

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760663

研究課題名(和文)強いプラズマ流を伴う輸送障壁の形成機構についての研究

研究課題名(英文)Study on formation of transport barriers with strong plasma flow

研究代表者

宮戸 直亮(Miyato, Naoaki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：80370477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：磁化プラズマと場という系全体についてのラグランジアンを構成し、これに対して変分原理を用いることでプラズマの流速が音速と同程度でも有効な矛盾のないモデルを構築した。このラグランジアンは、リー摂動解析と呼ばれる現代的手法を用いて速い旋回運動を取り除いた、磁場中の単一荷電粒子運動の基本1-形式を基礎としている。このモデルは従来の強いプラズマ流のモデルとは異なるが、弱いプラズマ流を仮定した標準モデルに近いことを、流体モーメントの押し出し表現を比較することで明らかにした。このモデルにより輸送障壁のない初期状態から強いプラズマ流を伴う輸送障壁が形成されるまでのシミュレーションが可能となった。

研究成果の概要(英文)：A self-consistent reduced model, which is valid for plasmas flowing with large flow velocity comparable to the sonic speed, has been constructed variationally from the total system Lagrangian which is based on a reduced one-form for single charged particle motion in a magnetic field. The fast gyro-motion is removed in the one-form by using the Lie-transform perturbation method under the assumption that the flow velocity is comparable to the sonic speed. Although the model constructed is different from the conventional model for flowing plasmas, the correspondence to the standard model with weak flow is shown clearly by considering the push-forward representation for fluid moments in an appropriate limit. The model enables us to simulate from the initial phase without any transport barrier to the final state in which a transport barrier with strong flow is formed.

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：プラズマ流 ジャイロ運動論 押し出し表現 輸送障壁 変分原理

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマ実験では、いわゆる高閉じ込めモード(Hモード)と呼ばれる周辺領域での輸送障壁の形成、また、反転磁気シアトカマクにおいては磁気シアが反転する半径近傍での内部輸送障壁の形成が観測されている。輸送障壁の中でも周辺プラズマにおいて形成されるHモードはプラズマ全体の閉じ込めを左右するのでとりわけ重要である。輸送障壁の形成には圧力勾配から生じるドリフト波乱流とプラズマ中の流れとの非線形相互作用が重要な役割を果たしていると考えられているが、基礎方程式に基づくシミュレーションにより輸送障壁形成を再現した例はない。

## 2. 研究の目的

通常、シミュレーションに用いられるモデルは基本的に弱いプラズマ流しか想定しておらず、強いプラズマ流は時間変化しない背景として取り入れられているのみである。しかし、輸送障壁のない初期状態から強いプラズマ流を伴う輸送障壁が形成されるまでのシミュレーションを行うには、プラズマ流の時間変化を取り扱う必要がある。そこで、時間変化する強いプラズマ流を取り扱うことのできるモデルを構築する。そして、そのモデルに基づく数値計算コードを開発し、強いプラズマ流を伴う輸送障壁形成のシミュレーションを行う。

## 3. 研究の方法

モデル構築については、単一荷電粒子運動の基本1-形式(相空間ラグランジアン)を強磁場で簡約化したものを基本とし、場の理論を用いた系全体についてのラグランジアンを構成し、変分原理を用いて矛盾のない方程式を導く。

数値計算コードの開発では、オブジェクト指向言語C++により、流体モデル、運動論モデルのどちらでも共通に利用できる部品から作成し、コードの拡張が容易に可能な構造とする。

## 4. 研究成果

### (1) 亜音速モデル

研究代表者はすでに磁場中の単一荷電粒子運動の基本1-形式を、強いプラズマ流の仮定の下でリー摂動解析と呼ばれる現代的手法を用いて荷電粒子の速い旋回運動について簡約化し、強いプラズマ流を取り扱うことのできる簡約化運動論モデルを導いていた。この簡約化には任意性があり、従来のモデルでは基本1-形式のシンプレクティック部分と呼ばれるところにプラズマ流に関係した項が含まれている。一方、研究代表者の導いたモデルはシンプレクティック部分にプラズマ流に関係した項が現れず、弱いプラズマ流を仮定した標準モデルと同じ形をしている。これら簡約化モデルの対応関係を

明らかにするため、簡約化モデルにおける流体モーメント(密度、流束、圧力など)について調べた。簡約化しない相空間において粒子の分布関数を速度変数について積分すると、当然、粒子密度になるが、簡約化モデルで分布関数を速度変数に対応する変数で積分しても旋回運動の中心(Guiding-Center, GC)の密度になり、これは一般には粒子密度には一致しない。これらの差は輸送障壁のように急峻な圧力勾配や強いプラズマ流があるとき特に重要となる。

物理的な粒子流体モーメントをGC流体モーメントで表したものを押し出し(push-forward)表現と呼ぶが、一般的な流体モーメントの形式的に厳密な表現から始め、それを亜音速の仮定において摂動展開することで具体的な表現を求めた。従来のモデルについても同様の展開で具体的な表現を求め違いを明らかにした。また、弱いプラズマ流を仮定した標準モデルとの比較も行い、長波長、弱いプラズマ流の極限で研究代表者のモデルと一致することを示した。さらに、電場(静電ポテンシャル)を求めるのに使われるポアソン方程式では電荷密度の部分で密度の押し出し表現が必要となるが、これは粒子のハミルトニアン(場合によってはラグランジアン)から変分的に求めることができ、摂動展開で求めた結果と一致することを示した。

### (2) 遷音速モデル

プラズマ流の速度が音速と同程度の場合に、厳密な流体モーメントの押し出し表現について摂動展開を行うと、非常に煩雑な計算が必要となるが、GC粒子運動のハミルトニアンがわかっているならば、粒子密度の表現は変分原理から厳密に求めることができる。モデルに必要なポアソン方程式を得るには粒子密度の押し出し表現で十分である。強いプラズマ流がある場合の粒子ハミルトニアンはすでに導いているので、これの変分計算からプラズマ流が音速程度でも有効なポアソン方程式を導くことに成功した。このポアソン方程式は標準的なものと比べて、静電ポテンシャルについて非線形な追加の項を含んでいる。追加の項は粒子ハミルトニアン中の静電ポテンシャルについての3次の非線形項に由来する。

### (3) 高精度ジャイロ運動論モデル

標準ジャイロ運動論モデルは短波長の微視的揺動を想定して定式化されているが、大型並列計算機の性能向上や洗練された数値計算スキームの適用により、定式化の想定を越えた時空間スケールでの大規模シミュレーションが可能となりつつある。しかし、近年、米国MITのグループからシミュレーションで用いられているジャイロ運動論モデルを長波長、長時間スケールに適用するには精度が不足しているとの指摘がなされた。そし

てそのような時空間スケールでも有効と称するモデルが提出されたが、その導出には標準モデルの導出で用いられている現代的な手法ではなく、分布関数の時間発展方程式を平均化するという伝統的な手法の改良版が用いられていた。その後、一部、現代的な手法を用いたモデルが提出されたが、最初に提出されたものと異なる部分があった。

研究代表者は標準モデルの定式化がなされた 1980 年代に単一荷電粒子運動の基本 1 - 形式についてのリー摂動解析は十分高次までなされており、MIT のグループの得た結果は基本的に標準モデルの焼き直しであることを指摘した。その上で研究代表者は、MIT グループのように煩雑な計算を行わずとも、上記の変分原理により静電ポテンシャルのポアソン方程式の高次項を標準モデルのハミルトニアンの高次項から簡単に導くことができることを示し、標準モデルから得られる高次項と、MIT グループの 2 つのモデルの高次項との違いを明らかにした。さらに高精度のモデルを磁場揺動を含む電磁的なモデルへの拡張も行った。

#### (4) C++コードの開発

オブジェクト指向言語 C++を用いて、磁場閉じ込めプラズマの乱流シミュレーションの基本となるクラスの構築を行った。この基本クラスは磁場に垂直な平面を想定した 2 次元空間におけるデータ領域を持ち、それに付随した処理を行うメンバ関数が定義されている。具体的には、算術・代入演算子の再定義の他、平均の計算、ポアソン括弧式を Arakawa スキームで計算する関数や、2 次元ポアソン方程式を解く関数などが定義されている。ポアソン方程式を解くときなど、境界条件によって動作を変える必要があるが、共通部分については基底クラスを定義し、動作が異なる部分については基底クラスを継承した派生クラスで定義するという実装になっている。この 2 次元基本クラスの検証のため、このクラスを用いて 2 次元 Kelvin-Helmholtz 問題を解くコードを開発した。これは 2 次元空間で渦度方程式とポアソン方程式を数値的に計算してプラズマ流の安定性を解析するもので、数値計算結果は過去の文献とよい一致を示しており正しく動作することを確認した。この 2 次元基本クラスを部品として用いれば 3 次元以上のプラズマ乱流コードを簡単に構築することができる。

#### 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 8 件)

- 1) N. Miyato, B. D. Scott, S. Tokuda, "Fluid moments in modified guiding-centre coordinates," 査読有,

J. Plasma Fusion Res. SERIES 9, 546-551 (2010).

- 2) N. Miyato, B. D. Scott, "Modification on the gyrokinetic quasi-neutrality condition due to large flow," 査読無, Europhysics Conference Abstracts 34A, P1.1070 (2010).
- 3) N. Miyato, B. D. Scott, "Fluid moments in the reduced model for plasmas with large flow velocity," 査読有, Plasma and Fusion Research 6, 1403147 (2011).
- 4) K. Kamiya, M. Honda, N. Miyato, H. Urano, M. Yoshida, Y. Sakamoto, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Koide, Y. Kamada, K. Ida, I. Murakami, "Modifications to the edge radial electric field by angular momentum injection in JT-60U and their implication for pedestal transport," 査読有, Nuclear Fusion 52, 114010 (2012).
- 5) N. Miyato, B. D. Scott, M. Yagi, "On the gyrokinetic model in long wavelength regime," 査読有, Plasma Physics and Controlled Fusion 55, 074011 (2013).
- 6) M. Yoshida, S. Ide, H. Takenaga, M. Honda, H. Urano, T. Kobayashi, M. Nakata, N. Miyato, Y. Kamada, "Temporal and spatial responses of temperature, density and rotation to electron cyclotron heating in JT-60U," 査読有, Nuclear Fusion 53, 083022 (2013).
- 7) S. Maeyama, A. Ishizawa, T. Watanabe, M. Nakata, N. Miyato, Y. Idomura, "Kinetic ballooning mode turbulence simulation based on electromagnetic gyrokinetics," 査読有, Plasma and Fusion Research 9, 1203020 (2014).
- 8) J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, "On kinetic resistive wall mode theory with sheared rotation," 査読有, Plasma and Fusion Research 9, 3403027 (2014).

[学会発表](計 12 件)

- 1) N. Miyato, B. D. Scott, S. Tokuda, M. Yagi, "Effects of strong ExB flow on gyrokinetics," 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea (11-16 October 2010).

- 2) B. D. Scott, F. Da Silva, A. Kendl, N. Miyato, T. Ribeiro, "Gyrokinetic studies of turbulence, equilibrium and flows in the tokamak edge," 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea (11-16 October 2010).
- 3) N. Miyato, B. D. Scott, "Fluid moments in a reduced model with large flow," 第 27 回プラズマ核融合学会年会, 北海道大学, 札幌, 2010 年 11 月 30 日-12 月 3 日.
- 4) N. Miyato, B. D. Scott, M. Yagi, "On extension of the gyrokinetic quasi-neutrality condition towards long wavelength regime," 13th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, Oxford, UK (10-12 October 2011).
- 5) N. Miyato, B. D. Scott, M. Yagi, "Higher order terms of the guiding-centre transformation and the gyrokinetic quasi-neutrality condition," Plasma Conference 2011, Kanazawa, Japan (22-25 November 2011).
- 6) 宮戸直亮, B. D. Scott, 矢木雅敏, "強い  $E \times B$  流があるときのジャイロ粘性力" 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス, 2012 年 3 月 24-27 日.
- 7) N. Miyato, B. D. Scott, M. Yagi, "The gyrokinetic model in the long wavelength regime," Theory of Fusion Plasmas, Joint Varenna-Lausanne international workshop, Villa Monastero, Varenna, Italy (27-31 August 2012).
- 8) 宮戸直亮, B. D. Scott, 矢木雅敏, "長波長領域におけるジャイロ運動論モデル" 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学 常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18-21 日.
- 9) J. Shiraishi, N. Aiba, N. Miyato, M. Yagi, "Stabilization of resistive wall modes by magnetohydrodynamic equilibrium change induced by plasma toroidal rotation," 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA (8-13 October 2012).
- 10) 宮戸直亮, "ジャイロ運動論モデル - 現代的な定式化と最近の話題 -," 第 16 回若手科学者によるプラズマ研究会, 那

珂核融合研究所, 2013 年 3 月 4 日-6 日.

- 11) N. Miyato, "A high-order extension of the  $p_z$  electromagnetic gyrokinetic model," Japan-Korea Workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas", Kyoto, Japan (19-20 August 2013).
- 12) 宮戸直亮, "Development of a plasma turbulence code by C++," 第 19 回 NEXT 研究会 京都大学, 2013 年 8 月 29 日-30 日.

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/theory/staff/miyatoJ.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮戸直亮 (MIYATO, Naoaki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究副主幹

研究者番号: 80370477