

## On the kinetic nature of Dipolarization fronts

\*Haoyu Lu

A non-ideal MHD model including Hall and finite Larmor radius (FLR) effects was used to reproduce the dipolarization fronts (DFs) produced by the interchange instability in the magnetotail. Numerical results indicate that Hall effect on the scale of inertial length determines the distributions of electric field and its ingredients at DFs. The inclusion of FLR effect would cause a clear asymmetry and downward drifting of the DF structure, which is attributed to the ion diamagnetic velocity. In addition, it also causes to alter the direction of the high-speed flow nearby the DF.

Keywords: dipolarization fronts, interchange instability, Hall effect, FLR effect, simulation

Landau resonant acceleration of relativistic electrons by whistler mode waves at oblique angles

Landau resonant acceleration of relativistic electrons by whistler mode waves at oblique angles

\*HSIEH Yikai<sup>1</sup>、大村 善治<sup>1</sup>

\*Yikai HSIEH<sup>1</sup>, Yoshiharu Omura<sup>1</sup>

1.京都大学生存圏研究所

1.Reserach Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

We perform test particle simulations of relativistic electrons interacting with whistler-mode waves propagating from magnetic equator at oblique angles in this study to reveal the acceleration processes of electrons in radiation belt. First we demonstrated the validity of gyro-averaging method, which solved the equations of motion of relativistic electrons with oblique propagated whistler-mode waves. In a simulation, initial distribution of kinetic energy and equatorial pitch angle are set to be a delta function, and the location of electrons are set to be different along a magnetic field line. Following the trajectories of electrons, we obtain the numerical Green's function of evolution of kinetic energy and equatorial pitch angle. We have computed several cases with energy ranges from 50 keV -2 MeV, and equatorial pitch angle ranges from 20°-70° for both parallel and oblique propagating waves. By analyzing the trajectories and Green's functions of electrons, we understand that the accelerated mechanism under Landau resonance, which appear in oblique whistler-mode wave-particle interactions but not in parallel waves, is very different from n=1 cyclotron resonance. Furthermore, by comparing the efficiency of acceleration in parallel propagating cases and oblique propagating cases at different energy ranges covering the MeV electrons, we found that MeV electrons are accelerated with remarkable efficiency through n=0 resonance.

キーワード：ホイッスラーモード波、斜め伝搬、相対論的電子

Keywords: whistler-mode waves, oblique propagation, relativistic electrons



## 広帯域静電ノイズ低周波成分に関する3次元電磁粒子シミュレーション

3D Electromagnetic Particle Simulations about the Low Frequency Component of BEN based on statistical analysis of EFD data

\*佐治 昌哉<sup>1</sup>

\*Masaya Saji<sup>1</sup>

1. 富山県立大学大学院工学研究科

1. Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University

これまでに、BENの低周波成分が、その高周波成分であるESWと同様にビーム不安定性の非線形発展の結果励起されるという仮定に基づき、ビーム不安定性からの低周波波動励起に関する2次元粒子シミュレーションを行った。その結果、磁場に垂直方向のイオン温度と低周波波動との関係は見られたが、ビーム不安定性とBENの低周波成分との明確な関係は確認できなかった。そこでGeotail衛星に搭載されている電界検出器（EFD）によって観測されたBENの低周波成分について統計解析を行い、BENの発生しやすい磁場強度とイオン密度・イオン温度の関係を調査した。しかし、観測頻度による解析では明確な関係を確認できなかった。そこでBENの低周波成分が多く観測されているPSBL領域を想定して解析を行った。結果、BEN低周波成分は磁場強度とイオン密度が共に高い、もしくは共に低いという2種類の条件でBENの低周波成分が発生しやすいことがわかった。この結果に基づいて、PSBL領域の環境を再現した3次元電磁粒子シミュレーションを行い、BENの低周波成分の生成メカニズムを明らかにしていく

ILE無衝突衝撃波実験におけるフォアショック不安定性の仮想協同トムソン散乱計測  
Virtual collective Thomson scattering measurement of foreshock instabilities in  
collisionless shock experiment at ILE

\*香月 のどか<sup>1</sup>、松清 修一<sup>1</sup>、羽田 亨<sup>1</sup>

\*Nodoka Katsuki<sup>1</sup>, Shuichi Matsukiyo<sup>1</sup>, Tohru Hada<sup>1</sup>

1.九州大学総合理工学研究院

1.Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences Kyushu University

宇宙ではしばしば無衝突衝撃波が観測される。衝撃波近傍の非平衡プラズマの緩和過程は複雑であり、その詳細はよく理解されていない。近年、高強度レーザーを用いて無衝突衝撃波を実験室に再現できるようになってきた。我々は大阪大学レーザーエネルギー学研究所(ILE)との共同実験により、無衝突衝撃波実験を行っている。実験で再現される衝撃波の遷移層構造を計測するのに、協同トムソン散乱計測を用いている。比較的low周波の電磁波がプラズマ電子の集団運動によって散乱される現象(協同トムソン散乱)を利用したもので、散乱光の特徴から、電子密度、電子およびイオンの温度、イオン価数、などの諸量を、プローブ光経路に沿った位置の関数として見積もることができる。プラズマが平衡状態に近い場合、Langmuir波とイオン音波が散乱体となって、それぞれ電子光、イオン光と呼ばれる散乱光スペクトルのピークが得られることが知られている。一方、非平衡プラズマにおける協同トムソン散乱はこれまであまり研究されておらず、その理論的整備は遅れている。無衝突衝撃波では、衝撃波上流(フォアショック)にしばしばビームが形成され、ビーム不安定性が起こる。平衡プラズマでは、通常電子光強度は弱いため検出が難しいとされているが、非平衡プラズマでは、ビーム不安定性により電子光が増幅される可能性がある。そのため、ILEでの実験において電子光計測が計画されている。

実験結果の解釈には数値実験が不可欠である。従来、プラズマの第一原理計算法として

PIC(Particle-In-Cell)計算が知られている。PIC計算では、さまざまな非平衡プラズマ現象を自己無撞着に再現できる。しかし、通常のPIC計算で想定されている時間分解能では、高周波の協同トムソン散乱までを実パラメータで再現することはできない。ここでは、PIC計算で再現したプラズマ密度揺動のデータをもとに、散乱波の波動方程式を別途解くことで、実パラメータのもとで協同トムソン散乱を再現する数値実験システムを構築し、実験結果との直接比較に備える。ILE実験での典型的なパラメータ域に対して、フォアショックの電子ビーム不安定性を想定した場合の数値実験を行い、電子光スペクトルが増幅されることを確認した。発表では、さらにさまざまなビーム-プラズマ系を考え、各場合のTSスペクトルの特徴を精査する。

キーワード：無衝突衝撃波、非平衡プラズマ、協同トムソン散乱

Keywords: Collisionless shock, Non-equilibrium plasma, Collective Thomson scattering

## 惑星磁気圏におけるコーラス放射発生過程の計算機実験

## Simulation study of whistler-mode chorus in planetary magnetospheres

\*加藤 雄人<sup>1</sup>、深沢 圭一郎<sup>2</sup>\*Yuto Katoh<sup>1</sup>, Keiichiro Fukazawa<sup>2</sup>

1.東北大学大学院理学研究科、2.京都大学学術情報メディアセンター

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

惑星磁気圏に共通して観測されるプラズマ波動として、周波数が時間的に変化するコヒーレントな波動であるホイッスラーモード・コーラス放射が挙げられる。コーラス放射は惑星磁気圏の磁気赤道領域を発生源として、keV帯の高エネルギー電子との非線形波動粒子相互作用によって生成されることが明らかとなっている[e.g., Katoh and Omura, GRL 2007a]。さらに、コーラス放射の発生過程では、相対論的な高エネルギー電子を作り出す非断熱加速過程も同時に生じることが、近年の計算機シミュレーションにより明らかとなった[Katoh and Omura, GRL 2007b; Katoh et al., Ann. Geophys. 2008]。近年では、磁気嵐回復相における地球放射線帯外帯電子の加速過程においてコーラス放射が重要な役割を果たすとされ、また、木星放射線帯の形成過程においてもコーラス放射の重要性が指摘されている[e.g., Horne et al., Nature Physics, 2008; Katoh et al., JGR 2011]。

一方で、スペクトル特性と相対論的電子加速過程との関連や、探査機による観測結果に見られる惑星磁気圏ごとのスペクトルの違いについては、未解明の問題が多く残されている。木星は太陽系最大の磁気圏と放射線帯を有しているが、コーラス放射の波動強度は地球磁気圏のコーラス放射よりも一桁以上小さいことが明らかとなっている[e.g., Katoh et al., JGR 2011]。どのような環境で相対論的電子が高効率に作り出されるかを理解する上で、コーラス放射の波動特性がどのように決定されるのかを理解する事は重要である。

本研究は惑星磁気圏でのコーラス放射の波動特性を理解する事を目的として、惑星磁気圏の構造を解くMHDコードと、磁力線上を運動する高エネルギー電子とプラズマ波動との相互作用を解く電子ハイブリッドコードとを用いた連成計算機実験を実施する。コーラス放射の波動特性は、磁力線に沿った背景磁場の空間勾配と、波動の励起エネルギー源であるkeV電子の速度分布関数とによって大きく変化する事が電子ハイブリッドコードを用いた計算機実験により明らかとなっている。この知見に基づき、木星磁気圏においてGalileo探査機によりコーラス放射の発生が同定されている5-20木星半径の領域を対象として、MHDシミュレーションにより背景磁場の空間勾配の変動範囲を同定し、さらに同定された背景磁場構造を初期条件として電子ハイブリッドコードを用いたシミュレーションにより、コーラス放射の発生条件とその波動特性を明らかにする。

キーワード：ホイッスラーモード・コーラス放射、惑星磁気圏、計算機実験

Keywords: whistler-mode chorus, planetary magnetosphere, numerical experiments

レイリー・テイラー不安定性のブラソフシミュレーション  
Vlasov simulation of the Rayleigh-Taylor instability

\*和田 泰尚<sup>1</sup>、梅田 隆行<sup>1</sup>、町田 忍<sup>1</sup>

\*Yasutaka Wada<sup>1</sup>, Takayuki Umeda<sup>1</sup>, Shinobu Machida<sup>1</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所

1.Institute for Space-Earth Environmental Research

The Rayleigh-Taylor instability (RTI) develops at an interface between two fluids with different densities when an external force is applied from a heavy fluid to a light fluid. The RTI is seen as a secondary instability of the Kelvin-Helmholtz instability taking place at the magnetopause. The spatial scale of the secondary RTI is on the ion inertial scale or ion gyro scale where non-MHD effects are important. In the previous studies of ideal MHD simulations, the RTI develops symmetrically in the horizontal axis. On the other hand, previous hall-MHD and Finite-Larmor-Radius (FLR)-MHD simulations have shown that the RTI develops asymmetrically in the horizontal axis. In this study, basic processes of non-MHD scale RTI are of interest. We perform four-dimensional Vlasov simulations of the RTI with two spatial dimensions and two velocity dimensions. We vary the ratio of the ion inertial length and/or the ion gyro radius to the spatial scale of the density gradient layer, and discuss the effect of the non-MHD effects on the linear growth and nonlinear development of the RTI.

キーワード：宇宙プラズマ、レイリー・テイラー不安定性、ブラソフシミュレーション

Keywords: Space Plasma, Rayleigh-Taylor instability, Vlasov simulation

## Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks

## Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks

\*柴山 拓也<sup>1</sup>、草野 完也<sup>1</sup>、三好 隆博<sup>2</sup>、中坊 孝司<sup>1</sup>、Grigory Vekstein<sup>3</sup>

\*Takuya Shibayama<sup>1</sup>, Kanya Kusano<sup>1</sup>, Takahiro Miyoshi<sup>2</sup>, Takashi Nakabou<sup>1</sup>, Grigory Vekstein<sup>3</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.広島大学大学院理学研究科物理科学専攻、3.University of Manchester  
1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.Department of Physical Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 3.University of Manchester

磁気リコネクションは反平行成分を持つ磁力線同士のつなぎかえ過程であり、磁場に蓄えられた磁気エネルギーをプラズマの運動エネルギーや熱エネルギー、粒子の運動エネルギーなどに変換することで短時間に大きなエネルギーを解放することができる。太陽フレアや磁気圏サブストーム、トカマクディスラプションにおけるエネルギー解放はこの磁気リコネクションによって引き起こされていると考えられている。さらには様々な天体物理現象においても磁気リコネクションは重要な役割を果たしていると考えられている。

磁気流体力学(MHD)近似を用いた磁気リコネクション理論の大きな問題の一つは宇宙プラズマや実験室プラズマの観測に比べてリコネクションによるエネルギー変換効率がはるかに低いことである。この「リコネクションの高速化問題」を解決する可能性があるMHDリコネクション理論として近年注目されているのがプラズモイド(磁気島)の発生を伴う高速化理論であるが、プラズモイド生成によりリコネクションが高速化する理由は未だ十分に解釈されていない。

本研究では大規模数値実験を用いてプラズモイドの生成によるリコネクション高速化メカニズムの解明に取り組んだ。はじめに、リコネクションをおこす電流層全体を含む大きな系での時間発展を再現するグローバルモデル数値実験を行った。これによりプラズモイド生成による高速化が起こる際に局所的にペチェックタイプと呼ばれる、衝撃波を持つリコネクション領域構造が繰り返し出現していることを明らかにした。次に、ペチェックタイプの構造が出現した部分の物理状態をモデル化したローカルモデル数値実験を行った。これによりペチェックタイプの構造が出現するための条件を明らかにした。その条件とは反並行の磁力線の境界面に沿ってプラズマ流が存在するという条件であり、この速度場の中でプラズモイドが成長することで磁気拡散領域の構造に制限を与え、ペチェックタイプの高速リコネクションが実現すると考えられる。

本発表では、以上の数値実験によって得られた知見をもとにプラズモイドの発生に伴うリコネクション高速化理論である「動的ペチェックリコネクションモデル」を提案する。ペチェックタイプ構造の形成に必要な境界面に沿ったプラズマ流はグローバルモデルの時間発展においてプラズモイドの形成以前に起こっていたリコネクションのアウトフローによって自発的に形成する。そのため本モデルはリコネクション領域の自己無撞着な発展の結果として高速化を説明できる。また、プラズモイドの生成、衝突に伴ってこのようなりコネクション領域が繰り返し形成することで本理論による高速リコネクションは非常に激しい時間変動をする。太陽フレアの観測からもこのような短周期の時間変動の存在が示唆されており、本理論はそれらの観測事実とも整合する。さらに、本理論に基づくと磁気拡散領域周辺には衝撃波構造が形成するが、これは太陽フレアに伴って生成する高エネルギー粒子の加速が行われる場所として有力な候補となる。

本研究の成果の一部はPhysics of Plasmas誌に学術論文として掲載されている(Shibayama et al. (2015), Physics of Plasmas, 22, 10, 100706)。

キーワード：磁気リコネクション、磁気流体力学シミュレーション、太陽フレア

Keywords: Magnetic reconnection, MHD simulation, Solar flare



## 磁気流体力学方程式に対する高次精度重み付きコンパクト差分法

## Higher-order weighted compact nonlinear scheme for magnetohydrodynamics

\*三好 隆博<sup>1</sup>、簗島 敬<sup>2</sup>、松本 洋介<sup>3</sup>\*Takahiro Miyoshi<sup>1</sup>, Takashi Minoshima<sup>2</sup>, Yosuke Matsumoto<sup>3</sup>

1. 広島大学大学院理学研究科、2. 海洋研究開発機構数理科学・先端技術研究分野、3. 千葉大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Hiroshima University, 2. Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Chiba University

様々な宇宙・天体プラズマ現象において、磁気流体力学（MHD）的な強い衝撃波と強い乱流の複雑な相互干渉が本質的に重要な役割を果たしていると考えられる。これまでに、衝撃波などの様々な不連続を数値振動なく鋭く解像できる数々の近似リーマン解法が精力的に開発されてきた。特に、Miyoshi and Kusano [1]によって提案されたHLLD近似リーマン解法は、高解像度、高効率、かつロバストなMHD数値解法として、様々なMHDソフトウェアパッケージの標準的な基礎解法として広く採用されている。一方、乱流を数値的に取り扱うためには、基礎解法の高次精度化が不可欠である。MHDに対しては、MUSCL、WENO、またはMP5などの数値振動を抑制する非線形の変数補間を用いた高次精度有限体積法がよく用いられる[2,3,4]。しかし、一般に多次元有限体積法の高次精度化は容易でなく、実際の多次元物理計算において高次精度化が達成される保証はない。

そこで本研究では、多次元化の容易な有限差分法に基づき高次精度MHD数値解法を構築する。特に、近似リーマン解法と組み合わせて衝撃波捕獲が可能となる重み付きコンパクト差分法（Weighted Compact Nonlinear Scheme: WCNS）[5,6]を採用し、多次元MHDに対する高次精度衝撃波捕獲法を開発する。WCNSは、重み付きの変数補間によって評価される高次精度数値流束と高次精度中心差分から構成される。本研究では、5次精度数値流束と4次または6次の中心差分で構成されるWCNSについて比較数値実験を行い、WCNSの有効性を示した。また、数値的な磁場発散の生じない多次元MHDに対するWCNSについても検討を行った。

[1] T. Miyoshi, K. Kusano, J. Comput. Phys., 208, 315, 2005.

[2] A. G. Kritsuk, et al., Astrophys. J., 737:13, 2011.

[3] T. Minoshima, et al., Astrophys. J., 808:54, 2015.

[4] <http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/cans/>

[5] X. G. Deng, H. Zhang, J. Comput. Phys., 165, 22, 2000.

[6] T. Nonomura, K. Fujii, Comput. Fluids, 85, 8, 2013.

キーワード：磁気流体力学、重み付きコンパクト差分法、近似リーマン解法

Keywords: MHD, WCNS, approximate Riemann solver