャル法

ベクトル・ポテンシャル法では真空中の基礎方程式は媒質中の基礎方程式の μ を μ_0 、 σ を ϵ_0 とおきかえるだけで良かった。このため、有限要素法の適用も統一的に記述できた。ところが、変形ベクトル・ポテンシャル法では媒質中と真空中の基礎方程式の形が異っているため、有限要素法の適用に際しても、媒質中の有限要素と真空中の有限要素とでは異った取り扱いをする必要がある。そこで、媒質中であるひとつの有限要素 $V_m^{(e)}$ 、真空中であるひとつの有限要素 $V_v^{(e)}$ をとりだし、

$$\dot{I}_0(\dot{\mathbf{B}}, \dot{\mathbf{i}}^T) = \int_{V_m^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} \dot{\mathbf{B}}^2 - \frac{j}{2\omega\sigma} (\dot{\mathbf{i}}^T)^2 \right] dV + \int_{V_v^{(e)}} \frac{1}{2\mu} \dot{\mathbf{B}}^2 dV \quad (79)$$

とおく、式(59)の $\sum_{V^{(e)}}$ は、 $V^{(e)}$ が媒質であるときは上式の第一項を加え、 $V^{(e)}$ が真空であるときは上式の第二項を加えるものとする。

式(79)に、式(33)、式(36)、式(37)、式(45)を組み合わせ代入する。式(58)の $\dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ は零であることを注意して、次式を得る。

$$\dot{I}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\mathbf{\Omega}}) = \int_{V_m^{(e)}} \left[\frac{1}{2} \mu (\dot{\mathbf{F}} + \nabla \dot{\mathbf{\Omega}}_m + \dot{\mathbf{H}}^{(e)})^2 - \frac{1}{2} \mu_p (\nabla \times \dot{\mathbf{F}})^2 \right] dV \\ + \int_{V_v^{(e)}} \left[\frac{1}{2} \mu_0 (\nabla \dot{\mathbf{\Omega}}_v + \dot{\mathbf{H}}^{(e)})^2 \right] dV \quad (80)$$

上式の $(\dot{\mathbf{H}}^{(e)})^2$ の項は I_0 の変分には全く影響しない。そこで、新たに、

$$\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\mathbf{\Omega}}) = \dot{I}_0^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\mathbf{\Omega}}) - \int_{V_m^{(e)}} \frac{\mu}{2} (\dot{\mathbf{H}}^{(e)})^2 dV - \int_{V_v^{(e)}} \frac{\mu_0}{2} (\dot{\mathbf{H}}^{(e)})^2 dV \quad (81)$$

$$\dot{I}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) = \sum_{V^{(e)}} \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) \quad (82)$$

と定義する。 $\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega})$ は次の様になる。

$$\begin{aligned} \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) = & \int_{V_m^{(e)}} \left[\frac{1}{2} \mu (\dot{\mathbf{F}} + \nabla \dot{\Omega}_m)^2 + \mu \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \cdot (\dot{\mathbf{F}} + \nabla \dot{\Omega}_m) \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \mu \dot{p} (\nabla \times \dot{\mathbf{F}})^2 \right] dV + \int_{V_v^{(e)}} \left[\frac{1}{2} \mu_0 (\nabla \dot{\Omega}_v)^2 + \mu_0 \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \cdot \nabla \dot{\Omega}_v \right] dV \end{aligned} \quad (83)$$

式(65)の $\nabla \dot{\Phi} \cdot \dot{\mathbf{i}}^{(e)}$ のように、 $\int \mu \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \cdot \nabla \dot{\Omega}_m dV$ 、 $\int \mu_0 \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \cdot \nabla \dot{\Omega}_v dV$ を部分積分すると、面積分が残る。ところが、表面を共有する有限要素同志の寄与が打消し合って、これらの項はなくなる。従って、

$$\begin{aligned} \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) = & \int_{V_m^{(e)}} \left[\frac{1}{2} \mu (\dot{\mathbf{F}} + \nabla \dot{\Omega}_m)^2 + \mu \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \cdot \dot{\mathbf{F}} - \frac{1}{2} \mu \dot{p} (\nabla \times \dot{\mathbf{F}})^2 \right] dV \\ & + \int_{V_v^{(e)}} \frac{1}{2} \mu_0 (\nabla \dot{\Omega}_v)^2 dV \end{aligned} \quad (84)$$

$\dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega})$ の変分をとると次の様になる。

$$\begin{aligned} \delta \dot{I}^{(e)}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) = & -\mu \int_{V_m^{(e)}} \left\{ \dot{p} \nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{F}} - \dot{\mathbf{F}} - \nabla \dot{\Omega}_m - \dot{\mathbf{H}}^{(e)} \right\} \cdot \delta \dot{\mathbf{F}} \\ & + (\nabla \cdot \dot{\mathbf{F}} + \nabla^2 \dot{\Omega}_m) \delta \dot{\Omega}_m dV - \mu_0 \int_{V_v^{(e)}} (\nabla^2 \dot{\Omega}_v) \delta \dot{\Omega}_v dV \\ & + \int_{S_m^{(e)}} \left\{ \frac{\dot{\mathbf{E}}}{\omega} \times \delta \dot{\mathbf{F}} + \dot{\mathbf{B}}_m \delta \dot{\Omega}_m \right\} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S_v^{(e)}} \delta \dot{\Omega}_v \dot{\mathbf{B}}_v \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad (85)$$

式(38)、式(41)、式(46)より、上式の体積積分の項は零となる。同時に、 $S_m^{(e)}$ が媒質と真空との境界を含む場合、 $\dot{\mathbf{F}}_n = 0$ より、 $S_m^{(e)}$ が媒質と媒質との境界を含む場合、 \mathbf{F}_n と \mathbf{E}_n の連続性より $S_m^{(e)}$ を含む有限要素同志の寄与が相殺するため、 $\dot{\mathbf{E}} \times \delta \dot{\mathbf{F}}$ の項はなくなる。同様に、 $\dot{\Omega}$ ($\dot{\Omega}_m$ あるいは $\dot{\Omega}_v$)と $\dot{\mathbf{B}}_l$ の連続性より $\dot{\mathbf{B}}_m \delta \dot{\Omega}_m$ 、 $\dot{\mathbf{B}}_v \delta \dot{\Omega}_v$ の項はなくなる(無限速で $\dot{\mathbf{B}}_{v1} = 0$ の仮定が含まれている)。従って、

$$\delta \dot{I}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega}) = 0 \quad (86)$$

逆に、 $\dot{I}(\dot{\mathbf{F}}, \dot{\Omega})$ を停留とする $\dot{\mathbf{F}}$ 、 $\dot{\Omega}$ は媒質中と真空中の基礎方程式と境界条件を満足する。

次に、要素方程式を導く。ベクトル・ポテンシャル法の場合と全く同様に、

$$\dot{\mathbf{F}}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) \dot{\mathbf{F}}_i \quad (87)$$

$$\dot{\Omega}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) \dot{\Omega}_i \quad (88)$$

$$\dot{H}^{(e)}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) \dot{H}_i^{(e)} \quad (89)$$

とおき，有限要素が媒質の場合と真空の場合のそれぞれについて，次の要素方程式を得る。

有限要素が媒質の場合

$i = 1 \sim 6$ に対して，

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{\Omega}_j \mu \left(\int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV + \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) \right. \\ \left. + \dot{F}_{rj} \mu \int \frac{\partial N_i}{\partial r} N_j dV + \dot{F}_{\theta j} \mu \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} N_j dV + \dot{F}_{zj} \mu \int \frac{\partial N_i}{\partial z} N_j dV \right\} = 0 \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{\Omega}_j \mu \int N_i \frac{\partial N_j}{\partial r} dV + \dot{F}_{rj} \mu \left(\int N_i N_j dV - p \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right. \right. \\ \left. \left. - p \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) + \dot{F}_{\theta j} \mu p \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial (r N_j)}{\partial r} dV \right. \\ \left. + \dot{F}_{zj} \mu p \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV \right\} = - \sum_{j=1}^6 \mu \dot{H}_{rj}^{(e)} \int N_i N_j dV \end{aligned} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{\Omega}_j \mu \int \frac{1}{r} N_i \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \dot{F}_{rj} \mu p \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r N_i)}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right. \\ \left. + \dot{F}_{\theta j} \mu \left(\int N_i N_j dV - p \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV - p \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r N_i)}{\partial r} \frac{\partial (r N_j)}{\partial r} dV \right) \right. \\ \left. + \dot{F}_{zj} \mu p \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right\} = - \sum_{j=1}^6 \mu \dot{H}_{\theta j}^{(e)} \int N_i N_j dV \end{aligned} \quad (92)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \left\{ \dot{\Omega}_j \mu \int N_i \frac{\partial N_j}{\partial z} dV + \dot{F}_{rj} \mu p \int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV + \dot{F}_{\theta j} \mu p \int \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right. \\ \left. + \dot{F}_{zj} \mu \left(\int N_i N_j dV - \mu p \int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV - \mu p \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV \right) \right\} \\ = - \sum_{j=1}^6 \mu \dot{H}_{zj}^{(e)} \int N_i N_j dV \end{aligned} \quad (93)$$

式(90)～式(93)の体積積分は有限要素の領域 $V_m^{(e)}$ にわたって行う。これで24行24列の要素マトリクスが得られた。この行列は対称行列となる。外部印加磁界 $\dot{H}^{(e)}(r, \theta, z)$ の

表式は付録Ⅲに与える。

有限要素が真空の場合

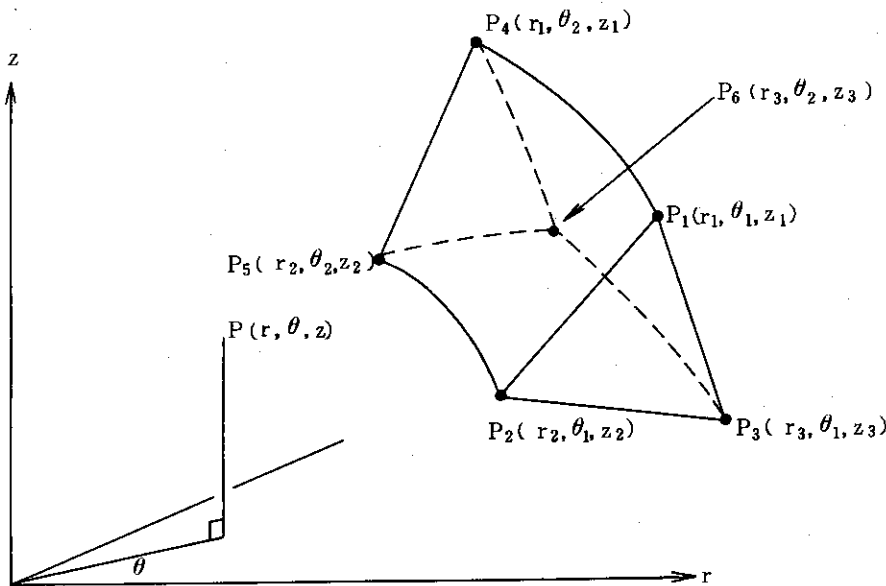
$i = 1 \sim 6$ に対して、

$$\sum_{j=1}^6 \dot{\Omega}_j \mu_0 \left(\int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV + \int \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV + \int \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) = 0 \quad (94)$$

この要素マトリクスは 6 行 6 列の対称行列となる。

2.3 形状関数

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の渦電流解析においては、第 1 図に示すように、円筒座標系 r, θ, z の rz 平面における断面が三角形 (頂点の座標 $(r_1, z_1), (r_2, z_2), (r_3, z_3)$) で、この三角形を θ_1 から θ_2 まで回転させたときに得られる立体を有限要素に選ぶのが最良と考えられる。この立体の六つの頂点 P_1, \dots, P_6 は、通常、節点と呼ばれている。



第 1 図 有限要素と節点座標

ある関数 $A(r, z, \theta)$ をこの有限要素内で r, θ, z の一次の関数と近似すると、 $A(r, z, \theta)$ は次式のようなになる。

$$A(r, z, \theta) = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z + \alpha_4 \theta + \alpha_5 r\theta + \alpha_6 \theta z \quad (95)$$

ここに、 $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ は定数で、この定数を有限要素の六つの節点における $A(r, z, \theta)$ の値より決める。すなわち、

$$\left. \begin{aligned}
 A(r_1, z_1, \theta_1) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_1 + \alpha_3 z_1 + \alpha_4 \theta_1 + \alpha_5 \theta_1 r_1 + \alpha_6 \theta_1 z_1 \\
 A(r_2, z_2, \theta_1) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_2 + \alpha_3 z_2 + \alpha_4 \theta_1 + \alpha_5 \theta_1 r_2 + \alpha_6 \theta_1 z_2 \\
 A(r_3, z_3, \theta_1) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_3 + \alpha_3 z_3 + \alpha_4 \theta_1 + \alpha_5 \theta_1 r_3 + \alpha_6 \theta_1 z_3 \\
 A(r_1, z_1, \theta_2) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_1 + \alpha_3 z_1 + \alpha_4 \theta_2 + \alpha_5 \theta_2 r_1 + \alpha_6 \theta_2 z_1 \\
 A(r_2, z_2, \theta_2) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_2 + \alpha_3 z_2 + \alpha_4 \theta_2 + \alpha_5 \theta_2 r_2 + \alpha_6 \theta_2 z_2 \\
 A(r_3, z_3, \theta_2) &= \alpha_1 + \alpha_2 r_3 + \alpha_3 z_3 + \alpha_4 \theta_2 + \alpha_5 \theta_2 r_3 + \alpha_6 \theta_2 z_3
 \end{aligned} \right\} (96)$$

今

$$\left. \begin{aligned}
 A_1 &= A(r_1, z_1, \theta_1) \\
 A_2 &= A(r_2, z_2, \theta_1) \\
 A_3 &= A(r_3, z_3, \theta_1) \\
 A_4 &= A(r_1, z_1, \theta_2) \\
 A_5 &= A(r_2, z_2, \theta_2) \\
 A_6 &= A(r_3, z_3, \theta_2)
 \end{aligned} \right\} (97)$$

とおき，式(96)を $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ について解くと次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} (a_{ij}) \begin{pmatrix} \theta_2 A_1 - \theta_1 A_4 \\ \theta_2 A_2 - \theta_1 A_5 \\ \theta_2 A_3 - \theta_1 A_6 \end{pmatrix} \quad (98)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{pmatrix} = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} (a_{ij}) \begin{pmatrix} A_4 - A_1 \\ A_5 - A_2 \\ A_6 - A_3 \end{pmatrix} \quad (99)$$

ここで，

$$(a_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{pmatrix}^{-1} \quad (100)$$

式(98)，式(99)の $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ を式(95)に代入して，整理すると次の様になる。

$$A(r, z, \theta) = \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) A_i \quad (101)$$

ここに，

$$\begin{pmatrix} N_1(r, \theta, z) \\ N_2(r, \theta, z) \\ N_3(r, \theta, z) \\ N_4(r, \theta, z) \\ N_5(r, \theta, z) \\ N_6(r, \theta, z) \end{pmatrix} = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \begin{pmatrix} (\theta_2 - \theta) \cdot (a_{11} + a_{21}r + a_{31}z) \\ (\theta_2 - \theta) \cdot (a_{12} + a_{22}r + a_{32}z) \\ (\theta_2 - \theta) \cdot (a_{13} + a_{23}r + a_{33}z) \\ (\theta - \theta_1) \cdot (a_{11} + a_{21}r + a_{31}z) \\ (\theta - \theta_1) \cdot (a_{12} + a_{22}r + a_{32}z) \\ (\theta - \theta_1) \cdot (a_{13} + a_{23}r + a_{33}z) \end{pmatrix} \quad (102)$$

式(102)は

$$M_i(r, z) = a_{1i} + a_{2i}r + a_{3i}z \quad (103)$$

とおき、次のようにまとめることができる。

$$N_i(r, \theta, z) = \frac{(-1)^{I_1}}{\theta_2 - \theta_1} (\theta - \theta_{I_2}) M_{I_3} \quad (104)$$

ただし、

$$I_1 = 1 - \left[\frac{i-1}{3} \right] = \begin{cases} 1, & i=1, 2, 3 \text{ のとき} \\ 0, & i=4, 5, 6 \text{ のとき} \end{cases} \quad (105)$$

$$I_2 = I_1 + 1 = \begin{cases} 2, & i=1, 2, 3 \text{ のとき} \\ 1, & i=4, 5, 6 \text{ のとき} \end{cases} \quad (106)$$

$$I_3 = i - 3 \times \left[\frac{i-1}{3} \right] = \begin{cases} 1, & i=1, 4 \text{ のとき} \\ 2, & i=2, 5 \text{ のとき} \\ 3, & i=3, 6 \text{ のとき} \end{cases} \quad (107)$$

とする。式(105)、式(107)の $[x]$ は、ガウス記号で、 x の値を越えない最大の整数を意味する。

$N_i(r, \theta, z)$ はある有限要素の形状関数(Shape function)と呼ばれている。次に、 $N_i(r, \theta, z)$ 、 $M_i(r, \theta, z)$ 、 a_{ij} の性質について調べよう。まず、

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} = r_1(z_2 - z_3) + r_2(z_3 - z_1) + r_3(z_1 - z_2) \quad (108)$$

とおくと、

$$(a_{ij}) = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} r_2 z_3 - r_3 z_2 & r_3 z_1 - r_1 z_3 & r_1 z_2 - r_2 z_1 \\ z_2 - z_3 & z_3 - z_2 & z_1 - z_2 \\ r_3 - r_2 & r_1 - r_2 & r_2 - r_1 \end{pmatrix} \quad (109)$$

従って、

$$\sum_{j=1}^3 a_{1j} = 1, \quad \sum_{j=1}^3 a_{2j} = \sum_{j=1}^3 a_{3j} = 0 \quad (110)$$

上式より、

$$\sum_{i=1}^3 M_i(r, z) = 1, \quad \sum_{i=1}^6 N_i(r, \theta, z) = 1 \quad (111)$$

さらに、次の関係が容易に導びかれる。

$$\theta_1 N_i + \theta_2 N_{i+3} = \theta M_i \quad (i=1 \sim 3) \quad (112)$$

$$N_i + N_{i+3} = M_i \quad (i=1\sim3) \quad (113)$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 N_5 &= N_2 N_4 \\ N_2 N_6 &= N_3 N_5 \\ N_3 N_4 &= N_1 N_6 \end{aligned} \right\} \quad (114)$$

式(103)は次のように書き換えることができる。

$$M_i(r, z) = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ r_1 & r & r_3 \\ z_1 & z & z_3 \end{vmatrix} \quad (115)$$

↑
i行目の r_i, z_i が r, z に入れかわる。

従って、 δ_{ij} をクロネッカーの記号とすると、

$$M_i(r_j, z_j) = \delta_{ij} \quad (116)$$

次に例として $i=1$ の場合を考えると、式(115)より、 $M_1=0$ は rz 平面で (r_2, z_2) と (r_3, z_3) を通る直線をあらわす。従って、この直線上では必ず $M_1=0$ である。

$N_i(r, \theta, z)$ に関する次の関係も容易に導くことができる。

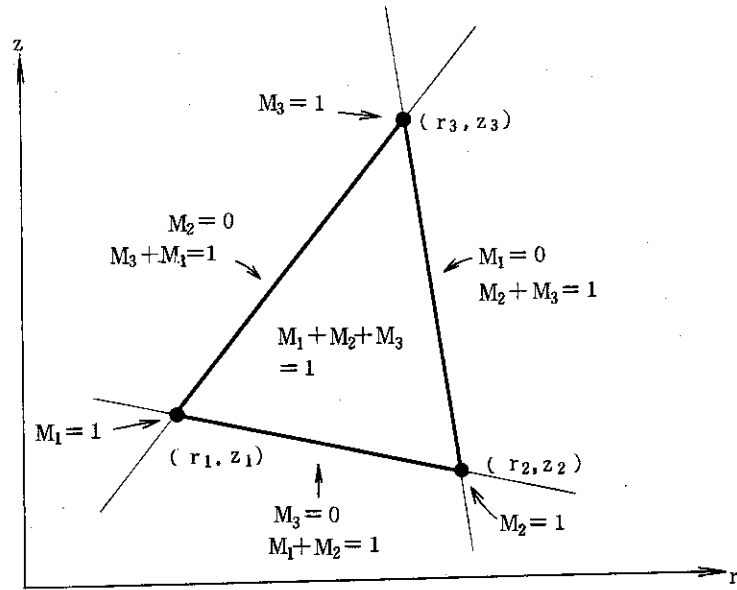
$$N_i(r_j, \theta_1, z_j) = \delta_{ij}, \quad i=1\sim3 \quad (117)$$

$$N_i(r_j, \theta_2, z_j) = \delta_{ij}, \quad i=4\sim6 \quad (118)$$

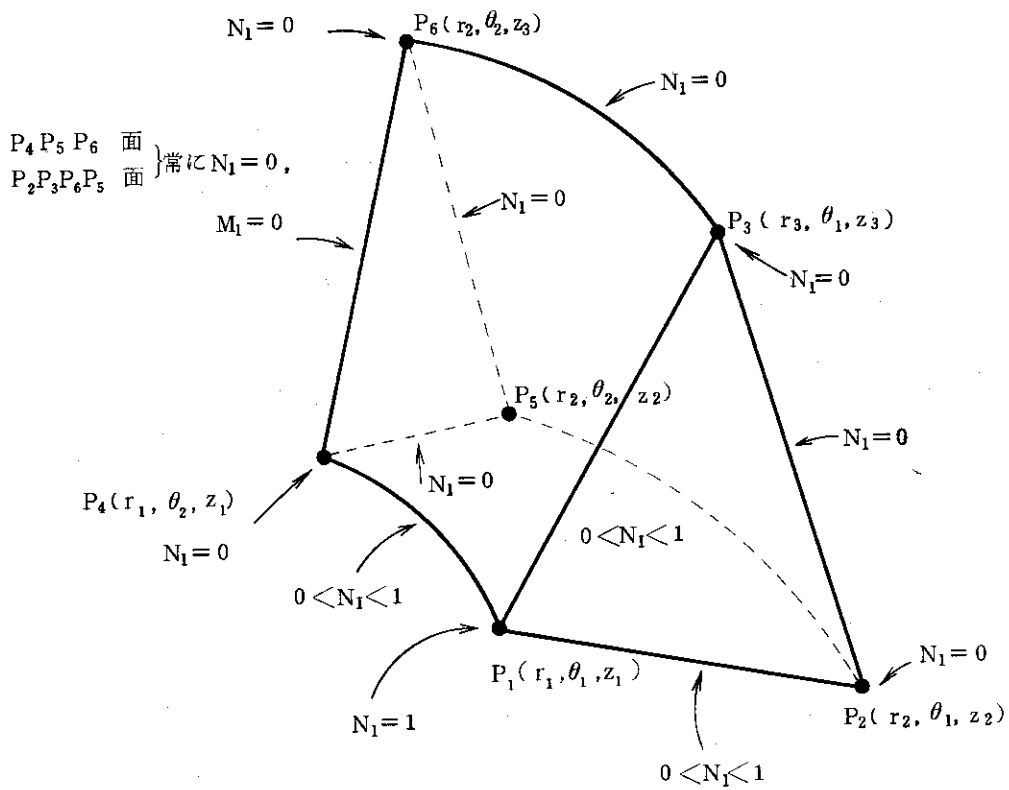
$$N_i(r, \theta_2, z) = 0, \quad i=1\sim3 \quad (119)$$

$$N_i(r, \theta_1, z) = 0, \quad i=4\sim6 \quad (120)$$

以上の関係より、 M_i と N_i (例として N_1) の位置との関係を調べると第2図のようになる。



(a) $M_i(r, \theta, z)$ と位置との関係



(b) $N_1(r, \theta, z)$ と位置との関係

第2図 形状関数と位置との関係

3 計算結果と検討

第2章に述べた解析方法に従って計算コードを作成すれば，臨界プラズマ試験装置における渦電流を解析することが出来る。その際，この装置のトロイダル方向の周期性と上下方向の対称性を考慮すると，全空間を有限要素に分割する必要はなく，解くべき全体マトリクスの大きさとバンド幅を著しく逓減させることができる。使用する電子計算機の容量に関する制限より，装置の周期性と対称性を考慮しなければ，実のところ，この装置における渦電流を解析することは不可能に近い。そこで，まず，装置の周期性と対称性を考慮した場合，その境界条件がどのようなようになるかを述べる。その後，変形ベクトル・ポテンシャル法に関する計算コードと計算例を述べ，最後に検討を加えることにする。ベクトル・ポテンシャル法に関する計算コード，計算例，臨界プラズマ試験装置への適用に関しては，すでに「臨界プラズマ試験装置 プラズマ位置形状制御技術の開発 総合報告書 (1)」に与えられているので，本報告では省略する。上記のR&Dに関する報告書には，この報告書の持つ性格から，解析方法に関してはその要旨のみが記述されているだけである。そこで，このR&D報告書を補完する意味で，本報告では，変形ベクトル・ポテンシャル法とともに，ベクトル・ポテンシャル法に関する解析方法についても詳述することにした。

3.1 臨界プラズマ試験装置における周期境界条件及び上下対称境界条件

臨界プラズマ試験装置には，トロイダル・コイル及び真空容器の厚肉部とベローズ部等の様に，トロイダル方向に一定の周期性が存在する。さらに，この一周期の構造の中に $\frac{1}{2}$ 周期を対称面とする対称性が存在する。第3図にこの様子を模倣的に示す。A面及びA'面を周期境界面B面を $\frac{1}{2}$ 周期境界面とする。

今，閉じたポロイダル電流のみを外部供給電流とすると，この電流により生じる渦電流の周期性と $\frac{1}{2}$ 周期面に関する対称性のために，

$$\dot{\mathbf{E}}_{\parallel} = 0 \quad (\text{すなわち, } \dot{E}_r = \dot{E}_z = 0) \quad (121)$$

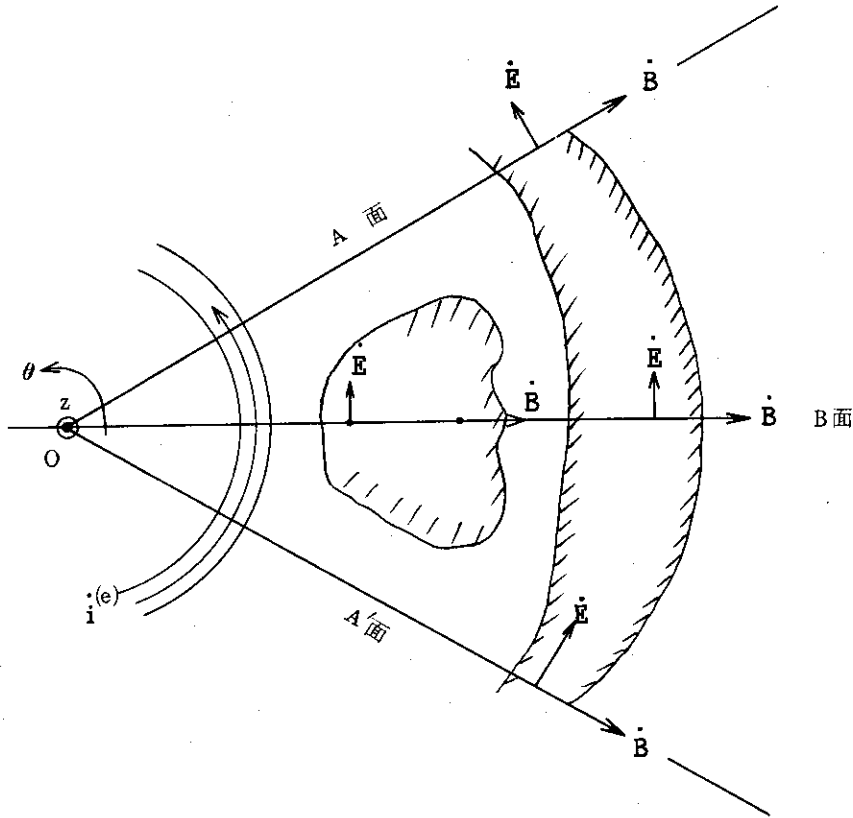
となる。式(57)の関係式を式(2)に適用すると，

$$\dot{\mathbf{B}}_{\perp} = 0 \quad (\text{すなわち, } \dot{B}_{\theta} = 0) \quad (122)$$

が得られる。 $\dot{\mathbf{E}} = -j\omega(\dot{\mathbf{A}} + \nabla\dot{\Phi})$ より，式(121)の条件を $\dot{\mathbf{A}}$ と $\nabla\dot{\Phi}$ にも別々に課すと次のようになる。

$$\dot{\mathbf{A}}_{\parallel} = 0 \quad (\text{すなわち, } \dot{A}_r = \dot{A}_z = 0) \quad (123)$$

$$(\nabla\dot{\Phi})_{\parallel} = 0 \quad (124)$$



第3図 周期境界条件と半周期境界条件

式(124)の条件より、無限遠で $\dot{\Phi} = 0$ と考えられるため、

$$\dot{\Phi} = 0 \quad (125)$$

となる。

変形ベクトル・ポテンシャル法では、式(122)より、

$$\dot{\mathbf{F}}_{\perp} = 0 \quad (\text{すなわち、} \dot{F}_{\theta} = 0) \quad (126)$$

$$\frac{\partial \dot{\Omega}}{\partial \theta} = 0 \quad (127)$$

が得られる。

次に、 $z = 0$ 平面に関して、臨界プラズマ試験装置に上下対称性を考える場合の境界条件について考えよう。この場合、やはり、外部供給電流としてポロイダル電流のみを考えると、

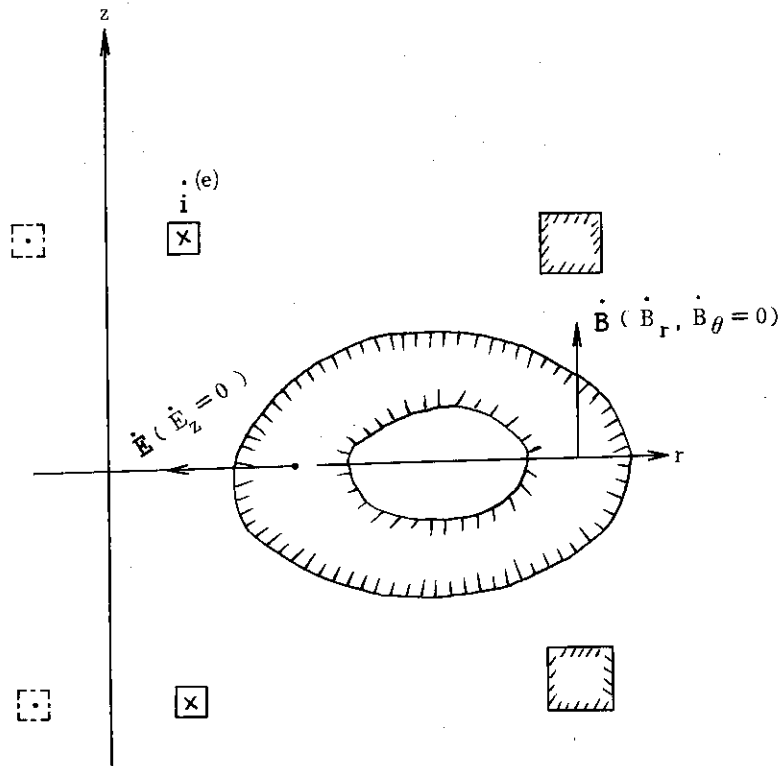
$$\dot{\mathbf{B}}_{\parallel} = 0 \quad (\text{すなわち、} \dot{B}_r = \dot{B}_{\theta} = 0) \quad (128)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{\perp} = 0 \quad (\text{すなわち、} \dot{E}_z = 0) \quad (129)$$

となる(第4図参照)。

上式より、ベクトル・ポテンシャル法では、

$$\dot{\mathbf{A}}_{\perp} = 0 \quad (\text{すなわち、} \dot{A}_z = 0) \quad (130)$$



第4図 上下対称境界条件

$$\frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial z} = 0 \tag{131}$$

変形ベクトル・ポテンシャル法では,

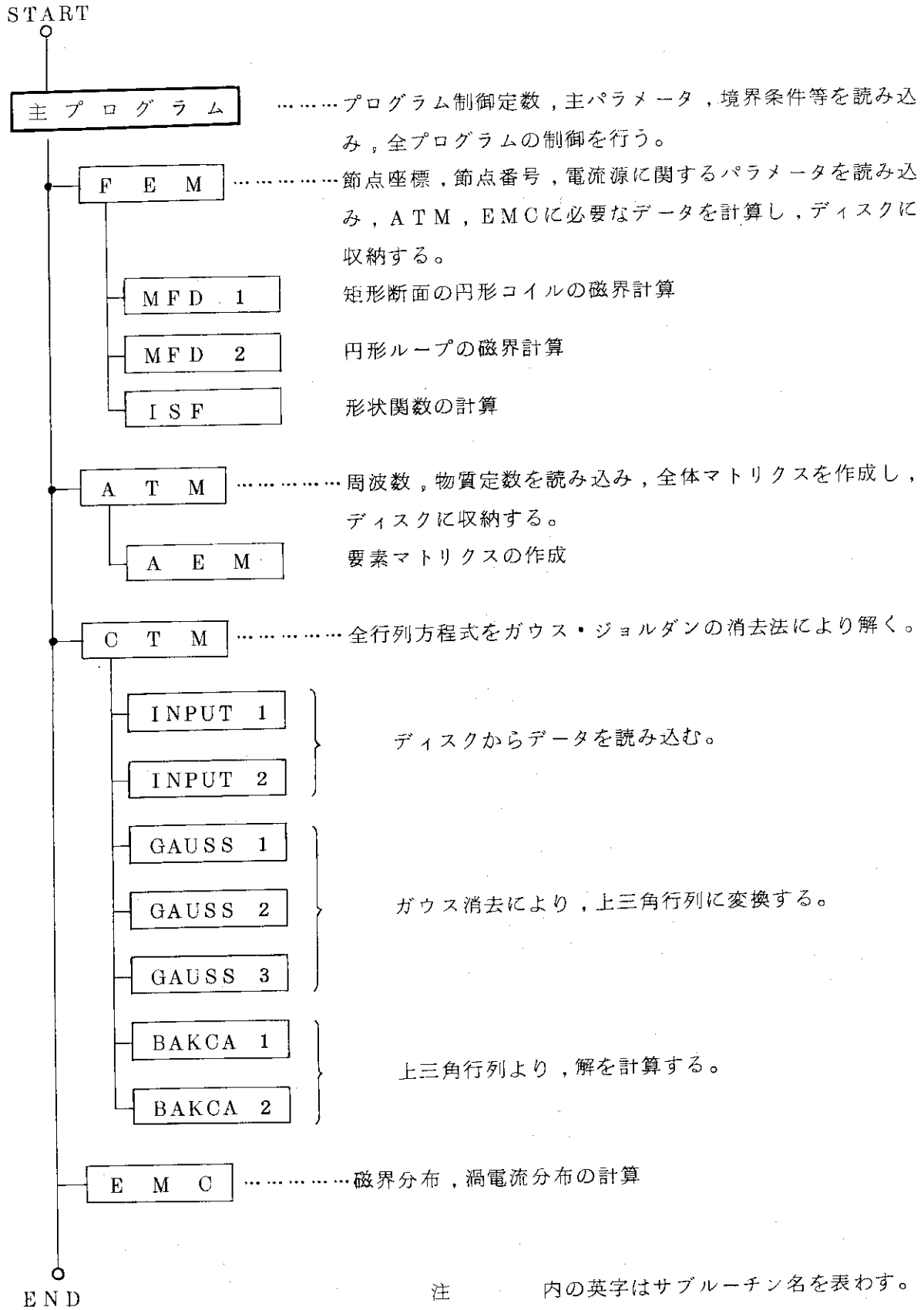
$$\dot{F}_n = 0 \text{ (すなわち, } \dot{F}_r = \dot{F}_\theta = 0 \text{)} \tag{132}$$

$$\dot{\Omega} = 0 \tag{133}$$

が得られる。

3.2 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算コード

第5図に、計算コードの構成と各サブルーチンの主な役割を示す。主プログラムに直接続く4つのサブルーチンを、それぞれ、オーバー・レイ構造のひとつのセグメントとしている。付録Ⅳに、実際の計算コードのリストを与える。

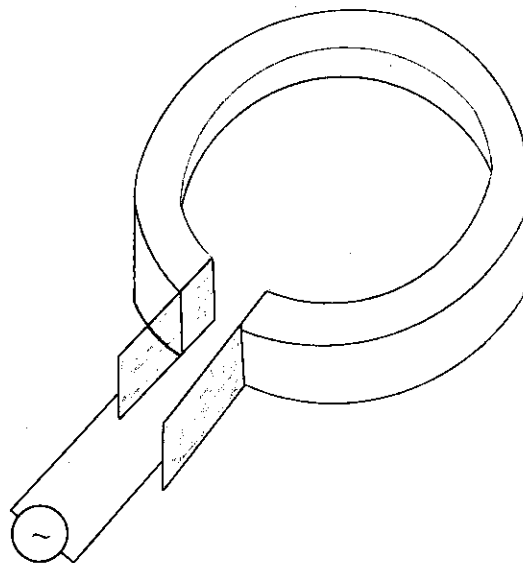


第5図 計算コードの構成

3.3 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算例とその計算結果

変形ベクトル・ポテンシャル法の計算例として、第6図に示すように、交流の定電流源（電源の内部インピーダンスを無限大とする）にその両端を接続された、正方形断面の円形ループを考える。この円形ループの断面中心がつくる円の半径を100[m]，正方形断面の一辺の長さを0.5[m]，円形ループを構成する導体の抵抗率を $2.0 \times 10^{-8} [\Omega m]$ ，通電電流を1000[A]，周波数を $f [Hz]$ とする。

この場合，明らかに，導体表面に電流が集まる傾向をもつ（表皮効果）。この計算例における表皮効果の解析には，ベクトル・ポテンシャル法より変形ベクトル・ポテンシャル法を用いる方が，はるかに便利である。なお，電流分布から，できるだけ，トロイダル効果を除き，解析解との比較を容易にするため，円形ループの半径を断面の一辺の長さより著しく大きくした。



第6図 計算例の概観

十分大きな領域を有限要素に分割した結果を第7図に示す。図には， rz 平面における要素番号と節点番号が示されている。このような有限要素に分割した場合，（要素数468，節点数390）全体マトリクスの大きさは501元で，その半バンド幅（half band width）は125であった。

計算の結果得られた電流密度分布を第8図及び第9図に示す。横軸は導体の内壁を基準にとっている。 $x = 0.5 [m]$ が丁度，外壁に相当する。電流密度の実数部には，外部供給電流密度 $4000 [A/m^2]$ だけのゲタがあること，図8と図9とは z 座標が異なることに注意されたい。パラメータとして周波数を取り，代表的に $f = 0.1 [Hz]$ ， $1.0 [Hz]$ ， $10 [Hz]$ と選んだ。

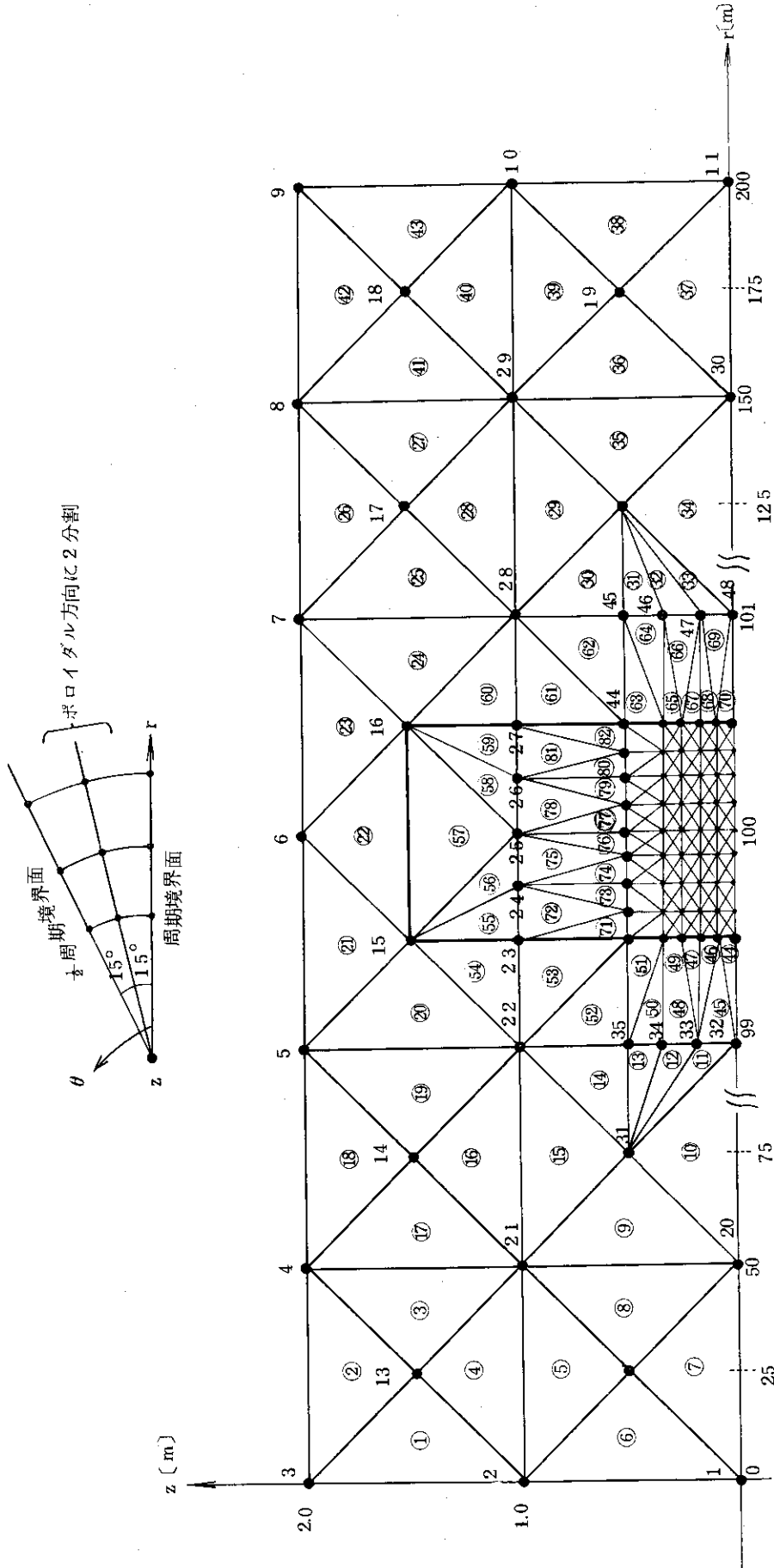
両図より，周波数が高くなるに従い，表皮効果が著しくなることは明白である。

以上の結果と比較するために，すでによく知られた無限の円筒状導体の表皮効果に対する表式⁽¹⁴⁾

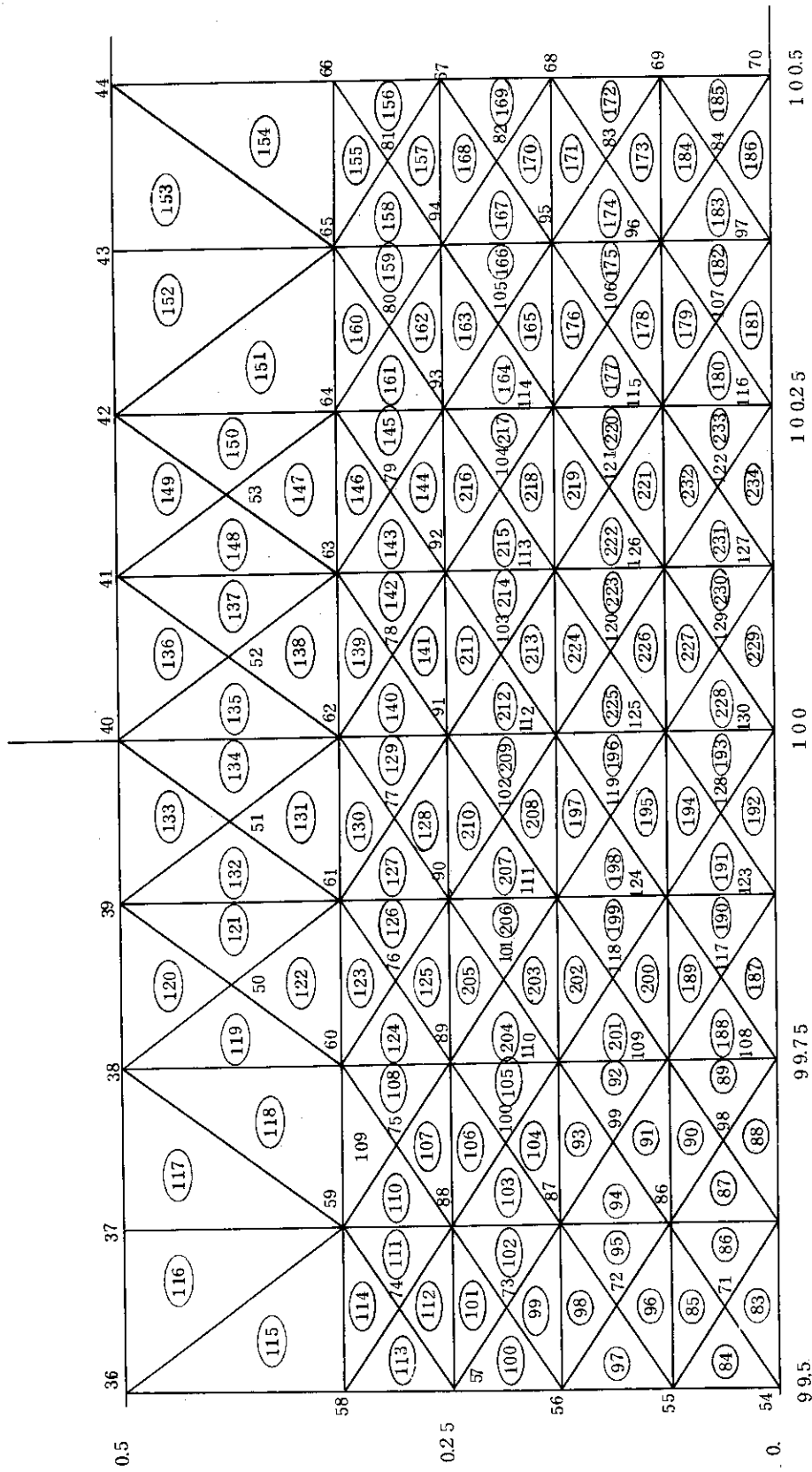
$$\dot{J}_z = \frac{\dot{I}}{2\pi a} \cdot \frac{I_0(\dot{q}\rho)}{I_1(\dot{q}a)} \quad (134)$$

を採用する。ここに， \dot{I} は全通電電流， a は円形断面の半径， I_0 と I_1 は零次と一次の変形ベッセル関数である。 δ を表皮厚さ，すなわち，

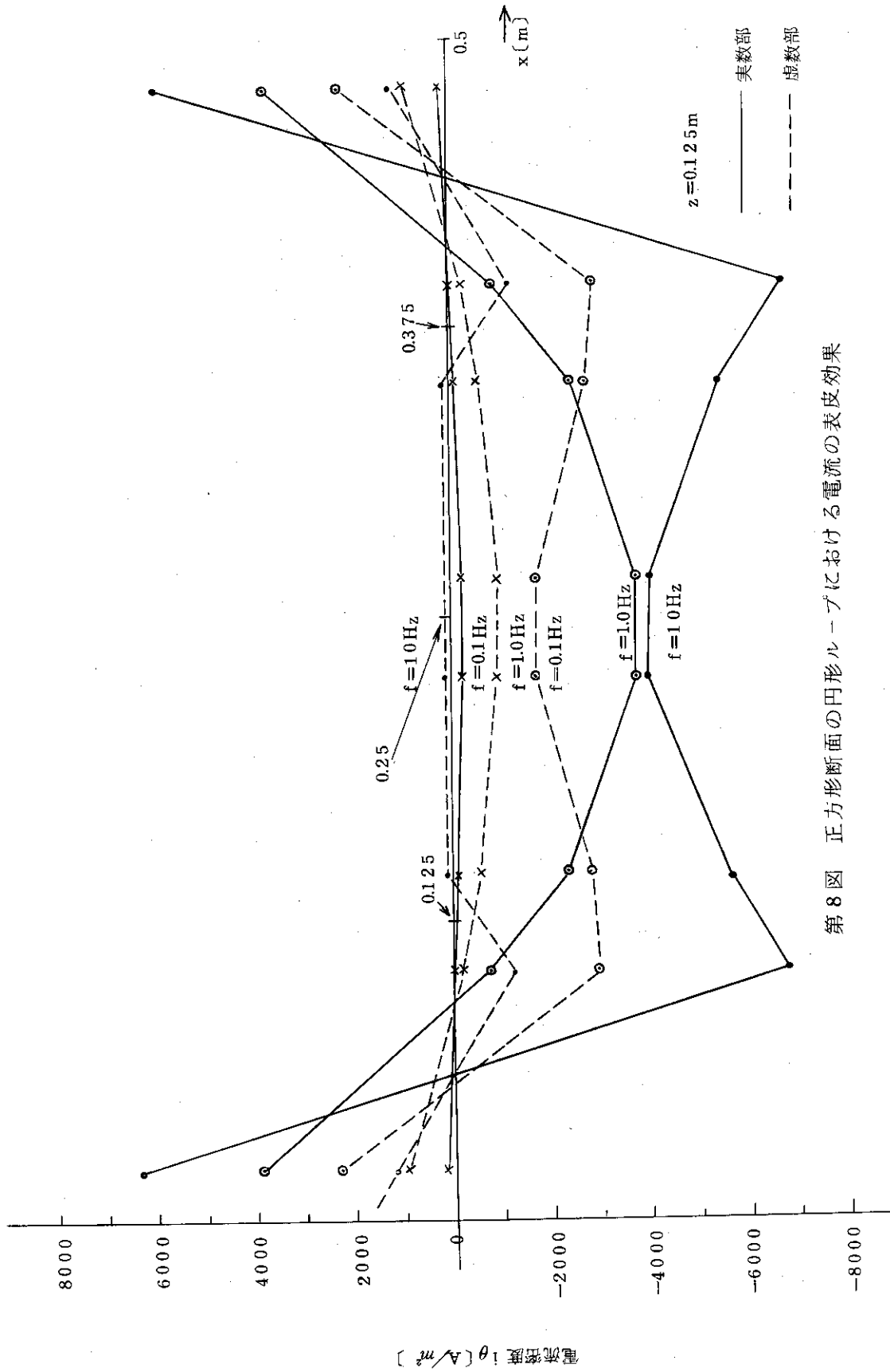
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (135)$$



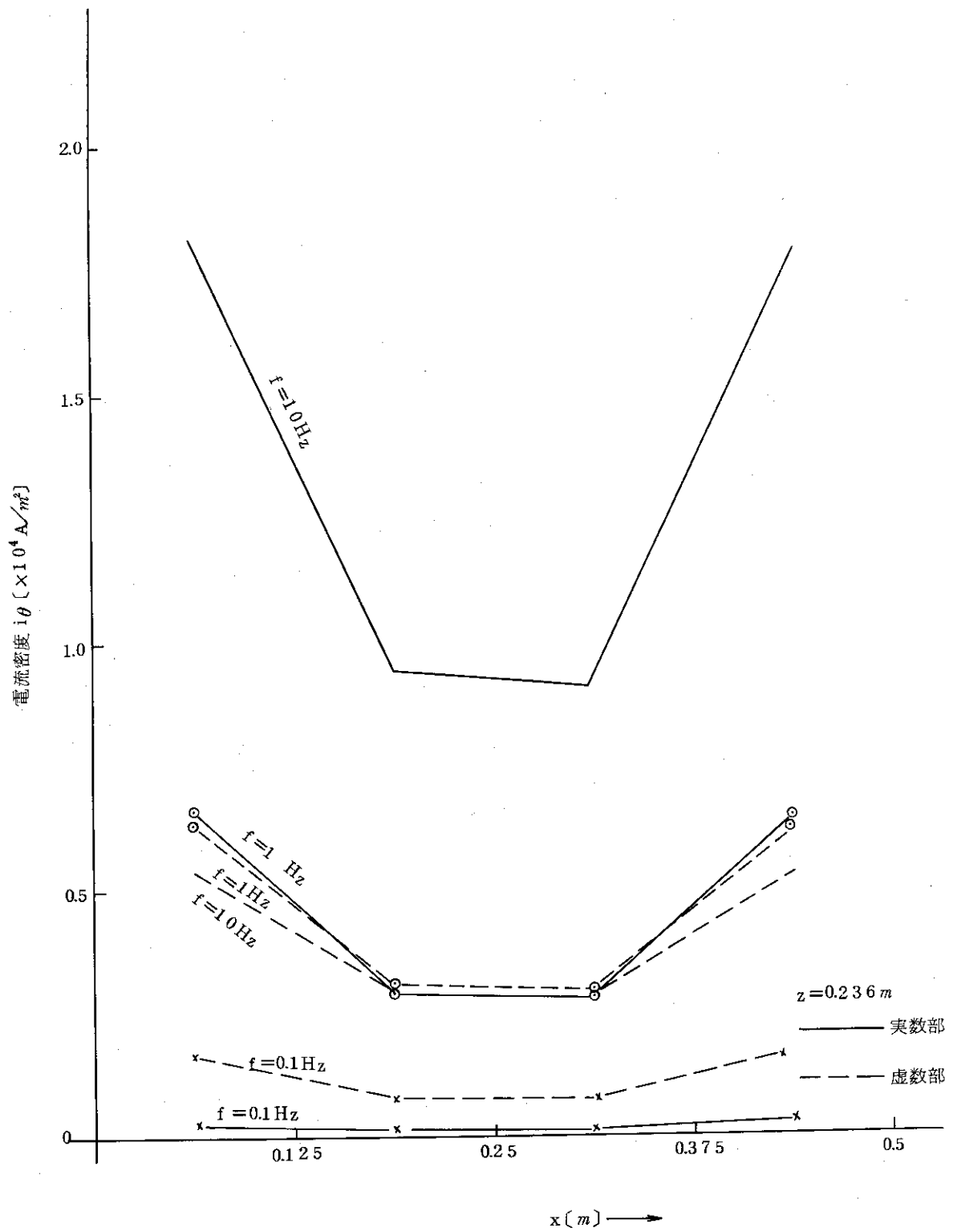
第7図(a) 有限要素への分割 (全体図)



第7図(b) 有限要素への分割(導体近傍の拡大図)



第8図 正方形断面の円形ループにおける電流の表皮効果



第9図 正方形断面の円形ループにおける電流の表皮効果

として、 \dot{q} は、

$$\dot{q} = \frac{1}{\delta} (1 + j) \quad (136)$$

と表わされる。

この表式は、厳密な意味では、本報告の計算例のような正方形断面の導体の場合の数値解に対する比較の対象とはならない。しかし、例えば、その断面積を等しくするように、式(134)の a を選んでやれば、表皮効果が周波数に依存する様子は、両者ともに変わらないはずである。そこで、式(134)により計算した結果を第10図、11図に示す。第10図は実数部、第11図は虚数部である。

第8、9図と第10、11図とを比較してみると、両者はほぼ同一の傾向を持っていることがわかる。また定量的にもかなり良くあっている。例えば、第8図で $f = 10\text{Hz}$ の場合、実数部のとる極小値は $-6700 [\text{A}/\text{m}^2]$ である。第10図において、これに相当する値は $-5300 [\text{A}/\text{m}^2]$ となる。

以上のことより、変形ベクトル・ポテンシャル法の解析方法には問題がないものと判断することができる。

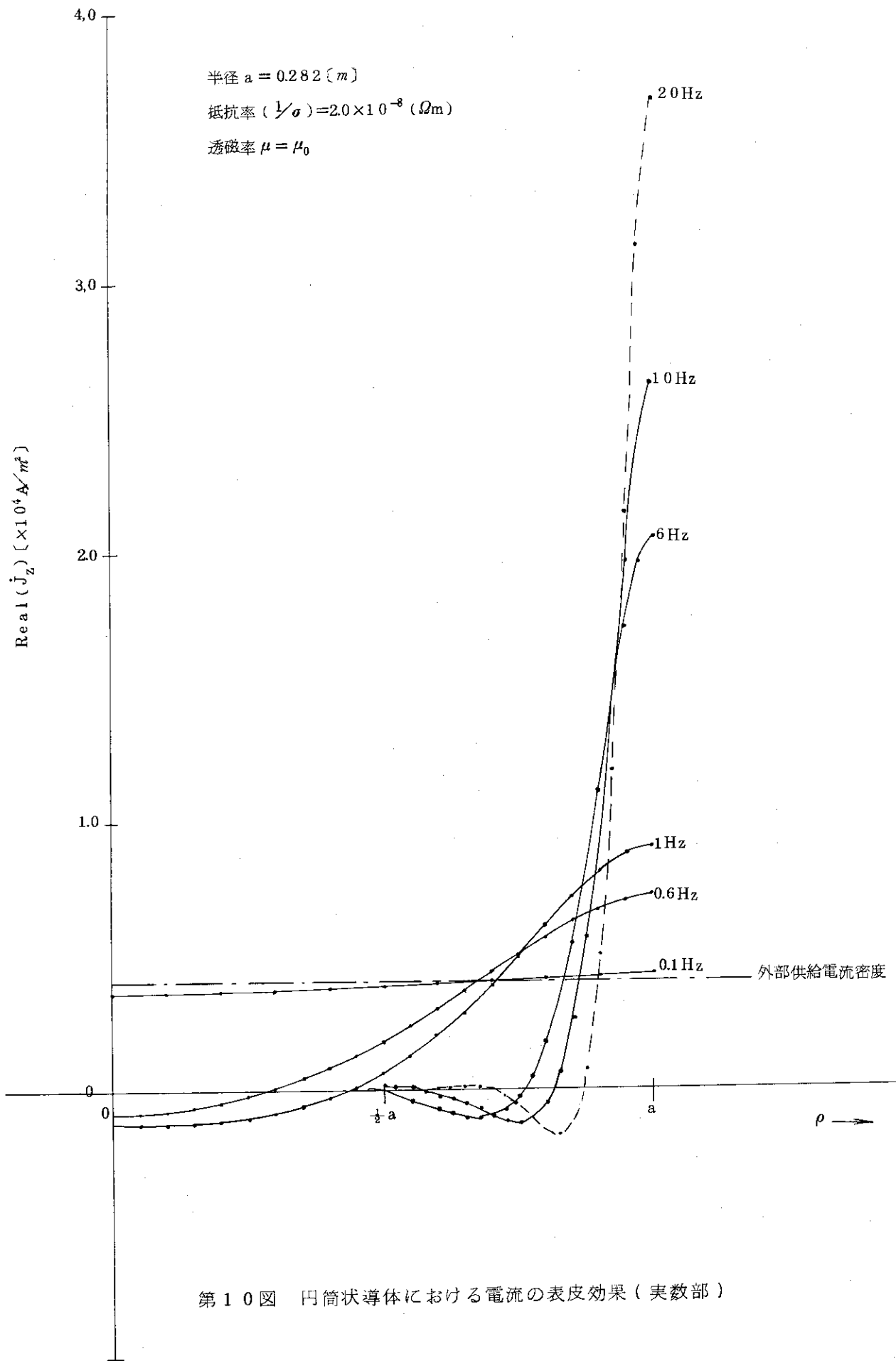
3.4 検 討

以下の項目にわたって検討する。

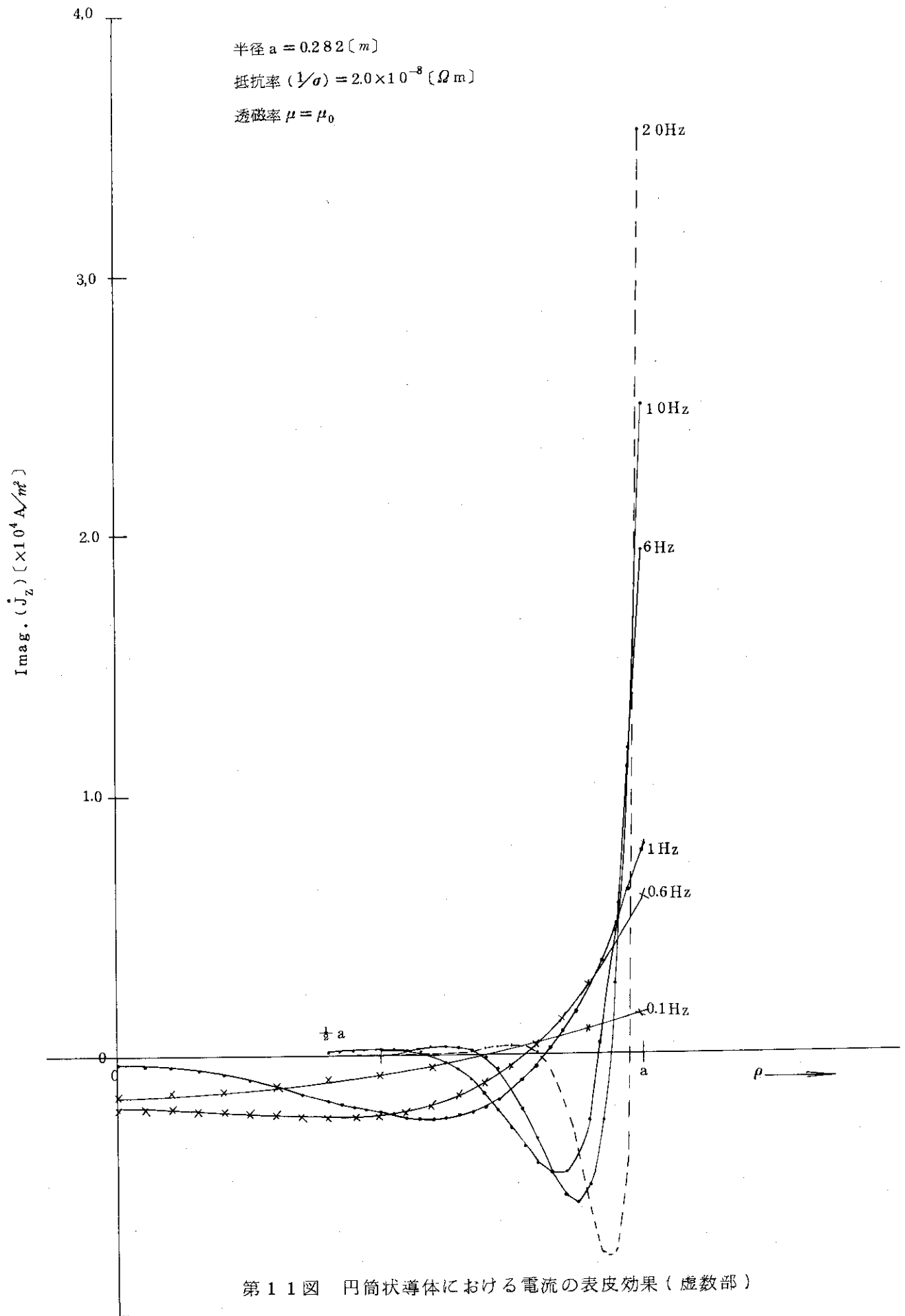
(1) ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル・ポテンシャル法との比較

(A) 変形ベクトル・ポテンシャル法では、すでに解析方法において述べた通り、真空中の磁界 $\dot{\mathbf{H}}_V$ が $\dot{\mathbf{H}}_V = \nabla \Omega_V$ とあらわされることを前提条件とする。媒質が単連結であれば、この条件は満足される(臨界プラズマ試験装置の構造に、 $z=0$ 平面を対称面とする上下方向の対称性を仮定すれば、トロイダル・コイルには、このコイルをポロイダル方向に一周する電流は流れない。単連結でなくとも、この様な場合、変形ベクトル・ポテンシャル法で解析が可能となる)。変形ベクトル・ポテンシャル法を臨界プラズマ試験装置の渦電流解析に適用した場合の最大の弱点は、例えば、真空容器の厚肉部とベローズ部をトロイダル方向に一周して流れる電流を考慮することができない点にある(なぜなら、この様な循環電流が存在する場合、真空中の磁界 $\dot{\mathbf{H}}_V$ がスカラー・ポテンシャル $\dot{\Omega}_V$ の勾配のみでは与えられないからである)。このような場合には、構造上、なんらかのポロイダル・カットを仮定しておく必要がある。他方、ベクトル・ポテンシャル法では、トロイダル方向、あるいはポロイダル方向に一周して流れる電流を、何の問題もなく、取り扱うことができる。

(B) 変形ベクトル・ポテンシャル法では、至る所で、 $\int_S \dot{\mathbf{i}} \cdot d\mathbf{S} = 0$ が成り立っている。ポロイダル・コイルの断面に対しても、この等式が成立するから、この方法では、ポロイダル・コイルの導電率 σ を零と見なした場合も、見なさない場合も、ポロイダル・コイルの電源として、常に定電流源(電源の内部インピーダンスが無限大、このインピーダンスが有限の場合、負荷の変動、あるいは逆起電力に応じて、電源電圧を変化させ、通電電流を一定に保つものとする)を想定していることになる。他方、ベクトル・ポテンシャル法で



第 10 図 円筒状導体における電流の表皮効果 (実数部)



は、理論上、解析の仕方により、ポロイダル・コイルの電源として定電圧源（電源の内部インピーダンスが零、このインピーダンスが零でない場合、負荷の変動、あるいは逆起電力に応じて電源電圧を変化させ、電源の端子電圧を一定に保つものとする）を想定する場合も生じるし、又定電流源を想定する場合も生じる。まず、(a)ポロイダル・コイルの導電率 σ を零と見なした場合。この場合、ポロイダル・コイルの電源として、定電流源を想定し、かつ、ポロイダル・コイル内の表皮効果を完全に無視したことに相当する。(b)ポロイダル・コイルに零とは異なる導電率を持たせる場合。この場合、ポロイダル・コイルに（コイル断面に沿うような）カットを入れる場合と入れない場合の二つの場合が考えられる。(b-1)カットを入れない場合。この場合、ポロイダル・コイルの電源として定電圧源を想定し、かつ、ポロイダル・コイル内の表皮効果を考慮することに相当する。(b-2)カットを入れた場合、この場合、定電流源を想定し、かつ、ポロイダル・コイル内の表皮効果を考慮することに相当する。ただし、この場合、式(63)から式(64)に移る際に省略した面積分の項 $\int_S \dot{\Phi} \cdot \dot{i}^{(e)} dS$ （面積分はコイル断面にわたって行う）を全行列方程式の右辺に組み込む必要がある。理論上は以上の通りであるが、実際問題として、(b-2)の場合の計算には非常な困難を伴う（トロイダル・コイル、ポロイダル・コイル、真空容器、ライナー等、多数の複雑な構造物をを解析の対象に加える場合、電子計算機の容量に関する制限より、ポロイダル・コイルに一箇所だけカットを入れることは不可能に近い。そこで、トロイダル・コイル、あるいは真空容器の周期性を勘案して、ポロイダル・コイルに（トロイダル方向に）周期的なカットを入れることになる。その結果、カットの入れ方に対しても種々の議論が必要になり、問題を極めて複雑にする）。

ところで、ポロイダル・コイルには種々の制御装置が装備されるため、ポロイダル・コイルの電源は定電流源であると考えの方が実際の状態に近い。そこで、定電流源を想定し、かつポロイダル・コイル内の表皮効果を考慮しようとする、上に述べた理由から、ベクトル・ポテンシャル法では非常な困難を伴うことになる。ベクトル・ポテンシャル法にはこのような弱点がある。この点、変形ベクトル・ポテンシャル法では、前節の計算例に示した如く、全く問題がない。

- (C) 次に、両方の運用上の比較に移ろう。両者ともに、媒質中では、ひとつの節点に対し4自由度（ベクトル・ポテンシャル3自由度、スカラー・ポテンシャル1自由度）が必要である。ところが、真空中では、ひとつの節点に対し、ベクトル・ポテンシャル法では3自由度（ベクトル・ポテンシャルのみ）、変形ベクトル・ポテンシャル法では1自由度（スカラー・ポテンシャルのみ）を有することになる。このため、変形ベクトル・ポテンシャル法は、ベクトル・ポテンシャル法に較べて、解くべき全体マトリクスの元数が（場合によっては半バンド幅も）著しく小さくなる。例えば、前節の計算例（501元）をベクトル・ポテンシャル法で行うと、さらに500元程度、マトリクスの元数が増えることになる。これが、変形ベクトル・ポテンシャル法の最大の長所となる。

変形ベクトル・ポテンシャル法では、媒質中の磁界 $\dot{H}^{(e)}$ が発生源となる。このため、電流源 $\dot{i}^{(e)}$ の媒質の導電率 σ を零と考える場合、電流源 $\dot{i}^{(e)}$ 近傍の領域の有限要素への分割を荒くすることができる。ベクトル・ポテンシャル法では、電流源 $\dot{i}^{(e)}$ の媒質の導電率 σ

を零と考える場合でも、電流源 $\dot{i}^{(e)}$ 近傍のベクトル・ポテンシャルの値が精度に非常に良く効くので、この領域を、比較的こまかく、有限要素に分割しなければならない。ただしこの点に関しては、媒質中のベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{A}}^{(e)}$ が発生源となるように、ベクトル・ポテンシャル法を改良することができる(付録V)。

(D) 変形ベクトル・ポテンシャル法では、媒質中の外部印加磁界 $\dot{\mathbf{H}}^{(e)}$ を計算する必要があること、媒質と真空との境界面における境界条件 $\dot{\mathbf{F}}_{\#} = 0$ を考慮する必要があることの二点に関して、ベクトル・ポテンシャル法より計算コードが複雑となる。これは、とりたてて、変形ベクトル・ポテンシャル法の欠点と見なされるほど、大きな欠点とはならない。

以上に述べた様に、ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル・ポテンシャル法は、それぞれ相異った特徴を持っており、解析の目的に応じて使い分けることが望ましい。

(2) ゲージ問題

第2.1.1節に述べたように、本報告では、クーロン・ゲージあるいはローレンツ・ゲージの様な特定のゲージを指定していない。従って、ベクトル・ポテンシャル法では、媒質中と真空中の両方の領域にわたって、一つの関数 $\dot{\chi}$ が、変形ベクトル・ポテンシャル法では、媒質内において、真空との境界面である与えられた値をとる関数 $\dot{\chi}$ が、ゲージ不変性に関連して残っている。当然、エネルギー汎関数(式(63)と式(83)とこの関数の変分を与える表式(式(67)と式(85))にも、ゲージ不変性が存在している。従って、得られた解にもゲージ不変性が存在していなければならないはずだが、有限要素法を適用して得られた解は一意的に決定されてしまう。なぜ、このようになるのかを、ベクトル・ポテンシャル法を例にとり、以下に考察する。

有限要素法を適用する際に、あるひとつの有限要素内で、スカラー・ポテンシャル $\dot{\Phi}(r, \theta, z)$ を r, θ, z に関して一次の関数と近似して、次式を得た(式(70))。

$$\dot{\Phi}(r, \theta, z) = \sum_{i=1}^j N_i(r, \theta, z) \dot{\Phi}_i \quad (137)$$

$N_i(r, \theta, z)$ は r, θ, z に関し一次の関数であるから、上式に ∇^2 の演算を施すと、

$$\nabla^2 \dot{\Phi}(r, \theta, z) \equiv 0 \quad (138)$$

となる。式(16)より、

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}}(r, \theta, z) = 0 \quad (139)$$

従って、有限要素内で、任意の関数を r, θ, z に関して一次の関数と近似することは、クーロン・ゲージを採用したことになる。(このように、ゲージを決めてしまえば、ベクトル・ポテンシャルの境界条件は文献(14)に述べられた方法から導びかれる。)有限要素法において、より高次の項を近似に加えれば、このゲージとは別のゲージを採用することになる(例えば、二次までの近似をとれば、 $\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} = \text{const}$ のゲージを選ぶことになる)。

(3) 変形ベクトル・ポテンシャル法の境界条件

変形ベクトル・ポテンシャル法では、媒質と真空との境界面において、

$$\dot{\mathbf{F}}_{\#} = 0 \quad (140)$$

となる様に、スカラー・ポテンシャル Ω を選んだ。上式が成り立つため、式(85)の面積積分

$$\int_{S_m^{(e)}} \frac{j}{\omega} \dot{\mathbf{E}} \times \delta \dot{\mathbf{F}} \cdot d\mathbf{S} \quad (141)$$

の項が零となり、変形ベクトル・ポテンシャル法に有限要素法が適用できた。

しかるに、式(44)より、 ℓ を媒質表面上にある、任意の閉曲線として、

$$\oint_{\ell} \dot{\mathbf{F}} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (142)$$

となる。式(140)は、もちろん、上式を満足する。ところが、上式を満足する $\dot{\mathbf{F}}$ は、境界面において、一般に、

$$\dot{\mathbf{F}}_{||} = (\nabla \Omega_b)_{||} \quad (143)$$

とあらわせる。この場合、境界面において、

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp} = 0 \quad (144)$$

が成り立つことがわかる。 $\dot{\mathbf{F}}_{||}$ を式(143)のように考えると、有限要素法が適用できなくなる。その結果、渦電流解析におけるひとつの手法として、変形ベクトル・ポテンシャル法を成り立たせることが不可能となる。従って、ゲージ不変性より、式(140)のように境界条件を選ぶことが、変形ベクトル・ポテンシャル法にとって最も強調されるべきことと言える。

4 ま と め

臨界プラズマ試験装置の設計を行うにあたり、この装置の種々の機構、たとえば、トロイダル・コイル、ポロイダル・コイル、真空容器、ライナー等に発生する渦電流、及び、この電流により生ずる磁場を三次元的に解析することが重要になっている。本報告では、有限要素法に着目し、この方法の三次元渦電流・磁場解析への適用について検討を行った。有限要素法を用いる点は同じであるが、外部発生源を外部供給電流に選ぶか、外部印加磁界に選ぶかにより、ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル・ポテンシャル法の二つの解法が考えられる。両解法の基礎方程式と境界条件について述べ、次にエネルギー汎関数を導出し、この汎関数を停留とするベクトル・ポテンシャルとスカラー・ポテンシャルを見い出すことと、境界条件の下に基礎方程式を解くこととは同等であることを示した。断面が三角形の五面体を有限要素に選び、この要素内で r 、 θ 、 z の一次の関数となる形状関数を定義し、形状関数の体積積分を係数にもつ、連立一次の要素方程式を導き出した。この要素方程式をすべての有限要素について組み立てることにより、全行列方程式が得られ、この方程式を解いて、渦電流と磁界を算出した。

変形ベクトル・ポテンシャル法に関しては、正方形断面の円形ループの表皮効果を計算例として与え、その結果を、解析解として与えられている円筒状導体の表皮効果と比較した。このことより、変形ベクトル・ポテンシャル法の解析方法には問題がないことが判った。

最後に、ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル法の比較、ゲージ問題、変形ベクトル・ポテンシャル法の境界条件について検討した。

謝 辞

本報告は、全般を通じて、「臨界プラズマ試験装置 プラズマ位置形状制御技術の開発」において、渦電流・磁界解析を担当された、東京芝浦電気株式会社 重電技術研究所の田辺義雄氏との議論に負うところが大きかった。巨大なマトリクス方程式の解法については、同社の第一電子計最機事業部、平野管谷氏から貴重なコメントをいただいた。又、ゲージ不変性について、大型トカマク開発部の二宮博正氏と亀有昭久氏には有益な示唆をいただいた。さらに、吉川允二大型トカマク開発室長をはじめとするグループの諸氏には、本研究を遂行するにあたり、種々の御援助をいただいた。ここに、以上の方々に感謝の意を表します。

4 ま と め

臨界プラズマ試験装置の設計を行うにあたり、この装置の種々の機構、たとえば、トロイダル・コイル、ポロイダル・コイル、真空容器、ライナー等に発生する渦電流、及び、この電流により生ずる磁場を三次元的に解析することが重要になっている。本報告では、有限要素法に着目し、この方法の三次元渦電流・磁場解析への適用について検討を行った。有限要素法を用いる点は同じであるが、外部発生源を外部供給電流に選ぶか、外部印加磁界に選ぶかにより、ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル・ポテンシャル法の二つの解法が考えられる。両解法の基礎方程式と境界条件について述べ、次にエネルギー汎関数を導出し、この汎関数を停留とするベクトル・ポテンシャルとスカラー・ポテンシャルを見い出すことと、境界条件の下に基礎方程式を解くこととは同等であることを示した。断面が三角形の五面体を有限要素に選び、この要素内で r 、 θ 、 z の一次の関数となる形状関数を定義し、形状関数の体積積分を係数にもつ、連立一次の要素方程式を導き出した。この要素方程式をすべての有限要素について組み立てることにより、全行列方程式が得られ、この方程式を解いて、渦電流と磁界を算出した。

変形ベクトル・ポテンシャル法に関しては、正方形断面の円形ループの表皮効果を計算例として与え、その結果を、解析解として与えられている円筒状導体の表皮効果と比較した。このことより、変形ベクトル・ポテンシャル法の解析方法には問題がないことが判った。

最後に、ベクトル・ポテンシャル法と変形ベクトル法の比較、ゲージ問題、変形ベクトル・ポテンシャル法の境界条件について検討した。

謝 辞

本報告は、全般を通じて、「臨界プラズマ試験装置 プラズマ位置形状制御技術の開発」において、渦電流・磁界解析を担当された、東京芝浦電気株式会社 重電技術研究所の田辺義雄氏との議論に負うところが大きかった。巨大なマトリクス方程式の解法については、同社の第一電子計最機事業部、平野管谷氏から貴重なコメントをいただいた。又、ゲージ不変性について、大型トカマク開発部の二宮博正氏と亀有昭久氏には有益な示唆をいただいた。さらに、吉川允二大型トカマク開発室長をはじめとするグループの諸氏には、本研究を遂行するにあたり、種々の御援助をいただいた。ここに、以上の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 亀有, 相川, 二宮, 鈴木: JAERI-M 6468 (1976)
- (2) 亀有, 二宮, 鈴木: JAERI-M 6953 (1977)
- (3) J. Donea, S. Giuliani and S. Philippe: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, 359-367 (1974)
- (4) M.V.K. Chari: IEEE Vol. PAS-93, 62-72 (1974)
- (5) W. Kinsner and Edward Della Torre: IEEE Vol. MTT-22, 221-228 (1974)
- (6) 奥田宏史: 昭和51年電気学会全国大会予稿集 S. 7-3
- (7) 臨界プラズマ試験装置, プラズマ位置形状制御技術の開発 総合報告書(1)
- (8) S. Caeymaex: CERN ISR-MA/70-19 (1970)
- (9) C.W. Trowbridge: RPP/A92 (1972)
Presented at the 4th International Conference on Magnet Technology, Brookhaven, 19-22 September 1972.
- (10) 後藤以紀: 「電気磁気学本論」, 215頁, 註I・9・1, オーム社,
昭和40年6月20日
- (11) O.C. Zienkiewicz 著, 吉識, 山田監訳: 「基礎工学におけるマトリックス有限要素法」
培風館 1975年
- (12) P. Daly: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 6, 169-178 (1973)
- (13) Calius Vernon Dodd: ORNL-TM-1185 (1965)
- (14) 林重憲ら共著: 「電気磁気学 II」120頁, オーム社, 昭和42年10月20日発行

付録 I. ゲージと境界条件

ベクトル・ポテンシャル法

媒質中のベクトル・ポテンシャルとスカラー・ポテンシャルを $\dot{\mathbf{A}}_m, \dot{\Phi}_m$, 真空中のベクトル・ポテンシャルとスカラー・ポテンシャルを $\dot{\mathbf{A}}_v, \dot{\Phi}_v$ とする。この時, ゲージ不変性より, $\dot{\chi}_m, \dot{\chi}_v$ を任意の独立な関数として,

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{A}}'_m = \dot{\mathbf{A}}_m - \nabla \dot{\chi}_m \\ \dot{\Phi}'_m = \dot{\Phi}_m + \dot{\chi}_m \end{array} \right. \quad (I-1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{A}}'_v = \dot{\mathbf{A}}_v - \nabla \dot{\chi}_v \\ \dot{\Phi}'_v = \dot{\Phi}_v + \dot{\chi}_v \end{array} \right. \quad (I-2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{A}}'_m = \dot{\mathbf{A}}_m - \nabla \dot{\chi}_m \\ \dot{\Phi}'_m = \dot{\Phi}_m + \dot{\chi}_m \end{array} \right. \quad (I-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{A}}'_v = \dot{\mathbf{A}}_v - \nabla \dot{\chi}_v \\ \dot{\Phi}'_v = \dot{\Phi}_v + \dot{\chi}_v \end{array} \right. \quad (I-4)$$

も, 又, 基礎方程式の解となり得る。 $\dot{\chi}_m$ と $\dot{\chi}_v$ は任意の独立な関数であるから, 境界において,

$$\dot{\Phi}'_m = \dot{\Phi}'_v \quad (I-5)$$

$$\dot{\mathbf{A}}'_{m\perp} = \dot{\mathbf{A}}'_{v\perp} \quad (I-6)$$

となる様に $\dot{\chi}_m, \dot{\chi}_v$ を決めてみる。すなわち, 境界では,

$$\dot{\chi}_m - \dot{\chi}_v = \dot{\Phi}_v - \dot{\Phi}_m \quad (I-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} (\dot{\chi}_m - \dot{\chi}_v) = \dot{\mathbf{A}}_{m\perp} - \dot{\mathbf{A}}_{v\perp} \quad (I-8)$$

の関係式が成り立つとする。今, 境界で,

$$\dot{\chi} = \dot{\chi}_m - \dot{\chi}_v \quad (I-9)$$

とおけば,

$$\dot{\chi} = \dot{\Phi}_v - \dot{\Phi}_m \quad (I-10)$$

$$\frac{\partial \dot{\chi}}{\partial n} = \dot{\mathbf{A}}_{m\perp} - \dot{\mathbf{A}}_{v\perp} \quad (I-11)$$

となる。境界面において, 式 (I-10) と式 (I-11) を満たす $\dot{\chi}$ は必ず存在する。従って, 式 (I-5), 式 (I-6) を満足する様に $\dot{\chi}_m, \dot{\chi}_v$ を選ぶことが可能である。

付録 II. 形状関数の積分

式(75)~式(78), 式(90)~式(94)の係数は形状関数の積分で表わされている。
ここでは, 形状関数の積分を, すべて, 表式にして与える。

まず, 式(103)を行列表示で記すと次の様になる。

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ r \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{II-1})$$

従って,

$$\begin{pmatrix} 1 \\ r \\ z \end{pmatrix} = \left((a_{ij})^* \right)^{-1} \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II-2})$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ r_1 & r_2 & r_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II-3})$$

となる。従って,

$$\sum_{i=1}^3 M_i = 1 \quad (\text{II-4})$$

$$r = \sum_{i=1}^3 r_i M_i \quad (\text{II-5})$$

$$z = \sum_{i=1}^3 z_i M_i \quad (\text{II-6})$$

となる。

形状関数の積分の中で $d\theta$ は容易に積分できる。従って $\int_{S^{(e)}} f(r, z) dr dz$ の型の積分のみが残る。この積分は次の様に行う。

(ℓ, m, n) を (1, 2, 3) の順列とする。式(II-4), 式(II-5), (II-6)より, (r, z) を (M_m, M_n) に座標変換する。

$$\int_S^{(e)} f(r, z) dr dz = \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial r}{\partial M_m} & \frac{\partial r}{\partial M_n} \\ \frac{\partial z}{\partial M_m} & \frac{\partial z}{\partial M_n} \end{array} \right| f(M_m, M_n)$$

$$\begin{aligned}
 &= |r_l(z_m - z_n) + r_m(z_n - z_l) + r_n(z_l - z_m)| \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n f(M_m, M_n) \\
 &= |\Delta| \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n f(M_m, M_n) \quad (\text{II-7})
 \end{aligned}$$

上式を用いれば形状関数の体積積分を容易に計算することができる。例として、次の二つの計算を行っておく。

$$S^{(e)} = \int_S^{(e)} r \, d r \, d z = |\Delta| \int_0^1 dM_1 \int_0^{1-M_1} dM_2 = \frac{1}{2} |\Delta| \quad (\text{II-8})$$

$$\begin{aligned}
 V^{(e)} &= \int_{V^{(e)}} r \, d r \, d \theta \, d z \\
 &= (\theta_2 - \theta_1) |\Delta| \int_0^1 dM_1 \int_0^{1-M_1} dM_2 (r_1 M_1 + r_2 M_2 + r_3 M_3) \quad (\text{II-9})
 \end{aligned}$$

式(II-4)を用いて、 M_3 を消去し、積分を実行する。

$$V^{(e)} = \frac{1}{6} (\theta_2 - \theta_1) |\Delta| (r_1 + r_2 + r_3) = (\theta_2 - \theta_1) \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} S^{(e)} \quad (\text{II-10})$$

$S^{(e)}$ は $r-z$ 平面の三角形の面積、 $V^{(e)}$ は有限要素の体積である。形状関数の積分の表式を与える前に、次の関数を与えておく。

$$\epsilon = \begin{cases} 1 & \Delta > 0 \text{ のとき} \\ -1 & \Delta < 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$$\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (> 0) \quad (\text{II-12})$$

$$A_{ij} = \Delta \cdot a_{ij} \quad (i=1 \sim 3, j=1, 3) \quad (\text{II-13})$$

$$\begin{aligned}
 F_0(r_1, r_2, r_3) &= \frac{1}{3\Delta} \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n (r_1 M_1 + r_2 M_2 + r_3 M_3) \\
 &= \frac{r_1 + r_2 + r_3}{18\Delta} \quad (\text{II-14})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_1^{(i)}(r_1, r_2, r_3) &= \frac{1}{3} \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n M_i (r_1 M_1 + r_2 M_2 + r_3 M_3) \\
 &= \frac{1}{72} (r_1 + r_2 + r_3 + r_i) \quad (i=1 \sim 3) \quad (\text{II-15})
 \end{aligned}$$

$$F_2^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) = \frac{1}{3} \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n M_i M_j (r_1 M_1 + r_2 M_2 + r_3 M_3)$$

$$(i=1\sim 3, j=1\sim 3)$$

$$= \frac{1}{360} \times \begin{cases} 2(r_1+r_2+r_3) + 4r_i, & i=j \text{ のとき} \\ 2(r_1+r_2+r_3) - r_k, & i \neq j \text{ のとき, } k=6-i-j \end{cases}$$

(II-16)

$$F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) = \Delta \int_0^1 dM_m \int_0^{1-M_m} dM_n \frac{M_i M_j}{r_1 M_1 + r_2 M_2 + r_3 M_3}$$

(II-17)

この積分はかなり複雑である。まず、 r_1, r_2, r_3 の中で零となるものがあれば（例えば r_i を零とする、非常に小さな値（例えば 1 cm）を持つ r_{min} に対し、

$$r_i = r_{min}$$

(II-18)

とおく。その後、この積分は次の二つの場合に分かれる。 i, j の取り得る値はともに 1, 2, 3 である。

(1) $r_1 \neq r_2, r_2 \neq r_3, r_3 \neq r_1$ の場合

$$F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) / \Delta = \begin{cases} \frac{1}{3(r_m - r_n)} \left[\frac{r_m^3}{(r_i - r_m)^3} \log\left(\frac{r_i}{r_m}\right) - \frac{r_n^3}{(r_i - r_n)^3} \log\left(\frac{r_i}{r_n}\right) \right. \\ \left. - \frac{3r_m^2 - r_i r_m}{2(r_i - r_m)^2} + \frac{3r_n^2 - r_i r_n}{2(r_i - r_n)^2} \right] & i=j \text{ の時, } m \neq i, n \neq i, m \neq n \\ \frac{1}{6(r_j - r_k)} - \frac{r_i - r_k}{3(r_j - r_k)^2} \left[\frac{r_j^3}{(r_i - r_j)^3} \log\left(\frac{r_i}{r_j}\right) - \frac{r_k^2}{(r_i - r_k)^2} \log\left(\frac{r_i}{r_k}\right) \right. \\ \left. - \frac{3r_j^2 - r_i r_j}{2(r_i - r_j)^2} + \frac{3r_k^2 - r_i r_k}{2(r_i - r_k)^2} \right] + \frac{r_k}{2(r_i - r_k)^2} \left[\frac{r_j^2}{(r_i - r_j)^2} \log\left(\frac{r_i}{r_j}\right) \right. \\ \left. - \frac{r_k^2}{(r_i - r_k)^2} \log\left(\frac{r_i}{r_k}\right) - \frac{r_j}{r_i - r_j} + \frac{r_k}{r_i - r_k} \right] & i \neq j \text{ の時, } k=6-i-j \end{cases}$$

(II-19)

(2) r_1, r_2, r_3 の中で、どれか二つが等しい場合

$i = j$ の場合

$$F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) / \Delta = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{3(r_0 - r_n)} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{r_n(3r_n - r_0)}{2(r_0 - r_n)^2} - \frac{r_n^3}{(r_0 - r_n)^3} \log\left(\frac{r_0}{r_n}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_i = r_m \text{ の時} \quad m \neq i, n = 6 - i - m \\ \\ \frac{1}{r_0 - r_i} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{r_i}{2(r_0 - r_i)} + \frac{r_0 r_i}{(r_0 - r_i)^2} + \frac{r_i r_0^2}{(r_0 - r_i)^3} \log\left(\frac{r_i}{r_0}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_m = r_n \text{ の時} \quad m \neq i, n \neq i, m \neq n \\ \\ \frac{1}{3(r_0 - r_m)} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{r_m(3r_m - r_0)}{2(r_0 - r_m)^2} - \frac{r_m^3}{(r_0 - r_m)^3} \log\left(\frac{r_0}{r_m}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_i = r_n \text{ の時} \quad n \neq i, m = 6 - i - n \end{array} \right. \quad (\text{II-20})$$

$i \neq j$ の場合

$$F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) / \Delta = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{6(r_0 - r_k)} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{r_k}{2(r_0 - r_k)} + \frac{r_k^2}{(r_0 - r_k)^2} - \frac{r_k^3}{(r_0 - r_k)^3} \log\left(\frac{r_0}{r_k}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_i = r_j \text{ の時} \quad k = 6 - i - j \\ \\ \frac{1}{2(r_0 - r_i)} \left\{ -\frac{1}{3} + \frac{r_0}{2(r_0 - r_i)} - \frac{r_0 r_i}{(r_0 - r_i)^2} + \frac{r_0 r_i^2}{(r_0 - r_i)^3} \log\left(\frac{r_0}{r_i}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_j = r_k \text{ の時} \quad k = 6 - i - j \\ \\ \frac{1}{2(r_0 - r_j)} \left\{ -\frac{1}{3} + \frac{r_0}{2(r_0 - r_j)} - \frac{r_0 r_j}{(r_0 - r_j)^2} + \frac{r_0 r_j^2}{(r_0 - r_j)^3} \log\left(\frac{r_0}{r_j}\right) \right\}, \\ \quad r_0 = r_i = r_k \text{ の時} \quad k = 6 - i - j \end{array} \right. \quad (\text{II-21})$$

以上の $A_{ij}, F_0(r_1, r_2, r_3), F_1^{(i)}(r_1, r_2, r_3), F_2^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3),$

$F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3)$ を用いて、形状関数の体積積分は次のようになる。

$$\int_{V^{(e)}} N_i dV = \frac{3}{2} \cdot \varepsilon \cdot \theta \cdot \Delta \cdot F_1^{(I_3)}(r_1, r_2, r_3), \quad i = 1 \sim 6 \quad (\text{II-22})$$

$i = 1 \sim 6, j = 1 \sim 6$ に対して,

$$\int_{V^{(e)}} N_i N_j dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot \Delta \cdot F_2^{(I_3, J_3)}(r_1, r_2, r_3) \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-23)

$$\int_{V^{(e)}} N_i \frac{\partial N_j}{\partial r} dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot A_{2J_3} \cdot F_1^{(I_3)}(r_1, r_2, r_3) \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-24)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{1}{r} N_i \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV = (-1)^{J_1} \cdot \frac{1}{24} \cdot \varepsilon \cdot \Delta \times \begin{cases} 1, & I_3 = J_3 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_3 \neq J_3 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-25)

$$\int_{V^{(e)}} N_i \frac{\partial N_j}{\partial z} dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot A_{3J_3} \cdot F_1^{(I_3)}(r_1, r_2, r_3) \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-26)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot A_{2I_3} \cdot A_{2J_3} \cdot F_0(r_1, r_2, r_3) \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-27)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV = (-1)^{I_1 + J_1} \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{\theta} \cdot F_3^{(I_3, J_3)}(r_1, r_2, r_3)$$

(II-28)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV = (-1)^{I_1} \cdot \frac{1}{12} \cdot \varepsilon \cdot A_{3J_3}$$

(II-29)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot A_{3I_3} \cdot A_{2J_3} \cdot F_0(r_1, r_2, r_3) \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-30)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial (rN_j)}{\partial r} dV = \varepsilon \cdot \theta \cdot \{ A_{2I_3} \cdot A_{2J_3} \cdot F_0(r_1, r_2, r_3) + \frac{1}{18} (A_{2I_3} + A_{2J_3}) + \frac{1}{3} F_3^{(I_3, J_3)}(r_1, r_2, r_3) \} \times \begin{cases} 1, & I_1 = J_1 \text{ の時} \\ \frac{1}{2}, & I_1 \neq J_1 \text{ の時} \end{cases}$$

(II-31)

$$\int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV = (-1)^{J_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \left\{ \frac{1}{6} A_{2I_3} + F_3^{(I_3, J_3)}(r_1, r_2, r_3) \right\}$$

(II-32)

以上の表式の中で、 I_1, I_2, I_3 (又は J_1, J_2, J_3) は、与えられた i (又は j) に対し、それぞれ式 (105), 式 (106), 式 (107) に従って計算された値をとるものとする。

次に、以上に与えた表式の性質について述べる。表式の左辺に i, j の添字のあるものは、すべて、3行3列あるいは6行6列の正方行列の型にあらわすことが可能である。この正方行列が対称行列となるものは次の通りである。

$$F_2^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3), F_3^{(i,j)}(r_1, r_2, r_3) \quad (3 \text{ 行 } 3 \text{ 列})$$

$$\int_{V^{(e)}} N_i N_j dV, \int_{V^{(e)}} \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV, \int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV, \int \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} dV$$

$$\int \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial (rN_j)}{\partial r} dV \quad (6 \text{ 行 } 6 \text{ 列})$$

形状関数の積分の表式については、 $i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 3$ とした時に得られる3行3列の小行列を (m) として、もとの6行6列の行列は次の4個の型の行列に分類できる。

$$\begin{pmatrix} (m) & -(m) \\ -(m) & (m) \end{pmatrix} \quad \text{型: } \int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV$$

$$\begin{pmatrix} (m) & -(m) \\ (m) & -(m) \end{pmatrix} \quad \text{型: } \int_{V^{(e)}} \frac{1}{r} N_i \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV, \int_{V^{(e)}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial (rN_i)}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} dV$$

$$\begin{pmatrix} (m) & (m) \\ -(m) & -(m) \end{pmatrix} \quad \text{型: } \int_{V^{(e)}} \frac{1}{r} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial z} dV$$

$$\begin{pmatrix} (m) & \frac{1}{2}(m) \\ \frac{1}{2}(m) & (m) \end{pmatrix} \quad \text{型: 上記を除くすべての体積積分}$$

形状関数の体積積分に関する以上の性質を利用することにより、実際の計算コード内における演算を簡略化することができる。

付録 III. 外部磁界 $H^{(e)}$, 外部ベクトル・ポテンシャル $A^{(e)}$ の表式

円筒座標系 r, θ, z の rz 平面における断面が矩形(巾 w , 高さ h)で, この矩形を θ_1 から θ_2 まで回転させたときに得られる立体に, 電流 $I^{(e)}$ が, 一定電流密度で, θ 方向に流れている場合を考える。この場合, 点 (r_p, θ_p, z_p) におけるベクトル・ポテンシャル $A^{(e)}$ (r_p, r_p, z_p) は次式で与えられる。断面中心がつくる円の直径を d としておく。

$$A_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \int_{\theta_1 - \theta_p}^{\theta_2 - \theta_p} d\theta \int_{\frac{d-w}{2}}^{\frac{d+w}{2}} dr_Q \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} dz_Q \frac{-r_Q \sin \theta}{\sqrt{r_Q^2 + r_p^2 - 2r_p r_Q \cos \theta + (z_Q - z_p)^2}} \quad (III-1)$$

$$A_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \int_{\theta_1 - \theta_p}^{\theta_2 - \theta_p} d\theta \int_{\frac{d-w}{2}}^{\frac{d+w}{2}} dr_Q \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} dz_Q \frac{r_Q \cos \theta}{\sqrt{r_Q^2 + r_p^2 - 2r_p r_Q \cos \theta + (z_Q - z_p)^2}} \quad (III-2)$$

$$A_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = 0 \quad (III-3)$$

外部磁界 $H^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ は $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ の関係式より導びかれる。

$$H_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)}{\partial z_p} \quad (III-4)$$

$$= \frac{1}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \int_{\theta_1 - \theta_p}^{\theta_2 - \theta_p} d\theta \int_{\frac{d-w}{2}}^{\frac{d+w}{2}} dr_Q \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} dz_Q \left\{ -\frac{\partial}{\partial z_p} \frac{r_Q \cos \theta}{\sqrt{r_Q^2 + r_p^2 - 2r_p r_Q \cos \theta + (z_Q - z_p)^2}} \right\} \quad (III-5)$$

上式の dr_Q, dz_Q の積分は実行可能で次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{d-w}{2} - r_p \cos \theta, & R_2 &= \frac{d+w}{2} - r_p \cos \theta \\ Z_1 &= -z_p - \frac{h}{2}, & Z_2 &= -z_p + \frac{h}{2} \\ \Phi_1 &= \theta_1 - \theta_p, & \Phi_2 &= \theta_2 - \theta_p \end{aligned} \right\} \quad (III-6)$$

$$H_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{1}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\theta \cos \theta$$

$$\times \left\{ \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} + r_p \cos \theta \log(R_i + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2}) \right\}$$

(III-8)

$H_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$, $H_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ も、同様に計算されて次の様になる。

$$H_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{1}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k-1} \frac{1}{2r_p}$$

$$\left[R_i \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \Phi_k + Z_j^2} + (r_p^2 \sin^2 \Phi_k + Z_j^2) \log(R_i + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \Phi_k + Z_j^2}) \right]$$

(III-9)

$$H_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{1}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\theta$$

$$\times \left\{ \left(\frac{r_p^2 \sin^2 \theta}{R_i} - r_p \cos \theta \right) \log(Z_j + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2}) \right.$$

$$+ Z_j \log(R_i + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2})$$

$$- \frac{r_p^2 \sin^2 \theta}{R_i} \log \left(\frac{Z_j + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta}}{Z_j - \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta}} \right)$$

$$\left. + 2r_p |\sin \theta| \tan^{-1} \left(\frac{r_p |\sin \theta|}{R_i + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta}} \frac{\sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta}}{Z_j} \right) \right\}$$

(III-10)

$A^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ の表式は、本報告の変形ベクトル・ポテンシャル法ではまったく必要としないが、附録Vに述べる改良されたベクトル・ポテンシャル法では必須となるので、参考のために、与えておくことにする。

$$A_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I^{(e)}}{wh} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j-1} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\theta \cos \theta$$

$$\times \left[\frac{1}{2} (R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta) + r_p R_i \cos \theta \right] \log(\sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - Z_j)$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j}{Z_j} r_p \cos \theta \log \left(\sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} + R_i \right) \\
& - \frac{Z_j}{2} \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} \\
& + \frac{r_p^3 \sin^2 \theta \cos \theta}{Z_j} \log \left(\frac{R_i + \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - \sqrt{r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2}}{R_i - \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} + \sqrt{r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2}} \right) \\
& + 2r_p |\sin \theta| \cos \theta \tan^{-1} \left(\frac{r_p |\sin \theta| \sqrt{R_i^2 + r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - \sqrt{r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2}}{\sqrt{r_p^2 \sin^2 \theta + Z_j^2} - Z_j} \cdot \frac{1}{R_i} \right)] \\
& \hspace{20em} (\text{III-11})
\end{aligned}$$

ただし，上式では，

$$Z_1 = z_p + \frac{h}{2}, \quad Z_2 = z_p - \frac{h}{2} \quad (\text{III-12})$$

とおいておく。

$A_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ の表式は，上式の $d\theta$ のすぐ後の $\cos \theta$ のみを $-\sin \theta$ に置き換えるだけで良いので省略する。

$H_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$, $H_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$, $A_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z)$, $A_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ の $\int d\theta$ の積分を行うことは不可能で，この部分は電子計算機による数値積分を行う。（導体表面の座標を r_p, θ_p, z_p に代入すると，以上のすべての表式は発散することに注意されたい）。

以上の表式の中で， $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 2\pi$ とすると， $H_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ と $A_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ は零となる。又， $H_r^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$, $H_z^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$, $A_\theta^{(e)}(r_p, \theta_p, z_p)$ は θ_p に依存しなくなる。

付録 IV. 変形ベクトル・ポテンシャル法の計算コード

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM
C          THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF EDDY CURRENT IN A LARGE TOKAMAK
C          PROGRAM CODE          ECT-1-A
C          MAIN PROGRAM
1      READ(5,10)      INPC1,INPC2
2          10 FORMAT(2I5)
3          WRITE(6,20)      INPC1,INPC2
4          20 FORMAT(1H0,35X,2(15,5X))
5          GO TO      (1000,2000,4000,6000,8000),INPC1
6      1000 READ(5,1010)  MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXSE,MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MSC
          1,INBC
7      1010 FORMAT(9I5)
          MAXMPE=MAXNPE+1
          MAXNRV=12*MAXSE
          MPE=4*MAXMPE
          MAXNCV=0
11     WRITE(6,1020)  MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXSE,MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MS
12     1C,INBC
13     1020 FORMAT(1H0,17X,9(15,5X))
14     CALL      FEM(MAXSMP,MAXCUR,MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXMPE,MSC,INBC,MA
          1XNCV)
15     WRITE(6,1030)  MAXMPE,MAXNRV,MPE,MAXNCV
16     1030 FORMAT(1H0,42X,4(15,5X))
17     IF(INPC2.GT.1) GO TO 3000
C      OUTPUT TO MAGNETIC TAPE
18     GO TO 10000
19     2000 CONTINUE
20     3000 CALL      ATM(MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MAXNSE,MAXNPE,MPE,MAXNCV,MAXNRV,
          1MAXMSE,MAXMPE)
21     IF(INPC2.GT.2) GO TO 5000
C      OUTPUT TO MAGNETIC TAPE
22     GO TO 10000
23     4000 CONTINUE
24     5000 CALL      CTM
25     IF(INPC2.GT.3) GO TO 7000
C      OUTPUT TO MAGNETIC TAPE
26     GO TO 10000
27     6000 CONTINUE
28     7000 CALL      EMC(MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXMPE,MAXNCV,MAXNRV,MPE)
29     IF(INPC2.GT.4) GO TO 9000
C      OUTPUT TO MAGNETIC TAPE
30     GO TO 10000
31     8000 CONTINUE
32     9000 WRITE(6,9010)
33     9010 FORMAT(1H,17H SUBROUTINE PLOT)
34     10000 STOP
35     END

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|---|
| 1 | C | SUBROUTINE FEM |
| | C | SUBROUTINE FEM(MAXSMP,MAXCUR,MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXMPE,MSC,I |
| | C | INBC,MAXNCV) |
| | C | DIMENSION R(MAXMSE),RP(3),Z(MAXMSE),ZP(3),INSMP(MAXNSE,MAXNPE) |
| | C | 1,INSMPO(MAXNPE),INR(MAXNSE,MAXNPE),INRO(MAXNPE),INRP(MAXNSE),MSEO(|
| | C | 13),RISF(6,6,11),RISFF(MAXNPE,6,6,11),MSESC(MAXCUR),WCS(MAXCUR),HCS |
| | C | 1(MAXCUR),NSESC(MAXCUR,MSC),RSC(MAXCUR),ZSC(MAXCUR),NASE(MAXSE,3),N |
| | C | 1SEF(MAXMSE),INCC(MAXMSE),INCCO(3),CUPVO(3),IFDO(3,MAXMPE,4),A2(3), |
| | C | 1A3(3),SH(3,2,MAXCUR),SHO(3,2),NSECS(2),MSECS(2),UNR(2),UNZ(2),MPER |
| | C | 1(MAXNPE) |
| 2 | C | DIMENSION R(130),RP(3),Z(130),ZP(3),INSMP(234, 2) |
| | C | 1,INSMPO(2),INR(234, 2),INRO(2),INRP(234),MSEO(|
| | C | 13),RISF(6,6,11),RISFP(2,6,6,11),MSESC(1),WCS(1),HCS |
| | C | 1(1),NSESC(1, 48),RSC(1),ZSC(1),NASE(234,3 |
| | C | 1),NSEF(130),INCC(130),INCCO(3),CUPVO(3),IFDO(3, 3,4),A2(3 |
| | C | 1),A3(3),SH(3,2, 1),SHO(3,2),NSECS(2),MSECS(2),UNR(2),UNZ(2),MP |
| | C | 1ER(3) |
| | C | DIMENSION RG(MAXNSE),ZG(MAXNSE),THETA(MAXNPE),CUPV(MAXMSE),MSE(MA |
| | C | 1XNSE,3),AR(MAXNSE,3),AZ(MAXNSE,3),IFD(MAXMSE,MAXMPE,4),MSER(MAXMSE |
| | C | 1) |
| 3 | C | DIMENSION RG(234),ZG(234),THETA(2),CUPV(130),MSE |
| | C | 1(234,3),AR(234,3),AZ(234,3),IFD(130, 3,4),MSER(|
| | C | 1234) |
| 4 | | REWIND 10 |
| 5 | | REWIND 20 |
| 6 | 8 | RAD=0.0174532925 |
| 7 | | READ(5,9) RMIN |
| 8 | 9 | FORMAT(F10.5) |
| 9 | | READ(5,10) (MSER(I),R(I),Z(I),I=1,MAXMSE) |
| 10 | 10 | FORMAT(I4,2F8.4,I4,2F8.4,I4,2F8.4,I4,2F8.4) |
| 11 | | WRITE(6,20) (MSER(I),R(I),Z(I),I=1,MAXMSE) |
| 12 | 20 | FORMAT(1H ,/, (11X,4(I4,2X,F8.4,1X,F8.4,5X),/)) |
| 13 | | READ(5,30) (MPER(I),THETA(I),I=1,MAXNPE) |
| 14 | 30 | FORMAT(I5,F8.3,18,F8.3,18,F8.3,18,F8.3,18,F8.3) |
| 15 | | WRITE(6,40) (MPER(I),THETA(I),I=1,MAXNPE) |
| 16 | 40 | FORMAT(1H ,/, (3X,2(I4,2X,F8.3,4X))) |
| 17 | | DO 50 I=1,MAXNPE |
| 18 | 50 | THETA(I)=RAD*THETA(I) |
| 19 | | READ(5,60) (MSER(I),(MSE(I,J),J=1,3),I=1,MAXNSE) |
| 20 | 60 | FORMAT(20I4) |
| 21 | | WRITE(6,70) (MSER(I),(MSE(I,J),J=1,3),I=1,MAXNSE) |
| 22 | 70 | FORMAT(1H ,/, (7X,5(I4,2X,I4,1X,I4,1X,I4,4X),/)) |
| 23 | | DO 90 I=1,MAXNSE |
| 24 | | IF(MSE(I,1).LT.MSE(I,2).AND.MSE(I,2).LT.MSE(I,3)) GO TO 90 |
| 25 | | WRITE(6,80) I |
| 26 | 80 | FORMAT(1H0,9X,64HERROR *** MSE(I,1),GE,MSE(I,2) OR MSE(I,2),GE,MSE |
| | | 1(I,3) AT NSE=,I4,4H ***) |
| 27 | | STOP |
| 28 | 90 | CONTINUE |
| 29 | | IF(MAXSMP.NE.1) GO TO 110 |
| 30 | | DO 100 I=1,MAXNPE |
| 31 | 100 | INSMPO(I)=1 |
| 32 | | GO TO 140 |
| 33 | 110 | READ(5,120) (MSER(I),(INSMP(I,J),J=1,MAXNPE),I=1,MAXNSE) |
| 34 | 120 | FORMAT(18I4) |
| 35 | | WRITE(6,130) (MSER(I),(INSMP(I,J),J=1,MAXNPE),I=1,MAXNSE) |
| 36 | 130 | FORMAT(1H ,/, (10X,6(I4,2X,I4,1X,I4,1X,3X),/)) |

3.

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN   ST-NO      SOURCE PROGRAM      ( FEM      )
37    140 READ(5,150)      (MSER(I),(INR(I,J),J=1,MAXNPE),I=1,MAXNSE)
38    150 FORMAT(18I4)
39    WRITE(6,160)        (MSER(I),(INR(I,J),J=1,MAXNPE),I=1,MAXNSE)
40    160 FORMAT(1H ,/, (10X,6(I4,2X,14,1X,14,1X,3X),/))
41    DO 170 I=1,MAXNSE
42    INRP(I)=0
43    DO 170 J=1,MAXNPE
44    170 INRP(I)=INRP(I)+INR(I,J)
45    READ(5,180)          (MSESC(I),WCS(I),HCS(I),(NSESC(I,J),J=1,MSC),I=1,MAXCUR)
46    180 FORMAT(14,2F8.5,3(/,16I5))
47    WRITE(6,190)        (MSESC(I),WCS(I),HCS(I),(NSESC(I,J),J=1,MSC),I=1,MAXCUR)
48    190 FORMAT(1H ,29X,14,2X,F8.5,2X,F8.5,3(/,2X,16(I5,3X)))
49    DO 230 I=1,MAXCUR
50    I1=MSESC(I)
51    RSC(I)=R(I1)
52    ZSC(I)=Z(I1)
53    J2=0
54    DO 200 J=1,MSC
55    IF(NSESC(I,J).EQ.0) GO TO 200
56    J2=J2+1
57    200 CONTINUE
58    IF(J2.EQ.0) GO TO 230
59    DO 220 J=1,J2
60    J3=NSESC(I,J)
61    DO 220 K=1,MAXNPE
62    IF(INR(J3,K).NE.0) GO TO 220
63    WRITE(6,210) I,J,J3,K
64    210 FORMAT(1H0,9X,33HERROR *** INR(I,J)=0 AT I,J,J3,K=4(14,2X),3H***)
65    220 CONTINUE
66    230 CONTINUE
67    DO 240 I=1,MAXNSE
68    DO 240 J=1,3
69    240 NASE(I,J)=0
70    DO 340 I=1,MAXNSE
71    DO 340 J=1,MAXNSE
72    IF(I.LE.J) GO TO 340
73    IF(MSE(I,2).GT.MSE(J,3)) GO TO 340
74    IF(MSE(I,2).LT.MSE(J,3)) GO TO 260
75    IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,2)) GO TO 250
76    NASE(I,3)=J
77    NASE(J,1)=I
78    GO TO 340
79    250 IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,1)) GO TO 340
80    NASE(I,3)=J
81    NASE(J,2)=I
82    GO TO 340
83    260 IF(MSE(I,2).LE.MSE(J,2)) GO TO 280
84    IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,3)) GO TO 340
85    IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,2)) GO TO 270
86    NASE(I,2)=J
87    NASE(J,1)=I
88    GO TO 340
89    270 IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,1)) GO TO 340
90    NASE(I,2)=J
91    NASE(J,2)=I

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|---|-------------|
| 92 | | GO TO 340 | |
| 93 | 280 | IF(MSE(I,2).LT.MSE(J,2)) | GO TO 300 |
| 94 | | IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,3)) | GO TO 290 |
| 95 | | NASE(I,1)=J | |
| 96 | | NASE(J,1)=I | |
| 97 | | GO TO 340 | |
| 98 | 290 | IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,1)) | GO TO 340 |
| 99 | | NASE(I,3)=J | |
| 100 | | NASE(J,3)=I | |
| 101 | | GO TO 340 | |
| 102 | 300 | IF(MSE(I,2).LE.MSE(J,1)) | GO TO 320 |
| 103 | | IF(MSE(I,1).NE.MSE(J,1)) | GO TO 340 |
| 104 | | IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,2)) | GO TO 310 |
| 105 | | NASE(I,2)=J | |
| 106 | | NASE(J,3)=I | |
| 107 | | GO TO 340 | |
| 108 | 310 | IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,3)) | GO TO 340 |
| 109 | | NASE(I,2)=J | |
| 110 | | NASE(J,2)=I | |
| 111 | | GO TO 340 | |
| 112 | 320 | IF(MSE(I,2).LT.MSE(J,1)) | GO TO 340 |
| 113 | | IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,2)) | GO TO 330 |
| 114 | | NASE(I,1)=J | |
| 115 | | NASE(J,3)=I | |
| 116 | | GO TO 340 | |
| 117 | 330 | IF(MSE(I,3).NE.MSE(J,3)) | GO TO 340 |
| 118 | | NASE(I,1)=J | |
| 119 | | NASE(J,2)=I | |
| 120 | 340 | CONTINUE | |
| 121 | | DO 420 I=1,MAXNSE | |
| 122 | | DO 420 J=1,3 | |
| 123 | | IF(NASE(I,J).NE.0) | GO TO 420 |
| 124 | | J1=J+1 | |
| 125 | | IF(J1.LE.3) | GO TO 350 |
| 126 | | J1=1 | |
| 127 | 350 | J2=J1+1 | |
| 128 | | IF(J2.LE.3) | GO TO 360 |
| 129 | | J2=1 | |
| 130 | 360 | J1=MSE(I,J1) | |
| 131 | | J2=MSE(I,J2) | |
| 132 | | IF(R(J1)) | 390,370,390 |
| 133 | 370 | IF(R(J2)) | 390,380,390 |
| 134 | 380 | NASE(I,J)=-1 | |
| 135 | 390 | IF(INBC.EQ.0) | GO TO 420 |
| 136 | | IF(Z(J1)) | 420,400,420 |
| 137 | 400 | IF(Z(J2)) | 420,410,420 |
| 138 | 410 | NASE(I,J)=-2 | |
| 139 | 420 | CONTINUE | |
| 140 | | WRITE(6,430) (MSE(I),(NASE(I,J),J=1,3),I=1,MAXNSE) | |
| 141 | 430 | FORMAT(1H ,/, (7X,5(14,2X,14,1X,14,1X,14,1X,3X),/)) | |
| 142 | | DO 440 I=1,MAXMSE | |
| 143 | 440 | NSEF(I)=0 | |
| 144 | | DO 460 I=1,MAXNSE | |
| 145 | | DO 460 J=1,3 | |
| 146 | | K=MSE(I,J) | |
| 147 | | L=NSEF(K) | |
| 148 | | IF(L.EQ.0) | GO TO 450 |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|---|-----------|
| 149 | | IF(INRP(L),NE,0) | GO TO 460 |
| 150 | | IF(INRP(I),EQ,0) | GO TO 460 |
| 151 | 450 | NSEF(K)=1 | |
| 152 | 460 | CONTINUE | |
| 153 | | WRITE(6,470) (MSER(I),NSEF(I),I=1,MAXMSE) | |
| 154 | 470 | FORMAT(1H ,/, (4X,9(14,2X,14,4X),/)) | |
| 155 | | DO 480 I=1,3 | |
| 156 | | DO 480 J=1,MAXMPE | |
| 157 | | DO 480 K=1,4 | |
| 158 | 480 | IFD0(I,J,K)=0 | |
| 159 | | DO 490 I=1,MAXMSE | |
| 160 | | INCC(I)=0 | |
| 161 | | CUPV(I)=0. | |
| 162 | | DO 490 J=1,MAXMPE | |
| 163 | | IFD(I,J,1)=1 | |
| 164 | | DO 490 K=2,4 | |
| 165 | 490 | IFD(I,J,K)=0 | |
| 166 | | DO 1110 I=1,MAXNSE | |
| 167 | | IF(MAXSMP,EQ,1) | GO TO 510 |
| 168 | | DO 500 J=1,MAXNPE | |
| 169 | 500 | INSMP0(J)=INSMP(I,J) | |
| 170 | 510 | DO 520 J=1,MAXNPE | |
| 171 | 520 | INR0(J)=INR(I,J) | |
| 172 | | DO 530 J=1,3 | |
| 173 | | DO 530 K=1,2 | |
| 174 | | DO 530 L=1,MAXCUR | |
| 175 | | SH(J,K,L)=0. | |
| 176 | 530 | CONTINUE | |
| 177 | | DO 540 J=1,3 | |
| 178 | | CUPV0(J)=0. | |
| 179 | | INCC0(J)=C | |
| 180 | | J1=MSE(I,J) | |
| 181 | | MSE0(J)=J1 | |
| 182 | | RP(J)=R(J1) | |
| 183 | 540 | ZP(J)=Z(J1) | |
| 184 | | INRPO=INRP(I) | |
| 185 | | IF(INRPO,EQ,0) | GO TO 720 |
| 186 | | DO 580 J=1,MAXCUR | |
| 187 | | RSCO=RSC(J) | |
| 188 | | ZSCO=ZSC(J) | |
| 189 | | WCSO=WCS(J) | |
| 190 | | HCSO=HCS(J) | |
| 191 | | J1=0 | |
| 192 | | DO 560 K=1,MSC | |
| 193 | | IF(I,NE,NSESC(J,K)) | GO TO 560 |
| 194 | | CALL MFD1(RSCO,ZSCO,WCSO,HCSO,RP,ZP,SH0) | |
| 195 | | DO 550 L=1,3 | |
| 196 | | DO 550 M=1,2 | |
| 197 | | SH(L,M,J)=SH0(L,M) | |
| 198 | 550 | CONTINUE | |
| 199 | | J1=J1+1 | |
| 200 | 560 | CONTINUE | |
| 201 | | IF(J1,NE,0) | GO TO 580 |
| 202 | | CALL MFD2(RSCO,ZSCO,RP,ZP,SH0) | |
| 203 | | DO 570 L=1,3 | |
| 204 | | DO 570 M=1,2 | |
| 205 | | SH(L,M,J)=SH0(L,M) | |

6

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|--------------------------------------|---------|
| 206 | 570 | CONTINUE | |
| 207 | 580 | CONTINUE | |
| 208 | | DO 715 J=1,3 | |
| 209 | | MSEP=MSE(I,J) | |
| 210 | | IF(NSEF(MSEP),EQ,I) GO TO 585 | |
| 211 | | CUPV(J)=CUPV(MSEP) | |
| 212 | | INCC(J)=INCC(MSEP) | |
| 213 | | GO TO 715 | |
| 214 | 585 | K0=0 | |
| 215 | | DO 650 K=1,3 | |
| 216 | | IF(K,EQ,J) GO TO 650 | |
| 217 | | K1=K | |
| 218 | | I1=I | |
| 219 | 590 | I2=NASE(I1,K1) | |
| 220 | | IF(I2,EQ,I) GO TO 650 | |
| 221 | | IF(I2) 650,650,600 | |
| 222 | 600 | IF(INRP(I2),EQ,0) GO TO 620 | |
| 223 | | DO 610 L=1,3 | |
| 224 | | IF(NASE(I2,L),EQ,I1) GO TO 610 | |
| 225 | | IF(MSE(I2,L),EQ,MSEP) GO TO 610 | |
| 226 | | K1=L | |
| 227 | 610 | CONTINUE | |
| 228 | | I1=I2 | |
| 229 | | GO TO 590 | |
| 230 | 620 | K0=K0+1 | |
| 231 | | NSECS(K0)=I1 | |
| 232 | 630 | K1=K1+1 | |
| 233 | | IF(K1,LE,3) GO TO 640 | |
| 234 | | K1=1 | |
| 235 | 640 | IF(MSE(I1,K1),EQ,MSEP) GO TO 630 | |
| 236 | | MSECS(K0)=MSE(I1,K1) | |
| 237 | 650 | CONTINUE | |
| 238 | | IF(K0-1) 715,700,660 | |
| 239 | 660 | DO 670 K=1,2 | |
| 240 | | I1=MSECS(K) | |
| 241 | | DR=R(I1)-R(MSEP) | |
| 242 | | DZ=Z(I1)-Z(MSEP) | |
| 243 | | D=SQRT(DR*DR+DZ*DZ) | |
| 244 | | UNR(K)=DR/D | |
| 245 | | UNZ(K)=DZ/D | |
| 246 | 670 | CONTINUE | |
| 247 | | UNRO=UNR(1)-UNR(2) | |
| 248 | | UNZO=UNZ(1)-UNZ(2) | |
| 249 | | D=SQRT(UNRO*UNRO+UNZO*UNZO) | |
| 250 | | UNRO=UNRO/D | |
| 251 | | UNZO=UNZO/D | |
| 252 | | IF(NSECS(1),GT,NSECS(2)) GO TO 680 | |
| 253 | | UNRO=-UNRO | |
| 254 | | UNZO=-UNZO | |
| 255 | 680 | IF(ABS(UNRO),GT,ABS(UNZO)) GO TO 690 | |
| 256 | | INCC(J)=2 | |
| 257 | | CUPV(J)=UNRO/UNZO | |
| 258 | | IF(ABS(CUPV(J)),LE,0.999) GO TO 710 | |
| 259 | | INCC(J)=-2 | |
| 260 | | GO TO 710 | |
| 261 | 690 | INCC(J)=4 | |
| 262 | | CUPV(J)=UNZO/UNRO | |

7

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|---|-----------|
| 263 | | IF (ABS(CUPVO(J)),LE.0.999) | GO TO 710 |
| 264 | | INCCO(J)=-4 | |
| 265 | | GO TO 710 | |
| 266 | 700 | INCCO(J)=-1 | |
| 267 | 710 | INCC(MSEP)=INCCO(J) | |
| 268 | | CUPV(MSEP)=CUPVO(J) | |
| 269 | 715 | CONTINUE | |
| 270 | 720 | CALL ISF(RP,ZP,INRPO,RMIN,RGO,ZGO,A2,A3,RISF) | |
| 271 | | RG(I)=RGO | |
| 272 | | ZG(I)=ZGO | |
| 273 | | DO 725 J=1,3 | |
| 274 | | AR(I,J)=A2(J) | |
| 275 | | AZ(I,J)=A3(J) | |
| 276 | 725 | CONTINUE | |
| 277 | | DO 1090 J=1,MAXNPE | |
| 278 | | IF(INR(I,J),NE.0) GO TO 740 | |
| 279 | | DO 730 K=1,6 | |
| 280 | | DO 730 L=1,6 | |
| 281 | | RISFP(J,K,L,1)=RISF(K,L,1)/THETA(J) | |
| 282 | | RISFP(J,K,L,2)=RISF(K,L,2)*THETA(J) | |
| 283 | | RISFP(J,K,L,3)=RISF(K,L,3)*THETA(J) | |
| 284 | | DO 730 M=4,11 | |
| 285 | | RISFP(J,K,L,M)=0. | |
| 286 | 730 | CONTINUE | |
| 287 | | GO TO 780 | |
| 288 | 740 | DO 770 K=1,6 | |
| 289 | | DO 770 L=1,6 | |
| 290 | | RISFP(J,K,L,1)=RISF(K,L,1)/THETA(J) | |
| 291 | | DO 750 M=2,8 | |
| 292 | 750 | RISFP(J,K,L,M)=RISF(K,L,M)*THETA(J) | |
| 293 | | DO 760 M=9,11 | |
| 294 | | RISFP(J,K,L,M)=RISF(K,L,M) | |
| 295 | 760 | CONTINUE | |
| 296 | 770 | CONTINUE | |
| 297 | 780 | DO 1080 K=1,3 | |
| 298 | | I0=MSE(I,K) | |
| 299 | | IF(NSEF(I0),NE.1) GO TO 1080 | |
| 300 | | IF(R(I0)) 1080,790,880 | |
| 301 | 790 | IF(INR(I,J),EQ.0) GO TO 880 | |
| 302 | | IF(INBC,EQ.0) GO TO 840 | |
| 303 | | IF(Z(I0)) 840,800,840 | |
| 304 | 800 | IFD(I0,J,1)=0 | |
| 305 | | IFD(I0,J+1,1)=0 | |
| 306 | | K1=K | |
| 307 | 810 | K1=K1+1 | |
| 308 | | IF(K1,EQ.K) GO TO 840 | |
| 309 | | IF(K1,LE.3) GO TO 820 | |
| 310 | | K1=1 | |
| 311 | 820 | I1=NASE(I,K1) | |
| 312 | | IF(I1,EQ.-1) GO TO 830 | |
| 313 | | GO TO 810 | |
| 314 | 830 | K1=6-K-K1 | |
| 315 | | I1=NASE(I,K1) | |
| 316 | | IF(I1,LE.0) GO TO 840 | |
| 317 | | IF(INR(I1,J),EQ.0) GO TO 880 | |
| 318 | 840 | IF(J,EQ.1) GO TO 850 | |
| 319 | | IF(INR(I,J-1),EQ.0) GO TO 860 | |

FACOM 230-75 M7 FORTKAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|--|---------|
| 320 | 850 | IFD(I0,J,4)=1 | |
| 321 | 860 | IF(J,NE,MAXNPE) GO TO 870 | |
| 322 | | IF(INR(I,J+1),EQ,0) GO TO 880 | |
| 323 | 870 | IFD(I0,J+1,4)=1 | |
| 324 | | GO TO 1080 | |
| 325 | 880 | IF(INBC,EQ,0) GO TO 940 | |
| 326 | | IF(Z(I0)) 1080,900,940 | |
| 327 | 900 | IFD(I0,J,1)=0 | |
| 328 | | IFD(I0,J+1,1)=0 | |
| 329 | | IF(INR(I,J),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 330 | | IF(INCCO(K),NE,0) GO TO 1080 | |
| 331 | | IF(J,EQ,1) GO TO 910 | |
| 332 | | IF(INR(I,J-1),EQ,0) GO TO 920 | |
| 333 | 910 | IFD(I0,J,4)=1 | |
| 334 | 920 | IF(J,EQ,MAXNPE) GO TO 930 | |
| 335 | | IF(INR(I,J+1),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 336 | 930 | IFD(I0,J+1,4)=1 | |
| 337 | | GO TO 1080 | |
| 338 | 940 | IF(INR(I,J),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 339 | | IF(INCCO(K),NE,0) GO TO 1000 | |
| 340 | | IF(J,NE,1) GO TO 950 | |
| 341 | | IFD(I0,J,2)=1 | |
| 342 | | IFD(I0,J,4)=1 | |
| 343 | | GO TO 970 | |
| 344 | 950 | IF(INR(I,J-1),EQ,0) GO TO 970 | |
| 345 | | DO 960 L=2,4 | |
| 346 | 960 | IFD(I0,J,L)=1 | |
| 347 | 970 | IF(J,NE,MAXNPE) GO TO 980 | |
| 348 | | IFD(I0,J+1,2)=1 | |
| 349 | | IFD(I0,J+1,4)=1 | |
| 350 | | GO TO 1080 | |
| 351 | 980 | IF(INR(I,J+1),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 352 | | DO 990 L=2,4 | |
| 353 | 990 | IFD(I0,J+1,L)=1 | |
| 354 | | GO TO 1080 | |
| 355 | 1000 | IF(INCCO(K),NE,2) GO TO 1040 | |
| 356 | | IF(J,EQ,1) GO TO 1010 | |
| 357 | | IF(INR(I,J-1),EQ,0) GO TO 1020 | |
| 358 | 1010 | IFD(I0,J,2)=1 | |
| 359 | | IFD(I0,J,4)=-1 | |
| 360 | 1020 | IF(J,EQ,MAXNPE) GO TO 1030 | |
| 361 | | IF(INR(I,J+1),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 362 | 1030 | IFD(I0,J+1,2)=1 | |
| 363 | | IFD(I0,J+1,4)=-1 | |
| 364 | | GO TO 1080 | |
| 365 | 1040 | IF(INCCO(K),NE,4) GO TO 1080 | |
| 366 | | IF(J,EQ,1) GO TO 1050 | |
| 367 | | IF(INR(I,J-1),EQ,0) GO TO 1060 | |
| 368 | 1050 | IFD(I0,J,2)=-1 | |
| 369 | | IFD(I0,J,4)=1 | |
| 370 | 1060 | IF(J,EQ,MAXNPE) GO TO 1070 | |
| 371 | | IF(INR(I,J+1),EQ,0) GO TO 1080 | |
| 372 | 1070 | IFD(I0,J+1,2)=-1 | |
| 373 | | IFD(I0,J+1,4)=1 | |
| 374 | 1080 | CONTINUE | |
| 375 | 1090 | CONTINUE | |
| 376 | | WRITE(I0) MSE0,CUPV0,SH,INRP0,INSMPO,INR0,IFD0,RISFP | |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (FEM) |
|-----|-------|--|---------|
| 377 | 1110 | CONTINUE | |
| 378 | | NCV=1 | |
| 379 | | DO 1120 I=1,MAXMSE | |
| 380 | | DO 1120 J=1,MAXMPE | |
| 381 | | DO 1120 K=1,4 | |
| 382 | | IF(IFD(I,J,K).LE.0) GO TO 1120 | |
| 383 | | IFD(I,J,K)=NCV | |
| 384 | | NCV=NCV+1 | |
| 385 | 1120 | CONTINUE | |
| 386 | | MAXNCV=NCV-1 | |
| 387 | | REWIND 10 | |
| 388 | | DO 1140 I=1,MAXNSE | |
| 389 | | READ(10) MSE0,CUPV0,SH,INRPO,INSMP0,INR0,IFD0,RISFP | |
| 390 | | BACKSPACE 10 | |
| 391 | | DO 1130 J=1,3 | |
| 392 | | M=MSE0(J) | |
| 393 | | DO 1130 K=1,MAXMPE | |
| 394 | | DO 1130 L=1,4 | |
| 395 | 1130 | IFD0(J,K,L)=IFD(M,K,L) | |
| 396 | | WRITE(10) MSE0,CUPV0,SH,INRPO,INSMP0,INR0,IFD0,RISFP | |
| 397 | 1140 | CONTINUE | |
| 398 | | WRITE(6,1150) (MSER(I),((IFD(I,J,K),K=1,4),J=1,MAXMPE),I=1,MAXMSE) | |
| 399 | 1150 | FORMAT(1H ,/, (4X,14,2X,12(15,1X),/)) | |
| 400 | | WRITE(6,1160) MAXNCV | |
| 401 | 1160 | FORMAT(1H ,9X,7HMAXNCV=,14) | |
| 402 | | WRITE(20) RG,ZG,THETA,AR,AZ,CUPV,MSE,IFD,INR | |
| 403 | | RETURN | |
| 404 | | END | |

10

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|---|
| | C | SUBROUTINE MFD1 |
| 1 | | SUBROUTINE MFD1(RSC,ZSC,W,H,RP,ZP,SH) |
| | C | MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF A CYLLINDRICAL COIL |
| | C | WITH RECTANGULAR CROSS SECTION |
| 2 | | DIMENSION R(2), RO(2),Z(2),RP(3),ZP(3),SH(3,2) |
| 3 | | DOUBLE PRECISION RDBL0,TDBL,STDBL,RSTDBL,ROBL,PDBL |
| 4 | | PI=3.14159265 |
| 5 | | H2=H/2. |
| 6 | | W2=W/2. |
| 7 | | RO(1)=RSC-W2 |
| 8 | | RO(2)=RSC+W2 |
| 9 | | CONST=1./W/H/PI/2. |
| 10 | | DT=PI/3000. |
| 11 | | DT2=DT/2. |
| 12 | | DO 110 K=1,3 |
| 13 | | RADIAL=RP(K) |
| 14 | | ZETA=ZP(K)-ZSC |
| 15 | | IF(RADIAL-RO(1)) 20,10,20 |
| 16 | 10 | RADIAL=RADIAL+0.001 |
| 17 | 20 | IF(RADIAL-RO(2)) 40,30,40 |
| 18 | 30 | RADIAL=RADIAL-0.001 |
| 19 | 40 | IF(ZETA-H2) 60,50,60 |
| 20 | 50 | ZETA=ZETA-0.001 |
| 21 | 60 | IF(ZETA+H2) 80,70,80 |
| 22 | 70 | ZETA=ZETA+0.001 |
| 23 | 80 | Z(1)=-ZETA-H2 |
| 24 | | Z(2)=-ZETA+H2 |
| 25 | | RDBL0=DBLE(RADIAL) |
| 26 | | HR=0. |
| 27 | | HZ=0. |
| 28 | | T=DT2 |
| 29 | 90 | CT=COS(T) |
| 30 | | ST=SIN(T) |
| 31 | | TDBL=DBLE(T) |
| 32 | | STDBL=DSIN(TDBL) |
| 33 | | RSTDBL=RDBL0*STDBL |
| 34 | | RSTDBL=RSTDBL*RSTDBL |
| 35 | | RST=RADIAL*ST |
| 36 | | RCT=RADIAL*CT |
| 37 | | SRST=RST*RST |
| 38 | | ARST=RADIAL*ABS(ST) |
| 39 | | DO 100 I=1,2 |
| 40 | | R(I)=RO(I)-RCT |
| 41 | | KDBL=DBLE(R(I)) |
| 42 | | PDBL=RDBL+DSQRT(RDBL*KDBL+RSTDBL) |
| 43 | | P=SNGL(PDBL) |
| 44 | | A=R(I)*R(I)+SRST |
| 45 | | DO 100 J=1,2 |
| 46 | | SIG=(-1.)**(I+J-2) |
| 47 | | SZ=Z(J)*Z(J) |
| 48 | | B=SQRT(A+SZ) |
| 49 | | C=SQRT(A) |
| 50 | | E=ALOG(R(I)+B) |
| 51 | | F=ALOG(Z(J)+B) |
| 52 | | G=ALOG((Z(J)+B-C)/(Z(J)-B+C)) |
| 53 | | O=ATAN(ARST*(B-C)/Z(J)/P) |
| 54 | | HR=HR+SIG*(B+RCT*E)*CT |

11.

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM (MFD1) |
|-----|-------|---|
| 55 | | HZ=HZ+SIG*((A/R(1)-RO(1))*F+Z(J)*E-SRST*G/R(1)+2.*ARST*G) |
| 56 | 100 | CONTINUE |
| 57 | | T=T+DT |
| 58 | | IF(T.LE.PI) GO TO 90 |
| 59 | | SH(K,1)=CONST*HR*DT |
| 60 | | SH(K,2)=CONST*HZ*DT |
| 61 | 110 | CONTINUE |
| 62 | | RETURN |
| 63 | | END |

12.

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE MFD2 |
| 1 | | SUBROUTINE MFD2(RSC0,ZSC0,RP,ZP,SH0) |
| | C | MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF A CIRCULAR LOOP |
| 2 | | DIMENSION RP(3),ZP(3),SH0(3,2) |
| 3 | | P12=0.283185308 |
| 4 | | P=0. |
| 5 | | Q=0. |
| 6 | | DO 20 I=1,3 |
| 7 | | Z=ZP(I)-ZSC0 |
| 8 | | Z2=Z*Z |
| 9 | | IF(RP(I).EQ.0.) GO TO 10 |
| 10 | | AP=RSC0+RP(I) |
| 11 | | AM=RSC0-RP(I) |
| 12 | | AP2=AP*AP |
| 13 | | AM2=AM*AM |
| 14 | | BP=AP2+Z2 |
| 15 | | BM=AM2+Z2 |
| 16 | | SBP=SQRT(BP) |
| 17 | | C=2.*RSC0*RP(I) |
| 18 | | D=SQRT(2.*C/BP) |
| 19 | | CALL CELI1S(D,P) |
| 20 | | CALL CELI2S(D,Q) |
| 21 | | SH0(I,1)=Z*(-P+Q*(AP2-C+Z2)/BM)/SBP/RP(I)/P12 |
| 22 | | SH0(I,2)=(P+Q*(AP*AM-Z2)/BM)/SBP/P12 |
| 23 | | GO TO 20 |
| 24 | 10 | SH0(I,1)=0. |
| 25 | | R2=RSC0*RSC0 |
| 26 | | SH0(I,2)=R2/(R2+Z2)**1.5/2. |
| 27 | 20 | CONTINUE |
| 28 | | RETURN |
| 29 | | END |

13

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN   ST-NO      SOURCE PROGRAM
      C          SUBROUTINE      ISF
1      SUBROUTINE      ISF(R,Z,INR,RMIN,RG0,ZG0,A2,A3,RISF)
2      DIMENSION      R(3),Z(3),RISF(6,6,11),A2(3),A3(3),RO(3),
      1            FRC1(3),FRC2(3,3),FRC3(3,3)
3      DO 10 I=1,6
4      DO 10 J=1,6
5      DO 10 K=1,11
6      10 RISF(I,J,K)=0.
7      DELTA0=R(1)*(Z(2)-Z(3))+R(2)*(Z(3)-Z(1))+R(3)*(Z(1)-Z(2))
8      A2(1)=Z(2)-Z(3)
9      A2(2)=Z(3)-Z(1)
10     A2(3)=Z(1)-Z(2)
11     A3(1)=R(3)-R(2)
12     A3(2)=R(1)-R(3)
13     A3(3)=R(2)-R(1)
14     FRC0=R(1)+R(2)+R(3)
15     RG0=FRC0/3.
16     ZG0=(Z(1)+Z(2)+Z(3))/3.
17     DO 40 I=1,3
18     RO(I)=R(I)
19     FRC1(I)=(FRC0+R(I))/72.
20     DO 40 J=1,3
21     IF(I-J) 20,30,40
22     20 K=6-I-J
23     FRC2(I,J)=(2.*FRC0-R(K))/360.
24     FRC2(J,I)=FRC2(I,J)
25     GO TO 40
26     30 FRC2(I,J)=(FRC0+2.*R(I))/180.
27     40 CONTINUE
28     FRC0=FRC0/DELTA0/18.
29     IF(RO(1)) 60,50,60
30     50 RO(1)=RMIN
31     60 IF(RO(2)) 80,70,80
32     70 RO(2)=RMIN
33     80 IF(RO(3)) 100,90,100
34     90 RO(3)=RMIN
35     100 DO 300 I=1,3
36     DO 300 J=1,3
37     IF(I-J) 110,200,300
38     110 K=6-I-J
39     R1=RO(I)
40     R2=RO(J)
41     R3=RO(K)
42     B1=R1-R2
43     B2=R2-R3
44     B3=R3-R1
45     IF(B3) 120,170,120
46     120 IF(B2) 130,160,130
47     130 IF(B1) 140,150,140
48     140 C1=R1/R2
49     C2=R1/R3
50     C3=C1-1.
51     C4=C2-1.
52     C5=C3*C3
53     C6=C4*C4
54     C7=ALOG(C1)
55     C8=ALOG(C2)

```

14

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (ISF) |
|-----|-------|---|---------|
| 56 | | C9=B2*B2 | |
| 57 | | C10=C7/C3/C5-C8/C4/C6-(3,-C1)/C5/2.+(3,-C2)/C6/2. | |
| 58 | | C11=C7/C5-C8/C6-1./C3+1./C4 | |
| 59 | | FRC3(I,J)=(1./6.+B3*C10/B2/3.+R3*C11/B2/2.)*DELTA0/B2 | |
| 60 | | GO TO 190 | |
| 61 | 150 | C1=R1/R3 | |
| 62 | | C2=C1-1. | |
| 63 | | C3=C2*C2 | |
| 64 | | FRC3(I,J)=(1./3.-(0.5-1./C2+ALOG(C1)/C3)/C2)*DELTA0/B2/6. | |
| 65 | | GO TO 190 | |
| 66 | 160 | C1=R2/R1 | |
| 67 | | C2=C1-1. | |
| 68 | | C3=C2*C2 | |
| 69 | | FRC3(I,J)=(-1./3.+C1*(0.5-1./C2+ALOG(C1)/C3)/C2)*DELTA0/B3/2. | |
| 70 | | GO TO 190 | |
| 71 | 170 | IF(B2) 180,310,180 | |
| 72 | 180 | C1=R1/R2 | |
| 73 | | C2=C1-1. | |
| 74 | | C3=C2*C2 | |
| 75 | | FRC3(I,J)=(-1./3.+C1*(0.5-1./C2+ALOG(C1)/C3)/C2)*DELTA0/B1/2. | |
| 76 | 190 | FRC3(J,I)=FRC3(I,J) | |
| 77 | | GO TO 300 | |
| 78 | 200 | J1=I+1 | |
| 79 | | IF(J1.LE.3) GO TO 210 | |
| 80 | | J1=1 | |
| 81 | 210 | K=J1+1 | |
| 82 | | IF(K.LE.3) GO TO 220 | |
| 83 | | K=1 | |
| 84 | 220 | R1=R0(I) | |
| 85 | | R2=R0(J1) | |
| 86 | | R3=R0(K) | |
| 87 | | B1=R1-R2 | |
| 88 | | B2=R2-R3 | |
| 89 | | B3=R3-R1 | |
| 90 | | IF(B3) 230,280,230 | |
| 91 | 230 | IF(B2) 240,270,240 | |
| 92 | 240 | IF(B1) 250,260,250 | |
| 93 | 250 | C1=R1/R2 | |
| 94 | | C2=R1/R3 | |
| 95 | | C3=C1-1. | |
| 96 | | C4=C2-1. | |
| 97 | | C5=C3*C3 | |
| 98 | | C6=C4*C4 | |
| 99 | | C7=ALOG(C1) | |
| 100 | | C8=ALOG(C2) | |
| 101 | | C9=C7/C3/C5-C8/C4/C6-(3,-C1)/C5/2.+(3,-C2)/C6/2. | |
| 102 | | FRC3(I,J)=DELTA0*C9/B2/3. | |
| 103 | | GO TO 300 | |
| 104 | 260 | C1=R1/R3 | |
| 105 | | C2=C1-1. | |
| 106 | | C3=C2*C2 | |
| 107 | | FRC3(I,J)=(1./3.+((3,-C1)/2.-ALOG(C1)/C2)/C3)*DELTA0/B2/3. | |
| 108 | | GO TO 300 | |
| 109 | 270 | C1=R1/R2 | |
| 110 | | C2=1.-C1 | |
| 111 | | C3=C2*C2 | |
| 112 | | FRC3(I,J)=(1./3.+C1*(0.5+1/C2+ALOG(C1)/C3)/C2)*DELTA0/B3 | |

15

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( ISF      )
113          GO TO 300
114  280 IF(B2)      290,310,290
115  290 C1=R1/R2
116      C2=C1-1.
117      C3=C2*C2
118      FRC3(I,J)=(1./3.+((3.-C1)/2.-ALOG(C1)/C2)/C3)*DELTA0/B1/3.
119  300 CONTINUE
120      GO TO 330
121  310 WRITE(6,320)
122  320 FORMAT(1H0,10X,24HERROR *** B1=B2=B3=0 ***)
123      STOP
124  330 DO 530      I=1,6
125      IF(I-3)    340,340,350
126  340 S11=-1.
127      I3=I
128      GO TO 360
129  350 S11=1.
130      I3=I-3
131  360 DO 530      J=1,6
132      IF(I-J)    370,370,530
133  370 IF(J-3)    380,380,390
134  380 SJ1=-1.
135      J3=J
136      GO TO 400
137  390 SJ1=1.
138      J3=J-3
139  400 SIJ=S11*SJ1
140      AA22=A2(I3)*A2(J3)
141      R1SF(I,J,1)=SIJ*FRC3(I3,J3)
142      R1SF(I,J,2)=AA22*FRC0
143      R1SF(I,J,3)=A3(I3)*A3(J3)*FRC0
144      IF(SIJ)    410,430,430
145  410 DO 420      K=2,3
146      R1SF(I,J,K)=R1SF(I,J,K)/2.
147  430 IF(I.EQ.J) GO TO 450
148      DO 440      K=1,3
149      R1SF(J,I,K)=R1SF(I,J,K)
150  450 IF(INR.EQ.0) GO TO 530
151      R1SF(I,J,4)=DELTA0*FRC2(I3,J3)
152      R1SF(I,J,5)=AA22*FRC0+(A2(I3)+A2(J3))/18.+FRC3(I3,J3)/3.
153      R1SF(I,J,6)=A2(J3)*FRC1(I3)
154      R1SF(I,J,7)=A3(J3)*FRC1(I3)
155      R1SF(I,J,8)=A3(I3)*A2(J3)*FRC0
156      R1SF(I,J,9)=SJ1*DELTA0/24.
157      IF(I3.EQ.J3) GO TO 460
158      R1SF(I,J,9)=R1SF(I,J,9)/2.
159  460 R1SF(I,J,10)=S11*A3(J3)/12.
160      R1SF(I,J,11)=SJ1*(A2(I3)/6.+FRC3(I3,J3))/2.
161      IF(SIJ)    470,490,490
162  470 DO 480      K=4,8
163      R1SF(I,J,K)=R1SF(I,J,K)/2.
164  490 IF(I.EQ.J) GO TO 530
165      R1SF(J,I,4)=R1SF(I,J,4)
166      R1SF(J,I,5)=R1SF(I,J,5)
167      R1SF(J,I,6)=A2(I3)*FRC1(J3)
168      R1SF(J,I,7)=A3(I3)*FRC1(J3)
169      R1SF(J,I,8)=A3(J3)*A2(I3)*FRC0

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (ISF) |
|-----|-------|---|---------|
| 170 | | RISF(J,I,9)=S11*DELTA0/24. | |
| 171 | | IF(I3.EQ.J3) GO TO 500 | |
| 172 | | RISF(J,I,9)=RISF(J,I,9)/2. | |
| 173 | 500 | RISF(J,I,10)=S11*A3(I3)/12. | |
| 174 | | RISF(J,I,11)=S11*(A2(J3)/6.+FRC3(J3,I3))/2. | |
| 175 | | IF(S1J) 510,530,530 | |
| 176 | 510 | DO 520 K=6,8 | |
| 177 | 520 | RISF(J,I,K)=RISF(J,I,K)/2. | |
| 178 | 530 | CONTINUE | |
| 179 | | DO 535 I=1,3 | |
| 180 | | A2(I)=A2(I)/DELTA0 | |
| 181 | 535 | A3(I)=A3(I)/DELTA0 | |
| 182 | | IF(DELTA0.GE.0.) GO TO 550 | |
| 183 | | DO 540 I=1,6 | |
| 184 | | DO 540 J=1,6 | |
| 185 | | DO 540 K=1,11 | |
| 186 | | RISF(I,J,K)=-RISF(I,J,K) | |
| 187 | 540 | CONTINUE | |
| 188 | 550 | RETURN | |
| 189 | | END | |

17

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|---|
| 1 | C | SUBROUTINE ATM |
| | | SUBROUTINE ATM(MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MAXNSE,MAXNPE,MPE,MAXNCV,MA |
| | | 1XNRV,MAXMSE,MAXMPE) |
| | C | DIMENSION SMP(MAXSMP),RES(MAXRES),ASC(MAXCUR),PSC(MAXCUR),INSH |
| | C | 1P(MAXNPE),INR(MAXNPE),MSE(3),NCM(3),NCV(3,MPE),NRM(3,MPE),NRV(3,MP |
| | C | 1E,MAXNRV),CUPV(3),SH(3,2,MAXCUR),IFD(3,MAXMPE,4),RISF(MAXNPE,6,6,1 |
| | C | 11) |
| 2 | | DIMENSION SMP(1),RES(1),ASC(1),PSC(1),INSM |
| | | 1P(2),INR(2),MSE(3),NCM(3),NCV(3, 12),NRM(3, 12),NR |
| | | 1V(3, 12, 96),CUPV(3),SH(3,2, 1),IFD(3, 3,4),RISF(|
| | | 1 2,6,6,11) |
| | C | COMPLEX CUR(MAXCUR),AE(MAXNPE,24,24),BE(MAXNPE,24),A(3,MPE,MAX |
| | C | 1NRV),B(3,MPE) |
| 3 | | COMPLEX CUR(1),AE(2,24,24),BE(2,24),A(3, 12, |
| | | 1 96),B(3, 12) |
| 4 | | DEFINE FILE 30(1300,360,U,IAV) |
| 5 | | READ(5,10) FREE |
| 6 | 10 | FORMAT(F10.5) |
| 7 | | READ(5,20) SMP |
| 8 | 20 | FORMAT(F8.3) |
| 9 | | READ(5,30) RES |
| 10 | 30 | FORMAT(F10.4) |
| 11 | | READ(5,40) ASC |
| 12 | 40 | FORMAT(F10.2) |
| 13 | | READ(5,50) PSC |
| 14 | 50 | FORMAT(F10.2) |
| 15 | | WRITE(6,60) FREE |
| 16 | 60 | FORMAT(1H0,9X,F10.5) |
| 17 | | WRITE(6,70) SMP |
| 18 | 70 | FORMAT(1H0,9X,F8.3) |
| 19 | | WRITE(6,80) RES |
| 20 | 80 | FORMAT(1H0,9X,F10.4) |
| 21 | | WRITE(6,90) ASC |
| 22 | 90 | FORMAT(1H0,9X,F10.2) |
| 23 | | WRITE(6,100) PSC |
| 24 | 100 | FORMAT(1H0,9X,F10.2) |
| 25 | | PI=3.1415927 |
| 26 | | DO 110 I=1,MAXRES |
| 27 | 110 | RES(I)=RES(I)/FREQ/PI/PI/80. |
| 28 | | WRITE(6,115) RES |
| 29 | 115 | FORMAT(1H ,9X,4HRES=,E12.5) |
| 30 | | DO 120 I=1,MAXCUR |
| 31 | | ASC1=ASC(I)*1000. |
| 32 | | PSC1=PSC(I)*PI/180. |
| 33 | 120 | CUR(I)=ASC1*CMPLX(COS(PSC1),SIN(PSC1)) |
| 34 | | NCM(1)=0 |
| 35 | | DO 130 JO=1,MPE |
| 36 | | NCV(1,JO)=0 |
| 37 | | NRM(1,JO)=0 |
| 38 | | B(1,JO)=(0.,0.) |
| 39 | | DO 130 KO=1,MAXNRV |
| 40 | | NRV(1,JO,KO)=0 |
| 41 | | A(1,JO,KO)=(0.,0.) |
| 42 | 130 | CONTINUE |
| 43 | | DO 140 I=1,MAXMSE |
| 44 | | I1=10*I-9 |
| 45 | | WRITE(30,I1) NCM(1),(NCV(1,JO),NRM(1,JO),(NRV(1,JO,KO),A(1,JO,KO), |

18

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM      ( ATM      )
      1KO=1,MAXNRV),B(1,JO),JO=1,MPE)
46   140 CONTINUE
47   REWIND      10
48   DO 550      I=1,MAXNSE
49   READ(10)    MSE,CUPV,SH,INRP,INSMP,INR,IFD,RISF
50   CALL       AEM(SMP,RES,CUR,MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MAXNPE,SH,INRP,INSMP
      1,INR,RISF,AE,BE)
51   DO 150      IO=1,3
52   I1=MSE(IO)*10-9
53   READ(30,11) NCM(IO),(NCV(IO,JO),NRM(IO,JO),(NRV(IO,JO,KO),A(IO,JO,
      1KO),KO=1,MAXNRV),B(IO,JO),JO=1,MPE)
54   150 CONTINUE
55   DO 530      J=1,MAXNPE
56   IF(INR(J),NE,0) GO TO 300
57   KC=1
58   160 IF(KC.GT.3) GO TO 170
59   IO=KC
60   JC=J
61   GO TO 180
62   170 IO=KC-3
63   JC=J+1
64   180 NCV0=IFD(IO,JC,1)
65   IF(NCV0,EQ,0) GO TO 230
66   J2=NCM(IO)
67   IF(J2,EQ,0) GO TO 200
68   JO=0
69   DO 190      J1=1,J2
70   IF(NCV(IO,J1),NE,NCV0) GO TO 190
71   JO=J1
72   190 CONTINUE
73   IF(JO,NE,0) GO TO 210
74   200 JO=J2+1
75   NCM(IO)=JO
76   NCV(IO,JO)=NCV0
77   210 KR=1
78   220 IF(KR.GT.3) GO TO 230
79   IR=KR
80   JR=J
81   GO TO 240
82   230 IR=KR-3
83   JR=J+1
84   240 NRVO=IFD(IR,JR,1)
85   IF(NRVO,EQ,0) GO TO 280
86   K2=NRM(IO,JO)
87   IF(K2,EQ,0) GO TO 260
88   KO=0
89   DO 250      K1=1,K2
90   IF(NRV(IO,JO,K1),NE,NRVO) GO TO 250
91   KO=K1
92   250 CONTINUE
93   IF(KO,NE,0) GO TO 270
94   260 KO=K2+1
95   IF(KO,LE,MAXNRV) GO TO 264
96   WRITE(6,262) I,J,KC,KR
97   262 FORMAT(1H,9X,4(15,5X))
98   264 CONTINUE
99   NRM(IO,JO)=KO

```

19

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (ATM) |
|-----|-------|-------------------------------------|-----------|
| 100 | | NRV(10,J0,K0)=NRV0 | |
| 101 | 270 | A(10,J0,K0)=A(10,J0,K0)+AE(J,KC,KR) | |
| 102 | 280 | KR=KR+1 | |
| 103 | | IF(KR.LE.6) | GO TO 220 |
| 104 | 290 | KC=KC+1 | |
| 105 | | IF(KC.LE.6) | GO TO 160 |
| 106 | | GO TO 530 | |
| 107 | 300 | KC=1 | |
| 108 | 310 | I0=(KC-1)/4+1 | |
| 109 | | LC=KC-4*I0+4 | |
| 110 | | IF(I0.GT.3) | GO TO 320 |
| 111 | | JC=J | |
| 112 | | GO TO 330 | |
| 113 | 320 | I0=I0-3 | |
| 114 | | JC=J+1 | |
| 115 | 330 | NCV0=IFD(I0,JC,LC) | |
| 116 | | IF(NCV0.EQ.0) | GO TO 520 |
| 117 | | IF(NCV0.NE.-1) | GO TO 350 |
| 118 | | IF(LC.NE.2) | GO TO 340 |
| 119 | | NCV0=IFD(I0,JC,4) | |
| 120 | | GO TO 350 | |
| 121 | 340 | NCV0=IFD(I0,JC,2) | |
| 122 | 350 | J2=NCM(I0) | |
| 123 | | IF(J2.EQ.0) | GO TO 370 |
| 124 | | J0=0 | |
| 125 | | DO 360 J1=1,J2 | |
| 126 | | IF(NCV(I0,J1).NE.NCV0) | GO TO 360 |
| 127 | | J0=J1 | |
| 128 | 360 | CONTINUE | |
| 129 | | IF(J0.NE.0) | GO TO 380 |
| 130 | 370 | J0=J2+1 | |
| 131 | | NCM(I0)=J0 | |
| 132 | | NCV(I0,J0)=NCV0 | |
| 133 | 380 | KR=1 | |
| 134 | 390 | IR=(KR-1)/4+1 | |
| 135 | | LR=KR-4*IR+4 | |
| 136 | | IF(IR.GT.3) | GO TO 400 |
| 137 | | JR=J | |
| 138 | | GO TO 410 | |
| 139 | 400 | IR=IR-3 | |
| 140 | | JR=J+1 | |
| 141 | 410 | NRV0=IFD(IR,JR,LR) | |
| 142 | | IF(NRV0.EQ.0) | GO TO 500 |
| 143 | | IF(NRV0.NE.-1) | GO TO 430 |
| 144 | | IF(LR.NE.2) | GO TO 420 |
| 145 | | NRV0=IFD(IR,JR,4) | |
| 146 | | GO TO 430 | |
| 147 | 420 | NRV0=IFD(IR,JR,2) | |
| 148 | 430 | K2=NRM(I0,J0) | |
| 149 | | IF(K2.EQ.0) | GO TO 450 |
| 150 | | K0=0 | |
| 151 | | DO 440 K1=1,K2 | |
| 152 | | IF(NRV(I0,J0,K1).NE.NRV0) | GO TO 440 |
| 153 | | K0=K1 | |
| 154 | 440 | CONTINUE | |
| 155 | | IF(K0.NE.0) | GO TO 460 |
| 156 | 450 | K0=K2+1 | |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (ATM) |
|-----|-------|--|---------|
| 157 | | IF(KU.LE.MAXNRV) GO TO 454 | |
| 158 | | WRITE(6,452) I,J,KC,KR | |
| 159 | 452 | FORMAT(1H,9X,4(15,5X)) | |
| 160 | 454 | CONTINUE | |
| 161 | | NRM(10,J0)=KO | |
| 162 | | NRV(10,J0,K0)=NRV0 | |
| 163 | 460 | IF(IFD(10,JC,LC).EQ.-1) GO TO 480 | |
| 164 | | IF(IFD(10,JC,LC).EQ.-1) GO TO 470 | |
| 165 | | A(10,J0,K0)=A(10,J0,K0)+AE(J,KC,KR) | |
| 166 | | GO TO 500 | |
| 167 | 470 | A(10,J0,K0)=A(10,J0,K0)-CUPV(10)*AE(J,KC,KR) | |
| 168 | | GO TO 500 | |
| 169 | 480 | IF(IFD(10,JC,LC).EQ.-1) GO TO 490 | |
| 170 | | A(10,J0,K0)=A(10,J0,K0)-CUPV(10)*AE(J,KC,KR) | |
| 171 | | GO TO 500 | |
| 172 | 490 | A(10,J0,K0)=A(10,J0,K0)+CUPV(10)*CUPV(10)*AE(J,KC,KR) | |
| 173 | 500 | KR=KR+1 | |
| 174 | | IF(KR.LE.24) GO TO 390 | |
| 175 | | IF(LC.EQ.1.OR.LC.EQ.3) GO TO 520 | |
| 176 | | IF(IFD(10,JC,LC).EQ.0) GO TO 520 | |
| 177 | | IF(IFD(10,JC,LC).EQ.-1) GO TO 510 | |
| 178 | | B(10,J0)=B(10,J0)+BE(J,KC) | |
| 179 | | GO TO 520 | |
| 180 | 510 | B(10,J0)=B(10,J0)-CUPV(10)*BE(J,KC) | |
| 181 | 520 | KC=KC+1 | |
| 182 | | IF(KC.LE.24) GO TO 310 | |
| 183 | 530 | CONTINUE | |
| 184 | | WRITE(6,536) I,MSE,MAXNRV,MPE,MAXMSE | |
| 185 | 536 | FORMAT(1H,9X,7I5) | |
| 186 | | DO 540 J0=1,3 | |
| 187 | | I1=MSE(10)*10-9 | |
| 188 | | WRITE(30,I1) NCM(10),(NCV(10,J0),NRM(10,J0),(NRV(10,J0,K0),A(10,J0,1,K0),K0=1,MAXNRV),B(10,J0),J0=1,MPE) | |
| 189 | 540 | CONTINUE | |
| 190 | 550 | CONTINUE | |
| 191 | | NGEN=0 | |
| 192 | | NBAND=0 | |
| 193 | | IKO=0 | |
| 194 | | DO 580 I=1,MAXMSE | |
| 195 | | I1=10*I-9 | |
| 196 | | READ(30,I1) NCM(1),(NCV(1,J0),NRM(1,J0),(NRV(1,J0,K0),A(1,J0,K0),K0=1,MAXNRV),B(1,J0),J0=1,MPE) | |
| 197 | | J1=NCM(1) | |
| 198 | | IF(J1.LE.0) GO TO 580 | |
| 199 | | WRITE(6,557) NCM(1) | |
| 200 | 557 | FORMAT(1H0,9X,7HNCM(1)=,15) | |
| 201 | | DO 561 J0=1,J1 | |
| 202 | | K1=NRM(1,J0) | |
| 203 | | WRITE(6,558) NCV(1,J0),NRM(1,J0),B(1,J0) | |
| 204 | 558 | FORMAT(1H,15,5X,15,5X,E12.5,1X,E12.5) | |
| 205 | | WRITE(6,559) (NRV(1,J0,K0),A(1,J0,K0),K0=1,K1) | |
| 206 | 559 | FORMAT(1H,5(13,E11.4,E11.4,1X),/,1X,5(13,E11.4,E11.4,1X)) | |
| 207 | 561 | CONTINUE | |
| 208 | | NGEN=NGEN+J1 | |
| 209 | | DO 575 J=1,J1 | |
| 210 | | K1=NCV(1,J) | |
| 211 | | K2=NRM(1,J) | |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN   ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( ATM   )
212           IKO0=0
213           MINC=10000000
214           DO 565 K=1,K2
215           IF(K1.LT.NRV(1,J,K)) GO TO 565
216           IKO0=IKO0+1
217           IF(MINC.LE.NRV(1,J,K)) GO TO 565
218           MINC=NRV(1,J,K)
219   565 CONTINUE
220           IF(IKO.GE.IKO0) GO TO 570
221           IKO=IKO0
222   570 MINC=K1-MINC+1
223           IF(NBAND.GE.MINC) GO TO 575
224           NBAND=MINC
225   575 CONTINUE
226   580 CONTINUE
227           REWIND 40
228           WRITE(40)          NGEN,NBAND,IKO
229           K5=0
230           B(1,1)=(0.,0.)
231           DO 591 K=1,IKO
232           NRV(1,1,K)=0
233   591 A(1,1,K)=(0.,0.)
234           DO 592 I=1,NGEN
235   592 WRITE(40) K5,(NRV(1,1,K6),A(1,1,K6),K6=1,IKO),B(1,1)
236           DO 650 I=1,MAXMSE
237           I1=10*I-9
238           READ(30,I1) NCM(1),(NCV(1,J0),NRM(1,J0),(NRV(1,J0,K0),A(1,J0,K0),K
10=1,MAXNRV),B(1,J0),J0=1,MPE)
239   594 J1=NCM(1)
240           IF(J1.LE.0) GO TO 650
241           DO 620 J=1,J1
242           K1=NCV(1,J)
243           K2=NRM(1,J)
244           K3=1
245           DO 600 K=1,K2
246           IF(K1.LT.NRV(1,J,K)) GO TO 600
247           NRV(1,J,K3)=NRV(1,J,K)
248           A(1,J,K3)=A(1,J,K)
249           K3=K3+1
250   600 CONTINUE
251           DO 610 K=K3,IKO
252           NRV(1,J,K)=0
253           A(1,J,K)=(0.,0.)
254   610 CONTINUE
255           REWIND 40
256           READ(40)          NGEN,NBAND,IKO
257           IF(K1.EQ.1) GO TO 616
258           K4=K1-1
259           DO 615 K=1,K4
260   615 READ(40) K5,(NRV(2,J,K6),A(2,J,K6),K6=1,IKO),B(2,J)
261   616 WRITE(40) K1,(NRV(1,J,K6),A(1,J,K6),K6=1,IKO),B(1,J)
262           620 CONTINUE
263           650 CONTINUE
264           WRITE(6,655)          MAXNCV,NGEN,NBAND,IKO
265   655 FORMAT(1H ,9X,4(15,2X))
266           IF(MAXNCV.EQ.0) GO TO 670
267           WRITE(6,660)

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM | (ATM) |
|-----|-------|--|---------|
| 268 | 660 | FORMAT(1H ,9X,28HERROR *** MAXNCV.NE.NGEN ***) | |
| 269 | | STOP | |
| 270 | 670 | RETURN | |
| 271 | | END | |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE AEM |
| 1 | | SUBROUTINE AEM(SMP,RES,CUR,MAXSMP,MAXRES,MAXCUR,MAXNPE,SH,INRP |
| | | 1,INSMP,INR,RISF,AE,BE) |
| 2 | | DIMENSION SMP(MAXSMP),RES(MAXRES),SH(3,2,MAXCUR),INSMP(MAXNPE) |
| | | 1,INR(MAXNPE),RISF(MAXNPE,6,6,11) |
| 3 | | COMPLEX CUR(MAXCUR),AE(MAXNPE,24,24),BE(MAXNPE,24),SMF(3,2) |
| 4 | | IF(INRP.EQ.0) GO TO 20 |
| 5 | | DO 10 I=1,3 |
| 6 | | DO 10 J=1,2 |
| 7 | | SMF(I,J)=(0.,0.) |
| 8 | | DO 10 K=1,MAXCUR |
| 9 | | SMF(I,J)=SMF(I,J)+CUR(K)*SH(I,J,K) |
| 10 | 10 | CONTINUE |
| 11 | 20 | DO 180 I=1,MAXNPE |
| 12 | | DO 30 J=1,24 |
| 13 | | BE(I,J)=(0.,0.) |
| 14 | | DO 30 K=1,24 |
| 15 | 30 | AE(I,J,K)=(0.,0.) |
| 16 | | IF(INR(I).NE.0) GO TO 50 |
| 17 | | DO 40 J=1,6 |
| 18 | | DO 40 K=1,6 |
| 19 | | AE(I,J,K)=CMPLX(RISF(I,J,K,2)+RISF(I,J,K,1)+RISF(I,J,K,3),0.) |
| 20 | 40 | CONTINUE |
| 21 | | GO TO 180 |
| 22 | 50 | INRO=INR(I) |
| 23 | | INSMP0=INSMP(I) |
| 24 | | C1=SMP(INSMP0) |
| 25 | | C2=RES(INRO) |
| 26 | | J0=1 |
| 27 | | DO 130 J=1,6 |
| 28 | | J1=J0+1 |
| 29 | | J2=J0+2 |
| 30 | | J3=J0+3 |
| 31 | | K0=1 |
| 32 | | DO 120 K=1,6 |
| 33 | | K1=K0+1 |
| 34 | | K2=K0+2 |
| 35 | | K3=K0+3 |
| 36 | | IF(K.GT.3) GO TO 60 |
| 37 | | K4=K |
| 38 | | GO TO 70 |
| 39 | 60 | K4=K-3 |
| 40 | 70 | IF(J0.GT.K3) GO TO 110 |
| 41 | | AE(I,J0,K3)=CMPLX(C1*RISF(I,K,J,7),0.) |
| 42 | | IF(J1.GT.K3) GO TO 110 |
| 43 | | AE(I,J1,K3)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,J,K,8)) |
| 44 | | IF(J2.GT.K3) GO TO 80 |
| 45 | | AE(I,J2,K3)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,K,J,10)) |
| 46 | | IF(J3.GT.K3) GO TO 80 |
| 47 | | AE(I,J3,K3)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,4),-C2*(RISF(I,J,K,2)+RISF(I,J,K,1 |
| | | 1))) |
| 48 | 80 | IF(J0.GT.K2) GO TO 110 |
| 49 | | AE(I,J0,K2)=CMPLX(C1*RISF(I,K,J,9),0.) |
| 50 | | IF(J1.GT.K2) GO TO 110 |
| 51 | | AE(I,J1,K2)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,K,J,11)) |
| 52 | | IF(J2.GT.K2) GO TO 90 |
| 53 | | AE(I,J2,K2)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,4),-C2*(RISF(I,J,K,5)+RISF(I,J,K,3 |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( AEM      )
      1)))
54      IF(J5.GT.K2)      GO TO 90
55      AE(I,J3,K2)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,J,K,10))
56      90 IF(J0.GT.K1)      GO TO 110
57      AE(I,J0,K1)=CMPLX(C1*RISF(I,K,J,6),0.)
58      IF(J1.GT.K1)      GO TO 110
59      AE(I,J1,K1)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,4),-C2*(RISF(I,J,K,1)+RISF(I,J,K,3
      1)))
60      IF(J2.GT.K1)      GO TO 100
61      AE(I,J2,K1)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,J,K,11))
62      IF(J3.GT.K1)      GO TO 100
63      AE(I,J3,K1)=CMPLX(0.,C2*RISF(I,K,J,8))
64      100 IF(J0.GT.K0)      GO TO 110
65      AE(I,J0,K0)=CMPLX(C1*(RISF(I,J,K,2)+RISF(I,J,K,1)+RISF(I,J,K,3)),0
      1.)
66      IF(J1.GT.K0)      GO TO 110
67      AE(I,J1,K0)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,6),0.)
68      IF(J2.GT.K0)      GO TO 110
69      AE(I,J2,K0)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,9),0.)
70      IF(J3.GT.K0)      GO TO 110
71      AE(I,J3,K0)=CMPLX(C1*RISF(I,J,K,7),0.)
72      110 BE(I,J1)=BE(I,J1)-SMF(K4,1)*RISF(I,J,K,4)
73      BE(I,J3)=BE(I,J3)-SMF(K4,2)*RISF(I,J,K,4)
74      120 KO=KO+4
75      130 JO=JO+4
76      DO 140 J=1,24
77      DO 140 K=1,24
78      IF(J.LE.K)      GO TO 140
79      AE(I,J,K)=AE(I,K,J)
80      140 CONTINUE
81      DO 170 J1=2,22,4
82      J3=J1+2
83      BE(I,J1)=C1*BE(I,J1)
84      BE(I,J3)=C1*BE(I,J3)
85      170 CONTINUE
86      180 CONTINUE
87      RETURN
88      END

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE CTM |
| 1 | | SUBROUTINE CTM |
| 2 | | DIMENSION IC(3),IO(2) |
| | C | DIMENSION A(INCORE),AA(NBAND5),AI(NN),B(NEQUI),C(NN),IN(NN),JN |
| | C | 1(NBAND),S(NBAND),SUM(NBAND) |
| 3 | | DIMENSION A(15000),AA(130),AI(182),B(7875),C(182),I |
| | | 1N(182),JN(125),S(125),SUM(125) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC,IO,IDIAG,IM,MG,IIO,N1,N2,IJ,MBAND,SS,IKO |
| 5 | | COMPLEX A,AA,AI,B,C,S,SS,SUM |
| 6 | | READ(5,10) INCORE,INCAL |
| 7 | 10 | FORMAT(2I10) |
| 8 | | READ(5,20) (IC(I),I=1,2),(IC(J),J=1,3),IDIAG |
| 9 | 20 | FORMAT(6I10) |
| 10 | | I1=IC(1) |
| 11 | | REWIND I1 |
| 12 | | READ(I1) NGEN,NBAND,IKO |
| 13 | | IM=(NBAND+1)*NBAND/2 |
| 14 | | MG=(INCORE-IM)/NBAND |
| 15 | | NN=NBAND+MG |
| 16 | | NBAND5=NBAND+5 |
| 17 | | NEQUI=INCAL*(INCAL+1)/2 |
| 18 | | CALL INPUT1(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,A,AA,AI,B, |
| | | 1C,IN,JN,S,SUM) |
| 19 | | I1=IC(2) |
| 20 | | REWIND I1 |
| 21 | | WRITE(I1) NGEN,NBAND,IKO |
| 22 | 30 | I2=MINO(NN,NGEN-MBAND) |
| 23 | | IF(NBAND-I2) 40,40,50 |
| 24 | 40 | CALL INPUT2(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,I2,A,AA,AI |
| | | 1,B,C,IN,JN,S,SUM) |
| 25 | | I3=I2-NBAND+1 |
| 26 | | CALL GAUSS1(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,I2,I3,A,AA |
| | | 1,AI,B,C,IN,JN,S,SUM) |
| 27 | | GO TO 30 |
| 28 | 50 | CALL GAUSS2(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,A,AA,AI,B, |
| | | 1C,IN,JN,S,SUM) |
| 29 | | CALL BAKCA2(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,A,AA,AI,B, |
| | | 1C,IN,JN,S,SUM) |
| 30 | | RETURN |
| 31 | | END |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE INPUT1 |
| 1 | | SUBROUTINE INPUT1(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI, A, AA, AI, B, C, IN, JN, S, SUM) |
| 2 | | DIMENSION IC(3), IO(2) |
| 3 | | DIMENSION A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NEQUI), C(NN), IN(NN), JN(1(NBAND)), S(NBAND), SUM(NBAND) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO |
| 5 | | COMPLEX A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM |
| 6 | | WRITE(6, 2003) INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI |
| 7 | | MBAND=0 |
| 8 | | I1=IO(1) |
| 9 | | IIO=2 |
| 10 | | DO 1 I=1, INCORE |
| 11 | | A(I)=(0., 0.) |
| 12 | 1 | CONTINUE |
| 13 | | N1=NBAND-1 |
| 14 | | DO 2 I=1, N1 |
| 15 | | S(I)=(0., 0.) |
| 16 | 2 | CONTINUE |
| 17 | | IN(I)=0 |
| 18 | | DO 3 I=1, N1 |
| 19 | | IN(I+1)=IN(I)+I |
| 20 | 3 | CONTINUE |
| 21 | | N2=NBAND+1 |
| 22 | | DO 4 I=N2, NN |
| 23 | | IN(I)=IN(I-1)+NBAND |
| 24 | 4 | CONTINUE |
| 25 | | DO 17 I=1, N1 |
| 26 | | READ(I1) JJ, (JN(J), AA(J), J=1, IKO), C(I) |
| 27 | | IF(I=JJ) 18, 5, 18 |
| 28 | 5 | IMAX=I |
| 29 | | IF(IDIAG) 7, 7, 6 |
| 30 | 6 | AMAX=0. |
| 31 | 7 | DO 15 J=1, IKO |
| 32 | | IF(JN(J)) 15, 15, 8 |
| 33 | 8 | KK=JN(J) |
| 34 | | IF(I=KK, LT, 0) GO TO 15 |
| 35 | | IF(IDIAG) 11, 11, 9 |
| 36 | 9 | BMAX=AMAX1(ABS(REAL(AA(J))), ABS(AIMAG(AA(J)))) |
| 37 | | IF(AMAX=BMAX) 10, 11, 11 |
| 38 | 10 | AMAX=BMAX |
| 39 | | IMAX=KK |
| 40 | 11 | S(I)=S(I)+AA(J) |
| 41 | | IF(I=KK) 13, 12, 13 |
| 42 | 12 | AI(I)=AA(J) |
| 43 | | GO TO 14 |
| 44 | 13 | S(KK)=S(KK)+AA(J) |
| 45 | 14 | LL=IN(I)+KK |
| 46 | | A(LL)=AA(J) |
| 47 | 15 | CONTINUE |
| 48 | | IF(I=IMAX) 20, 17, 20 |
| 49 | 17 | CONTINUE |
| 50 | | RETURN |
| 51 | 18 | *WRITE(6, 2000) I, JJ |
| 52 | | STOP |
| 53 | 20 | *WRITE(6, 2002) I, IMAX |
| 54 | | STOP |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( INPUT1 )
55   2000 FORMAT(22H INPUT MATRIX ROW NO.,15,1H=,15)
56   2002 FORMAT(22H INPUT MATRIX ROW NO.,15,17H ABS-MAX-COL NO.,15)
57   2003 FORMAT(1H ,9X,7(15,5X))
58           END
    
```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM
C    SUBROUTINE      INPUT2
1    SUBROUTINE      INPUT2(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,I2,A
    1,AA,AI,B,C,IN,JN,S,SUM)
2    DIMENSION       IC(3),IO(2)
3    DIMENSION       A(INCORE),AA(NBAND5),AI(NN),B(NEQUI),C(NN),IN(NN),JN
    1(NBAND),S(NBAND),SUM(NBAND)
4    COMMON          /COMO/ IC,IO,IDIAG,IM,MG,IIO,N1,N2,IJ,MBAND,SS,IKO
5    COMPLEX A,AA,AI,B,C,S,SS,SUM
6    *WRITE(6,2003)  MBAND,I2,INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI
7    I1=IO(1)
8    DO 11 I=NBAND,I2
9    K2=IN(I)
10   DO 1 J=1,NBAND
11   K3=K2+J
12   A(K3)=(0.,0.)
13   1 CONTINUE
14   I3=I+MBAND
15   READ (I) JJ,(JN(J),AA(J),J=1,IKO),C(I)
16   IF(I3-JJ)      14,2,14
17   2 IMAX=I3
18   IF(IDIAG) 4,4,3
19   3 AMAX=0.
20   4 DO 9 J=1,IKO
21   IF(JN(J))    9,9,5
22   5 KK=JN(J)
23   IF(I3-KK,LT,0) GO TO 9
24   IF(IDIAG) 8,8,6
25   6 BMAX=AMAX1(ABS(REAL(AA(J))),ABS(AIMAG(AA(J))))
26   IF(AMAX-BMAX) 7,8,8
27   7 AMAX=BMAX
28   IMAX=KK
29   8 LL=KK-MBAND
30   MM=IN(I)+LL-I+NBAND
31   A(MM)=AA(J)
32   9 CONTINUE
33   IF(I3-IMAX)  15,11,15
34   11 CONTINUE
35   IF(NGEN=JJ)  12,12,13
36   12 REWIND II
37   13 RETURN
38   14 *WRITE (6,2000) I3,JJ
39   STOP
40   15 *WRITE (6,2002) I3,IMAX
41   STOP
42   2000 FORMAT(22H INPUT MATRIX ROW NO.,15,1H=,15)
43   2002 FORMAT(22H INPUT MATRIX ROW NO.,15,17H ABS-MAX-COL NO.,15)
44   2003 FORMAT(1H ,9X,9(15,5X))
45           END
    
```


FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|---|
| | C | SUBROUTINE GAUSS1 |
| 1 | | SUBROUTINE GAUSS1(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI, I2, I3, A, AA, AI, B, C, IN, JN, S, SUM) |
| 2 | | DIMENSION IC(3), IO(2) |
| 3 | | DIMENSION A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NEQUI), C(NN), IN(NN), JN1(NBAND), S(NBAND), SUM(NBAND) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO |
| 5 | | COMPLEX A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM |
| 6 | | WRITE(6, 2100) MBAND, I2, INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI |
| 7 | 2100 | FORMAT(1H, 9X, 9(15, 5X)) |
| 8 | | DO 35 I=1, I3 |
| 9 | | LL=MBAND+I |
| 10 | | WRITE(6, 2008) MBAND, I3, I, LL |
| 11 | 2008 | FORMAT(1H, 9X, 4(110, 5X)) |
| 12 | | I4=IN(NBAND)+NBAND |
| 13 | | S(NBAND)=A(I4) |
| 14 | | AI(NBAND)=A(I4) |
| 15 | | N1=NBAND-1 |
| 16 | | DO 36 J=1, N1 |
| 17 | | I4=IN(NBAND)+J |
| 18 | | S(J)=S(J)+A(I4) |
| 19 | | S(NBAND)=S(NBAND)+A(I4) |
| 20 | 36 | CONTINUE |
| 21 | | AA(2)=AI(1) |
| 22 | | AA(3)=A(1) |
| 23 | | AA(4)=CSQRT(A(1)) |
| 24 | | IF(LL-IC(1)) 3, 1, 3 |
| 25 | 1 | AA(1)=AA(4) |
| 26 | | DO 2 J=2, NBAND |
| 27 | | SUM(J-1)=(0, .0.) |
| 28 | 2 | CONTINUE |
| 29 | 3 | DO 9 J=2, NBAND |
| 30 | | JJ=IN(J) |
| 31 | | AA(J+3)=A(JJ+1)/AA(4) |
| 32 | | IF(LL-IC(1)) 5, 4, 5 |
| 33 | 4 | AA(1)=AA(1)+AA(J+3) |
| 34 | 5 | DO 8 K=2, J |
| 35 | | J1=IN(J-1)+K-1 |
| 36 | | J2=IN(J)+K |
| 37 | | A(J1)=A(J2)-AA(J+3)*AA(K+3) |
| 38 | | IF(LL-IC(1)) 8, 6, 8 |
| 39 | 6 | SUM(K-1)=SUM(K-1)+A(J1) |
| 40 | | IF(J-K) 7, 8, 7 |
| 41 | 7 | SUM(J-1)=SUM(J-1)+A(J1) |
| 42 | 8 | CONTINUE |
| 43 | 9 | CONTINUE |
| 44 | | AA(NBAND+4)=C(1)/AA(4) |
| 45 | | AA(NBAND+5)=S(1)/AA(4) |
| 46 | | DO 10 J=2, NBAND |
| 47 | | C(J-1)=C(J)-AA(NBAND+4)*AA(J+3) |
| 48 | | S(J-1)=S(J)-AA(NBAND+5)*AA(J+3) |
| 49 | | AI(J-1)=AI(J) |
| 50 | 10 | CONTINUE |
| 51 | | IF(I-I3) 11, 13, 13 |
| 52 | 11 | NB=NBAND+I |
| 53 | | C(NBAND)=C(NB) |
| 54 | | DO 12 J=1, NBAND |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN   ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( GAUSS1 )
55     J1=IN(NBAND)+J
56     J2=IN(NB)+J
57     A(J1)=A(J2)
58     12 CONTINUE
59     13 MM=NBAND+5
60     II=IO(110)
61     WRITE (II) LL,(AA(J),J=2,MM)
62     WRITE(6,2006) LL,(A(J),J=1,19),A(IM)
63     2006 FORMAT(1H ,2X,15,3X,4(E12.5,1X,E12.5,5X),/,4(11X,4(E12.5,1X,E12.5,
64     15X),/))
64     IF(LL-IC(1)) 35,16,35
65     18 J1=NBAND+5
66     SS=AA(1)-AA(J1)
67     WRITE(6,2002) NGEN,NBAND
68     2002 FORMAT(1H1,10X,10HDIMENSION=,15,5X,6HWIDTH=,13//3X,3HNO.,10X,15HSU
69     1M(RIGHT-SIDE),28X,8HSUMCHECK,27X,12HSUM-SUMCHECK)
70     WRITE(6,2003) LL,AA(1),AA(J1),SS
71     MINE=1
72     DO 21 J=1,N1
73     SS=SUM(J)-S(J)
74     JL=J+LL
75     IF(MINE-60) 20,19,19
76     19 MINE=0
77     WRITE(6,2002) NGEN,NBAND
78     20 WRITE (6,2003) JL,SUM(J),S(J),SS
79     2003 FORMAT(1X,15,3(5X,1H(,1PE1+.7,2X,1PE14.7,2H)))
80     MINE=MINE+1
81     21 CONTINUE
82     IF(IC(2).GE.IC(1)+IC(3)) IC(1)=IC(1)+IC(3)
83     35 CONTINUE
84     MBAND=MBAND+13
85     WRITE(6,2007) MBAND,13
86     2007 FORMAT(1H ,9X,6HMBAND=,110,5X,3H13=,110)
87     RETURN
88     END

```

3/

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE GAUSS2 |
| 1 | | SUBROUTINE GAUSS2(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI, A, AA, 1, AI, B, C, IN, JN, S, SUM) |
| 2 | | DIMENSION IC(3), IO(2) |
| 3 | | DIMENSION A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NEQUI), C(NN), IN(NN), JN 1(NBAND), S(NBAND), SUM(NBAND) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO |
| 5 | | COMPLEX A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM |
| 6 | | WRITE(6, 2100) INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI |
| 7 | 2100 | FORMAT(1H, 9X, 7(15, 5X)) |
| 8 | | WRITE(6, 2007) IN |
| 9 | 2007 | FORMAT(1H, /, 3(5X, 15(15, 3X), /)) |
| 10 | | IMAX=NBAND-1-INCAL |
| 11 | | IF(IMAX) 21, 21, 1 |
| 12 | 1 | DO 20 I=1, IMAX |
| 13 | | WRITE(6, 2006) LL, (A(J), J=1, 19), A(IM) |
| 14 | 2006 | FORMAT(1H, 2X, 15, 3X, 4(E12.5, 1X, E12.5, 5X), /, 4(11X, 4(E12.5, 1X, E12.5, 15X), /)) |
| 15 | | JMAX=NBAND-1-I |
| 16 | | LL=MBAND+1 |
| 17 | | AA(2)=A(1) |
| 18 | | AA(3)=A(1) |
| 19 | | AA(4)=CSGRT(A(1)) |
| 20 | | IF(LL-IC(1)) 4, 2, 4 |
| 21 | 2 | AA(1)=AA(4) |
| 22 | | DO 3 J=1, JMAX |
| 23 | | SUM(J)=(0., 0.) |
| 24 | 3 | CONTINUE |
| 25 | 4 | DO 10 J=1, JMAX |
| 26 | | JJ=IN(J+1) |
| 27 | | AA(J+4)=A(JJ+1)/AA(4) |
| 28 | | IF(LL-IC(1)) 6, 5, 6 |
| 29 | 5 | AA(1)=AA(1)+AA(J+4) |
| 30 | 6 | DO 9 K=1, J |
| 31 | | J1=IN(J)+K |
| 32 | | J2=IN(J+1)+K+1 |
| 33 | | A(J1)=A(J2)-AA(J+4)*AA(K+4) |
| 34 | | IF(LL-IC(1)) 9, 7, 9 |
| 35 | 7 | SUM(K)=SUM(K)+A(J1) |
| 36 | | IF(J=K) 8, 9, 8 |
| 37 | 8 | SUM(J)=SUM(J)+A(J1) |
| 38 | 9 | CONTINUE |
| 39 | 10 | CONTINUE |
| 40 | | AA(JMAX+5)=C(1)/AA(4) |
| 41 | | AA(JMAX+6)=S(1)/AA(4) |
| 42 | | DO 11 J=1, JMAX |
| 43 | | C(J)=C(J+1)-AA(JMAX+5)*AA(J+4) |
| 44 | | S(J)=S(J+1)-AA(JMAX+6)*AA(J+4) |
| 45 | | AI(J)=AI(J+1) |
| 46 | 11 | CONTINUE |
| 47 | | MM=JMAX+6 |
| 48 | | II=IO(IIO) |
| 49 | | WRITE(II) LL, (AA(J), J=2, MM) |
| 50 | | IF(LL-IC(1)) 20, 16, 20 |
| 51 | 16 | J1=JMAX+6 |
| 52 | | SS=AA(1)-AA(J1) |
| 53 | | WRITE(6, 2002) NGEN, NBAND |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN   ST=NO          SOURCE PROGRAM      ( GAUSS2 )
54    2002 FORMAT(1H1,10X,10HDIMENSION=,15,5X,6HWIDTH=,13,/,3X,3HNO.,10X,15H
      1SUM(RIGHT-SIDE),28X,8HSUMCHECK,27X,12HSUM-SUMCHECK)
55    WRITE (6,2003) LL,AA(1),AA(J1),SS
56    MINE=1
57    DO 19 J=1,JMAX
58    SS=SUM(J)-S(J)
59    JL=J+LL
60    IF(MINE=60) 18,17,17
61    17 MINE=0
62    WRITE(6,2002)      NGEN,NBAND
63    18 WRITE (6,2003) JL,SUM(J),S(J),SS
64    2003 FORMAT(1X,15.3(5X,1H(,1PE14.7,2X,1PE14.7,2H)))
65    MINE=MINE+1
66    19 CONTINUE
67    IF(IC(2).GE.IC(1)+IC(3)) IC(1)=IC(1)+IC(3)
68    20 CONTINUE
69    MBAND=MBAND+IMAX
70    21 IMAX=NGEN-MBAND
71    JN(1)=0
72    DO 22 I=2,IMAX
73    JN(I)=JN(I-1)+IMAX-I+2
74    22 CONTINUE
75    DO 24 I=1,IMAX
76    DO 23 J=1,I
77    J1=IN(I)+J
78    J2=JN(J)+I-J+1
79    B(J2)=A(J1)
80    23 CONTINUE
81    24 CONTINUE
82    WRITE(6,2008)      B(1),B(NEQUI)
83    2008 FORMAT(1H ,9X,2(E12.5,2X,E12.5,5X))
84    CALL GAUSS3(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,IMAX,A,AA,
      1AI,B,C,IN,JN,S,SUM)
85    RETURN
86    END

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE GAUSS3 |
| 1 | | SUBROUTINE GAUSS3(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NE@UI, IMA |
| | | 1, A, AA, AI, B, C, IN, JN, S, SUM) |
| 2 | | DIMENSION IC(3), IO(2) |
| 3 | | DIMENSION A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NE@UI), C(NN), IN(NN), JN |
| | | 1(NBAND), S(NBAND), SUM(NBAND) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO |
| 5 | | COMPLEX A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM |
| 6 | | WRITE(6, 2100) INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NE@UI |
| 7 | 2100 | FORMAT(1H, 9X, 7(15, 5X)) |
| 8 | | WRITE(6, 2007) B(1), B(NE@UI) |
| 9 | 2007 | FORMAT(1H, 9X, 2(E12.5, 2X, E12.5, 5X)) |
| 10 | | DO 16 I=1, IMA |
| 11 | | LL=MBAND+I |
| 12 | | JJ=JN(I)+1 |
| 13 | | AA(I)=B(JJ) |
| 14 | | B(JJ)=CSQRT(B(JJ)) |
| 15 | | IF(LL-IC(1)) 3, 1, 3 |
| 16 | | 1 DO 2 J=I, IMA |
| 17 | | SUM(J)=(0., 0.) |
| 18 | | 2 CONTINUE |
| 19 | | SUM(I)=B(JJ) |
| 20 | | 3 C(I)=C(I)/B(JJ) |
| 21 | | S(I)=S(I)/B(JJ) |
| 22 | | IF(I-IMA) 4, 11, 11 |
| 23 | | 4 JMIN=JN(I)+2 |
| 24 | | JMAX=JN(I)+IMA-I+1 |
| 25 | | DO 6 J=JMIN, JMAX |
| 26 | | B(J)=B(J)/B(JJ) |
| 27 | | IF(LL-IC(1)) 6, 5, 6 |
| 28 | | 5 SUM(I)=SUM(I)+B(J) |
| 29 | | 6 CONTINUE |
| 30 | | KMIN=I+1 |
| 31 | | DO 10 K=KMIN, IMA |
| 32 | | J1=JN(I)+K-I+1 |
| 33 | | J2=JN(K) |
| 34 | | DO 9 J=K, IMA |
| 35 | | J3=JN(I)+J-I+1 |
| 36 | | J4=J2+J-K+1 |
| 37 | | B(J4)=B(J4)-B(J1)*B(J3) |
| 38 | | IF(LL-IC(1)) 9, 7, 9 |
| 39 | | 7 SUM(K)=SUM(K)+B(J4) |
| 40 | | IF(J-K) 8, 9, 8 |
| 41 | | 8 SUM(J)=SUM(J)+B(J4) |
| 42 | | 9 CONTINUE |
| 43 | | C(K)=C(K)-B(J1)*C(I) |
| 44 | | S(K)=S(K)-B(J1)*S(I) |
| 45 | | 10 CONTINUE |
| 46 | | 11 IF(LL-IC(1)) 16, 12, 16 |
| 47 | | 12 WRITE(6, 2000) NGEN, NBAND |
| 48 | 2000 | FORMAT(1H1, 10X, 10HDIMENSION=, 15, 5X, 6HWIDTH=, 13, //3X, 3HNO., 10X, 15HS |
| | | 1UM(RIGHT-SIDE), 28X, 8HSUMCHECK, 27X, 12HSUM=SUMCHECK) |
| 49 | | MINE=0 |
| 50 | | DO 15 J=1, IMA |
| 51 | | SS=SUM(J)-S(J) |
| 52 | | JL=MBAND+J |
| 53 | | IF(MINE=60) 14, 13, 13 |

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( GAUSS3 )
54    13 MINE=0
55    WRITE (6,2000) NGEN,NBAND
56    14 WRITE (6,2001) JL,SUM(J),S(J),SS
57    2001 FORMAT(1X,15,3(5X,1H(,1PE14.7,2X,1PE14.7,2H)))
58    MINE=MINE+1
59    15 CONTINUE
60    IF(IC(2).GE.IC(1)+IC(3)) IC(1)=IC(1)+IC(3)
61    16 CONTINUE
62    IO1=4*IMAX
63    IO2=IMAX*(IMAX+1)/2
64    IO3=NGEN-IMAX+1
65    II=IO(IO)
66    WRITE (II) IO3,(A(J),AA(J),C(J),S(J),J=1,IMAX)
67    DO 24 J=1,IO2,10000
68    K2=J
69    IF(J+9999-IO2) 22,21,21
70    21 K3=IO2
71    GO TO 23
72    22 K3=J+9999
73    23 WRITE (II) (B(K),K=K2,K3)
74    24 CONTINUE
75    ENDFILE II
76    REWIND II
77    WRITE (6,2004) NGEN,NBAND,IKO,IO3
78    2004 FORMAT(1H1,10X,10HDIMENSION=,15,5X,6HWIDTH=,15,5X,37HA NUMBER OF C
10EFFICIENT(ONE FORMULA)=,15,7,10X,17HLAST FORMULA NO.=,110)
79    J1=NGEN-IMAX
80    DO 27 I=1,IMAX
81    J2=J1+1
82    A(J2)=C(I)
83    27 CONTINUE
84    II=IO(II0)
85    II=IO3-1
86    IF(II) 30,30,28
87    DO 29 I=1,II
88    READ(II)
89    29 CONTINUE
90    30 CONTINUE
91    CALL BAKCA1(INCORE,INCAL,NGEN,NBAND,NBAND5,NN,NEQUI,IMAX,A,AA,
1AI,B,C,IN,JN,S,SUM)
92    RETURN
93    END

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM |
|-----|-------|--|
| | C | SUBROUTINE BAKCA1 |
| 1 | | SUBROUTINE BAKCA1(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI, IMAX 1, A, AA, AI, B, C, IN, JN, S, SUM) |
| 2 | | DIMENSION IC(3), IO(2) |
| 3 | | DIMENSION A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NEQUI), C(NN), IN(NN), JN 1(NBAND), S(NBAND), SUM(NBAND) |
| 4 | | COMMON /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO |
| 5 | | COMPLEX A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM |
| 6 | | WRITE(6, 2100) INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQUI |
| 7 | 2100 | FORMAT(1H, 9X, 7(15, 5X)) |
| 8 | | DO 4 I=1, IMAX |
| 9 | | J1=NGEN-I |
| 10 | | J2=IMAX-I+1 |
| 11 | | JJ=JN(J2) |
| 12 | | IF(I-1) 3, 3, 1 |
| 13 | 1 | DO 2 J=2, I |
| 14 | | J3=J1+J |
| 15 | | J4=JJ+J |
| 16 | | A(J1+1)=A(J1+1)-B(J4)*A(J3) |
| 17 | 2 | CONTINUE |
| 18 | 3 | A(J1+1)=A(J1+1)/B(JJ+1) |
| 19 | 4 | CONTINUE |
| 20 | | MBAND=NGEN-IMAX+1 |
| 21 | | RETURN |
| 22 | | END |

36

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM
   C  SUBROUTINE  BAKCA2
   1  SUBROUTINE  BAKCA2(INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQ01, A, AA
      1, AI, B, C, IN, JN, S, SUM)
   2  DIMENSION  IC(3), IO(2)
   3  DIMENSION  A(INCORE), AA(NBAND5), AI(NN), B(NEQ01), C(NN), IN(NN), JN
      1(NBAND), S(NBAND), SUM(NBAND)
   4  COMMON  /COMO/ IC, IO, IDIAG, IM, MG, IIO, N1, N2, IJ, MBAND, SS, IKO
   5  COMPLEX  A, AA, AI, B, C, S, SS, SUM
   6  WRITE(6, 2100)  INCORE, INCAL, NGEN, NBAND, NBAND5, NN, NEQ01
   7  2100  FORMAT(1H, 9X, 7(15, 5X))
   8  I2=MBAND
   9  I1=IC(IIO)
  10  1  J1=NGEN+1
  11  J2=NGEN+MINO(NBAND, NGEN-I2+2)
  12  I2=I2-1
  13  READ (I1) LL, SS, SS, (A(I), I=J1, J2), A(I2)
  14  IF(I2-LL) 10, 11, 10
  15  10  WRITE (6, 2003) I1, LL, I2
  16  2003  FORMAT(1H1, 4X, 18HPHYSICAL FILE NO. =, 15, 5X, 12HFORMULA NO. =, 15, 5X, 25
      1HCALCULATING SOLUTION NO. =, 15)
  17  STOP
  18  11  J3=J2-NGEN
  19  DO 12 I=2, J3
  20  J4=NGEN+I
  21  J5=I2+I-1
  22  A(I2)=A(I2)-A(J4)*A(J5)
  23  12  CONTINUE
  24  A(I2)=A(I2)/A(NGEN+1)
  25  BACKSPACE II
  26  BACKSPACE II
  27  GO TO 14
  28  19  WRITE(6, 18)  (A(I), I=1, NGEN)
  29  18  FORMAT(1H, /, 21(6X, 3(E12.5, 2X, E12.5, 5X), E12.5, 2X, E12.5, /))
  30  REWIND 20
  31  READ(20)
  32  WRITE(20)  (A(I), I=1, NGEN)
  33  WRITE(6, 2006)  IN
  34  2006  FORMAT(1H, /, 3(5X, 15(15, 3X), /))
  35  17  RETURN
  36  14  IF(I2=1) 19, 19, 1
  37  END

```


FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO      SOURCE PROGRAM
1    C          SUBROUTINE      EMC
      C          SUBROUTINE      EMC(MAXNSE,MAXMSE,MAXNPE,MAXMPE,MAXNCV,MAXNRV,MPE)
      C          DIMENSION      RG(MAXNSE),ZG(MAXNSE),THETA(MAXNPE),CUPV(MAXMSE),MSE(MA
      C          1XNSE,3),AR(MAXNSE,3),AZ(MAXNSE,3),IFD(MAXMSE,MAXMPE,4),INR(MAXNSE,
      C          1MAXNPE)
2    C          DIMENSION      RG( 234),ZG( 234),THETA( 2),CUPV( 130),MSE(
      C          1 234,3),AR( 234,3),AZ( 234,3),IFD( 130, 3,4),INR( 234,
      C          1 2)
3    C          COMPLEX        HSPRO,HSPTO,HSPZO,HVPRO,HVPTO,HVPZO,CURR1,CURR2,CURT1,
      C          1CURT2,CURZ1,CURZ2
      C          COMPLEX        POT(MAXMSE,MAXMPE,4),HR(MAXNSE,MAXNPE),HT(MAXNSE,MAXNP
      C          1E),HZ(MAXNSE,MAXNPE),CURR(MAXNSE,MAXNPE),CURT(MAXNSE,MAXNPE),CURZ(
      C          1MAXNSE,MAXNPE),X(MAXNCV)
4    C          COMPLEX        POT( 130, 3,4),HR( 234, 2),HT( 234,
      C          12),HZ( 234, 2),CURR( 234, 2),CURT( 234, 2),CURZ(
      C          1 234, 2),X( 501)
      C          DIMENSION      NCV2(MPE),NRM(MPE),NRV(MPE,MAXNCV),A(MPE,MAXNCV),B(M
      C          1PE)
5    C          DIMENSION      NCV2(12),NRM(12),NRV(12,96),A(12,96),B(12)
6    C          COMPLEX        A,B,C1,C2,CUR
7    C          REWIND        20
8    C          READ(20)      RG,ZG,THETA,AR,AZ,CUPV,MSE,IFD,INR
9    C          READ(20)      X
10   C          DO 50        I=1,MAXMSE
11   C          DO 50        J=1,MAXMPE
12   C          DO 50        K=1,4
13   C          NCV=IFD(I,J,K)
14   C          IF(NCV)      30,20,10
15   C          10 POT(I,J,K)=X(NCV)
16   C          GO TO 50
17   C          20 POT(I,J,K)=0.
18   C          GO TO 50
19   C          30 IF(K.NE.2) GO TO 40
20   C          NCV1=IFD(I,J,4)
21   C          POT(I,J,K)=-CUPV(I)*X(NCV1)
22   C          GO TO 50
23   C          40 NCV1=IFD(I,J,2)
24   C          POT(I,J,K)=-CUPV(I)*X(NCV1)
25   C          50 CONTINUE
26   C          DO 70        I=1,MAXMSE
27   C          WRITE(6,60)  I,((POT(I,JO,KO),KO=1,4),JO=1,MAXMPE)
28   C          60 FORMAT(1H ,5X,14,3X,4(E12.5,2X,E12.5,3X),/,13X,4(E12.5,2X,E12.5,3X
      C          1),/,13X,4(E12.5,2X,E12.5,3X))
29   C          70 CONTINUE
30   C          CUR=(0.,0.)
31   C          DO 110       I=1,MAXNSE
32   C          DO 110       J=1,MAXNPE
33   C          HSPRO=(0.,0.)
34   C          HSPTU=(0.,0.)
35   C          HSPZO=(0.,0.)
36   C          HVPRO=(0.,0.)
37   C          HVPTU=(0.,0.)
38   C          HVPZO=(0.,0.)
39   C          CURR1=(0.,0.)
40   C          CURT1=(0.,0.)
41   C          CURZ1=(0.,0.)
42   C          CURR2=(0.,0.)

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST

```

ISN  ST-NO          SOURCE PROGRAM      ( EMC  )
43      CURT2=(0.,0.)
44      CURZ2=(0.,0.)
45      DO 80 K=1,3
46      I1=MSE(I,K)
47      HSPRO=HSPRO+AR(I,K)*(POT(I1,J,1)+POT(I1,J+1,1))
48      HSPT0=HSPT0+POT(I1,J+1,1)-POT(I1,J,1)
49      HSPZ0=HSPZ0+AZ(I,K)*(POT(I1,J,1)+POT(I1,J+1,1))
50      IF(INR(I,J).EQ.0) GO TO 80
51      HVPRO=HVPRO+POT(I1,J,2)+POT(I1,J+1,2)
52      HVPT0=HVPT0+POT(I1,J,3)+POT(I1,J+1,3)
53      HVPZ0=HVPZ0+POT(I1,J,4)+POT(I1,J+1,4)
54      CURR1=CURR1+POT(I1,J+1,4)-POT(I1,J,4)
55      CURR2=CURR2+AZ(I,K)*(POT(I1,J,3)+POT(I1,J+1,3))
56      CURT1=CURT1+AZ(I,K)*(POT(I1,J,2)+POT(I1,J+1,2))
57      CURT2=CURT2+AR(I,K)*(POT(I1,J,4)+POT(I1,J+1,4))
58      CURZ1=CURZ1+AR(I,K)*(POT(I1,J,3)+POT(I1,J+1,3))
59      CURZ2=CURZ2+POT(I1,J+1,2)-POT(I1,J,2)
60      80 CONTINUE
61      RGT=RG(I)*THETA(J)*3.
62      HR(I,J)=HSPRO/2.
63      HT(I,J)=HSPT0/RGT
64      HZ(I,J)=HSPZ0/2.
65      INRO=INR(I,J)
66      IF(INRO.NE.0) GO TO 90
67      CURR(I,J)=(0.,0.)
68      CURT(I,J)=(0.,0.)
69      CURZ(I,J)=(0.,0.)
70      GO TO 95
71      90 HR(I,J)=HR(I,J)+HVPRO/6.
72      HT(I,J)=HT(I,J)+HVPT0/6.
73      HZ(I,J)=HZ(I,J)+HVPZ0/6.
74      CURR(I,J)=CURR1/RGT-CURR2/2.
75      CURT(I,J)=(CURT1-CURT2)/2.
76      CURZ(I,J)=(HVPT0/RG(I))/5.+CURZ1/2.-CURZ2/RGT
77      95 WRITE(6,100) I,J,RG(I),ZG(I),HR(I,J),HT(I,J),HZ(I,J),CURR(I,J)
78      1,CURT(I,J),CURZ(I,J)
79      100 FORMAT(1H ,2X,14,3X,14,3X,2(E12.5,3X),3(E12.5,1X,E12.5,3X),/,47X,3
80      1(E12.5,1X,E12.5,3X))
81      IF(J.NE.1) GO TO 110
82      CUR=CUR+CURT(I,1)
83      110 CONTINUE
84      WRITE(6,120) CUR
85      120 FORMAT(1H ,5X,4HCUR=,E12.5,2X,E12.5)
86      DO 160 I=1,MAXMSE
87      I1=10*I-9
88      READ(30,I1) NCM,(NCV2(J),NRM(J),(NRV(J,K),A(J,K),K=1,MAXNRV),B(
89      1J),J=1,MPE)
90      IF(NCM.LE.0) GO TO 160
91      DO 150 J=1,NCM
92      C1=(0.,0.)
93      K1=NRM(J)
94      IF(K1.LE.0) GO TO 150
95      DO 130 K=1,K1
96      K2=NRV(J,K)
97      C1=C1+A(J,K)*X(K2)
98      130 CONTINUE
99      C2=C1-B(J)

```

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT2) SOURCE PROGRAM LIST ³⁹

| ISN | ST-NO | SOURCE PROGRAM (EMC) |
|-----|-------|--|
| 97 | | WRITE(6,140) NCV2(J),C1,B(J),C2 |
| 98 | 140 | FORMAT(1H,9X,15,5X,3(E12.5,2X,E12.5,5X)) |
| 99 | 150 | CONTINUE |
| 100 | 160 | CONTINUE |
| 101 | | RETURN |
| 102 | | END |

FACOM 230-75 GLIED (V-01.L-07) ⁴⁰ -760610-

```

NAME NNAME,ENTRY=ELM(FTMAIN),OVLY
DOMAIN HCM,RWX,OVLY
CALL PRVLIB,SSL
INPUT RELBIN
* PGSLIB
* COMLIB
* PLTLIB
SGMT SEG1
SELECT (FTMAIN)
SGMT SEG2,CHN=SEG1
SELECT (FEM,MFD1,MFD2,ISF)
SGMT SEG3,CHN=SEG1
SELECT (ATM,AEM)
SGMT SEG4,CHN=SEG1
SELECT (CTM,INPUT1,INPUT2,GAUSS1,GAUSS2,GAUSS3,BAKCA1,BAKCA2)
SGMT SEG5,CHN=SEG1
SELECT (EMC)
FIN
    
```

付録 V. ベクトル・ポテンシャル法の改良

外部ベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{A}}^{(e)}$ を次の様に定義する。

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{A}}^{(e)} = \dot{\mathbf{i}}^{(e)} \quad (\text{V-1})$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}}^{(e)} = 0 \quad (\text{V-2})$$

すでによく知られている通り，上式を満足する $\dot{\mathbf{A}}^{(e)}$ は次式で与えられる。

$$\dot{\mathbf{A}}^{(e)} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\dot{\mathbf{i}}^{(e)}}{r} dV \quad (\text{V-3})$$

この $\dot{\mathbf{A}}^{(e)}$ を用いて，ベクトル・ポテンシャル $\dot{\mathbf{a}}$ を新たに定義する。

$$\dot{\mathbf{a}} = \dot{\mathbf{A}} - \dot{\mathbf{A}}^{(e)} \quad (\text{V-4})$$

上式の $\dot{\mathbf{A}}$ を基礎方程式(13)，(16)に代入して次式を得る。

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{a}} + j \omega \sigma (\dot{\mathbf{a}} + \nabla \dot{\Phi}) = -j \omega \sigma \dot{\mathbf{A}}^{(e)} \quad (\text{V-5})$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{a}} + \nabla^2 \dot{\Phi} = 0 \quad (\text{V-6})$$

この場合のエネルギー汎関数 $\dot{I}(\dot{\mathbf{a}}, \dot{\Phi})$ は次の様になる。

$$\begin{aligned} \dot{I}(\dot{\mathbf{a}}, \dot{\Phi}) = & \sum_{V^{(e)}} \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{a}}) + \frac{j \omega \sigma}{2} (\dot{\mathbf{a}} + \nabla \dot{\Phi})^2 \right. \\ & \left. + j \omega \sigma \dot{\mathbf{A}}^{(e)} \cdot (\dot{\mathbf{a}} + \nabla \dot{\Phi}) \right] dV \quad (\text{V-7}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} = & \sum_{V^{(e)}} \int_{V^{(e)}} \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times \nabla \times \dot{\mathbf{a}}) + \frac{j \omega \sigma}{2} (\dot{\mathbf{a}} + \nabla \dot{\Phi})^2 + j \omega \sigma \dot{\mathbf{A}}^{(e)} \cdot \dot{\mathbf{a}} \right] dV \\ & + \sum_{S^{(e)}} \int_{S^{(e)}} j \omega \sigma \dot{\Phi} \dot{\mathbf{A}}^{(e)} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{V-8}) \end{aligned}$$

有限要素が真空の場合，上式の σ を零とおくだけでよい。又， $S^{(e)}$ を共有する有限要素の媒質が同一の導電率を有する時，この有限要素同志の寄与が相殺されるため，上式のこの面に関する面積分の項はなくなる。

エネルギー汎関数 $\dot{I}(\dot{\mathbf{a}}, \dot{\Phi})$ を停留にする $\dot{\mathbf{a}}, \dot{\Phi}$ は，明らかに，基本方程式(式(V-5)と式(V-6))と第2.1.1節に述べた境界条件を満足する。