

平成 21年 4月 2日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2005－2008
 課題番号：17560736
 研究課題名 (和文) 圧力駆動型モードによる巨視的構造変化に対する自発的ゾーナルフローの効果
 研究課題名 (英文) Effects of spontaneous zonal flow generated by pressure driven mode on global structure
 研究代表者
 市口 勝治 (ICHIGUCHI KATSUJI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号：90211739

研究成果の概要：

核融合発電のために、できるだけ多くのプラズマを磁場で閉じ込めようとする場合に、その圧力によって不安定になる場合がある。そこで、圧力が上昇していく過程での圧力駆動型不安定性の振舞いを詳細に調べる非線型数値シミュレーション手法を開発した。そして、線型不安定な状態であっても、大きな閉じ込め損失が生じないように、プラズマ自身が圧力分布を変形していく可能性があることを示した。また、圧力駆動型不安定性による自発的流れを精度よく取り扱う指針も確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	800,000	0	800,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,500,000	330,000	2,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁場閉じ込め核融合、電磁流体力学、圧力駆動型モード、構造変化、ゾーナルフロー、非線型数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合を達成するためには、プラズマの巨視的安定性は必須条件である。しかし、良好な閉じ込めが達成されればされるほど、プラズマ圧力は増大し、圧力駆動型不安定性の危険性が増す。従って、その電磁流体力学的 (MHD) 非線形挙動に基づく安定性の理解は核融合炉を目指すうえで重要な課題である。圧力駆動型不安定性は装置の種類にかかわらず生じ得るものである。特に、

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) をはじめとするヘリカル型の装置では、プラズマ中に正味電流を流す必要がないため、この圧力駆動型不安定性が特に注目すべき不安定性となる。

この非線形挙動による圧力分布や磁場構造の巨視的構造変化は、準安定配位への自己組織化現象と不安定で激しい崩壊現象の二つに分類される。これまでの研究において、この現象の差異が不安定性の作り出す渦同士の相互作用の違いによるものであること

を、数値シミュレーションを用いて明らかにしてきた。一方、このような現象の総合的な理解のためには、圧力上昇時でのプラズマ挙動の連続的な追跡が必須となる。しかし、そのためには背景の平衡量と不安定性を引き起こす摂動量の両方の時間変化を同時に取り扱わなければならない。ところが、平衡量は 10ms 程度の長い時間スケールで変化するのに対し、摂動量は、 $1\mu\text{s}$ 程度の短い時間スケールで変化し、両者の間には、 10^5 乗もの開きがある。従って、このマルチスケールでの変化を取扱うためには、特別な手法が必要であると考えられていた。

さらに、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) では、交換型モードが線型不安定であると理論的に予測されていた領域で、非常に高い圧力を持つ良好な閉じ込めが達成されている。従って、実際のプラズマでは、線型安定性解析では説明できない安定化メカニズムが働いていると考えられ、このメカニズムを解明するためにも、圧力上昇時のプラズマ挙動の非線型解析が必要であった。

一方、圧力駆動型モードである交換型モードの非線型発展においては、大局的なシアフローが形成され、微視的不安定性によるゾーナルフローと同様の自発的なフローが生じる可能性がある。そこで、このようなフローを精度よく取り扱うための数値的指針の確立が必要となっていた。また、微視的乱流によるゾーナルフローとの関連も重要な課題となりつつあった。

2. 研究の目的

(1) 圧力上昇時のプラズマ挙動を追跡し、圧力分布や磁場構造のベータ値に対する連続的な変化を明らかにする。その結果を用いて、LHD で得られている実験結果のメカニズムを解明する。

(2) 交換型モードの非線型発展における自発的なシアフローの形成について、その計算手法を確立する。その手法を用いて、圧力上昇時の交換型モード自身の非線型発展にどのような影響を与えるかを調べる。また、微視的乱流によるゾーナルフローを取り込んだ解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 圧力上昇効果を含むプラズマの MHD 挙動を解析できる非線型マルチスケール数値解析手法を新たに開発する。この解析手法は、MHD 不安定性の非線型時間発展を追跡する計算と MHD 平衡の計算とを交互に繰り返すことから成り立っている。前者の計算は短い時間スケールの変化に対応し、後者は長い時間スケールの変化に対応している。平衡計算を行う際に、非線型発展によって変形した圧力分布の構造を取り込み、同時に、外部

からの一定の加熱及び粒子補給に対応する圧力上昇分を加える。このようにして、非線型ダイナミクスの効果と圧力上昇の両方の効果を含めたマルチスケール解析手法を確立することができる。非線型時間発展コードには、既に関連している、簡約化 MHD 方程式に基づく NORM コードを用い、平衡計算には、米国で開発された VMEC コードを用いる。さらに、平衡量及び摂動量の連続性を高めるために、各時間発展区間において、平衡量を線型補間するという工夫も行う。

(2) 円柱プラズマにおいて、粘性等の散逸効果を含むプラズマでの角運動量保存則を精度よく満たす解析手法を開発する。また、この手法を (1) で開発するマルチスケールスキームに応用し、圧力上昇時での、交換型モードの時間発展による大局的なシアフローの形成の様子を調べる。さらに、微視的乱流効果を含む解析コードを開発し、巨視的な交換型モードによるシアフローと微視的モードによるゾーナルフローの相互作用を調べる。

4. 研究成果

(1) 開発したマルチスケール解析手法を用いて、高い圧力を持つ良い閉じ込めが達成されている LHD プラズマを解析した。その結果、このプラズマが交換型モードに対して線型不安定であるにも拘らず、破壊的な現象が生じることなく、圧力が上昇していくという実験結果を再現することができた。また、そのとき、図 1 に示すように、圧力分布が階段状に変化することが得られた。この結果は、次のようなメカニズムによる。

このプラズマは、交換型モードに対して線型不安定であるので、圧力の上昇とともに、交換型不安定性が励起される。しかし、初期の段階では、圧力が低いため、非常に低いレベルで非線型飽和する。このとき、不安定性が生じる共鳴領域において、圧力分布に局所的な平坦化が生じる。この平坦化は、その領域での圧力勾配が小さくなったことを意味している。プラズマ全体としては、この構造を保持して全体の圧力が上昇していくので、この領域では平坦化がない場合に比べて不安定性の駆動力が減少していることになる。この平坦化による駆動力低減によって、圧力が上昇した場合でも、大きな不安定性が抑制されることになる。このようにして、圧力が上昇していくに従って、弱い不安定性の励起とその飽和現象が連続的に繰り返される。不安定性が生じる共鳴領域は、圧力の値によって異なり、それぞれの領域で局所的に平坦化が生じることになる。そのため、最終的には圧力分布は階段状となり、大きな破壊的な現象が抑制されたと考えられる。この状態での圧力分布の鳥瞰図を図 2 に示す。また、圧力

が平坦化されている領域では、線型安定性も改善されていることが得られている。以上から、交換型モードの非線形発展によって、高い圧力領域への安定な経路を構成するようにプラズマ自身が自己組織化していることが、実験で得られている良好な閉じ込めの要因であると考えられる。

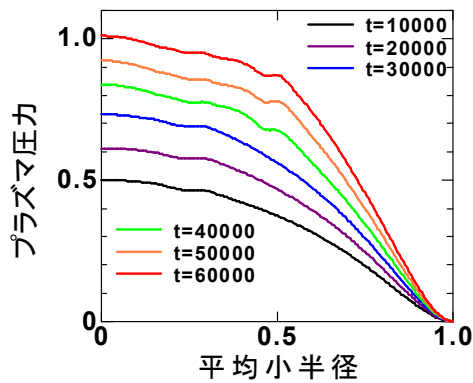


図1. 平均圧力分布の時間発展。

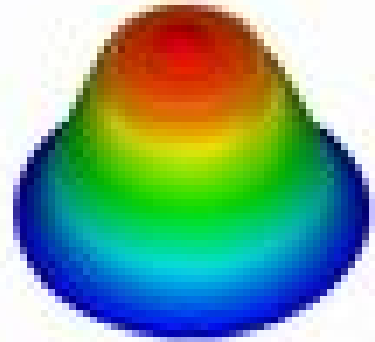


図2. 最終状態での圧力鳥瞰図。

(2) 大局的なシアフローを議論するためには、角運動量保存則を正確に取り扱わなくてはならない。交換型モードでは、レイノルズ応力と電磁応力の働く場所が異なるため、シアフローが生じるが、全角運動量は保存する。しかし、それが、数値計算においてどの程度満足されているかは、今まで殆ど議論されていない。そこでまず、円柱配位での簡約化MHD方程式において、粘性が存在する場合の、全角運動量保存則を導出した。その結果、保存則を満たすためには、渦度変数の境界での値を適切に選ぶ必要があることがわかった。図3は、NORMコードを用いて得られた、円柱配位での交換型モードの時間発展に伴う全角運動量の相対誤差を示している。従来、よく用いられている境界での値がゼロという境界条件での値を「改良前」としてプロットした。この結果からわかるように、この境界条件で

は、時間とともに大きな誤差が蓄積し、非物理的な流れが生じてしまう。一方、保存則を満たす境界条件は、境界での速度微分と渦度の値が関連したものであることが得られている。これを用いて改良した結果、図3の「改良後」に示すように、誤差は、1/1000程度まで減少した。このことから、精度よく大局的なシアフローを計算するためには、渦度の境界条件を適切に設定することが必要であることがわかった。

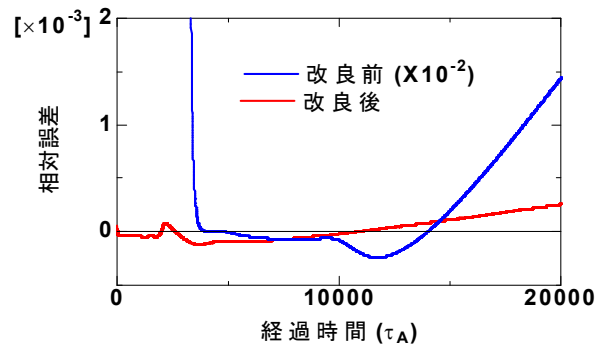


図3. 全角運動量の相対誤差の時間経過。

この知見に基づいた、圧力上昇時での交換型モードの自己組織化に対するシアフローの効果、及び、微視的乱流によるゾーナルフローとの効果については、今後の課題となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Ichiguchi, B. A. Carreras, 'Multi-Scale MHD Simulation Incorporating Pressure Transport Equation for LHD Plasma', 査読有, Journal of Plasma and Fusion Research, 2009, 掲載確定。
- ② K. Ichiguchi, B. A. Carreras, 'Numerical Analysis of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 査読無, Abstracts of 35th EPS Conference on Plasma Physics, Hersonissos, 9-13 June 28, ECA Vol. 32D, 2008, P-2. 053.
- ③ K. Ichiguchi, B. A. Carreras, 'Mercier Stability Improvement in Nonlinear Development of LHD Plasmas', 査読有, Plasma and Fusion Research, Vol. 3, 2008, S1033.
- ④ K. Ichiguchi, B. A. Carreras, 'Multi-Scale approach to the solution of nonlinear MHD evolution of heliotron

plasma', 査読有, Journal of Plasma Physics, Vol.72, part 6, 2006, 1117-1121.

[学会発表] (計 26件)

① K. ICHIGUCHI

'Numerical Study of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 第14回NEXT研究会、2009年3月11日、京大会館。

② K. ICHIGUCHI

'Multi-Scale MHD Simulation with Profile Relaxation', Workshop on Physics of Modeling of Multi-Scale Interaction in Plasma, 2009年2月20日、京大会館。

③ K. ICHIGUCHI, B. A. Carreras,

'Numerical Study of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 18th International Toki Conference, 2008年12月9日、セラとピア土岐。

④ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,

'Numerical Analysis of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 第25回プラズマ・核融合学会年会、2008年12月3日、栃木県総合文化センター。

⑤ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,

'Numerical Analysis of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 第2回シミュレーション科学シンポジウム、2008年9月25日、多治見市産業文化センター。

⑥ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,

'Multi-Scale MHD Simulation Incorporating Pressure Transport Equation for LHD Plasma', International Conference on Plasma Physics 2008, 2008年9月11日、福岡国際会議場。

⑦ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,

'Numerical Analysis of Non-Resonant Pressure Driven Mode in Heliotron Plasma', 35th EPS Conference on Plasma Physics, Heronissos 9-13 June 2008, 2008年6月10日、Creta Maris Conference Center, Heronissos, Crete, Greece.

⑧ K. Ichiguchi,

'Non-Resonant Pressure Driven Mode in a Heliotron Plasma', US/Japan JIFT Workshop on "New Development of Simulation Science", 2008年3月19日、核融合科学研究所。

⑨ K. Ichiguchi,

'Mercier Stability Improvement of LHD Plasmas', 第13回NEXT研究会、2008年3月12日、京都テルサ。

⑩ K. Ichiguchi,

'Multi-Scale MHD Analysis of Heliotron Plasma', Workshop on Physics of Modeling

of Multi-Scale Interaction in Plasmas, 2008年3月4日、京大会館。

⑪ 市口勝治,

'ヘリオトロンプラズマの非線型発展におけるメルシエ安定性の改善', 平成19年度シミュレーション科学共同研究研究会、2008年2月6日、核融合科学研究所。

⑫ 市口勝治,

'LHDにおけるIDB-SDCプラズマのMHD安定性解析', 第24回プラズマ・核融合学会年会、2007年11月27日、イーグレ姫路。

⑬ 市口勝治,

'ヘリオトロンプラズマの非線型発展におけるメルシエ安定性の改善', 平成19年度NIFS共同研究研究会「MHD理論の進展とその周辺」, 2007年11月1日、核融合科学研究所。

⑭ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,

'Mercier Stability Improvement in Nonlinear Development of LHD Plasmas', Joint Conference of 17th International Toki Conference and 16th International Stellarator Workshop 2007, 2007年10月16日、セラとピア土岐。

⑮ 市口勝治,

'ヘリオトロンプラズマの非線型MHD解析', 日本天文学会2007年秋季年会、2007年9月26日、岐阜大学。

⑯ 市口勝治,

'ヘリオトロンプラズマにおける非共鳴圧力駆動がモードの数値解析', 日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学。

⑰ K. Ichiguchi,

'Nonlinear MHD Analysis of Heliotron Plasma with Multi-Scale Approach', US-Japan Workshop on Progress of Extended MHD Models, 2007年3月26日、核融合科学研究所。

⑱ 市口勝治, B. A. Carreras,

'ヘリオトロンプラズマのマルチスケールMHDシミュレーション', 第12回NEXT研究会、2007年3月2日、京都テルサ。

⑲ 市口勝治, B. A. Carreras,

'固定圧力上昇分布を用いたLHDプラズマのマルチスケールMHDシミュレーション', 「プラズマ・核融合におけるHigh Performance Computingワークショップ」および「大型シミュレーション研究会」、2007年1月24日、核融合科学研究所。

⑳ 市口勝治, B. A. Carreras,

'固定圧力上昇分布を用いたLHDプラズマのマルチスケールMHDシミュレーション', プラズマ・核融合学会第23回年会、2006年11月30日、筑波大学大学会館。

㉑ 市口勝治, B. A. Carreras,

'ベータ上昇効果を含むヘリオトロンプラ

ズマのマルチスケール MHD シミュレーション’，平成 18 年度 NIFS 共同研究合同作業会「MHD 理論の進展とその周辺」、2006 年 9 月 14 日、核融合科学研究所。

㉒ 市口勝治、B. A. Carreras,
‘LHD プラズマの非線型 MHD 解析」，第 6 回核融合エネルギー連合講演会、2006 年 6 月 13 日、富山国際会議場。

㉓ 市口勝治、B. A. Carreras,
‘ヘリオトロンプラズマのベータ上昇を含む MHD 非線型解析’，日本物理学会第 61 回年次大会、2006 年 3 月 28 日、愛媛大学。

㉔ 市口勝治、B. A. Carreras,
‘ヘリオトロンプラズマのマルチスケール MHD シミュレーション’，第 10 回シミュレーションサイエンスシンポジウム&平成 17 年度 NIFS 共同研究「大型シミュレーション研究」合同研究会、2006 年 1 月 12 日、核融合科学研究所。

㉕ 市口勝治、B. A. Carreras,
‘ヘリオトロンプラズマのマルチスケール MHD シミュレーション’，プラズマ・核融合学会第 22 回年会、2005 年 12 月 1 日、タワーホール船越。

㉖ K. Ichiguchi, B. A. Carreras,
‘Multi-Scale Approach to Solution of Nonlinear MHD Evolution of Heliotron Plasma’，19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and 7th Asia Pacific Plasma Theory Conference, 2005 年 7 月 13 日、奈良県新公会堂。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市口 勝治
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
90211739

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。

(4) 研究協力者

Benjamin A. Carreras
BACV Solutions Inc., USA.

以上。