

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740411

研究課題名(和文) 連結階層シミュレーションモデルで拓く核融合プラズマ研究の新展開

研究課題名(英文) Evolution of fusion plasma studies with macro-micro interlocked simulation model

研究代表者

長谷川 裕記 (Hasegawa, Hiroki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60390639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合プラズマをはじめとする様々なプラズマで生じる多階層現象の連結階層モデルによる自己無撞着なシミュレーションを実現させるための研究、並びに、開発した連結階層コードによる物理現象の研究をおこなった。その結果、オーロラ現象において、微視的な効果に対して磁気圏が応答する過程の詳細を見出した。また、磁場閉じ込め核融合装置の周辺部で見られるコヒーレント構造の伝播ダイナミクスにおける微視的な効果などを見出した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the research for code development of self-consistent holistic simulation of multi-hierarchy plasma phenomena and the investigation of dynamics of the phenomena with the developed holistic simulation code have been performed. The response of the magnetosphere to microscopic effects in auroral arc formation has been found. Furthermore, some microscopic effects on propagation dynamics of the coherent structure which are observed in fusion peripheral plasmas have been discovered.

研究分野：プラズマ物理、シミュレーション科学

キーワード：プラズマ・核融合 計算物理 ハイパフォーマンス・コンピューティング 磁気圏・電離圏 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

自然界では、様々な物理現象が起きているが、ひとの目に見えるその挙動の多くは、マクロな階層におけるそれである。しかし、実際に、マクロ階層の挙動を左右しているのは、ミクロな階層の物理であろうし、逆に、マクロ階層の運動がミクロ階層の挙動の端緒となることも多い。

しかし、そのような物理現象に関する数値シミュレーション研究では、そのほとんどにおいて、マクロ階層の挙動を記述する方程式のみにもとづいてその計算がおこなわれ、ミクロ階層の物理については考慮しないか、もしくは、単純なパラメタとしてくり込む程度であった。一方、物理現象の厳密な解明をめざして、ミクロの素過程にもとづく第一原理的なシミュレーション研究もなされつつあるが、現存する計算機的能力では、システム全体を計算するのは不可能である。

そこで、マクロ階層とミクロ階層をつなぎ、現象の自己無撞着なシミュレーションを可能とする画期的な連結階層アルゴリズム (Macro-Micro Interlocked (MMI) Algorithm) が考案された [引用文献①]。そして、この MMI アルゴリズムは、様々な物理現象に関するシミュレーション研究に応用されつつある。

2. 研究の目的

本研究では、このような自然界の物理現象と同じく、マクロな現象とミクロの過程が複雑にからみあっている核融合プラズマや宇宙プラズマなどにおける諸現象に焦点をあて、それらにおける多階層ダイナミクスを解明するための連結階層シミュレーションモデルの実現に向けた研究を進め、そして、開発した連結階層シミュレーションコードを用いた研究により、多階層ダイナミクスの理解を目指す。具体的には主に、次の項目について研究を進める。

(1) 磁場閉じ込め核融合プラズマの周辺部などにおいて、通常の拡散理論から考えられる密度よりも高い密度のプラズマが観測されている。そして、その原因として、プラズマプロブと呼ばれる磁力線方向に伸びたプラズマの塊が、磁力線を横切って、装置の壁方向へ移動する現象が考えられている (図1) [引用文献②]。このプロブ輸送は閉じ込め装置の壁へ悪影響をおよぼす可能性などがあるため、そのプロセスの理解が急務となっているが、その精度の高い観測が少なく、輸送が間欠的におこるなど、あきらかにされていない部分が残されている。一方、流体モデルによるシミュレーション研究がいくつかなされているが、プロブの大きさがイオン回旋半径の数十倍程度とメソスケールであることを考えると、粒子運動の効果を考慮する必要がある。そこで、本研究では、プロブ輸送において重要となるミクロな効果を同

定し、そのダイナミクスについて調べ、その連結階層シミュレーション実現のための基盤を整える。

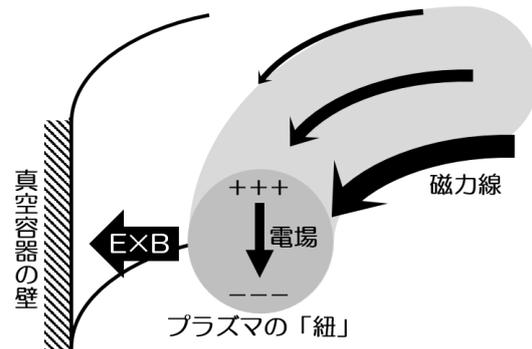


図1 プロブの概念図。磁場勾配ドリフトや曲率ドリフトにより荷電分離が生じ、プロブ内部に電場ができる。この電場によるE×Bドリフトで、プロブは壁側へ移動する。

(2) 地球の電離圏でくり広げられるオーロラ現象では、オーロラの分布を決めるマクロな電流系と、オーロラを光らせる高エネルギー電子の生成というミクロ過程が、密接にからみあっている。オーロラ電子を高エネルギーに加速する過程のトリガーとなっているのは巨視的な電流であるが、加速機構は、ミクロな電流不安定性によるものである。また、オーロラ電子によって電離圏の中性粒子が電離され、電離圏プラズマの密度が変動すると、その影響が磁気圏に伝わることも考えられる。本研究では、オーロラ現象における多階層ダイナミクスを調べるためのシミュレーションコード開発を進め、それを用いて、現象における多階層ダイナミクスの理解を目指す。

3. 研究の方法

(1) プロブ輸送におけるミクロな効果について調べるため、静電粒子モデルによる3次元プロブ輸送シミュレーションコード (図2) [雑誌論文③] の開発を進める。そして、同コードを用いて、核融合科学研究所のスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」にて、プロブ輸送のシミュレーションをおこない、輸送過程におけるミクロな効果について調べる。

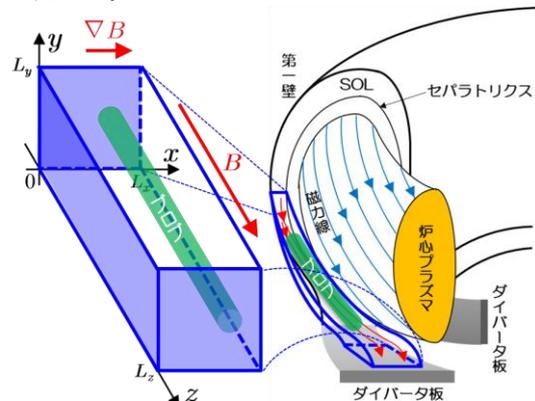


図2 プロブ輸送の3次元粒子シミュレーションの模式図。

(2) オーロラ現象における多階層ダイナミクスを解明するために開発されてきたオーロラ連結階層シミュレーションコード(図3) [引用文献③] を用いて、現象における多階層ダイナミクス、特に、オーロラ電子加速によるマイクロな効果が磁気圏に与える影響などについて調べる。

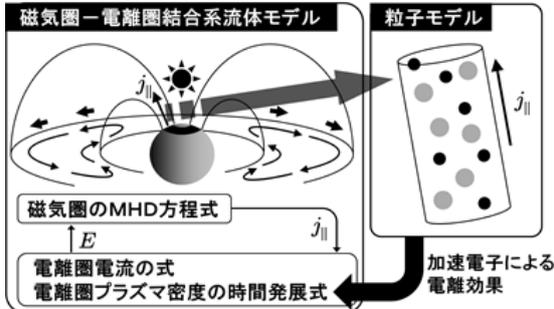


図3 オーロラ連結階層シミュレーションの模式図。流体モデルにおいて電流(j_{\parallel})が成長した領域をさがし、その領域について粒子モデルを起動する。粒子モデルによって電子加速の計算をおこない、加速電子による電離効果を、プラズマ密度増加率として流体モデルに引き渡す。

4. 研究成果

(1) ブロブ輸送について調べる際には、ブロブ内部の電流回路がどうなっているのか知ることが重要となるが、これまでの流体シミュレーションによる計算などでは、電流回路については、ある仮定に基づいたモデルを使用してきた。これは、電流回路を考える際に

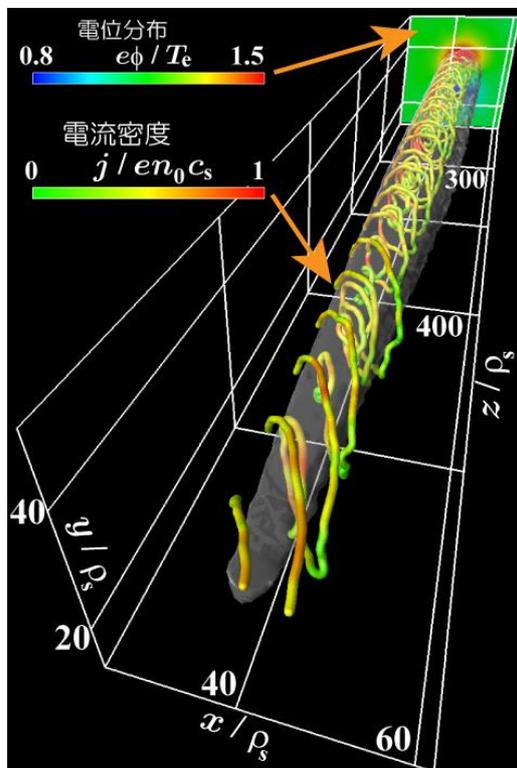


図4 3次元粒子シミュレーションで得られたブロブ内部の電流構造(渦状のカラーの太い線)。灰色の部分ブロブを表している。また、奥側のカラーマップは、電位の分布を示している。

は、プラズマ粒子が閉じ込め装置の受熱板(ダイバータ板)にぶつかる領域にできるシースと呼ばれるマイクロな電場の効果を入れる必要があるが、流体モデルのようなマクロなシミュレーションでは、シースを自己無撞着に計算できないためである。一方、本研究で用いた粒子シミュレーションモデルでは、シースも自己無撞着に計算できるため、なんら仮定に基づくことなく、電流回路を再現することが可能である。そして、本研究で行った計算により、ブロブの内部をらせん状に流れる電流系の存在を確認した(図4) [雑誌論文②]。このことは、これまで、ブロブ研究において懸案となっていた電流回路の問題が、マイクロなシミュレーションを取り入れることにより解決できることを示している。

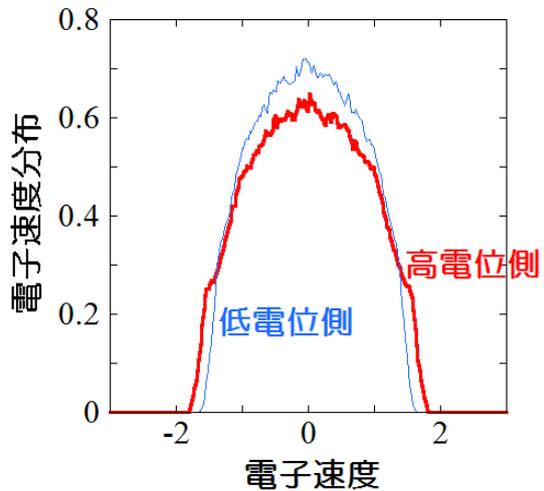


図5 ブロブ内部の高電位側における電子速度分布(赤い太線)と低電位側における電子速度分布(青い細線)。この図から、高電位側の電子温度が高いことがわかる。なお、横軸は、1が初期の電子熱速度に対応している。また、縦軸については、速度分布を積分して1となったとき、背景のプラズマ密度と同じ値に相当するようになっている。

また、ブロブ内部には、その断面において、ダイポール状の電位構造が形成されるが(図4の奥側のカラーマップ参照)、粒子シミュレーションによる計算によって、この電位構造にともない、温度についても分布構造を持つことを見出した(図5) [雑誌論文②]。この他にも、粒子運動の効果により伝播の対称性が崩れる現象 [学会発表③] や、磁場勾配が非一様なプラズマにおけるブロブ輸送の特性 [学会発表④、⑤] などについても、多くの知見を得ている。

さらに、ブロブとは逆に、背景プラズマよりも密度の低いコヒーレント構造である「ホール」構造についても、輸送シミュレーションができるようコードの改良をおこない [学会発表②]、以前より指摘があるものの具体的な数値シミュレーションによる研究がなされていないブロブ/ホール構造による不純物輸送に関して、研究を開始した [学会発表①]。

このように、本研究により、核融合周辺ブ

ラズマにおける非拡散的輸送を担うプロブ構造の輸送過程における、マイクロなダイナミクスについて、多くの知見が得られた。これにより、今後の輸送の物理機構理解の深化、周辺プラズマ制御への貢献が期待され、そして、これら知見に基づく、連結階層シミュレーションモデルの構築につながっていくものと考えられる。

(2) オーロラ連結階層シミュレーションコードによる計算により、電子加速にともなうマイクロな効果が、磁気圏-電離圏結合系におけるマクロな変動におよぼす影響について調べた結果、加速されたオーロラ電子による電離圏密度増大にともなう電離圏電場の大きな変動が磁気圏に伝わり、磁気圏における沿磁力線電流の分布に強い変動が加わること、さらに、それが間欠的に繰り返されることを見出した(図6) [雑誌論文⑥]。さらに、粒子モデルの計算結果に基づいて得られたオーロラ発光分布データをもとにしたオーロラの可視化にも成功した [雑誌論文⑤]。

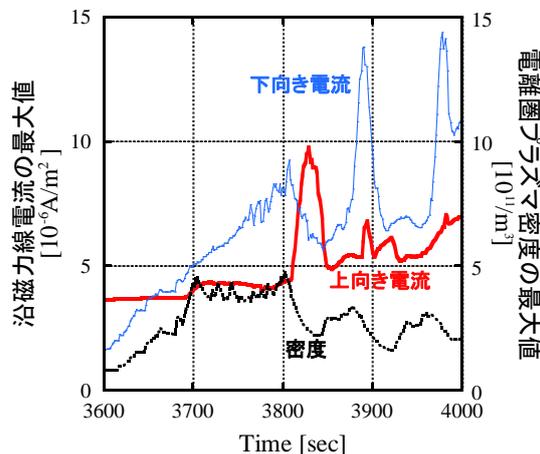


図6 オーロラ連結階層シミュレーションで得られた諸量の最大値の時間変化。赤い太線が上向き沿磁力線電流密度、青い細線が下向きの沿磁力線電流密度、黒い破線が電離圏プラズマ密度を示している。フィードバック不安定性によって強められた電流で誘起されたスーパーイオン音波ダブルレイヤーにより加速された電子が、中性粒子を電離することにより、3,600 s ~ 3,700 s あたりにかけて、電離圏プラズマ密度が大きく増加していることがわかる。その後、3,820 s あたりで、上向き電流が急激に増加している。これは、電離圏プラズマ密度の増加にともない電離圏電場が大きく減少し、その変動が磁気圏に伝播することにより、沿磁力線電流の分布に大きな変化が現れたものと考えられる。そして、このような電流の増加が、間欠的に繰り返されている。

<引用文献>

- ① T. Sato, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 16, 2005, pp. 310-316
- ② S. I. Krashennnikov et al., Journal of Plasma Physics, Vol. 74, 2008, pp. 679-717
- ③ T. Sato, H. Hasegawa, N. Ohno, Computational Science and Discovery, Vol. 2, 2009, pp. 015007-1-015007-9.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① T. Pianpanit, S. Ishiguro, H. Hasegawa, Observation of the Strong Temperature Gradient in Detached Plasma by PIC Simulation with Monte Carlo Collision, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 11, 2016, pp. 2403040-1-2403040-5, DOI: 10.1585/pfr.11.2403040
- ② H. Hasegawa, S. Ishiguro, Study of self-consistent particle flows in a plasma blob with particle-in-cell simulations, Physics of Plasmas, 査読有, Vol. 22, 2015, pp. 102113-1-102113-8, DOI: 10.1063/1.4933359
- ③ H. Hasegawa, S. Ishiguro, Particle Simulation of Plasma Blob Dynamics: Preliminary Results, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 7, 2012, pp. 2401060-1-2401060-4, DOI: 10.1585/pfr.7.2401060
- ④ 長谷川裕記、大野暢亮、佐藤哲也、オーロラ形成の連結階層シミュレーション、日本流体力学会誌「ながれ」、査読無、第30巻、2011、pp. 401-408、<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?dd=assets/files/download/noauth/nagare/30-5/30-5tokushu6.pdf>

- ⑤ N. Ohno, H. Hasegawa, T. Sato, Images of Aurora Light Based on Macro-Micro-Interlocked Simulation, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 39, 2011, pp. 2708-2709, DOI: 10.1109/TPS.2011.2159617

- ⑥ H. Hasegawa, N. Ohno, T. Sato, Response of the Magnetosphere to Microscopic Effects in Auroral Arc Formation, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 6, 2011, pp. 2401128-1-2401128-4, DOI: 10.1585/pfr.6.2401128

[学会発表] (計32件)

- ① H. Hasegawa, Impurity Transport Caused by Blob and Hole Propagations, 26th IAEA Fusion Energy Conference, October 20, 2016, 国立京都国際会館 (京都府京都市)
- ② 長谷川裕記、ホール構造伝播の粒子シミュレーション、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月20日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)

③ H. Hasegawa, Kinetic Effects on Plasma Blob Dynamics with Plasma Sheath, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 19, 2015, Savannah (United States of America)

④ H. Hasegawa, Particle Simulation of Blob Propagation in Non-Uniform grad-B Plasmas, Plasma Conference 2014, November 20, 2014, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

⑤ H. Hasegawa, Particle Simulation of the Blob Propagation in Non-Uniform Plasma, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 30, 2014, New Orleans (United States of America)

⑥ 長谷川裕記, プラズマblobにおける自発的フローと運動論的効果、プラズマ・核融合学会第30回年会、2013年12月3日、東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区)

⑦ H. Hasegawa, Configuration of Spontaneous Flows in a Plasma Coherent Structure, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 13, 2013, Denver (United States of America)

⑧ H. Hasegawa, Microscopic Dynamics of Plasma Blob, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 1, 2012, Providence (United States of America)

⑨ 長谷川裕記, 粒子シミュレーションによるblob挙動の研究、Plasma Conference 2011, 2011年11月25日、石川県立音楽堂 (石川県・金沢市)

⑩ H. Hasegawa, Particle-in-Cell Simulation of Plasma Blob Dynamics, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 15, 2011, Salt Lake City (United States of America)

[その他]

ホームページ等

<http://fps.nifs.ac.jp/activity.html>

http://www.nifs.ac.jp/lhdreport/mailinfo_264.html

<http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/230.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 裕記 (HASEGAWA, Hiroki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号： 60390639