

## 宇宙天体プラズマにおける KH 不安定の乱流発展の役割 Kelvin-Helmholtz turbulence in space and astrophysical plasmas

松本 洋介<sup>1\*</sup>  
MATSUMOTO, Yosuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University

Solar wind interactions with magnetized or un-magnetized planets destabilize planetary boundaries such as the magnetopause of the Earth magnetosphere and the ionopause of Mars and Venus. The Kelvin-Helmholtz (K-H) instability arising at a velocity shear layer has been considered to be important for momentum transport of the solar wind across the boundary layers, and been a universal nature of the planetary interactions. Linear and nonlinear growths of the instability depend on background plasma and magnetic field configurations. At the Martian ionopause, where the ionospheric ion escape is expected by the K-H instability, a fast ( $\sim 400$  km/s), dilute ( $\sim 1$  /cc) plasma flow directly interacts with a high density ( $10^4$ - $10^5$  /cc), low temperature (a few thousand K) plasma. The situation can be found similarly at the terrestrial magnetopause, where in-situ observations have often indicated growth of the instability and resultant transport of the solar wind plasma into the magnetosphere, in the sense that the K-H instability grows in a strongly inhomogeneous plasma.

In this presentation, we review nonlinear evolutions of the K-H instability in strongly inhomogeneous plasmas. The evolutions are characterized by the secondary instabilities such as the Rayleigh-Taylor instability and the magnetic reconnection, by which a coherent eddy structure are destroyed and the energy is transported to smaller scales. Recent kinetic plasma simulations have shown that electron-scale structures are spontaneously generated as a consequence of the secondary instabilities (Karimabadi et al., 2013). The micro-scale structure accompanied with the MHD-scale evolution enhanced mixing of collisionless plasmas. It was also found that the spatial size of the turbulent area was quickly broaden when coupled with a coalescence of large scale K-H modes, that is, the inverse energy cascade (Matsumoto & Seki, 2010). When nonlinear mode coupling was considered the time scale of the inverse energy cascade can be even faster than the fastest growing mode of the K-H instability. These nonlinear features in micro and macro scales have large impact on plasma transport process in the solar wind - planetary interactions as well as in astrophysical plasmas.

キーワード: ケルビン・ヘルムホルツ不安定, 乱流, 地球磁気圏, 惑星大気  
Keywords: Kelvin-Helmholtz instability, turbulence, Earth's magnetosphere, Planetary atmosphere

## 電気対流乱流を用いた乱流輸送の実験研究 Experimental Study on Turbulent Transport using ElectroHydroDynamics Convection Turbulence

永岡 賢一<sup>1\*</sup>; 吉村 信次<sup>1</sup>; 日高 芳樹<sup>2</sup>; 寺坂 健一郎<sup>2</sup>; 横井 喜充<sup>3</sup>; 政田 洋平<sup>4</sup>; 三浦 英昭<sup>1</sup>; 常田 佐久<sup>5</sup>; 久保 雅仁<sup>6</sup>; 石川 遼子<sup>6</sup>

NAGAOKA, Kenichi<sup>1\*</sup>; YOSHIMURA, Shinji<sup>1</sup>; HIDAKA, Yoshiki<sup>2</sup>; TERASAKA, Kenichiro<sup>2</sup>; YOKOI, Nobumitsu<sup>3</sup>; MASADA, Yohei<sup>4</sup>; MIURA, Hideaki<sup>1</sup>; TSUNETAKA, Saku<sup>5</sup>; KUBO, Masahito<sup>6</sup>; ISHIKAWA, Ryoko<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 核融合科学研究所, <sup>2</sup> 九州大学, <sup>3</sup> 東京大学, <sup>4</sup> 神戸大学, <sup>5</sup> 宇宙科学研究所, <sup>6</sup> 国立天文台

<sup>1</sup>National Institute for Fusion Science, <sup>2</sup>Kyushu Univ., <sup>3</sup>Tokyo Univ., <sup>4</sup>Kobe Univ., <sup>5</sup>ISAS, <sup>6</sup>NAOJ

乱流輸送は、広い分野で研究対象となっている課題である。Kolmogorov 則が支配する 3次元等方乱流では、現実の系としては興味が薄く、一般に我々の興味の対象は、構造形成を伴う非常に複雑な系である。近年では、乱流中の構造形成は、その系に内在する対象性の破れと乱流の結合により生じると考えられており、温度、密度、乱流強度などの非一様性や回転などの乱流の結合が議論されている。我々は、新たな実験的研究として、非常に制御性の良い電気対流乱流を用いた乱流輸送実験を提案している。

電気対流とは、液晶に電圧を印加したときに駆動される対流現象であり、Rayleigh Bernard 対流の重力場と浮力を電場のみで置き換えることに対応している。印加する電圧を上げると電気対流は、乱流へと遷移する。これは Rayleigh Bernard 対流系と同様の性質である。電気対流乱流の場合は、乱流を特徴付ける無次元パラメータを印加電圧により制御することが可能である。すなわち、Rayleigh 数は、電圧の 2 乗に比例し、Prandtl 数は、印加電圧の周波数の逆数に比例することが知られている。この電気対流乱流を回転ステージに乗せて実験を行うことで、Rossby 数の制御も可能である。つまり、3つの無次元パラメータを独立に制御することが可能である。

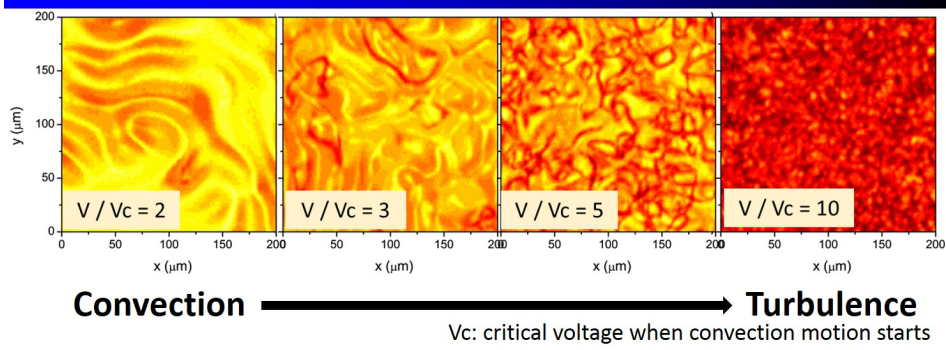
初期実験として、一様対称な電気対流乱流を用いた乱流輸送の実験を行った。小さなガラス球を液晶中に混入させ、電位対流乱流中の局所的な速度場を可視化することが可能であり、粒子追跡を行うことで、粒子輸送特性を調べることも可能となる。実験では、Hurst 数が 0.5 となり、ランダムウォークによる拡散過程が支配的な輸送が観測された。実行乱流輸送係数は、Rayleigh 数の 0.85 乗程度で増加する結果が得られた。これらの結果は、Navier-Stokes 方程式で記述される通常粘性流体に大変よく似た性質である。

講演では、これらの初期実験の詳細を紹介し、3つの計画を議論する。1つ目は、乱流輸送に対する非一様性の影響を調べる実験である。乱流強度が空間非一様な場合の乱流輸送特性の変化の計測を目指す。2つ目は、回転の効果である。電気対流乱流を回転場で生成したときに、乱流と回転が結合する状態での輸送特性の評価を試みる。これらの2つの実験は、乱流輸送に対するスカラー場と軸性ベクトル場の対象性破れの影響を明らかにする可能性があると考えている。最後は、星や惑星の対流層の実験室シミュレーションである。これまでに、回転球殻形状では乱流は半径方向に駆動することができなかった。電気対流乱流を使うことで、電場のみで乱流を駆動することができるため、半径方向に乱流駆動が可能になる。最初のターゲットは、Rossby 数の比較的大きな太陽対流層に挑戦する予定である。

キーワード: 乱流輸送実験, 対称性の破れ, 電気対流, 液晶

Keywords: turbulent transport experiment, symmetry breaking, EHC, liquid crystal

## EHC turbulence in planar shell



## 衛星データと画像自動認識手法を利用した太陽表面磁束輸送の研究 Investigation of magnetic flux transport on the solar surface based on satellite data and auto-tracking technique

飯田 佑輔<sup>1\*</sup>  
IIDA, Yusuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所  
<sup>1</sup> ISAS/JAXA

Spatial displacement of patch structure on the solar surface is investigated based on satellite data and auto-tracking technique. Magento-convection system on the solar surface is thought to be important not only as a cause of various solar activities but also as an actual observable magneto-convection on the stellar surface. One important issue is how magnetic flux is transported there. In global scale, the transport of magnetic field is treated as a diffusion now. However it is not clear that diffusion treatment is appropriate in magneto-convection system. The aim of this study is to understand if the diffusion treatment of magnetic field transport in global scale is good or not.

I investigate the dependence of mean-square displacement on elapsed time by using auto-tracking technique, which is thought to be one of the critical characteristics for global-scale description of transport.

The longest magnetogram data obtained by Hinode/FG is used. In that data, number of tracked patches is enough for statistical study, more than 40000. The obtained dependence show a different character above and below the point of  $L \sim 10^4$  km. Below that scale, it has a power-law dependence with an index of  $\sim -1.4$ , namely super-diffusion scheme. However, in the larger scale, the power-law dependence becomes  $\sim -0.6$ , namely sub-diffusion scheme. These characters can be explained by the network flow pattern qualitatively. Below the network scale, patch is transported by constant flow ( $\sim 0.3 \text{ km s}^{-1}$ ) from center of network cell to edge of the cell addition to the large ( $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$ ) perturbing flow of granulation. On the other hand, above the network scale, patches experience the trapping around stagnation point of network flow, which makes displacement of patch shorter than that only by diffusion motion.

キーワード: 太陽, 磁場, 対流, 拡散, 画像自動認識

Keywords: the Sun, magnetic field, convection, diffusion, feature recognition

## 太陽光球起源の吸収線プロファイルで探る対流運動の高さ方向の動的構造 Dynamic structure of convective motion depending on the height with line profile originating at solar photosphere

大場 崇義<sup>1\*</sup>; 飯田 佑輔<sup>2</sup>; 清水 敏文<sup>2</sup>  
OBA, Takayoshi<sup>1\*</sup>; IIDA, Yusuke<sup>2</sup>; SHIMIZU, Toshifumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構  
<sup>1</sup>The Graduate University for Advanced Studies, <sup>2</sup>ISAS/JAXA

太陽表面では全面に渡り、粒状斑と呼ばれる小さな粒状の模様が見られ、その周りは粒状斑間隙と呼ばれる暗いレーンで囲まれている。これらの構造は対流運動によって形成されている。太陽表面の対流運動は、上空にあるコロナの加熱や磁場のダイナミクスを起こすエネルギーの源であることから、対流運動について理解することは、これらの物理を明かす上で重要な意味がある。しかし、その空間スケールの小ささから粒状斑構造を分離した観測は困難であった。さらに、対流運動では高さ方向の構造が重要であると考えられるが、光球よりも内部を直接観測する手段は限られているため、観測的に高さ方向の構造を捉えることは難しかった。我々は、太陽観測衛星「ひので」に搭載された可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Telescope : SOT) で取得されたスペクトルデータの解析から、これら太陽表面对流の粒状斑構造、および高さ構造の直接観測を試みた。SOT のストークス偏光リメータ (Stokes Polarimeter : SP) は、Fe I の 630.15/630.25nm の吸収線の偏光プロファイルを精密計測している。SOT は優れた空間・波長分解能を持ち、粒状斑、粒状斑間隙それぞれを空間的に分解した詳細な線輪郭の形状について調べることができる。シーイングフリーである宇宙空間で観測を行っていることから、地上望遠鏡では難しい長時間観測が安定して実行できる。本研究ではこの長時間観測によって、太陽表面に現れる放射強度、速度場の時間的変動である 5 分振動を取り除くことで、より精密な解析が可能となった。

静穏領域にて観測された強度プロファイル (Stokes I) の線輪郭に注目した。太陽表面上での対流運動による線輪郭のドップラーシフトを調べることで、粒状斑の上下運動速度を得ることができる。これに加えて、我々は線輪郭の波長方向の構造に着目した。波長毎の吸収係数の差から、線輪郭の中心波長付近では高度が高い位置を、ウィング部分では低い位置を反映する。本研究では、この波長依存性を利用して、対流運動の高さ方向の動的構造を調べた。太陽表面上部と下部において、300m/s 程度の典型速度差が見られた。1km/s 以上の差が生じている場所も観測された。これらの値は、太陽光球の音速が 7km 程度であることを考慮すると、無視できない大きな加速、減速が太陽表面付近で起こっていることを意味している。また、粒状斑と粒状斑間隙において、異なった対流速度の変化が見られた。上昇流が発生している粒状斑では、太陽内部から減速的に対流が上昇していく一方、下降流が発生している粒状斑間隙では、上部から内部に向かって加速する傾向が捉えられた。しかしながら、これらの典型的な例に従わない場所も幾つか存在している。講演では、これらの解析から得られた太陽表面对流の典型構造の描像や、それに従わない場所についての議論を行いたい。

キーワード: 太陽, 対流, スペクトル, 光球

Keywords: sun, convection, spectrum, photosphere



## Particle acceleration and magnetic field generation in the relativistic jet-plasma interactions

### Particle acceleration and magnetic field generation in the relativistic jet-plasma interactions

ARDANEH, Kazem<sup>1\*</sup> ; CAI, Dongsheng<sup>1</sup>  
ARDANEH, Kazem<sup>1\*</sup> ; CAI, Dongsheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Science, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

<sup>1</sup>Department of Computer Science, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

The aim of the current work is to analyze particle acceleration and magnetic field generation related to propagation of a relativistic electron-ion jet front into an unmagnetized ambient electron-ion plasma. We have focused on the earliest evolution in shock formation. The analysis is on the basis of a three-dimensional relativistic electromagnetic particle-in-cell (PIC) code. The results demonstrate that the Weibel instability is responsible for generation of strong small-scale magnetic fields and subsequent particles acceleration. In agreement with previous studies the majority of the particles acceleration occurs behind the jet front. Initially, the incoming electrons respond to field fluctuations growing as a result of the Weibel instability. Therefore, the electron channels are generated and the total magnetic energy grows linearly due to the mutual attraction between the channels, and downstream advection of the magnetic field fluctuations. When the magnetic fields become strong enough to deflect the much heavier ions, the linear growth rate of instability decreases as a result of oppositely directed electron-ion currents and topological change in the structure of magnetic fields. The Ion channels are then merged and magnetic energy increases more slowly at the expense of the energy stored in ion stream. It has been clearly illustrated that the ion channels develop through a larger scale in the longitudinal direction, while extension of the electron filaments is limited. Hence, the ions channels are the sources of deeply penetrating magnetic fields. Our results are in valid agreement with those reported in the literature.

キーワード: Relativistic jets, Particle acceleration, Magnetic field generation, Weibel instability

Keywords: Relativistic jets, Particle acceleration, Magnetic field generation, Weibel instability

## プラズマ中におけるリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定の磁気流体的進化 Magnetohydrodynamic evolutions of the Richtmyer-Meshkov instability in astrophysical and laboratory plasmas

佐野 孝好<sup>1\*</sup>  
SANO, Takayoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心  
<sup>1</sup>Institute of Laser Engineering, Osaka University

The Richtmyer-Meshkov instability (RMI) in magnetohydrodynamics is of great interest in many fields such as astrophysical phenomena, laboratory experiments, and inertial confinement fusion. The RMI occurs when an incident shock strikes a corrugated contact discontinuity. A strong shock wave traveling through the density inhomogeneity of magnetized interstellar medium is a promising site of the RMI. This astrophysically common event plays a key role in determining the dynamics of supernova remnants and gamma ray bursts. Recent laboratory experiments are designed to test the magnetic field amplification due to the RMI by the use of laser-induced shock waves. In inertial confinement fusion, the RMI excited at several capsule interfaces amplifies the perturbations that seed the Rayleigh-Taylor instability. For the fast ignition approach, the utilization of an external magnetic field to guide the fast electrons is discussed proactively and sheds light on the impact of magnetohydrodynamic (MHD) instabilities during the implosion.

The inclusion of a magnetic field brings two important consequences into the RMI, which are the amplification of an ambient field and the suppression of the unstable motions. The magnetic field can be amplified by the stretching motions at the interface associated with the RMI. A strong magnetic field inhibits the nonlinear turbulent motions of the RMI. The vorticity generated by the interaction between a shock front and a corrugated contact discontinuity is the driving mechanism for the RMI. For the cases of MHD parallel shocks, the role of the magnetic field is to prevent the deposition of the vorticity on the interface, and stabilize the RMI.

We have investigated that the critical strength of a magnetic field required for the suppression of the RMI numerically by using a two-dimensional single-mode analysis. For the cases of magnetohydrodynamic parallel shocks, the RMI can be stabilized as a result of the extraction of vorticity from the interface. A useful formula describing a critical condition for magnetohydrodynamic RMI is introduced and is successfully confirmed by direct numerical simulations. The critical field strength is found to be largely dependent on the Mach number of the incident shock. If the shock is strong enough, even low-beta plasmas can be subject to the growth of the RMI.

キーワード: 磁気流体不安定, 天体プラズマ, 実験室プラズマ  
Keywords: MHD instability, astrophysical plasmas, laboratory plasmas

## マルチスケール・プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション Gyrokinetic simulation of multi-scale plasma turbulence

渡邊 智彦<sup>1\*</sup>

WATANABE, Tomo-hiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Nagoya University

よく知られているようにプラズマ現象の時空間構造は複数のスケール長で特徴づけられる。しかし、そのスケール分離性は必ずしも成立するとは限らず、プラズマにおけるマルチスケール現象として宇宙や実験室のプラズマに共通の研究課題となっている。磁気再結合などはその好例としてよく議論される。一方、乱流は巨視的スケールと微視的スケールの構造を同時に含み、広い波数領域にわたって連続的な揺動スペクトルを示す。ここでは、磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流輸送現象を対象とし、複数のスケール長をもつプラズマにおける乱流について議論する。

我々は、ジャイロ運動論にもとづいたシミュレーションにより、電子温度勾配が駆動する乱流 (ETG 乱流) と密度勾配が駆動する捕捉電子モード (TEM) が共存する系における輸送現象を調べている。乱流揺動を特徴づけるスケールとしては、電子とイオンのジャイロ半径の二つがある。上記の二つのモードが不安定であれば、まず、より短い時空間スケールをもつ ETG 乱流が発達した後、長い時空間スケールをもつ TEM 不安定性が成長する。我々は、TEM がさらに長スケールのシア流 (ゾーナル流) を駆動し、それにより ETG 乱流および TEM 揺動を抑制するという、興味深いケースを見出した。この結果は、ゾーナル流を介したスケール間の相互作用を利用して、異なる駆動源をもつ乱流輸送を低減させることのできる可能性を示唆している。

さらに我々は、イオン温度勾配が駆動する乱流 (ITG 乱流) も含むより大規模なジャイロ運動論的シミュレーションも進めており、イオンスケールから電子スケールまでの乱流揺動スペクトルとそのダイナミックな変動の様子を調べている。講演では、こうしたマルチスケール・プラズマ乱流の特徴と輸送の関連についてさらに議論したい。

\*本発表は、朝比祐一 (東工大)、前山伸也、仲田資季、井戸村泰宏 (原子力機構)、石澤明宏、沼波政倫、洲鎌英雄 (核融合研)、各氏との共同研究にもとづいている。シミュレーションの実行においては、共同研究によるサポートのもと、プラズマシミュレータ (核融合科学研究所)、ヘリオス (国際核融合エネルギー研究センター)、京 (理化学研究所計算科学研究機構)、の各計算機を利用させていただいた。また、課題の実施においては HPCI 戦略課題分野 4 体制構築課題ならびに科学研究費補助金の支援を得た。

キーワード: 乱流, 輸送, 運動論, シミュレーション

Keywords: turbulence, transport, kinetics, simulation



## 有限振幅ホイッスラー波動非線形発展に伴うプラズマ加熱 Plasma heating by nonlinear development of a finite amplitude whistler wave

齊藤 慎司<sup>1\*</sup>; 成行 泰裕<sup>2</sup>; 梅田 隆行<sup>3</sup>  
SAITO, Shinji<sup>1\*</sup>; NARIYUKI, Yasuhiro<sup>2</sup>; UMEDA, Takayuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学 大学院理学研究科, <sup>2</sup> 富山大学 人間発達科学部, <sup>3</sup> 名古屋大学 太陽地球環境研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Nagoya University, <sup>2</sup>Faculty of Human Development, University of Toyama, <sup>3</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

本研究では、有限振幅かつ長波長の右偏波波動の非線形発展について、空間二次元速度 3 次元の粒子シミュレーションを用いて研究を行った。波動が持つ磁場エネルギーは背景磁場の 10% とし、イオン慣性長程度の波長を持った波動について注目した。シミュレーション結果より、波動が持つ粒子速度の摂動を原因として、Modified Two Stream Instability が駆動されることを確認した。この不安定性により、背景場に対して準垂直方向に静電場が励起され、イオンが垂直方向に、電子が平行方向に優位なエネルギー増加が起こった。波動エネルギーは非常に短い時間（イオン回転時間以内）に約 70% 減少した。これは一次元的な parametric instability より効率的なエネルギー散逸を意味する。さらに、この非線形発展を介して、背景場に対して準垂直方向に波動が励起されていることを本シミュレーションによって見いだされた。ここでは非線形発展に伴うプラズマ加熱と準垂直伝搬波動について議論を行う。

キーワード: ホイッスラー波動, 太陽風, 非線形発展, プラズマ加熱, 粒子シミュレーション

Keywords: Whistler wave, Solar wind, Nonlinear development, Plasma heating, Particle-in-cell simulation

加速膨張する太陽風プラズマにおける非線形アルヴェン波の理論モデル  
A theoretical model of nonlinear Alfvén waves in expanding accelerating solar wind plasmas

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

During about forty years, a lot of studies have discussed the linear and nonlinear dynamics of Alfvén waves in solar wind plasmas. Although the uniform plasmas are assumed in most past studies, the effects of the inhomogeneity of background plasmas cannot be negligible in the inner heliosphere, in which several future spacecraft missions are planned. In the present study, a nonlinear evolution equation of envelope-modulated Alfvén waves is derived from the magnetohydrodynamic accelerating expanding box model by using the reductive perturbation method. The effects of the acceleration of solar wind to nonlinear evolution are discussed in detail.

キーワード: 太陽風, アルヴェン乱流  
Keywords: solar wind, Alfvénic turbulence

## 密度構造によるアルフヴェーン波共鳴と非線形現象への影響について Alfven wave resonance in density profile structure and the effect for nonlinear phenomenon

堤 昭裕<sup>1\*</sup>; 鈴木 建<sup>1</sup>  
TSUTSUMI, Akihiro<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Takeru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup> Nagoya University

Alfven 波等のプラズマ内における波動伝播は、宇宙空間における電磁気効果を伴った流体现象において普遍的な性質である。プラズマ内の密度構造の存在は、この様な波動の反射を引き起こし、一般的には一方向へのスムーズな波動伝播を妨げる。しかし井戸型の密度構造の場合、Alfven 波が密度構造に捕われ共鳴することにより、反射が起きなくなる様な状況があることが知られている。プラズマ内の密度谷の構造自体は普遍的な状況であるので、このような波の共鳴も普遍的現象であり、物理現象にも大きく関与していると考えられる。例えば、太陽表面付近の低密度領域では捕われた Alfven 波のエネルギー散逸が行われており、このことがコロナ加熱のメカニズムに関係しているとの指摘もある。

井戸型密度構造下での Alfven 波の伝播は、線形範囲下では解析的に求めることができる。よって、密度構造による反射が起これなくなり波動が捕われる条件も解析的に求めることができる。この段階においては規則正しい定常的な流れになっており、Alfven 波は本質的に横波であるので、密度や圧力変化といった圧縮性効果は伴わない。しかし波の注入が続いた場合、振幅が増大し波動の非線形効果が重要となる段階になる。この様な段階においては、捕われた波動同士の衝突による効果によって流れは非常に不規則になり、さらに元の井戸型密度構造もその構造を保っていらなくなり、共鳴条件そのものが自発的に変化してしまうという現象も起きる。この様な密度谷構造はプラズマ現象において普遍的であるので、上記の現象はプラズマ現象の理解において重要であるとも考えられる。

本研究では線形段階から非線形段階への移行による自発的な構造変化に注目して数値シミュレーションを行った。その結果、線形段階の捕われ現象や条件が、非線形段階での時間発展に対しても影響を与えうることが分かった。本発表ではその結果を紹介する。

## ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果 The effect of the ion gyro motion to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability

上野 悟志<sup>1\*</sup>; 梅田 隆行<sup>1</sup>; 中村 琢磨<sup>2</sup>; 町田 忍<sup>1</sup>

UENO, Satoshi<sup>1\*</sup>; UMEDA, Takayuki<sup>1</sup>; NAKAMURA, Takuma<sup>2</sup>; MACHIDA, Shinobu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> ロスアラモス国立研究所

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, <sup>2</sup>Los Alamos National Laboratory

Nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) at a transverse velocity shear layer in an inhomogeneous space plasma is investigated by means of a four-dimensional (two spatial and two velocity dimensions) electromagnetic Vlasov simulation. When the rotation direction of the primary KH vortex and the direction of ion gyro motion are same, there exists a strong ion cyclotron damping. In this case, spatial inhomogeneity inside the primary KH vortex is smoothed and the secondary Rayleigh-Taylor instability is suppressed. The ion gyro motion also suppresses the formation of secondary vortices in the spatial scale smaller than the ion gyro radius, when the rotation direction of the vortex and the direction of ion gyro motion are same. As a result, the secondary instabilities take place at different locations in the primary KH vortex, where the rotation direction of the secondary vortex and the direction of ion gyro motion are opposite. These results indicate that secondary instabilities occurring in the nonlinear stage of the primary KHI at the Earth's magnetospheric boundaries might show dawn-dusk asymmetries.

Keywords: the Kelvin-Helmholtz instability, Vlasov simulation, space plasma, nonlinear processes, secondary instabilities

## 巨大ブラックホールによる潮汐破壊事象の磁気流体・輻射流体数値実験 Magnetohydrodynamic and Radiation Hydrodynamic Simulations of Tidal Disruption Events by a Supermassive Black Hole

川島 朋尚<sup>1</sup>; 大須賀 健<sup>2</sup>; 松元 亮治<sup>3\*</sup>

KAWASHIMA, Tomohisa<sup>1</sup>; OHSUGA, Ken<sup>2</sup>; MATSUMOTO, Ryoji<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 上海天文台, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 千葉大理

<sup>1</sup>Shanghai Astronomical Observatory, <sup>2</sup>NAOJ, <sup>3</sup>Chiba University

恒星やガス雲が巨大ブラックホールに接近すると潮汐力によって破壊され、ブラックホールへの降着率が急激に増加する。このような潮汐破壊事象を観測することにより、降着率変動に伴う巨大ブラックホール降着円盤の光度変化や状態遷移についての知見を得ることができ、様々なタイプの活動銀河中心核相互の関係を明らかにするとともに、降着円盤の進化のタイムスケールを決定する角運動量輸送率を見積もることも可能になる。2014 年にはふたつの天体で、潮汐破壊に伴う増光が観測されると期待されている。第一は我々の銀河系中心の巨大ブラックホール Sgr A\* である。現在、G2 と名付けられた地球の 3 倍の質量のガス雲が落下しつつあり、2014 年 3 月にブラックホールに最接近すると予想されている。最近接点は降着円盤が存在すると予想されている領域内にあるため、潮汐破壊されたガス雲とブラックホール降着円盤が相互作用すると考えられる。我々は近似リーマン解法の一つである HLLD 法に基づく高次精度の 3 次元磁気流体コード CANS+ を用いてこの相互作用の磁気流体シミュレーションを実施した。その結果、ガス雲との衝突によって降着円盤内部の磁気乱流が強まり、ブラックホールへの降着率が 10 倍程度高まること、磁気流体ジェットが噴出すること等を示すことができた。降着率増加に伴う X 線・電波領域での増光は再近接点通過後 1 カ月程度で生じることもわかった。第二は Swift J1644+57 と名付けられた天体であり、2011 年 3 月に赤方偏移  $z=0.35$  の銀河中心で爆発的な増光が観測されている。この事象では恒星が巨大ブラックホールの潮汐力によって破壊されたと考えられる。この天体の光度は増光後 1 年以上にわたって百万太陽質量のブラックホールのエディントン光度以上であったが、2012 年 8 月に急激に減光した。これは、エディントン光度に対応する臨界降着率を超えて物質が落下する超臨界降着状態から、臨界降着率以下で降着する標準降着円盤への状態遷移と解釈できる。輻射と物質の相互作用を考慮した輻射流体シミュレーションを実施した結果、潮汐破壊物質の落下が続くことによって円盤に物質が蓄積されつつあり、減光後、1~2 年で円盤光度が再びエディントン光度程度まで増光することがわかった。X 線観測等から示唆される再増光時期について議論する。

キーワード: 降着円盤, 磁気流体力学, 輻射流体力学, ブラックホール, 潮汐破壊, 状態遷移

Keywords: accretion disk, MHD, radiation hydrodynamics, black hole, tidal disruption, state transition