

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05673

研究課題名(和文) 磁気リコネクションにおける電子ダイナミクスの全粒子解析研究

研究課題名(英文) Full particle analysis of electron physics in magnetic reconnection

研究代表者

銭谷 誠司 (Zenitani, Seiji)

神戸大学・都市安全研究センター・特命准教授

研究者番号：10623952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ粒子シミュレーション(PICシミュレーション)を使って、地球磁気圏の昼側境界で起きる非対称型リコネクションの性質を調べ、複雑な電子の運動が力学バランスやプラズマ混合に及ぼす影響を議論した。また、高エネルギー天体環境で期待される相対論的磁気リコネクションについて、PICデータセットをエネルギー・運動量テンソルの形で利用し、磁力線つなぎ変え領域の運動論的性質を議論した。さらに、これらのPICシミュレーションでより信頼できる結果を得るために、解析解やサブサイクリングを使って計算の根幹部を高精度化する新しい数値解法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気リコネクション系を想定して、プラズマの構成粒子の運動を逐一解き進めるPICシミュレーション研究を行った。そして、複雑な(非断熱的な)粒子運動の結果として、マクロ近似(磁気流体近似)では議論できないタイプのプラズマの性質が現れることが明らかになり、当該研究におけるPICシミュレーションの重要性が浮き彫りになった。また、本研究の過程で、PICシミュレーションを高精度化するいくつかの数値解法を提案した。これは磁気リコネクションのみならず、運動論プラズマ現象に依存する全ての研究分野に波及する成果である。

研究成果の概要(英文)：Using particle-in-cell (PIC) simulations, we have studied the electron kinetic physics in asymmetric magnetic reconnection in the Earth's magnetopause in space. We have clarified the influence of non-adiabatic electron orbits to force-balance and plasma mixing. We have also investigated kinetic properties of relativistic pair-plasma reconnection in high-energy astrophysical settings, by carefully analyzing PIC dataset in a form of energy-momentum tensors. Then we have proposed new algorithms to obtain better simulation results in PIC simulation. Our numerical solvers employ an analytic formula and a subcyclotron method in the Lorentz-force part of the particle solver.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：磁気リコネクション マグネットポーズ 非対称リコネクション 相対論リコネクション プラズマ粒子シミュレーション PICシミュレーション 数値解法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは宇宙空間のさまざまなプラズマ環境で磁気的な爆発を引き起こす物理素過程である。特に、地球周辺の宇宙空間で起きる無衝突磁気リコネクションでは、プラズマ粒子の運動論効果が複雑に作用するため、その詳細メカニズムは十分に理解されていない。リコネクションの物理を理解するために、理論・シミュレーション・実験、衛星による「その場」観測など、さまざまな手法で研究が続けられている。

磁気リコネクションの普遍性・重要性を鑑み、NASA は 2015 年に宇宙空間のリコネクション領域を直接観測する Magnetospheric Multiscale (MMS) 衛星を打ち上げた。MMS は速度分布関数などの電子の運動論的特徴を十分な解像度で観測する初めての衛星である。

MMS の観測データを理解するためには、リコネクション系の粒子ダイナミクスをプラズマ粒子シミュレーション (Particle-in-Cell; 以降、PIC と略す) を用いて、事前に理解しておく必要がある。これ自体は基礎的なテーマであるため、過去 15 年以上にわたって研究が続けられている (e.g. Hoshino et al. 2001 JGR, Hesse et al. 2014 GRL)。しかし、草創期の PIC シミュレーション研究は解像度が不足している。一方、近年のシミュレーション研究ではデータが巨大化しすぎたため、個々の粒子データに目を向けておらず、過去の議論が適用できるかどうか自明ではなかった。

こうした中、研究代表者は、現代の PIC シミュレーションで大量の粒子データを出力して、丁寧に個々の粒子運動を辿る「プラズマ粒子の全軌道解析」研究を立ち上げた。その第一弾として、基本タイプのリコネクション系で粒子軌道をサーベイし、さまざまな新タイプの粒子軌道を発見した (Zenitani & Nagai 2016 *Phys. Plasmas*)。これを契機に、PIC の大量の粒子データを丁寧に解析して、新たな知見を引き出す研究の必要性が高まってきた。

2. 研究の目的

本研究は、PIC シミュレーションの大量の粒子データセットを活用する解析を行い、磁気リコネクション系での電子ダイナミクスを理解することを目的とする。具体的には、以下の 3 タイプの新しい解析手法を開発し、その有効性を検証する。

(1) プラズマの混合の定量化。磁気リコネクションは、2 つの上流領域からやってきたプラズマが混じり合う混合過程でもあるため、粒子の軌道データを活用して、プラズマ (特に電子) の混合度合いを定量評価する方法を開発する。

(2) MMS 衛星が観測する電子の速度分布関数の背景物理の理解。速度分布関数を構成する粒子の履歴データから、特徴的な分布関数の成因を解明する。

(3) その他、大量の粒子データを活かした解析手法を模索し、将来のシミュレーション研究に役立てる。

3. 研究の方法

地球磁気圏の昼側境界で、強い地球磁場と弱い太陽風磁場との間で起きる「非対称磁気リコネクション」問題を数値モデル化して 2 次元の PIC シミュレーションを実行する。そして、系の基礎的な性質を調べるとともに、計算途中の粒子データを大量に出力して粒子軌道をフルに再現して、詳細な解析・検討を行う。次に「研究目的」項で述べた、大量の粒子データセットを活用する新たな解析手法を導入して、それぞれの有効性を検証する。そして、その解析結果を踏まえて、運動論リコネクションの一般的な性質を総合的に議論する。

4. 研究成果

PIC シミュレーションを使って、地球磁気圏の昼側境界で起きる非対称タイプの磁気リコネクションの基本的な性質を調べた (図 1)。粒子軌道データを解析して、磁力線の繋ぎかえ領域で観測される「三日月」型の電子速度分布関数がメアングリング運動という運動の結果であることを示し、その条件を議論した (図 1b; 研究目的 2)。次に、磁力線が大きく曲がった領域で粒子が非断熱的タイプの軌道を通るため、プラズマの電磁流体条件 (正確には電子の理想条件) が大きく変わることを突き止めた (図 1c)。プラズマ混合電子の混合状態を定量化する理論指標 (Finite-Time Mixing Fraction) を提案し、磁力線の繋ぎかえ領域で効率的な電子混合が起きることを示した (図 1d; 研究目的 1)。電子の速度分布関数の運動論的エントロピーがリコネクション系を議論する指標になることもわかってきた (研究目的 3)。

一方、高エネルギー天体環境で期待される相対論的磁気リコネクションについて PIC シミュレーションを行い、粒子データセットをエネルギー・運動量テンソルの形で利用して、磁力線繋ぎかえ領域の運動論的性質を議論した (研究目的 3)。

また、これらの PIC シミュレーションでより信頼できる結果を得るために、解析解を使って計算の根幹部を高精度化する数値解法を考案した。さらに、標準的な数値解法の計算手順 (図 2a) を、時間刻みを細かくして複数回繰り返す高精度数値解法 (図 2b) を考案した。

加えて、磁気リコネクション系の大局的な性質に関する理論・シミュレーション研究を行い、

プラズマの圧縮性やプラズマ分布関数の非等方性がもたらす効果を議論した。

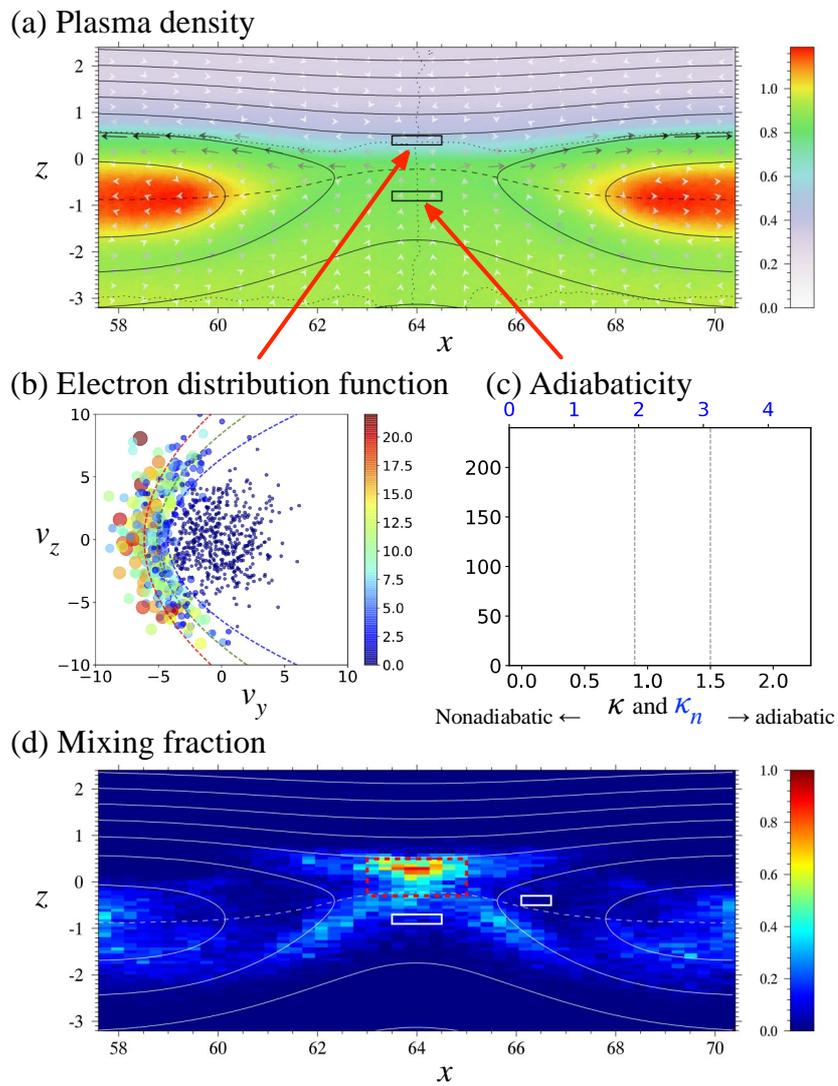
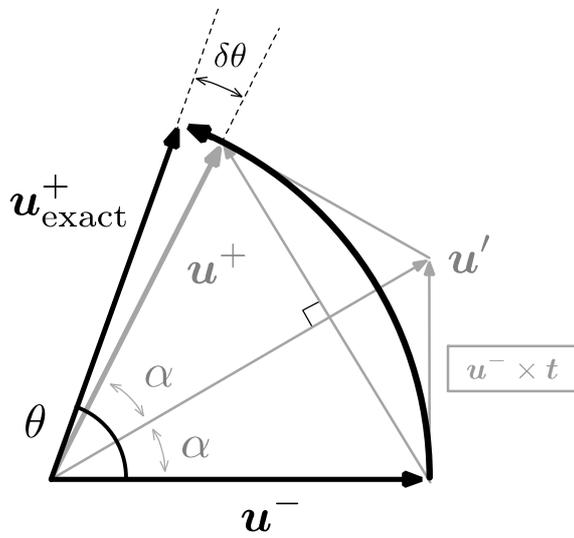
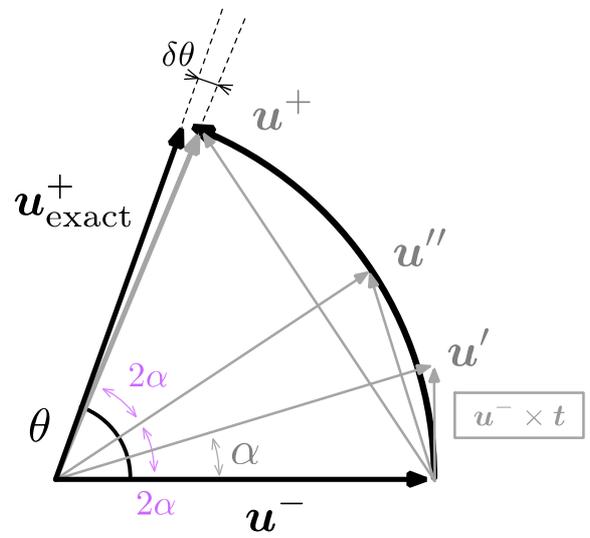


図 1 非対称磁気リコネクションの PIC シミュレーション結果： (a) 全体構造、(b) 領域内の電子の速度分布関数、(c) 領域内の電子の「断熱パラメーター」のヒストグラム、(d) 電子混合関数 を示す。(Zenitani et al. 2017 *J. Geophys. Res.*)



(a) Boris solver



(b) Double Boris solver

図2 PICシミュレーションの粒子計算部の数値解法：(a) 標準解法、(b) 新解法
(Zenitani & Kato 2020, *Comput. Phys. Commun.*)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Seiji Zenitani, Tsunehiko N. Kato	4. 巻 247
2. 論文標題 Multiple Boris integrators for particle-in-cell simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 106954 ~ 106954
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2019.106954	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seiji Zenitani, Takahiro Miyoshi	4. 巻 894
2. 論文標題 Plasmoid-dominated Turbulent Reconnection in a Low- Plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab8b5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yosuke Matsumoto, Yuta Asahina, Yuki Kudoh, Tomohisa Kawashima, Jin Matsumoto, Hiroyuki R. Takahashi, Takashi Minoshima, Seiji Zenitani, Takahiro Miyoshi, Ryoji Matsumoto	4. 巻 71
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic simulation code CANS+: Assessments and applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wai-Leong Teh, Seiji Zenitani	4. 巻 885
2. 論文標題 Thermodynamic Properties of Mirror Structures in the Magnetosheath: MMS Observations and Double-polytropic MHD Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wai-Leong Teh, Seiji Zenitani	4. 巻 890
2. 論文標題 Thermodynamics of Dipolarization Fronts of Magnetic Reconnection in Anisotropic Plasma: MMS Observations and Resistive Double-polytropic MHD Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6d6b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Zenitani and T. Umeda	4. 巻 25
2. 論文標題 On the Boris solver in particle-in-cell simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5051077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Hosseinpour, Y. Chen, and S. Zenitani	4. 巻 25
2. 論文標題 On the effect of parallel shear flow on the plasmoid instability	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5061818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Shimizu, K. Kondoh, and S. Zenitani	4. 巻 24
2. 論文標題 Numerical MHD study for plasmoid instability in uniform resistivity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4996249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 銭谷誠司	4. 巻 13
2. 論文標題 衝撃波対応コードを用いた磁気リコネクションの磁気流体シミュレーション研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 生存圏研究	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 銭谷誠司・加藤恒彦	4. 巻 14
2. 論文標題 相対論的プラズマ粒子シミュレーションのための粒子計算アルゴリズム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生存圏研究	6. 最初と最後の頁 62-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seiji Zenitani, Hiroshi Hasegawa, and Tsugunobu Nagai	4. 巻 122
2. 論文標題 Electron dynamics surrounding the X line in asymmetric magnetic reconnection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 7396-7413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA023969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seiji Zenitani	4. 巻 60
2. 論文標題 Dissipation in relativistic pair-plasma reconnection: revisited	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 14028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aa8f17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. K. M. Nakamura, S. Eriksson, H. Hasegawa, S. Zenitani, W. Y. Li, K. J. Genestreti, R. Nakamura, and W. Daughton	4. 巻 122
2. 論文標題 Mass and energy transfer across the Earth's magnetopause caused by the vortex-induced reconnection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 11505-11522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA024346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Hiroshi Hasegawa, Tsugunobu Nagai
2. 発表標題 Asymmetric magnetic reconnection at the dayside magnetopause
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Tsunehiko Kato, Takayuki Umeda
2. 発表標題 Boris-type particle solvers in particle-in-cell (PIC) simulation
3. 学会等名 26th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Tsunehiko Kato, Takayuki Umeda
2. 発表標題 Boris-type particle solvers in particle-in-cell (PIC) simulation
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Tsunehiko Kato
2. 発表標題 Multiple Boris integrators for particle-in-cell simulation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 銭谷 誠司、加藤 恒彦
2. 発表標題 プラズマ粒子シミュレーションのための多重 Boris 解法の提案
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Electron Particle Dynamics in Collisionless Magnetic Reconnection
3. 学会等名 The 13th International School / Symposium for Space Simulations (ISSS-13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Zenitani, H. Hasegawa, and T. Nagai
2. 発表標題 Electron physics near the X-line in asymmetric magnetic reconnection
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Reconnecting the dots: Particle dynamics in magnetic reconnection
3. 学会等名 Max-Planck Princeton Center for Plasma Physics (MPPC) Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Advances in numerical modeling of relativistic magnetic reconnection
3. 学会等名 2017 European Physical Society - Plasma Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Electron particle dynamics in collisionless magnetic reconnection
3. 学会等名 7th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW-7) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Electron particle dynamics in collisionless magnetic reconnection
3. 学会等名 IAPSO-IAMAS-IAGA scientific assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seiji Zenitani
2. 発表標題 Electron particle dynamics in collisionless magnetic reconnection
3. 学会等名 AAPPS-DPP2017 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Hiroshi Hasegawa, and Tsugunobu Nagai
2. 発表標題 Electron dynamics surrounding the X line in asymmetric magnetic reconnection
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seiji Zenitani, Hiroshi Hasegawa, and Tsugunobu Nagai
2. 発表標題 Electron dynamics surrounding the X line in asymmetric magnetic reconnection
3. 学会等名 Fundamental Physical Processes in Solar-Terrestrial Research and Their Relevance to Planetary Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----