

ランダウ減衰の非可逆性

Irreversibility of Landau damping

*中村 匡¹*Tadas Nakamura¹

1. 福井県立大学

1. Fukui Prefectural University

ランダウ減衰はプラズマ運動論の中で基本的な素過程のひとつであり、ほとんど全てのプラズマ物理の教科書でくわしく扱われている。しかしながら、その正確な意味については、いくつかの誤解があり、教科書の記述もまちまちである。講演者は2015年度秋のSGEPSS講演会でランダウ積分路に関する混乱について報告したが、今回はその可逆性について議論する。

多くの教科書では、ブラソフ方程式に衝突項がないため、無衝突プラズマで起こる現象は可逆であると解説している。そして、その例としてランダウ減衰をあげ、プラズマエコーによって波動を再現できることから、情報が失われていないという議論をしている。しかしながら、「可逆」という言葉を字義通り、つまり「時間逆転をした過程が実際に起こりうる」という意味に解釈すると、プラズマエコーは可逆の証拠ではない。プラズマエコーが先におこり、それを放置しておくで初期状態にもどるような現象は起こらないからである。

講演では近年の統計力学の知見をもとに「不可逆」の意味を考え、ランダウ減衰も普通の不可逆現象と本質的に同じ意味で不可逆であることを示す。この観点からみると、プラズマエコーでは散逸が起こってないのではなく、実空間の散逸と同じタイムスケールで速度空間内の散逸が起こっているため、一見情報が失われてないようにみえると説明できる。

キーワード：ランダウ減衰、プラズマ波動、無衝突プラズマ

Keywords: Landau damping, Plasma waves, Collisionless plasma

温度異方性を考慮したMHDによる無衝突降着円盤の成層シミュレーション

Stratified Simulations of Collisionless Accretion Disks by Kinetic MHD with Anisotropic Pressure

*平林 孝太¹、星野 真弘¹*Kota Hirabayashi¹, Masahiro Hoshino¹

1.東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

1.Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

An accretion disk is one of the most ubiquitous astrophysical structure in the universe. In particular, the accretion disk around a supermassive black hole, such as Sgr A* in our galactic center, is thought to consist of a collisionless plasma, in which the gas is so hot and dilute that the mean free path of charged particles become larger than a scale size of the accretion disk. Particle-in-cell and Vlasov simulations are typical numerical approaches to investigate such a collisionless system. In the case of the accretion disk, however, the fact that the scale size of the disk and the kinetic scale of particles are different by orders of magnitude makes it impossible to apply the kinetic simulation techniques to this problem directly due to the limit of computational resources. To study the large-scale dynamics of collisionless accretion disks, therefore, the so-called kinetic magnetohydrodynamics (MHD), which can take into account some of kinetic effects, is required.

In this study, we pay attention to the effect of anisotropy of the thermal pressure. Including an anisotropic pressure tensor can modify the nature of the magnetorotational instability (MRI), which has been considered to play an important role for the angular momentum transport in accretion disks. We carried out series of kinetic MHD simulations using a *stratified* shearing box model, for the purpose of investigating the impact of pressure anisotropy on large scale dynamics of collisionless disks.

In the case of the standard MHD simulations with an isotropic pressure in a stratified domain, it is known that the disk threaded by a weak magnetic field is eventually filled with MRI-driven turbulence, which provides a sufficient rate of the angular momentum transport. This MRI-driven turbulence is considered to be responsible for production of a large-scale toroidal magnetic field observed in the stratified simulations, through some underlying disk dynamo process. We found that, once the effect of the anisotropic pressure is included, the resultant saturation level of the small-scale MRI-driven turbulence reduces to one third of that in the isotropic case with respect to the magnetic energy, due to the anisotropy with $P_{\perp} > P_{\parallel}$ generated by the MRI itself. On the other hand, the magnetic energy contained in large-scale structure gets much smaller roughly by one order of magnitude, which implies that the dynamo action might not work efficiently in the collisionless disks. In our talk, we will discuss the dynamical behavior in more detail and try to give a theoretical explanation to the reduction of the turbulence and suppression of the disk dynamo.

キーワード：降着円盤、無衝突プラズマ、MHDシミュレーション

Keywords: accretion disk, collisionless plasma, MHD simulation

磁気回転不安定性の非線形段階でパラサイト不安定性が駆動する乱流の波数スペクトルの異方性について

Anisotropic wave number spectra of turbulence driven by parasitic instability in the nonlinear stage of MRI

*平井 研一郎¹、加藤 雄人¹、寺田 直樹¹、河合 宗司²

*Kenichiro Hirai¹, Yuto Katoh¹, Naoki Terada¹, Soshi Kawai²

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

The magneto-rotational instability (MRI) (Balbus & Hawley, 1991) is one of the most important phenomena in accretion disks and causes turbulence driving the mass accretion in the disks. Goodman & Xu (1994) suggested that the magnetic field structure caused by the MRI cascades into turbulence through the evolution of the parasitic instability, which is related to the Kelvin-Helmholtz instability and magnetic reconnection. Pessah (2010) suggested the wave vector and growth rate of parasitic instability are strongly related to both magnetic diffusivity and fluid viscosity. These facts indicate that the artificial diffusivity, which is necessary in an MHD simulation scheme for treating the discontinuity and shock, should be as low as possible in the ideal MHD simulation of MRI-driven turbulence.

We have originally developed the MHD simulation code by employing the MHD scheme suggested by Kawai (2013). This scheme focuses on resolving the turbulence much accurately, and treats the discontinuity by adding the artificial diffusivity only to the vicinity of discontinuity (Localized Artificial Diffusivity method). We carry out the three-dimensional ideal MHD simulation by the developed code with net vertical magnetic field in the local shearing box disk model. We use 256x256x128 grids in the simulation system. We analyze the simulation results for the evolution of the MRI and the simultaneous enhancement of the parasitic instability.

Simulation results in the present study show that the MRI grows in the time scale of a few orbital periods and saturates at 2.8 orbital period. We find that a channel flow is formed through the evolution MRI and that the parasitic instability grows concurrent with the MRI, resulting in the turbulence spectra of both magnetic field and velocity in the simulation system. We confirm the strong enhancement of the parasitic instability at the timing of the saturation of the MRI and its anisotropic wave number spectra of turbulence appeared when the first channel flow is broken down. The anisotropic wave number spectra observed in the simulation result are consistent to the previous analytical studies. Additionally, we reveal that the magnetic field and velocity vectors enhanced by the MRI do not change in time from the same specific angle in the horizontal plane, but the waves enhanced by the parasitic instability in the subsequent channel break down does not show such a clear anisotropic wave number spectra as we find in the first channel flow. It could be because the turbulent flow breaks the laminar channel flow in the subsequent channels as Latter et al. (2009) suggested. We study the formation process of the anisotropic turbulence by analyzing the simulation results in detail.

キーワード：磁気回転不安定性、パラサイト不安定性、MHDシミュレーション

Keywords: Magneto-rotational instability, Parasitic instability, MHD simulation

単位球内部MHD流体の流れを伴う緩和状態 MHD Relaxation with Flow in a unit Sphere

*山本 晃平¹、陰山 聡¹

*Kohei Yamamoto¹, Akira Kageyama¹

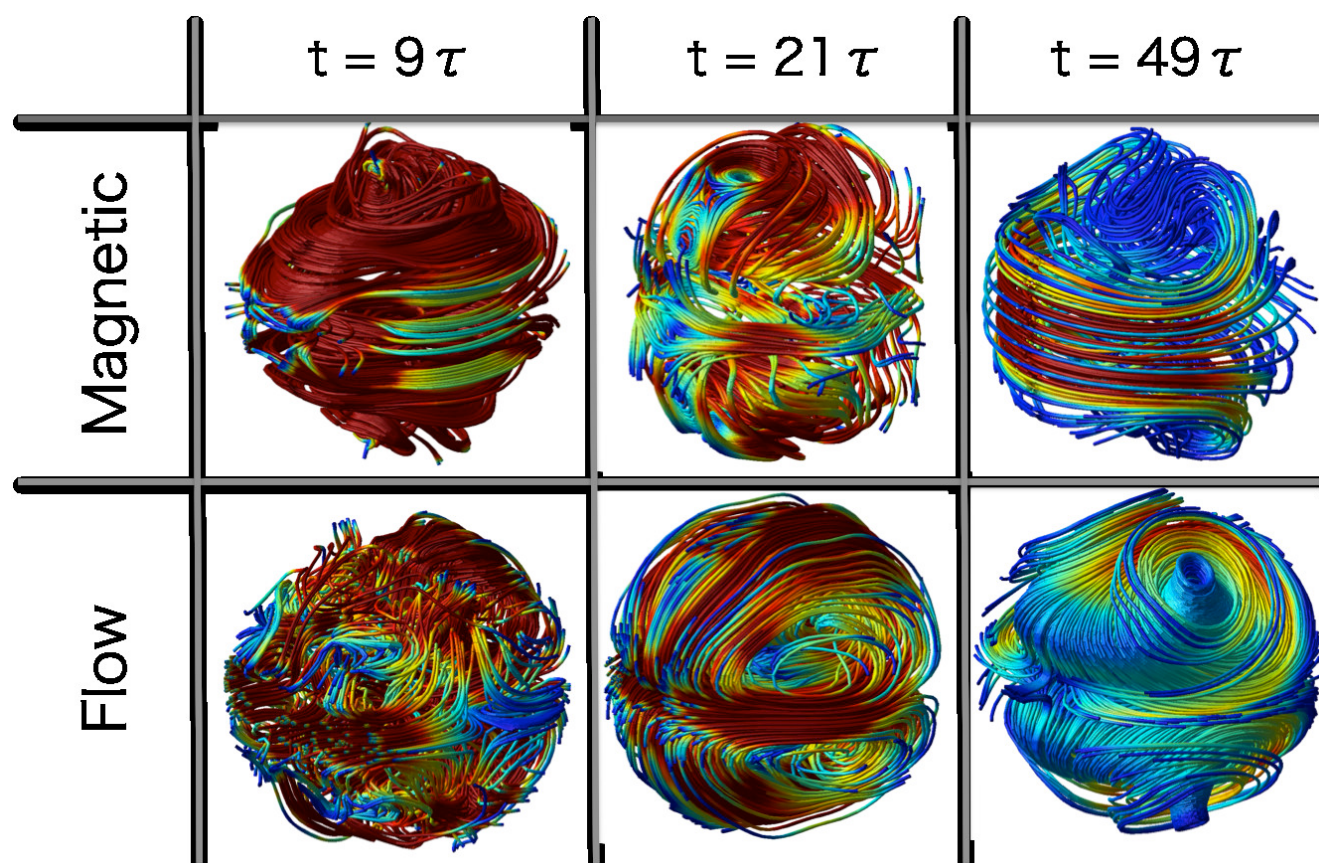
1.神戸大学

1.Kobe University

磁気流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD) モデルでのプラズマの緩和理論がWoltjerとTaylorによって構築され、実験結果の定量的な説明を含めて大きな成功を納めてきた。この理論 (Woltjer-Taylor理論) では、磁気ヘリシティが保存する条件下において 磁気エネルギーと比較して磁気ヘリシティの保存性が良いという仮定の下、磁気エネルギー最小の状態が最終状態になる理論である。この最終状態では流れのエネルギーはない (つまり流れはゼロ) と仮定されている。我々は、単位球内部に閉じ込められたMHD流体の、流れのある緩和状態を計算機シミュレーションで調べた。球の境界条件として、完全導体壁境界条件、stress-free境界条件、断熱壁境界条件を採用した。この場合、全エネルギーに加えて全角運動量が系の保存量となる。初期条件として経度方向のみのリング状のトロイダル磁場を与え、流れは全領域でゼロとした。初期状態として与えた磁場によるローレンツ力が働くことで、流れが駆動され、その後の緩和過程を観測する。レイノルズ数 Re と磁気レイノルズ数 Rm はともに $Re = Rm = 8600$ となった。その結果、緩和状態では正方形の各頂点にそれぞれ渦が配置された特徴的な流れが見られた。

キーワード：磁気流体力学、自己組織化、MHD緩和、Yin-Yang-Zhong格子

Keywords: magnetohydrodynamics, self-organization, plasma relaxation, Yin-Yang-Zhong grid



ヘリコンプラズマ放電過程のシミュレーション

The simulation of helicon plasma discharge

*諫山 翔伍¹、羽田 亨¹*Shogo Isayama¹, Tohru Hada¹

1.九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

1.Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Helicon plasma is a high-density and low-temperature plasma generated by the electromagnetic helicon wave (i.e., bounded whistler wave) excited in the plasma. It is considered useful for various applications. The helicon plasma discharge is a very complex system that involves many physical processes: the wave propagation and mode conversion to the electrostatic TG wave (determined by the wave dispersion relation), collisional and non-collisional wave damping, plasma heating, and ionization/recombination of neutral particles which in turn renews the dispersion relation. While the steady state of the helicon plasma is relatively well understood, there remain some important unsolved questions, such as how the discharge grows, how the helicon and the TG waves influence the plasma density and the electron temperature, and how their spatial profiles are determined. We have constructed a self-consistent model of the discharge growth that takes into account the wave excitation, electron heat transfer, and diffusion of particles. We discuss some quantitatively different states arising due to different choices of plasma parameters.

キーワード：ヘリコンプラズマ、ヘリコン波、TG波、自己無撞着放電モデル

Keywords: Helicon plasma, Helicon wave, TG wave, Self-consistent discharge model

デカメータ波電波によるわが銀河系中心部ブラックホール・バイナリー検出の再検証

Confirmation of the proposal of five sets of binary of super massive black holes in the central region of our Galaxy

*大家 寛¹

*Hiroshi Oya¹

1.東北大学理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics Graduate School for Science Tohoku University

デカメータ電波パルスの観測に基づき銀河系中心部における超巨大ブラックホールは天文学界の定説となっているような単数ではなく、多数のブラックホール群よりなり、少なくとも5組以上のブラックホール・バイナリーのシステムを形成していることを提唱してきた。それらは、公転周期が

Gaa-Gab系、Gac-Gae系、Gad-Gag系、Gaf-Gah 系およびGai-Gaj系においてそれぞれ

れ、2300sec, 1200sec, 810sec, 528sec 及び450sec で、それぞれのバイナリーを構成する各BHの自転周期は Gaa, 171.6 sec; Gab 119.6 sec; Gac, 100.8 sec; Gad, 72.4 sec; Gae, 62.8 sec; Gaf, 54.0 sec; Gag, 46.0 sec; Gah, 44.0; Gai, 26.0 sec; およびGaj, 23.6 sec と得られてきた。これらのパラメータの導出は受信されるデカメータ信号に対してFFT解析を施し、結果となる、諸特徴周期を手掛かりとして、周期相関集積法（ボックス・カー法）を適用して、パルス波形の検出と合わせてより詳細な周期を決定する手法によっている。現時点で自転周期1secはBH質量として5000太陽質量に相当する。ここで、本研究はこれまで得られた結果の確かさを、厳密に検証する時期にはいって、今回は基本ステップであるFFT解析結果の検証を以下3点についておこなった。即ち、1) BHバイナリーの根拠としている公転周波数（公転周期の逆数）をその基準にしている側帯波スペクトルの有意性をランダム雑音の場合との対比から明確にすること、2) 銀河系中心部の出現とブラックホールバイナリー、群の存在の根拠とするFFTコード出現の対比を明確にすること、3) 現在までに得られた5組のブラックホールバイナリーの諸周期情報から逆に信号源を組み立てたシミュレーションにより観測結果との一致性を評価すること、である。検証の結果、第1) 検証項目については特徴ある側帯波スペクトルは多数のBHバイナリー系からの相互干渉によって一部1/3の率で本来のピークを外れるが、ランダム雑音では一致と外れの場合が1/2 づつで、観測結果は有意に公転運動にもとづく周波数変調を示すと結論された。第2) 検証項目は、銀河中心を直視出来ない観測時点にもブラックホールバイナリー、群の存在の根拠とするFFTコードが出現することが判明した。しかしこれは問題のFFTコードが銀河中心部に存在する5組のブラックホールバイナリーに起源を持つことを否定するものでなく、逆にデカメータ波電波が電離層により蜃気楼をつくることの証明となった。第3の検証項目はシミュレーションによって得られたFFT結果は観測によって得られているBHバイナリー群のFFTコードと主要点において一致していて、本研究において進めてきた、我が銀河系中心部の超巨大ブラックホールが5組以上のブラックホール・バイナリーのシステムを形成しているとの提唱の根拠が確認された。

キーワード：ブラックホールバイナリー、銀河中心、デカメータ波電波

Keywords: Black Hole Binary, Galaxy Center, Decameter Radio Wave

実験室宇宙物理学における協同トムソン散乱計測に向けた数値実験

Numerical simulation of collective Thomson scattering in laboratory astrophysics

*松清 修一¹、潮崎 幸太¹、香月 のどか¹、坂和 洋一²、富田 健太郎¹、森田 太智¹、佐野 孝好²、蔵満 康浩³、山崎 了⁴、羽田 亨¹

*Shuichi Matsukiyo¹, Kota Shiosaki¹, Nodoka Katsuki¹, Youichi Sakawa², Kentaro Tomita¹, Taichi Morita¹, Takayoshi Sano², Yasuhiro Kuramitsu³, Ryo Yamazaki⁴, Tohru Hada¹

1.九州大学、2.大阪大学、3.国立中央大学、4.青山学院大学

1.Kyushu University, 2.Osaka University, 3.National Central University, 4.Aoyama Gakuin University

We have performed the laboratory experiment on collisionless shocks by using high power laser in collaboration with the Institute of Laser Engineering (ILE) at Osaka university for the past few years. To measure the local plasma quantities in the shock transition region, collective Thomson scattering (CTS) measurement is utilized. The CTS is the scattering of low frequency incident electromagnetic waves by collective oscillations of plasma electrons. The spectrum of the scattered waves enables us to infer the local plasma quantities like electron density, electron and ion temperature, valence of ions, etc, as a function of local position along the path of the incident probe laser light.

The CTS measurement has been widely used so far to measure experimental as well as space plasmas. However, details of the scattering theory are complex. In particular the theory of the CTS in a non-equilibrium plasma has not been established. In this study we build the numerical simulation system of virtual CTS applicable to the measurement system in the ILE experiment. A local non-equilibrium plasma near a shock is reproduced by using standard full particle-in-cell (PIC) simulation. The time-series data of electron density obtained from the PIC simulation is used to solve a wave equation of the scattered waves separately. Since the frequencies of the scattered waves as well as the incident probe light are much higher than the plasma frequency, the wave equation should be solved with the temporal resolution much higher than that in the PIC simulation. Furthermore, the measurement system at ILE is essentially two dimensional. We will report preliminary results of the virtual CTS simulation with realistic parameters in the ILE experiment.

キーワード：協同トムソン散乱、実験室宇宙物理学、数値実験

Keywords: collective Thomson scattering, laboratory astrophysics, numerical simulation

マジックCFL法を用いた相対論的衝撃波の長時間計算

Long-term PIC simulations of relativistic shocks using the magic CFL method

*松本 洋介¹、池谷 直樹¹*Yosuke Matsumoto¹, Naoki Ikeya¹

1.千葉大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Chiba University

Mitigating so-called the numerical Cherenkov instability (NCI) has been a critical issue in studying particle accelerations at relativistic collision-less shocks by means of the particle-in-cell simulation. We have studied the stability property of the NCI in relativistic plasma flows employing particle-in-cell simulations. Using the implicit finite-difference time-domain method to solve Maxwell equations, we found that the nonphysical instability was greatly inhibited with a Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) number of 1.0 (Ikeya and Matsumoto, 2015). The present result contrasts with recently reported results (Vay et al., 2011; Godfrey and Vay, 2013; Xu et al., 2013) in which magical CFL numbers in the range 0.5-0.7 were obtained with explicit field solvers.

Using the newly found stability property of the NCI, we successfully solved long-term evolutions of relativistic collision-less shocks. For relativistic, un-magnetized shocks in pair plasmas, we found that magnetic field turbulence generated by the Weibel instability saturated at much larger levels than those found in the previous studies. As results, particles' maximum energy increased linearly in time with the energy spectral slope $\gamma^{-1.8}$, which compares with the previously-reported relation as $\gamma_{\max} \propto \sqrt{t}$ with $\gamma^{-2.4}$.

キーワード：PICシミュレーション、相対論的衝撃波、粒子加速

Keywords: PIC simulation, relativistic shocks, particle acceleration

ケルビン・ヘルムホルツ不安定性におけるジャイロ粘性効果

Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations

*梅田 隆行¹、山内 捺希¹、和田 泰尚¹、上野 悟志¹*Takayuki Umeda¹, Natsuki Yamauchi¹, Yasutaka Wada¹, Satoshi Ueno¹

1.名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

In the present paper, the gyro-viscous term[W. B. Thompson, *Pep. Prog. Phys.* 24, 363-424 (1961)] is evaluated by using a full kinetic Vlasov simulation result of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI). The average velocity (velocity field) and the pressure tensor are calculated from a high-resolution data of the velocity distribution functions obtained by the Vlasov simulation, which used to approximate the gyro-viscous term according to Thompson (1961). The direct comparison between the pressure tensor and the gyro-viscous term shows a good agreement. It is also shown that the off-diagonal pressure gradient enhanced the linear growth of the KHI when the inner product between the vorticity of the primary velocity shear layer and the magnetic field is negative, which is consistent with the previous Finite-Larmor-Radius (FLR)-MHD simulation result, but not with the previous kinetic simulation results. This result suggest that it is not enough for reproducing the kinetic simulation result to include the gyro-viscous term only in the equation of motion in fluid simulations.

キーワード：計算機シミュレーション、ケルビン・ヘルムホルツ不安定、非MHD効果

Keywords: Computer simulation, Kelvin-Helmholtz instability, Non-MHD effect

Compressible fluid effects in plasmoid-dominated turbulent reconnection

Compressible fluid effects in plasmoid-dominated turbulent reconnection

*銭谷 誠司¹

*Seiji Zenitani¹

1.国立天文台

1.National Astronomical Observatory of Japan

Traditionally, two basic models of magnetic reconnection have been discussed in the framework of resistive magnetohydrodynamics (MHD): Fast Petschek reconnection and slow Sweet--Parker reconnection. However, the former requires a localized profile of the electric resistivity. The latter is free from such an assumption, but it is too slow to explain reconnection events in the plasma universe.

Recently, it has been found that Sweet--Parker reconnection switches to plasmoid-dominated turbulent reconnection due to the generation of secondary plasmoids. As a result, the reconnection rate remains moderately fast ($R \sim 0.01$) in realistic parameters, in which the conventional Sweet--Parker reconnection is too slow. This transition is analogous to a transition from a laminar flow to a turbulent flow in fluid dynamics.

Both Sweet--Parker and plasmoid-dominated models usually assume the incompressibility as a first step to understand the mechanism. At present, the role of the compressibility in these systems remains unclear.

The compressible fluid effects are pronounced in a low-beta plasma, in which the typical speed of the system or the typical Alfvén speed exceeds the local sound speed. As extreme examples of compressible effects, recent MHD simulations revealed various shock-structures in low-beta reconnection (Zenitani & Miyoshi 2011, Zenitani 2015).

In this contribution, we will report our initial results on the basic properties of plasmoid-dominated turbulent reconnection in a low plasma beta. We discuss the role of the compressible parameters on the global reconnection rate and fine structures around the plasmoid islands. We will also discuss numerical issues in our HLLD/HLLC type MHD code.

キーワード：磁気リコネクション、磁気流体、乱流

Keywords: Magnetic reconnection, MHD, Turbulence

The role of Hall magnetic field in large-scale magnetic reconnection dynamics and structure

The role of Hall magnetic field in large-scale magnetic reconnection dynamics and structure

*中村 雅夫¹

*Masao Nakamura¹

1.大阪府立大学

1.Osaka Prefecture University

A Hall magnetic field of magnetic reconnection is generated by the electron-ion dynamics in the diffusion region. There are many studies on the effect of the Hall magnetic field for the reconnection rate around the diffusion region. However, in this study, we investigate the roles of the Hall magnetic in the dynamics and structures of reconnection jets and plasma sheet boundary layers, along which the Hall magnetic field propagate away from the diffusion region in large-scale magnetic reconnection systems. That makes it possible to discuss the Hall magnetic field strength generated in various conditions of magnetic reconnection.

キーワード：磁気リコネクション、ホール磁場

Keywords: magnetic reconnection, Hall magnetic field

磁気リコネクションに対する拡散過程の影響

Impact of diffusion processes on magnetic reconnection

*簗島 敬¹、三好 隆博²、今田 晋亮³*Takashi Minoshima¹, Takahiro Miyoshi², Shinsuke Imada³

1.海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野、2.広島大学 大学院理学研究科、3.名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1.Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Graduate School of Science, Hiroshima University,, 3.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Magnetic reconnection intrinsically contains a hierarchical structure ranging from the fully kinetic scale to the magnetohydrodynamic (MHD) scale. In order to identify the essential physics necessary to model the reconnection, numerical simulations have been conducted with a variety of codes from kinetic codes to conventional resistive MHD codes (Birn et al. 2001). They have shown that only the MHD simulation with uniform resistivity fails to trigger fast reconnection, indicating that resistive MHD would be insufficient to model it.

The role of resistive dissipation on the reconnection has been extensively investigated in the framework of MHD. Recent theoretical and numerical studies have proposed a dynamic model dominated by plasmoids for sufficiently small resistivity beyond a classical static model. The resulting reconnection rate seems to be independent of the resistivity that may account for actual phenomena, although it does not necessarily settle the difference from the kinetic model. Meanwhile, the impact of other dissipation processes should be discussed. This study especially focuses on viscosity and heat transfer.

Viscosity controls the dissipation scale of vortex. Resistive MHD assumes it to be zero, meaning that the vortex dissipation scale is negligible small compared with the current dissipation scale. However, the ratio of the scale of vortex to current can be much larger than unity in actual environments, and it affects the dynamics. Finite heat transfer is frequently observed in association with the reconnection. It can also affect the dynamics through increasing compressibility.

In order to investigate the effect of viscosity and heat transfer on the nonlinear evolution of the reconnection, we conduct two-dimensional fully-compressible visco-resistive MHD simulations coupled with thermal conduction. We discuss that viscosity and thermal conduction considerably modify the dynamics from a resistive model. Large viscosity excites a broad vortex that enables the efficient transfer of upstream magnetic field to the reconnection region. The resulting reconnection rate increases with viscosity provided that thermal conduction is fast enough to take away the viscous heating energy. This is indicative of the importance of viscosity and heat transfer to model the reconnection against the conventional resistive MHD. We also investigate the dependence on resistivity to determine key parameters (specifically, Reynolds numbers and Prandtl numbers) governing the visco-resistive reconnection coupled with thermal conduction. Comparison with the kinetic model will be discussed.

キーワード：磁気リコネクション、磁気流体シミュレーション、拡散

Keywords: Magnetic reconnection, MHD simulation, Diffusion

ホイッスラー乱流中での運動論スケール静電波動の励起について：粒子シミュレーション

Enhancement of kinetic scale electrostatic fluctuations in decaying whistler turbulence:
Particle-In-Cell simulations

*齊藤 慎司¹、成行 泰裕³、梅田 隆行²

*Shinji Saito¹, Yasuhiro Nariyuki³, Takayuki Umeda²

1.名古屋大学 大学院理学研究科、2.名古屋大学 宇宙地球環境研究所、3.富山大学 人間発達科学部

1.Graduate School of Science, Nagoya University, 2.Institute for Space-Earth Environmental
Research, Nagoya University, 3.Faculty of Human Development, University of Toyama

Solar wind observations show that larger cascade rates of turbulence lead to steeper power-law magnetic spectra at kinetic scales. This suggests that larger fluctuation amplitudes at kinetic scales lead to some nonlinear properties more efficiently. Our previous research showed that the modified two stream instability in a monochromatic finite amplitude whistler wave contributes the nonlinear dissipation of the wave at kinetic scales. This result suggests that kinetic instabilities can enhance the dissipation at electron and ion scales. The wave driven instability occurs with larger wave amplitudes more efficiently, so this process could be a contributor for the steep power-law spectrum at kinetic scales. Here two-dimensional electromagnetic particle-in-cell simulations in magnetized, homogeneous, collisionless electron-ion plasma demonstrate the forward cascade of whistler turbulence at ion scales. The simulation show that whistler turbulence cascades into electron scales, and show a spectrum break around the scale of the electron inertial length. Around the scale related to the break point, electrostatic fluctuations appear at several points intermittently. The electrostatic fluctuations are expected to be driven by ion acoustic instability driven by localized electric current in whistler turbulence. We will discuss the instability driven dissipation of whistler turbulence at kinetic scales and heating of both electrons and ions.

キーワード：プラズマ乱流、ホイッスラー波、粒子シミュレーション

Keywords: plasma turbulence, whistler wave, Particle-In-Cell simulation

相対論的衝撃波におけるプリカーサー Precursor Waves in Relativistic Shocks

*岩本 昌倫¹、天野 孝伸¹、松本 洋介²、星野 真弘¹

*Masanori Iwamoto¹, Takanobu Amano¹, Yosuke Matsumoto², Masahiro Hoshino¹

1.東京大学理学系研究科、2.千葉大学理学研究科

1.Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Chiba University

The origin of high energy cosmic rays has been a long-standing problem in astrophysics. Many particle acceleration mechanisms such as Fermi shock acceleration in relativistic jets and magnetic reconnection in pulsar/magnetar magnetosphere have been proposed so far, however, there is no plausible model to explain such energetic particles. Recently Chen et al. (2002) proposed the particle acceleration by the ponderomotive force of a large amplitude Alfvén wave as a model of ultra-high energy cosmic rays, based on the wakefield acceleration process (Tajima and Dawson 1979). Since then the mechanism attracts interests in astrophysical field. In relativistic shocks, the generation of large-amplitude precursor electromagnetic waves is discussed by synchrotron maser instability (Hoshino and Arons 1991). Lyubarsky (2006) suggested the precursor waves excited in the relativistic shock front induces the electrostatic field, and argued that it may be responsible to the particle acceleration. Hoshino (2008) extended the previous studies and demonstrated the efficient particle acceleration by the incoherent wakefields induced by the large-amplitude precursor electromagnetic waves in the upstream region of a relativistic shock wave by using one-dimensional Particle-In-Cell (PIC) simulation.

However, the efficiency of the particle acceleration by the wakefield mechanism is sensitive to the nature of the precursor electromagnetic waves, because the ponderomotive force is known to strongly depend on the wave amplitude and the wave coherence. In this study, we argue the precursor waves in relativistic shocks by using the two-dimensional PIC simulation. Since relativistic shocks are mainly controlled by “sigma parameter” which is the ratio of the Poynting flux and plasma flow energies, the amplitude of the precursor wave depends on sigma parameter. For instance, in our simulations, the amplitude of the precursor wave gets smaller and the wave coherency of the precursor wave gets lower as sigma parameter decreases, and the amplitude dependence on sigma parameter in two-dimensional simulations is different from that in one-dimensional simulations. Furthermore, the previous one-dimensional simulations could not investigate the wave coherency of the precursor wave. We must take account of the wave coherency when considering the wakefield acceleration because the wave coherency of the precursor wave, which is required for the ponderomotive force, is essential to the wakefield acceleration. In this presentation, we compare two-dimensional simulations to one-dimensional simulations and report our results.

キーワード：プラズマ、衝撃波、粒子加速

Keywords: plasma, shock, particle acceleration

運動論的アルヴェン波ダイナミクスのためのモーメント分離解法

Moment extracted method for solving kinetic Alfven wave dynamics

*渡邊 智彦¹、渡邊 裕介¹、前山 伸也¹*Tomo-Hiko Watanabe¹, Yusuke Watanabe¹, Shinya Maeyama¹

1.名古屋大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Nagoya University

Kinetic Alfven waves (KAW), which play crucial roles in a variety of phenomena in space plasmas, involve multiple space- and time-scales. For example, the wavelength along the field line may extend to the system size, while the perpendicular wave numbers are characterized by the ion gyro-radius or the electron skin depth. The characteristic time is given the wave frequency or the electron transit time. Thus, drift kinetic or gyrokinetic simulations of low-frequency plasma dynamics including the KAWs often suffer from a severe Courant condition for explicit time-integrators or a poor convergence of iteration in implicit methods.

To overcome the numerical inefficiency, we have developed a new scheme for solving the KAW dynamics including drift kinetic electrons. In the new scheme, the low-order moments of electron distribution function are calculated separately from the drift kinetic equation for electrons. It enables us to easily implement implicit time-integrators and/or the semi-Lagrangian scheme while keeping the numerical stability and the conservation property. Some applications of the moment extracted formulation will be discussed.

キーワード：アルヴェン波、シミュレーション、ジャイロ運動論

Keywords: Alfven waves, simulation, gyrokinetics

アルヴェン波の非線形発展における見かけの温度を含む平衡速度分布の効果

Effects of the equilibrium velocity distribution function with the apparent temperature on nonlinear evolution of Alfven waves

*成行 泰裕¹

*Yasuhiro Nariyuki¹

1.富山大学人間発達科学部

1.Faculty of Human Development, University of Toyama

Finite amplitude Alfvenic fluctuations are ubiquitously observed in the solar wind plasma. When we model the low-frequency phenomena of the solar wind plasma using one-fluid magnetohydro-dynamic (MHD) system, the fluctuations and the non-equilibrium components of ions are mixed into the pressure tensor (e.g., Chen et al, 770, 125 (2013); Nariyuki et al, POP, 22, 124502 (2015)). It is noteworthy that the local equilibrium velocity distribution function in the one-fluid MHD system can include the effects of the fluctuations as the apparent temperature. In the present study, nonlinear evolution of Alfven waves with the background (equilibrium) VDF including the apparent temperature is discussed by using the classical theoretical method such as the reductive perturbation method. If the isotropic equilibrium VDF is assumed, the apparent temperature can appear as the linear term in the triple-degenerated derivative nonlinear Schrodinger (TDNLS) system. The relationship between the apparent temperature and the Reynolds stress is also discussed.

キーワード：アルヴェン波、太陽風、磁気流体

Keywords: Alfven waves, solar wind, MHD

Expanding box model of quasilinear theory including the anisotropy-driven instabilities and collisional dissipation

*Seough Jungjoon^{1,2}, Yasuhiro Nariyuki¹, Peter H. Yoon^{3,4}

1.Faculty of Human Development, University of Toyama, Japan, 2.JSPS Postdoctoral Fellow,
3.University of Maryland, College Park, USA, 4.School of Space Research, Kyung Hee University,
Korea

Measurements in situ of proton temperature anisotropy were found to be bounded by the marginal stability conditions of the kinetic instabilities driven by proton temperature anisotropies. This implies that these instabilities are indeed active and play an important role in limiting the range of temperature anisotropies observed in the expanding solar wind. However, the vast majority of the observed data distribution in the parameter space, denoted by proton temperature anisotropy and parallel beta, are found near isotropic state instead of being near the instability thresholds, so that they could not be explained by the local kinetic instability alone. Since the solar wind itself expands in inhomogeneous interplanetary space, the solar wind expansion would lead to a development of excessive parallel temperature anisotropy. Moreover, the binary particle collisions are thought to contribute to the temperature isotropization of the solar wind plasma. In order to understand the measured proton properties in the solar wind, various kinetic processes responsible for the global dynamics, such as the solar wind expansion and binary collisions, and the local kinetic instabilities should be taken into account. In the present work, we employ quasilinear theory of the expanding box model to investigate how the solar wind expansion and the instability driven collisionless dissipation as well as the collisional dissipation affect the dynamic evolution of the solar wind proton.

Keywords: solar wind proton, temperature anisotropy-driven kinetic instability, expanding box model of quasilinear theory, collisional dissipation

乱流場の中の宇宙線輸送

Cosmic ray transport in a turbulence field

*羽田 亨¹*Tohru Hada¹

1.九州大学大学院総合理工学研究院流体環境理工学部門

1.Earth System Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences,
Kyushu University

乱流場中の宇宙線（高エネルギー荷電粒子）輸送は、天体物理学や数理科学の観点から重要な問題であり続けている。とくに乱流が大振幅の磁気流体乱流の場合、非ガウスの統計的性質があらわれる。本発表では、これをモデル化するフラクタル輸送拡散方程式の数値解を紹介する。衝撃波フェルミ加速についても言及する。

キーワード：宇宙線、輸送、非ガウス過程

Keywords: cosmic rays, transport, non-gaussian process

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 dawnward 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 Yikai¹、大村 善治¹

*Yikai HSIEH¹, Yoshiharu Omura¹

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¹

*Masaya Saji¹

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¹、松清 修一¹、羽田 亨¹

*Nodoka Katsuki¹, Shuichi Matsukiyo¹, Tohru Hada¹

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センター(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。比較的低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、ラングミュア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と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¹、深沢 圭一郎²*Yuto Katoh¹, Keiichiro Fukazawa²

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¹、梅田 隆行¹、町田 忍¹

*Yasutaka Wada¹, Takayuki Umeda¹, Shinobu Machida¹

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¹、草野 完也¹、三好 隆博²、中坊 孝司¹、Grigory Vekstein³

*Takuya Shibayama¹, Kanya Kusano¹, Takahiro Miyoshi², Takashi Nakabou¹, Grigory Vekstein³

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リ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¹、簗島 敬²、松本 洋介³*Takahiro Miyoshi¹, Takashi Minoshima², Yosuke Matsumoto³

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