

# プラズマの流束制御に関する理論およびシミュレーションによる研究

## Theory and simulation of plasma flux control

代表研究者	広島大学理学部教授, 広島大学核融合理論研究センター長 西川 恭 治 Prof., Faculty of Sci., Hiroshima Univ. Director, Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Kyoji NISHIKAWA
協同研究者	広島大学核融合理論研究センター教授 佐藤 哲 也 Prof., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Tetsuya SATO
	広島大学核融合理論研究センター助教授 渡辺 二 太 Assoc. Prof., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Tsuguhiro WATANABE
	広島大学核融合理論研究センター助教授 <sup>a)</sup> 伊藤 早 苗 Assoc. Prof., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Sanae-Inoue ITOH
	広島大学核融合理論研究センター講師 丹下 寿 夫 Assis. Prof., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Toshio TANGE
	広島大学核融合理論研究センター講師 <sup>a)</sup> 林 隆 也 Assis. Prof., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Takaya HAYASHI
	広島大学核融合理論研究センター助手 <sup>b)</sup> 田中 基 彦 Res. Assoc., Inst. for Fusion Theory, Hiroshima Univ.	Motohiko TANAKA
	日本学術振興会特定領域奨励研究員 <sup>c)</sup> 浜松 清 隆 Postdoctoral Fellow in Special Areas, Japan Soc. for the Promotion of Sci.	Kiyotaka HAMAMATSU
	日本学術振興会特定領域奨励研究員 <sup>c)</sup> 堀内 利 得 Postdoctoral Fellow in Special Areas, Japan Soc. for the Promotion of Sci.	Ritoku HORIUCHI
	日本学術振興会特定分野奨励研究員 <sup>d), e)</sup> 繁田 光 浩 Postdoctoral Fellow, Japan Soc. for the Promotion of Sci.	Mitsuhiro SHIGETA
	広島大学理学研究科大学院学生 <sup>e), f)</sup> 荒木 恒 一 郎 Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.	Koichiro ARAKI
	広島大学理学研究科大学院学生 <sup>e), f)</sup> 大塚 周 介 Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.	Shusuke OTSUKA
	広島大学理学研究科大学院学生 <sup>a), g)</sup> 小田 嘉 則 Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.	Yoshinori ODA
	広島大学理学研究科大学院学生 <sup>h)</sup> 菅野 聡 Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.	Satoshi SUGANO
	広島大学理学研究科大学院学生 <sup>i), j)</sup> 宮本 秀 信 Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.	Hidenobu MIYAMOTO

<sup>a)</sup> 昭和 57 年度より, <sup>b)</sup> 昭和 58 年度より, <sup>c)</sup> 昭和 59 年度より, <sup>d)</sup> 昭和 58 年度まで, <sup>e)</sup> 昭和 56 年度のみ,  
<sup>f)</sup> 昭和 57 年度のみ, <sup>g)</sup> 昭和 56, 57 年度は助手, 58, 59 年度は講師, <sup>h)</sup> 現日本原子力研究所, <sup>i)</sup> 現シャープ  
(株), <sup>j)</sup> 現石川県高丘中校, <sup>k)</sup> 現富士通(株), <sup>l)</sup> 現松下電器(株), <sup>m)</sup> 現日本電気(株), <sup>n)</sup> 現(株)日立製作所.

広島大学理学研究科大学院学生 <sup>b),2)</sup>	亀井光浩	Mitsuhiro KAMEI
Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.		
広島大学理学研究科大学院学生 <sup>c)</sup>	草野完也	Kanya KUSANO
Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.		
広島大学理学研究科大学院学生 <sup>c)</sup>	中山裕一郎	Yuichiro NAKAYAMA
Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.		
広島大学理学研究科大学院学生 <sup>c)</sup>	阿部賢二	Kenji ABE
Grad. Student, Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.		
広島大学理学部研究生	芹沢洋一	Yoichi SERIZAWA
Res. Student, Faculty of Sci., Hiroshima Univ.		

The purpose of the present work was to explore, by theoretical and computational means, possible methods for improving fusion plasma confinement by external control of plasma fluxes. The work was conducted as a four-year project research for the fiscal years, 1981-1984, at the Institute for Fusion Theory, Hiroshima University.

Various works conducted can roughly be classified into three categories: i) current-drive and r.f. heating in tokamaks, ii) r.f. control of loss fluxes in open systems and iii) supporting fundamental research. In i), the following two works were extensively and systematically carried out: a) control of loss fluxes and input energy fluxes by r.f. waves, particularly concerning the ICRF heating and its application to large tokamak machines and projects; b) simulation study of dynamic control of plasma currents, particularly concerning the current ring formation and stability and the current start-up by REB injection. In addition, a model analysis of LHW current-drive taking account of asymmetry of r.f. profile was carried out. In ii), a new numerical method efficient for analyzing 2D Vlasov equilibrium and stability was developed and was successfully applied to bumpy cylinder, axisymmetric thermal barrier with sloshing ions, double cusp, etc. In addition, properties of sheet plasmas were studied and a new code was developed to calculate vacuum B-field. In iii), drift wave instability in a sheared magnetic field and associated transport was studied from various view points. In addition, high-energy ion spectrum in laser produced plasma was studied and a new numerical method for solving stiff differential equations was developed.

## 研究目的

当研究の目的は、プラズマの流束制御という観点から、核融合プラズマ保持・加熱の改善を図る方式を、理論および計算機シミュレーションにより研究することにある。具体的には、次の二つの問題を取り上げた。

- 1) 現在、核融合炉心プラズマ保持方式として最先端を歩んでいるトカマク方式に対して、外部入力の有効利用により、そのパルス運転という短所を補い、かつエネルギー流束制御などの可能性を追求すること。
- 2) 炉心プラズマ生成・保持の観点からはトカマク方式に一步遅れをとっているものの、将来の実用炉を展望した炉工学的観点から利点が期待

されている開放端系プラズマ保持方式において、開放端および径方向プラズマ損失流束を、効率良く外部電磁界により軽減する可能性を調べること。

上記二つの問題に対して、大規模な計算機シミュレーションとそのためのコード開発を中心とする応用的観点、ならびに基礎となる物理機構の解明と計算手法の開発を中心とする基礎的観点の両面から研究を進めることにより、一方において現在ならびに将来にわたる核融合研究への具体的提案提示を試みるとともに、他方において高温プラズマ物理学の体系化に寄与せんとするものである。

## 研究経過および成果

当研究は、次の三つの研究課題に大別して進めて来た。

1. トカマクの加熱と定常運転化を図る方法の理論および計算機解析
2. 開放端系におけるプラズマ損失の軽減を図る方法の理論および計算機解析
3. 基礎物理学的視点からの学問的体系化への寄与

上記の課題について進めて来たさまざまな研究に関する4年間の研究経過を顧みると、当初の目的どおりに進展したのものもあるが、特定の課題から出発して新しい学問体系の構築への寄与や数値解析法の開発などへ発展して行ったものもある。これらの研究は、必ずしも上記1, 2, 3の課題別に分類できるものではないが、以下では、研究の力点がそのいずれにあったかに応じて、全体を9項目に分けて報告することにする。

1. トカマクの加熱と定常運転化をねらった研究  
ここでは、次の三つの研究項目に分けて報告する。
  - a) RF電磁場による流束制御と加熱に関する研究(第1~4年度)
  - b) 電流のダイナミック制御のシミュレーション(第1~4年度)
  - c) 低域混成波による電流駆動のモデル解析(第2~4年度)
- a) RF電磁場による流束制御と加熱に関する研究(第1~4年度)

当研究は、磁場を横切る粒子やエネルギーの異常拡散流束を、外部印加RF電磁場により制御しようというアイデアに端を発したものである。当初、このアイデアの有効性を確認する目的で、イオンサイクロトロン周波数より低い周波数帯のアルフベーン波を対象として、プラズマと外部回路系との結合状態を調べ、波の伝播・吸収に関する粒子運動論的理論を展開した。導かれた基礎方程式系を数値的に解くにあたって、マトリックス法を使用した新しい手法を導入した。

この研究を進展させて、一般にRF電磁場のもとの平均力を、プラズマの分散効果、不均一効

果、粒子運動論的效果、外部磁場の不均一性などを含む形で定式化した。平均力は、RF電磁場のスペクトルとプラズマの各種粒子群の移動度テンソルとを用いて表され、それは、共鳴粒子を介した波の吸収・放射に伴う力と、波の振幅やプラズマの不均一性による力(動重力)とを統一的に表したものとなっている。得られた平均力は、プラズマの流束制御とともに、プラズマの巨視的安定性の制御にきく成分も含んでいる。前者はさらに、プラズマの損失流束制御(出力制御)と、プラズマの加熱や電流駆動を効果的に行なう入力制御とに用いることができる。以下の研究は、入力制御、特にプラズマの加熱に重点を置いて進められた。

まず、シアアルフベーン波によるプラズマ加熱を考え、このときは主に電子が加熱されること、また、アンテナ系との結合効率を最適化することによって、波動の伝播領域と呼ばれる広い領域で加熱が可能であることを示した。

上述の平均力の表式は、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)でも有効であるので、以後は、近年注目を集めて来ているICRF加熱に重点を置き、精力的な研究を行なった。その成果は、世界をリードするICRF加熱理論体系の構築と、その世界最先端実験計画への応用へと発展するに至った。

すなわち、まず、トロイダルプラズマ中のICRF波の伝播・吸収構造を定常境界値問題として定式化し、得られた粒子運動論的線形波動方程式を数値的に解くと同時に、外部入力への応答係数をプラズマの巨視的量の関数として求めた。巨視的応答は微視的振舞いを包含している。具体的には、キャピティ共鳴、2イオン混成共鳴加熱、サイクロトロン2倍高調波共鳴加熱について解析し、その結果、速波の近接性については吸収機構にあまり依存しない統一的理解を得るなどの知見が得られた。計算結果の代表例を図1に示す。

また、プラズマの巨視的パラメータの変化に応じて、電子加熱が主な領域、イオン加熱が主な領域、非プラズマ損失(放射や壁損失)が主な領域の同定を行なった(図2参照)。アンテナへのイン

ピーダンス整合や結合効率の解析には、非プラズマ損失も考慮に入れ、また3次元流体的解析も併せて行ない、後者のアンテナ設計への有効性を示した。さらに、不純物放射損失の一機構を提言し、これにより、日本原子力研究所 JFT-2M 装置で実験が行なわれ、また、新たにアンテナ接合系の位相操作に関する理論実験双方からの知見を得る

ことができた。

これらの理論的予言は、上記 JFT-2M の他、日本原子力研究所 JT-60 やヨーロッパ共同体の JET などの世界最先端の大型トカマク装置におけるアンテナ設計に寄与するとともに、国際原子力機関の核融合実験炉 INTOR 計画にも多大の貢献を行なった。

さらに進んで、波動とビームや、異種波動の合成などの複合加熱の粒子運動論的解析を行ない、複合加熱の有効性を示すとともに、中性粒子ビーム入射によるビーム存在下での ICRF 波動励起がプラズマ中のエネルギー緩和率・輸送流束に及ぼす効果を調べ、JFT-2M 装置による実験を促し、理論の定性的検証を得た。

なお、ここで述べた一連の研究は、日本原子力研究所核融合研究部および岡山大学工学部との共同研究により進められたものである。

#### b) 電流のダイナミック制御のシミュレーション (第1~4年度)

当研究の目的は、プラズマ電流(トロイダル方向)の減衰を、外部電流源(ポロイダル磁東源)から直接本体プラズマ中に補給することによって、準定常的にトロイダル電流を維持することが可能かどうかを計算機シミュレーションによって調べることにあつた。

研究はまず、スフェロマック(トロイダル電流

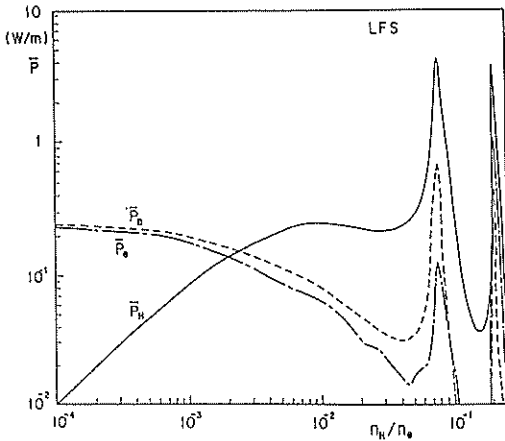


図1. 重水素プラズマ中に少量の水素イオンを混ぜ、水素イオンのサイクロトロン周波数付近の波をアンテナで低磁場側から励起したときのエネルギー吸収パワーの水素イオン濃度  $n_{II}/n_0$  に対する依存性の計算例。  
 $\bar{P}_e$ ,  $\bar{P}_D$ ,  $\bar{P}_H$  は、それぞれ電子、重水素イオン、水素イオンによる吸収パワーを表す。濃度の高いところで現れる吸収パワーの山はキャビティ共鳴の効果を表す。(HIFT-86 より転載)

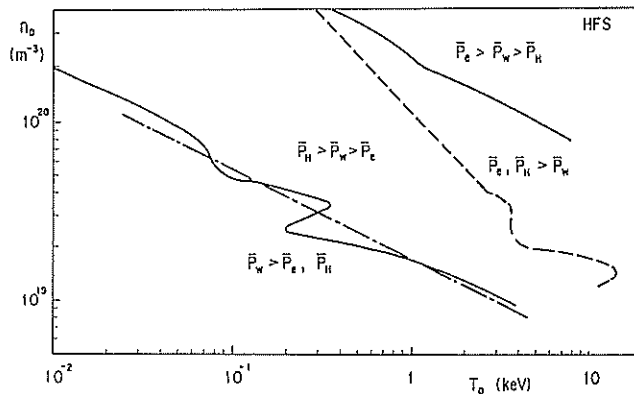


図2. 2倍高調波イオンサイクロトロン共鳴加熱で、電子による吸収パワー  $\bar{P}_e$ 、イオン(水素)による吸収パワー  $\bar{P}_H$  および壁による損失パワー  $\bar{P}_w$  が、密度  $n_0$ 、温度  $T_0$  のどの領域で主となるかを解析した例。

この場合、波は高磁場側からアンテナで励起されている(HIFT-86 より転載)。

のみならず、トロイダル磁場を与えるポロイダル電流もプラズマ電流で維持する新しいプラズマ閉

じ込め配位)の研究用に開発したシミュレーションコードを改良し、磁束(すなわちプラズマ電流)

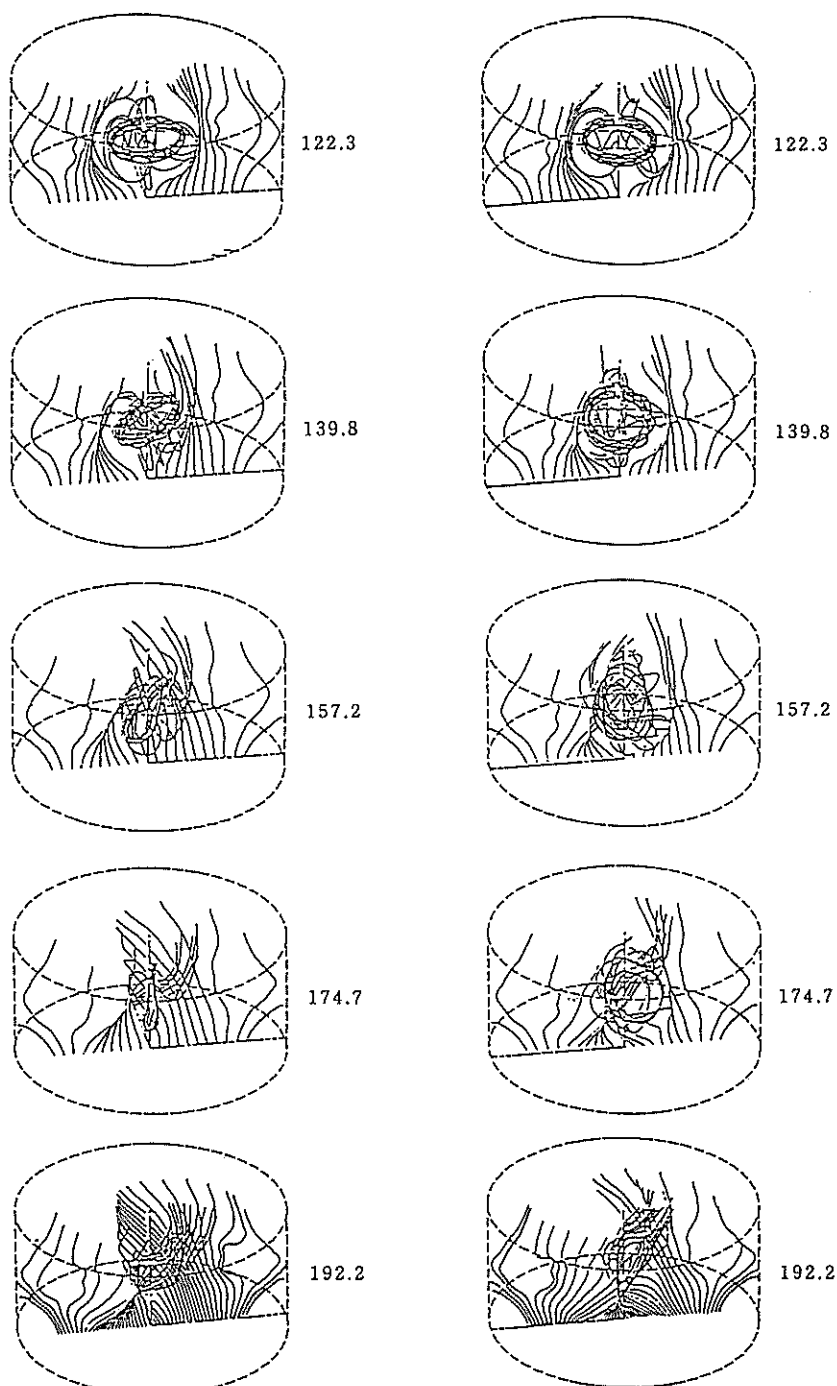


図 3. スフェロマックが傾斜不安定性を起こして崩壊・消滅して行く過程を、90 度異なる二つの角度から磁力線によって示した図。数字は適当に規格化した時間を表す。

の輸送の可能性とその物理機構を明らかにすることから始められた。具体的には、任意の大きさの二つの電流リングを並べて作り、それらを互いに近づけて一方の電流リングのもつ磁束を他方の電流リングに輸送させる2次元(軸対称)電磁流体シミュレーションを行なった。その結果、次のことが明らかにされた。i) トロイダル電流の向きが同じであれば、二つのリングは磁気リコネクション過程を経て融合し、一つの閉じた電流リングに合体する。そのための時間は磁場の拡散時間より

はるかに短く、電流制御を行なう上に十分な速さである。ii) 合体後の電流リングのトロイダル磁束は、合体前の二つのリングのトロイダル磁束の和になるのに対し、ポロイダル磁束は合体前の大きい方の値に一致する。iii) リングの融合に際して、磁気エネルギーはある程度散逸するが、磁気ヘリシティはほぼ保存される。なお、この研究は、一部、米国プリンストンプラズマ物理研究所および東京大学工学部の協力を得て行なわれた。

次に、非軸対称モードが入りうる本格的3次元

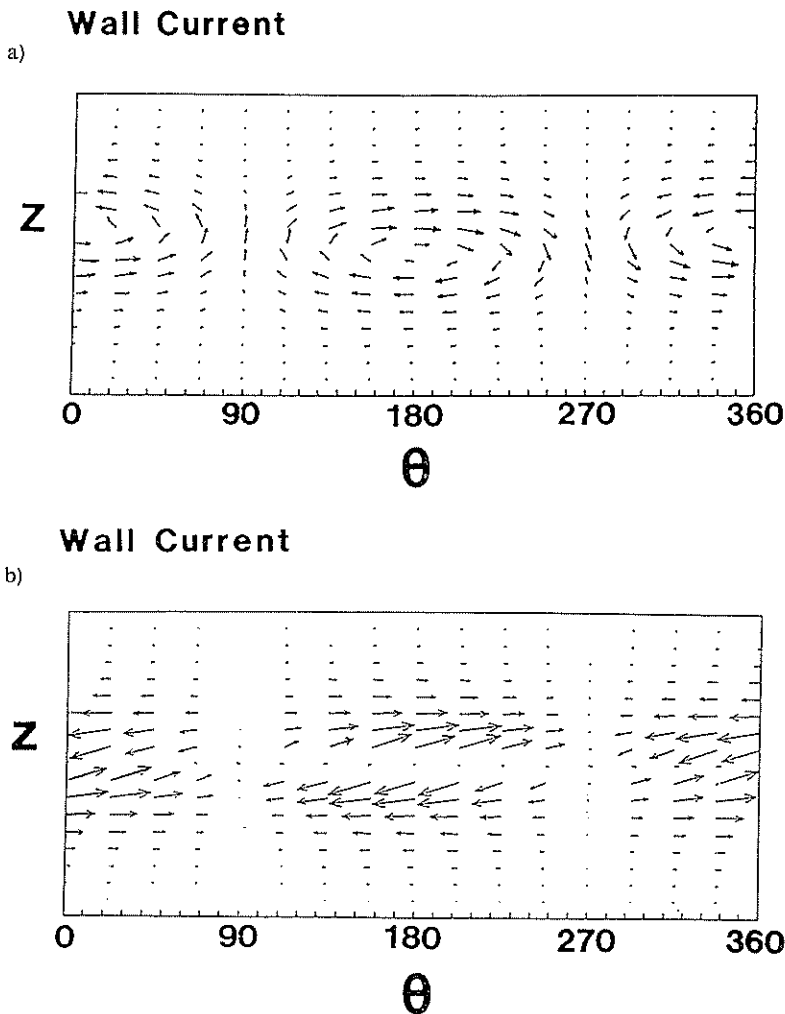


図 4 スフェロマックの傾斜不安定性を近接導体壁により安定化しようとしたとき、壁に流れる電流。a) は渦状電流を表し、このときは安定化できないが、b) のときは安定化に成功している。このときの電流パターンは、磁力線のラインタイピングが起こっていることを示している。(文献 29 より転載)

電磁流体シミュレーションコードを完成し、シミュレーションを行なった結果、リングは傾斜不安定性を起こして崩れて行くことが明らかになった(図3)。しかし、この不安定性は近接導体壁により安定化できることが分った。そのための条件は、磁力線のライントイピング効果がきくように導体壁を設置することである(図4)。このことは、第1壁に密着した導体壁で覆うフラックスコア部からポロイダル磁束を供給する過程は安定に動作できることを示唆している。

さらに、複数の電流リングを同軸上に並べたとき、それらが傾斜不安定性によりシリンダー状に変換されつつ互いにつながって新しい安定な平衡配位に遷移することを示唆する結果も得られた。この結果は、安定な巨大電流リングを多数の小電流リングより生成させうる可能性を示している。

関連して、トカマク配位のトロイダル電流を増大させていくと、不安定性が発生し、やがて周辺のトロイダル磁場の向きが逆転して再び安定な配位(逆転磁場ピンチと呼ばれる)になるという、永年にわたり未解明にされていた実験結果について、その物理機構を、トロイダル方向の磁気リコネクションによって説明する理論を提唱し、3次元電磁流体シミュレーションによってその理論の正しさを検証した。

これらの研究成果を、より一般的な物理法則の解明へと発展させ、任意の初期平衡配位から出発して、それに摂動を加えて磁気リコネクションを起こさせると、磁場配位は単純な形状へと自己形成することを、3次元電磁流体シミュレーションで明らかにした。その際、ヘリシティ積分の時間変化はエネルギー積分の時間変化に比べて十分遅いこと、初期ヘリシティ積分の大小によって、単純軸対称配位または単純ヘリカル対称配位のいずれかの最小エネルギー状態に落ちつくこと、磁気リコネクションと非線形モード結合を通じて励起された多数のモードは、時間とともに波数空間の中で遷移して行くが、磁気エネルギースペクトルは高周波側へ、磁気ヘリシティスペクトルは低周波側へ遷移して行くこと、などが見いだされた。

以上の物理的知見を踏まえて、最終年度には、

電子ビームを用いたトカマク電流駆動および制御の本格的シミュレーション研究に取り組んだ。

すなわち、トロイダル磁場および垂直磁場を外部コイル電流で作る、その磁場中に真空容器壁近くから電子銃によって電子ビームを入射させる。電子ビームはスパイラル状の真空磁場に沿ってプラズマ中に侵入するが、まず、壁近傍から入射された電子ビームと背景プラズマとの相互作用を、実験室大の空間スケールで調べる3次元粒子シミュレーションコードの開発を行ない、それを用いて、i) 入射電子ビームが自己ポロイダル磁場との相互作用により真空磁場の磁力線からずれて閉じた電流系を形成すること、ii) ビーム路に沿って逆向きリターン電流が磁気誘導により発生すること、などを明らかにした。次に、スパイラル磁力線に沿って既に電流が形成されたとして、以後の過程を電磁流体シミュレーションにより解析し、iii) 電流はその初期分布形状によらず磁気リコネクションを介してトーラス中心に集中し、トカマク平衡配位に到着すること、iv) その時間発展はプラズマの抵抗にはほとんどよらず、初期電流分布のみで決まること、などを明らかにした。

以上の成果は、電子ビームを用いた電流駆動の実験計画に極めて重要な寄与を果たすと期待されている。

c) 低域混成波による電流駆動のモデル解析(2~4年度)

近年大きな実験的成果が得られている低域混成波による電流駆動について、低域混成波はレゾナンスコーンに沿って伝播すること、およびプラズマの熱効果でレゾナンスコーンの前面と後面とで高周波電場の波形に強い非対称性が起こり得ることに着目し、非伝播領域からの電場の急激な立ち上がりの簡単なモデルで、電子に強い一方向加速を起こさせる可能性を調べた。その結果、急激な立ち上がりに伴う高波数成分の電場により熱速度域の電子が高速に加速されること、高密度になると衝突によりその効果が抑制されること、および十分強い電場のもとでは強い非線形効果(捕捉粒子効果)により、非対称性が電流駆動の高効率化に重要な役を果たしうること、などが明らかにな

った。

## 2. 開放端系における損失軽減のための研究

ここでは、次の三つの研究項目に分けて報告する。

- a) プラズマの平衡・安定性の数値解析法の開発とその応用 (第 1~4 年度)
- b) シート状プラズマの解析 (第 1~2 年度)
- c) 磁場解析コードの開発とその応用 (第 3~4 年度)
- a) プラズマの平衡・安定性の数値解析法の開発とその応用 (第 1~4 年度)

開放端系プラズマ保持の研究には、高エネルギー粒子群や静電ポテンシャルの存在を考慮に入れたブラソフモデルによる平衡・安定性解析が必要である。当研究では、まず、2次元(軸対称)配位下でのブラソフプラズマの定常状態を非線形境界値問題として定式化し、それを両方向からのシューティングとニュートンの逐次近似法を組み合わせることで解く新しい数値解析法を開発した。この手法は、高温電子環をもつバンピーシリンダー(バンピートーラス型磁場閉じ込めプラズマ配位で、トーラスの大半径を小半径に比べて無限に大きくしたもの)や、低温周辺プラズマを含むダブルカusp(図5参照)におけるプラズマの平衡解析、スロッシングイオンにより形成される熱障壁(開放端系プラズマ保持で現在先端を行くタンデムミラー方式における端損失制御に不可欠のもの)の構造解析、ICRF波の動重力による熱障壁形成(上記ダブルカuspプラズマにおける低温成分流入を防ぐための一方法として考案)の可能性の解析などに応用され、その有効性が確認された。併せて、これらさまざまな配位における静電ポテンシャルの構造や、各種プラズマ成分の空間分布などに関する数多くの重要な知見が導かれた。図5、図6にその計算結果の代表例を示す。なお、この研究は、一部、米国テキサス大学核融合研究所との共同研究で行なわれた。

この方法を、実際の3次元非軸対称配位の解析に適用することは極めて困難だが、最終年度にはその可能性についての見通しを得て、磁気流体モデルながら、3次元平衡解析に応用し、磁気面の

新しい数値計算法を考案することができた。

上記の方法は、しかし、隋円型の微分方程式を解く必要があるときには、数値的不安定性の困難に直面する。そこで、隋円型方程式で記述される線形境界値問題(非線形境界値問題は、ニュートン法により線形境界値問題に還元する)に対して、緩和法を直接法と組み合わせ、両者の短所を補いながら効率良く解く新しい数値解析法を開発し、グラドシャフラノフ方程式で記述されるトカマクプラズマの平衡解析と、ICRF波の動重力を利用した単純トーラスプラズマの平衡解析とに適用して、その有効性を確認した。この研究で、数値解析法は北京建築工程学院師華氏(当時本学理学部進修生)の協力を、また単純トーラスプラズマの平衡解析は山梨大学工学部の協力を得て、それぞれ行なわれた。

ICRF波の動重力に関連して、これが多くの

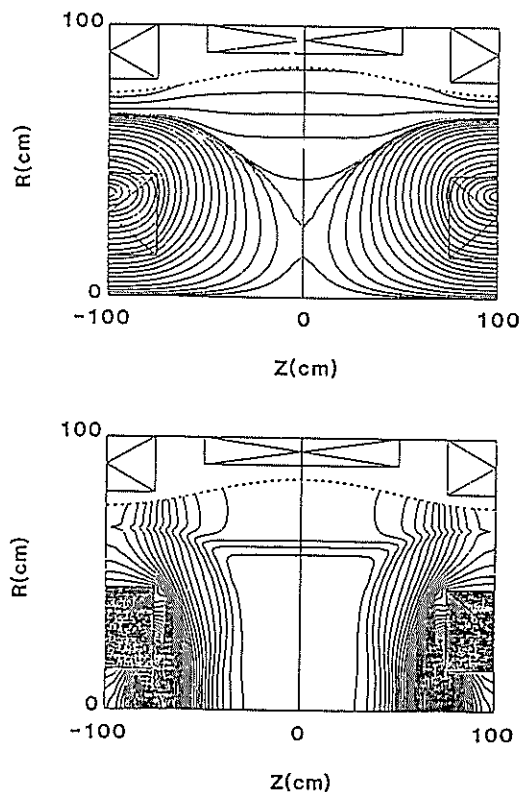


図5 二重カuspプラズマにおける高ベータ平衡のときの磁力線(上の図)と $B = \text{一定}$ の線(下の図)の空間構造。(文献41より転載)



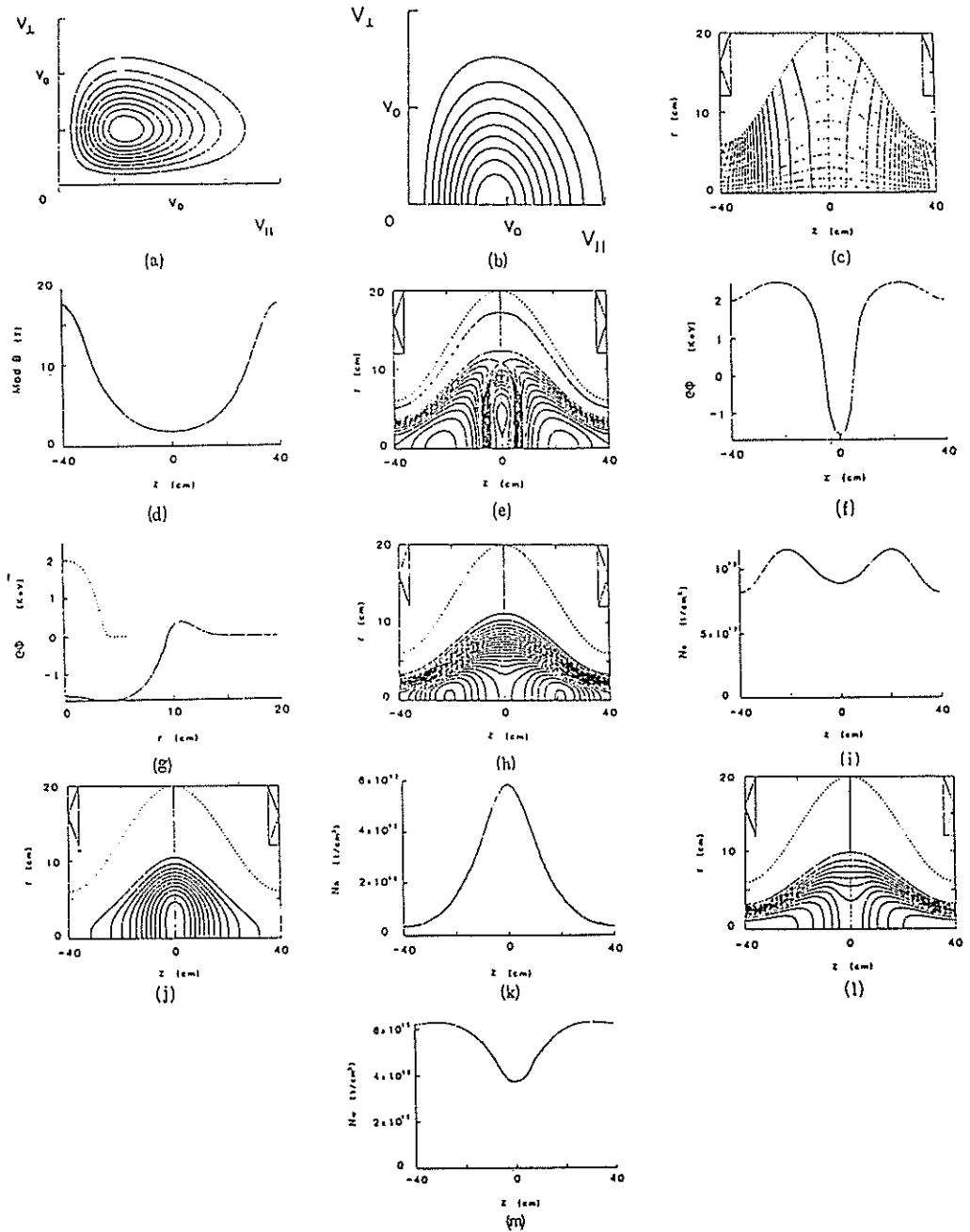


図 6. 熱障壁プラズマの計算結果例.

(a) 軸上中心部でのスロッシングイオンの分布の等高線. (b) 同じく高温電子の分布の等高線, (c) 磁力線 (破線) と磁場の等高線 (実線), (d) 軸上の磁場強度の分布, (e) 静電ポテンシャルの等高線, (f) 軸上の静電ポテンシャルの分布, (g) 中央部 (実線) 及び端部 (破線) での静電ポテンシャルの分布, (h) スロッシングイオンの密度の等高線, (i) 軸上でのスロッシングイオンの分布, (j) 高エネルギー電子密度の等高線, (k) 軸上での高エネルギー電子の密度分布, (l) 高温電子密度の等高線, (m) 軸上での高温電子の密度分布, (文献 40 より転載).

場合ポテンシャル力として表現できることが理論的に示され、数値解析によりその性質が定量的に確かめられた。この結果を用いて、ICRF 波動の磁場に垂直方向の動重力を利用した巨視的不安定性の抑制や、ICRF 波動により生成される静電ポテンシャルの強さとその空間構造に関する知見が導かれた。

#### b) シート状プラズマの解析 (第 1~2 年度)

線カusp状開放端には、厚さがイオンのラーモア半径程度で、両極性電位の存在するシート状プラズマが生成される。当研究では、まず、プラズマの端損失流束を外部印加高周波電場で制御する目的で、シート状プラズマ内に効率よく高周波電場を励起すべく、プラズマの厚さ、磁力線方向の波の波数、シート内の両極性電位、プラズマの密度などをいろいろ変化させて、励起される固有モードの系統的数値解析を行なった。その結果得られた主な知見は、i) 厚さがイオンのラーモア半径程度であれば、高周波電場はプラズマ内部に十分侵透する。ii) 厚さが増すと、プラズマのアルフベン速度が光速程度以上の高密度域で、プラズマの遮へいにより高周波電場は内部に侵透しなくなる、などである。

次に、シート状プラズマ内に自然励起される固有モードについて、粒子運動論的效果や両極性電位を取り入れたブラソフモデルで、波数空間積分方程式を直接数値的に解くことにより解析した。その結果、i) ドリフト波およびイオンサイクロトロンドリフト波はプラズマの周辺部にのみ局在して励起されること、ii) 両極性電位が存在するとその成長率は小さくなり、安定化も可能なこと、iii) ディオコトロン波は閾値を越す正の両極性電位の井戸の存在するところで不安定になり、シートプラズマの平衡を破壊しうるが、十分に強い両極性電位のもとでは再び安定になること、などが明らかにされた。なお、この研究は、本学理学研究科大学院学生としてパキスタンより留学していた M. B. Chaudhry 氏の協力により行なわれた。

#### c) 磁場解析コードの開発とその応用 (第 3~4 年度)

従来の磁場解析コードは、コイル電流を線電流

の集合で近似するものであったが、コイルを適当な要素群に分けてボディ電流の作る磁場を求める新しいコードを開発した。このコードは、タンデムミラー型などに見られるように、分割型コイルから成る配位での磁場計算に有効である。そのことを確認する目的で、まず、カusp型コイルを基本単位としてトーラス状に連結し、それに縦磁場を重ねることによって、 $l=2$  のステラレータ型磁場配位が作られることを示した。

次に、この方法で、筑波大学タンデムミラー装置ガンマ 10 のコイル配位下の磁場を計算し、その磁場中での粒子軌道を解析した。ガンマ 10 装置は、タンデムミラー型のもつ非軸対称配位に起因する粒子の径方向拡散損失を制御する目的で、実効的軸対称化を図るコイル配位を工夫している。当研究により、中央部セルにおける優れた軸対称化効果を確認するとともに、極小磁場アンカー部の両端の非軸対称性の強い遷移領域でも粒子が良好に捕捉されることを確認した。一方、径方向周辺部で、従来注目されていなかった新しい共鳴拡散の起こる可能性も見出された。

### 3. 基礎物理学的視点からの学問的体系化への寄与

ここでは、次の三つの項目に分けて報告する。

- a) ドリフト波不安定性と乱流および異常輸送流束に関する研究 (第 1~3 年度)
- b) レーザープラズマにおける高エネルギーイオンのスペクトル解析 (第 2 年度)
- c) 固い微分方程式の新しい数値解析法の開発 (第 4 年度)
- a) ドリフト波不安定性と乱流および異常輸送流束に関する研究 (第 1~3 年度)

磁場によるプラズマ保持の研究において最も基本的な物理的課題は、磁場を横切るプラズマ粒子およびエネルギーの異常輸送の機構解明にある。今日まで、ドリフト波と呼ばれる低周波不安定性に伴い生ずる乱流がその原因と考えられている。当研究グループでは、従来、一様磁場中での弱い乱流理論の範囲内で、粒子やエネルギーの拡散流束を、ドリフト波不安定の非線形安定化機構とコンシステントな形で定式化し、各種非線形効果の

物理的考察や、各種流束の定量的評価を行なって来た。当研究は、この成果を、より現実的な状況（シア磁場、強い乱流、RF 駆動電流などの効果）を取り入れて発展させる方向に進められた。

ドリフト波不安定は、通常、共鳴電子によって起こるが、シア磁場中では、与えられた波のモードに対して、共鳴電子が空間的に局在し、線形理論では不安定性は起こらない。しかし、共鳴電子の運動には、わずかな振幅のもとでも非線形効果が現れる。そこで、当研究では、まず、簡単のため、単一のモードに対する最低次の非線形効果を取り入れ、それが静電ドリフト波および電磁ドリフト波の両者に対して不安定効果をもたらすことを示した。その後、高次の非線形項の中から永年項をすべて集めることに成功し、非線形固有値方程式を導いたが、その数値解を得るには至らなかった。

シア磁場中でも、トロイダル方向の電流はドリフト波不安定性を引き起こす原因となる。通常のトカマク電流は誘導方式により駆動されるが、ここでは、低域混成波により駆動された電流の場合について不安定効果を調べた。この場合、電流は主に高エネルギー電子群により運ばれるため、静電ドリフト波不安定性は起こりにくくなることが示された。一方、電磁的ドリフトアルフベン波については、電子のドリフト速度が空間的に一様であれば電流の生成法による差はあまり現れないが、非一様であれば、低域混成波による駆動電流の方が不安定性が起こりにくいことが示された。この研究は、名古屋大学プラズマ研究所との共同研究で行なわれた。

ドリフト波乱流のもとでの輸送流束については、強い乱流を記述するのに成功している DIA 近似を用いて、それとコンシステントな輸送流束の定式化を試みたが、まだ完成していない。

広い意味のドリフト波に、トーラス状幾何形状効果で不安定になる静電パルレーンクモードが存在することが近年明らかにされたが、この静電パルレーンクモードによるシア磁場中での粒子の拡散流束を、写像法を用いて解析した。その結果、拡散係数は磁力線方向の速さに逆比例し、したがって磁力線に沿って遅い粒子ほど速く拡散するこ

とが示された。この取扱いでは、捕捉粒子は考慮に入れられていないが、ここで得られた結果は、捕捉粒子が異常拡散に重要な役割を果たしている可能性を示唆している。なお、この研究は、岡山大学工学部および日本原子力研究所核融合研究部との共同研究で行なわれた。

b) レーザープラズマにおける高エネルギーイオンのスペクトル解析 (第2年度)

慣性核融合方式では、高出力レーザーなどを微少燃料球(ペレット)に照射・吸収させ、表面に高温プラズマを生成し、その膨張の反作用で燃料ペレットを超高密度に爆縮させる。表面プラズマには、しばしば高エネルギー電子が生成され、それに伴い高エネルギーイオンが発生する。この高エネルギーイオンの発生はペレットの爆縮効率を低下させる。

ここでは、当報告 2. a) で述べた非線形固有値問題に対する新しい数値解析手法を応用し、レーザー生成プラズマの膨張過程を解析した。特に、高エネルギー電子の分布に速度上限を設定し、高エネルギーイオンの先端速度が1ピコ秒ぐらいで上限に達してしまうこと、さらにこのときのイオンの上限速度は高エネルギー電子の分布の上限の入れ方に強く依存することが見いだされた。この研究は、大阪大学レーザー核融合研究センターとの共同で行なわれた。

c) 固い微分方程式の新しい数値解析法の開発 (第4年度)

プラズマ中の波動伝播では、空間変化の尺度が極端に異なる現象の混在する場合があります、そのような現象の解析には、標準的な数値解析法は無効となることが多い。当研究では、このような場合に有効な手法として、連立常微分方程式に対する高精度の多段階陰解法を考案し、サブルーチン DEQSLV にまとめあげた。これは、マイクロ波によるプラズマ波の共鳴励起の数値解析に適用され、広く使われている数値解析法の限界を超える性能を有していることを確認した。

おわりに

核融合プラズマ研究は、大型トカマク装置による臨界炉心プラズマ生成実験を目前に控えるとこ

ろにまで進展してきた。4年前に当研究がスタートした当時の核融合プラズマ研究の主課題は、この臨界炉心プラズマ生成実験計画を成功させることにあった。しかし、当研究は、あえてそれを主テーマにかかげることを避けて、その次に来るべき課題、すなわち、現行トカマク方式のもつパルス運転という難点を克服するための新しいアイデアの開発、装置の小型化、加熱の高効率化をねらったRF電磁場によるプラズマの流束制御、トカマクに代わる方式としての可能性をもつ開放端系プラズマ保持における損失流束制御、などの研究課題を先取りして始められた。併せて、大型電子計算機の著しい進歩を見通しつつ、その役割の急激な増大に対応するための新しい数値解析法の開発と応用に力を入れてきた。そして、それらの研究の着実な蓄積を通じて、プラズマ物理学の学問的体系化への寄与が図られてきた。

4年間を顧みて、当研究は、核融合理論研究センター全メンバーの力を結集して進めてくるにふさわしいものであったことを痛感する。もちろん、すべての課題にわたって所期のねらい通りに研究が進行したとは言いがたい。核融合プラズマ保持のための最重要課題の一つである異常輸送現象の機構解明に関しては、当研究が始まるまでに果たした当研究グループの先駆的・基礎的成果にもかかわらず、当研究を通じての十分な寄与はできなかった。反面、ICRF加熱や磁気リコネクション過程に関する研究などでは、当初の予想をはるかに上回る世界最先端の研究結果が得られ、これらが今日核融合プラズマの実験的研究における主要テーマに含まれてきていることは特筆に値しよう。

当研究グループとしては、この4年間の研究の経験を十分に活かして、今後も先を見通した新しい課題を掘り起こしつつ、あえてそれに挑戦して次期計画を先取りした成果を挙げて行くことにつとめる方針である。具体的には、プラズマと壁面の接する周辺プラズマ領域の研究などがよい例である。近年の実験的研究の結果の中には、周辺の境界条件が中心付近のプラズマの挙動に与える効果の重要性を暗示しているものが多い。特に、磁

力線のセパトリックス領域のプラズマの振舞いは未解明なところが多く、それがプラズマの加熱効率や閉じ込め特性に与える影響は極めて大きいと判断される。当研究で明らかにしてきた磁力線のダイナミクスや静電ポテンシャルの生成などに関する知見は、これらの問題を解き明かして行く上で重要な礎石となるであろう。

これらと並行して、いよいよ本格的な実験先導型の3次元計算機シミュレーション研究に着手すべき時機が近づいたと思われるので、そのための基盤研究をなおいっそう育成して行くことが必要と思われる。当研究で行なってきた3次元シミュレーション研究は、現時点で世界最先端を行くものと思われるが、それを本格的な実験先導型研究に質的に転換させて行くためには、未だシミュレーションモデリングやコード開発の面で大きな飛躍が必要である。

今後5~10年間の核融合研究では、一方でプラズマ保持の改良の面での新しい進展がみられるとともに、他方、第一壁などの炉材料の面からの炉心プラズマへの要請も明らかになってくるであろう。当研究で目標にかかげてきた炉心プラズマ保持の定常化、小型化、高効率化のための研究は、今後炉工学的側面から得られる新しい知見や要請に対応して行く形で、いっそう進めて行くことが必要となろう。

## 謝 辞

当研究は、昭和56年度より4年間にわたる日産科学振興財団の研究助成金により行なわれたもので、同財団および選考委員の方々、そして当研究計画をご推薦くださった日本物理学会に深く感謝の意を表します。当研究には、広島大学核融合理論研究センターの職員はもとより、多くの学術振興会奨励研究員や大学院学生に協同研究者として参加してもらったが、その他にも、本文中に随所に記したように、多くの研究機関の研究者にご協力をいただきました。ここにそれらの方々に深く謝意を表します。なかでも、日本原子力研究所核融合研究部伊藤公孝氏（現京都大学ヘリオートロン核融合研究センター）、岡山大学工学部福山淳氏および広島大学理学部北条仁士氏には、多方面

にわたり格別のご協力をいただいたことを申し添えます。

#### 研究発表

##### 1. a) 関係

- 1) S. I. Itoh, K. Itoh and Kyoji Nishikawa: Kinetic Alfvén Wave Propagation in Cylindrical Tokamak, *Plasma Phys.*, **24**, 1027 (1982).
- 2) A. Fukuyama, S. I. Itoh and K. Itoh: Averaged Force and Flow Induced by R. F. Waves in Inhomogeneous and Dispersive Plasma, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**, 1010 (1982).
- 3) K. Itoh and S. I. Itoh: Radial Absorption Structure of Kinetic Alfvén Wave and Heating Efficiency, Proc. Int. Conf. on Plasma Phys. (Göteborg, Sweden, 1982) Vol. 1, 82.
- 4) K. Itoh and S. I. Itoh: On the RF Stabilization of MHD Instability, *Jap. J. Appl. Phys.*, **21**, L203 (1982).
- 5) S. I. Itoh, K. Itoh and A. Fukuyama: 2D Kinetic and 3D MHD Analysis of ICRF Waves in Tokamaks, 19th Conf. on Numerical Simulation of Plasmas (San Diego, USA, 1983) 3B2.
- 6) S. I. Itoh, K. Itoh and A. Fukuyama: 2D Kinetic Analysis of ICRF Waves in Tokamak, 5th Topical Conf. on Radio Frequency Plasma Heating (Madison, USA, 1983) C-1-6.
- 7) K. Itoh, S. I. Itoh and A. Fukuyama: 3D Collisional MHD Analysis of ICRF Waves in Tokamaks, *ibid.*, C-1-5.
- 8) A. Fukuyama, S. Nishiyama, K. Itoh and S. I. Itoh: Kinetic Description of Propagation and Absorption Structures of ICRF Waves, *Nucl. Fusion*, **23**, 1005 (1983).
- 9) K. Itoh and S. I. Itoh: Energy Deposition Profile of Shear Alfvén Heating, *Plasma Phys.*, **25**, 11037 (1983).
- 10) S. I. Itoh, A. Fukuyama and K. Itoh: Simultaneous Heating by ICRF Wave and Neutral Beam Injection, *Nucl. Fusion*, **24**, 224, (1984).
- 11) K. Itoh, A. Fukuyama and S. I. Itoh: Numerical Calculation of ICRF Waves in Tokamak Plasmas, *Computer Phys. Communications*, **32**, 35 (1984).
- 12) K. Itoh, S. I. Itoh and A. Fukuyama: Study of ICRF Wave Propagation and Absorption in INTOR Tokamak, *Jap. J. Appl. Phys.*, **23**, 889 (1984).
- 13) S. I. Itoh, K. Itoh and A. Fukuyama: Beam-Driven ICRF Instability and Associated Nonclassical Transport in Tokamak, *Plasma Phys. Cont. Fusion*, **26**, 1311 (1984).
- 14) A. Fukuyama, A. Goto, S. I. Itoh and K. Itoh: Excitation and Propagation of ICRF Waves

in INTOR Tokamak, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, L613 (1984).

- 15) S. I. Itoh, A. Fukuyama and K. Itoh: Kinetic Analysis of ICRF Wave Propagation and Absorption (Two Ion Hybrid Resonance and Second Harmonic Resonance), 4th Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasmas (Rome, Italy, 1984).
- 16) S. I. Itoh, K. Itoh, A. Fukuyama and A. Goto: Three Dimensional Study of Coupling Efficiency of ICRF Wave Heating (Antenna Launcher and Wave Guide Launcher), *ibid.*
- 17) S. I. Itoh and A. Fukuyama: Beam-Driven ICRF Instability and Nonclassical Transport in Tokamak, Proc. Int. Conf. on Plasma Phys. (Lausanne, Switzerland, 1984) Vol. 1. P-5-2.
- 18) A. Fukuyama, K. Itoh and S. I. Itoh: Kinetic Analysis of ICRF Waves in Tokamak, Proc. Int. Conf. on Plasma Phys. (Lausanne, Switzerland, 1984) Vol. 1, P-5-7.
- 19) S. I. Itoh, A. Fukuyama, A. Goto, K. Itoh, K. Sakai, S. Takeuchi, M. Matsumoto and R. Sugihara: Propagation and Coupling Efficiency of ICRF Waves in Tokamaks and Particle Simulation of ICRF 2nd Harmonic Heating, 10th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res. (London, U.K., 1984) IAEA CN-44/F-III-4.
- 20) K. Itoh, S. I. Itoh and A. Fukuyama: Excitation of ICRF Waves in Tokamaks by Waveguide Launcher, *Fusion Technology*, **7**, 301 (1985).
- 21) S. I. Itoh, A. Fukuyama, K. Itoh and K. Nishikawa: Radio Frequency Conductivity of Plasma in Inhomogeneous Magnetic Field, *J. Phys. Soc., Jpn.*, **54**, 1800 (1985).
- 22) S. I. Itoh, A. Fukuyama, K. Itoh and K. Nishikawa: Differential Form of Wave Propagation Equation in Inhomogeneous Plasma, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **54**, 1808 (1985).
1. b) 関係
- 23) K. Watanabe, K. Ikegami, M. Nishikawa, A. Ozaki, N. Satomi, T. Uyama, T. Sato, S. Otsuka, T. Hayashi and K. Nishikawa: Merging Experiment and Simulation of Compact Toroids, 9th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Fusion Res. (Baltimore, USA, 1982) Vol. II, 311 (IAEA-CN-41/M-4).
- 24) T. Hayashi, T. Sato, Y. Oda and K. Kusano: Three Dimensional Simulation of Spheromak Dynamics, Int. School for Space Simulations (Kyoto, 1982).
- 25) T. Sato and T. Hayashi: Three Dimensional Simulation of Spheromak Creation and Dis-

- ruption, *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 38 (1983).
- 26) T. Sato, A. M. M. Todd and H. Okuda: Numerical Simulation of Slow Spheromak Formation: Flux Control by Formation Speed, *Phys. Fluids*, **26**, 775 (1983).
- 27) T. Sato, Y. Oda, S. Otsuka, K. Katayama and M. Katsurai: Numerical Simulation of Axisymmetric Spheromak Merging, *Phys. Fluids*, **26**, 3692 (1983).
- 28) T. Hayashi and T. Sato; 3-D MHD Simulation Studies of Spheromak Creation, Tilting Disruption and Stabilization, Int. School of Plasma Phys. (Varenna, Italy, 1983).
- 29) T. Hayashi and T. Sato: Simulation Studies on Line-Tying Stabilization of Spheromak Tilting Instability, *Phys. Fluids*, **27**, 778 (1984).
- 30) T. Sato: Nonlinear Driven Reconnection, Roc. Int. Conf. on Plasma Phys. (Lausanne, Switzerland, 1984), vol. II, 963.
- 31) T. Sato and K. Kusano: 3D MHD Studies of Dynamic Processes in the RFP, Proc. of the 10th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Fusion Res. (London, U. K., 1984) IAEA CN-44/D-II-4-1.
- 32) T. Sato and K. Kusano: Nonlinear Driven Reconnection in the Reversed Field Pinch, *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 808 (1985).
- 33) T. Sato: Three Dimensional Reconnection Between Two Colliding Magnetized Plasmas, *Phys. Rev. Lett.*, **54** 1985 (1985).
- 34) K. Kusano and T. Sato: Simulation Study of Reversed Field Generation and Maintenance in the RFP, Int. School of Space Simulation, (Hawaii, USA, 1985).
- 35) R. Horiuchi and T. Sato: 3D MHD Self-Organization and Energy Relaxation, *ibid.*
- 36) M. Tanaka: 3-D Electromagnetic Particle Simulation of Relativistic Electron Beam Injection into a Magnetized Plasma, *ibid.*
- 37) R. Horiuchi and T. Sato: Three Dimensional Self-Organization of Magnetohydrodynamic Plasma, *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 211 (1985).
- 38) M. Tanaka: Current Drive by REB Injection, 1985 Spring College on Plasma Phys. (Trieste, Italy, 1985).
2. a) 関係
- 39) T. Watanabe, K. Nishikawa, Y. Kishimoto and H. Hojo: Numerical Method for Nonlinear Eigenvalue Problems, *Physica Scripta*, T2: **1**, 142 (1982)
- 40) K. Hamamatsu, T. Watanabe, J. M. Van Dam and K. Nishikawa: Numerical Method for Two-Dimensional Vlasov Equilibrium as a Nonlinear Boundary Value Problem, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 124 (1983).
- 41) K. Hamamatsu: Numerical Study of Vlasov Equilibrium in a Double Cusp Magnetic Field, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 1230 (1983).
- 42) H. Hojo, K. Hamamatsu, T. Watanabe, K. Nishikawa, K. Sakai, S. Takeuchi and M. Matsuoto: ICRF Confinement and Stabilization of Torus Plasma, Workshop on Advanced Bumpy Torus Concepts (Rancho Santa-Fe, USA, 1983).
- 43) 師華, 渡辺二太, 浜松清隆: 非線形境界値問題の新しい数値解析法とそのプラズマの平衡解析への応用, 京大数理解析研究所講究録 **532**, 200 (1984).
2. b) 関係
- 44) M. B. Chaudhry, T. Watanabe and K. Nishikawa: Characteristic Oscillations in Sheet Plasmas, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**, 2666 (1982).
- 45) M. B. Chaudhry, T. Watanabe and K. Nishikawa: The Effect of Ambipolar Field for the Electrostatic Ion Cyclotron Waves in Sheet Plasmas, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**, 3353 (1982).
- 46) Y. Serizawa, T. Watanabe, M. B. Chaudhry and K. Nishikawa: A Numerical Method for Eigenvalue Problems of Integral Equations, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 28 (1983).
2. c) 関係
- 47) 渡辺二太, 菅野 聡, 浜松清隆: 連結カスプ磁場により作られるトーラス磁場配位, 核融合研究, **51**, 57 (1984).
- 48) S. Sugano, T. Watanabe and K. Nishikawa: Drift Orbits in  $\Gamma-10$ , Workshop on Axi-Symmetric Effect in Tandem Mirror and RFC-XX (Tsukuba, Japan, 1985).
3. a) 関係
- 49) M. Shigeta, T. Tange and R. Sugihara: Effect of RF-Driven Current on Stability of Drift Waves, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**, 3012 (1982).
- 50) M. Shigeta, T. Tange and K. Nishikawa: Non-linear Stability of Drift Wave in a Sheared Magnetic Field, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 116 (1982).
- 51) M. Shigeta, Electron Diffusion in a Sheared Magnetic Field Due to Electrostatic High  $n$  Ballooning Mode, *J. Phys. Soc., Jpn.*, **52**, 485 (1983).
- 52) M. Shigeta, A. Fukuyama and T. Takizuka: Electron Diffusion in a Tokamak Due to High  $n$ -Ballooning Mode, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **53**, 1058 (1984).
3. b) 関係
- 53) Y. Kishimoto, K. Mima, T. Watanabe and K. Nishikawa: Analysis of Fast-Ion Velocity Distributions in Laser Plasmas with a Truncated Maxwellian Velocity Distribution of Hot Electrons, *Phys. Fluids*, **26**, 2308 (1983).