

非軸対称トーラスプラズマにおける
三次元 MHD 平衡・安定性と高エネルギー粒子

(課題番号 12680490)

平成12年度～14年度 科学研究費補助金（基盤研究（C）(2)）
研究成果報告書



平成15年5月

研究代表者 中村 祐司

(京都大学 大学院エネルギー科学研究科 助教授)

はしがき

トカマクやヘリカル系などのトーラスプラズマにおいて、アルファ粒子のような高エネルギー粒子とプラズマの MHD 特性との関係を調べることは、制御熱核融合炉を実現するために不可欠であり、重要な意義を持っている。そこで、本研究では非軸対称トーラスプラズマにおける三次元 MHD 平衡・安定性と高エネルギー粒子との相互作用について次のような理論・数値的解析を行った。

- (1) LH D装置のアルヴェン連続固有スペクトルギャップ内に存在する離散固有モードをステラレータ近似に基づくグローバルコードで調べ、T A Eモードのモード構造や周波数が有限ベータによる回転変換分布の変化によって大きく変化することを明らかにした。現在、得られたT A Eモードに対する高エネルギー粒子の影響を摂動論的に調べている。
- (2) 近年問題となっているヘリカル系に特有のバルーニングモードに対して、詳細な解析を行なった。また、この結果を踏まえて、このバルーニングモードに運動論的效果がどのように影響するかを評価するため、運動論的バルーニングモード方程式を用いた局所解析を行なった。
- (3) 運動論的效果を粒子の観点から評価することを最終的な目標として、モンテカルロコードの開発を始めた。まず最初のステップとしてヘリカル系装置ヘリオトロンJにおける新古典輸送を調べている。
- (4) リップルトカマクの解析では、コイル磁場計算コードKMAG と三次元 MHD 平衡解析コードVMEC を用いて、トロイダルコイルの離散性を考慮した自由境界平衡を求め、磁場リップルの有限ベータ依存性を調べるとともに、それが高エネルギー粒子のリップル損失に及ぼす影響を明らかにした。

なお、本研究において京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻博士後期課程の鈴木康浩、山岸統の両君に助力をいただいた。

研究組織

研究代表者：中村祐司（京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成12年度	2,100	0	2,100
平成13年度	700	0	700
平成14年度	700	0	700
総計	3,500	0	3,500

研究発表

[1] 学会誌等

- 1) "Ballooning instabilities in a Heliotron J plasma"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo,
Phys. Plasmas, Vol.8, No.6 (2001) 2750 – 2759.
- 2) "Global ballooning instabilities in a Heliotron J plasma"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo, N. Nakajima,
Phys. Plasmas, Vol.9, No.8 (2002) 3429 - 3439.
- 3) "Finite β Equilibria of Heliotron J Plasmas"
Y. Suzuki, T. Hayashi, Y. Nakamura, K. Kondo,
J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol.5 (2002) 377-380.
- 4) "Finite Beta Effects on Toroidal Field Ripple in Three Dimensional Tokamak Equilibria"
Y. Suzuki, Y. Nakamura, K. Kondo,
Nucl. Fusion, Vol.43 (2003) 406-415.
- 5) "MHD equilibrium of a low-shear helical axis heliotron"
Y. Suzuki, Y. Nakamura, K. Kondo, T. Hayashi, S. S. Lloid, H. J. Gardner,
Plasma Phys. Control. Fusion, Vol.45 (2003) 971-981.
- 6) "Kinetic effects on the ideal pressure-driven modes in an L=2 heliotron"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo, N. Nakajima,
to be appeared in Phys. Plasma.
- 7) "MHD Equilibrium and Pressure Driven Instability in L=1 Heliotron Plasmas"
Y. Nakamura, Y. Suzuki, O. Yamagishi, K. Kondo, N. Nakajima, T. Hayashi, D. A. Monticello, A. H. Reiman,
submitted to Nuclear Fusion..

[2] 口頭発表

- 1) "トカマクのリップルによる粒子軌道損失に対する有限ベータ効果"
中村祐司、市川和秀、鈴木康浩、
研究会「トロイダルプラズマの MHD 平衡・安定性と高速イオンの影響」
2001 年 2 月 21 日ー22 日、文部省核融合科学研究所.
- 2) "リップルトカマクの粒子軌道損失に対する有限ベータ効果"
中村祐司、市川和秀、鈴木康浩、
第 4 回 ITER 物理 R&D 研究会、2001 年 12 月 26 日ー27 日、東京大学.
- 3) "非軸対称トーラスプラズマにおける MHD 平衡・安定性解析"
中村祐司、

日本原子力研究所「トーラス理論専門部会」、2002年1月18日、東京.

- 4) "MHD Equilibrium and Stability Properties of a Heliotron J plasma"
Y. Nakamura, O. Yamagishi, Y. Suzuki, N. Nakajima, D. A. Monticello,
13th International Stellarator Workshop, February 25 - March 1, 2002, Canberra,
Australia.
- 5) "ステラレータ展開法による LHD の理想 TAE モードグローバル解析"
中村祐司、
H13 年度 NIFS 研究会 「トロイダルプラズマのMHD平衡・安定性と MHD
モードと高速イオンとの相互作用」、2002年3月6日-7日、文部科学省核融合
科学研究所.
- 6) "MHD Equilibrium and Pressure Driven Instabilities in L=1 Heliotron Plasmas"
Y. Nakamura, Y. Suzuki, O. Yamagishi, K. Kondo, N. Nakajima, T. Hayashi, D. A.
Monticello, A. H. Reiman,
19th IAEA Fusion Energy Conference, October, 2002, Lyon, France.
- 7) "ヘリカル系プラズマにおけるバルーニングモード"
中村祐司、 山岸統、
NIFS MHD 研究会、2003年3月4日-5日、文部科学省核融合科学研究所.
- 8) "Heliotron J 装置の高エネルギー粒子軌道解析"
鈴木康浩、中村祐司、近藤克己、
日本物理学会 第 58 回年次大会、2003年3月28日-31日、東北大学

非軸対称トーラスプラズマにおける 三次元 MHD 平衡・安定性と高エネルギー粒子

目次

1. はじめに
2. 研究成果
 2. 1 LHDにおけるTAEモード
 2. 2 ヘリカル系におけるバルーニングモード不安定性と運動論的效果
 2. 3 ヘリカル系における三次元 MHD 平衡と高エネルギー粒子軌道・新古典輸送
 2. 4 リップルトカマクの三次元 MHD 平衡と有限ベータ依存性
3. まとめ
4. 添付論文
 - 1) "Ballooning instabilities in a Heliotron J plasma"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo,
Phys. Plasmas, Vol.8, No.6 (2001) 2750 – 2759.
 - 2) "Global ballooning instabilities in a Heliotron J plasma"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo, N. Nakajima,
Phys. Plasmas, Vol.9, No.8 (2002) 3429 - 3439.
 - 3) "Kinetic effects on the ideal pressure-driven modes in an L=2 heliotron"
O. Yamagishi, Y. Nakamura, K. Kondo, N. Nakajima,
to be appeared in Phys. Plasma.
 - 4) "MHD equilibrium of a low-shear helical axis heliotron"
Y. Suzuki, Y. Nakamura, K.Kondo, T. Hayashi, S. S. Lloid, H. J. Gardner,
Plasma Phys. Control. Fusion, Vol .45 (2003) 971-981.
 - 5) "Finite Beta Effects on Toroidal Field Ripple in Three Dimensional Tokamak Equilibria"
Y. Suzuki, Y. Nakamura, K. Kondo,
Nucl. Fusion, Vol.43 (2003) 406-415.

1. はじめに

トカマクやヘリカル系などのトーラスプラズマにおいて、アルファ粒子のような高エネルギー粒子とプラズマのMHD特性との関係を調べることは、制御熱核融合炉を実現するために不可欠であり、重要な意義を持っている。とくにトカマクにおいては、JETやTFTRのDT核反応実験やITERの工学設計により、アルファ粒子に関連した物理課題に関心が集まっており、トロイダル磁場リップルによる高エネルギー粒子損失、高エネルギー粒子によるMHD不安定性の励起や安定化、MHD不安定性による高エネルギー粒子損失などに関して理論的・実験的に研究がなされている。

しかし、ヘリカル系を代表とする非軸対称トーラスプラズマでは、三次元的取り扱いが必要であるため、その理論解析は容易ではなく、運動論的效果のMHD安定性への影響（たとえばTAEモードの励起）やMHD不安定性による高エネルギー粒子損失についての研究は、まだ限られたものしかない。

またトカマクにおいても、トロイダル磁場リップルを矛盾なく考慮した三次元MHD平衡のもとでの高エネルギー粒子の振る舞いは、近似的にしか調べられておらず不十分である。とくに高ベータ時のトロイダル磁場リップルの変化はよく分かっていなかった。そこで、本研究では非軸対称トーラスプラズマにおける三次元MHD平衡・安定性と高エネルギー粒子との相互作用について理論・数值的に解析し、新しい知見を得ることを目的とした。

具体的には、

- 1) LHDプラズマにおけるアルヴェン連続固有スペクトルギャップとTAEモードの解析
- 2) ヘリカル系プラズマにおけるバルーニングモード不安定性と運動論的效果の解析
- 3) ヘリカル系プラズマにおける三次元MHD平衡と高エネルギー粒子軌道・新古典輸送の解析
- 4) リップルトカマクの三次元MHD平衡と高エネルギー粒子軌道の有限ベータ依存性を主な研究課題とした。それぞれの研究課題の成果を次章に示す。

2. 研究成果

2. 1 LHD における TAE モード

三次元 MHD 平衡コード VMEC で得られた LHD プラズマの MHD 平衡を用いて、三次元的に低モード数アルヴェン連続固有スペクトルの解析を行い、ヘリカル系プラズマにおいてもトカマクと同様にトロイディシティーに起因するスペクトルギャップに存在することを示した。また、非軸対称性に起因するトロイダルモード結合が、高周波数領域に HAE モードに対応するスペクトルギャップを作るとともにアルヴェン周波数帯の固有周波数にダウンシフトをもたらすことが明らかになった。無電流 MHD 平衡ではプラズマ圧力によって回転変換分布が容易に変化するため、スペクトル構造の有限プラズマ圧力依存性は大きいことが分かる。

これらの連続スペクトル解析から、LHD においてもトカマクプラズマと同様にスペクトルギャップ内に安定離散固有値が存在する可能性が示される。プラズマの非軸対称性を主要な要因とする低モード数 HAE の解析には完全な三次元 MHD 安定性解析コードが必要であるが、低モード数 TAE の解析では、ステラレータ近似に基づくグローバルコードが有用であると考えられる。ここではステラレータ展開法に基づく KSTEP コードを用いて低モード数 TAE の解析を行い、TAE モードのモード構造や周波数が連続スペクトル構造と同様に有限ベータによる回転変換分布の変化によって大きく変化することを明らかにした。現在、得られた TAE モードに対する高エネルギー粒子の影響を摂動論的に調べている。

2. 2 ヘリカル系におけるバルーニングモード不安定性と運動論的効果

近年問題となっているヘリカル系に特有のバルーニングモードに対して、WKB 近似による局所解析と三次元 MHD 安定性解析コード CAS 3D による大域的解析の詳細な比較検討を行い、近似の妥当性に問題が指摘されていた局所解析の有用性を始めて示した。得られた成果の詳細は添付論文 1) および 2) で示す。

この理想 MHD 解析の結果を踏まえて、バルーニングモードに運動論的効果がどのように影響するかを評価するため、運動論的バルーニングモード方程式を用いた局所解析を行い、有限ラマ半径効果が短波長モードを強く安定化すること、圧縮性効果が長波長モードの安定化に有効であることを示した。詳細は添付論文 3) に示す。

2. 3 ヘリカル系における三次元 MHD 平衡と高エネルギー粒子軌道・新古典輸送

ヘリカル系プラズマの MHD 平衡を考えると、多くの場合入れ子状の磁気面の存在を仮定し、前述の三次元 MHD 平衡コード VMEC を用いる。さらにヘリカル系プラズマでは外部コイル系によって真空磁気面ができるため、真空の最外殻磁気面の形状を固定境界と置いた平衡計算がなされることも多い。しかし、高エネルギー粒子の軌道や新古典輸送、プラズマ安定性の有限ベータ依存性を調べる際にはプラズマ形状の変化、場合によっては磁気島の形成、磁気面の崩れを考慮する必要がある。さらに高エネルギー粒子の真空領域での軌道やダイバータ構造の解析を行うためには、有限プラズマが存在するときの真空領域の磁場構造を矛盾なく求める必要がある。そこで、この観点から自由境界三次元 MHD 平衡を求める研究を進めた。ここでは HINT コードを用いて得られたヘリオトロン J プラズマに対する解析結果を添付論文 4) に示す。

また、このように得られたヘリオトロン J の三次元 MHD 平衡を用いて高エネルギー粒子の無衝突粒子軌道解析を行い、高エネルギー粒子が真空容器壁に衝突する位置を調べた。さらに運動論的效果を粒子の観点から評価することを最終的な目標として、モンテカルロコードの開発を始めた。最初のステップとしてヘリカル系装置ヘリオトロン J における新古典輸送を調べている。現段階では、定量的議論は難しいが、以前の解析で示された磁場のバンピー成分と径電場による新古典輸送の抑制をモンテカルロコードで確認した。

2. 4 リップルトカマクの三次元 MHD 平衡と高エネルギー粒子軌道の有限ベータ依存性

トカマクにおいては、JET や TFTR の DT 核反応実験や ITER の工学設計により、アルファ粒子に関連した物理課題に関心が集まっており、トロイダル磁場リップルによる高エネルギー粒子損失、高エネルギー粒子による MHD 不安定性の励起や安定化、MHD 不安定性による高エネルギー粒子損失などに関して理論的・実験的に研究がなされている。しかし、トロイダル磁場リップルを矛盾なく考慮した三次元 MHD 平衡のもとでの高エネルギー粒子の振る舞いは、近似的にしか調べられておらず不十分である。とくに高ベータ時のトロイダル磁場リップルの変化はよく分かっていなかった。

そこで、外部コイルによる磁場計算コード KMAG と三次元 MHD 平衡解析コード VMEC を用いて、トロイダルコイルの離散性を考慮した自由境界平衡を求め、磁場リップルの有限ベータ依存性を調べた。また、負磁気シア・トカマク配位に対する解析を行い、中心領域の安全係数が大きいことがリップルへの有限ベータ効果を大きくすることを示した。詳細を添付論文 5) に示す。

さらに、高エネルギー粒子の軌道計算を行い、リップル損失の有限ベータ依存性を明らかにした。粒子軌道はシャフラノフシフトの影響を受けるだけでなく、有限ベータによりリップル井戸構造が変化するため、プラズマ表面近傍ではリップル損失は減少するが、中心領域では逆にストカスティック・リップル損失が増えることが分かった。

3. まとめ

本研究では非軸対称トーラスプラズマにおける三次元MHD平衡・安定性と高エネルギー粒子との相互作用について理論・数值的に解析し、新しい知見を得ることを目的として、

- 1) LHD プラズマにおけるアルヴェン連続固有スペクトルギャップと TAE モードの解析
- 2) ヘリカル系プラズマにおけるバルーニングモード不安定性と運動論的効果の解析
- 3) ヘリカル系プラズマにおける三次元 MHD 平衡と高エネルギー粒子軌道・新古典輸送の解析
- 4) リップルトカマクの三次元 MHD 平衡と高エネルギー粒子軌道の有限ベータ依存性

の研究を行った。その結果、先進的な三次元 MHD 平衡計算手法の開発、三次元非軸対称プラズマに対する運動論的 MHD 安定性解析、粒子軌道解析に関して多くの新しい知見を得た。とくに、トカマクにおける三次元 MHD 平衡解析の重要性、ヘリカル系プラズマの MHD 安定性に対する運動論的効果の重要性を示した。

この研究で挙げたいくつかの課題はまだ研究の途中であり現在も研究を進めている。またここで取り上げなかった運動論的 MHD 安定性に関する研究課題も多いが、これらは将来の研究課題としてさらに検討を続ける予定である。