

JAERI-M
84-028

トカマクプラズマ制御検討における
渦電流主要モードの選択法

1984年2月

二宮 博正・小関 隆久・吉田 英俊・関 省吾

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山 田 軽 印 刷 所

トカマクプラズマ制御検討における渦電流主要モードの選択法

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

二宮 博正・小関 隆久・吉田 英俊・関 省吾

(1984年1月26日受理)

渦電流を含むトカマクプラズマ制御の検討のために、プラズマの挙動及び、その制御特性に強い影響を与える渦電流主要モードの選択法について報告する。制御対象モデルをブロック線図で表示することにより、渦電流による導電性構造物の passive 効果を6種の効果に分類した。これらの各効果（シェル効果、シールド効果等）は渦電流を固有モード展開することにより各固有モードが担っている効果の単純和で記述することができる事を示す。この性質を利用して、各固有モードが担っている効果の大きさを比較することにより、プラズマ制御に対し強い影響を与える渦電流主要固有モードを選択することができる。この選択法の適用例として、JT-60を考え、渦電流解析で得られた464個の固有モードの中から35個の固有モードを選択した。これら35個の固有モードは全体の渦電流が担っている諸効果を良く近似しており、この選択法を使用することにより、プラズマ制御対象モデルの次元数を大幅に縮小できることが分かった。

Selecting Method of the Dominant Eigenmodes of
Eddy Currents for Plasma Control Study

Hiromasa NINOMIYA, Takahisa OZEKI, Hidetoshi YOSHIDA,
and Shogo SEKI

Department of Large Tokamak Development ,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 26, 1984)

A method for selecting the dominant eigenmodes of the eddy currents which affect plasma equilibria and its control is presented. The method is based on the block-line diagram analysis of a control model. The passive effects of conductors due to eddy currents are classified into 6 groups and each effect such as a shell effect and a shield effect is expressed in a simple summation of that of each eigenmode. This property is used to select the dominant eigenmodes for a plasma control study. The application of this method is made for JT-60 and 35 dominant eigenmodes are selected from among 464 eigenmodes obtained from the eddy current analysis. The effect due to these 35 dominant eigenmodes approximates well to that due to 464 eigenmodes and it is shown that the dimension of the control model is well reduced by using this method.

Keywords : Dominant Eigenmode, Eddy Current, Plasma Control,
Tokamak, JT-60
(ii)

目 次

1.はじめに	1
2.渦電流を含むトカマクプラズマ制御モデル	2
3.渦電流主要固有モードの選択法	4
3.1 トカマクプラズマ制御モデルの線形化	4
3.2 主要固有モードの選択法	6
4.JT-60 に於ける渦電流主要固有モード	10
5.まとめ	19
参考文献	19
Appendix 1 JT-60 渦電流主要固有モードの選択	21

Contents

1. Introduction	1
2. Control Model of Tokamak Plasma Including Eddy Currents	2
3. Method for Selecting Dominant Eigenmodes of Eddy Currents	4
3.1 Linearization of Control Model of Tokamak Plasma	4
3.2 Method for Selecting Dominant Eigenmodes of Eddy Currents	6
4. Dominant Eigenmodes of Eddy Currents in JT-60	10
5. Conclusions	19
References	19
Appendix 1 Selection of Dominant Eigenmodes of Eddy Currents	
in JT-60	21

1. はじめに

トカマクを構成する各種導電性構造物（真空容器、上下架台等）に誘起される渦電流は、プラズマの電流・位置変化に対しては安定化効果（シュル効果）をもつ方向に流れると共に、外部ポロイダル磁場コイルによるプラズマ制御に対してはコイルの作る磁場をシールドする方向に流れ。従ってプラズマの種々の挙動（例えばプラズマ内部エネルギーの放出によるプラズマ電流、水平方向位置の変化や第2段加熱時のベータ値上昇に伴う位置変化等）、及びプラズマ電流、位置のフィードバック制御の検討を行なう際に、その制御対象の検討モデル（以下「制御モデル」と呼ぶ）の中に渦電流の効果を含むことが不可欠となる。

導電性構造物に流れる渦電流は、多数個の Passive Coils の集合として記述できるため、プラズマ、外部磁場コイルと渦電流との電磁気的相互作用は電気回路方程式の形で制御モデルの中に組み込むことが可能となる。渦電流を含む制御モデルとしては、渦電流の軸対称性を仮定したトカマク回路論がある。^{1,2)} このモデルはトカマク・プラズマ制御の Physical picture を理解するには便利である。しかし、現実のトカマク放電に於て一般的には渦電流の非軸対称成分を無視できない。例えば JT-60 の真空容器はトロイダル方向にベローズをもつために、^{3~5)} プラズマ変位に対する安定化効果は主に鞍型電流^{3~5)} が担っている。また上下架台もトロイダル方向にカットをもつため鞍型電流成分が渦電流の主体となっている。この様な軸対称性のない任意形状導体に流れる渦電流解析として有限要素回路法^{3~7)} がある。この方法は構造物を有限要素法的に要素分割し、固有モード展開することにより Passive Coils に相当する固有モード群を求めている。この方法を利用すると、これら固有モード表示した渦電流、プラズマ、外部磁場コイルの回路方程式及びプラズマの運動方程式を結合した制御モデルを作成することができる。

しかし、固有モード表示した全ての渦電流を含む制御モデルは渦電流効果を正確に表現できる反面、極言すれば無限個の固有モードを考えなければならなくなるためその制御モデルの取り扱い（例えば数値計算）が非常に難しくなる。そのため何らかの基準に基づいてプラズマの挙動及びプラズマ制御への寄与が大きい渦電流固有モードを選択することにより、制御モデルの合理化を行なうことが現実的問題として要求される。この選択法の一つとして、著者らはプラズマ位置変化に対する渦電流の安定化効果指數を既に報告した。⁸⁾ 本報告では、既報に加えてトカマクプラズマ制御の観点から総合的にみた渦電流各種効果の明確化及びそれらの効果に対する主要固有モードの選択法を提出する。

第2章では、一例として最も簡単なプラズマ位置・電流の制御モデルについて概説する。第3章では、第2章で得られた制御モデルをブロック線図表示することにより、プラズマの挙動及びその制御に対して渦電流が担っている各種の効果を明確にするとともに、これらの効果に対する主要固有モードの選択法について述べる。第4章では第3章の選択法の応用例として JT-60 の渦電流主要固有モードの選択結果について述べ、第5章にまとめを述べる。

2. 湧電流を含むトカマクプラズマ制御モデル

前章に於て、プラズマの挙動及び制御系の諸検討を行なうためには制御対象の物理現象を数式表現した制御モデルが必要な事を述べたが、本章ではトカマクプラズマ制御の基本であるプラズマ水平方向変位及びプラズマ電流変化に対する湧電流を含む制御モデルを考える。

プラズマ水平方向の運動は良く知られた Shafranov の式

$$M \frac{d^2 R_p}{dt^2} = \frac{\mu_0 I_p^2}{2} \left(\ell_n \frac{8 R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2} \right) + 2\pi R_p I_p B_z \quad (1)$$

を用いる。ここで

I_p : プラズマ電流

R_p : プラズマ大半径

a_p : プラズマ小半径

β_p : ポロイダル・ベータ値

ℓ_i : 規格化されたプラズマ内部インダクタンス

μ_0 : 真空の透磁率

B_z : プラズマ中心 ($R = R_p$, $Z = 0$) に於ける外部垂直磁場

である。また、プラズマ、ポロイダル磁場コイル、湧電流固有モードの各回路方程式は以下の様になる。

$$\frac{d}{dt} (L_p I_p) + \eta_p I_p + \sum_i \frac{d}{dt} (M_{p,i} I_i) + \sum_k \frac{d}{dt} (\tilde{M}_{p,k} \tilde{I}_k) = 0 \quad (2)$$

$$L_i \frac{d I_i}{dt} + \eta_i I_i + \frac{d}{dt} (M_{p,i} I_p) + \sum_j M_{i,j} \frac{d I_j}{dt} + \sum_k \tilde{M}_{i,k} \frac{d \tilde{I}_k}{dt} = E_i \quad (3)$$

$$\tau_k \frac{d \tilde{I}_k}{dt} + \tilde{I}_k + \frac{d}{dt} (\tilde{M}_{p,k} I_p) + \sum_i \tilde{M}_{i,k} \frac{d I_i}{dt} = 0 \quad (4)$$

ここで、添字 p はプラズマ、 i, j はポロイダル磁場コイル、 k は湧電流固有モードを意味し、 I は電流、 L は自己インダクタンス、 M はプラズマ、コイル間の相互インダクタンス、 η は抵抗、 τ は時定数（固有モードの時定数）を表わしている。なお固有モード展開しているため、(4)式に固有モード間の結合はない。また、湧電流の取り扱いを容易にするため、本報告では文献(3.8)で提案されている様に固有モードの電流 \tilde{I} をジュール損が 1 になる様に規格化する。従って \tilde{I} は $[A \cdot \Omega^{1/2}]$ のデイメンションを、また固有モードとプラズマ、またはコイルとの相互インダクタンス \tilde{M} は $[H \cdot \Omega^{-1/2}]$ のデイメンションをもつ。

外部垂直磁場 B_z は各コイル電流 I_i 及び湧電流 \tilde{I}_k の線型結合として

$$B_z(R_p) = \sum_i \nu_i(R_p) I_i + \sum_k \tilde{\nu}_k(R_p) \tilde{I}_k \quad (5)$$

と表わせられる。ここで

$\nu_i(R_p)$: コイル i の単位電流が R_p の位置に作る垂直磁場の大きさ

$\tilde{\nu}_k(R_p)$: 固有モード k の単位電流が R_p の位置に作る垂直磁場の大きさ

である。

以上(1)~(5)式が、プラズマ水平方向運動、プラズマ電流、ポロイダル磁場コイル電流、及びドカマク構成要素に流れる渦電流のダイナミクスを表現した制御モデルとなる。

3. 涡電流主要固有モードの選択法

渦電流が担うシェル効果やシールド効果等を具体的に数式表現するために前章で得られた制御モデル ((1)~(5)式) を線形化してラプラス変換し、ブロック線図を求めてみる。

3.1 トカマクプラズマ制御モデルの線形化

プラズマの運動の方程式(1)式を、プラズマ水平方向位置及びプラズマ電流の微少変化に対して線形化すると

$$-\frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} \tau_o^2 \frac{d^2 \delta R}{dt^2} = \frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} \left(1 - \frac{1}{A_o} - n\right) \delta R - B_{zo}^{EQ} \frac{\delta I_p}{I_p} + \delta B_z \quad (6)$$

$$\delta B_z = \delta B_z^c + \delta B_z^{EDDY}$$

となる。ここで

$$B_{zo}^{EQ} = -\frac{\mu_0 I_p}{4\pi R_p} A_o$$

$$A_o = \ell n \frac{8R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2}$$

$$\tau_o^2 = -\frac{M}{2\pi I_p B_{zo}^{EQ}} = \frac{R_p^2}{V_{PA}^2} \frac{1}{A_o} \quad (V_{PA} : ポロイダルアルフベン速度)$$

$$n = -\frac{R_p}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R_p}$$

$$\delta B_z^c = \sum_i \nu_i \delta I_i$$

$$\delta B_z^{EDDY} = \sum_k \widetilde{\nu}_k \widetilde{I}_k$$

である。なお(6)式では簡単のため、 a_p は変位 δR に対して不変とし、また平衡状態に於いては渦電流は流れていないと仮定している。(6)式をラプラス変換すると

$$-\frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} s^2 \tau_o^2 \delta R = \frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} \left(1 - \frac{1}{A_o} - n\right) \delta R - \frac{B_{zo}^{EQ}}{I_p} \delta I_p + \sum_i \nu_i \delta I_i + \sum_k \widetilde{\nu}_k \widetilde{I}_k \quad (7)$$

となる。

一方回路方程式(2)～(4)式を微少変化に対して線形化しラプラス変換すると

$$(sL_p + \eta_p) \delta I_p + sI_p \frac{\partial L_p}{\partial R} \delta R + \sum_i \left(sM_{p,i} \delta I_i + sI_i \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} \delta R \right) + \sum_k s\tilde{M}_{p,k} \tilde{I}_k = 0 \quad (8)$$

$$(sL_i + \eta_i) \delta I_i + sM_{p,i} \delta I_p + sI_p \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} \delta R + \sum_j sM_{i,j} \delta I_j + \sum_k s\tilde{M}_{i,k} \tilde{I}_k = \delta E_i \quad (9)$$

$$(s\tau_k + 1) \tilde{I}_k + s\tilde{M}_{p,k} \delta I_p + sI_p \frac{\partial \tilde{M}_{p,k}}{\partial R} \delta R + \sum_i s\tilde{M}_{i,k} \delta I_i = 0 \quad (10)$$

となる。(10)式より \tilde{I}_k を求め(7)～(9)式に代入すると以下の様になる。

$$-\frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} s^2 \tau_0^2 \delta R = \frac{B_{zo}^{EQ}}{R_p} \left(1 - \frac{1}{A_0} - n + \sum_k n_{sk} \frac{s\tau_k}{s\tau_k + 1} \right) \delta R - \frac{B_{zo}^{EQ}}{I_p} \delta I_p - \sum_k \tilde{\nu}_k \frac{s\tilde{M}_{p,k}}{s\tau_k + 1} \delta I_p - \sum_i \sum_k \tilde{\nu}_k \frac{s\tilde{M}_{i,k}}{s\tau_k + 1} \delta I_i + \sum_i \nu_i \delta I_i \quad (11)$$

$$\left\{ (sL_p + \eta_p) - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{p,k}^2}{s\tau_k + 1} \right\} \delta I_p + \sum_i \left\{ sM_{p,i} - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{p,k} \tilde{M}_{i,k}}{s\tau_k + 1} \right\} \delta I_i + \left(sI_p \frac{\partial L_p}{\partial R} + \sum_i sI_i \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} - \sum_k \frac{s^2 I_p \tilde{M}_{p,k}}{s\tau_k + 1} \frac{\partial \tilde{M}_{p,k}}{\partial R} \right) \delta R = 0 \quad (12)$$

$$\left\{ (sL_i + \eta_i) - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{i,k}^2}{s\tau_k + 1} \right\} \delta I_i + \left(sM_{p,i} - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{i,k} \tilde{M}_{p,k}}{s\tau_k + 1} \right) \delta I_p + \sum_j \left\{ sM_{i,j} - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{i,k} \tilde{M}_{j,k}}{s\tau_k + 1} \right\} \delta I_j + \left(sI_p \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} - \sum_k \frac{s^2 I_p \tilde{M}_{i,k}}{s\tau_k + 1} \frac{\partial \tilde{M}_{p,k}}{\partial R} \right) \delta R = \delta E \quad (13)$$

ただし

$$n_{sk} = -\frac{R_p}{B_{zo}^{EQ}} \frac{\tilde{\nu}_k}{\tau_k} \left(\frac{\partial \tilde{M}_{p,k}}{\partial R} I_p \right) \quad (14)$$

であり、文献(8)で提案した安定化効果指数である。(11)～(13)式をブロック線図で示すと図1, 2となる。図2は図1の渦電流の諸効果部分をまとめたものである。

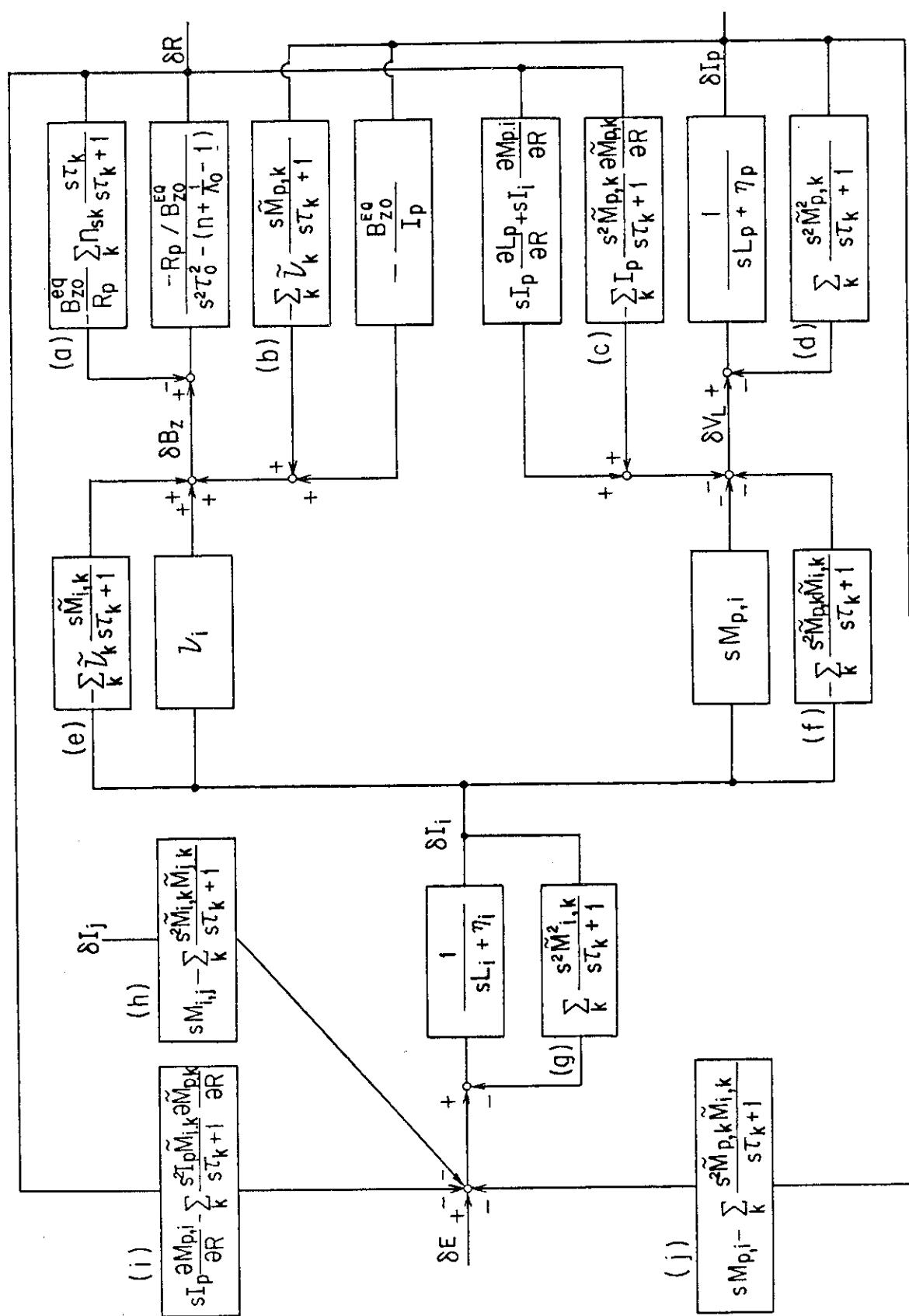


図1 プラズマ制御モデルのブロック線図

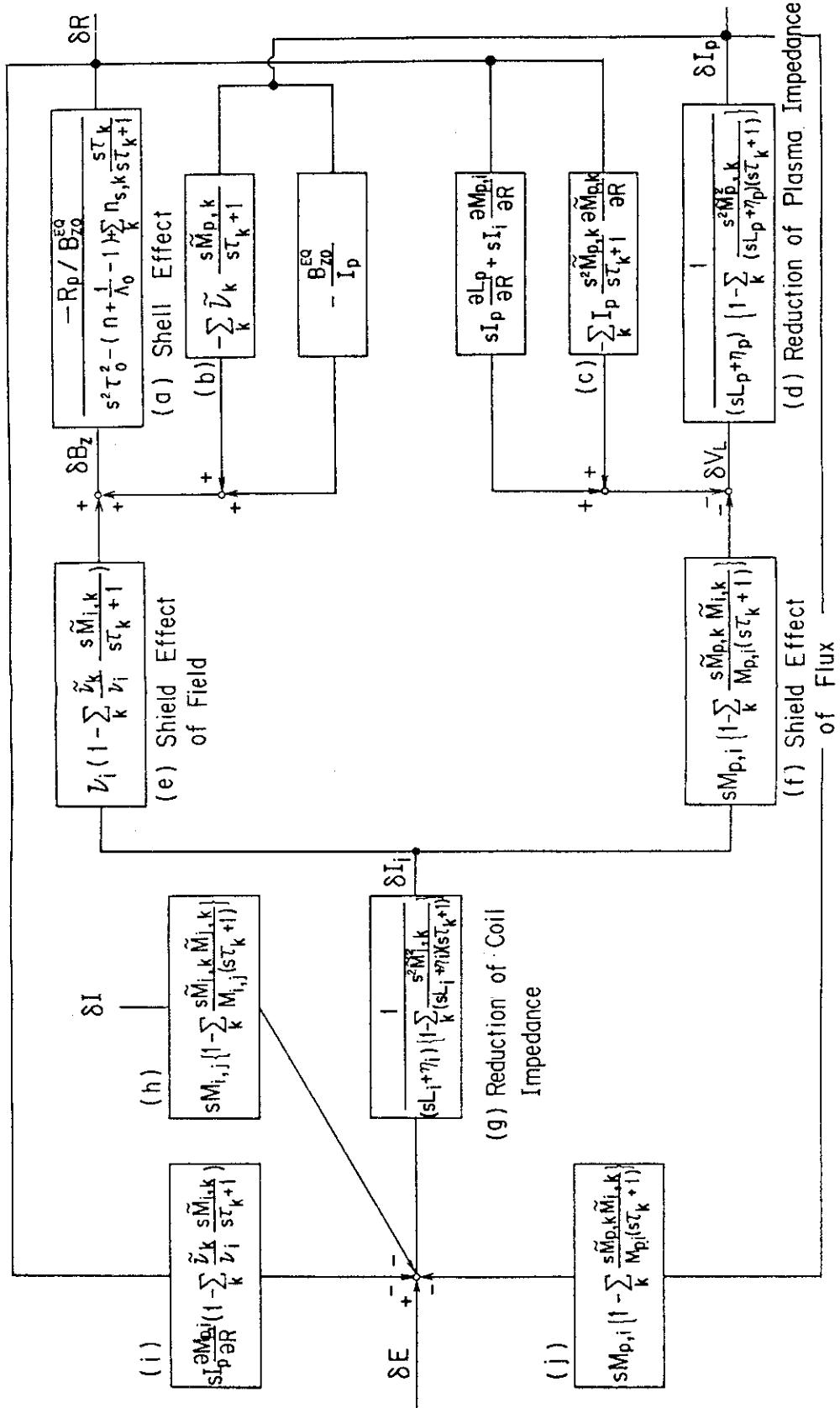


図 2 プラズマ制御モデルのブロック線図。図1をまとめたもの

3.2 主要固有モードの選択法

(1)～(3)式及び図1, 2より、渦電流がプラズマの挙動及び制御に与える影響を整理すると以下の様になる。

i) プラズマパラメータ変化に対するシェル効果

プラズマ位置変化に対するシェル効果(図1, 2の(a))は

$$n_s = \sum_k n_{sk} \frac{s\tau_k}{s\tau_k + 1} \quad (15)$$

又は

$$-\frac{B_{z0}^{EQ}}{R_p} \frac{\delta R_p}{\delta B_z} = \frac{1}{s^2 \tau_0^2 - (n + \frac{1}{A_0} - 1) + \sum_k n_{sk} \frac{s\tau_k}{s\tau_k + 1}} \quad (16)$$

を評価すれば良い。

プラズマ電流変化に対する渦電流の効果(図1, 2の(d))は下式～～～線部である。

$$(sL_p + \eta_p) \left\{ 1 - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{p,k}^2}{(sL_p + \eta_p)(s\tau_k + 1)} \right\} = \alpha_{LP} (sL_p + \eta_p) \quad (17)$$

上式は、渦電流がプラズマの等価的インピーダンスを α_{LP} だけ減らしていることを示しており、この α_{LP} を評価すれば良い。

ii) 磁場等に対するシールド効果

垂直磁場に対するシールド効果(図1, 2の(e))は下式～～～線部である。

$$\nu_i \left(1 - \sum_k \frac{\tilde{\nu}_k}{\nu_i} \frac{s\tilde{M}_{i,k}}{s\tau_k + 1} \right) = \alpha_{\nu i} \nu_i \quad (18)$$

上式はコイル電流の変化 δI_i による垂直磁場が渦電流により $\alpha_{\nu i}$ だけ減少することを示しており、この $\alpha_{\nu i}$ を評価すれば良い。

またコイルの作るワントーン電圧(フラックス変化)に対するシールド効果(図1, 2の(f))は下式～～～線部である。

$$M_{p,i} \left\{ 1 - \sum_k \frac{s\tilde{M}_{p,k} \tilde{M}_{i,k}}{M_{p,i}(s\tau_k + 1)} \right\} = \alpha_{MPI} M_{p,i} \quad (19)$$

この場合も α_{MPI} を評価すれば良い。なお、 $s \rightarrow \infty$ においては構造物が完全導体となる様に渦電流は流れるので、構造物がプラズマを完全におおっている場合 $\alpha_{\nu i}$, α_{MPI} は零となる。

iii) コイルの等価的インピーダンスの変化(図1, 2の(g))

(13式第1項)

$$(sL_i + \eta_i) \left\{ 1 - \sum_k \frac{s^2 \tilde{M}_{i,k}^2}{(sL_i + \eta_i)(s\tau_k + 1)} \right\} = \alpha_{Li} (sL_i + \eta_i) \quad (20)$$

はコイルの等価的インピーダンス $(sL_i + \eta_i)$ が渦電流の存在で α_{Li} だけ減少することを意味している。

iv) プラズマ電流、位置変化による磁場、ワンターン電圧の発生

プラズマ電流及び位置変化により誘起される渦電流はそれぞれ垂直磁場(図1, 2の(b)), ワンターン電圧(図1, 2の(c))を発生する。これらの効果は $\tilde{\nu}_k = (\partial \tilde{M}_{p,k} / \partial R) / 2\pi R_p$ であることを考慮すると

$$\sum_k \frac{s \tilde{M}_{p,k}}{s\tau_k + 1} \frac{\partial \tilde{M}_{p,k}}{\partial R} \equiv \alpha_{pp} \quad (21)$$

となり、(21)式を評価すれば良い。

v) プラズマ位置、電流変化によるコイルへのね返り電圧への影響

プラズマ位置、電流変化により、渦電流がない場合 $sI_p \partial M_{p,i} / \partial R$ 及び $sM_{p,i}$ だけの電圧がコイルに誘起されるが、(13式及び図1, 2の(i), (j)より明らかな様にこれらのはね返り電圧は渦電流の存在により以下の様に減少する。

$$I_p \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} \left(1 - \sum_k \frac{\tilde{\nu}_k}{\nu_i} \frac{s \tilde{M}_{i,k}}{s\tau_k + 1} \right) = \alpha_{pi} I_p \frac{\partial M_{p,i}}{\partial R} \quad (22)$$

$$M_{p,i} \left\{ 1 - \sum_k \frac{s \tilde{M}_{p,k} \tilde{M}_{i,k}}{M_{p,i}(s\tau_k + 1)} \right\} = \alpha_{MPI} M_{p,i} \quad (23)$$

なおこれらの効果は図1, 2(e), (f)のシールド効果と同じ形をしており、評価方法は ii)と同じである。

vi) コイル間の相互インダクタンスの変化

渦電流の存在によりコイル間の相互インダクタンスも下式の様に減少する(図1, 2(h))。

$$M_{i,j} \left\{ 1 - \sum_k \frac{s \tilde{M}_{i,k} \tilde{M}_{j,k}}{M_{i,j}(s\tau_k + 1)} \right\} = \alpha_{Mij} M_{i,j} \quad (24)$$

以上 i) ~ vi) の評価を各固有モードに対して行なうことにより、プラズマの挙動及び制御に強い影響を与える主要固有モードを選択することができる。

4. JT-60に於ける渦電流主要固有モード

本章では前章で述べた方法の応用例として、JT-60に於けるプラズマ水平方向位置変位及びプラズマ電流変化に対してシェル効果、シールド効果等が大きくプラズマ制御への影響力が強い渦電流主要固有モードを選択する。

検討対象は、文献(7)に示されているJT-60真空容器、上下架台、トロイダル磁場コイル、中心支柱に対する渦電流解析結果である。この解析結果では、755 msecから14 μsecまでの時定数をもつ総数464個の固有モードが求められている。これらの固有モードのなかで、時定数が16 msecより短い固有モード（モードNo.219以上のモード）は真空容器に流れる渦電流が主体のモードであり、時定数が16 msecより長い固有モードはトロイダル磁場コイル、上下架台、中心支柱等に流れる渦電流が主体のモードである。制御モデルにこの464個の全固有モードを取り入れることは非能率であるから、前章で述べた方法を用いて渦電流の主要固有モードを選択する。この時、ポロイダル磁場コイルとしては空心変流器コイルと垂直磁場コイルの2種類を考える。

主要固有モードの選択は、その特性の近似度及び制御モデルの次元数の大きさの観点から

- i) 選択された主要固有モード群により、464個の全固有モード群がもつ各種効果(n_s ,
 α_{LP} , α_{Vi} , α_{MP} 等)の80%以上を近似できること
 - ii) かつ選択された主要固有モード数を全固有モード数の1/10以下にすること
- を目標とした評価基準により行なった。

この結果、JT-60に於けるプラズマ電流及びプラズマ水平方向位置変化に対する渦電流主要モードは第1表に示す35モードとなる（Appendix 1参照）。

表1 JT-60に於ける渦電流主要固有モード ($2.5^m \leq R_p \leq 3.5^m$)

主 要 固 有 モ ド No.	4, 9, 14, 17, 22, 32, 41, 50, 201, 202, 219, 230, 242, 250, 259, 262, 270, 273, 275, 276, 277, 279, 280, 298, 386, 390, 391, 392, 414, 415, 417, 418, 425, 430, 435
-----------------------------------	---

(注) 本表のモードを選択するにあたっては、Appendix 1に示す様な渦電流諸効果のもつ空間依存性が考慮されている。

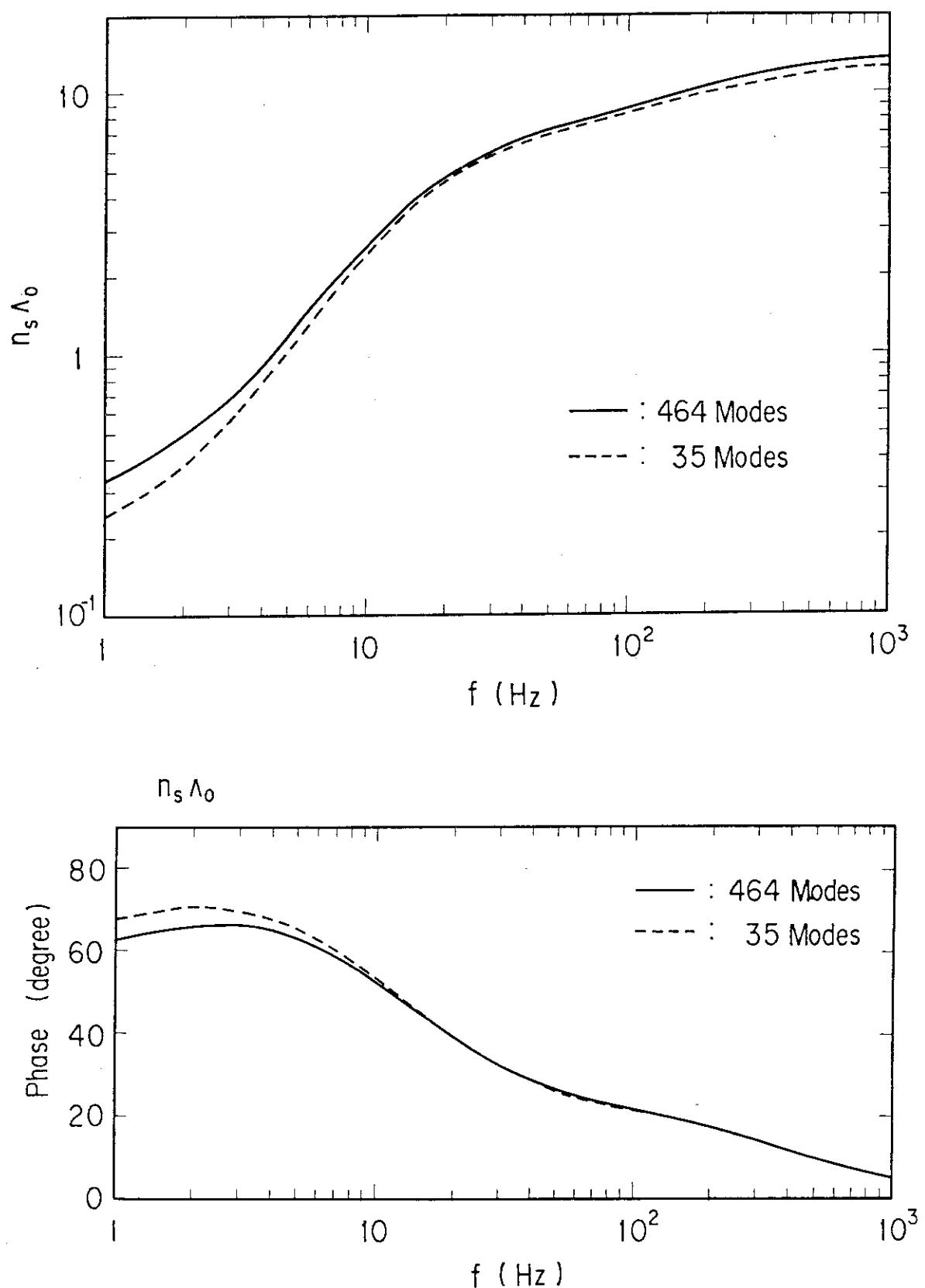
次に、この35個の主要固有モードによる各種シェル効果、シールド効果等の近似度及び適用範囲について述べる。渦電流の各種効果のなかで特に重要と思われる n_s , α_{LP} , α_{VV} , α_{MPF} , α_{PP} の各効果のボード線図($R_p = 3.03 m$ の場合)を、464個の全固有モード群に対してと35個の主要固有モード群に対して求めた結果を図3から8に、また $s \rightarrow \infty$ に於ける結果を表2に示す。これらの結果から以下の結論を得る。

表2 涡電流各種効果の $s \rightarrow \infty$ に於ける 464 個の全固有モードと 35 個の主要固有モードより得られる結果の比較 ($R_p = 3.03\text{m}$ の場合)

項	目	464 個全固有モード	35 個の主要固有モード
水平方向変位に対するシェル効果: $n_s A_0$		13.64	12.83
プラズマの等価的インピーダンスの変化: α_{LP}		0.344	0.381
垂直磁場コイルの作る垂直磁場に対するシールド効果: α_{vv}		0	0.042
空心変流器コイルの作るワンターン電圧に対するシールド効果 : α_{MPF}		0	0.036
プラズマ電流、位置変化による垂直磁場、ワンターン電圧の発生: α_{PP}		1.038×10^{-6}	1.100×10^{-6}

- i) 水平方向変位に対するシェル効果、プラズマ、コイルの等価的インピーダンスの変化等に対しては、35 個の主要モードを選ぶことにより 464 個の全固有モード群のもつ効果の 80 %以上を全周波数領域に対して近似できる。
 - ii) 垂直磁場のシールド効果 α_{vv} 、ワンターン電圧のシールド効果 α_{MPF} については、図 6, 7 からわかる様に近似度が 80 %以上を満たしている周波数領域は $f \lesssim 10^2\text{ Hz}$ であり、
 $f > 10^2\text{ Hz}$ の高周波領域では特に位相特性の誤差が大きくなる。この原因是、464 個の全固有モードを考えた場合 $s \rightarrow \infty$ で渦電流は垂直磁場、ワンターン電圧を完全にシールドしており(表 2)，その場合 α_{vv} 、 α_{MPF} は一次遅れ要素の形になっているのに対し、35 個の主要固有モードによる場合その近似のために α_{vv} 、 α_{MPF} が位相遅れ補償要素の形になるためである。従って $f \gtrsim 10^2\text{ Hz}$ での位相特性を取り扱うためには、 $s \rightarrow \infty$ における α_{vv} 、 α_{MPF} を零に近くする必要があるが、そのためには結局 464 個の全固有モードを用いざるを得ない。
 - iii) 図 8 のプラズマ電流、位置変化による垂直磁場、ワンターン電圧の発生 α_{PP} に関しては、
 $f \lesssim 5\text{ Hz}$ の周波数領域で近似度が 80 %以下になる。しかしこの効果の絶対値は小さく、制御モデルの評価をする上でこの誤差の影響は充分小さいと考えられる。
- すなわち、JT-60 のプラズマ制御解析に於いては、35 個の渦電流主要固有モードを用いることにより
- シールド効果以外の効果については、35 個の主要固有モードにより全体の渦電流が担っている効果の 80 %以上を近似できる。
 - シールド効果 (α_{vi} 、 α_{MPi}) については、 $f \leq 100\text{ Hz}$ の領域に対しては 80 %以上の近似になっているが、 $f > 100\text{ Hz}$ の領域に対しては 35 個の主要固有モードによる近似は精度が悪くなる。従って、 $f > 100\text{ Hz}$ の領域に於ける精度が問題となる検討では主要固有モード数を 35 個より大きくする必要がある。
- ことがわかった。
- なお以上の評価に於いては、ポロイダル磁場コイルは空心変流器コイルと垂直磁場コイルの

みを考えているが、JT-60の場合、これら以外のポロイダル磁場コイルに対しても表1の渦電流固有モードが主要固有モードとなっている。

図3 プラズマ水平方向変位のシェル効果 $n_s A_0$ のボード線図

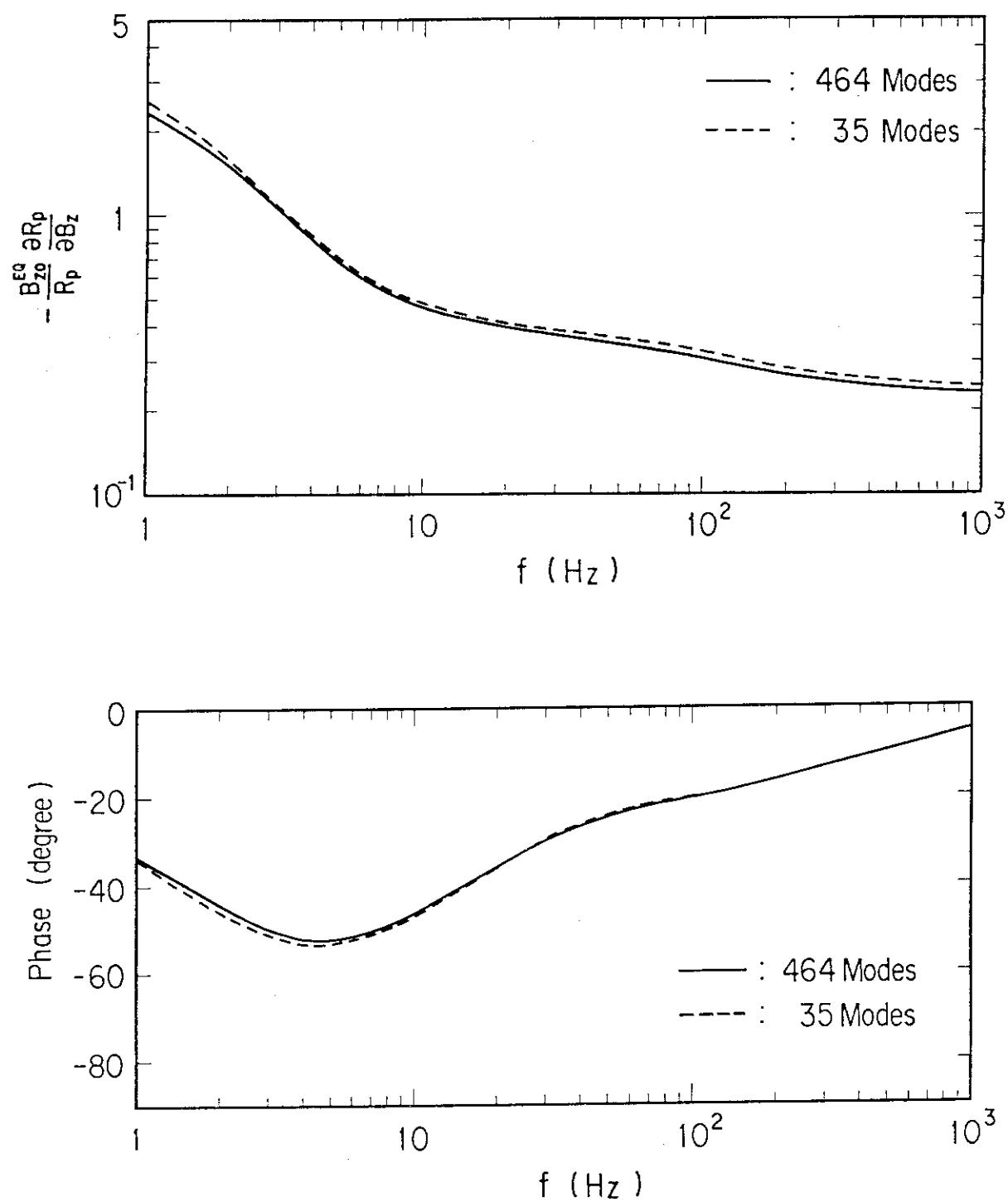
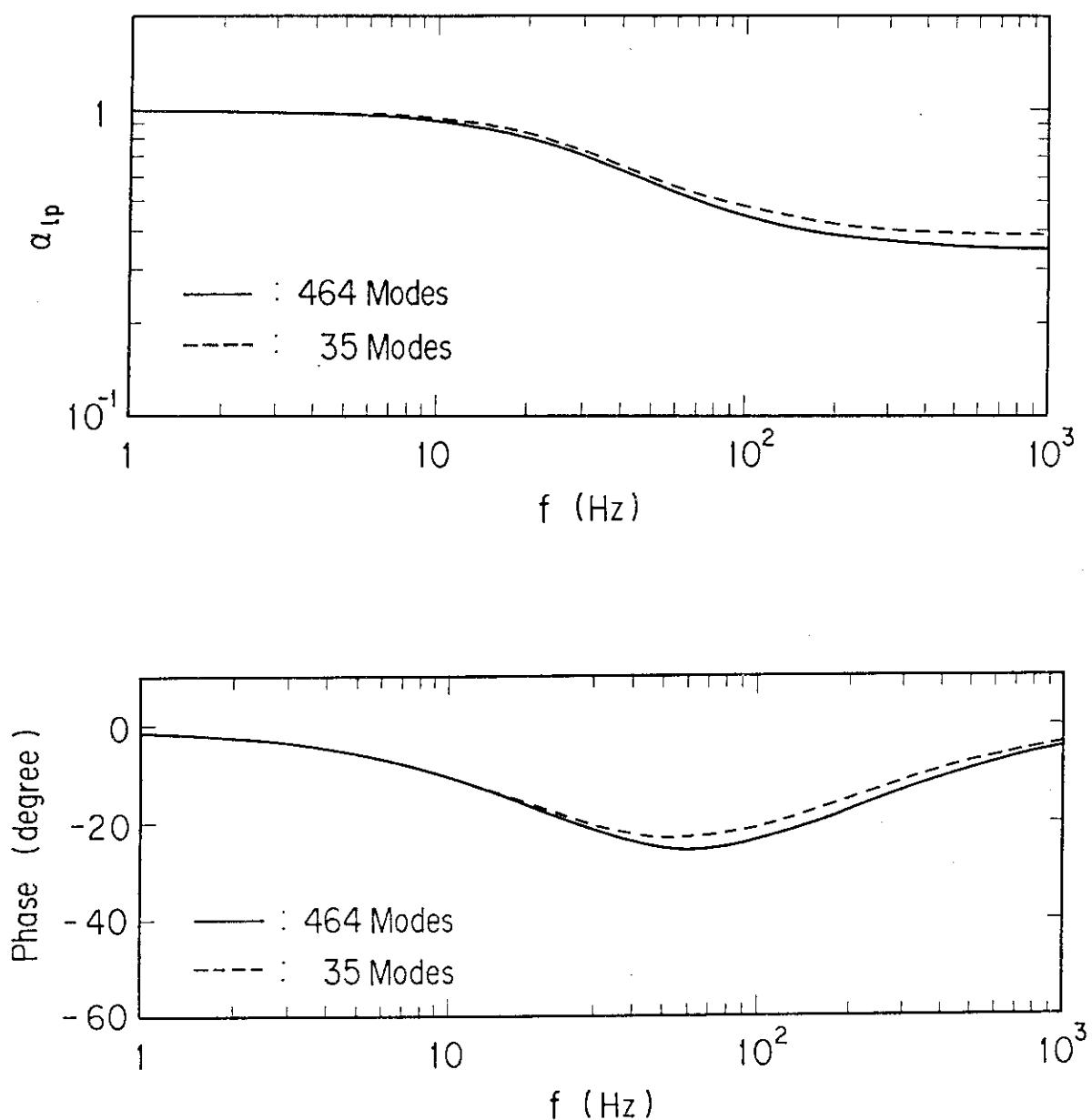


図4 プラズマ水平方向変位 $-(B_{z0}^{EQ}/R_p) \cdot (\delta R_p/\delta B_z)$ の
ボード線図。 $n = 0.5, \tau_0^2 = 10^{-12}, A_0 = 3.26$ の場合

図5 プラズマの等価的インピーダンスの変化 α_{lp} のボード線図

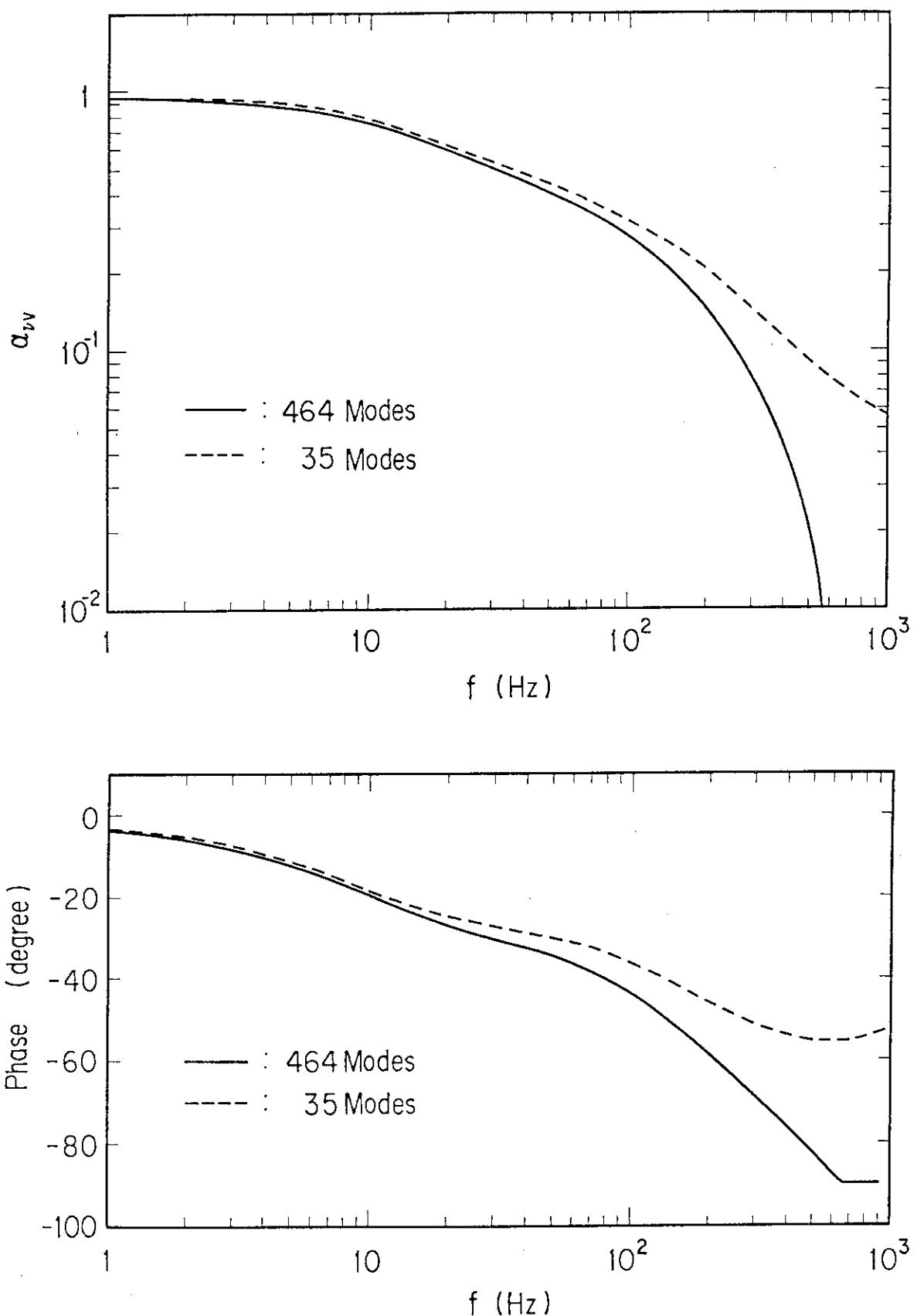


図6 垂直磁場コイルの作る垂直磁場に対するシールド効果 α_{vv} のボード線図

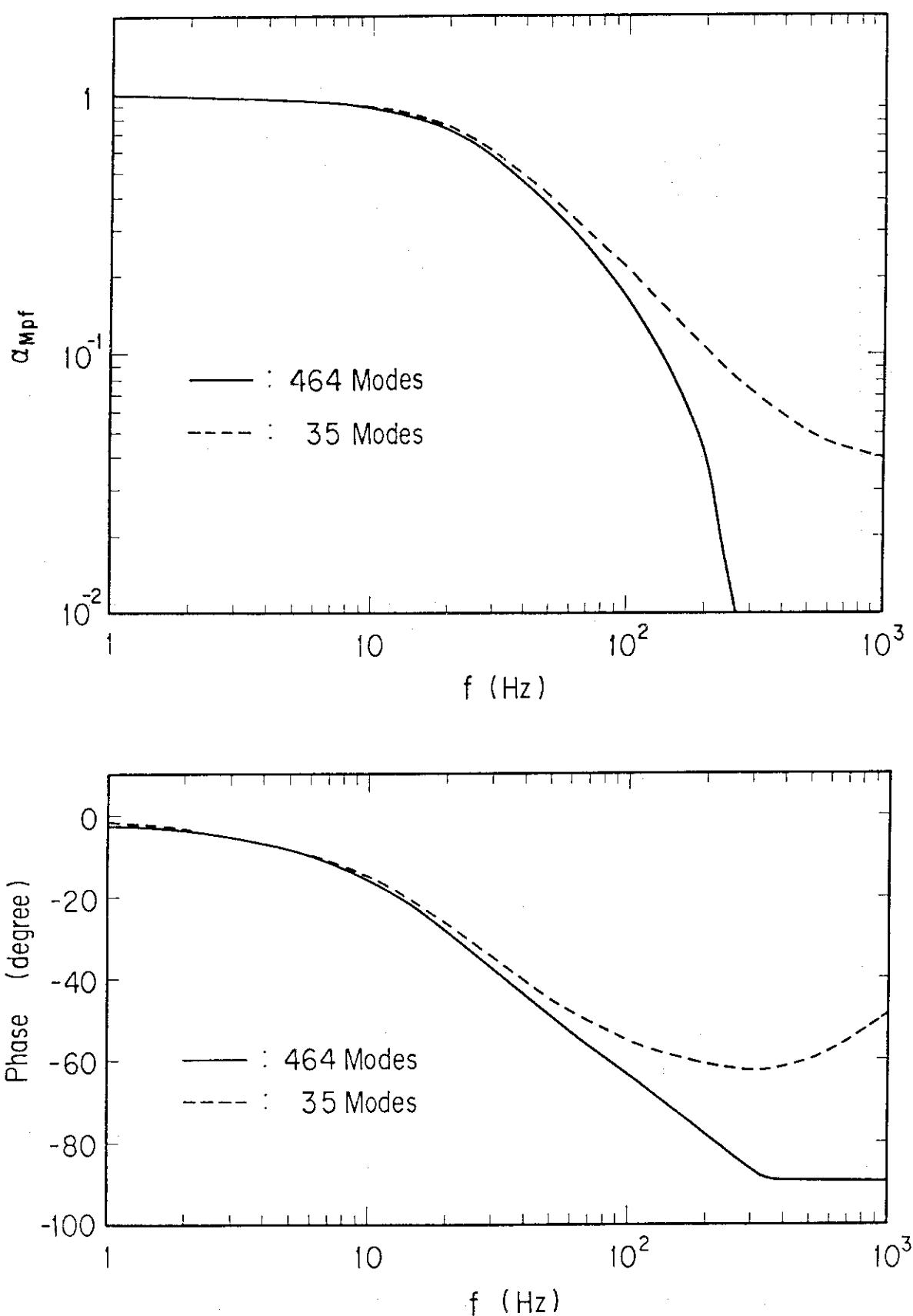


図7 空心変流器コイルの作るワンターン電圧に対する
シールド効果 α_{MPF} のボード線図

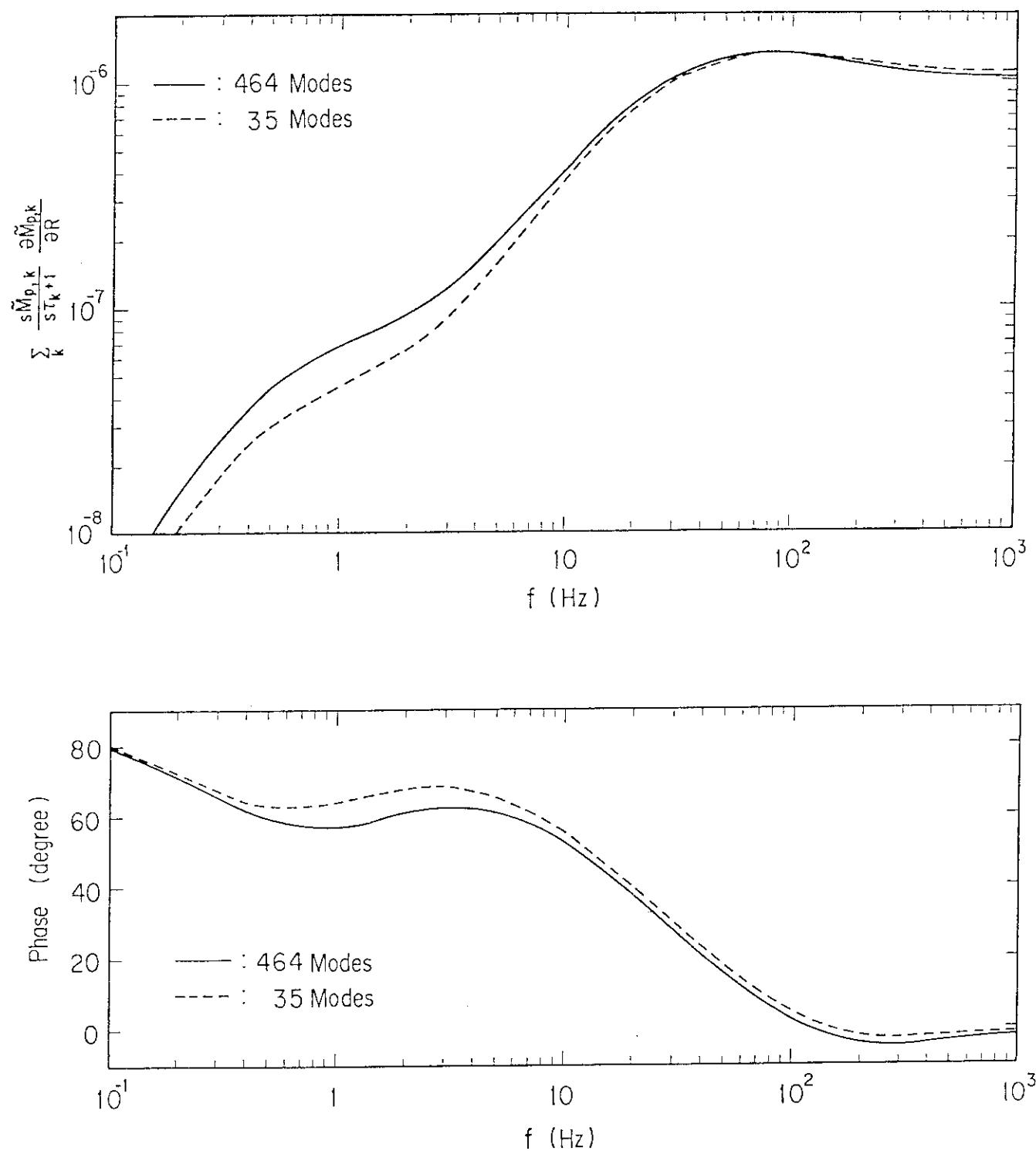


図 8 プラズマ電流, 位置変化による垂直磁場, ワンターン電圧の
発生 α_{pp} に関する伝達関数のボード線図

5. ま　と　め

大型トカマク装置に於いて、プラズマ周辺の各種導電性構造物に誘起される渦電流は、プラズマの挙動及びその制御の検討上非常に重要である。導電性構造物の代表的なものとしては真空容器、トロイダル磁場コイル等があるが、これら任意形状の導電性構造物に流れる渦電流は、有限要素法的に要素分割することにより多数個の Passive Coils として取り扱うことができるため、電気回路方程式の形で制御モデルの中に渦電流の効果を組み込むことが可能である。しかし、一般にはこの Passive Coils 又は固有値展開した固有モード群の個数は非常に多い（厳密には無限個）ため、そのままでは制御モデルの次元数も非常に大きくなりその解析が困難となる。

本報告は、制御モデル作成のために多数個の渦電流固有モードの中から特にプラズマの挙動及びその制御に強い影響を与えるモードを選択するための一般的な方法を提出したものである。上記目的のために制御モデルのブロック線図を求め、渦電流が担う諸効果を 6 種の効果に分類した。またこれらの効果は渦電流各固有モードが担っている効果の単純和であることを示した。この性質を利用して、各固有モードが担っている効果の大きさを比較することにより各効果に対する渦電流主要固有モードを選択することが可能であることを示した。更に、この選択法を JT-60 に適用して、JT-60 渦電流解析⁷⁾で得られていた 464 個の渦電流固有モードを選ぶことにより、プラズマ制御設計・検討の主対象となる周波数領域 ($f \lesssim 100 \text{ Hz}$) に於ける渦電流諸効果を 80 % 以上の精度で近似できることを示した。この結果、JT-60 制御モデルの次元数が大幅に縮小され（470 から 40 程度）、本報告で提出した渦電流主要モード選択法の有用性が示された。

なお、プラズマ電流、プラズマ水平方向位置変化以外の現象、例えば非円形断面トカマクの垂直方向位置変化やプラズマ形状変化等に対しても第 3 章の方法論を適用することにより渦電流主要固有モードを選択することが可能である。

本報告をまとめるにあたり、中村幸治氏（JT-60 第 3 開発室）及び JT-60 計画室実験・解析グループの諸氏に有益な議論をして頂いた。ここに諸氏の有益な御援助に対し感謝の意を表する。

参　考　文　献

- (1) 鈴木康夫、小方厚、二宮博正、他： JAERI-M 6531 (1976).
- (2) Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata et. al. : Jpn. J. Appl. Phys. 16 (1977) 2237.

5. ま　と　め

大型トカマク装置に於いて、プラズマ周辺の各種導電性構造物に誘起される渦電流は、プラズマの挙動及びその制御の検討上非常に重要である。導電性構造物の代表的なものとしては真空容器、トロイダル磁場コイル等があるが、これら任意形状の導電性構造物に流れる渦電流は、有限要素法的に要素分割することにより多数個の Passive Coils として取り扱うことができるため、電気回路方程式の形で制御モデルの中に渦電流の効果を組み込むことが可能である。しかし、一般にはこの Passive Coils 又は固有値展開した固有モード群の個数は非常に多い（厳密には無限個）ため、そのままでは制御モデルの次元数も非常に大きくなりその解析が困難となる。

本報告は、制御モデル作成のために多数個の渦電流固有モードの中から特にプラズマの挙動及びその制御に強い影響を与えるモードを選択するための一般的な方法を提出したものである。上記目的のために制御モデルのブロック線図を求め、渦電流が担う諸効果を 6 種の効果に分類した。またこれらの効果は渦電流各固有モードが担っている効果の単純和であることを示した。この性質を利用して、各固有モードが担っている効果の大きさを比較することにより各効果に対する渦電流主要固有モードを選択することが可能であることを示した。更に、この選択法を JT-60 に適用して、JT-60 渦電流解析⁷⁾ で得られていた 464 個の渦電流固有モードを選ぶことにより、プラズマ制御設計・検討の主対象となる周波数領域 ($f \lesssim 100 \text{ Hz}$) に於ける渦電流諸効果を 80 % 以上の精度で近似できることを示した。この結果、JT-60 制御モデルの次元数が大幅に縮小され（470 から 40 程度）、本報告で提出した渦電流主要モード選択法の有用性が示された。

なお、プラズマ電流、プラズマ水平方向位置変化以外の現象、例えば非円形断面トカマクの垂直方向位置変化やプラズマ形状変化等に対しても第 3 章の方法論を適用することにより渦電流主要固有モードを選択することが可能である。

本報告をまとめるにあたり、中村幸治氏（JT-60 第 3 開発室）及び JT-60 計画室実験・解析グループの諸氏に有益な議論をして頂いた。ここに諸氏の有益な御援助に対し感謝の意を表する。

参　考　文　献

- (1) 鈴木康夫、小方厚、二宮博正、他： JAERI-M 6531 (1976).
- (2) Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata et. al. : Jpn. J. Appl. Phys. 16 (1977) 2237.

- (3) 龜有昭久, 鈴木康夫 : JAERI-M 7120 (1977).
- (4) A. Kameari and Y. Suzuki : Proc. 7 th Simp. Eng. Prob. Fusion Res. (1977) p. 1386.
- (5) H. Ninomiya, Y. Nakamura, T. Ozeki et al. : Proc. 8 th Simp. Eng. Prob. Fusion Res. (1979) P. 1863.
- (6) 中村幸治, 小関隆久 : JAERI-M 9612 (1981).
- (7) T. Ozeki and Y. Nakamura : JAERI-M 83-159 (1983).
- (8) 関省吾 二宮博正, 吉田英俊 : JAERI-M 83-165 (1983).

Appendix 1 JT-60渦電流主要固有モードの選択

本文表1に示した35個の主要固有モードは以下の様な検討により得た。

第3章で述べた様に、渦電流が担う諸効果 n_s , α_{LP} , $\alpha_{\nu i}$, α_{MPI} , α_{Li} , α_{Mij} , α_{PP} は全て周波数特性を有している。そこで、JT-60 ポロイダル磁場コイル系の時定数及び制御系の特徴等を考慮して $1 \leq f \leq 10^4$ Hz の周波数領域及び $s \rightarrow \infty$ に於ける各効果伝達関数のゲインを各固有モード毎に求め、第4章に述べた評価基準に従い主要固有モードを求めた。諸効果のなかで特に重要と思われるシェル効果 n_s , プラズマの等価的インピーダンスの変化 α_{LP} , 垂直磁場コイルの作る垂直磁場に対するシールド効果 $\alpha_{\nu v}$, 空心変流器コイルの作るワンターン電圧に対するシールド効果 α_{MPI} , コイルの等価的自己インダクタンスの変化 α_{Lv} , α_{LF} , 及びプラズマ電流, 位置変化による垂直磁場, ワンターン電圧の発生 α_{PP} に対して上記の方法に従い行なった検討結果を表A-1に示す。但し $R_p = 3.03$ mの場合である。表A-1をまとめると、JT-60に於ける $R_p = 3.03$ mのプラズマの挙動及びその制御に強い影響を与える固有モードとして表A-2の28個の固有モードを得る。

表A-2 $R_p = 3.03$ mの場合の渦電流主要固有モード

固 モ ー ド 有 No.	4, 9, 14, 17, 32, 41, 50, 201, 202, 219, 230, 242, 259, 270, 273, 275, 276, 277, 279, 280, 298, 386, 390, 391, 392, 414, 415, 418
------------------------------	--

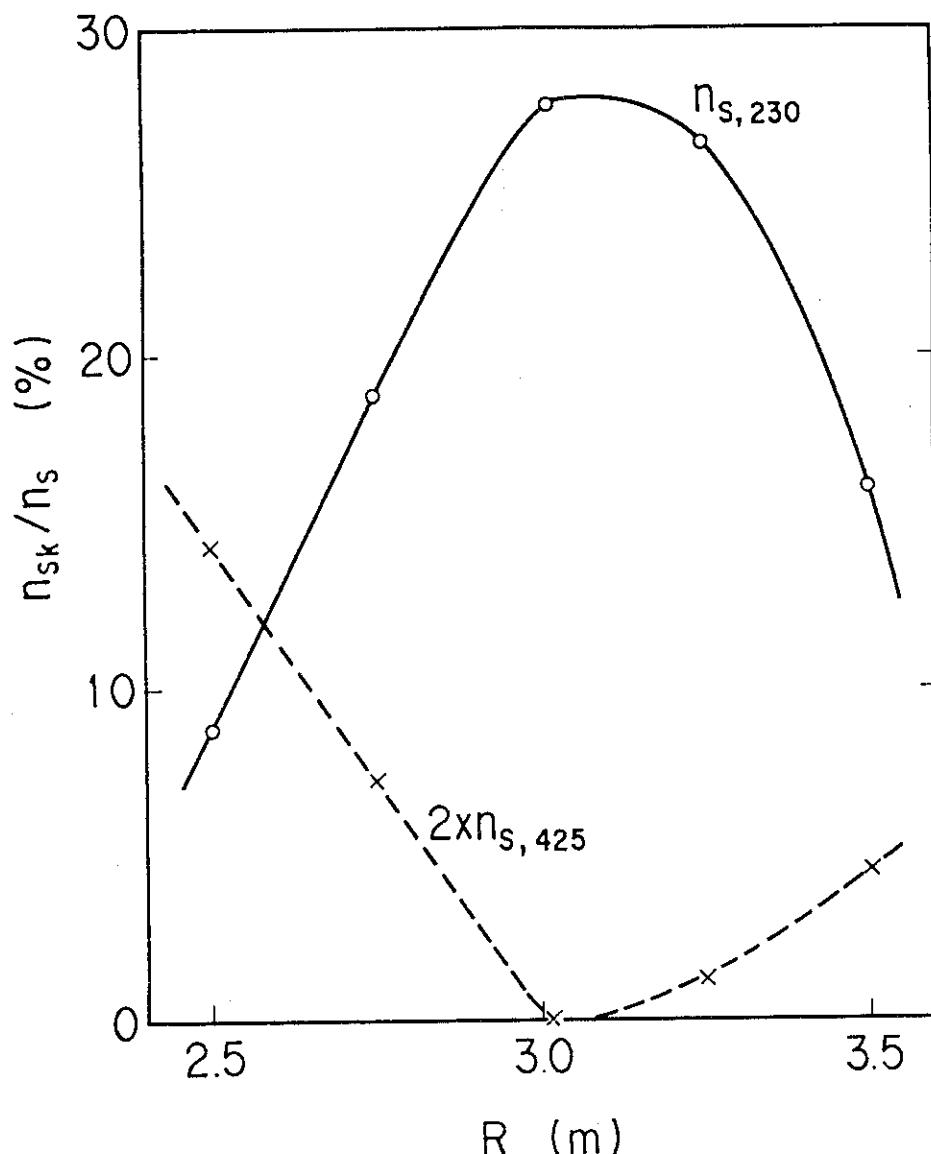
しかし、図A-1に示す様に n_s , α_{LP} , $\alpha_{\nu i}$ …… 等の渦電流諸効果は位置依存性をもっている。従って、 $R_p = 3.03$ m近傍の現象を取り扱う場合は表A-2の28個の固有モードを考えることで良いが、制御モデルの対象とする R_p の領域が広い場合はその領域に応じた評価を行なう必要がある。今、 $2.5 \leq R_p \leq 3.5$ mの領域を考え、 $R_p = 2.5$ m及び 3.5 mで $R_p = 3.03$ mの時と同様の評価を行なうと、表A-3に示す結果を得る。

表A-3 $R_p = 2.5$ m及び 3.5 mに於ける渦電流主要固有モード

$R_p = 2.5$ m に於ける 主要固有 モード No.	4, 9, 14, 17, 22, 32, 41, 50, 201, 202, 219, 230, 242, 250, 259, 262, 270, 273, 275, 276, 277, 279, 280, 298, 390, 391, 392, 415, 418, 425, 430, 435
$R_p = 3.5$ m に於ける 主要固有 モード No.	4, 9, 14, 17, 32, 41, 50, 201, 202, 219, 230, 242, 250, 259, 270, 273, 275, 276, 277, 279, 280, 298, 386, 390, 391, 392, 414, 415, 417, 418, 425

従って、表A-2, A-3の結果をまとめると JT-60に於けるプラズマ電流及びプラズマ水平方向位置変化に対する渦電流主要固有モードとして、本文表1に示す35個の主要固有モードを得る。

表 A-1 各種効果に於ける漏電流主要因有モードNo. ($R_p = 3.03\text{m}$ の場合)

図A.1 n_{sk} の水平位置依存性