

## 高粘性プラズマにおける磁気リコネクション Magnetic reconnection in viscosity-dominated plasmas

震島 敬<sup>1\*</sup>; 今田 晋亮<sup>2</sup>; 三好 隆博<sup>3</sup>  
MINOSHIMA, Takashi<sup>1\*</sup>; IMADA, Shinsuke<sup>2</sup>; MIYOSHI, Takahiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科物理学専攻

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>3</sup>Department of Physical Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

Magnetic reconnection is essentially multi-scale phenomenon. From fully kinetic to magnetohydrodynamic (MHD) scales, a wide variety of models are utilized to identify triggering mechanisms for fast reconnection. The so-called GEM reconnection challenge has compared numerical simulations with fully kinetic (Particle-In-Cell), partly kinetic (Hybrid and Hall-MHD), and conventional resistive MHD models under the same initial condition, and it has shown that only the MHD model cannot achieve fast reconnection (Birn et al. 2001). This result indicates that kinetic effects are the essential physics and the resistive MHD is insufficient to model fast reconnection.

There are several kinetic effects proposed for the candidate to trigger fast reconnection, such as the Hall effect, the dispersion of whistler waves, the electron inertia and pressure anisotropy. We particularly focus on a two-scale structure in the diffusion region. In the fully kinetic model of electron-ion plasmas, the diffusion region is composed of a thinner electron diffusion region embedded in a thicker ion diffusion region. We hypothesize that fast reconnection may be triggered even in the MHD model if it attains a two-scale diffusion region like the kinetic model. Since the ion and electron diffusion regions are respectively measured as the vortex and current sheet, the two-scale diffusion region may be observed in the visco-resistive MHD with the viscosity larger than the resistivity (i.e., magnetic Prandtl number is larger than unity). However, this is not expected in conventional MHD simulations because they often use only the resistivity and ignores the viscosity (i.e., magnetic Prandtl number is almost zero).

Then, we perform two-dimensional visco-resistive MHD simulations of magnetic reconnection in viscosity-dominated plasmas. A simple Harris sheet configuration with uniform viscosity and resistivity is assumed as an initial configuration. When the viscosity is sufficiently high, the two-scale structure of thicker vortex and thinner current sheet is observed in the diffusion region, and subsequently, the diffusion region begins to thin down. The thinning speed increases with decreasing the thickness, implying that the thinning is driven by the viscous vortex motion. The vortex originates from the viscous heating at the downstream. High viscosity immediately dissipates and opens the outflow jet, thus tends to localize the diffusion region. We observe the upstream propagation of rarefaction waves, which accelerate the plasma toward the diffusion region. As a result, the current sheet in the visco-resistive MHD model becomes much thinner than in the resistive MHD model. Explosive reconnection is expected in the visco-resistive MHD. Since the magnetic Prandtl number is estimated to be much larger than unity in hot and tenuous astrophysical plasmas (e.g., stellar corona and active galactic nuclei disks), our result indicates the importance of the visco-resistive MHD against the conventional resistive model.

キーワード: 磁気流体力学, 磁気リコネクション

Keywords: magnetohydrodynamics (MHD), magnetic reconnection

## GPUを用いた非対称磁気リコネクションの数値計算 Numerical simulation of asymmetric reconnecton with GPU

淵田 泰介<sup>1\*</sup>  
TAISUKE, Fuchida<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学大学院理工学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering

磁気リコネクションは地球磁気圏における重要な素過程の一つとして受け入れられている。特に非対称な磁気リコネクションは対称なものよりも一般的であり、太陽表面におけるアネモネ型フレアや、地球前面で起こる FTE などの解明に重要である。しかし、未だ未解決な問題の多い現象でもある。我々は、MHD 方程式を基礎方程式とした数値計算を行うことで非対称磁気リコネクションを理解することを目指している。

本研究では GPU を用いた並列化 (GPGPU) を行い、計算の高速化を図っている。現在は GPU デバイスを一つのみ稼働させて並列実行させているが、今後複数の GPU デバイスを用いた並列計算を行う予定である。この際問題になるのが CPU-GPU 間の通信速度の遅さである。複数の GPU デバイスで並列化を行う場合、計算領域を分割し各領域に GPU を割り当てて計算を行うこととなる。GPU は自分の計算に必要な値をそれぞれの Device Memory 内に保持している必要がある。そのため各計算領域の接する部分でデータのやり取りを行う必要があるが、GPU デバイス間で直接通信を行うことは出来ないため、CPU を経由してデータの転送を行わなければならない。ここで CPU-GPU 間の通信が発生し、この部分がボトルネックとなって GPU 内での並列計算が高速に行われても全体として処理速度を向上することができなくなる。そこで、CPU-GPU 間の通信を GPU の計算中に行い、低速な通信を隠蔽するようなメソッドを考え、コーディングした。

さらに、GPU 並列化を行ったコードを用いて先行研究である Cassak&Shay(2007) との定性的、定量的な比較を行った。この論文では非対称なリコネクションが起こった際、リコネクションポイントが弱磁場側に移動することが示されており、本計算結果でもそれを確認した。

キーワード: 非対称磁気リコネクション, GPGPU, 並列計算  
Keywords: asymmetric reconnection, GPGPU, parallel calculation

## 無衝突磁気リコネクションのMHDスケールダイナミクス An MHD-scale dynamics of collisionless magnetic reconnection

藤本 桂三<sup>1\*</sup>; 高本 亮<sup>2</sup>  
FUJIMOTO, Keizo<sup>1\*</sup>; TAKAMOTO, Makoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台理論研究部, <sup>2</sup>Max-Planck-Institut für Kernphysik  
<sup>1</sup>Division of Theoretical Astronomy, NAOJ, <sup>2</sup>Max-Planck-Institute for Nuclear Physics

We usually believe that an MHD-scale dynamics can be adequately described with the MHD approximation. However, this idea is not always straightforward in collisionless plasmas, where the time scale of thermal relaxation is much larger than that of phenomena of interest. The present study considers this problem for magnetic reconnection.

Magnetic reconnection is an explosive energy converter from the magnetic field energy into plasma kinetic energy. The reconnection processes are believed to play a key role in energetic phenomena in space such as geomagnetic substorms, solar flares, and the generation of the pulsar wind. One of the main issues in reconnection has been the mechanism that enables fast energy release in a realistic time scale. Since the reconnection processes give rise to a MHD-scale dynamics, a lot of reconnection models have been developed historically in the MHD framework. One of the most promising models is the Petschek model suggested in 1964. The Petschek model provides a fast reconnection in a wide range of plasma conditions (leading to magnetic Reynolds number). The key assumptions of the model are a compact diffusion region localized in the vicinity of the x-line and a pair of the switch-off slow shocks extending from the x-line. The compact diffusion region is necessary to keep the reconnection rate high, avoiding the current sheet from elongation. Most part of the plasma is accelerated at the slow shocks, which allow the energy conversion in a broad area downstream the x-line. Although the Petschek model has been demonstrated by the MHD simulations under certain setups, the model has not been accepted. In fact, the dynamical behavior of reconnection depends significantly on the resistivity model in the MHD simulations, and clear slow mode shocks have merely been observed in geomagnetosphere.

To assess the MHD reconnection model, the present study has performed huge-scale particle-in-cell (PIC) simulations with the help of the adaptive mesh refinement (AMR). The simulation domain extends to more than 600 ion inertia length in the outflow direction with a large ion-to-electron mass ratio and an open boundary condition. We believe that the system size is sufficiently large to describe the MHD-scale dynamics of reconnection. After a long-time evolution, we find that a long current layer is formed in the exhaust, which is reminiscent of the Sweet-Parker reconnection model. However, the magnetic dissipation takes place only around the x-line, so that the reconnection rate remains high as in the Petschek model. The transient region formed around the field line separatrix almost satisfies the Rankine-Hugoniot relation for the slow mode shock. However, we found that no plasma acceleration occurs in the transient region. Instead, the ions are accelerated in the current layer through the Speiser motions, while the electrons gain the energy in the Hall region from the reconnection electric field. Therefore, the plasma acceleration mechanism in collisionless reconnection is different clearly from that in the Petschek model. The decoupling motions between the ions and the electrons generate the Hall current even far downstream the x-line. Thus, the dynamics in the exhaust is not able to be described in the MHD framework. The present study suggests that magnetic reconnection is an MHD-scale phenomenon, but the MHD approximation is not adequate in collisionless plasmas.

Keywords: magnetic reconnection, particle-in-cell simulation, MHD-scale dynamics, plasma acceleration

## 高精度 MHD 計算を用いた高速磁気リコネクションの研究 Study of fast magnetic reconnection by using newly high resolution MHD scheme

小川 匡教<sup>1\*</sup>  
OGAWA, Masanori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

磁気リコネクションとは反平行な磁力線が繋ぎ変わることで磁場のエネルギーを爆発的に解放する現象である。この現象は太陽フレアでの粒子加速や地球磁気圏内の大規模な対流などを駆動する重要な物理過程である。磁気リコネクション研究の有用な手法には計算機シミュレーションがあるが、その中でも本研究では電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを用いた。MHD はプラズマを流体として扱うため、個々の粒子の集団的な振る舞いを記述できる。すなわち MHD はマクロスケールの物理現象の再現に適した手法だと言える。しかし、磁気リコネクションは大規模な物理現象を駆動する過程である一方で、磁力線が繋ぎ変わる現場である拡散領域では MHD 近似が破れ、プラズマ粒子の運動論的效果が重要になる。従って運動論的效果を含まない MHD では、磁気リコネクションのエネルギー解放効率を示すリコネクションレートが小さくなる (遅いリコネクションと呼ばれる)。過去の研究において、運動論的效果を含む粒子コードなどの計算では高いリコネクションレートが達成できるのに対し、MHD コードによるリコネクションレートは低くなり、MHD では速いリコネクションが再現できないことが示された [e.g., J. Birn et al., 2001]。

本研究では S. Kawai[2013] により提案された、新たな高精度 MHD スキームを用いて高速磁気リコネクションの再現を試みた。その結果、過去の MHD 計算のリコネクションレートよりも高い値が得られた。またリコネクションレートが解像度に依存するかどうかを確かめた。解像度が良くなると、より薄い電流層が再現できるため、より爆発的なリコネクションが起こり、リコネクションレートが高くなると予想される。結果として、グローバルなリコネクションレートは解像度に比例して高くなる傾向が見られた。しかし同時に、精度の良い計算ほど磁気島が複数発生し、複数の X-line ができることが分かった。つまり、解像度に比例したグローバルなリコネクションレートの増加は複数の X-line の影響を反映したものである。しかし、その中の 1 つの X-line に注目して、ローカルなリコネクションレートを求めると、どの解像度でも粒子計算と同等の値に収束することが分かった。このことは低解像度でも一定の高速磁気リコネクションが再現できることを示しており、今後大規模なスケールのリコネクションの研究に今回用いたコードが適用できることを示唆している。

キーワード: 磁気リコネクション, 電磁流体力学  
Keywords: magnetic reconnection, magnetohydrodynamics

## 動的ペッチェック過程による磁気リコネクションの新たな高速化機構 Dynamical Petschek Reconnection: New Mechanism of Fast Magnetic Reconnection

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>; Vekstein Grigory<sup>3</sup>  
SHIBAYAMA, Takuya<sup>1\*</sup>; KUSANO, Kanya<sup>1</sup>; MIYOSHI, Takahiro<sup>2</sup>; NAKABOU, Takashi<sup>1</sup>; VEKSTEIN, Grigory<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 太陽地球環境研究所, <sup>2</sup>広島大学, <sup>3</sup>University of Manchester

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>Hiroshima University, <sup>3</sup>University of Manchester

磁気リコネクションは磁力線のつなぎかえにより磁気エネルギーを運動エネルギーや熱エネルギーに変換する過程であり、太陽フレアや磁気圏サブストーム、トーラスプラズマの緩和現象の原因と考えられている。しかし、フレアが起こる太陽コロナ中は電気抵抗が非常に小さく、Sweet-Parker 理論によると効率的にリコネクションを起こすのは難しい。Petschek 理論では非常に小さい磁気拡散領域を仮定することで太陽コロナのパラメータでも効率的にリコネクションを起こすことができるとされたが、これまでの数値計算によると Petschek リコネクションは一様抵抗では安定に存在せず、これを実現するには異常抵抗モデルなどで磁気拡散領域を局所的に維持するためのメカニズムが必要であることが示唆されている。このため、Petschek リコネクションが自発的に発生し得るかという問題は未だに解決していない。

我々は今までよりも大きなシステムサイズで精密な数値計算を行うことで、一様抵抗モデルであっても非線形発展段階で Petschek 理論で予想されるスローショック構造が自発的に形成することを発見した。この過程では非線形発展により形成した大きなプラズモイドが電流シート内を速い速度で運動することが重要な役割を担っており、スローショック構造は運動するプラズモイドの前面に形成される。ただし、Petschek 理論とは異なりスローショックは X ポイントから 1 方向にのみ現れる (図 1)。プラズモイドは電流シートからの排出と新たなプラズモイドの形成を繰り返すため、この過程は非定常的に繰り返し起こり磁気リコネクションを進行させる。これによりリコネクションの高速化が起こり、太陽フレアを説明するのに必要とされる 0.01 程度のリコネクション率が高 Lundquist 数領域で得られることを明らかにした。(図 2)

我々はこの高速リコネクションレジームを「動的ペッチェックリコネクション (Dynamical Petschek Reconnection)」と名付けた。このレジームではリコネクションを高速化させるためにミクロスケールの物理過程や異常抵抗モデルなどは必要なく、一様抵抗のみでリコネクションの高速化が実現する。プラズモイドの運動が周囲のプラズマの流れに影響を与えることで電流を局在化させる働きをする。これにより Petschek 理論で予想されるスローショックが自発的に形成し、効率的にエネルギー変換を行うことができる。

キーワード: 磁気リコネクション, 太陽フレア  
Keywords: Magnetic reconnection, Solar flare

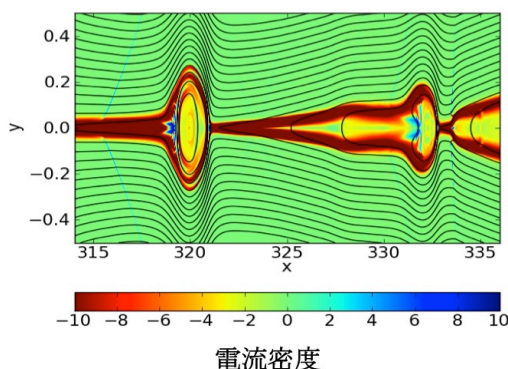


図 1、Slow shock部分の電流の空間分布

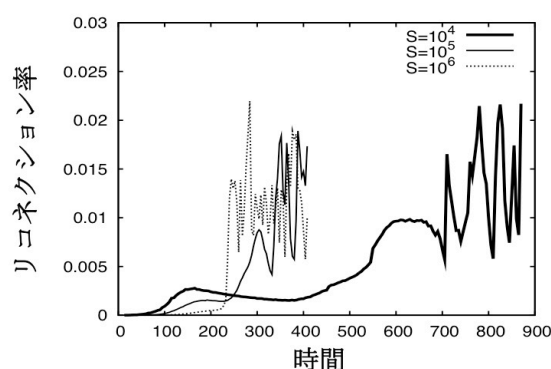


図 2、リコネクション率の時間発展

## プラズマ流中での抵抗性磁気リコネクション Resistive magnetic reconnection in a plasma stream

三好 隆博<sup>1\*</sup>; 草野 完也<sup>2</sup>; 柴山 拓也<sup>2</sup>  
MIYOSHI, Takahiro<sup>1\*</sup>; KUSANO, Kanya<sup>2</sup>; SHIBAYAMA, Takuya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>2</sup> Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

磁気リコネクションは様々な宇宙・天体爆発現象に対して重要な役割を果たす基礎的なプラズマ物理過程である。特に高磁気レイノルズ数プラズマでの磁気リコネクションの高速化機構の解明は、プラズマ物理学における最重要課題の一つである。近年、高解像度の磁気流体力学 (MHD) シミュレーションによって、プラズマの流れを伴う薄化した電流層 (スワート・パーカー型の電流層) の 2 次的不安定性に起因する新たな高速磁気リコネクション過程が示されてきた [1]。また、最新の超高解像度 MHD シミュレーションでは、薄化した電流層におけるプラズマ流れが磁気リコネクション過程と強く関連し、動的にペテック型の磁気リコネクションを実現することが指摘された [2]。したがって、プラズマ流中での磁気リコネクション過程は、高磁気レイノルズ数プラズマにおける高速磁気リコネクションの物理機構解明の鍵になると予想できる。

これまでに沿磁力線プラズマ流れを伴う反平行磁場における抵抗性テアリング不安定性、ストリーミング・テアリング不安定性、について幾つか理論・シミュレーション研究がなされてきたが [3]、プラズマ流中で強く発達する磁気リコネクションの非線形ダイナミクスについてはほとんど未解明である。そこで本研究では、プラズマ流中での抵抗性磁気リコネクションの非線形ダイナミクスを高解像度 MHD シミュレーションによって明らかにする。電流層と同程度の厚さを持つ局所的な沿磁力線流を加えたハリス型平衡配位に対し、大振幅の初期擾乱を与えることによって、プラズマ流中での非線形磁気リコネクションを駆動した。その結果、沿磁力線流のバルク速度に応じて、磁気リコネクション点の電流構造が変化することがわかった。特にバルク速度がアルフェン速度程度以下では、電流が局在化し得ることが見出された。

[1] N. F. Loureiro, et al., Phys. Plasmas, 19, 042303 (2012)

[2] T. Shibayama, et al., in preparation

[3] T. Sato, R.J. Walker, J. Geophys. Res., 87, 7453-7459 (1982)

キーワード: 磁気リコネクション, プラズマ流れ, 磁気流体力学

Keywords: magnetic reconnection, plasma stream, MHD

## 粒子シミュレーションのための相対論分布関数の初期化アルゴリズム Loading Relativistic Maxwell Distributions in Particle Simulations

銭谷 誠司<sup>1\*</sup>  
ZENITANI, Seiji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台  
<sup>1</sup> NAOJ

乱数を用いた速度分布関数の初期化は、粒子シミュレーションの基本的な要素技術の1つである。非相対論プラズマでは、例えば正規分布を生成する Box-Muller 法など、さまざまなアルゴリズムが知られている。しかし、相対論プラズマで粒子分布を生成するアルゴリズムはあまりよく知られていない。本講演では、相対論的 Maxwell 分布 (Juttner-Synge 分布) を生成するアルゴリズムとして、モンテカルロ業界で使われている Sobol 法 (1976) を紹介する。また、系が動いている場合にはローレンツ変換を考慮する必要があるが、多くの粒子コードでは分布関数のローレンツ変換を適切に扱えていない。我々は、棄却法に基づく簡単なローレンツ変換アルゴリズムを提案し、この処置がプラズマ系のエネルギー収支に及ぼす影響を議論する。

キーワード: 粒子シミュレーション, 相対論, モンテカルロ  
Keywords: PIC simulation, relativity, Monte-Carlo

## 電磁イオンサイクロトロントリガード放射による内部磁気圏高エネルギープラズマ環境の変化 Effects of EMIC rising tone emissions on energetic particles in the inner magnetosphere

小路 真史<sup>1\*</sup>; 大村 善治<sup>2</sup>

SHOJI, Masafumi<sup>1\*</sup>; OMURA, Yoshiharu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 京都大学生存圏研究所

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, <sup>2</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere

Rising tone electromagnetic ion cyclotron (EMIC) emissions, or so-called EMIC triggered emissions, have been observed in the inner magnetosphere. In order to reproduce the EMIC triggered emissions, we perform self-consistent hybrid simulations with a real scale non-uniform ambient magnetic field model. We obtained two different triggered emissions, coherent rising tone emission and broadband EMIC bursts, which are generated in high and low magnetic field gradient model, respectively. We estimate effects on plasmas by the EMIC rising tone emissions in the inner magnetosphere. For energetic protons, which drive EMIC waves, broadband emissions induce rapid precipitation of energetic protons into the loss cone since the scattering by the concurrent triggering takes place faster than that of the coherent emissions. On the other hand, the coherent triggered emission causes efficient proton acceleration around the equator because of the stable particle trapping by the coherent rising tone emission. The rising tone EMIC waves also causes an effective heating of cold heavy ions by parallel electric field induced by counter-propagating EMIC waves. The generation of the EMIC waves are also modulated due to the cold ion heating. Relativistic electron scattering by the rising tone emissions reproduced by the hybrid simulations are also estimated by test particle simulations. Nonlinear trapping causes significant electron scattering in wide energy range. Broadband EMIC waves induce rapid, weak and continuous precipitations.

キーワード: 内部磁気圏, ハイブリッドシミュレーション, 波動粒子相互作用

Keywords: inner magnetosphere, hybrid simulation, wave-particle interaction



## コーラス放射発生過程の高エネルギー電子の温度異方性に対する依存性について Dependencies of the generation process of whistler-mode emissions on temperature anisotropy of energetic electrons

加藤 雄人<sup>1\*</sup>; 大村 善治<sup>2</sup>; 三宅 洋平<sup>3</sup>; 白井 英之<sup>3</sup>; 中島 浩<sup>4</sup>

KATO, Yuto<sup>1\*</sup>; OMURA, Yoshiharu<sup>2</sup>; MIYAKE, Yohei<sup>3</sup>; USUI, Hideyuki<sup>3</sup>; NAKASHIMA, Hiroshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学生存圏研究所, <sup>3</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科, <sup>4</sup> 京都大学学術情報メディアセンター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, <sup>3</sup>Graduate School of System Informatics, Kobe University, <sup>4</sup>Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

By a series of electron hybrid simulations, we study dependencies of the generation process of whistler-mode chorus and hiss-like emissions on temperature anisotropy of energetic electrons.

Whistler-mode chorus emissions are electromagnetic plasma waves commonly observed in planetary magnetospheres. In the Earth's inner magnetosphere, chorus emissions are observed mostly on the dawn side and are enhanced during geomagnetically disturbed periods. Chorus emissions appear in the typical frequency range from 0.2 to 0.8  $f_{ce0}$  with a gap at the half  $f_{ce0}$ , where  $f_{ce0}$  represents the electron gyrofrequency at the magnetic equator. Recent in situ observation in the magnetosphere revealed the presence of whistler-mode hiss-like emissions, whose wave amplitude is comparable to those of chorus emissions.

The generation process of chorus has been reproduced in electron hybrid simulations and has been explained by the nonlinear wave growth theory [see review by Omura et al., in AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere, 2012]. The generation mechanism of hiss-like emissions is also explained by the nonlinear wave growth theory and has been reproduced by simulations [Kato and Omura, JGR 2013]. In the present study, by an improved electron hybrid code with OhHelp library [Nakashima et al., 2009], we conduct a series of electron hybrid simulations for different temperature anisotropy ( $A_T$ ) of the initial velocity distribution function of energetic electrons. We vary  $A_T$  in the range from 3 to 9 with changing the number density of energetic electrons ( $N_h$ ) so as to study whether distinct rising-tone chorus emissions are reproduced or not in the assumed initial condition. Based on the simulation results, we reveal properties of the chorus generation for the assumed  $A_T$  parameter range.

Keywords: whistler-mode chorus, the Earth's inner magnetosphere, numerical experiments

## ヘリコンプラズマ生成の自己無撞着モデル A self-consistent model of helicon plasma production

諫山 翔伍<sup>1\*</sup>; 羽田 亨<sup>1</sup>  
ISAYAMA, Shogo<sup>1\*</sup>; HADA, Tohru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学総合理工学府

<sup>1</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Helicon plasma is a high-density and low-temperature plasma generated by the electromagnetic (Helicon) wave excited in the plasma. Then, helicon plasma is expected for various applications. On the other hand, there still remain a number of unsolved physical issues regarding how the plasma is generated using the helicon wave. The mechanism of helicon plasma production includes the wave propagation in the plasma (dispersion relation), collisional or non-collisional wave damping and plasma heating, and ionization/recombination of neutral particles which causes time evolution of the dispersion relation. In this study, we use the linear theory of helicon plasma, fluid simulation, and particle simulation to construct self-consistent model including these physics.

In previous, we studied the helicon wave propagation and the process of plasma heating. And we showed the efficiency of mode conversion in bulk plasma depends strongly on the magnitudes of dissipations. However, there is a problem that has not been much studied: How do the helicon and TG modes influence the plasma density, electron temperature and their profiles? While the helicon mode is absorbed in the bulk plasma, the TG mode is mostly absorbed near the edge of the plasma. The local power deposition in a helicon plasma is mostly balanced by collision loss. This local power balance can give rise to an inhomogeneous electron temperature profile which is related to time evolution of density profile. In our study, we construct a self-consistent discharge model which includes wave excitation, classical electron heat transfer, and diffusion of charged particles.

## 運動論的な圧縮モードを含む非線形磁気流体波の理論モデル A theoretical model of nonlinear Alfvén waves including kinetic compressional modes

成行 泰裕<sup>1\*</sup>

NARIYUKI, Yasuhiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 富山大学人間発達科学部

<sup>1</sup> Faculty of Human Development, University of Toyama

It is well known that magnetohydrodynamic (MHD) turbulence in solar wind plasmas often has clear correlations between magnetic field and velocity field (Alfvénic correlations). Although it is widely believed that Alfvénic fluctuations play important role in making developed MHD turbulence and scattering charged particles, damping processes of the fluctuations have not been clarified yet. Over the nearly four decades, nonlinear evolution equation of Alfvén waves has been discussed by many authors. Mio et al (1976) and Mjølhus (1976) derived a nonlinear evolution equation of envelope-modulated Alfvén waves. Rogister (1971), Mjølhus and Wyller (1988), and Spangler (1989, 1990) derived a kinetic-fluid model including nonlinear Landau damping of compressional fluctuations. Hada (1993) derived a nonlinear evolution equation set including compressional propagating mode by using a novel expansion. In the present study, we discuss a nonlinear evolution equation of Alfvén waves including both kinetic effects and compressional modes. Such a model was phenomenologically discussed by Nariyuki and Hada (2007). We here systematically derive and discuss the expansion of Hada (1993) in the resultant kinetic-fluid model. We also discuss effects of mean fields and thermal noises.

キーワード: 磁気流体波, 運動論, 太陽風

Keywords: Alfvén waves, kinetic theory, solar wind

## 磁気流体波から考える分極ベクトルの意味 A Pedagogical Calculation on the Polarization Vector in an MHD Wave

中村 匡<sup>1\*</sup>  
NAKAMURA, Tadas<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 福井県立大学  
<sup>1</sup>Fukui Prefectural University

教科書などで電場  $E$  と電束密度  $D$  の関係を説明するとき、ほとんどの場合分子分極をもちだして、電流なり電荷なりを分極部分とそれ以外にわけて、という手順をふむ。これに従うと、分極とそれ以外という区別は物理的になにか本質をついたものであり、電束密度  $D$  も物理的実体であるかのような気分になる。それに対して、いくつかの教科書（代表はファインマン物理）では電束密度  $D$  というのは計算を簡単にする数学的な補助場で、本質的なものは  $E$  ひとつであるという立場で説明してある。しかし、ファインマンでも分極ベクトル  $P$  というものは使っていて、これを分子分極から導出している。

しかし本当に分極ベクトル場  $P$  というのは必要なのであろうか？ われわれのプラズマ物理の分野では磁場中の粒子のサイクロトロン運動から導かれる分極電流というものがよく知られており、MHD 理論の基礎になっている。このプラズマ中での分極電流の計算をするときに、この電流に対応した分極ベクトル  $P$  というものが数学的には定義できるが、調べてみると実際にこれに対応した物理的実体は存在しないことがわかる。したがって、分極ベクトルというものは計算上の導入する便宜的なベクトル場であり、本質的なものは分極電流であると考えほうが妥当である。

標準的な論法では、アンペールの法則の電流項を「真電荷」による電流と「分極電流」による部分にわけると、そう考えるよりも電流項の中にたまたま電場の時間微分に比例すると近似できるものがあつた場合に、それを分極電流としてあつかうという立場の方が、直感的に理解しやすい。

そして、不導体の分子分極や、MHD プラズマの分極電流などは、この近似がよくなりたつので、分極ベクトル  $P$  を導入して電束密度  $D$  でマックスウェル方程式を書き直すと、真空中の場合と同じ形になってあつかいやすいわけである。この立場、「真電荷」というのは何になるかという、比例関係で近似しきれなかった電流がつくる電場という定義になる。

本講演は新しい研究成果というより、プラズマ物理でよく知られているサイクロトロン運動からくる分極電流をつかって、電場と電束密度の関係を説明するという教育的観点からの意味に充填をおく。講演では以上に述べた立場から、無衝突プラズマの分極電流を例に、電束密度  $D$  および分極ベクトル  $P$  の一般論を議論する。

キーワード: MHD 波, 分極ベクトル, 電場と電束密度  
Keywords: MHD wave, Polarization Vector, Electric field and Electric Flux

## 衝撃波-衝撃波相互作用における粒子加速のモデル化 Modeling of Particle Acceleration in Shock-Shock Interaction

中野谷 賢<sup>1\*</sup>; 松清 修一<sup>1</sup>; 羽田 亨<sup>1</sup>  
NAKANOTANI, Masaru<sup>1\*</sup>; MATSUKIYO, Shuichi<sup>1</sup>; HADA, Tohru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院総合理工学府

<sup>1</sup>IGSES, Kyushu University

無衝突衝撃波は高エネルギー粒子(宇宙線)を生成すると考えられている。しかしながら、これまでの研究では単一の衝撃波を仮定しており、複数の衝撃波による加速はあまり研究されていない。しかし複数の衝撃波による加速は高効率であると考えられている[Gieseler and Jones, 2000, Melrose and Pope, 1993]。宇宙において、二つの衝撃波が近接・衝突することは頻繁に起こる。例えば、コロナ質量放出により生じた衝撃波と地球磁気圏衝撃波の衝突[Hietala et al., 2011, Concharov et al., 2014]、惑星間空間衝撃波が太陽圏終端衝撃波を横切ることなどが報告されている[Lu et al., 1999]。

この衝撃波 - 衝撃波相互作用を調べるために1次元フル粒子シミュレーションを用い、対称な二つの斜め衝撃波の近接・衝突を再現した。結果として、電子が二つの衝撃波の間で反射を繰り返すことで加速されることが分かった(フェルミ加速)。さらに、これらの電子は二つの衝撃波の間で波動を励起する。この波動が上流の電子をピッチ角散乱し、電子の衝撃波面での反射確率を高めることが分かった。これらの効果を含めて衝撃波-衝撃波相互作用における電子の加速機構をモデル化し、加速における最適なパラメータを示す。

キーワード: 無衝突衝撃波, 衝撃波-衝撃波相互作用, 粒子加速

Keywords: Collisionless Shocks, Shock-Shock Interaction, Particle Acceleration

## デカメータ電波パルスの観測に基づく我が銀河系中心部ブラックホール・バイナリ 一群——電離層効果を考慮した位置決定 (その2) Detection of Group of Black hole Binaries at the Center Part of Our Galaxy Based on

大家 寛<sup>1\*</sup>  
OYA, Hiroshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学  
<sup>1</sup> Tohoku University

### 1. 序

わが銀河系中心部より到来するデカメータ電波パルスの解析を通じてカー・ブラックホールがバイナリを形成していることを結論してきた。前回に引き続き東北大学・長距離基線デカメータ電波干渉計による2014年の観測に基づき、Gaa-Gab バイナリシステムの他3 systemのバイナリの存在を明らかにし、3層電離層モデルを採用して2分角以内の精度で SgrA\* を中心に位置することを明らかにした。

### 2. 観測システムと観測実施期間

観測は東北大学長距離基線デカメータ電波干渉計を用いて行われた。干渉計システムは Yoneyama, Zao, および Kawatabi の3局よりなり、最長83km, 最短44kmの3基線が設定される。22.816MHzにて帯域1kHzで観測された受信信号は仙台局にテレメータ伝送される。各信号は帯域幅100Hzの狭帯域3チャンネルに分割され、各々サンプリング率6kHzでAD変換された後干渉データとして処理される。観測期間は銀河中心部が出現する以前の1月下旬から銀河中心部観測の条件が整う4月10日にわたる期間にて実施された。

### 3. データ解析

データ解析は第一段階として、銀河系中心部が、観測点地方時、午前1時半より観測可能となる3月18,19,及び20日、3観測日について行った。解析に際しては、電離層を3層モデルで近似し、その方位を起点に実際の電離層効果による銀河中心の方位(RA, Dec)を補正しつつ追跡する方式をとった。電離層パラメータは各観測日ごとに対応し、国分寺観測点におけるfoF2の15分値を基礎に3次補間関数を用いて1分値として使用した。

方位決定には、探索する方位に対応して算出される基準干渉計フリッジと、観測データに内在する干渉計フリッジとの相関を求める方法によっている。即ち、検出すべき方位を掃引しつつ結果として得られるパルスの波形の整形度とパルスレベルが最大となる点を探索する方式である。

### 4. 結果

4.1 方位 観測周波数22.186MHzにおいては、電離層による銀河中心部の方位角の偏向は、仰角の低い時刻にはかなり顕著で、24arc min近くのずれを示し、南中時にも3 arc min程度の差のあることが3層モデル電離層から示された。解析の結果、モデル電離層効果のもとで算出される SgA\* の方位と実際の電離層効果のもとで決定された各 Binary 方位との補正值が得られ、4組のブラック・ホールバイナリ、Gaa-Gab, Gac-Gad, Gae-Gaf, および Gag-Gah に対し以下となりとなっている。結果の記述に当たり、Gaa (RA (0.01,0.53) ;Dec(-0.45,0.63)) —Gab (RA (0,109) ;Dec(-1.53,1.33)) とするフォーマットを用いるが、この表現の意味するところはバイナリの片方 Gaa 場合、方位の補正值は赤経 (RA) が平均値0.01arc min、標準偏差0.53 arc min 赤緯 (Dec) が平均値-0.45 arc min 標準偏差0.63 arc minであることを示す。続いてバイナリのパートナー Gab の記述が同じフォーマットで示される。同じフォーマットで以下、Gac (RA (1.34,1.89) ;Dec(-0.30,0.41)) —Gad (RA (-0.28,0.40) ;Dec(-1.53,1.33)) ; Gae (RA (0, 0) ;Dec(0, 0)) —Gaf (RA (-0.47,0.67) ;Dec(-1.09,1.54)) ; Gag (RA (-0.14,0.70) ;Dec(0.81,1.08)) —Gah (RA (-0.681.22) ;Dec(0.27,0.54)) となっている。以上の結果は Gab の赤緯の場合の一例を例外として、すべての結果はの平均値が標準偏差の1.89 arc min 以内にありこれらのBHバイナリからのデカメータ電波パルスが SgrA\* に源を持っていることを示唆している。すなわちすべてのパルス源は赤経17h45m40s, 赤緯-29°00' 28" に対し約2 arc min 以内で同じ方位に位置することが認められる。

### 4.2 導出されるBHパラメータ

BHバイナリの公転周期はDoppler効果による周波数変調から得られ、また、変調度からは視線方向に投影された軌道運動速度が求められる。公転には円軌道・ケプラー運動を仮定しBHバイナリの質量を求めた。この場合観測されるパルス周期がカーブラックホールのスピン周期と仮定し、パルス周期の比が質量比となることによりそれぞれの質量を得ている。軌道傾斜角が不明のため、質量の制限値を1巨大BHの想定で恒星運動より導出された値(たとえばEizenhauer, 2004)に準拠している。

### 5. 結論

今回解析した4組のBHバイナリからの電波源からのパルスはその源がパートナーBHと軌道運動することを示し、公転周期はそれぞれGaa-Gab系2050sec, Gac-Gad系1024sec, Gae-Gaf系1200sec Gag-Gah系325secを示し、質量範囲は、1万太陽質を単位として、Gaa,130-132; Gab,104-107; Gac,82-84; Gad, 57-60; Gae,15-17; Gaf,11-14; Gag,17-18; 及びGah,14-15となる。これらの質量をもって公転するBHバイナリはその位置が2arc minの精度でSgrA\*にあると

PEM26-14

会場:302

時間:5月24日 12:30-12:45

結論される。

キーワード: ブラックホール, 銀河系中心, デカメートル電波, 干渉計  
Keywords: Black Hole, Binary, Decameter Radiowave, Interferometer, Galaxy Center

## 無衝突系磁気回転不安定でのガス降着と粒子加速 Gas accretion and particle acceleration during collisionless magnetorotational instability

星野 真弘<sup>1\*</sup>  
HOSHINO, Masahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>University of Tokyo

Enhanced angular momentum transport and efficient particle acceleration during the magnetorotational instability (MRI) in a collisionless accretion disk are studied using three-dimensional particle-in-cell (PIC) simulation with a pitch-angle isotropization model. It is well known that the magnetic reconnection plays an important role on the nonlinear saturation of MRI, and we find that the plasma pressure anisotropy inside the channel flow with  $p_{\parallel} > p_{\perp}$  induced by active magnetic reconnection during the nonlinear stage of MRI suppresses the onset of subsequent reconnection, which in turn leads to high magnetic field saturation and enhancement of Maxwell stress tensor of angular momentum transport. Meanwhile, during the quiescent stage of reconnection the plasma isotropization progresses in the channel flow, and the anisotropic plasma with  $p_{\perp} > p_{\parallel}$  due to the dynamo action of MRI outside the channel flow contributes to rapid reconnection and strong particle acceleration. This efficient particle acceleration and enhanced angular momentum transport in a collisionless accretion disk may explain the origin of high energy particles observed around massive black holes.

キーワード: 降着円盤, 磁気回転不安定, 角運動量輸送, 粒子加速, 磁気リコネクション, 乱流

Keywords: accretion disk, magnetorotational instability, angular momentum transport, particle acceleration, magnetic reconnection, turbulence



## 降着円盤中の非一様トロイダル磁場による不安定性と乱流生成 Instability and Turbulence Generation through Non-uniform Toroidal Magnetic Field in Accretion Disks

平林 孝太<sup>1\*</sup>; 星野 真弘<sup>1</sup>

HIRABAYASHI, Kota<sup>1\*</sup>; HOSHINO, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo

Plentiful dynamics observed in accretion disks, e.g. disk winds, jets, and outflows, are believed as the results of angular momentum transport highly enhanced by magnetohydrodynamic turbulence. The magneto-rotational instability (MRI) is one of the most successful mechanisms to drive the required turbulent state, and generates a large toroidal magnetic field in the nonlinear evolution. In this study, we investigate the local stability of accretion disks especially focusing on the stage when the toroidal field is dominant, which is important to understand the dynamics and the nature of turbulence in well-developed disks, and suggest another possible path leading to the turbulent generation.

It is known that the differentially rotating plasmas threaded by the uniform toroidal field are unstable essentially for the perturbation with a vertical wavevector. Our linear analysis, however, shows that if the initial toroidal field has non-uniformity, the unstable modes confined within the equatorial plane, or with no vertical wavenumber, appear. Furthermore, a series of two-dimensional nonlinear simulations reveal that when the plasma beta is not so low (roughly  $\beta > 1$ ), this unstable mode can grow as far as the background field configuration breaks down. As another possible situation, we study the stability of the toroidal field with wavy structure. The simulations show that after the above unstable modes grow enough to interact with neighboring modes, they couple, merge, and eventually evolve to very turbulent state. In the saturated stage, the alpha parameter describing the efficiency of the angular momentum transport reaches to the same level with the previous studies of a toroidal MRI. This instability plays an important role in plasma transport since it may couple with magnetic reconnection occurring in an equatorial plane and then contribute to the saturation mechanism of MRI.

Hybrid simulation of an ion scale magnetosphere: Structure of the magnetopause boundary  
Hybrid simulation of an ion scale magnetosphere: Structure of the magnetopause boundary

中村 雅夫<sup>1\*</sup>  
NAKAMURA, Masao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪府立大学  
<sup>1</sup>Osaka Prefecture University

An ion scale magnetosphere is studied by performing a three-dimensional hybrid simulation. The hybrid simulation treats the ions as kinetic super particles via a particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid. In this study, the ion scale magnetosphere has a dayside stand-off distance which is several to a hundred times larger than the ion Larmor radius of the solar wind proton in the magnetic field strength which magnetic pressure equals to the solar wind dynamic pressure. The dayside magnetopause boundary has a double- or triple-layer flow structure due to the finite Larmor radius effect in the interaction between the solar wind and the magnetosphere. The flow structure is controlled by the interplanetary magnetic field. For the small ion scale magnetosphere, the bow shock cannot well steepen because the dayside sheath thickness is an order of the ion Larmor radius and the shock transition region overlaps with the boundary flow structure. We will discuss the plasma convections, current flows, and field structures in various solar wind conditions.

キーワード: イオンスケール磁気圏, ハイブリッドシミュレーション  
Keywords: Ion scale magnetosphere, hybrid simulation

## 惑星間空間における宇宙機能動帯電の数値シミュレーション Numerical simulation of active spacecraft charging in interplanetary space

星 賢人<sup>1\*</sup>; 村中 崇信<sup>2</sup>; 小嶋 浩嗣<sup>3</sup>; 山川 宏<sup>3</sup>

HOSHI, Kento<sup>1\*</sup>; MURANAKA, Takanobu<sup>2</sup>; KOJIMA, Hirotsugu<sup>3</sup>; YAMAKAWA, Hiroshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科電気工学専攻, <sup>2</sup> 中京大学工学部電気電子工学科, <sup>3</sup> 京都大学生存圏研究所

<sup>1</sup>Kyoto University, Graduate School of Engineering, Department of Electrical Engineering, <sup>2</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, Chukyo University, <sup>3</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

一般に宇宙機における帯電現象は、放電の危険性や観測への支障につながるとして、回避すべき現象と捉えられている。しかし近年、宇宙機を能動的に帯電させ、帯電した宇宙機に働く電磁気力を用いて軌道制御を行う、新たな推進方式が提唱されている。

帯電制御のためにイオンまたは電子の放出を行い、電場・磁場との相互作用によって推力を得るシステムは、推進剤を噴出して推力を得る従来の宇宙推進システムとは全く異なった推進方式となる。

電子放出の場合は電力のみ、イオン放出の場合は少量のイオン源と電力のみで推力を発生できるため、推進剤が不要となり、大幅な軽量化が期待できる。

さらに、想定されている荷電粒子エミッタは数 kg 以下で従来のエンジンに比べて非常に軽量であるため、軽量・長寿命な小型衛星のための推進機関と成り得る。

本発表では、特に惑星間空間における電磁気力を用いた宇宙機推進について、その能動帯電性能を評価するため、太陽風環境における宇宙機からの荷電粒子ビーム放出を模擬した三次元 Full PIC シミュレーションを行った結果について報告する。

特に、太陽風速度、太陽風流入とビーム放出方向の依存性、光電子による影響による宇宙機帯電電位の変化について、惑星間空間における自然帯電を解析した先行研究との比較も含めて、評価を行う。

また、惑星間空間における応用例として提案されている帯電セイルについて解析した結果についても述べる。

帯電セイルとは、帯電した長大なテザーを帆のように伸ばすことで太陽風中のプロトンの運動量をうけ、推力とする推進方式である。

本発表では、帯電テザーの長さや太さによる帯電特性の変化について解析し、その推力特性へ与える影響について検討する。

キーワード: 宇宙機帯電, 太陽風, 帯電セイル

Keywords: Spacecraft Charging, Solar Wind, Electric Sail

## 球に対応した新しい重合格子「イン・ヤン・ゾン格子」の開発 Yin-Yang-Zhong: An overset grid for a sphere

陰山 聡<sup>1\*</sup>  
KAGEYAMA, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学 システム情報学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of System Informatics, Kobe University

原点も含めた球全体を解くための新しい計算格子「Yin-Yang-Zhong (イン・ヤン・ゾン) 格子」を開発した。球座標は球ジオメトリの数値計算には最も自然な直交座標系であるが、球座標をそのまま計算格子に使うと、極軸と原点の付近に格子点が集中するという問題がある。Yin-Yang-Zhong 格子は、球の外側付近に Yin-Yang 格子を張り、球の原点付近には (カーテシアン座標に基づく) Zhong 格子を張る。Yin-Yang 格子と Zhong 座標系の境界では互いに一部のグリッドが重なっており、重合格子法に基づいて重複部分で相互補間を行う。今回我々は Yin-Yang-Zhong 格子に基づく新しい磁気流体力学 (MHD) シミュレーションコードを開発した。このコードは MPI を使って並列化されている。球内部の拡散問題と流体問題でコードの正しさを定量的に確認した。

キーワード: インヤン格子, 重合格子, 計算機シミュレーション, インヤンゾン格子  
Keywords: Yin-Yang grid, overset grid, computer simulation, Yin-Yang-Zhong grid