

差動回転プラズマにおけるトロイダル磁場に沿った新しい不安定性 A new instability along toroidal magnetic field in differentially rotating plasmas

平林 孝太^{1*}; 星野 真弘¹
HIRABAYASHI, Kota^{1*}; HOSHINO, Masahiro¹

¹ 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

We discuss a new type of instability expected to take place in an accretion disk, which has a differentially rotating plasma threaded by a weak magnetic field, by performing linear eigenvalue analysis. We study the linear stability of a disk with a localized, toroidal magnetic field in the radial direction, which can be expected in an accretion disk during the nonlinear evolution of the magneto-rotational-instabilities (MRI).

The MRI is believed to be a strong source of magneto-hydro-dynamic (MHD) turbulence and the resultant angular momentum transport in the accretion disk, which is required for the gas to accrete onto the central object. Once the MRI grows, the system is chiefly governed by the toroidal and radial magnetic field newly generated by the dynamo action of MRI. Such a configuration allows the Alfvén waves to propagate along toroidal direction.

In this talk, we study the linear stability of the Alfvén wave in the local Cartesian coordinate, the so-called shearing periodic box, and show that the toroidally propagating Alfvén wave can become unstable if its wavelength is larger than the length scale of the localized magnetic field gradient. We investigate our results of the linear eigenvalue analysis by changing the structure of the localized magnetic field, and discuss some properties of the instability with examining the eigenvectors and eigenvalues. It is revealed that this type of instability may also appear in non-rotating plasma, but it is highly suppressed in a rigid body rotating plasma. In addition to the linear analysis, the corresponding nonlinear behavior will also be discussed by using MHD numerical simulations. This instability plays an important role in the plasma transport because it probably couples with the magnetic reconnection occurring in the equatorial plane and then to contributes to the saturation mechanism of the MRI.

無衝突系降着円盤での磁気回転不安定による粒子加速と角運動量輸送
Particle acceleration and angular momentum transport during magnetorotational instability in kinetic accretion disks

星野 真弘^{1*}
HOSHINO, Masahiro^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科
¹The University of Tokyo

Magneto-rotational instability (MRI) in a gravitational rotating system is known to play an important role on the formation of the astrophysical accretion disk and the angular momentum transport, and the nonlinear time evolution of magneto-rotational instability has been extensively investigated by using MHD simulations so far. The mean free path of plasma, however, is not necessarily smaller than the characteristic scale length for some classes of astrophysical accretion disks, and the collisionless behavior of MRI beyond the MHD approximation needs to be understood. In this talk, we study momentum transport and particle acceleration of the kinetic (collisionless) MRI by focusing on magnetic reconnection. We discuss that a strong pressure anisotropy is associated with the formation of the channel flow, and the anisotropic channel flow can lead to a rapid magnetic reconnection, that can occur sporadically in three-dimensional system. As a result of the reconnection, non-thermal power law distribution with a hard spectral index $p=1-1.5$ is quickly formed. We also discuss that the so-called alpha parameter in the standard accretion disk model, which is numerically measured from the Reynolds and Maxwell stresses, can be dramatically enhanced during the nonlinear time evolution of MRI. The kinetic MRI is one of plausible mechanisms to explain much more efficient angular momentum transport and high-energy particle emissions observed from massive black holes such as Sgr A*.

キーワード: 宇宙プラズマ, 降着円盤, 粒子加速, 磁気リコネクション, 角運動量輸送

Keywords: Space and astrophysical plasmas, accretion disk, particle acceleration, magnetic reconnection, angular momentum transport

新しいハイブリッドコードによる磁気回転不安定性の非線型シミュレーション Numerical Simulation of Kinetic Magnetorotational Instability using a new Hybrid Technique

白川 慶介^{1*}; 天野 孝伸¹; 星野 真弘¹

SHIRAKAWA, Keisuke^{1*}; AMANO, Takanobu¹; HOSHINO, Masahiro¹

¹ 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹ Faculty of Science, University of Tokyo

The evolution of Magnetorotational instability (MRI) is considered to be important in the context of efficient angular momentum transport in the accretion disks in our universe. Conventionally, the nonlinear evolution of MRI is studied under the MHD approximation which assumes the mean free path of the plasma is sufficiently small compared to the actual size of the disk. However some classes of the accretion disks, for example the disk around SgrA*, are found to be constituted with a collisionless plasma and therefore the kinetic effect of the plasma, such as generation and relaxation of the pressure anisotropy, should be taken into account.

For the inclusion of the kinetic plasma effects, hybrid code, which treats ions as particles and electrons as massless charge neutralizing fluid, may provide a robust approach resolving the ion scale physics and integrating over the Keplerian time scale. However in the 2 dimensional simulation of the MRI, it is well known that the system eventually grows to a set of channel flows. In this state, the density of the plasma is found to be extremely low in the region where the magnetic field is enhanced as a result of a strong dynamo effect of the differential rotation of the disk. In this low density, strong magnetic field region, the CFL condition determined by the R-mode wave is found to be severe. Moreover, since the extremely low density region is generated in the channel flow, the division-by-density operation in the conventional hybrid code leads to an unexpected termination of the calculation.

In this study we adopted a new approach of hybrid simulation to a differentially rotating system. In this approach, the finite electron inertia is taken into account which gives an upper bound in the phase velocity of the R-mode wave, providing a reduced CFL condition. In addition, the new approach is almost free from the division-by-density operation and the extremely low density region generated in the channel flow can then be calculated appropriately. With this new code we would like to discuss the nonlinear evolution of the 2 dimensional kinetic MRI.

キーワード: 磁気回転不安定性, 運動論プラズマ, 降着円盤, 無衝突プラズマ, ハイブリッドコード

Keywords: Magnetorotational Instability, Kinetic Plasmas, Accretion disks, Collisionless Plasmas, Hybrid code

高ベータ磁化プラズマにおけるフローと自律的構造形成 Self-organization and flow in high-beta magnetized plasmas

永田 正義^{1*}
NAGATA, Masayoshi^{1*}

¹ 兵庫県立大学 大学院工学研究科
¹ University of Hyogo, Graduate School of Engineering

スフェロマックなど自己組織化機能の強い高ベータプラズマの自発的な磁界構造形成は、太陽コロナの間欠的爆発的現象（フレア）にみられる磁気リコネクション、キンク変形、粒子加速、衝撃波発生などの共通の物理機構が内在していることが明らかにされつつある。磁化プラズモイドやフローの駆動による巨視的なダイナモ磁場や磁気リコネクション発生の基礎過程は太陽コロナループや宇宙ジェットの発生機構、天体・宇宙惑星の回転熱対流に起因する帯状流の発生と構造形成にも大きく寄与している。また、核融合プラズマでは多彩な遷移現象を伴う自律的特性をうまく制御し、最適圧力勾配と高ベータを維持するためには、フローの発生と駆動が重要な役割を果たしていることが分かってきた。過去に見られたHモード遷移の要因は大きな径電場の形成とそれに伴うポロイダルシア流による乱流輸送の低減である。この様な渦や流れの構造形成が高ベータプラズマの磁場構造の自律的生成に大きく関与している。本講演では、国内外の各実験装置での観測をもとに、磁化同軸プラズマガンによるトロイダルプラズマの自律的磁界構造形成など、ヘリシティ駆動系のプラズマフローが強く関与する緩和現象に関する最近の研究のトピックスを紹介する。

電磁流体力学 (MHD) により記述できる天体宇宙現象はその構造のスケールが何桁も大きく違っているにも関わらず、固有の時間空間スケールを持たないことから地球上の実験室内で再現することができる。模擬するための技術的観点からは、この磁化プラズモイドやフローを幾何学的な配置とトポロジー構造を考慮にいれて柔軟に制御しながら発生させる必要がある。プラズモイドを効率よく作り出し、ダイナミックで非定常な MHD 現象を探求する際の最適な実験ツールとして、磁化同軸プラズマガン (MCPG) がある。この MCPG を用いた電磁加速パルス放電によって、スフェロマックと呼ばれる高ベータトラスプラズマを形成することができる [1]。MCPG は通常のマーシャルガンの出口付近に放射状に径方向磁場を印加しただけの簡単な構造をしている。太陽コロナの構造を支配しているのが太陽の磁界であり、内部の対流層で磁気流体ダイナモによって生産維持されている。この磁界はプラズマ流体に凍結されているため、磁力線を横切る運動が起電力を発生して電流を生み出し、この電流によってまわりに新たな磁界を生み出すという電磁流体力学の機構が働いている。スフェロマックはまさにこの電磁流体力学の基本法則に従って生成されており、MCPG の中ではそれらの法則がうまく作用している。歴史的には、1959-1964 年頃にアルヴェン達がこの方法で磁化プラズマリングの生成を行ったことが今日のスフェロマック生成の起源とされている。

Woltjer-Taylor 状態を記述する Force-Free 式、 $\nabla \times \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ (λ :ピンチパラメータ) は、境界条件と外部トロイダル磁束の拘束によって多様な解が存在する。単連結構造のスフェロマックの場合、この式の線形解の特性は二つの違った境界条件によって決定される。一つは、完全導体で囲まれた境界 ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = 0$) で、スフェロマックはガンから孤立しているような緩和配位である。もう一つは、ヘリシティ駆動系での緩和配位 (Jensen-Chu 配位と呼ばれる) であり、バイアス磁界がガン電極を貫いていることから一部の境界で $\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \neq 0$ の条件を与えて得られる解である。この駆動系の MHD 緩和の問題をさらに複連結構造のトラス配位に拡張させ、外部トロイダル磁界を考慮した場合、 $\nabla \times \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ の解析はさらに複雑になる。この時、J.B. Taylor は RFP との遷移分岐として Flipped した球状トロイダル緩和配位の存在を予測した。この複連結構造のトラス配位の緩和現象について、兵庫県立大の HIST 装置で実験が行われ、外部のトロイダル磁束を反転させると、ポロイダル磁束つまりトロイダル電流も自発的に反転する緩和が観測され、理論的な予測が実証された [2]。外部駆動系の緩和配位では、磁気ヘリシティ入射によるダイナモ電流駆動が実現でき、この方法によるトラスプラズマを長時間維持できることがすでに実験で検証されている [3]。

- [1] M. Nagata et al., Phys. Rev. Lett. 71, 4342 (1993)
- [2] M. Nagata et al., Phys. Rev. Lett. 90, 225001 (2003)
- [3] M. Nagata et al., Phys. Plasmas 10, 2932 (2003)

キーワード: プラズモイド, スフェロマック, フロー, 自己組織化, MHD 緩和, ダイナモ
Keywords: plasmoid, spheromak, flow, self-organization, MHD relaxation, dynamo

太陽大気における波動の観測 Observations of Alfvénic waves in the solar atmosphere

岡本 丈典^{1*}
OKAMOTO, Joten^{1*}

¹JAXA 宇宙研

¹ISAS/JAXA

太陽表面の温度が 6,000 度であるのに対して、太陽大気コロナの温度が 100 万度以上あることは半世紀以上前より知られているが、その原因についてはいまだに解明されていない。これは太陽物理学や天体物理学において長年の謎であり、「コロナ加熱問題」と呼ばれている。太陽に遍在する磁場が重要な役割を果たしていることはわかっており、

その中でも「波動加熱」説が有力な候補に挙げられている。Alfvén 波のような散逸しにくい波動は光球から遠距離にある上空コロナまでエネルギーを伝えることができるため、X 線で観測される太陽コロナの広がり観点からも都合が良い。しかしながら、そのような波動は長年検出されてこなかった。

ところが、2006 年に太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられると、期待されていた波動と思しき現象が発見された。太陽大気は微細な構造で構成されており、それが至るところで振動していることがわかった。プロミネンス (Okamoto et al. 2007) やスピキュール (De Pontieu et al. 2007) の観測から見つかった振動は Alfvén 波の伝播によるものと考えられる。2.5 分程度の振動周期と最大 20 km/s 程度の速度振幅を持ち、これらが進行波であるならコロナ加熱に十分なエネルギーを持っていることがわかった。しかし、これらの構造は波動の波長と同程度かそれ以下の長さしかないので、磁力線に沿った位相差の検出は非常に難しく、進行波か定在波かの区別は断定しがたい。

その後、データ取得方法や解析手法を洗練し、進行波を検出する試みがなされた (Okamoto and De Pontieu 2011)。スピキュールの撮像データを用いたこの研究では、まずスピキュール自体を自動検出し、それから波形のピーク位置の空間・時間変化を検出するためのアルゴリズムを作成した。磁力線が太陽面から鉛直に伸びているというスピキュールの形状を踏まえ、上向き進行波、下向き進行波、及びそれらが合成した定在波を分離することに成功した。それぞれの波動の存在割合や空間的・時間的分布を統計的に調べることで、スピキュールの進化と波動の発展には関連性があることがわかり、またスピキュール上端付近で波動が反射され、太陽面に戻っていることが示唆された。なお、ここで検出された波動は周期が 1 分程度の高周波波動で、輸送エネルギーの観点から 2.5 分の低周波波動の方がコロナ加熱には重要であると考えられる。

このような波動の研究は、コロナ加熱の直接的要因であるという理由だけではなく、磁場強度などの測定が困難な物理量の導出の手がかりとなる点で、非常に有用である。

本講演では、これらのひのでの結果や、最近観測が開始された太陽観測衛星 IRIS による太陽波動研究の最新情報も報告したい。

キーワード: 太陽, コロナ, 波動, ひので

Keywords: Sun, corona, wave, Hinode

放射凝縮による太陽フィラメント形成の2.5次元MHDシミュレーション 2.5D MHD Simulations of Solar Filament Formation by Condensation

金子 岳史^{1*}; 横山 央明¹
KANEKO, Takafumi^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki¹

¹ 東京大学 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

We investigate the formation mechanism of solar filaments by two-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) simulations. Solar filaments are cool dense plasma clouds in the hot tenuous corona. Filaments abruptly erupt with flares, hence, they are the important objects to comprehend the explosive events in the solar atmosphere. On the other hand, their formation mechanism is still unclear as well as the mechanism for eruptions.

Filaments always appear inside the coronal arcade fields, and the cool dense plasma is sustained by the magnetic forces. Observations show that filaments are categorized as normal polarity filaments or inverse polarity filaments. The normal polarity filaments have the same polarity with the surrounding coronal magnetic fields, while the inverse polarity filaments have opposite polarity. One candidate to explain the origin of the cool dense plasma is condensation by the radiative cooling in the corona. The current condensation model can reproduce the normal polarity filaments, but not the inverse polarity filaments. We propose a new condensation model to reproduce the inverse polarity filaments, and demonstrate it by two-dimensional MHD simulations including radiative cooling, thermal conduction along the magnetic field and gravity. Our model starts from the formation of the magnetic flux rope. The relatively dense plasma at the lower corona is trapped inside the flux rope and lifted up to the upper corona. The dense plasma causes imbalance between the radiative cooling and the background heating, while the thermal conduction along the closed field line of the flux rope does not suppress the thermal imbalance. Consequently, the condensation process is triggered and the cool dense plasma is formed. We test two types of heating term (one depends on magnetic pressure and the other depends on density) and two types of formation mechanisms of the flux rope (one is the converging motion at the footpoints of the coronal arcade field and the other is the interaction between the emerging flux and the coronal arcade field). As a result, the cool dense plasma is formed inside the flux rope in every case. We also show that our model has a possibility to reproduce the density of solar filaments, which is 10 -100 times larger than that of the surrounding corona, qualitatively.

キーワード: 太陽フィラメント, プロミネンス
Keywords: solar filament, prominence

フレアアーケード上空の高温高速流の観測・計算結果の比較研究 Comparative study of Observation and Calculation of Hot Fast Flow above a Solar Flare Arcade

今田 晋亮^{1*}
IMADA, Shinsuke^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Nagoya Univ. STEL

Solar flares are one of the main forces behind space weather events. However, the mechanism that drives such energetic phenomena is not fully understood. The standard eruptive flare model predicts that magnetic reconnection occurs high in the corona where hot fast flows are created. However, there is not enough observational knowledge of the physical parameters in the reconnection region. The inflow into the reconnection region, the temperature of the plasma in the reconnection region, and the temperatures and densities of the plasma jets predicted by reconnection, have not been quantitatively measured in sufficient. First, we will show a flare that occurred on the west solar limb on 2012 January 27 observed by the Hinode EUV Imaging Spectrometer (EIS) and found that the hot (~30MK) fast (>500 km s⁻¹) component was located above the flare loop and discuss how extent we understand the key-region of solar flare. Second, it is important to answer why the most observation cannot detect the predicted flow or temperature in the reconnection region. One of the reasons why we cannot observe inside the magnetic reconnection region is due to its darkness. Generally we can see the bright cusp-like structure during solar flare, although the reconnection region is faint/blind. One may think that the temperature in the reconnection region is enough higher than that of cusp-like flare loops. Thus the wavelength of emission from reconnection region is different from flare loops. However, this is not entirely true. Magnetic reconnection causes rapid heating. Thus ionization cannot reach to the equilibrium stage. We have calculated the ionization process in the down stream of Petschek type magnetic reconnection. From our result, we can clearly see that plasma cannot reach the ionization equilibrium in the down stream of slow-mode shock. The typical emissions from magnetic reconnection region are FeIX or FeXX, although the plasma temperature is equal to 40MK. The typical temperature and density of post flare loops are 10 MK and 10¹¹ /cc, and the dominant emissions from post flare loops are from FeIX to FeXXIII. Thus the wavelength of emission from reconnection region is not so much different from post flare loops. We will discuss how the emissions from reconnection region looks like by using several ionization calculations of magnetic reconnection.

キーワード: フレア, コロナ, 電離非平衡, 太陽
Keywords: flare, corona, non-equilibrium ionization, sun

Magnetic Evolutions at Extremely High Latitude Region during Polarity Reversal Observed with Hinode Magnetic Evolutions at Extremely High Latitude Region during Polarity Reversal Observed with Hinode

塩田 大幸^{1*}; 下条 圭美²; 佐古 伸治³; Kaithakkal Anjali John³; 常田 佐久⁴
SHIOTA, Daikou^{1*}; SHIMOJO, Masumi²; SAKO, Nobuharu³; KAITHAKKAL, Anjali john³; TSUNETETA, Saku⁴

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 国立天文台, ³ 総合研究大学院大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
¹STEL, Nagoya University, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³The Graduate University for Advanced Studies,
⁴ISAS, JAXA

The magnetic field in the Sun's polar region is a key ingredient of the solar dynamo mechanism because the polar field strength at a solar minimum has a correlation with solar activity of the following cycle. The evolution processes of the polar field (its polarity reversal and its build-up after the reversal) are thought to be caused by magnetic flux transport due to meridional flow and diffusion by turbulent convection. Nevertheless, our understanding of the meridional flow and diffusion in the polar region is still poor because of many difficulties in magnetic observation near the limb.

We recorded time evolution of magnetic polarity distribution within the whole of both polar regions derived from the high-accuracy spectropolarimetric observation with Solar Optical Telescope aboard Hinode. In the north polar region, the latitudinal polarity inversion line (PIL) between the preexisting negative polarity region and transported positive polarity region migrates from 60 degrees latitude at January 2012 to 68 degrees latitude at September 2012. Then the whole of the north polar region becomes positive at September 2013. The migration speed of the PIL is 5 m s^{-1} (January - September 2012) and then becomes 8.5 m s^{-1} (September 2012 - September 2013). According to a flux transport model, the speed-up is understood as a result of a diffusion process. In contrast, the whole of the south polar region observed in March 2013 has still ample positive field. The PIL locates out of the observed region (over 67 degrees latitude).

We examined a few parameter sets of the meridional flow pattern and the diffusion coefficient with an advection-diffusion model. The observed PIL migration in the north polar region can be explained well if there is slightly strong diffusion without the meridional flow.

キーワード: 光球, 磁場, 偏光分光観測, 極性反転, ダイナモ

Keywords: photosphere, magnetic fields, spectropolarimetry, polarity reversal, dynamo

分光観測で探る黒点彩層で頻発する微細ジェットの性質 Properties of small-scale jets in a sunspot chromosphere revealed through spectroscopic observations

勝川 行雄^{1*}; 大井 瑛仁²; Reardon Kevin³; Tritschler Alexandra³
KATSUKAWA, Yukio^{1*}; OI, Akihito²; REARDON, Kevin³; TRITSCHLER, Alexandra³

¹ 国立天文台, ² 京都大学, ³ 国立太陽観測所

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Kyoto University, ³National Solar Observatory

High-resolution observations with HINODE Solar Optical Telescope (SOT) revealed that small-scale jets frequently occur in a sunspot chromosphere though their driving mechanism is not well understood yet because of lack of spectroscopic information, such as temperatures and Doppler velocities, in the chromospheric observations with Hinode SOT. Spectroscopic observations of the small-scale jets were attempted using an Interferometric Bidimensional Spectrometer (IBIS) at the National Solar Observatory (NSO), and suggested that temperature enhancements associated with the jets happened in the lower chromosphere though their upward flows were not clearly detected (Reardon, Tritschler, Katsukawa 2013). We've tried obtaining another spectroscopic data set of a sunspot chromosphere with better spectral resolution with IBIS, and carried out careful analysis of spectral profiles and their temporal evolution. The study shows majority of the heated plasma in the lower chromosphere has a bulk flow slower than the sound speed in the chromosphere. The spectral profiles indicate enhancements in the blue wing, which suggests a part of the heated plasma has a supersonic upflow. In addition, small temperature enhancements are also found in the upper chromosphere near the end of the duration of the jets. The supersonic upflows are possibly responsible for heating in the upper chromosphere. This study provides an important observational support for slow-mode waves as acceleration and heating mechanism in the chromospheric jets. We are going to present a new spectroscopic observation of chromospheric jets made by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) spacecraft that has just started observations since 2013.

キーワード: 太陽, 彩層, ジェット, 分光観測, ひので, IRIS

Keywords: the Sun, chromosphere, jet, spectroscopy, HINODE, IRIS

抵抗性 MHD における移動する X 点を持つ高速磁気リコネクション Fast magnetic reconnection with a moving X-point in resistive MHD

三好 隆博^{1*}; 草野 完也²

MIYOSHI, Takahiro^{1*}; KUSANO, Kanya²

¹ 広島大学大学院理学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Graduate School of Science, Hiroshima University, ²STEL, Nagoya University

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の解明は、宇宙・天体プラズマ現象を理解するための未解明かつ最重要な課題の一つである。近年の高解像度の高磁気レイノルズ数磁気流体力学 (MHD) シミュレーションにより、薄化した電流シートのプラズモイド不安定性をトリガーとする磁気リコネクション過程の高速化の可能性が示されてきた [1]。特に最新のより精密な高解像度計算においては、プラズモイド不安定性による複数の 2 次的磁気リコネクションがペチェック型リコネクション的に発達する様子が観測された [2]。しかし、2 次的磁気リコネクション個々の詳細な構造やダイナミクスについては未だ不明である。

本研究では、2 次的リコネクションの移動に着目し、移動する X 点を持つ磁気リコネクションの詳細な構造とダイナミクスを明らかにすることを目的とする。特に、2 次元ハリス平衡に対して、移動する局所的異常抵抗を付与することにより、アウトフロー方向に非対称性を持つ高速磁気リコネクションモデルを導入する。HLLD 近似リーマン解法を用いた高解像度 MHD シミュレーションを実施し、非対称構造を詳細に解析した。また、磁気リコネクションにより駆動された流れによって、移動する X 点を持つ高速磁気リコネクションが自己維持的に発達する可能性についても検討した。

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

[2] K. Kusano, K. Nakabou, et al., in preparation

キーワード: 磁気リコネクション, 磁気流体力学, 異常抵抗モデル

Keywords: magnetic reconnection, MHD, anomalous resistivity model

動的ペッチェック・リコネクション Dynamical Petscheck Reconnection

草野 完也^{1*}; 中坊 孝司¹; 三好 隆博²; Vekstein Grigory³
KUSANO, Kanya^{1*}; NAKABOU, Takashi¹; MIYOSHI, Takahiro²; VEKSTEIN, Grigory³

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²広島大学大学院理学研究科, ³マンチェスター大学
¹STEL, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Hiroshima University, ³Manchester University

磁気リコネクションは様々な高温プラズマにおける爆発的なエネルギー解放機構と考えられている。しかしながら、磁気レイノルズ数 (S) が 10^{10} 以上もある太陽コロナのような高磁気レイノルズ数領域におけるリコネクションの高速化メカニズムは未だに明確に説明されていない。観測によれば太陽フレアにおけるリコネクション率は 10^{-2} 程度であると考られているが、Sweet (1958) や Parker (1963) による古典的な理論はリコネクション率が $S^{-1/2}$ で制限されることを示している。これに対して Petscheck (1964) はスローモード衝撃波を伴う高速リコネクションの定常解があることを理論的に示したが、その後の数値的研究によれば一様抵抗においては Petscheck の解は安定に維持できないことが示唆されてきた。そのため、リコネクションの高速化には局所的な異常抵抗や非 MHD 効果が不可欠であると広く考えられてきた。

こうした背景のもと、我々は高精シミュレーションによって高磁気レイノルズ数領域 ($S \sim 10^4 - 10^6$) における一様抵抗 MHD リコネクションの新たな高速化の可能性とそのメカニズムを探った。本研究では、Miyoshi and Kusano (2005) による HLLD スキームを用いてハリス解によって与えられた電流層のこれまでにない高分解 2 次元 MHD 計算を実施した。

その結果、高磁気レイノルズ数領域にこれまでに知られていない新しい高速リコネクションの解が存在することを見出した。磁気レイノルズ数が 10^4 を超えるとセカンダリ・テアリングモード不安定によって電流層の中に複数の X 点が形成され、多数の磁気島 (プラズモイド) が形成される。我々はその後、磁気島が成長すると共にプラズモイド間の電流層が V 型に分岐し、分岐電流層の頂点で電流密度が強化されリコネクションが高速化することを見出した。さらにこの分岐電流層はスロー・モード・ショックに発展することを明らかにした。その結果、リコネクション率は磁気レイノルズ数に関わらず 0.05 程度まで増加した。ただし、このスロー・モード・ショックは定常的に維持されず、プラズモイドの伝搬と共に生成と崩壊を繰り返すことが分かった。これらの結果は高磁気レイノルズ数領域では、一様抵抗下においても Sweet-Parker 型の電流層からなる従来のプラズモイド・リコネクションは「動的ペッチェック型リコネクション」と呼ぶべき新しい高速リコネクションに遷移することを示している。この遷移機構の詳細を講演で議論する。

キーワード: リコネクション, ペッチェック・リコネクション, MHD, シミュレーション, スロー・ショック
Keywords: reconnection, Petscheck reconnection, MHD, simulation, slow mode shock

ペチェク型磁気リコネクションに対する熱伝導効果 Thermal conduction effect on the Petschek magnetic reconnection

河野 隼也^{1*}; 横山 央明¹
KONO, Shunya^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki¹

¹ 東京大学

¹University of Tokyo

We simulated the magnetic reconnection including the nonlinear thermal conduction effect with two-dimensional MHD equations. Magnetic reconnection is considered to be the basic process of the solar explosive phenomena. In the atmosphere with high temperature and low density like solar corona, time-scale of the nonlinear heat conduction becomes shorter and can become comparable to the Alfvén time-scale. Thermal conduction effect should be considered. Previous studies have showed that, in the model of magnetic reconnection produced by Petschek, adiabatic slow mode shock wave generated from the localized diffusion region is dissociated into isothermal shock wave and conduction front due to the thermal conduction. However, the effect of the thermal conduction on the energy release rate in the magnetic reconnection is not explained enough in the past.

Here we investigated how the thermal conduction influences the energy conversion rate. We calculated the energy release rate in different magnitude of the magnetic diffusivity to see the dependence on the Lundquist number. As a result, due to the thermal conduction effect, adiabatic shock wave is dissociated into isothermal shock wave and conduction front and this makes temperature in the reconnection outflow jet smaller. In the outflow region with small temperature, density becomes larger. Considering mass conservation between the mass flux in the reconnection inflow and that in the outflow, inflow velocity is accelerated because of larger density in the outflow region. This causes increase of the energy release rate in the magnetic reconnection. That increase rate tends to become larger as the magnitude of magnetic diffusivity becomes smaller. Smaller magnetic diffusivity corresponds to the larger Lundquist number. In the real solar atmosphere, plasma gas has larger Lundquist number than that in this numerical simulation. This means that thermal conduction effect on the energy release rate in magnetic reconnection might become more effective in the real solar atmosphere.

キーワード: 太陽フレア, 磁気リコネクション, 熱伝導, コロナ

Keywords: solar flare, magnetic reconnection, thermal conduction, corona

Analysis on turbulent reconnection of three-dimensional resistive MHD simulation Analysis on turbulent reconnection of three-dimensional resistive MHD simulation

WANG, Shuoyang^{1*} ; YOKOYAMA, Takaaki¹ ; ISOBE, Hiroaki²
WANG, Shuoyang^{1*} ; YOKOYAMA, Takaaki¹ ; ISOBE, Hiroaki²

¹The University of Tokyo, ²Kyoto University

¹The University of Tokyo, ²Kyoto University

This study starts from a three-dimensional current sheet with random perturbation on velocity, in order to understand more on the 3D reconnection in a more general way.

Due to the periodic boundary condition, the core of current sheet quickly develops a resonance netlike pattern under tearing instability. Small reconnection site mainly form two chains on either side of the current sheet center and constitute a zigzag arrangement. The outflow from one reconnection site is fed into the counterpart on the other side thus composes a positive feedback system resembles even double tearing mode. As the inflow being enhanced, slow-mode shocks are identified along the current sheet. The conversion of the magnetic energy is further raised. Total kinetic energy of the current sheet presents 4 steps of development while first 3 exhibit linear growing tendency. At the same time, reconnection rate increases by 5 times compared with the early phase. Thus we have achieved faster reconnection without localized resistivity in a more universal idea.

磁気リコネクションの下流域におけるイオン加速機構 Ion Acceleration Mechanisms in the Exhaust Region of Magnetic Reconnection

高本 亮^{1*}; 藤本 桂三²
TAKAMOTO, Makoto^{1*}; FUJIMOTO, Keizo²

¹Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, ² 国立天文台

¹Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, ²National Astronomical Observatory of Japan

Magnetic reconnection is considered to be a key mechanism to convert magnetic field energy into plasma kinetic and thermal energy in various plasma phenomena, in particular, in many astrophysical systems. In collisional plasma, many works assuming magnetohydrodynamic approximation have revealed that plasma jets can be accelerated up to the upstream Alfvén velocity. However, in the case of the collisionless plasma, which is common in many astrophysical phenomena, there is still no conclusive theory of the ion acceleration mechanism and the maximum plasma jet velocity because of the complexities of plasma phenomena and the associated high numerical cost.

In this study, we performed a large-scale 2D particle-in-cell simulations with adaptive mesh refinement under an open boundary condition. The simulation was performed until the MHD condition is well-satisfied in the exhausts, which allows us to study a long-time dynamical evolution of the structure of the diffusion region and exhausts.

To analyze the detailed mechanisms of the ion acceleration in the exhausts, we also performed test particle simulations on the dynamical background plasma. We found that the ions are accelerated mainly by the electric field perpendicular to the reconnection plane. However, effects from other electric field components are not negligible;

in particular, the contribution from the electric field along the exhausts becomes significant as the ions are accelerated. We also compared the results with the velocity distribution functions inside of the exhausts.

In this talk, we present our numerical results of the particle-in-cell simulation, and discussed its physical interpretations of the structure. We also discuss the ion kinetic mechanisms leading to the formation of reconnection jets.

Keywords: magnetic reconnection, ion acceleration

磁気リコネクションのセパトリクス周辺におけるプラズマ波動と粒子加速 Waves and particle acceleration around the separatrixes of magnetic reconnection

藤本 桂三^{1*}
FUJIMOTO, Keizo^{1*}

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

Understanding the properties of waves in magnetic reconnection is very important in collisionless plasmas. The waves can transport the momentum and energy between the different species in plasmas, which results in the anomalous magnetic dissipation, particle heating, and formation of non-thermal particles. Therefore, the wave activities relevant to the kinetic interactions can have a significant impact on the dynamical behaviour of magnetic reconnection. Theoretical modeling of waves in the reconnection region is also beneficial to reveal the reconnection dynamics using in-situ satellite observations where wave properties are obtained in much higher time resolution than plasma distribution functions.

Recent satellite observations in the Earth's magnetotail have shown that the wave activities are significantly enhanced in a broad range of frequency around the separatrixes of anti-parallel magnetic reconnection. The waves were recognized as lower hybrid waves, Langmuir waves, electrostatic solitary waves (ESWs), and whistler waves. In most cases, they were associated with cold electron beams and density cavity. However, because of the limited space-time resolutions of the observations, it has been difficult to identify the generation mechanisms of the waves and their roles in magnetic reconnection.

In this study, large-scale 2D particle-in-cell simulations with adaptive mesh refinement have been performed under an open boundary condition. The simulations use a set of more realistic parameters than those in most other simulations, achieving lower plasma beta in the upstream region that leads to stronger electron beams in the reconnection region. The wave activities are dominant in the inflow side of the separatrixes. The waves are generated mainly due to the electron beams that constitute the Hall current. The relatively weak beams before strong acceleration trigger the Buneman instability which results in the waves with a frequency of the lower hybrid range. The strong acceleration occurs along the field line due to a localized potential hump and causes the density cavity. The intense electron beams excite the electron two-stream instability and the beam driven whistler instability. The former mode gives the Langmuir waves and the flat-top electron distributions in the parallel direction, both of which have been observed frequently in the Earth's magnetotail. The latter mode, on the other hand, scatters the electrons in the perpendicular direction, forming isotropic distribution with non-thermal high-energy tail. Both the Buneman and electron two-stream instabilities evolve the ESWs in the nonlinear phases.

In this talk, we present the generation mechanisms of the waves around the separatrixes and their roles in magnetic reconnection. The mechanism of the intense electron acceleration along the field line will be discussed.

キーワード: 磁気リコネクション, プラズマ波動, 粒子加速, 粒子シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, plasma waves, particle acceleration, particle-in-cell simulations

持続的磁気リコネクションにおける最小空間構造 Minimum spatial scale for maintaining vigorous magnetic reconnection

清水 健矢^{1*}; 藤本 正樹²; 篠原 育²
SHIMIZU, Kenya^{1*}; FUJIMOTO, Masaki²; SHINOHARA, Iku²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

¹University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

磁気リコネクションは磁力線が繋ぎ変わることで磁気エネルギーを爆発的に解放する現象で、地球磁気圏における地磁気嵐や太陽コロナにおけるフレア現象などにおいて重要な役割を果たす。大きく見れば磁気リコネクションは、電磁流体スケールにおける現象であるが、その効率は粒子スケールの電子拡散領域に支配される。近年の粒子シミュレーションにより、リコネクションレートが準定常状態における電子拡散領域の描像が捉えられた。その中で空間的に長く伸びる電子ジェットはリコネクションレートに影響しないことが示唆されている。しかしながらリコネクションレートを維持するための空間スケールは明らかではない。本研究では初期条件及び境界条件の異なる複数の粒子シミュレーションを実行し結果を比較することで、磁気リコネクションを維持するために必要な最小の空間構造を明らかにした。周期境界条件の下では、磁気リコネクションの発展とともにジェットは長く伸びるが、リコネクションレートの減衰直前時には下流に蓄積した磁場の影響により X-line 近傍まで短くなる。短く詰まったジェット構造が磁気リコネクションを維持するための最小ジェット構造である。一方壁境界条件の下では、堅い壁に阻まれるジェットと開けた空間に伸びるジェットをもつ非対称磁気リコネクションにより、X-line の移動を誘導した。X-line の移動中はリコネクションレートは維持されるが、壁側のジェットは短く詰まった構造となる。この壁側の構造と周期境界条件の減衰直前時に見られる詰まったジェット構造はよく一致した。周期境界条件と壁境界条件における結果を合わせ最小ジェット構造を定量的に示した。また、その最小空間構造は計算領域の大きさに依存しないこと、電子質量を小さくするにつれて最小空間構造は小さくなることを示した。

キーワード: 磁気リコネクション, 電子拡散領域

Keywords: magnetic reconnection, electron diffusion region

太陽外層コロナでの磁気熱不安定性 Magnetothermal instability in the solar outer corona

横山 央明^{1*}
YOKOYAMA, Takaaki^{1*}

¹ 東京大学
¹The University of Tokyo

太陽コロナへの、磁気熱不安定 (magneto-thermal instability, MTI) の適用について検討した。磁気熱不安定は、磁場が存在する成層大気中で非等方熱伝導が効くとき生じるもので Balbus (2000) によって提案された。重力のもとで、水平磁場とガス圧とで支えられている成層大気を考える。もしこの層が、重力の向きに温度が高くなる、つまり低層が高温の場合に、この不安定が起きる。成長時間は、重力加速度を温度スケール長で割った程度になる。磁気張力が復元力として働くので、磁場はじゅうぶん弱い必要がある。

太陽コロナ中では、密度が薄く温度が高い。さらにジャイロ半径が十分小さいため、非等方熱伝導がよく効く。したがって、磁場が十分弱くかつ温度勾配が重力と同じ向きであるような環境であれば、磁気熱不安定がはたらくかもしれない。このような状況は、数太陽半径付近の上空コロナに存在する可能性がある。そこでは、温度勾配は内向きでスケール長は太陽半径程度となっている。Quataert (2008) が求めた磁場強度に対する制限条件も、状況によっては満たす可能性があると考えられる。もしこの不安定が有効にはたらけば、非常に長周期ではあるが、太陽風に対する擾乱源になりうるかもしれない。

詳しく調べてみたところ、3 太陽半径付近で最大成長になる。しかし、典型的な磁場強度に対しては成長時間・成長波長ともに大きすぎ現実的ではない。磁場が 0.1 倍であれば、太陽風中の乱流の擾乱源の振動数とほぼ調和的であった。

キーワード: 太陽, コロナ, プラズマ, 磁気流体
Keywords: Sun, corona, plasma, magnetohydrodynamics

宇宙線パーカー不安定と銀河面対称性 Cosmic-ray Parker Instability and Galactic Plane Symmetry

工藤 哲洋^{1*}; 横山 央明²; 工藤 祐己³; 松元 亮治³
KUDOH, Takahiro^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki²; KUDOH, Yuki³; MATSUMOTO, Ryoji³

¹ 国立天文台, ² 東京大学, ³ 千葉大学

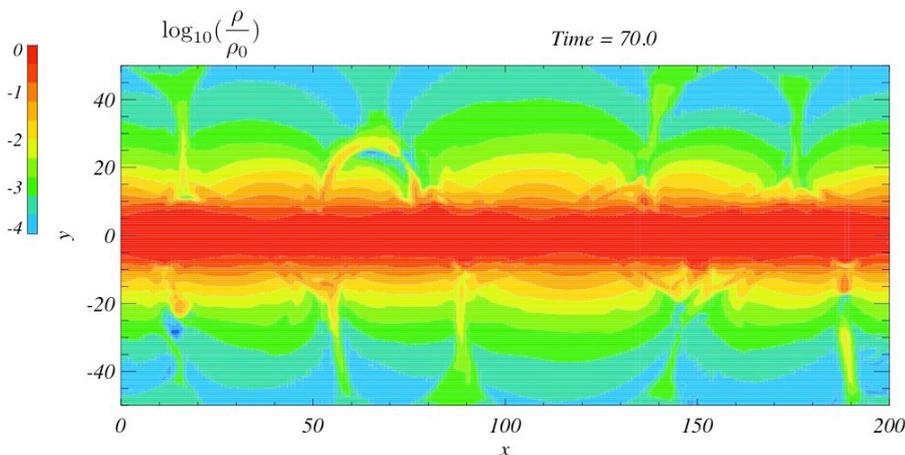
¹National Astronomical Observatory of Japan, ²University of Tokyo, ³Chiba University

宇宙線圧力を含めた2次元磁気流体力学数値シミュレーションを行い、パーカー不安定性について調べた。パーカー不安定性の研究で良く行われている銀河面対称性を仮定せずに、銀河面の上下全体を計算領域に含めて数値シミュレーションを行った。その結果、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、銀河面に対して対称な構造もそうでない構造も同じ様に成長した。一方、宇宙線圧力が比較的小さい場合は銀河面を挟んで半波長ずれたモードが卓越した構造を形成した。この結果を線形解析の結果からも確認し、宇宙線圧力が相対的に大きくなるにつれ、対称なモードの成長率が半波長ずれたモードの成長率に近づいていくことを確認した。

非線形段階においては、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、先に成長した磁気ループが急激に成長して大きなループに膨張し、後から成長してきた磁気ループの成長を阻害した。その結果、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、最終的に成長した磁気ループの波長が線形成長から予想される最大成長波長よりも数倍も大きな構造となった。

非線形段階で膨張した磁気ループは、同じように膨張してきたループと上空で衝突し、密度の高い構造を形成した。図はその非線形段階における密度構造を表す。図からフィラメント状の構造やループ状の構造が見られることがわかる。このような構造と観測から示唆されている似たような構造との比較や星形成との関係が将来の重要な課題となる。

キーワード: 磁気流体力学, 星間ガス, 宇宙線
Keywords: MHD, Interstellar gas, Cosmic rays



銀河ガス円盤におけるパーカー不安定性による低温高密度ループの形成 Formation of Dense, Cold Loops by Parker Instability in Galactic Gas Disks

彭之翰^{1*}; 工藤 祐己¹; 朝比奈 雄太¹; 松元 亮治¹
PENG, Chih-han^{1*}; KUDOH, Yuki¹; ASAHINA, Yuta¹; MATSUMOTO, Ryoji¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Faculty of Science, Chiba University

We performed two dimensional numerical simulations of Parker instability taking into account the cooling and heating functions of the interstellar medium (Inoue et al. 2006). Our numerical experiment is based on the simulation code "CANS+" in which the HLLD Riemann solver (Miyoshi & Kusano 2005) is used to solve the MHD equations. We found that the cold, dense filaments formed at the valley of magnetic field lines by Parker instability coupled with the cooling instability are deformed into loops of dense, cold gas when the Ram pressure at the left- and right-hand side of the filament is different. The maximum number density and the lowest temperature of cold, dense filament at 100Myrs is about 200 per cubic cm and 50K, respectively. These results support the model in which thermal instability triggered in the dense region formed by Parker instability is responsible for the formation of molecular loops found in the Galactic center region (e.g., Fukui et al. 2006).