

JAERI-M

6693

位置不安定性に対する真空容器のシェル効果

(JT-4設計報告・III)

1976年9月

横溝英明\*・関省吾・狐崎晶雄  
松田俊明・斉藤龍太\*\*

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.

位置不安定性に対する真空容器のシェル効果

(JT-4 設計報告・Ⅲ)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

横溝英明\*・関 省吾・狐崎晶雄・松田俊明・斎藤龍太\*\*

(1976年8月4日受理)

縦長楕円断面トカマクにおいて、垂直方向位置不安定性のフィードバック制御安定化を考える時に必要となる真空容器の安定化効果(シェル効果)を、任意の断面形状を有する容器について、数値的に求めた。また、その時用いた数値解析法の妥当性を、円形断面容器の場合を用いて確認した。

---

\* 特別研究生；東京大学

\*\* 外来研究員；三菱電機株式会社

Shell Effects of Vacuum Vessel for the Positional Instability

Hideaki YOKOMIZO,<sup>\*</sup> Shogo SEKI, Akio KITSUNEZAKI, Toshiaki MATSUDA  
and Ryuta SAITO<sup>\*\*</sup>

Division of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

( Received August 4, 1976 )

Shell effects are important to stabilize the positional instability of a tokamak plasma with a non-circular cross section. Numerical calculations of the shell effects of the vacuum vessels with circular and rectangular cross sections are presented. The numerical method is assessed by comparing the calculated results of the vacuum vessels with a circular cross section with the analytical ones.

---

\* University of Tokyo

\*\* On leave from Mitsubishi Electric Co. Ltd.

## 目 次

1 序 論 .....	1
2 位置不安定性の安定化要素 .....	1
2-1 プラズマ柱を囲む導体群のシェル効果 .....	1
2-2 フィードバック安定化 .....	3
3 リングモデルによるシェル効果の計算 .....	5
3-1 シェル効果の計算方法 .....	5
3-2 プラズマ柱の運動の表現方法 .....	6
4 矩形断面容器 .....	11
5 円形断面容器による検算 .....	16
6 結 論 .....	21
附録 「SEEPIC」マニュアルおよびリスト .....	22

## 1 序 論

トカマク型装置において、プラズマ断面形状が縦長楕円形となる様な MHD 平衡を得る為には、外部より印加する垂直磁場  $B_V$  の曲率指数；

$$n = - \frac{R}{B_V} \left. \frac{\partial B_V}{\partial R} \right|_{R=R_p} \quad (1)$$

を、負にしなければならない。<sup>1)</sup> しかるに、この様な条件を満たす垂直磁場 ( $n < 0$ ) でのトカマクプラズマは、垂直方向の摂動に対して不安定である (位置不安定性)。従って、安定平衡なプラズマ放電を得るためには、何らかの方法で、この位置不安定性を抑制する必要がある。安定化効果の期待できる要素としては、

a) プラズマ柱を囲む導体系のシェル効果

b) フィードバック制御

などが考えられる<sup>2)</sup>。

本報告では、真空容器、あるいはライナによる安定化効果の大きさを数値的に計算し、フィードバック制御の検討資料を得る。

第2章では、プラズマ位置を安定化するために必要な条件を概説する。第3章では、真空容器の安定化効果を計算するための方法を説明する。第4章では、矩形断面容器についての計算結果を示し、その断面形状に依存する安定性について議論する。また、そのとき容器に流れる電流分布を、解析的に予想される電流分布と比較する。第5章では、本報告で用いた数値計算法の妥当性を調べるために、円形断面容器の場合の数値計算を行ない、直円筒容器の場合の解析結果と比較する。

数値計算コードを、附録に記載した。

## 2 位置不安定性の安定化要素

### 2-1 プラズマ柱を囲む導体群のシェル効果

トカマク型装置には、プラズマ柱の周囲に真空容器、ライナ、ポロイダル磁場コイル、トロイダル磁場コイルなどの金属物質が存在する。この様な導体に囲まれた中で、電流が流れているプラズマ柱が運動すると、それらの導体には、誘導電流が流れる。この電流は、プラズマ柱の運動を妨げる方向に流れる。これがシェル効果である。今後建設が予定される様な、放電持続時間が数秒の長さを持つトカマクにおいては、これらの導体群は、有限の導電率を持った導体として取り扱う必要がある<sup>3)</sup>。

今、図1-(a)のように、プラズマ柱が上下方向に  $Z(t)$  だけ変位したとする。導体群としては、真空容器一種類だけしか存在しない場合を考える。この容器の等価的自己インダクタンス、および、抵抗を、各々、 $L_S$ 、 $R_S$  とし、容器とプラズマ電流の上下運動との等価相互インダクタンスを  $M_{PS}$  とすると、プラズマ柱の変位によって導体に誘導される双極子誘導電流  $I_S(t)$  は、図1-(b)に示したよう

## 1 序 論

トカマク型装置において、プラズマ断面形状が縦長楕円形となる様な MHD 平衡を得る為には、外部より印加する垂直磁場  $B_V$  の曲率指数；

$$n = - \frac{R}{B_V} \frac{\partial B_V}{\partial R} \Big|_{R=R_p} \quad (1)$$

を、負にしなければならない。<sup>1)</sup> しかるに、この様な条件を満たす垂直磁場 ( $n < 0$ ) でのトカマクプラズマは、垂直方向の摂動に対して不安定である (位置不安定性)。従って、安定平衡なプラズマ放電を得るためには、何らかの方法で、この位置不安定性を抑制する必要がある。安定化効果の期待できる要素としては、

a) プラズマ柱を囲む導体系のシェル効果

b) フィードバック制御

などが考えられる<sup>2)</sup>。

本報告では、真空容器、あるいはライナによる安定化効果の大きさを数値的に計算し、フィードバック制御の検討資料を得る。

第2章では、プラズマ位置を安定化するために必要な条件を概説する。第3章では、真空容器の安定化効果を計算するための方法を説明する。第4章では、矩形断面容器についての計算結果を示し、その断面形状に依存する安定性について議論する。また、そのとき容器に流れる電流分布を、解析的に予想される電流分布と比較する。第5章では、本報告で用いた数値計算法の妥当性を調べるために、円形断面容器の場合の数値計算を行ない、直円筒容器の場合の解析結果と比較する。

数値計算コードを、附録に記載した。

## 2 位置不安定性の安定化要素

### 2-1 プラズマ柱を囲む導体群のシェル効果

トカマク型装置には、プラズマ柱の周囲に真空容器、ライナ、ポロイダル磁場コイル、トロイダル磁場コイルなどの金属物質が存在する。この様な導体に囲まれた中で、電流が流れているプラズマ柱が運動すると、それらの導体には、誘導電流が流れる。この電流は、プラズマ柱の運動を妨げる方向に流れる。これがシェル効果である。今後建設が予定される様な、放電持続時間が数秒の長さを持つトカマクにおいては、これらの導体群は、有限の導電率を持った導体として取り扱う必要がある<sup>3)</sup>。

今、図1-(a)のように、プラズマ柱が上下方向に  $Z(t)$  だけ変位したとする。導体群としては、真空容器一種類だけしか存在しない場合を考える。この容器の等価的自己インダクタンス、および、抵抗を、各々、 $L_S$ 、 $R_S$  とし、容器とプラズマ電流の上下運動との等価相互インダクタンスを  $M_{PS}$  とすると、プラズマ柱の変位によって導体に誘導される双極子誘導電流  $I_S(t)$  は、図1-(b)に示したよう

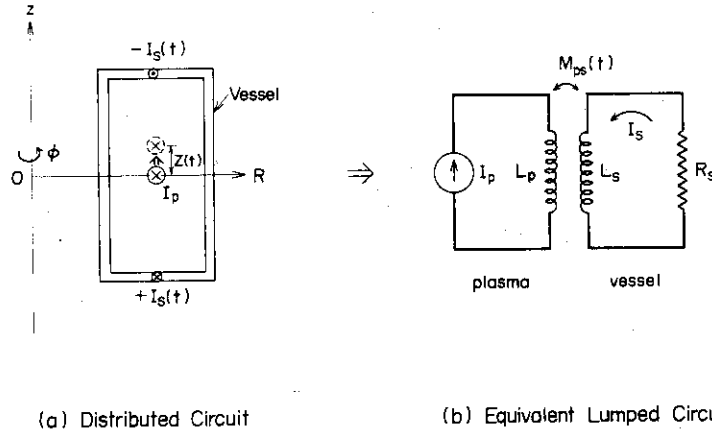


図1 トカマク装置におけるプラズマと真空容器。(a)プラズマ柱が垂直方向に移動すると、真空容器には、 $\pm I_s$  の誘導電流が流れる。(b)真空容器を1対のコイルに置き換えたときの等価的集中定数回路。

に、電気回路的に、次のように表わされる。

$$L_s \frac{d I_s(t)}{dt} + R_s I_s(t) = - \frac{d M_{ps}}{dt} I_p \quad (2)$$

プラズマ電流  $I_p$  は、プラズマ柱の上下運動に対しては、ポロイダル磁束保存則より一定である。プラズマ柱の変位が十分に小さく ( $Z(t)/a_p \ll 1$ )、線型理論が成り立つとすると、

$$\frac{d M_{ps}}{dt} = \left. \frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} \right|_{Z=0} \frac{d Z}{dt} \quad (3)$$

と、記せる。式(2)、(3)をラプラス変換し、双極子誘導電流  $I_s(s)$  を求めると、

$$I_s(s) = - \left. \frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} \right|_{Z=0} \frac{1}{L_s} \frac{s \tau_s}{1+s \tau_s} Z(s) I_p \quad (4)$$

となる。但し、 $\tau_s$  は容器の時定数に対応し、

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (5)$$

である。

この双極子誘導電流  $I_s$  により、プラズマ中心に作られる水平磁場  $B_R^{ex}$  は、その比例係数を  $\nu_s$  とすれば、

$$\begin{aligned} B_R^{ex}(s) &\equiv \nu_s I_s(s) \\ &= -n_s \frac{B_{v0}}{R_p} \frac{s \tau_s}{1+s \tau_s} Z(s) \end{aligned} \quad (6)$$



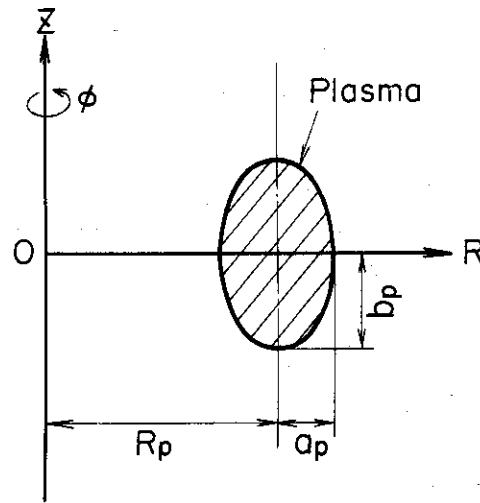


図2 プラズマ断面と座標系。非円形断面プラズマの平均副半径は  $\bar{a}_p = \sqrt{a_p b_p}$  とする。

となる。ここで、

$$n_s = \nu_s \left| \frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} \right|_{Z=0} \frac{I_p}{L_s} \frac{R_p}{B_{v_0}}$$

$$= \nu_s \left| \frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} \right|_{Z=0} \frac{4 \pi R_p^2}{\mu_c L_s A_0} \quad (7)$$

$$B_{v_0} = \frac{\mu_0 I_p A_0}{4 \pi R_p} \quad (8)$$

であり、 $A_0$ は、円形断面プラズマの場合

$$A_0 = \ell n \frac{8 R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2} \quad (9)$$

で与えられる<sup>3)</sup>。

### 2-2 フィードバック安定化

さらに、フィードバック制御による安定化を考える。フィードバック・ループの特性を、 $N_c(s) \frac{B_{v_0}}{R_p}$ とすると、トカマク・プラズマ柱の垂直方向変位を表わすブロック線図は、図3のように書ける。図3-(b)中の $\tau_0$ は、MHD不安定性の特征的な時間であり、

$$\tau_0^2 = \frac{1}{\Gamma_0^2} = \frac{\pi \bar{a}_p^2 \rho R_p}{I_p B_{v_0}} \quad (10)$$

と書ける。ここで、 $\rho$ はプラズマ密度、 $\bar{a}_p$ はプラズマの平均副半径である。 $n_s$ は容器のシェル効果を表わす指数であり、式(7)から分る様に、この量は、プラズマの諸量にはあまり依存せず、容器の幾何学的量で決まる。

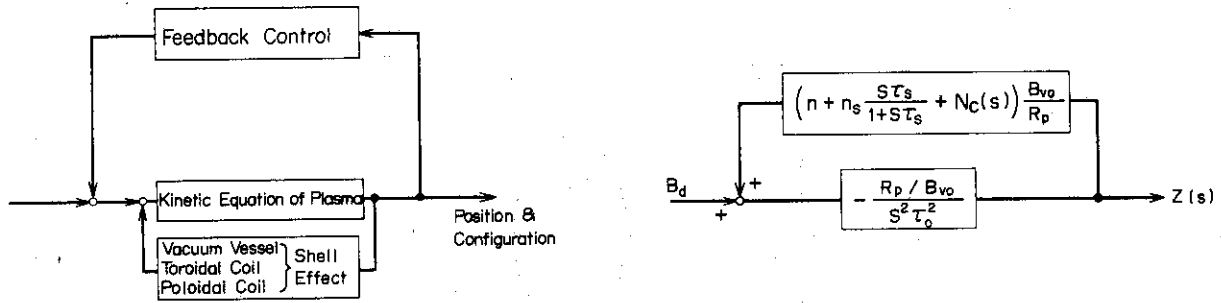


図3 プラズマ位置（と断面形状）制御のブロック線図。

図3から、系の特性方程式を求めると

$$s^2 \tau_o^2 = - \left( n + n_s \frac{s \tau_s}{1 + s \tau_s} + N_c(s) \right) \quad (11)$$

となる。式(11)から、フィードバック制御安定化の条件が概算できる。

i)  $s \tau_s \gg 1$  の時、式(11)は

$$s^2 \tau_o^2 = - (n + n_s + N_c(s)) \quad (12)$$

と書けるので、フィードバック制御系の周波数特性が悪く、その利得が期待できない場合 ( $N_c(s) = 0$ ) でも、系が安定であるためには、

$$n + n_s > 0 \quad (13)$$

であることが要請される。

ii)  $s \tau_s \rightarrow 0$  の時、式(11)は、

$$s^2 \tau_o^2 = - (n + N_c(o)) \quad (14)$$

故に、系を安定にするためには、

$$n + N_c(o) > 0 \quad (15)$$

であることが要請される。

フィードバック制御系に、サイリスタゲート位相角制御電源を使用すると、その時定数は、最も早いもので1ms前後となると予想される。一方、図3で表わされる位置不安定性の成長率は、式(13)が満足される時、 $\tau_s^{-1}$ のオーダーである<sup>3)</sup>。従って、フィードバック制御のためには、容器の時定数として、

$$\tau_s \gg 1 \text{ms} \quad (16)$$

が、要求される。以上のことから、真空容器に要請されるプラズマ柱の位置安定化のための必要条件は、式(13)と(16)である。本報告は、真空容器が上記の条件を満足しているかどうか調べるために、容器のシェル効果の大きさを数値計算法によって求めることが、目的である。

実際のトカマク型装置では、プラズマ周囲の導体系として、真空容器のほかに更に多くものを考慮する必要があり、また、フィードバック制御系に対しては、その周波数特性まで考慮しなくてはならない。これらのことを考慮に入れた安全性に関する解析は、別途報告する予定である。

### 3 リングモデルによるシェル効果の計算

#### 3-1 シェル効果の計算方法

プラズマ柱を取り囲む導体群のうち、ポロイダルコイル等、コイル類のシェル効果については、コイルの位置さえ決定されれば、容易に求めることができる。しかし、真空容器、ライナ等は、分布定数回路であるので、その特性を一般的、かつ解析的に求めることは困難である。従って、分布定数回路となっているものに対しては、嶋田ら<sup>4)</sup>によって提案されたリングモデルによる解法を適用する。すなわち、図4に示したように、真空容器をトロイダル方向へ多数個のリングに分割し、その1本1本をコイルと考える。その各々について、自己インダクタンス  $L_i$ 、相互インダクタンス  $M_{ij}$ 、抵抗  $R_i$  を求め、最後に、その総和を求める方法である。

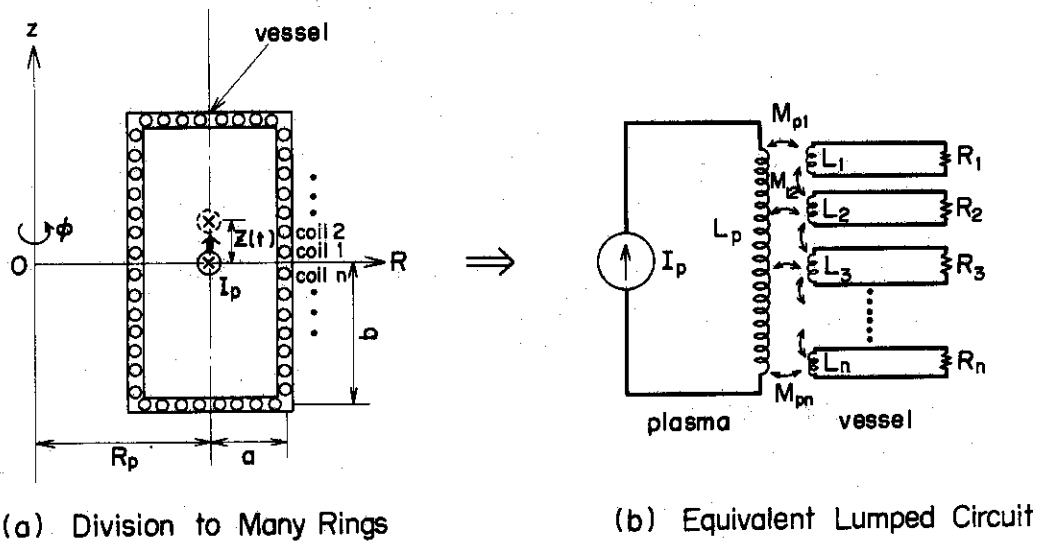


図4 真空容器を多数のリングに分割し、分布定数回路を等価的集中定数回路として取り扱う。(a)分布定数回路、(b)等価的集中定数回路。

図4-(b)に示した電気回路の過渡現象は、次の連立方程式で記述できる。

$$\begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & \\ \vdots & & & & \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & \cdots & L_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_1 & I_1 \\ R_2 & I_2 \\ \vdots & \\ R_n & I_n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \dot{M}_{p1} \\ \dot{M}_{p2} \\ \vdots \\ \dot{M}_{pn} \end{pmatrix} I_p \quad (17)$$

実際のトカマク型装置では、プラズマ周囲の導体系として、真空容器のほかに更に多くものを考慮する必要があり、また、フィードバック制御系に対しては、その周波数特性まで考慮しなくてはならない。これらのことを考慮に入れた安全性に関する解析は、別途報告する予定である。

### 3 リングモデルによるシェル効果の計算

#### 3-1 シェル効果の計算方法

プラズマ柱を取り囲む導体群のうち、ポロイダルコイル等、コイル類のシェル効果については、コイルの位置さえ決定されれば、容易に求めることができる。しかし、真空容器、ライナ等は、分布定数回路であるので、その特性を一般的、かつ解析的に求めることは困難である。従って、分布定数回路となっているものに対しては、嶋田ら<sup>4)</sup>によって提案されたリングモデルによる解法を適用する。すなわち、図4に示したように、真空容器をトロイダル方向へ多数個のリングに分割し、その1本1本をコイルと考える。その各々について、自己インダクタンス  $L_i$ 、相互インダクタンス  $M_{ij}$ 、抵抗  $R_i$  を求め、最後に、その総和を求める方法である。

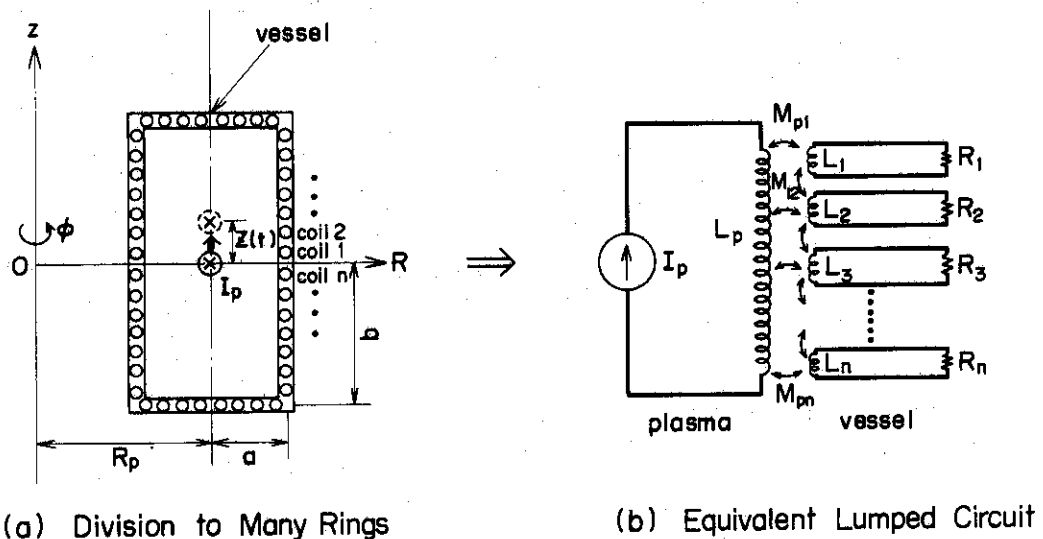


図4 真空容器を多数のリングに分割し、分布定数回路を等価的集中定数回路として取り扱う。(a)分布定数回路、(b)等価的集中定数回路。

図4-(b)に示した電気回路の過渡現象は、次の連立方程式で記述できる。

$$\begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & \\ \vdots & & & & \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & \cdots & L_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_1 & I_1 \\ R_2 & I_2 \\ \vdots & \\ R_n & I_n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \dot{M}_{p1} \\ \dot{M}_{p2} \\ \vdots \\ \dot{M}_{pn} \end{pmatrix} I_p \quad (17)$$

式(17)から、式(2)中の  $L_s$ 、 $R_s$ 、 $I_s$  は次のように定義できる。

$$L_s \equiv \frac{1}{I_s^2} \sum_{ij} (L_{ij} I_i^2 \delta_{ij} + M_{ij} I_i I_j) \quad (18)$$

$$R_s \equiv \frac{1}{I_s^2} \sum_i R_i I_i^2 \quad (19)$$

$$I_s \equiv \frac{1}{2} \sum_i |I_i| \quad (20)$$

さらに、式(2)(3)から

$$\frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} = - \frac{L_s \dot{I}_s + R_s I_s}{I_p \dot{Z}} \quad (21)$$

が求まる。また、各コイルに誘起される  $I_i$  によってプラズマ中心部に作られる磁場  $B_R^{\text{ex}}(i)$  も容易に計算されるので、式(6)で定義した比例定数  $\nu_s$  も

$$\nu_s \equiv \frac{1}{I_s} \sum_i B_R^{\text{ex}}(i) \quad (22)$$

と求まる。従って、真空容器のシュール効果を示す指数  $r_s$ 、 $n_s$  を式(5)(7)から得ることができる。

以上の計算を実行するにあたり、ADSL言語で書かれたコード「SEEPICCO」を用いた。コードリストは附録を参照されたい。ADSL言語は、時間経過に対して変数が連続的に変化する過程をシミュレーションするために開発されたものである<sup>5)</sup>。

### 3-2 プラズマ柱の運動の表現方法

数値計算を実行するためには、プラズマ柱の運動を等価的電気回路として、入力しなければならない。プラズマ運動の表わし方には、図5に示したような2種類のモデルが考えられる。

図5-(a)モデル1は、時刻  $t=0$  で中心にプラズマ柱を置き、その位置を時刻  $t$  の関数として動かすモデルである。このモデルでは、プラズマ柱を複数本に分け、空間的拡がりを持たせることができる。さらに、各々の模擬プラズマ柱に流す電流に、分布を持たせることも可能である。

図5-(b)モデル2は、 $\delta Z$  なるプラズマ柱の運動をプラズマ表面の双極子電流  $I_d$  に等価的に置き換える方法である<sup>6)</sup>。双極子電流  $I_d$  の大きさについては、次のように考える。

時間  $\delta t$  の間に、プラズマ柱が  $\delta t$  だけ微小変位したとすると、図5-(b)中の斜線で示した部分の面積  $\Delta S$  は、

$$\Delta S = 2 a_p \delta Z \quad (23)$$

である。 $a_p$  はプラズマ柱の副半径である。さらに、プラズマ電流が、プラズマ断面全体に一様に分布していると考えると、等価的双極子電流  $I_d$  の時間変化量は、

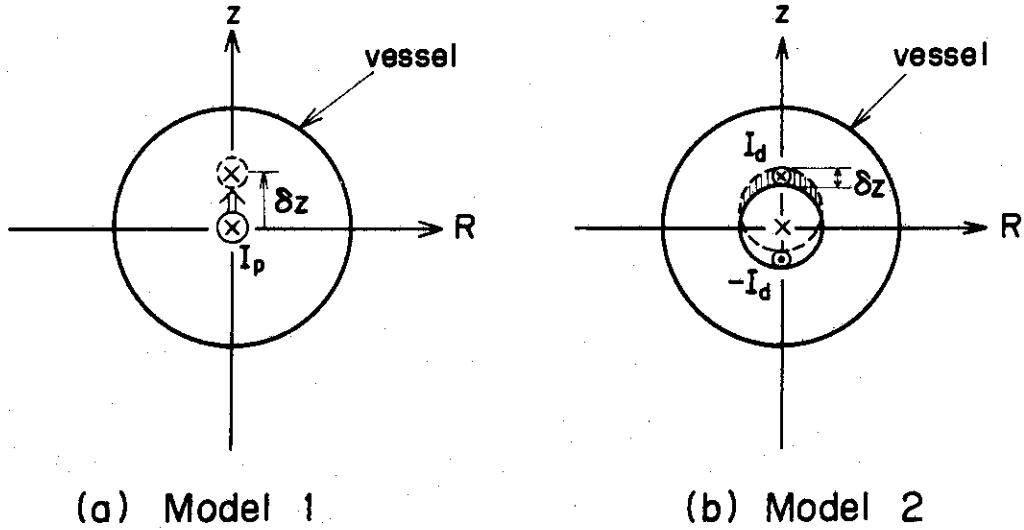
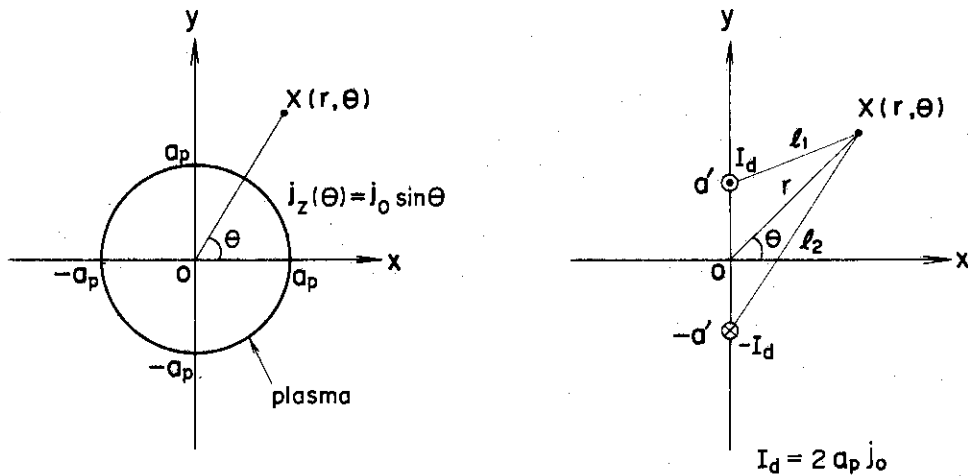


図5 プラズマ柱の運動の表現方法。(a)プラズマ位置を移動させる。  
(b)等価的双極子電流でプラズマ柱の変位を表現する。

$$\frac{d I_d}{d t} = \frac{I_p}{\pi a_p^2} \frac{\delta S}{\delta t} = \frac{2 I_p}{\pi a_p} \frac{\delta Z}{\delta t} \tag{24}$$

となる。この電流  $I_d$  を流すコイルを置くべき位置は、図5-(b)中の斜線で示した部分の、真空容器から見た幾何学的平均距離に相当する場所であって、次の様にして求められる。図6-(a)のように、プラズマ表面に  $j_z(\theta)$  の電流が流れたとき、プラズマ外部の点  $X(r, \theta)$  に作られるベクトルポテンシャル  $A_z(r, \theta)$  は、



(a) Plasma Surface Current (b) Equivalent Dipole Current

図6 プラズマ柱の運動を等価的双極子電流を使って表現する(モデル2)場合、双極子電流はプラズマ柱の運動を表現する幾何学的距離  $y = \pm a'$  に置かなくてはならない。

$$I_d = \int_0^\pi j_z(\theta) d\theta。$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \theta^2} = 0 \quad (25)$$

を満たす。  $r \rightarrow \infty$  及び  $r = a$  での境界条件を考慮して解くと、

$$A_z(r, \theta) = \frac{a_p^2}{2r} \mu_0 j_0 \sin \theta \quad (26)$$

となる。同様に、図6-(b)のように、双極子電流  $I_d$  が流れるときの、点  $X(r, \theta)$  におけるベクトルポテンシャルを求めると、

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0}{2\pi} [ I_d \ln \ell_1(\theta) - I_d \ln \ell_2(\theta) ] \quad (27)$$

ただし、

$$I_d = \int_0^\pi j(\theta) d\theta = 2 a_p j_0$$

$$\ell_1(\theta)^2 = r^2 + a'^2 - 2 a' r \sin \theta$$

$$\ell_2(\theta)^2 = r^2 + a'^2 + 2 a' r \sin \theta$$

従って  $a'/r \ll 1$  の場合には、式(27)は、

$$A_z(r, \theta) \approx \frac{2 a_p a'}{\pi r} \mu_0 j_0 \sin \theta \quad (28)$$

となる。式(26)と(28)を等しいとすると、

$$a' = \frac{\pi}{4} a_p \quad (29)$$

と求まる。この位置に双極子電流  $I_d$  を流せば、プラズマ柱の移動を等価的に表現することができる。

図5-(b)モデル2の場合、プラズマ柱の移動を示す等価的双極子コイルと真空容器の相互インダクタンスを  $M_{ds}$  とすると、 $M_{ds}$  は時間変化をしないので、回路方程式は、

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s = -M_{ds} \frac{dI_d}{dt} \quad (30)$$

と記せる。容器を分割した各リングと、等価双極子プラズマ柱との相互インダクタンスを  $M_{di}$  とすると

$$M_{ds} = \frac{1}{I_s} \sum_i M_{di} I_i \quad (31)$$

と書ける。プラズマ柱の移動に伴うプラズマ柱と容器との相互インダクタンスの変化率  $\frac{\partial M_{ps}}{\partial Z}$  は、式(2)、(3)及び式(24)、(30)を比較することにより、

$$\frac{\partial M_{ps}}{\partial Z} = \frac{2}{\pi a_p} M_{ds} \quad (32)$$

と、関係づけることができる。

モデル1の利点としては、プラズマ柱の断面形状、及び電流分布をかなり忠実に取り入れることができる点である。モデル2の利点としては、断面形状が複雑に時間変化をする場合でも多重極電流として容易に計算に取り入れることができること、また、充分時間が経過しても、プラズマ柱が真空容器に衝突することがない点である。

円形断面容器を用いて、プラズマ柱の運動の表現方法、モデル1と2の比較検討を行う。真空容器としては、図7に示したように、厚さ1 cm、副半径20 cmの容器を考え、その断面を48本のリングに分割した。主半径を0.6 m及び2.0 mに取ることにより、容器のアスペクト比 ( $R/a$ ) を3と100にした。プラズマ柱の移動速度は、1 cm/10 msec とする。プラズマ柱の位置は、図8に示したように、モデル1については、(a), (b), (c)の3種類計算した。

モデル2については、垂直方向の運動に対しては、(d-1)のように、水平方向の運動に対しては、(d-2)のように表現した。

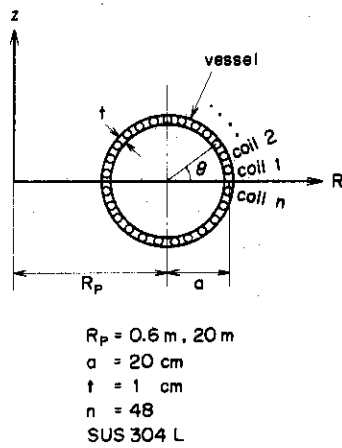


図7 円形断面容器と座標系。真空容器は、48本の等間隔に並べたリングで置き換える。

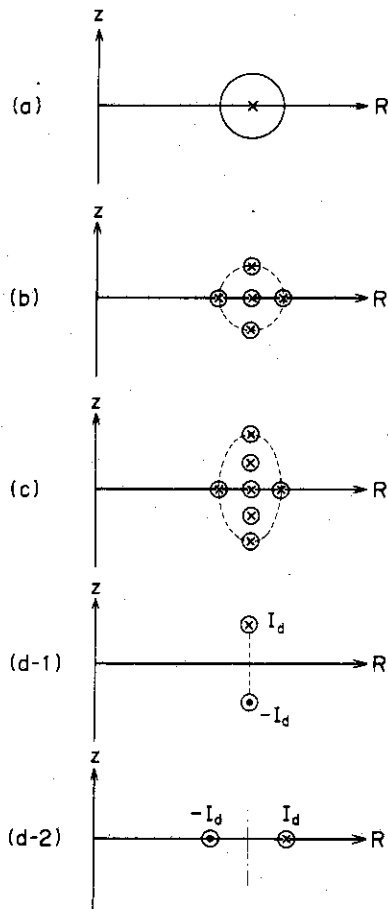


図8 プラズマ柱の表現、(a)~(c)がモデル1、(d)がモデル2による表現。

プラズマ柱が垂直方向、及び水平方向に運動した場合の真空容器の電気的特性値を表1に示した。参考のために、直円筒容器の場合の解析値も示した<sup>6)</sup>。すべてのパラメータについて、2%以下の誤



差で計算値が一致している。これから、プラズマ柱の運動を表現するモデル1, 及び, 2には, 数値計算の方法として有意な差は存在しないと言える。

表1. プラズマ運動入力モデル依存性

容器アスペクト比  $R/a=100$

運動方向 プラズマ	垂直方向 ( $\Delta Z$ )				水平方向 ( $\Delta R$ )				直円筒
	(a)	(b)	(c)	(d-1)	(a)	(b)	(c)	(d-2)	解析値
$L_s$ ( $\mu H$ )	60.2	60.2	61.7	61.3	60.5	60.3	59.0	61.1	62.0
$R_s$ ( $m\Omega$ )	41.4	41.4	42.5	42.2	41.7	41.5	40.6	42.1	41.5
$\tau_s$ (mS)	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.50
$\nu_s$ (T/MA)	1.57	1.57	1.59	1.58	1.57	1.57	1.55	1.58	1.57
$\frac{\partial M}{\partial X}$ ( $\mu H/m$ )	-197	-197	-200	-199	-198	-198	-196	-199	-197
$n_s$	2710	2710	2720	2720	2720	2720	2720	2720	2640

容器アスペクト比  $R/a=3$

運動方向 プラズマ	垂直方向 ( $\Delta Z$ )				水平方向 ( $\Delta R$ )				直円筒
	(a)	(b)	(c)	(d-1)	(a)	(b)	(c)	(d-2)	解析値
$L_s$ ( $\mu H$ )	1.61	1.60	1.65	1.64	1.75	1.75	1.71	1.77	1.86
$R_s$ ( $m\Omega$ )	1.22	1.21	1.25	1.24	1.22	1.22	1.19	1.23	1.24
$\tau_s$ (mS)	1.32	1.32	1.32	1.32	1.44	1.44	1.43	1.44	1.50
$\nu_s$ (T/MA)	1.40	1.40	1.42	1.41	1.53	1.53	1.51	1.54	1.57
$\frac{\partial M}{\partial X}$ ( $\mu H/m$ )	-5.28	-5.27	-5.36	-5.33	-5.83	-5.81	-5.76	-5.80	-5.92
$n_s$	4.08	4.08	4.09	4.08	4.50	4.49	4.51	4.47	4.43

容器材質 SUS304L(200℃)

モデル2の適用限界としては, 等価双極子電流を求めるために直円筒近似していること, 及び, 式(28)を導びく際にプラズマ柱の太さを真空容器の内径に比較して十分小さいとしていることにある。すなわち, アスペクト比が小さい場合, 及び, プラズマ柱の太さが真空容器の太さに近い場合には, 誤差が大きくなると考えられる。モデル1の場合では, ここで用いた数値計算コードで  $\frac{dM_{ps}}{dZ}$  を求める際に, 計算時間を短縮するため, 初期位置と最終位置についてのみ  $M_{ps}$  を計算し, その中間位置では,  $M_{pi}$  が直線的に変化すると仮定しているが, このために図9に示したような誤差を生じる。図9中の破線で示したのは, 微小変位のときの  $\frac{\partial M_{ps}}{\partial Z}$  からのずれを示すために書いたものである。容器

アスペクト比3の円形断面容器で、副半径20 cmに関して計算した図9から判断して、変位が小さい場合以外は線型近似が成り立たないことがわかる。

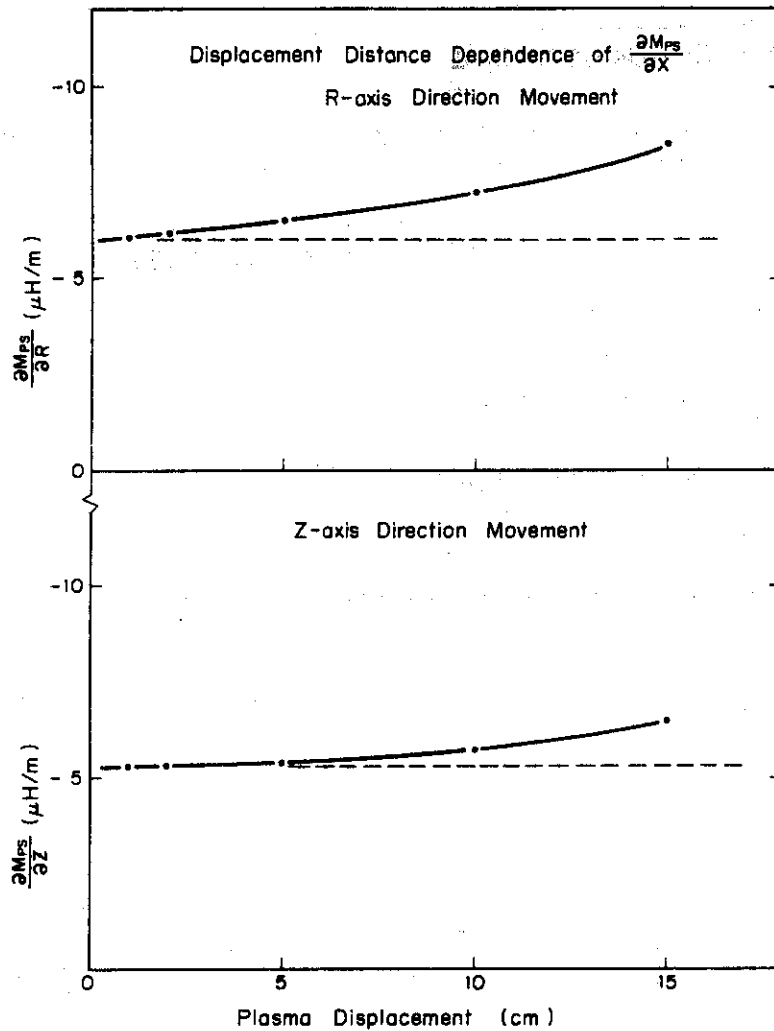


図9 プラズマ柱の運動をモデル1で表現したときの、変位の大きさに対する  $\frac{\partial M_{ps}}{\partial X}$  の変化。点(実線)は、各計算値。破線は微小変位のときの値を示す。

#### 4 矩形断面容器

図4-(a)に示したような断面形状が四辺形の容器について、その電気的特性の計算を行なった。Rを変化させて容器アスペクト比  $R/a$  を、3, 5, 100に取った。四辺形の矩形度は  $\pi = b/a$  と定義し、bを変化させることによって、1.0, 1.5, 2.0にした。内径a, 長さ  $2\pi R_p$  の直円筒容器の場合についての解析値<sup>6)</sup>を基準(100%)にとり、その値との相対値を、容器のシェル効果指数  $\tau_s$  と  $n_s$  について、図10, 11に示した。参考のために、主半径  $R_p$ , 副半径aの円形断面真空容器についての数値計算結果も図示した。

アスペクト比3の円形断面容器で、副半径20 cmに関して計算した図9から判断して、変位が小さい場合以外は線型近似が成り立たないことがわかる。

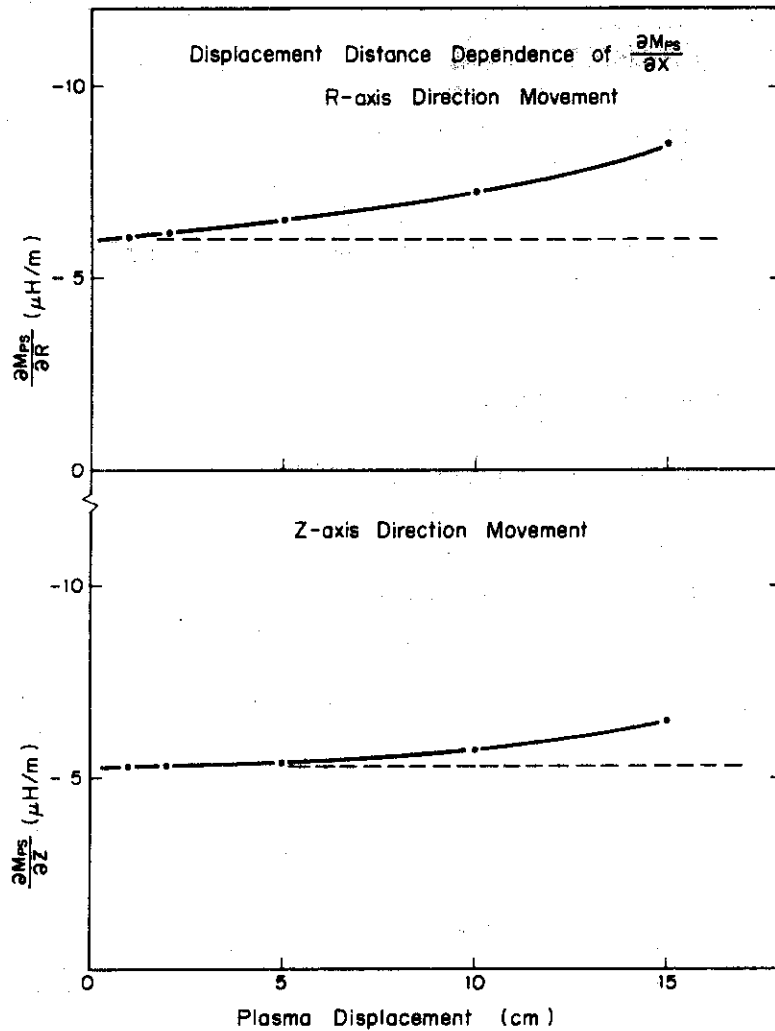


図9 プラズマ柱の運動をモデル1で表現したときの、変位の大きさに対する  $\frac{\partial M_{ps}}{\partial X}$  の変化。点(実線)は、各計算値。破線は微小変位のときの値を示す。

#### 4 矩形断面容器

図4-(a)に示したような断面形状が四辺形の容器について、その電気的特性の計算を行なった。Rを変化させて容器アスペクト比  $R/a$  を、3, 5, 100に取った。四辺形の矩形度は  $\pi = b/a$  と定義し、bを変化させることによって、1.0, 1.5, 2.0にした。内径a, 長さ  $2\pi R_p$  の直円筒容器の場合についての解析値<sup>6)</sup>を基準(100%)にとり、その値との相対値を、容器のシェル効果指数  $\tau_s$  と  $n_s$  について、図10, 11に示した。参考のために、主半径  $R_p$ , 副半径aの円形断面真空容器についての数値計算結果も図示した。

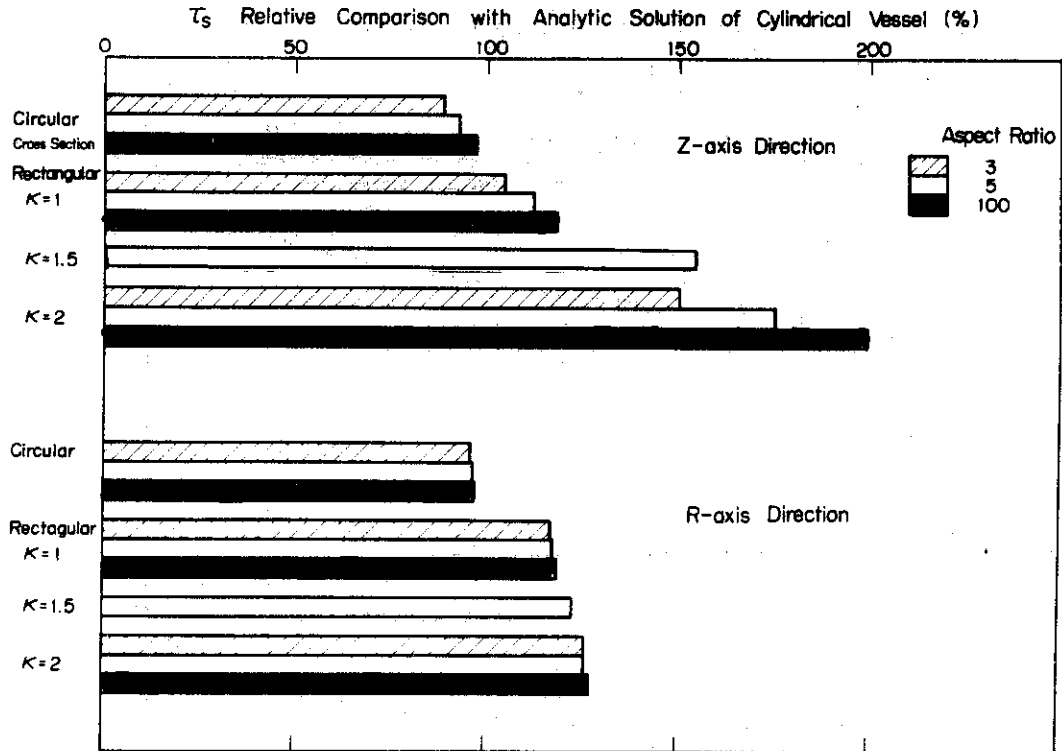


図10 容器時定数 $\tau_s$ の矩形度依存性。矩形度は図4-(a)で示した変数 $a$ を固定し、 $b$ を変化させて実現した。容器アスペクト比は $R_p/a$ で定義し、 $R_p$ を変化させた。円形断面容器は、主半径を各々、 $R_p$ 、 $a$ と等しく取った。

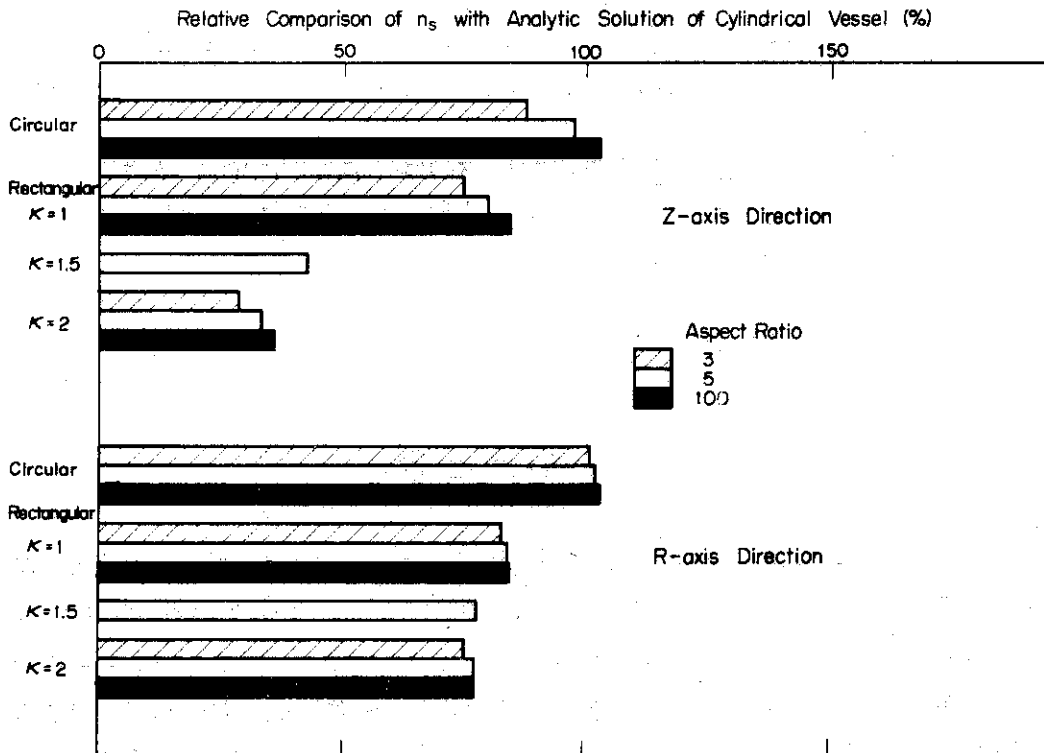


図11 シェル効果指数 $n_s$ の矩形度依存性。図10の説明を参照のこと。

図10, 11からわかるように、水平方向（R-軸方向）へプラズマ柱が移動する場合には、容器矩形度依存性が、 $\tau_s$ 、 $n_s$ ともに小さい。これは、プラズマ柱と横壁までの距離は、矩形度が変わっても一定に保たれているので当然の結果である。それに対し、プラズマ柱が垂直方向（Z軸方向）へ移動する場合には、容器矩形度依存性が、 $\tau_s$ 、 $n_s$ ともに非常に大きい。プラズマ柱と上下の壁までの距離が大きくなればなるほど、容器の時定数 $\tau_s$ が大きくなり、逆に、 $n_s$ は小さくなる。 $\tau_s$ が大きくなるということは式(16)からみて好ましいことであるが、 $n_s$ が小さくなるということは、式(13)の条件を破る可能性も生じるので注意する必要がある。縦長楕円断面プラズマを作るトカマク装置では、真空容器も当然縦長形状とするが、その場合、この $n_s$ の値が重要な問題となる。具体的な $n_s$ の大きさと、垂直位置不安定性の関係についての議論は、フィードバック制御系も含めた形で、別途報告する予定である。

容器アスペクト比5で、矩形度2の真空容器に流れる誘導電流分布を図12に示す。プラズマ柱が

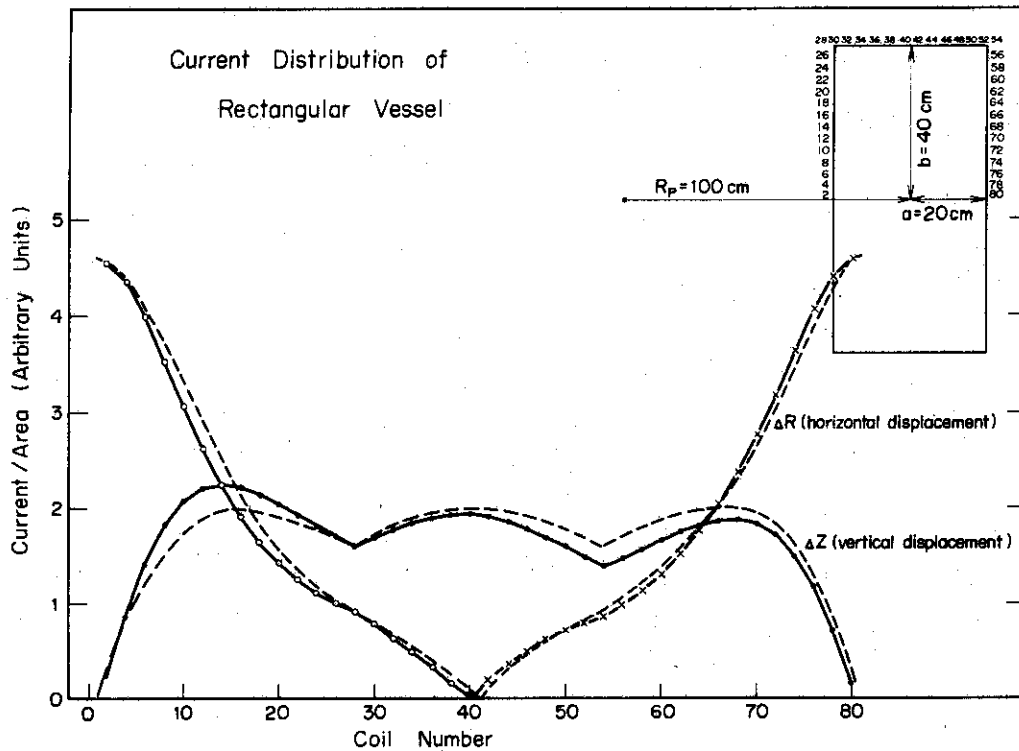


図12 矩形度2の容器に誘起された電流分布。点（実線）は各計算値。 $\Delta R$ 変位におけるX点とO点は、電流方向が逆方向であることを示す。破線は、矩形断面直筒容器に対する解析値を示す。

垂直方向、及び、水平方向に移動した場合とでは、容器に誘起される電流分布に大きな違いがみられる。破線で示した曲線は、矩形断面の無限長筒の場合の解析値である。数値計算による誘導電流分布と、解析値とは、かなり良く一致していると言える。解析値は次のようにして求めることができる。

半径  $a_p$  の長いプラズマ中に電流  $I_p$  が一様に流れているとする。図13のように座標系を取ると、電流密度ベクトルは、

$$\mathbf{j} = \left( 0, \frac{I_p}{\pi a_p^2}, 0 \right) \tag{33}$$

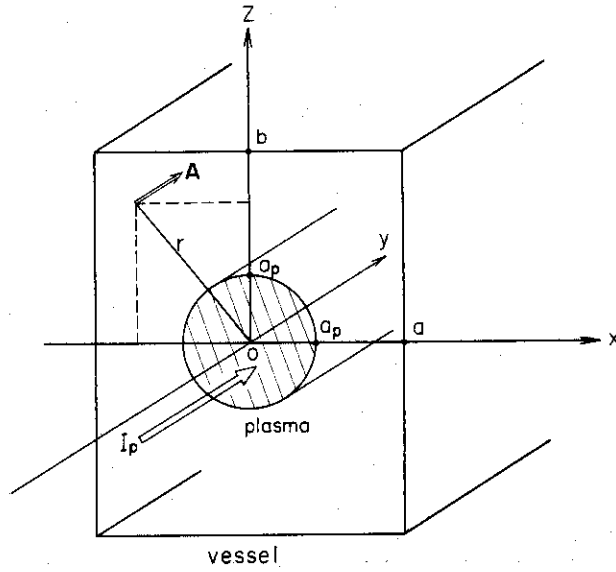


図13 矩形断面直筒容器とプラズマ。

と書ける。ベクトルポテンシャルは、

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu_0 \mathbf{j} \tag{34}$$

から、プラズマ外部の点  $r$  について解くと、

$$\mathbf{A} = (0, -\frac{\mu_0}{2\pi} I_p \ln r, 0) \tag{35}$$

と求まる。点  $r$  における電界は、式(35)から

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = (0, \frac{\mu_0}{2\pi} I_p \frac{\dot{r}}{r}, 0) \tag{36}$$

となる。従って、容器に流れる誘導電流は、

$$i \propto E_y = \frac{\mu_0}{2\pi} I_p \frac{\dot{r}}{r} \tag{37}$$

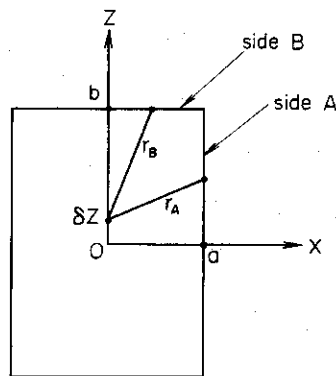


図14 プラズマ柱の変位  $\delta Z$  と矩形断面座標系。

となる。図14に示したように、時間 $\delta T$ の間にプラズマが垂直方向へ $\delta Z$ 移動したとすると、

$$r_A = \sqrt{a^2 + (Z - \delta Z)^2} \quad (38)$$

$$r_B = \sqrt{X^2 + (b - \delta Z)^2}$$

と記せる。壁A, B面上の電流は、式(37), (38)より

$$i_A(Z) \propto \frac{\mu_0}{2\pi} I_p \frac{-(Z - \delta Z)}{a^2 + (Z - \delta Z)^2} \frac{\delta Z}{\delta T} \quad (39)$$

$$i_B(X) \propto \frac{\mu_0}{2\pi} I_p \frac{-(b - \delta Z)}{X^2 + (b - \delta Z)^2} \frac{\delta Z}{\delta T}$$

となる。 $\delta Z \approx 0$ の近傍を考えると、式(39)は、

$$i_A(Z) \propto -\frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{Z}{a^2 + Z^2} \frac{\delta Z}{\delta T} \quad (40)$$

$$i_B(X) \propto -\frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{b}{X^2 + b^2} \frac{\delta Z}{\delta T}$$

と求まる。同様にして、プラズマ柱が水平方向に移動する場合について解くと、

$$i_A(Z) \propto -\frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{a}{Z^2 + a^2} \frac{\delta X}{\delta T} \quad (41)$$

$$i_B(X) \propto -\frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{X}{b^2 + X^2} \frac{\delta X}{\delta T}$$

と求まる。

## 5 円形断面容器による検算

図15に示したような、円形断面直円筒型容器について電気的特性は、解析的手段で求められている<sup>6)</sup>。

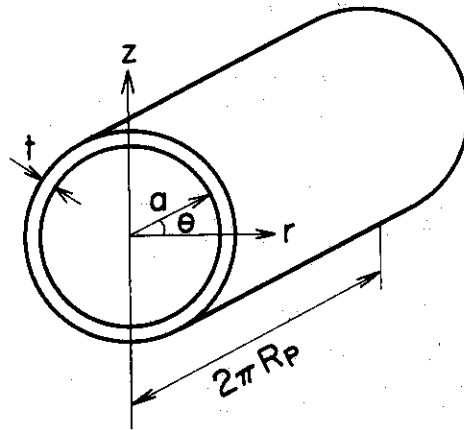


図15 直円筒容器と座標系。

すなわち、

$$L_s = \frac{\mu_0 \pi^2 R_p}{4} \quad (42)$$

$$R_s = \frac{\pi^2 R_p}{2 \sigma a t} \quad (43)$$

$$\frac{\partial M}{\partial X} = - \frac{\mu_0 \pi R_p}{2 a} \quad (44)$$

$$n_s = \frac{2 R_p^2}{A_0 a^2} \quad (45)$$

である。今、容器の導電率を $\sigma$ とした。円形断面直円筒容器は、トロイダル円形断面容器の容器アスペクト比 $R_p/a$ を無限大にした場合に対応すると近似できる。そこで本報告で用いた数値解析手法を円形断面トロイダル容器の場合に応用し、容器アスペクト比を大きくしていったとき、得られたシェル効果を示す指数が、直円筒容器の場合の解析値にどれほど近づいていくかを検討した。又、数値計算を行う時には、プラズマ柱をトポロジカルに包んでいる真空容器を複数個のリングに分割して計算を実行するのであるが、その分割数をいくつにすべきであるかということも同時に検討した。

プラズマ柱を、垂直方向へ運動させたときのシェル時定数 $\tau_s$ について、容器アスペクト比、分割数依存性を、図16に示した。プラズマ柱を水平方向へ運動させたときの $\tau_s$ を、図17に示した。図中に示した数字は、

$$f = \left( 1 - \frac{\tau_s (\text{容器アスペクト比, 分割数})}{\tau_s (\text{直円筒容器の解析値})} \right) \times 100 \quad (46)$$

である。



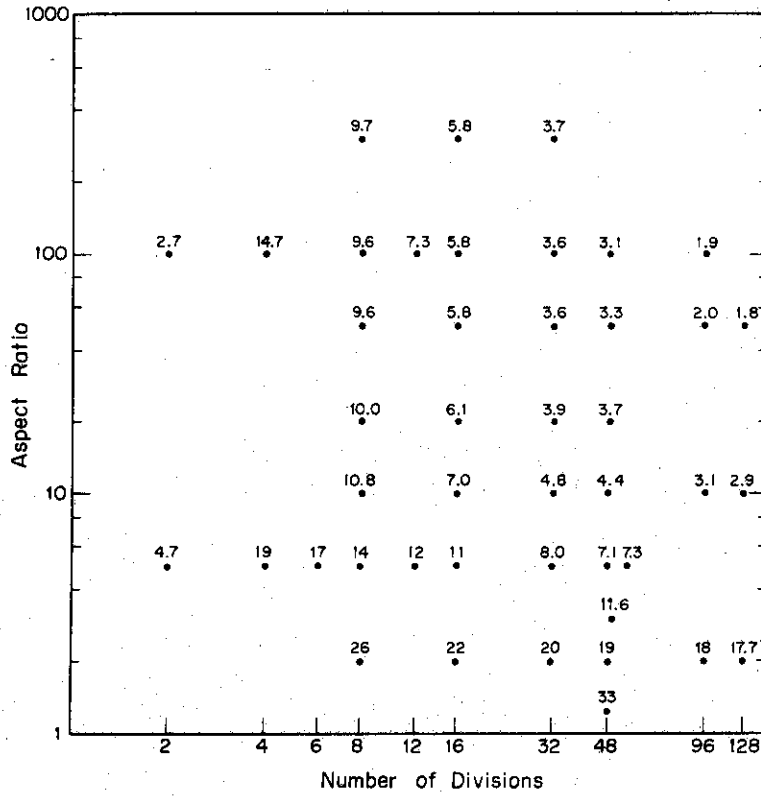


図 1 6 プラズマ柱が垂直方向 ( $\updownarrow Z$ ) に運動したときの、円形断面容器の時定数相対値。直円筒容器に対する数値計算結果の相対値を百分率で示した (本文の式(46)を参照のこと)。

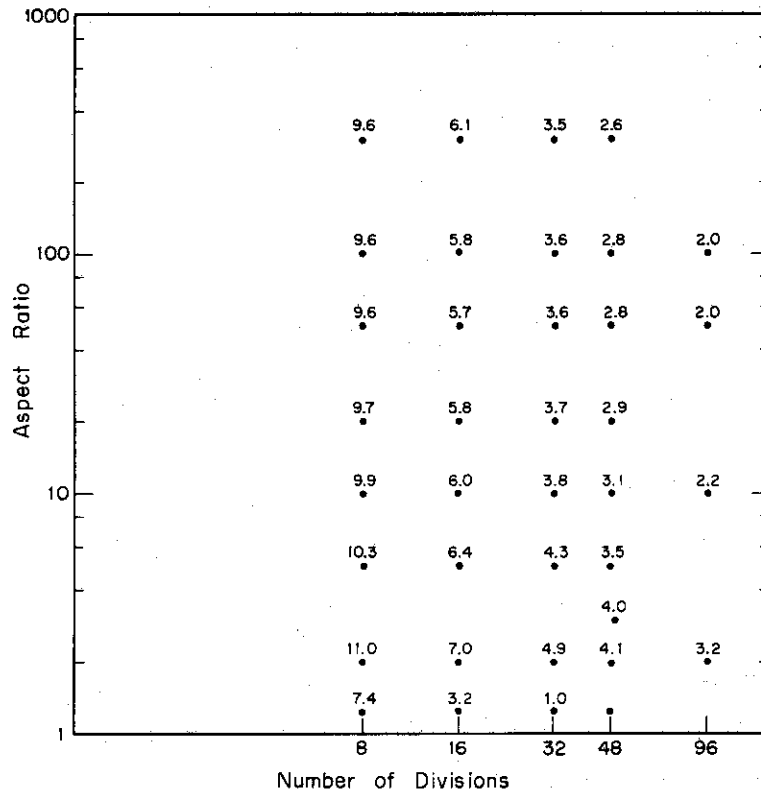


図 1 7 プラズマ柱が水平方向 ( $\updownarrow R$ ) に運動したときの、円形断面容器の時定数相対値。図 1 6 の説明を参照のこと。

容器アスペクト比が小さくても、分割数が少なくても、 $\tau_s$  は、直円筒容器の場合の解析値に近い値を示している。そして、容器アスペクト比を大きくすればするほど、また、分割数を多くすればするほど、直円筒容器についての解析値に近づいていく。しかし、容器アスペクト比、あるいは、分割数を大きくしても、最終的には、1~2%の差は残る。これは数値計算上の誤差と考えられるが、この程度の誤差は、いま必要としている設計上の精度と比較する限りにおいて問題とならない。このような容器アスペクト比、分割数依存性は、他の電気的特性指数  $L_s$ 、 $R_s$ 、 $n_s$  等についても同様に言える。

容器アスペクト比依存性について注目してみると、図17の水平方向にプラズマ柱が移動する場合のほうが、図16の垂直方向に移動する場合より、 $f$  のアスペクト比依存性が小さい。これは、プラズマ柱が水平方向に移動する場合の数値計算方法に問題があると思われる。実際にプラズマ柱が水平方向へ移動する場合には、鎖交磁束数に変化があるため、それに伴ってプラズマ電流も変化する。これに対し、数値計算コードの中では、プラズマ電流を一定と仮定している。その為、磁気エネルギーの変化が生じ、真空容器には、直流成分を持った誘導電流（OH成分と呼ぶことにする）が生じることになる。今、求めたい真空容器のシェル効果指数の計算には、このOH成分が邪魔になるので、本解析で用いた数値計算コードの中では、各誘導電流からOH成分を一様に差し引いた電流を用いてシェル効果指数の算出を行なった。この様な計算方法は、容器アスペクト比が小さい場合の値に、誤差が大きくなる傾向を持つ。これを改良するには、プラズマ電流の取り扱い、および、OH成分の取り扱いを再検討する必要があるが、ここで注目している垂直方向の位置不安定性に対する計算には何ら問題とならないので、さらに詳しい検討は別の機会にゆずる。

次に、真空容器に流れる誘導電流分布について検討を行なう。図18、19に、数値計算による誘導電流分布を、容器アスペクト比100と3の場合について示した。直円筒容器に流れる誘導電流分布は、解析的に予想ができて、プラズマ柱が垂直方向、及び、水平方向に移動したときの誘導電流  $I_z$ 、及び  $I_R$  は、

$$I_z \propto \sin \theta \quad (47)$$

$$I_R \propto \cos \theta$$

となる。これにトロイダル効果による一次の補正

$$1 + \eta' \cos \theta \quad (48)$$

を考慮すると、

$$I_z \propto \sin \theta + \eta \sin 2\theta \quad (49)$$

$$I_R \propto \cos \theta + \eta \cos 2\theta + \eta$$

となる。直流成分を無視すると電流分布は、図20の破線のようにになると予想される。容器アスペクト比100のとき  $\eta = 0$  とし、容器アスペクト比3のとき  $\eta \approx 0$  と考えると、図18、19で示した容器電流分布は、式(49)で理解することができる。

式(49)の  $\eta$  の大きさを、容器アスペクト比を変数にして表2に示した。すなわち数値計算で求めた

真空容器上に流れる誘導電流をフーリエ展開し、双極子成分に対する四重極成分の比を示した値である。解析的に求められた値<sup>7)</sup>も同時に示した。

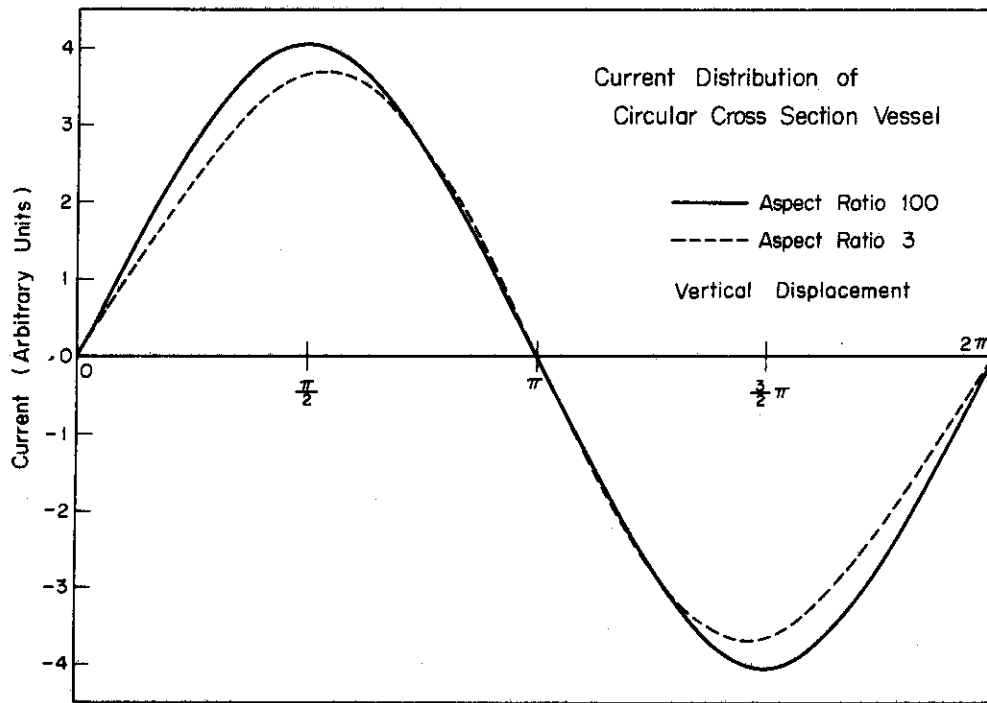


図18 プラズマ柱が垂直方向 ( $\Delta Z$ ) に運動したとき、円形断面容器上に誘起される電流分布。

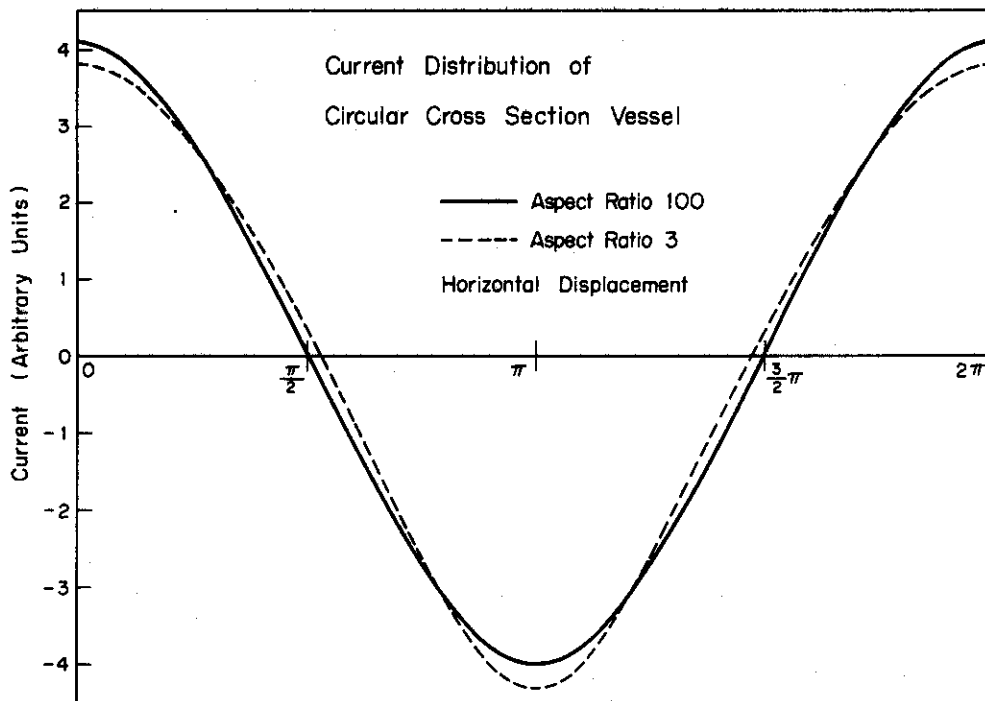


図19 プラズマ柱が水平方向 ( $\Delta R$ ) に運動したとき、円形断面容器上に誘起される電流分布。

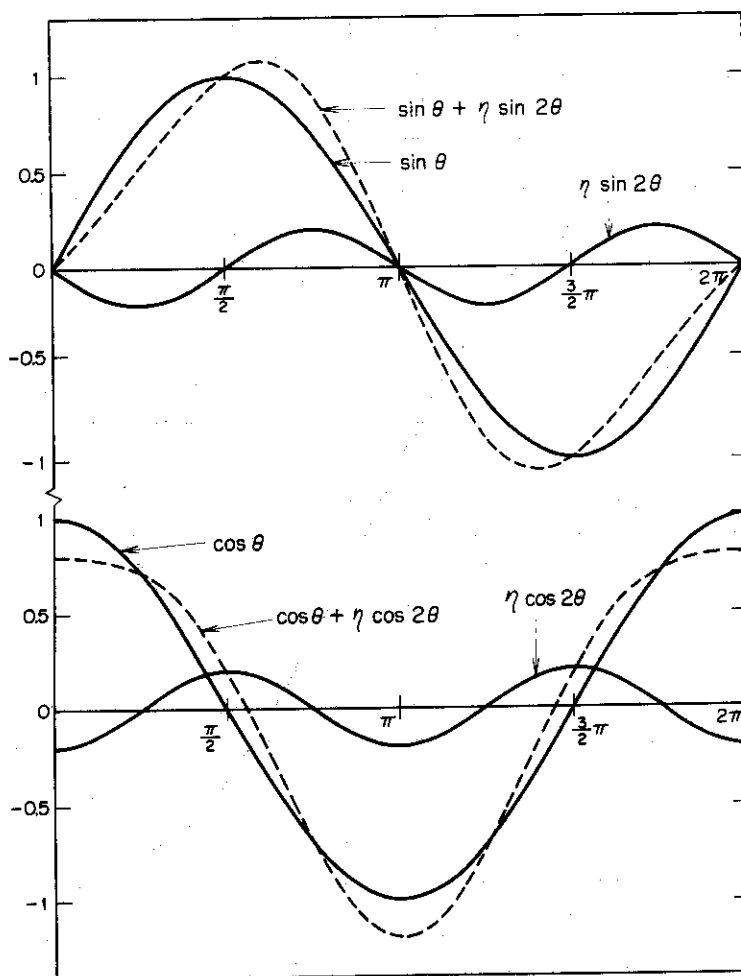


図 20 三角関数の1次と2次の和。η = -0.2。

表 2 真空容器上に流れる誘導電流の四重極成分比較

ε		1/2	1/3	1/5	1/10	1/30	1/100
解析	$\frac{\epsilon}{4} \left(1 + \frac{a^2}{2b^2}\right)^*$	0.129	0.086	0.052	0.026	0.0086	0.0026
数値計算	ΔZ	0.088	0.071	0.047	0.025	0.0082	0.0018
	ΔR	0.124	0.081	0.049	0.025	0.0016	0.0013

値は、双極子電流成分の大きさを1とした相対値である。

a=5 cm    b=20 cm

εは、容器の逆アスペクト比 (b/R)。

\* 解析値。文献7)を参照のこと。

## 6 結 論

トカマク・プラズマの位置不安定性に対する真空容器の安定化効果（シェル効果）を見積るために、本報告で用いた数値計算方法が有効であることがわかった。

円形断面容器の場合、容器の分割数を16分割以上にとっておけば、5%以下の誤差範囲でシェル効果を求めることができる。直円筒容器の場合の解析値と、円形断面容器の場合の数値計算結果を比較すると、容器アスペクト比が10程度以上の場合には、その差は5%以下に収まる。一方、容器アスペクト比が3の場合には、その差は10%程度である。従って、円形断面容器の場合のシェル効果について、大体の値を見積るときには、直円筒容器についての解析値で代用できる。

矩形断面容器のシェル効果は、矩形度に大きく依存することがわかった。プラズマ柱と容器壁までの距離が大きい方向にプラズマが移動する場合には、容器のシェル効果が小さくなり、フィードバック制御を行なっても、プラズマ柱の位置を安定にすることが困難となる可能性がある。このような場合には、容器とプラズマ柱との間に別の板を挿入し、シェル効果を大きくするような対策を考慮する必要がある。

今後検討すべきこととしては、矩形断面容器のシェル効果の一般的表記法の問題がある。円形断面容器についてのこの種の検討は、文献7)でフーリエ級数展開法でなされている。この方法を矩形断面容器について導入することは可能であるが、あまり有効ではない。なぜなら、図12からも明らかのように、矩形断面容器の場合、フーリエ成分が非常に多くなり、容器を集中定数回路で表現する利点が失われる。この様な矩形断面容器の場合、容器に流れる誘導電流がプラズマ領域に作る磁場成分（例えば、一様垂直磁場成分、四重極磁場成分など）に注目した方法が有利であろうと考えられるが、この点に関しては今後検討する予定である。

## 謝 辞

本解析に用いた数値計算コードを開発するに当たり、有益な議論、助言をして戴いた嶋田隆一氏、小林朋文氏をはじめとする大型トカマク開発部の諸氏に感謝の意を表す。また、本研究を援助して頂いた森茂部長、吉川允二室長に謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) V. S. MUKHOVATOV and V. D. SHAFRANOV , Nucl. Fusion 11(1971)605
- 2) 小方, 二宮, 亀有, 相川, 野田, 鈴木, JAERI-M 6323 (1975)
- 3) A. FUKUYAMA, S. SEKI, H. MOMOTA and R. ITATANI , JJAP 14 (1975)871
- 4) 嶋田, 谷, 田村, 小林, 小林, 吉田, JAERI-M 6469 (1976)
- 5) 99AR-0030-1 FACOM ADSL (富士通, 1975)
- 6) 鈴木, 二宮, 亀有, JAERI-M 6050 (1975)
- 7) 鈴木, 小方, 二宮, 亀有, 相川, 野田, JAERI-M 6531 (1976)

## 附録 SEEPICC アニュアルおよびリスト

### (1) 主プログラム

(1-a) データセクション; プラズマ, 真空容器に関する情報, 積分間隔, 出力関係の指定を行なう。

DLR: R軸(水平方向)への移動の大きさ。

DLZ: Z軸(垂直方向)への移動の大きさ。

(水平方向と垂直方向と同時には移動できない。)

DLT: DLR(又はDLZ)移動するために要する時間。

RPLA: プラズマ主半径(容器主半径は, プラズマ主半径と同じにしている)。

APLA: プラズマ副半径。

OPTION=1: プラズマ(運動モデル1)と分布定数となっている導体群(容器, ライナ), =2: プラズマ(運動モデル1)と集中定数となっている導体群(トロイダル磁場コイル, ポロイダル磁場コイル), =3: プラズマ(運動モデル2)と分布定数となっている導体群。

ASHELL: 容器副半径。

TSHELL: 容器の肉厚。

DELT: 積分時間間隔。

OUTDEL: ラインプリンタに図形出力する時間間隔。

FINTIM: 積分実行終了時間。

PRDEL: ラインプリンタのデータ出力時間間隔。

RHO: 容器の比抵抗率。

IPLA: プラズマ電流。

NGL, NCH1: 導体の最初のチャンネル番号。

NP: プラズマの本数

TITLE: タイトルを指定。

### (1-b) セクション1-4

入力したい導体の本数(または, リング分割数)に合せて, カード枚数を変える必要がある。

### (1-c) セクション5

出力したい変数, および, 入力した導体本数に合せて, 出力変数を変える。

### (2) データカードの作り方

プラズマ, 導体の位置等を指定する。このデータカードは, サブルーチン「INPT」に読み込まれる。

カード1: NTYP(1I3)

=1: 円形断面容器の場合に適用。容器の分割数のみ指定すれば, リングの位置等はプログラムで決定する。

=2: 任意形状容器の場合に適用。リングの位置等を入力する。

=3: NTYP=2に加えて, 各リングの抵抗値を入力できる。

= 4 : 矩形断面容器の場合に適用。容器の分割数, 矩形度を指定すれば, リングの位置等はプログラムで決定する。

= 5 : 矩形断面で上下の壁がない容器の場合に適用。容器の分割数, 矩形度を指定すれば, リングの位置等はプログラムで決定する。

カード2 : ITIT1 (18A4)

カード3 : ITIT2 (18A4)

タイトルを入れる。

カード4 ~ (NP+3) : K, JOGE, R, Z, AA, BB, CURR (2I5, 5F10.0)

プラズマの位置 (R, Z), 断面形状 (AA, BB), 電流方向の入力 (CURR)。OPTION = 3 のときは, CURR = +1, -1 で双極電流を流すコイルの位置を2枚のカードで入れる。その場合, K は共に1とする。JOGE は0にしておく。

カード (NP+4) ~ : カード4 ~ (NP+3) と同じフォーマット。導体 (リング) の位置, 断面形状, 電流方向を入力する。

K : コイル番号

JOGE : = 0 の場合, (R, -Z) の位置にもリングを置く。そのリングのCURRは JOGE × CURR とする。

R : R座標

Z : Z座標

AA : リング断面の一辺

BB : リング断面の他辺。= 0.0 のときは, そのリングは半径AAの円形断面であるとみなす。

CURR : リングに流れる電流方向を指定する。

NTYP = 2 または 3 のときは, リング数だけ, このカードを入力する。NTYP = 1 のときは, 分割数をKで指定する。リング位置は, プログラム中で Z = 0.0 の最外点から反時計回りにK分割して取っていく。NTYP = 4 または 5 のときは, 分割数と矩形度をKとRで指定する。

リング位置の取り方はNTYP = 1 のときと同じである。矩形断面は, 横をASHELLの2倍, 縦を横の長さの矩形度倍に取る。NTYP = (1, 4, 5) の場合には, 容器の位置入力カードは一枚で済む。

SOURCE STATEMENT

ADSL  
主7.0774

```

*****
*      SEEPIC      *****
*      SHELL EFFECT ESTIMATION FOR POSITIONAL INSTABILITY
*      AND CONFIGURATION CONTRAL
*
*
*              ADSL      A. KITSUNEZAKI      JAN 1976
*      MODIFIED BY      H. YOKOMIZU      MAY 1976
*
*****
1 /      DIMENSION AMU(100,100),AMU1(100,100),A(20000),AMU2(100,100)
2 STORAGE I(100), IO(100), RES(100), TOK(100), IDOT(100)
3 STORAGE K(500),Z(500),AA(500),BB(500),CURR(500),TN(500)
4 STORAGE RO(500),ZO(500),RPL(5),ZPL(5)
5 STORAGE X(100)
6 TABLE X(1-100)=100*0.0
7 TABLE I(1-100)=100*0.0, IO(1-100)=100*0.0, IDOT(1-100)=100*0.0
8 FIXED J,K,NG,NGL,NCH1,N1,OPTION,JST,KJOK,NGM,NP,NTYP
9 CONST KJOK=20000 ,RLOOP=4.0E-3
*
*
*****
**      OPTION=1 MOVING PLASMA (J=1,NP) AND CHAMBER+LINER (J=NGL,NGM)
**      OPTION=2 MOVING PLASMA (J=1) AND COILS
**      OPTION=3 COIL (J=1) AND CHAMBER+LINER (J=NGL,NGM)
*
*      ADJUST NUMBER OF CARDS IN SECTION 1-4
*      AND ALSO NUMBER OF OUTPUT VARTIABLES IN SECTION 5
*      IF EXCESS CARD REMAINS IN SECTION 1-4, PUT ( * ) MARK ON 1-ST COLUMN
*
*      RES(J=1,NP) IS CALCULATED FOR COPPER IF NO INPUT EXIST
*      RES(J,GE,NGL) IS CALCULATED WITH RHO IN (DATA) AT CONST
*
*****
*
*      ***** INPUT DATA CARD MEHL *****
10 CONST DLR=0.00, DLZ=0.01, DLT=0.01
11 CONST RPLA=0.6, APLA=0.05
12 PARAM OPTION=3
13 CONST ASHELL=0.2, TSHLL=0.01
14 TIMER DELT=2.0E-5
15 TIMER OUTDEL=2.5E-4, FINTIM=1.00E-2, PRDEL=1.0E-3
16 CONST RHO=8.40E-7, IPLA=1.0E6
17 CONST NGL=2, NCH1=2, NP=1
18 TITLE SHELL EFFECT CALCULATION FOR VACUUM VESSEL
*
*
19 INITIAL
***** SECTION 1 START
20 IO1=IO(1)
21 IO2=IO(2)
22 IO3=IO(3)
23 IO4=IO(4)
24 IO5=IO(5)
25 IO6=IO( 6)
26 IO7=IO( 7)
27 IO8=IO( 8)
28 IO9=IO( 9)
29 IO10=IO(10)
30 IO11=IO(11)
31 IO12=IO(12)
32 IO13=IO(13)
33 IO14=IO(14)
34 IO15=IO(15)
35 IO16=IO(16)
36 IO17=IO(17)
***** SECTION 1 END *****
37 NOSORT
38 PAJ=3.14159
39 UM=PAJ*4.0E-7
40 LINT=1.0
41 BETA=0.5
42 RAMUDA=ALOG(8.0*RPLA/APLA)*(LINT-3.0)/2.0*BETA
43 RSHLL=RPLA
44 IDOT(1)=2.0*IPLA*DLZ/PAJ/APLA/DLT
45 IF(DLR,NE,0.0) IDOT(1)=2.0*IPLA*DLR/PAJ/APLA/DLT
46 DO 1 J=1,100
47 DO 1 K=1,100
48 1 AMU(J,K)=AMU1(J,K)=AMU2(J,K)=0.0
*      INITIAL CURRENT (*WHEN NOT ZERO) INPUT CARD HERE *****
***** INICIAL CURRENT INPUT END *****

```

DATA SECTION

導体(コイル)の本数に合わせて  
枚数を調整する。



```

49     CALL INPT(NG,N1,RES,R,Z,AA,BB,CURR,TN,RHO,KPLA,ASHELL,TSHELL, ...
50           APLA,DLR,OPTION,NGL, NP,NTYP)
51     IF(NP.NE.1.AND.N1.NE.1) STOP 1234
52     IF(NP.NE.1.AND.N1.EQ.1) N1=NP
53     NGM=NG
54     A2=AA(N1+1)
55     CALL CHECK(RPLA,APLA,ASHELL,TSHELL,RHO,DLR,DLZ,DLT,IPLA, ...
56           IDOT(1),RAMUDA,NG,N1,NGL,OPTION,AA(1),A2,DELTA,FINTIM)
57     IF(ASHELL.EQ.0.0) GO TO 4
58     CALL ANAL(RSHELL,ASHELL,TSHELL,RAMUDA,RHO,UM,PAI,APLA)
59     4 CONTINUE
60     DO 2 J=1,500
61     RO(J)=R(J)
62     2 ZO(J)=Z(J)
***** CALCULATION OF INDUCTANCE AND COUPLING COEFFICIENT *****
63     CALL CALI(NG,R,Z,AA,BB,CURR,TN,KIOK,A,AMU)
64     CALL POUT(AMU,100,100,100,NG,NG)
65     IF(OPTION.EQ.3) GO TO 3
66     IF(DLR*DLZ.NE.0.) STOP 6789
67     DO 40 J=1,NG
68     DO 40 K=1,NG
69     40 AMU1(J,K)=AMU(J,K)
70     DO 41 J=1,N1
71     R(J)=R(J)+DLR
72     41 Z(J)=Z(J)+DLZ
73     CALL CALI(NG,R,Z,AA,BB,CURR,TN,KIOK,A,AMU2)
74     CALL POUT(AMU2,100,100,100,NG,NG)
75     DO 42 J=1,NG
76     DO 42 K=1,NG
77     42 AMU2(J,K)=(AMU2(J,K)-AMU1(J,K))/DLT
78     CALL POUT(AMU2,100,100,100,NG,NG)
79     FDELTA=IDOT(1)=0.0
80     I(1)=IPLA
81     IF(NP.EQ.1) GO TO 3
82     RESP=0.0
83     DO 43 J=1,N1
84     IF(RES(J).EQ.0.0) GO TO 43
85     RESP=RESP+1.0/RES(J)
86     43 CONTINUE
87     RESP=1.0/RESP
88     DO 45 J=1,N1
89     IDOT(J)=0.0
90     IF(RES(J).EQ.0.0) GO TO 45
91     I(J)=IPLA*RESP/RES(J)
92     45 CONTINUE
93     3 CONTINUE
94     P=Q=L=M=RTOTAL=ITAU=NUE=DMP51=DMP52=NS=NR=0.0
95     TCU=0.
*
*
96     DYNAMIC
*
97     NOSORT
***** IF NECESSARY I(J)=FUNC(J,TIME) INPUT CARD HERE *****
98     IF(OPTION.EQ.3) I(1)=IDOT(1)*TIME
99     IF(OPTION.EQ.3.AND.NTYP.EQ.2) I(1)=IDOT(1)*PAI*TIME/4.0
***** I(J) INPUT END *****
100    IF(OPTION.EQ.3) GO TO 7
101    DO 44 J=1,100
102    DO 44 K=1,100
103    44 AMU(J,K)=AMU1(J,K)+AMU2(J,K)*TIME
104    7 CONTINUE
105    JST=NGL
106    DO 10 J=JST,NG
107    S=C.0
108    DO 20 K=1,NG
109    IF(K.EQ.J) GO TO 20
110    S=S+AMU(J,K)*IDOT(K)
111    IF(OPTION.NE.3) S=S+I(K)*AMU2(J,K)
112    20 CONTINUE
113    P=RES(J)*I(J)
114    IF(OPTION.NE.2.AND.J.GE.NCH1) P=RES(J)*TOK(J)+TCU*RLOOP
115    IF(OPTION.NE.3) P=P+AMU2(J,J)*I(J)
116    IDOT(J)=-S/P/AMU(J,J)
117    10 CONTINUE
118    L=M=RTOTAL=P=Q=ITAU=PCH=QCH=PDOT=QDOT=0.0
119    IF(OPTION.EQ.2) GO TO 34
120    DO 30 J=NGL,NGM
121    IF(I(J).LT.0.) GO TO 31
122    P=P+I(J)
123    PDOT=PDOT+IDOT(J)
124    IF(J.GE.NCH1) PCH=PCH+I(J)

```

```

125      GO TO 30
126      31 Q=Q+I(J)
127      QDOT=QDOT+IDOT(J)
128      IF(J.GE.NCH1) QCH=QCH+I(J)
129      30 CONTINUE
130      IF(OPTION.NE.3.OR.N1.LE.2) GO TO 62
131      P=P*2.0/N1
132      Q=Q*2.0/N1
133      PDOT=PDOT*2.0/N1
134      QDOT=QDOT*2.0/N1
135      62 CONTINUE
136      S=T+U+V=LPLA=0.0
137      DO 32 J=NGL,NGM
138      T=T+RES(J)*I(J)*I(J)
139      DO 32 K=1,NP
140      32 S=S+AMU(K,J)*I(J)*I(K)
141      DO 33 J=NGL,NGM
142      DO 33 K=NGL,NGM
143      33 U=U+AMU(J,K)*I(J)*I(K)
144      DO 46 K=1,NP
145      DO 46 J=1,NP
146      46 V=V+AMU(J,K)*I(J)*I(K)
147      IF(IPLA.EQ.0.0) STOP 2468
148      LPLA=V/IPLA**2
149      IF(I(1).NE.0.0.AND.OPTION.EQ.3) LPLA=V/I(1)**2
150      IF(P.EQ.0.) GO TO 35
151      M=S/P/IPLA
152      IF(OPTION.NE.3) GO TO 59
153      IF(I(1).EQ.0.0) GO TO 59
154      M=S/P/I(1)
155      LPLA=V/I(1)/I(1)
156      59 CONTINUE
157      RTOTAL=T/P/P
158      L=U/P/P
159      IF(T.EQ.0.0) GO TO 35
160      TTAU=U/T
161      35 CONTINUE
162      TCU=PCH+QCH
163      TOK2=TCU/(NGM-NCH1+1)
164      M2= RT2=L2=TAU2=0.
165      S=T+U=0.
166      IF(TOK2.EQ.0.) GO TO 34
167      DO 39 J=NGL,NCH1
168      39 TOK(J)=I(J)
169      DO 36 J=NCH1,NGM
170      36 TOK(J)=I(J)-TOK2
171      DO 37 J=NGL,NGM
172      S=S+AMU(1,J)*TOK(J)
173      37 T=T+RES(J)*TOK(J)*TOK(J)
174      DO 38 J=NGL,NGM
175      DO 38 K=NGL,NGM
176      38 U=U+ AMU(J,K)*TOK(J)*TOK(K)
177      ADOT=(PDOT-QDOT)/2.0
178      AVT=(P-Q)/2.0
179      OH=P+Q
180      IF(AVT.EQ.0.0) GO TO 34
181      M2=S/AVT
182      RT2=T/AVT/AVT
183      L2=U/AVT/AVT
184      IF(T.EQ.0.0) GO TO 34
185      TAU2=U/T
186      34 CONTINUE
187      ***** DELTA M , NUE, AND NS CALCULATION *****
188      DMPS1=DMPS2=NS=NUE=BRR=DMPSA=BZZ=AMUX=AMUX2=DMX=DMX2=0.0
189      IF(DLZ.EQ.0.0) GO TO 47
190      DMPS1=-DLT*(RTOTAL*P+L*PDOT)/DLZ/IPLA
191      DMPSA=-DLT*(RT2*AVT+L2*ADOT)/DLZ/IPLA
192      GO TO 48
193      47 CONTINUE
194      IF(DLR.EQ.0.0) GO TO 48
195      DMPS1=-DLT*(RTOTAL*P+L*PDOT)/DLR/IPLA
196      DMPSA=-DLT*(RT2*AVT+L2*ADOT)/DLR/IPLA
197      48 CONTINUE
198      IF(OPTION.EQ.3) GO TO 50
199      DO 58 J=1,NP
200      DO 58 K=NGL,NG
201      AMUX=AMUX+AMU2(J,K)*I(J)*I(K)
202      58 AMUX2=AMUX2+AMU2(J,K)*I(J)*TOK(K)
203      IF(DLZ.EQ.0.0) GO TO 49
204      IF(P.EQ.0.0) GO TO 50
205      DMX=AMUX*DLT/DLZ/IPLA/P
206      IF(AVT.EQ.0.0) GO TO 50
207      DMX2=AMUX2*DLT/DLZ/IPLA/AVT

```

```

207      GO TO 50
208      49 CONTINUE
209      IF(DLR.EQ.0.0) GO TO 50
210      IF(P.EQ.0.0) GO TO 50
211      DMX=AMUX*DLT/DLR/IPLA/P
212      IF(AVT.EQ.0.0) GO TO 50
213      DMX2=AMUX2*DLT/DLR/IPLA/AVT
214      50 CONTINUE
215      IF(APLA.EQ.0.0) STOP 2460
216      DMPS2=2.0/PAI/APLA*M
217      DO 53 J=1,5
218      RPL(J)=0.0
219      53 DO 52 K=1,3
220      RPL(K)=RPLA+(K-2)*APLA
221      ZPL(K)=0.0
222      52 CONTINUE
223      RPL(4)=RPL(5)=RPLA
224      ZPL(4)=APLA
225      ZPL(5)=-APLA
226      DO 60 K=1,5
227      RP=RPL(K)
228      ZP=ZPL(K)
229      DO 51 J=NGL,NG
230      RC=R(J+N1-1)
231      ZC=Z(J+N1-1)
232      CC=1(J)
233      IF(NP.EQ.1) GO TO 61
234      RC=R(J)
235      ZC=Z(J)
236      61 CONTINUE
237      CALL FIELD(RP,ZP,RC,ZC,CC,PS1,BR,BZ,AKE1,1)
238      BRR=BRR+BR
239      IF(DLR.EQ.0.0) GO TO 51
240      CC2=TOK(J)
241      CALL FIELD(RP,ZP,RC,ZC,CC2,PS1,BR2,BZ2,AKE1,1)
242      BRR=BRR+BZ
243      BZZ=BZZ+BZ2
244      51 CONTINUE
245      60 CONTINUE
246      BR=BRR/5.0
247      BZZ=BZZ/5.0
248      IF(P.EQ.0.0) GO TO 55
249      NUE=BR/P
250      55 CONTINUE
251      IF(AVT.EQ.0.0) GO TO 56
252      NUE2=BZZ/AVT
253      56 CONTINUE
254      IF(L.EQ.0.0) GO TO 54
255      NS=NUE*DMPS1*PAI*4.0*RPLA*RPLA/UM/1/RA*UDA*(-1.0)
256      54 CONTINUE
257      IF(L2.EQ.0.0) GO TO 57
258      NS2=NUE2*DMPSA*PAI*4.0*RPLA**2/UM/1/2/RAMUDA*(-1.0)
259      57 CONTINUE
***** D M, NUE, NS CAL. END *****
260      SORT
***** SECTION 2 START *****
261      I1=1(1)
*      I1=INTGRL(101,C1)
262      I2=INTGRL(102,C2)
263      I3=INTGRL(103,C3)
264      I4=INTGRL(104,C4)
265      I5=INTGRL(105,C5)
266      I6=INTGRL(106,C6)
267      I7=INTGRL(107,C7)
268      I8=INTGRL(108,C8)
269      I9=INTGRL(109,C9)
270      I10=INTGRL(1010,C10)
271      I11=INTGRL(1011,C11)
272      I12=INTGRL(1012,C12)
273      I13=INTGRL(1013,C13)
274      I14=INTGRL(1014,C14)
275      I15=INTGRL(1015,C15)
276      I16=INTGRL(1016,C16)
277      I17=INTGRL(1017,C17)
***** SECTION 2 END *****
***** SECTION 3 START *****
*      C1=IDOT(1)
278      C2=IDOT(2)
279      C3=IDOT(3)
280      C4=IDOT(4)
281      C5=IDOT(5)
282      C6=IDOT(6)

```

導体(リニア)の本数に合わせて  
枚数を調整する。

同上

```

283      C7 =IDOT( 7)
284      C8 =IDOT( 8)
285      C9 =IDOT( 9)
286      C10=IDOT(10)
287      C11=IDOT(11)
288      C12=IDOT(12)
289      C13=IDOT(13)
290      C14=IDOT(14)
291      C15=IDOT(15)
292      C16=IDOT(16)
293      C17=IDOT(17)
***** SECTION 3 END *****
294      NOSORT
***** SECTION 4 START *****
*      I(1)=11
295      I(2)=12
296      I(3)=13
297      I(4)=14
298      I(5)=15
299      I( 6)=16
300      I( 7)=17
301      I( 8)=18
302      I( 9)=19
303      I(10)=110
304      I(11)=111
305      I(12)=112
306      I(13)=113
307      I(14)=114
308      I(15)=115
309      I(16)=116
310      I(17)=117
***** SECTION 4 END *****
***** SECTION 5 START *****
311      PRINT      I1,I2,I3,I4,I5,I6,I7,I8,I9,I10,I11,I12,I13,I14,I15,I16, ...
312      I17
313      PRTPLT      I1,I2,I3
314      PRINT      P,Q,L,M,RTOTAL,TTAU,NUE,DMPS1,DMPS2,NS,BR,DMX,LPLA
***** SECTION 5 END *****
315      TERMINAL
316      DO 63 K=1,NG-NP
317      63 X(K)=I(K+NP)
318      CALL TENKAI(X,NG,NP,DLZ)
319      END
320      STOP

```

導体 (リ=7) の本数に合わせて  
枚数を調整する。

出力変数の指定

副プログラム 「INPT」 リングの位置等は、このプログラムで読み込む。

```

*
*****
1      SUBROUTINE INPT(NGROP,N1,RES,R,Z,AA,BB,CURR,TN,RHO,RPLA,ASH,TSH,
*      APLA,DLR,IOPT10,NGL,NP,NTYP)
2      DIMENSION RES(1),R(1),Z(1),AA(1),BB(1),CURR(1),TN(1)
3      COMMON /INPT/ ITIT1(18),ITIT2(18),NGC(25),IJMN(100),IMX(100),UM,RP
4      DATA 1BLK /4H, / ,PAI/3.14159265/
*
*      NTYP=1      CIRCULAR,      BUNKATSU SUU,      -- INPUT --
*      NTYP=2      R, Z, AA, BB, AND CURR -- INPUT --
*      NTYP=3      NTYP=2      FURTHERMORE R AND RES -- INPUT --
*      NTYP=4      RECTANGULAR, BUNKATSU SUU,ELLIPTICITY -- INPUT --
*      NTYP=5      RECT(ONLY VERT. WALL), BUNKATSU SUU,ELLIPTICITY --
*
*      IF BB(1)=0.0, COIL(1) IS A CIRCULAR CROSS SECTION
*      IF NO INPUT EXIST, RES(J=1,NP) IS FOR COPPER. RRPL=1.72E-8
*      RES(J) CAN ALSO BE READ WITH INPUT CARD IF NTYP=003
*
*****
5      RRPL=1.72E-8
6      OMEGA=PAI/4.0
7      OMEGA=PAI/2.0
8      OMEGA=0.0
9      UM=PAI*4.0E-7
10     RP=0.0
11     IOIN=5
12     IOUT=6

```

```

13 10 CONTINUE
14 DO 11 I=1,500
15 TN(I)=1.0
16 11 CONTINUE
17 READ(IOIN,1010) NTYP ← カード 1 ( I3) 入力方式の指定
18 *WRITE(IOUT,1040)NTYP
19 IF(NTYP.EQ.999) GO TO 998
20 IF(NTYP.EQ.0) GO TO 100
21 READ(IOIN,1000) (ITIT1(I),I=1,18) ← カード 2 タイトル
22 READ(IOIN,1000) (ITIT2(I),I=1,18) ← カード 3 タイトル
23 GO TO (40,60,60,40,40),NTYP
24 20 CONTINUE
25 ELLIP=R(ILAS+1)
26 IF(NP.NE.1) ELLIP=R(NP+1)
27 *WRITE(6,1093) ELLIP
28 BSHELL=ELLIP*ASHELL
29 DL=4.0*BSHELL/K
30 N3=K/2
31 N2=(N3-1)/2
32 N=2*N2+1
33 IF(N.NE.N3) GO TO 997
34 N4=N2+NP+1
35 DO 21 J=NP+1,N4
36 I=J+N3
37 JJ=J+ILAS-1
38 II=I+ILAS-1
39 BB(I)=BB(JJ)=TSHELL
40 AA(I)=AA(JJ)=DL
41 IJMN(J)=JJ
42 IJMN(I)=II
43 IMA(J)=IMA(I)=1
44 CURR(JJ)=CURR(II)=1.0
45 R(JJ)=RSHELL+ASHELL
46 R(I)=RSHELL-ASHELL
47 Z(JJ)=(J-NP-1)*DL
48 Z(I)=(I-NP-N3-1)*DL *(-1.0)
49 21 CONTINUE
50 DO 22 J=N4+1,N4+N2
51 I=J+N3
52 JJ=J+ILAS-1
53 II=I+ILAS-1
54 BB(I)=BB(JJ)=TSHELL
55 AA(I)=AA(JJ)=DL
56 IJMN(J)=JJ
57 IJMN(I)=II
58 IMA(J)=IMA(I)=1
59 CURR(JJ)=CURR(II)=1.0
60 R(JJ)=RSHELL-ASHELL
61 R(I)=RSHELL+ASHELL
62 Z(JJ)=(N4+N2+1-J)*DL
63 Z(I)=(J-N4-N2-1)*DL
64 22 CONTINUE
65 GO TO 37
66 30 CONTINUE
67 ELLIP=R(ILAS+1)
68 IF(NP.NE.1) ELLIP=R(NP+1)
69 *WRITE(6,1093) ELLIP
70 BSHELL=ELLIP*ASHELL
71 TOTAL=4.0*(ASHELL+BSHELL)
72 DL=TOTAL/K
73 I=0
74 31 I=I+1
75 HEIGHT=I*DL
76 IF(HEIGHT.LE.BSHELL) GO TO 31
77 N2=I-1
78 N4=N2+1
79 N3=(K-4*N2-2)/2
80 N=2*N3+4*N2+2
81 IF(N.NE.K) GO TO 997
82 N5=N3+N4
83 N6=3*N2+N3+2
84 N7=3*N2+2*N3+2
85 DO 32 J=1+NP,N4+NP
86 I=J+ILAS-1
87 BB(I)=TSHELL
88 AA(I)=DL
89 IJMN(J)=I
90 IMA(J)=1
91 CURR(I)=1.0
92 R(I)=RSHELL+ASHELL
93 Z(I)=(J-2)*DL
94 32 CONTINUE
95 DDJ=BSHELL-N2*DL
96 DO 33 J=N4+NP+1,N5+NP
97 JJ=J-N4-1
98 I=J+ILAS-1
99 BB(I)=TSHELL

```

```

100 AA(I)=DL
101 IJMN(J)=I
102 IMX(J)=1
103 CURR(I)=1.0
104 R(I)=RSHELL+ASHELL+DDL-JJ*DL
105 Z(I)=BSHELL
106 33 CONTINUE
107 DDL= 2.0*ASHELL+DDL-N3*DL
108 DO 34 J=N5+NP+1,N6+NP
109 JJ=J-N5-1
110 I=J+ILAS-1
111 BB(I)=TSHELL
112 AA(I)=DL
113 IJMN(J)=I
114 IMX(J)=1
115 CURR(I)=1.0
116 R(I)=RSHELL-ASHELL
117 Z(I)=BSHELL+DDL-JJ*DL
118 34 CONTINUE
119 DDL=2.0*BSHELL+DDL-(2*N2+1)*DL
120 DO 35 J=N6+NP+1,N7+NP
121 JJ=J-N6-1
122 I=J+ILAS-1
123 BB(I)=TSHELL
124 AA(I)=DL
125 IJMN(J)=I
126 IMX(J)=1
127 CURR(I)=1.0
128 R(I)=RSHELL-ASHELL-DDL+JJ*DL
129 Z(I)=-BSHELL
130 35 CONTINUE
131 DDL=2.0*ASHELL+DDL-N3*DL
132 DO 36 J=N7+NP+1,NGROP
133 JJ=J-N7-1
134 I=J+ILAS-1
135 BB(I)=TSHELL
136 AA(I)=DL
137 IJMN(J)=I
138 IMX(J)=1
139 CURR(I)=1.0
140 R(I)=RSHELL+ASHELL
141 Z(I)=-BSHELL-DDL+JJ*DL
142 36 CONTINUE
143 37 CONTINUE
144 WRITE(6,1094)
145 DO 39 J=NP+1,NGROP
146 I=J+ILAS-1
147 S=2.0*PAI*R(I)/AA(I)/BB(I)
148 RES(J)=RHO*S
149 WRITE(6,1095) J,R(I),Z(I),AA(I),BB(I),RES(J)
150 39 CONTINUE
151 GO TO 100
152 40 CONTINUE
153 WRITE(6,1240)
154 WRITE(IOUT,1030) (ITIT1(I),I=1,18)
155 WRITE(IOUT,1031) (ITIT2(I),I=1,18)
156 I=0
157 IF(NP.NE.1) GO TO 50
158 41 I=I+1
159 READ(5,1020) K,JOGE,R(I),Z(I),AA(I),BB(I),CURR(I) ← カート 4~ (NTYP=1,4,5)
160 IF(K,GE.2) GO TO 42
161 GO TO 41
162 42 CONTINUE
163 NGC(1)=K+1
164 NGC(2)=1
165 IJMN(1)=1
166 IMX(1)=I-1
167 NGROP=K+1
168 ISTA=1
169 ILAS=I-1
170 N1=I-1
171 S=0.0
172 DO 43 J=ISTA,ILAS
173 IF(IOPTIO.NE.3) GO TO 49
174 IF(N1.NE.2) GO TO 49
175 R(J)=RPLA
176 Z(J)=-(-1.0)**J*APLA*PAI/4.0
177 IF(DLR.NE.0.0) R(J)=RPLA-(-1.0)**J*APLA*PAI/4.0
178 IF(DLR.NE.0.0) Z(J)=0.0
179 43 CONTINUE
180 IF(N1.NE.1) GO TO 48
181 R(J)=RPLA
182 Z(J)=BB(J)=0.0
183 AA(J)=APLA
184 CURR(J)=1.0
185 48 CONTINUE

```

← カート 4~ (NTYP=1,4,5)  
 • 番号, フォズ位置, 断面形状, 電流方向  
 • 回路分割数 (矩形度; NTYP=4,5)

```

186     IF(BB(J),NE,0,0) GO TO 44
187     S=S+2.0*R(J)/AA(J)/AA(J)
188     GO TO 43
189 44  S=S+2.0*PAI*R(J)/AA(J)/BB(J)
190     IF(N1,NE,1) GO TO 43
191     S=PAI*APLA**2
192     AA(1)=APLA
193 43  CONTINUE
194     RES(1)=RRPL*S
195     WRITE(6,1081)
196     *WRITE(IOUT,1090) (R(I),Z(I),I=1,ISTA,ILAS)
197     *WRITE(IOUT,1130) (CURR(I), I=1,ISTA,ILAS)
198     *RITE(6,1086) RES(1)
199     RSHELL=RPLA
200     ASHELL=ASH
201     TSHELL=TSH
202     IF(NTYP,EQ,4) GO TO 30 ]
203     IF(NTYP,EQ,5) GO TO 20 ]
204     TETA=PAI/K
205     TETA=0.0
206     WRITE(6,1094)
207     DO 45 J=2,NGROP
208     I=J+ILAS-1
209     BB(I)=TSHELL
210     AA(I)=2.0*PAI*ASHELL/K
211     IJMN(J)=I
212     IMX(J)=1
213     CURR(I)=1.0
214     R(I)=RSHELL+ASHELL*COS(2.0*PAI*(J-2)/K+OMEGA+TETA)
215     Z(I)=ASHELL*SIN(2.0*PAI*(J-2)/K+OMEGA+TETA)
216     S=0.0
217     S=K*R(I)/TSHELL/ASHELL
218     RES(J)=RHO*S
219     *WRITE(6,1095) J,R(I),Z(I),AA(I),BB(I),RES(J)
220 45  CONTINUE
221     GO TO 100
222 50  CONTINUE
223     I=I+1
224     READ(5,1020) K,JOGE,R(I),Z(I),AA(I),BB(I),CURR(I)
225     IF(1,GT,NP) GO TO 52
226     GO TO 51
227 52  CONTINUE
228     NGROP=K+I-1
229     NGC(1)=K+I-1
230     NGC(2)=1
231     N1=1
232     DO 53 J=1,NP
233     IJMN(J)=J
234     IMX(J)=1
235     S=PAI*APLA**2/NP
236     AA(J)=SQRT(APLA**2/NP)
237     BB(J)=0.0
238     RES(J)=RRPL/S*2.0*PAI*R(J)
239     *WRITE(6,1085) J,J,RES(J)
240     *WRITE(IOUT,1090) R(J),Z(J)
241 53  CONTINUE
242     RSHELL=RPLA
243     ASHELL=ASH
244     TSHELL=TSH
245     ILAS=1
246     IF(NTYP,EQ,4) GO TO 30
247     IF(NTYP,EQ,5) GO TO 20
248     TETA=PAI/K
249     TETA=0.0
250     DO 55 J=NP+1,NGROP
251     BB(J)=TSHELL
252     AA(J)=2.0*PAI*ASHELL/K
253     IJMN(J)=J
254     IMX(J)=1
255     CURR(J)=1.0
256     R(I)=RSHELL+ASHELL*COS(2.0*PAI*(J-2)/K+OMEGA+TETA)
257     Z(I)=ASHELL*SIN(2.0*PAI*(J-2)/K+OMEGA+TETA)
258     S=0.0
259     S=K*R(J)/TSHELL/ASHELL
260     RES(J)=RHO*S
261     *WRITE(6,1085) J,J,RES(J)
262     *WRITE(IOUT,1090) R(J),Z(J)
263 55  CONTINUE
264     GO TO 100
265 60  CONTINUE
266     WRITE(6,1260)
267     *WRITE(IOUT,1030) (ITIT1(I),I=1,18)
268     *WRITE(IOUT,1031) (ITIT2(I),I=1,18)
269     NGC(2)=1
270     I=0
271     IS=2
272     IJMN(1)=1
273 71  CONTINUE
274     I=I+1
275     READ(5,1020) K,JOGE,R(I),Z(I),AA(I),BB(I),CURR(I)
276     IF(JOGE,EQ,0) GO TO 69

```

← カード 4~  
 フラグマの本数が複数の場合に使用

← カード 4~  
 (NTYP=2 or 3 のとき 使用)

```

277      I=I+1
278      R(I)=R(I-1)
279      Z(I)=-Z(I-1)
280      AA(I)=AA(I-1)
281      BB(I)=BB(I-1)
282      CURR(I)=JOGE*CURR(I-1)
283  69 CONTINUE
284      IF(K.EQ.0.OR,K.EQ.15) GO TO 73
285      GO TO 71
286  73 CONTINUE
287      IJMN(IS)= I
288      IF(JOGE,NE,0) IJMN(IS)=I-1
289      ISTA=IJMN(IS-1)
290      ILAS=IJMN(IS)-1
291      IMX(IS-1)=ILAS-ISTA+1
292      IF(JOGE,EQ,0) GO TO 76
293      IF(IOP10,EQ,2) GO TO 76
294      IS=IS+1
295      IJMN(IS)=I
296      IMX(IS-1)=IJMN(IS)-IJMN(IS-1)
297  76 CONTINUE
298      IF(K.EQ.0) GO TO 74
299      IS=IS+1
300      GO TO 71
301  74 CONTINUE
302      NGC(1)=IS-1
303      NGROP=NGC(1)
304      N1=IJMN(2)-1
305      IF(IJMN(2).EQ.2.AND,BB(1).EQ.0.) RP=AA(1)
306      WRITE(6,1055) NGC(1),NGC(2),RP
307      WRITE(IOUT,1070)
308      DO 75 IS=1,NGROP
309      WRITE(IOUT,1080) IS
310      ISTA=IJMN(IS)
311      ILAS=IJMN(IS+1)-1
312      WRITE(IOUT,1090) (R(I),Z(I),I=ISTA,ILAS)
313      WRITE(IOUT,1130) (CURR(I), I=ISTA,ILAS)
314  75 CONTINUE
315      WRITE(IOUT,1120)
316      DO 81 IS=1,NGROP
317      ISTA=IJMN(IS)
318      ILAS=IJMN(IS+1)-1
319      S=0.
320      DO 92 I=ISTA,ILAS
321      IF(BB(I),NE,0.) GO TO 93
322      S=S+2.0*R(I)/AA(I)/AA(I)
323      GO TO 92
324  93 S=S+2.0*PAI*R(I)/(AA(I)*BB(I))
325  92 CONTINUE
326      RRR=RHO
327      IF(IS.EQ.1) RRR=1.72E-8
328      RES(IS)=RRR*S
329  94 CONTINUE
330      WRITE(6,1085) IS,IS,RES(IS)
331      WRITE(IOUT,1090) (AA(I),BB(I),I=ISTA,ILAS)
332  81 CONTINUE
333      IF(NTYP,EQ,3) GO TO 80
334      WRITE(6,1041)
335      GO TO 100
336  80 CONTINUE
337      READ(5,1025) I,RES(I) ← NTYP=3 のとき 使用.
338      IF(I,NE,0) GO TO 80
339      WRITE(6,1145)
340      WRITE(6,1140) (I,RES(I),I=1,NGROP)
341      WRITE(6,1041)
342      GO TO 100
343  997 WRITE(6,1997) N,K
344      STOP
345  998 WRITE(6,1999)
346  999 STOP
347  100 CONTINUE
348      RETURN
349  1000 FORMAT(18A4)
350  1010 FORMAT(5I3)
351  1020 FORMAT(2I5,7E10,2)
352  1025 FORMAT(15,5X,E10,2)
353  1030 FORMAT(1H1,18A4)
354  1031 FORMAT(1H ,18A4)
355  1040 FORMAT(1H0,13HINPUT SECTION,13)
356  1041 FORMAT(1H0,' ADSL CALCULATION GO ')
357  1055 FORMAT(/10X,'GROUP TOTAL NO.=',15,'          PLASMA GROUP NO.=',15
358      * /10X,'PLASMA MINOR RADIUS =',F10,3/)
358  1060 FORMAT(1H ,5X,4HMU =.1PE12,4,5X,24HMINOR RADIUS OF PLASMA =.
359      * .1PE12,4)
359  1070 FORMAT(1H ,3X,39HCOILE POSITION R(I),Z(I) AND CURRENT(I))
360  1080 FORMAT(1H ,4X,9H** GROUP=,13,3H **)

```



```

361 1081 FORMAT(///4X,'** GROUP = 1 ** R, Z, RESISTANCE')
362 1085 FORMAT(/4X,'** GROUP-',I3,' **',5X,'RES(',I2,') =',1PE15,5)
363 1086 FORMAT(1H ,4X,26H** GROUP= 1 ** RES( 1 ) = ,1PE15,5)
364 1090 FORMAT(1H ,6X,1P2E12,4,1X,2E12,4,1X,2E12,4,1X,2E12,4,1X,2E12,4)
365 1093 FORMAT(/4X,'*** RECTANGULAR CROSS SECTION ELLIPTICITY =',
1 F10,5,' ***')
366 1094 FORMAT(/4X,'*** SHELL ***', 9X,'R(J)',9X,'Z(J)',9X,'AA(J)',8X,
1 'BB(J)',7X,'RES(J)')
367 1095 FORMAT( 4X,'** GROUP -',I3,' **',2X,1P5E13,5)
368 1100 FORMAT(1H ,4X,15HNUMBER OF TURNS)
369 1120 FORMAT(///37H COIL RESISTER AND CROSS SECTION(A,B))
370 1130 FORMAT(1H ,6X,1PE12,4,13X,E12,4,13X,E12,4,13X,E12,4,13X,E12,4)
371 1140 FORMAT(5X,5(15,E12,4))
372 1145 FORMAT(/10X,'RES(I) --(INPUT)--')
373 1240 FORMAT(1H0,13X,' SHELL R AND A . BUNKATSU SOO -- INPUT -- ')
374 1260 FORMAT(1H0,13X,'R(I),Z(I) --INPUT-- ')
375 1997 FORMAT(/,'***** ERROR STOP 997 N=',I3,' K =',I3,' *****')
376 1999 FORMAT(1H0,' STOP 999 ')
377 END

```

インダクタンスの計算

```

*****
1 SUBROUTINE CALL(NGROP,R,Z,AA,BB,CURR,TN,MEMORY,A,AMU)
2 COMMON /INPT/ ITIT1(18),ITIT2(18),NGC(25),IJMN(100),IMX(100),UM,RP
3 DIMENSION R(1),Z(1),AA(1),BB(1),CURR(1),TN(1),A(1),AMU(100,100)
4 IOUT=6
5 DO 140 K= 1,NGROP-1
6 DU 140 L=K+1,NGROP
7 ISWTE=0
8 IF(K.EQ,NGC(2)) ISWTE=1
9 IF(L.EQ,NGC(2)) ISWTE=2
10 IVX1=IMX(K)
11 IVX2=IMX(L)
12 IOX1=IVX1
13 IOX2=IVX2
14 INX1=IVX1
15 INX2=IVX2
16 I12 =IVX1+IVX2
17 M1 =K
18 M2 =L
19 K1=IVX1+1
20 K2=K1+IVX2
21 K3=K2+INX1*INX1
22 K4=K3+INX2*INX2
23 K5=K4+IOX1*IOX2
24 K6=K5+I12
25 K7=K6+I12
26 K8=K7+I12
27 K9=K8+I12
28 K10=K9+I12
29 K11=K10+I12
30 * WRITE(6,1010) K11
31 IF(K11-1.GT,MEMORY) GO TO 990
32 DU 130 I=1,I12
33 I1=I+K5-1
34 I2=I+K6-1
35 I3=I+K7-1
36 I4=I+K8-1
37 I5=I+K9-1
38 I6=I+K10-1
39 IF(I.LE,IVX1) II=I+IJMN(K)-1
40 IF(I.GT,IVX1) II=I+IJMN(L)-1-IVX1
41 A(I1)=R(II)
42 A(I2)=Z(II)
43 A(I3)=AA(II)
44 A(I4)=BB(II)
45 A(I5)=CURR(II)
46 A(I6)=TN(II)
47 130 CONTINUE
48 CALL COPL(IVX1,IVX2,I12,ISWTE,M1,M2,INX1,INX2,IOX1,IOX2,K,L,
1 A(K1),A(K2),A(K3),A(K4),A(K5),A(K6),A(K7),A(K8),A(K9),
2 A(K10), AL1,AL2,AM,COEF)
48 AMU(M1,M2)=AM
49 AMU(M2,M1)=AM
50 AMU(M1,M1)=AL1
51 AMU(M2,M2)=AL2
52 140 CONTINUE
53 RETURN
54 990 CONTINUE
55 WRITE(IOUT,1020) K11
56 RETURN
57 1010 FORM AT(///'*** USED DIMENSION (A) SIZE =',I10//)
58 1020 FORMAT(1H0,43H***** MEMORY OVER FOR INDUCTANCE ,I10,
* 11H *****')
59 END

```

```

*****
1  SUBROUTINE COPL(IMX1,IMX2,IJMX,ISWT,M1,M2,INX1,INX2,IOX1,IOX2,K,L,
*      SELF1,SELF2,GRMU1,GRMU2,AM12,R,Z,AA,BB,CURR,TN,
*      AL1,AL2,AM,COEF)
2  COMMON /INPT/ ITIT1(18),ITIT2(18),NGC(25),IJMN(100),IMX(100),UM,RP
3  DIMENSION SELF1(IMX1),SELF2(IMX2),GRMU1(INX1,INX1),
*      GRMU2(INX2,INX2),AM12(IOX1,IOX2),R(IJMX),Z(IJMX),
*      AA(IJMX),BB(IJMX),CURR(IJMX),TN(IJMX)
4  IOUT=6
5  10 CONTINUE
6  IS=1
7  AL1=0.0
8  AL2=0.0
9  AM =0.0
10 DO 11 I=1,INX1
11 DO 11 J=1,INX1
12 GRMU1(I,J)=0.0
13 11 CONTINUE
14 DO 12 J=1,IMX1
15 SELF1(J)=0.0
16 12 CONTINUE
17 DO 13 I=1,INX2
18 DO 13 J=1,INX2
19 GRMU2(I,J)=0.0
20 13 CONTINUE
21 DO 14 J=1,IMX2
22 SELF2(J)=0.0
23 14 CONTINUE
24 DO 16 J=1,IOX2
25 DO 15 I=1,IOX1
26 AM12(I,J)=0.0
27 15 CONTINUE
28 16 CONTINUE
29 20 CONTINUE
30 GO TO (30,40),IS
31 30 CONTINUE
32 IO=1
33 I1=IMX1
34 GO TO 50
35 40 CONTINUE
36 IO=1+IMX1
37 I1=IMX1+IMX2
38 50 CONTINUE
39 DO 70 I=IO,I1
40 II=I
41 IF(IS .EQ.2) II=I-IMX1
42 X1=AA(I)
43 X2=BB(I)
44 R1=R (I)
45 Z1=Z (I)
46 IF(IS.EQ.1) SELF1(II)=RECL(X1,X2,R1)*UM
47 IF(IS.EQ.2) SELF2(II)=RECL(X1,X2,R1)*UM
48 DO 60 J=IO,I1
49 JJ=J
50 IF(IS .EQ.2) JJ=J-IMX1
51 IF(I.EQ.J) GO TO 60
52 R2=R (J)
53 Z2=Z (J)
54 IF(IS.EQ.1) AL1=AL1+AMUT(R1,R2,Z1,Z2)*UM*CURR(I)/ABS(CURR(I))
*      *CURR(J)/ABS(CURR(J))*TN(I)*TN(J)
55 IF(IS.EQ.2) AL2=AL2+AMUT(R1,R2,Z1,Z2)*UM*CURR(I)/ABS(CURR(I))
*      *CURR(J)/ABS(CURR(J))*TN(I)*TN(J)
56 IF(IS.NE.1) GO TO 55
57 GRMU1(II, JJ)=AMUT(R1,R2,Z1,Z2)*UM*CURR(I)/ABS(CURR(I))
*      *CURR(J)/ABS(CURR(J))
58 55 CONTINUE
59 IF(IS.NE.2) GO TO 60
60 GRMU2(II, JJ)=AMUT(R1,R2,Z1,Z2)*UM*CURR(I)/ABS(CURR(I))
*      *CURR(J)/ABS(CURR(J))
61 60 CONTINUE
62 70 CONTINUE
63 IF(IS.EQ.2) GO TO 100
64 DO 90 I=1,IMX1
65 AL1=AL1+SELF1(I)*TN(I)*TN(I)
66 90 CONTINUE
67 GO TO 130
68 100 CONTINUE
69 DO 120 I=1,IMX2
70 II=I+IMX1
71 AL2=AL2+SELF2(I)*TN(II)*TN(II)
72 120 CONTINUE
73 130 CONTINUE
74 IS=IS+1
75 IF(IS .EQ.2) GO TO 20
76 DO 150 I=1,IMX1
77 DO 140 J=1,IMX2
78 JJ=J+IMX1
79 R1=R(I)

```

```

80      R2=R(JJ)
81      Z1=Z(I)
82      Z2=Z(JJ)
83      AM=AM+AMUT(R1,R2,Z1,Z2)*UM*CURRE(I)/ABS(CURRE(I))
      *      *CURRE(JJ)/ABS(CURRE(JJ))*TN(I)*TN(JJ)
84      140 CONTINUE
85      150 CONTINUE
86      151 CONTINUE
87      COEF=AM/SQRT(AL1*AL2)
88      RETURN
89      END
    
```

イ=979=スの出力

```

*****
1      SUBROUTINE POUT(A,IRR,JZZ,JK,IRMX,JZMX)
2      DIMENSION A(IRR,JZZ)
3      IOUT=6
4      WRITE(IOUT,1060)
5      DO 130 I1=1,IRMX,10
6      I2=I1+9
7      IF(I2.GT,IRMX) I2=IRMX
8      JM=JK
9      ISWT=0
10     J1=1
11     J2=JM
12     IF(J2.GT,JZMX) J2=JZMX
13     100 CONTINUE
14     IF(ISWT,EQ,0) GO TO 110
15     JM=40
16     J1=J2+1
17     J2=J2+JM
18     IF(J2.GT,JZMX) J2=JZMX
19     110 CONTINUE
20     WRITE(IOUT,1000) (I,I=I1,I2)
21     DO 120 J=J1,J2
22     WRITE(IOUT,1010) J,(A(I,J),I=I1,I2)
23     120 CONTINUE
24     IF(J2.GE,JZMX) GO TO 130
25     IF(J2.LT,JZMX) ISWT=1
26     IF(J2.LT,JZMX) GO TO 100
27     130 CONTINUE
28     1000 FORMAT(1H0,5H J,I,10(4X,I3,5X))
29     1010 FORMAT(1H ,I3,2X,1P10E12,4)
30     1020 FORMAT(1H )
31     1060 FORMAT(1H1,)//
      1      1H .50H*****//
      2      1H .50H****          ****/
      3      1H .50H****          I N D U C T A N C E          ****/
      4      1H .50H****          ****/
      5      1H .50H*****//
32     RETURN
33     END
    
```

磁場計算

```

*****
C ** FIELD CALCULATION **
1      SUBROUTINE FIELD(R,Z,CR,CZ,CI,PSI,BR,BZ,AKEI,NP)
2      UM=4,E-7
3      IF(R,EQ,0.) GO TO 30
4      S=R*CR+CR*CR+(Z-CZ)*(Z-CZ)
5      P=2,0*R*CR
6      RK=2,0*P/(S+P)
7      RK=SQRT(RK)
8      IF(RK.GE,0.99999999) RK=0.99999999
9      CALL CEP125(RK,1,ZK,ZE,ILL)
10     AKEI=UM*SQRT(R*CR)*((1,0-RK*RK/2.)*ZK-ZE)/RK
11     PSI=CI*AKEI
12     SPSA=S-P
13     IF(SPSA,EQ,0,0) GO TO 25
14     IF(NP,EQ,0) GO TO 20
15     BZ=UM*CI/(2,0*SQRT(S+P))*(ZK-(S-2,0*CR*CR)/(S-P)*ZE)
16     IF(NP,EQ,2) GO TO 20
17     BR=UM*CI/(2,0*SQRT(S+P))*(Z-CZ)/R*(-ZK+S/(S-P)*ZE)
18     20 CONTINUE
19     RETURN
20     25 CONTINUE
21     BZ=0,0
22     BR=0,0
23     RETURN
24     30 CONTINUE
25     PSI=0,
26     AKEI=0,
27     BR=0,
28     BZ=C,5*CI*CR**2/SQRT((CR**2+(Z-CZ)**2)**3)*3,141592*UM
29     RETURN
30     END
    
```

```

***** ANALITIC CALCULATION OF SHELL EFFECT *****
1  SUBROUTINE ANAL(R,A,T,AM,RHO,U,PAI,AP)
2  IF(T,EQ,0,0) GO TO 9
3  SANA=PAI**2*U*R/4,0
4  RANA=PAI**2*R*RHO/2,0/A/T
5  TANA=SANA/RANA
6  SUEANA=U/4,0/A
7  DMANA=-PAI*U*R/2,0/A
8  SSANA=2,0*R**2/RAM/A/A
9  DSM=PAI**2*U*R*AP/4,0/A
10 WRITE(6,1000)
11 WRITE(6,1010)
12 WRITE(6,1020) SANA,RANA,TANA,SUEANA,DMANA,SSANA,DSM
13 1000 FORMAT(///4X,'ANALITIC CALCULATION OF SHELL')
14 1010 FORMAT(/9X,'L (H)',9X,'R (OHM)',8X,'T (SEC)',7X,'NUE (H/A)',
*        6X,'DM (H/M)',10X,'NS',11X,'MDS (H)')
15 1020 FORMAT(8E15,5)
16 9 CONTINUE
17 RETURN
18 END

```

解析値の計算  
(直円筒容器)

## 入力データの確認

```

***** INPUT DATA CHECK *****
1  SUBROUTINE CHECK(A,B,C,D,E,F,G,H,P,R,S,M1,M2, NGL,M3,A1,A2,T1,T2)
2  NSH=M1+1-NGL
3  RA=C/A
4  RB=B/C
5  WRITE(6,1000)
6  WRITE(6,1010)
7  WRITE(6,1020) A,B,A,C,D,E,F,G,H,P,R,S,NSH,M2,RA,RB,M3
8  WRITE(6,1030) NGL
9  WRITE(6,1040) A1,A2,T1,T2
10 1000 FORMAT(///4X,'INPUT DATA CHECK')
11 1010 FORMAT(/6X,'RPLA  APLA  RSHLL  ASHELL  TSHLL  RHO(OHM)',
*        'DLR  DLZ  DLT  IPLASMA  IDOT(1)  RAMUDA',
*        'NSH  NPL  B/R  A/B OPTION')
12 1020 FORMAT(3X,5F8,3,1PE10,2,0P3F7,3,1P2E10,2,0P7F,3,2I5,2F7,3,1I5)
13 1030 FORMAT(/6X,'AA(1)  AA(12,1)  DELT  FINTIM')
14 1040 FORMAT(3X,2F8,3,2E10,3)
15 RETURN
16 END

```

## 誘導電流のフーリエ展開

```

*      FOURIER EXPANSION *****
1  SUBROUTINE TENKA(X,NG,NP,DLZ)
2  DOUBLE PRECISION H,GG,ERR
3  DIMENSION X(1),H(50),GG(100)
4  WRITE(6,602)
5  NC=NG-NP+1
6  DO 5  I=1,50
7  H(I)=0.0
8  DO 6  J=1,100
9  GG(J)=0.0
10 DO 1  K=1,NC-1
11 Y=X(K)
12 GG(K)=DBLE(Y)
13 1 CONTINUE
14 GG(NC)=GG(1)
15 E=NC/2.0
16 M=FIX(E)
17 ERR=1.0
18 WRITE(6,605) NC,M,ERR
19 WRITE(6,606)
20 WRITE(6,601) (GG(I),I=1,NC)
21 IF(DLZ,EQ,0,0) GO TO 2
22 CALL SJFOD(GG,NC,M,ERR,H,ILL)
23 WRITE(6,603)
24 GO TO 3
25 2 CALL COFOD(GG,NC,M,ERR,H,ILL)
26 WRITE(6,604)
27 3 CONTINUE
28 IF(ILL,EQ,0) GO TO 4
29 WRITE(6,600) ILL
30 RETURN
31 4 CONTINUE
32 WRITE(6,601) (H(I),I=1,M)
33 600 FORMAT(/,' ILL =',I5,' ERROR STOP')
34 601 FORMAT(1P10E13,5)
35 602 FORMAT(/,' ***** FOURIER EXPANSION *****',/)
36 603 FORMAT(/,' SIN EXPANSION COEFFICIENTS',/)
37 604 FORMAT(/,' COS EXPANSION COEFFICIENTS',/)
38 605 FORMAT(' NC =',I3,' M =',I3,' ERR =',F8,4,/)
39 606 FORMAT(' ** INPUT DATA FOR FOURIER EXPANSION **')
40 RETURN
41 END

```

```

*****
1  FUNCTION RECL(A,B,R)
C  SELF-INDUCTANCE OF RECTANGULAR CROSS SECTION COIL
C  AND CIRCULAR CROSS SECTION COIL
2  IF(B.EQ.0.) GO TO 10
3  RS=0.5*ALOG(A*A+B*B)-B*B/(12.0*A*A)*ALOG(1.0+A*A/(B*B))
  * -A*A/(12.0*B*B)*ALOG(1.0+B*B/(A*A))+2.0*B/(3.0*A)*ATAN(A/B)
  * +2.0*A/(3.0*B)*ATAN(B/A)-25.0/12.0
4  GO TO 20
5  10 CONTINUE
6  RS=ALOG(A)-0.25
7  20 CONTINUE
8  RECL=R*(ALOG(8.0*R)-RS-2.0)
9  RETURN
10 END

```

```

*****
1  FUNCTION AMUT(R1,R2,Z1,Z2)
C  MUTUAL INDUCTANCE BETWEEN LOOP CURRENTS
2  AK=SQRT(4.0*R1*R2/((R1+R2)*(R1+R2)+(Z1-Z2)*(Z1-Z2)))
3  CALL CELI1S(AK,ELPK)
4  CALL CELI2S(AK,ELPE)
5  AMUT=2.0/AK*SQRT(R1*R2)*((1.0-AK*AK/2.0)*ELPK-ELPE)
6  RETURN
7  END

```