

PEM026-01

会場:101

時間:5月24日 14:15-14:30

## 無衝突プラズマ中の大振幅アルフェン波の厳密解 Finite amplitude Alfvén waves in hot collisionless plasmas: An exact solution

成行 泰裕<sup>1\*</sup>

Yasuhiro Nariyuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 高知工業高等専門学校

<sup>1</sup> Kochi National College of Technology

非圧縮の円偏光アルフェン波が、有限振幅であっても流体系の厳密解であることは良く知られている。一方で、ブラソフ-マクスウェル系においてどのような円偏光アルフェン波が厳密解になり得るかは詳しく議論されてこなかった。これはBGK(Bernstein-Greene-Kruskal)モードの電磁波版に当たるもので、一般論自体は半世紀近く前に与えられていた[1]が、その後ほとんど取り上げられることが無かった。しかし一方で、太陽風プラズマに遍在しているアルフェン的な電磁場擾乱と非平衡なプラズマ速度分布の関連を議論する上では(準)平衡状態としてのアルフェン波の性質の理解が必須であるが、上記のようにこれまではほとんど議論されてこなかった。また、運動論コードを用いたアルフェン波の非線形発展についての研究では初期条件として流体系の関係式が用いられるのが通常であるが、時間発展初期に線形的な振動や分布関数の変形が見られており[2]、流体系の関係式が必ずしも平衡状態でないことが分かっている。

本講演では、有限温度のブラソフ-マクスウェル系の厳密解となる最も簡単な例として、一粒子系の保存量の線形結合に依存する分布関数[3]を議論する。ここでは、円偏光アルフェン波の各パラメータと温度異方性の関係について述べた後、各粒子の保存量の総和が一定という束縛条件下で最大エントロピー原理[4]を適用するとブラソフ-マクスウェル系を満たす分布関数が導出されることを示す。

[1] T. F. Bell, Phys. Fluids, 8(10), 1829 (1965).

[2] T. Terasawa, M. Hoshino, J. -I. Sakai and T. Hada, J. Geophys. Res., 91, 4171 (1986); B. J. Vasquez, J. Geophys. Res., 100, 1779 (1995).

[3] B. U. Ö. Sonnerup, and S. Y.-Su, Phys. Fluids, 10(2), 462 (1967).

[4] T. K. Nakamura, Astrophys. J., 531, 739 (2000); I. Arad, and D. Lynden-Bell, Mon. Not. R. Astron. Soc., 361, 385 (2005).

キーワード: アルフェン波, ブラソフ-マクスウェル系, 厳密解, 平衡状態, 太陽風プラズマ

Keywords: Alfvén wave, Vlasov-Maxwell system, exact solution, equilibrium state, solar wind plasma

PEM026-02

会場:101

時間:5月24日 14:30-14:45

## 3次元モデルにおける非線形ミラーモード磁場構造 Nonlinear Mirror Mode Structures in the Three-dimensional Model

小路 真史<sup>1\*</sup>, 大村 善治<sup>1</sup>, Lee Lou-Chuang<sup>2</sup>  
Masafumi Shoji<sup>1\*</sup>, Yoshiharu Omura<sup>1</sup>, Lou-Chuang Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学生存圏研究所, <sup>2</sup> 国立中央大学

<sup>1</sup>RISH, Kyoto University, <sup>2</sup>NCU, Taiwan

The temperature anisotropy ( $T_{per}/T_{par} > 1$ ) of ions in the magnetosheath drives the mirror instability. We performed two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) hybrid simulations in open boundary models to study the nonlinear mirror mode structures. In the open boundary systems, because of the propagation of EMIC waves, we can obtain the clearer non propagating mirror mode structures. We analyzed the relation between the mirror instability and the magnetic peaks and dips which are peculiar magnetic structures observed in the magnetosheath. In the 2D open boundary model, we obtain the clear magnetic dips at the nonlinear stage. The magnetic structures become larger in the parallel directions rather than the perpendicular directions. In the 3D model, on the other hand, the mirror instability makes the magnetic peaks structures with the same parameters. We obtain the cigar-like magnetic peaks structures, because of the nonlinear evolution of mirror instability and the symmetric structure in the perpendicular directions. We also performed parametric analyses on the ion beta in both 2D and 3D models. We find that the magnetic peaks also arise in the 2D high beta case as shown in the Cluster observations. Considering the pressure balance between the magnetic field and plasma, we show how the ion beta dependence of the magnetic structures appears. In all parameters, we obtain the magnetic peaks in the 3D models.

Keywords: Mirror instability, Magnetic peak, Magnetic dip, 3D hybrid simulation

PEM026-03

会場:101

時間:5月24日 14:45-15:00

## 無衝突プラズマのエントロピーにおける粗視化の問題 Coarse-grained entropy of collisionless plasmas

中村 匡<sup>1\*</sup>

Tadas Nakamura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 福井県立大学

<sup>1</sup>Fukui Prefectural University

宇宙空間プラズマでは、二粒子間衝突の頻度が無視できるほど小さいため、速度分布が長時間マックスウェル分布から大きく離れた状態になっていることが頻繁にある。このような非平衡の速度分布  $f(x,v)$  が与えられた場合、いわゆる情報エントロピーは  $f \log f$  を積分して計算することができる。しかしプラズマの分布関数が熱平衡分布（マックスウェル分布）から離れている場合、この情報エントロピーと熱力学的エントロピーは直接には結びついてはおらず、したがって、分布関数というミクロな量と温度や自由エネルギーなどのマクロな熱力学的物理量の関係も不明である。昨年秋のSGEPSS講演会で、仮想的な準静過程を使って「自由エネルギー」の上限を見積もる方法と、それにとまなう諸問題について報告したが、今回は、その問題の中で応用上もっとも深刻と思われる粗視化の問題について考える。

無衝突プラズマを記述するブラソフ方程式に従えば、 $f \log f$  を積分して得られたエントロピーは時間変化しないということが知られている。しかし、現実のプラズマに起こっている諸現象は不可逆であるので、この情報エントロピーは不可逆性の指標としては適当ではないと考えられる。そこで、位相空間内の有限体積内で平均した分布関数、つまり、いわゆるいわゆる粗視化した分布関数を使って情報エントロピーを計算すると、これが時間変化することは示せる。この時間変化が時間発展にともなって単調増加かどうかは未解決問題ではあるが、それを仮定すると、上述の準静過程による議論で、熱力学的な応用が可能になる。

ところが、この粗視化による情報エントロピーの計算には重大な問題がある。エントロピーの値そのものが、粗視化のプロセスにつかう位相空間体積平均のサイズによってしまうという問題である。このサイズは、情報エントロピーを可逆性の指標とするために仮想的に導入したものであって、選び方に恣意性があり、現実の物理量には対応しない。したがって、計算した情報エントロピーがこのサイズによるということは、そのエントロピーそのものが確定した物理量ではないことを意味する。

これは応用上重大な問題である。人工衛星などで観測されたプラズマ分布関数というものは、観測機の観測精度によって粗視化されたものであり、これからエントロピーを計算すると、値が観測精度によって変わってしまうことになる。また、粒子シミュレーションやブラソフなどでも、エントロピーを計算するときには、グリッドサイズなどで粗視化した分布関数を使わざるを得ないので、同様な問題が生ずる。講演では分布関数の粗視化とエントロピーの関係を議論し、確定した物理量としてなにをみつかわかべきを考える。

キーワード: 無衝突プラズマ, Vlasov 方程式, エントロピー, 熱力学

Keywords: Collisionless Plasma, Vlasov Equation, Entropy, Thermodynamics

PEM026-04

会場:101

時間:5月24日 15:00-15:15

## ダスト音波の効果を入れた磁気回転不安定性の非線型発展

## Non-Linear Evolution of Magneto-Rotational Instability under the effect of Dust Acoustic Wave mode

白川 慶介<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>1</sup>

Keisuke Shirakawa<sup>1\*</sup>, Masahiro Hoshino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

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

Magneto-Rotational Instability (MRI) is a plasma instability which is considered to take place in a magnetized differentially rotating astrophysical disks. It is first proposed by Velikhov in 1959 and later by Chandrasekhar in 1960. Its importance in astrophysical rotating disk was pointed out by Balbus and Hawley in 1991. This instability can generate MHD turbulence within a few periods of orbit and can generate a strong turbulent viscosity. Thus this instability is considered to play a major role in the context of accretion which requires a strong viscous effect to transport angular momentum in the disk.

On the other hand, recent study has shown that the dust grains which carries about 1% of mass in the astrophysical matter can carry about  $10^3$  of negative charges through several atomic processes like collisions with charged electrons or ions and photoionization effect. These new heavy plasma components may excite new dusty plasma wave modes in low frequency regime such as dust acoustic wave (DAW), and may modify behavior of plasma instabilities and plasma wave propagation.

Here, we perform both linear and non-linear analysis of multi-fluid plasma equations and study the modification of MRI by existence of charged-up dust particles. In this study, we assume fully ionized multi-component plasma with finite temperature to include the effect of dust acoustic wave (DAW). In the limit of parallel mode, we found the DAW may barely modify the behavior of MRI. On the other hand, result from the linear simulation implied a coupling between MRI and DAW in the oblique mode of MRI.

In this presentation, we would like to discuss a behavior of MRI in the non-linear stage and the effect of dusty plasma with results from numerical simulation.

キーワード: 宇宙プラズマ, 降着円盤, 磁気回転不安定性, ダストプラズマ

Keywords: Space Plasma, Accretion Disk, Magneto-Rotational Instability, Dusty Plasma

PEM026-05

会場:101

時間:5月24日 15:15-15:30

## 回転磁場型におけるプラズマ加速シミュレーション Numerical simulation of plasma acceleration due to Rotating Magnetic Field

山之口 和輝<sup>1\*</sup>, 羽田 亨<sup>2</sup>, 篠原 俊二郎<sup>3</sup>  
Kazuki Yamanokuchi<sup>1\*</sup>, Tohru Hada<sup>2</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院総合理工学府大海専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院総合理工学研究院, <sup>3</sup>東京農工大学工学研究院  
<sup>1</sup>ESST,Kyushu Univ, <sup>2</sup>ESST,Kyushu Univ, <sup>3</sup>Tokyo Univ. of Agriculture and Technol.

惑星探査などの長期ミッションにおいては比推力の高い電気推進機関が有効であり注目されている。これは推進剤としてプラズマを用い、これを加速することにより推進力を得る方法である。

しかし一方でイオンエンジン等、既存の多くの電気推進機関は有電極型のため、プラズマとの接触による電極摩耗による寿命の制限が大きな問題となっている。この現状を踏まえ、我々はプラズマ生成、プラズマ加速の両段階ともに無電極である、完全無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を始動した(HEATプロジェクト)[1]。

無電極プラズマ生成はヘリコン波を用いることにより、安定に高密度・低温度プラズマが得られることが実験的にほぼ確立している[2]。無電極プラズマ加速としてはいくつかの方法が考えられるが、本研究では回転磁場(RMF)型の加速機構について発表する[3]。この方法では、円柱プラズマに対して、その軸と垂直方向に回転外部磁場をかけることにより、プラズマ内部に周回方向の定常電子電流を誘起する。これは核融合分野で知られた、回転磁場による磁場逆転配位のプラズマ閉じ込め(FRC)の方法と同じものである。背景磁場に径方向成分があれば(発散磁場配位であれば)、励起された電子電流と背景磁場とで軸方向のローレンツ力が得られる[4]。このローレンツ力が円柱プラズマ内のイオンを加速・噴射することで定常推進力を得ることができるはずである。

本講演では、発散磁場のもとでのRMF機構について、数値シミュレーションを行った結果を発表する。円柱プラズマを流体として扱い、回転外部磁場を境界条件として与えて発展方程式系を解くことにより、プラズマ内への磁場浸透を定量的に評価することができる。径方向磁場の無い場合については既にいくつかの計算結果があるが[5]、推力のために必須の径方向磁場がある場合についてはほとんど研究がおこなわれていない。しかし、プラズマ加速を研究する上で発散磁場を導入した円柱プラズマ内の磁場の様子を把握することは非常に重要である。プラズマ散逸、外部磁場強度、そして径方向磁場の主要パラメータに依存してどのように磁場浸透が決まるかを議論する。

[1] 文部科学省科学研究費基盤研究(S)、ヘリコン源を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発、代表 篠原俊二郎、平成 21-25 年度。

[2] cf. Shinohara, S. et al., Phys. Plasmas vol. 16, 057104, 2009.

[3] Jones, I. R., Phys. Plasmas vol. 6, 1950, 1999.

[4] Inomoto, M., I.E.E.J. Trans. vol. 128, 319, 2008.

[5] Milroy, R. D., Phys. Plasmas vol. 6, 2771, 1999.

キーワード: 電気推進, 無電極推進, 回転磁場

Keywords: electric thruster, electrodeless thruster, rotating magnetic field

PEM026-06

会場:101

時間:5月24日 15:30-15:45

## 小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関する粒子シミュレーション Full particle-in-cell simulation study on the solar wind interactions with small scale dipole field

臼井 英之<sup>1\*</sup>, 森高 外征雄<sup>1</sup>  
Hideyuki Usui<sup>1\*</sup>, Toseo Moritaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of System Informatics

我々は、次世代惑星間航行システムとして JAXA で検討が進められている磁気プラズマセイル (MPS) の推力評価に向けて、衛星に搭載された超電導コイルによって作られる小型人工ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関する 2 次元および 3 次元全粒子シミュレーション解析を行っている。本講演では、特に、イオン慣性長以下のスケールのダイポール磁場を取り扱い、太陽風相互作用によって生じる境界層電流の形成プロセスおよびその特性を定量的に調べるとともに、その数値モデル化を試み、MPS 推力推定に役立てる。

MPS は、衛星周辺に形成された人工ダイポール磁場によって太陽風を受け止め、その運動量の一部を推力に変換して航行するシステムである。推力は、ダイポール磁場と太陽風の境界層に形成される電流によって生じる磁場と衛星コイル電流との間のローレンツ力で評価できる。すなわち、境界層電流の定量把握がキーとなる。

MPS では、イオン慣性長以下のダイポール場を形成するので、直接的にはイオンダイナミクスがダイポール場から大きく影響を受けるとは考えにくい。しかし、電子はこの小型ダイポール磁場においても磁化されているため、このスケールでは、まずダイポール磁場による電子ダイナミクス変動が重要となる。結果として、電子 イオン間でダイナミクスの差異が生じ、主として静電的效果によりイオンダイナミクスも大きく影響を受ける。この状況において形成される小型磁気圏の境界層電流特性を粒子シミュレーションによって調べる。特に、その形成場所、電流強度、層の幅について、シミュレーション結果から定量モデルを構築することを試みる。

また、太陽風磁場とダイポール磁場との相互作用の観点から、衝撃波構造、磁気リコネクションなどのプラズマ現象も生起すると考えられ、これらの現象が小規模磁気圏でどう生じるのか、また、これらが境界層電流形成にどのような影響を及ぼすかについても着目する。これまでの 2 次元シミュレーションでは、北向き IMF の場合でも磁気圏夜側において磁気リコネクションが生じ、繋ぎかえられた磁力線が太陽風電子とともに磁気圏昼間側に逆流し蓄積され、磁気圏内部プラズマの増加および電流密度のピークが見られた。また磁気圏前面境界層での圧力平衡の変化により、電子反射やショック構造形成が見られた。このように IMF を考慮することにより磁気圏拡大が見られ、結果として MPS 推力は非定常に増加することが確認できた。マルチスケール 3 次元粒子シミュレーションを今後行い、2 次元モデルで得られた結果を踏まえたうえで小規模磁気圏と太陽風の 3 次元的な相互作用についての詳細解析を進める。

キーワード: ダイポール磁場, 太陽風相互作用, 粒子シミュレーション, 磁気プラズマセイル

Keywords: dipole magnetic fields, solar wind interactions, particle simulation, magnetoplasma sail

PEM026-07

会場:101

時間:5月24日 15:45-16:00

## ミニ磁気圏の3次元ハイブリッドシミュレーション 3D hybrid simulation of the mini-magnetosphere

中村 雅夫<sup>1\*</sup>

Masao Nakamura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪府立大学

<sup>1</sup>Osaka Prefecture University

Interaction between the solar wind and the mini-magnetosphere of dipolar magnetized objects is investigated by a three-dimensional hybrid simulation, which treats the ions as kinetic super particles via particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid and additionally includes a fluid ion component to approximate the cold background plasma component. The hybrid simulation is suitable for the study of the mini-magnetosphere which scale is the order of the ion Larmor radius of the solar wind ions at the magnetopause, because the ion kinetic effects are important for the structure of the mini-magnetosphere. In the northward interplanetary magnetic field (IMF) solar wind case, the shape of the mini-magnetosphere more or less resembles the down-sized geomagnetosphere. On the other hand, in the southward IMF solar wind case, the dayside magnetopause boundary layer became unclear and the density is enhanced in the cusp region. We will discuss the structures of the mini-magnetosphere in the various solar wind conditions.

キーワード: 太陽風ミニ磁気圏相互作用, 3次元ハイブリッドシミュレーション

Keywords: Interaction between solar wind and mini-magnetosphere, 3D hybrid simulation

PEM026-08

会場:101

時間:5月24日 16:00-16:15

## 次世代無電極推進機関のための外部電磁場による粒子加速

## Particle acceleration by external electromagnetic field for the next generation electric thrusters

大塚 史子<sup>1\*</sup>, 羽田 亨<sup>1</sup>, 篠原俊二郎<sup>2</sup>

Fumiko Otsuka<sup>1\*</sup>, Tohru Hada<sup>1</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学・総合理工学研究院, <sup>2</sup>東京農工大学・工学研究院

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>Tokyo Univ. of Agriculture & Technol.

前回の講演では、HEAT プロジェクト (Helicon Electrodeless Advanced Thrusters) の一環として、次世代無電極推進機関の開発に向けて、発散磁場中における電磁場ポンドロモティブ場を利用した粒子加速モデルを紹介し、加速機構はポンドロモティブ力による加速とサイクロトロン共鳴加速との共存であることを報告した。前者の加速機構では、粒子は平均磁場に平行方向(円柱デバイスの軸方向)に直接加速される。一方、後者の加速機構では、垂直方向に加熱した粒子が磁気ミラーによる運動エネルギー変換により軸方向へ加速される。よって、垂直方向への壁損失を考慮すると、前者の加速機構が推進機関として都合が良い。本講演では、外部電場パルスの空間スケールや磁場勾配スケール、電場強度等のパラメータサーベイを行い、電磁場ポンドロモティブ加速が優位である領域を探る。また、空間的に非対称な波形を持つ電場による加速も検討する。さらに、中性粒子との衝突効果や内部プラズマによる外部電場遮蔽の影響をモデルに組み込み、粒子加速効率を議論する。

キーワード: 粒子加速, 電気推進, 無電極推進

Keywords: particle acceleration, electric thruster, electrodeless thruster

PEM026-09

会場:101

時間:5月24日 16:30-16:45

## 限られた領域から発生する3次元磁気リコネクションにおけるHall効果の重要性 Hall effects for three-dimensional magnetic reconnection with finite width along the direction of the current

中村 琢磨<sup>1\*</sup>, 中村 るみ<sup>2</sup>, Alexandra Alexandrova<sup>2</sup>, 久保田 康文<sup>3</sup>  
Takuma Nakamura<sup>1\*</sup>, Rumi Nakamura<sup>2</sup>, Alexandra Alexandrova<sup>2</sup>, Yasubumi Kubota<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, <sup>2</sup> オーストリア宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 情報通信研究機構  
<sup>1</sup>ISAS, JAXA, <sup>2</sup>IWF, OEAW, <sup>3</sup>NICT

We have performed three-dimensional Hall magnetohydrodynamic (MHD) simulations of magnetic reconnection with finite width along the current direction. Previous MHD simulations have revealed that such localized three-dimensional situations produce the so-called fast reconnection process, in which an Alfvénic fast and narrow jet flows from the localized reconnection region, and the reconnected field lines are strongly piled-up at the head of the jet. Our Hall MHD simulations also confirmed a similar fast reconnection process. On the other hand, our Hall MHD simulations also revealed that the Hall effects critically change the results obtained from MHD simulations regarding the physics of the reconnection region; in the Hall MHD cases, the reconnection region itself broadens in the current and anti-current directions due to the plasma flow related with the current. This means that the location and the size of the reconnection region are unsteady features in Hall MHD regime. In this presentation, we will show the detailed results of our Hall MHD simulations and discuss their implications to the observations in the planetary magnetotail.

キーワード: 磁気リコネクション, ホール効果, 3次元シミュレーション  
Keywords: magnetic reconnection, Hall MHD, three-dimensional simulation

PEM026-10

会場:101

時間:5月24日 16:45-17:00

## 高速磁気リコネクション時に形成される薄い電流層の3次元特性 3D dynamics of thin current layer formed during fast magnetic reconnection

藤本 桂三<sup>1\*</sup>

Keizo Fujimoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 理化学研究所計算宇宙物理研究室

<sup>1</sup> Computational Astrophysics Lab., RIKEN

Magnetic reconnection is a common process in space and laboratory plasmas, facilitating fast release of energy stored in the compressed magnetic field into plasma kinetic and thermal energy. It is well known in theoretical and simulation studies that a thin current layer characterized by the electron inertia length is formed around the magnetic X-line associated with 2D magnetic reconnection. In the thin current layer, the electrons are intensely accelerated by the reconnection electric field and are quickly ejected toward the downstream region. This electron behavior gives rise to the electric resistivity, so-called the inertia resistivity, in the current layer, which results in the dissipation of the magnetic field and plays a significant role in the reconnection processes. However, it is easy to expect that such a thin current layer would be unstable to current driven modes which propagate in the current density direction and are artificially suppressed in the 2D system. In fact, the simulation studies in a 2D plane orthogonal to the magnetic field have revealed that the Harris-type current sheet is unstable to the lower hybrid drift instability (LHDI) and a kink instability. In particular, it has been suggested that in high mass ratio regime ( $m_i/m_e > 100$ ) the kink mode decouples into two modes: the ion-ion kink mode with  $kyL \sim 1$  and a smaller-scale mode with an intermediate scale of the ion and electron Larmor radii. Because of the high nonlinearity and the limitation of computer resources, it has been very difficult to investigate the role of the current-aligned modes in magnetic reconnection.

In order to challenge large-scale 3D simulations of kinetic reconnection with high mass ratio ( $m_i/m_e > 100$ ), we have recently developed a massively-parallel code of the electromagnetic particle-in-cell (PIC) model with the adaptive mesh refinement (AMR). The AMR technique enables efficient high-resolution simulations of the current sheet evolution, while the parallelization on the distributed memory system allows us to use much computer resources for a single simulation run. Thus the massively-parallel AMR-PIC code is a strong tool to achieve the large-scale 3D simulations.

The present study investigates 3D effects of the reconnection processes for the cases of high mass ratio with  $m_i/m_e > 100$ . The main difference between 2D and 3D reconnections is the fact that in 3D case the thin current layer is unstable to a kink mode even in a quasi-steady phase. The kink mode has a scale with  $kyL_e \sim 1$  and propagates in the ion drift direction, where  $L_e$  is the half width of the thin current layer and is characterized by the electron inertia length. The mode is neither the LHDI nor the ion-ion kink mode. Since the wavelength is comparable with the electron meandering scale, this mode can scatter the electrons and yield the anomalous resistivity.

In this paper, we show the initial results of large-scale 3D simulations of magnetic reconnection and describe the 3D aspects of the processes in the thin current layer. The mechanisms of the magnetic dissipation and particle acceleration will be discussed.  
Keywords: 3D magnetic reconnection, AMR-PIC simulation, dissipation mechanism, kink mode

## 無衝突リコネクションで遅進衝撃波は本当に形成されるか? Can slow-mode shocks be really formed in collision-less magnetic reconnection?

東森 一晃<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>1</sup>

Katsuaki Higashimori<sup>1\*</sup>, Masahiro Hoshino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・地球惑星科学

<sup>1</sup> Tokyo Univ, Earth & Planetary Science

Petschek [1964] によって磁気リコネクションでの磁場からプラズマへのエネルギー転換のほとんどが中心の拡散領域から伸びる遅進衝撃波によって担われているという考えが提唱されてから、リコネクション中で遅進衝撃波が形成されるかどうかは宇宙物理学において長い間問題とされてきた。これまでに、観測と MHD シミュレーション両者によってリコネクションでの遅進衝撃波の存在が確認づけられてきた。しかしながら、Hybrid や Particle-In-Cell などの運動論的シミュレーションで、遅進衝撃波の存在を強く示唆するような、リコネクション境界層に沿った十分な磁場の散逸を示したものはない。

我々は無衝突プラズマで遅進衝撃波の形成を阻害する要因は、リコネクション境界層下流で発達するイオンの温度異方性であると考えている。(観測やシミュレーションなどの)多くの先行研究によって、そのような温度異方性は、Lobe から流れてきた冷たいプラズマ成分と PSBL (プラズマシート境界層)でのイオンビームの相対速度によって生まれることがわかっている。したがって磁場に平行方向のイオンの温度 ( $T_{i,para}$ ) は大抵、垂直方向の温度 ( $T_{i,perp}$ ) よりも高い。一方で異方性があるプラズマでの MHD Rankine-Hugoniot 理論から、温度異方性 ( $T_{i,para}/T_{i,perp}$ ) が大きくなるほど、上流の低いアルフベンマッハ数で遅進衝撃波は存在しなくなることが知られている。

これまでに我々は電磁 Hybrid コードを用いて、そのような温度異方性は磁気中性点からの距離が大きくなるほど緩和し、中性点からおよそ 150-200 イオン慣性長離れたところで遅進衝撃波が形成されるという予測を立てた。そこで我々はその問いに答えるのに十分な巨視的スケールでのシミュレーションを行う。我々は初めて、無衝突磁気リコネクション中の遅進衝撃波の存在を示唆する磁場の鋭い折れ曲がりと二股に分かれた電流構造を示す。本講演では、温度異方性がある場合の MHD RH 関係の観点から、リコネクション境界層に沿って形成される不連続面について議論し、さらにそのイオンスケールでの構造を明らかにする。

キーワード: リコネクション, 衝撃波, 遅進衝撃波, 温度異方性, ハイブリッド, リコネクション境界層

Keywords: reconnection, shock, slow shock, temperature anisotropy, hybrid, reconnection layer

PEM026-12

会場:101

時間:5月24日 17:15-17:30

## 自発的高速磁気再結合過程により生成されるプラズモイドの三次元構造とダイナミクス

### 3D structure and dynamics of plasmoids associated with spontaneous fast reconnection process

清水 徹<sup>1\*</sup>, 近藤光志<sup>1</sup>

Tohru Shimizu<sup>1\*</sup>, Koji Kondo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学宇宙進化研究センター

<sup>1</sup> Ehime university, RCSCE

二次元高速磁気再結合過程の三次元不安定性により生成されるプラズモイドの三次元構造とダイナミクスをMHDシミュレーションにより調べた。太陽フレアや磁気嵐において高速磁気再結合過程が重要な役割を果たしていると考えられている。高速磁気再結合過程の最大の特徴は、大規模なプラズマの塊(プラズモイド)が放出されることである。実際、近年の太陽フレアや地球磁気圏尾部の多点衛星観測において、そのようなプラズモイドの構造が観測され始めているが、それらの観測により得られた情報は未だ断片的であり、プラズモイドを放出しているであろう三次元高速磁気再結合の基本性質を理解するには未だ不十分である。最近の我々の数値的、理論的研究により、一次元電流層に加えられたわずかな三次元摂動が、二次元不安定そして三次元不安定を経て「間欠的でランダムな三次元高速磁気再結合過程」に向けて非線形的に成長することがわかってきた。本発表では、我々の研究成果をもとに、太陽フレアや地球磁気圏尾部の一次元的な電流層において生じるプラズモイドの持つべき三次元基本性質について明らかにする。

キーワード: 磁気再結合過程, 三次元, プラズモイド, 磁気流体力学

Keywords: magnetic reconnection, three-dimensional, plasmoid, MHD

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PEM026-13

会場:101

時間:5月24日 17:30-17:45

## The SCOPE mission The SCOPE mission

Masaki Fujimoto<sup>1\*</sup>

Masaki Fujimoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ISAS, JAXA

<sup>1</sup>ISAS, JAXA

SCOPE is a space plasma physics mission that consists of five spacecraft and that will perform simultaneous multi-scale observations of dynamic space plasma phenomena. The target processes are shocks, reconnection and turbulence. The orbit is  $\sim 10 \times 30$  Re in the earth's magnetosphere and in the solar wind, which allows the spacecraft to encounter and us to study these physical processes of fundamental importance. The simultaneous multi-scale observations are performed by a pair of mother-near-daughter (M-ND) spacecraft and the formation of three far-daughter (FD) spacecraft that surrounds the spacecraft pair. The M-ND pair with small inter-spacecraft distance will zoom-in to the electron dynamic scale while the FDs, located at larger distances, will observe the larger-scale (ion- and MHD-scales) dynamics that surrounds the key micro-region observed by the M-ND pair. The mission is planned to have substantial international contributions. In this talk, we will summarize the recent progress of the mission study. Expectations of space plasma simulations from the SCOPE's point of view are also described, with the intention of enhancing the ties between the mission study and the space plasma physics research via simulation.

キーワード: SCOPE, Multi-scale physics, Large-scale particle simulations

Keywords: SCOPE, Multi-scale physics, Large-scale particle simulations

PEM026-14

会場:101

時間:5月24日 17:45-18:00

## 磁気圏 - 電離圏結合におけるアルヴェン相互作用に関する運動論的モデル A kinetic model for Alfvénic interactions in magnetosphere-ionosphere coupling

渡邊 智彦<sup>1\*</sup>, 平木 康隆<sup>1</sup>

Tomo-Hiko Watanabe<sup>1\*</sup>, Yasutaka Hiraki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 核融合科学研究所

<sup>1</sup>National Institute for Fusion Science

Alfvénic interactions of the magnetosphere and the ionosphere (M-I) play a key role in spontaneous growth of quiet auroral arcs in the polar region. The feedback instability has been formulated in terms of the reduced magnetohydrodynamic (MHD) equations [1], and is recently investigated in detail in the dipole configuration with realistic Alfvén velocity profiles [2]. Non-linear simulations of the feedback instability in the M-I coupling system also reveal that the secondary instability growth of the Kelvin-Helmholtz-like mode leads to deformation of vortex, current, and density profiles associated with auroral arcs [1].

A variety of non-MHD effects, however, appear in the magnetosphere with low-density and high-temperature plasma. The finite ion gyroradius effect is, for example, non-negligible in the vicinity of the magnetic equator region with the weak magnetic field and the high ion temperature. While some of the non-MHD effects can be incorporated in terms of extended fluid models, a kinetic model is still necessary for more complete description of the magnetospheric plasma dynamics.

In this study, we consider a gyrokinetic model of the magnetospheric plasma, where the finite gyroradius and other kinetic effects are preserved while deleting fast time-scales associated with gyro-motions. In the gyrokinetics, the kinetic Alfvén waves are compactly formulated in terms of the polarization density of ion gyro-centers and the parallel electron current. We would discuss some basic properties of the kinetic model for Alfvénic interactions in the M-I coupling system in comparison to the reduced MHD model.

[1] T.-H. Watanabe, "Feedback instability in the magnetosphere-ionosphere coupling system: Revisited", *Phys. Plasmas*, Vol.17, 022904-1 - 022904-8 (2010).

[2] Y. Hiraki, and T.-H. Watanabe, in preparation for submission (2011).

キーワード: オーロラ, 磁気圏 - 電離圏結合, アルヴェン波, ジャイロ運動論, シミュレーション

Keywords: aurora, magnetosphere-ionosphere coupling, Alfvén wave, gyrokinetics, simulation

PEM026-15

会場:101

時間:5月24日 18:00-18:15

## ブラソフコードによる様々なスーパーコンピュータの性能評価 Performance evaluation of various supercomputer systems with Vlasov code

梅田 隆行<sup>1\*</sup>, 深沢 圭一郎<sup>2</sup>, 成行 泰裕<sup>3</sup>, 荻野 竜樹<sup>1</sup>

Takayuki Umeda<sup>1\*</sup>, Keiichiro Fukazawa<sup>2</sup>, Yasuhiro Nariyuki<sup>3</sup>, Tatsuki Ogino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 九州大学理学研究院, <sup>3</sup> 高知工業高等専門学校

<sup>1</sup>STEL, Nagoya University, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>Kochi National College of Technology

More than 99% of the "top 500" supercomputer systems in the world now adopt scalar processors. Almost 90% of the supercomputer systems consist of the 64bit x86 processor architecture. The POWER processor architecture has a 8% share, and the SPARC processor architecture has only a 0.4% share. In general, the computational efficiency (the ratio of the effective performance to the theoretical performance) of user applications on a scalar computer tends to be low (less than 10%), although the computational efficiency of the LINPACK sometimes exceeds 80%. Therefore, it is important to develop a high-performance user application for space plasma simulations on scalar-type massively parallel supercomputer systems. In this paper, a performance measurement study of the first-principle Vlasov-Maxwell solver is carried out on various scalar-type supercomputer systems in Japan.

In December 2010, the Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL) at Nagoya University installed a new supercomputer system, DELL PowerEdge R815. The DELL PowerEdge R815 supercomputer system at STEL has the same specification with the T2K open supercomputers in Japan. The system is a PC-cluster-type supercomputer consisting of 48 nodes, and each node has four AMD 12-core Opteron 6174 processors (2.2GHz, L2: 512KB/core, L3: 12MB/CPU) and 96GB DDR3 memory. As for the internode connections, each node has two InfiniBand QDR links with a bandwidth of 4GB/s per link. The peak performance of the system is 20TFlops. The system has just started pre-operation in January 2011, and the preliminary result of the performance measurement will also be presented.

キーワード: ブラソフ方程式, スーパーコンピュータ, プラズマ, 性能評価

Keywords: Vlasov equation, supercomputer, plasma, performance measurement

PEM026-16

会場:101

時間:5月24日 18:15-18:30

## マルチモーメント移流法を用いた電磁ブラソフシミュレーション Full-electromagnetic Vlasov simulations with the Multi-Moment Advection scheme

簗島 敬<sup>1\*</sup>, 松本 洋介<sup>2</sup>, 天野 孝伸<sup>3</sup>

Takashi Minoshima<sup>1\*</sup>, Yosuke Matsumoto<sup>2</sup>, Takanobu Amano<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>2</sup> 名古屋大学 太陽地球環境研究所, <sup>3</sup> 名古屋大学 理学研究科

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup>STEL, Nagoya University, <sup>3</sup>Department of Physics, Nagoya University

位相空間において分布関数の移流を直接解くブラソフシミュレーションは、粒子法固有の問題を解決できるとして提案されている。しかし、多次元の移流方程式を精度良く解くことが難しいことから、適切な手法は未だ確立していない。

我々はこれまで、数値拡散を極めて抑えて移流方程式を数値的に解く手法を開発してきた。このスキームは、情報エントロピーを精度良く保存するため、分布関数のグリッド上における点値のみならず、その0次から2次までの区分化されたモーメントを同時に更新することが特徴である。これまで、1次元・2次元スキームを開発し、静電・電磁ブラソフシミュレーションに適用してきた。

しかし、多くのプラズマ現象は、3次元速度空間の取り扱いを必要とする。そこで我々は今回、3次元スキームを開発した。結果、1次元・2次元と同様、線形移流問題及び剛体回転問題を極めて精度良く解くことに成功した。これは、磁化プラズマのブラソフシミュレーションにおいて最も重要な性能である。

本発表では、本スキームの設計の詳細について紹介する。また、本スキームを3次元速度空間に適用したブラソフシミュレーションのテスト結果についても紹介する。

キーワード: ブラソフシミュレーション

Keywords: Vlasov simulations

PEM026-17

会場:101

時間:5月25日 08:30-08:45

## SLAMS の流体モデル Fluid Modeling of SLAMS

羽田 亨<sup>1\*</sup>, 成行 泰裕<sup>2</sup>, Marty Lee<sup>3</sup>  
Tohru Hada<sup>1\*</sup>, Yasuhiro Nariyuki<sup>2</sup>, Marty Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院総合理工学研究院, <sup>2</sup>高知工業高等専門学校, <sup>3</sup>ニューハンプシャー大学

<sup>1</sup>ESST, Kyushu University, <sup>2</sup>Kochi National College of Technology, <sup>3</sup>University of New Hampshire

準平行な無衝突衝撃波の上流域には、しばしば Short Large Amplitude Magnetic Structures (SLAMS) と呼ばれる特徴的な大振幅磁場構造が現れる (Schwartz et al., JGR, 1992)。クラスター衛星データの解析等により SLAMS の観測的研究が進展中である一方 (Lucek et al., Annales Geophys., 2004)、これが生成される物理的メカニズムについては未だよくわかっていないのが現状である。しかし SLAMS が成長するのは衝撃波起源と考えられるイオンプラズマ圧勾配の中であることをふまえると (Giacalone et al., GRL, 1993)、熱いイオンのフラックスが SLAMS のトータル磁場を介してエネルギーを供給していると考えるのが自然であろう。つまり流体の言葉では、イオンの熱流束による非線形逆ランダウ減衰が本質的な励起機構であると言える。この考え方に基づき、本研究では SLAMS の流体モデルを提案する。温度勾配不安定性を記述するための Hammett and Perkins (PRL, 1990) 流の熱流束モデルを含む非線形 MHD モデルを考える。逆ランダウ減衰がある場合には SLAMS と類似の磁場構造が成長する。講演ではモデルと結果の詳細について述べる。

キーワード: 衝撃波上流域, SLAMS, 非線形ランダウ減衰, イオン熱流束

Keywords: foreshock, SLAMS, nonlinear Landau damping, ion heat flux

PEM026-18

会場:101

時間:5月25日 08:45-09:00

## 衝撃波加速粒子の空間拡散について Time Sequence of Energetic Particle Spectra in Quasi-parallel Shocks

杉山 徹<sup>1\*</sup>

Tooru Sugiyama<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

We have studied the transport properties of energetic particles in the upstream region of parallel shocks considering the possibility of anomalous diffusion where the density decay profile has not an exponential profile but a power-law behavior. The results obtained from hybrid simulation model show that the energetic ions with energy of 50-100  $E_0$  ( $E_0$  is the shock ram energy) spatial profiles are well fitted by a power law distribution and that the value of  $\langle dx^2 \rangle / t$  increases in time. This implies that particle propagation can be described by a super-diffusion profile even though the power of the magnetic wave is sufficient large to scatter the particles.

キーワード: 衝撃波, 粒子加速, 拡散現象

Keywords: shock wave, particle acceleration, diffusion process

PEM026-19

会場:101

時間:5月25日 09:00-09:15

## 低マッハ数衝撃波による相対論的電子加速 Relativistic electron acceleration in a low Mach number shock

松清 修一<sup>1\*</sup>, 山崎了<sup>2</sup>, 大平 豊<sup>3</sup>, 梅田 隆行<sup>4</sup>

Shuichi Matsukiyo<sup>1\*</sup>, Ryo Yamazaki<sup>2</sup>, Yutaka Ohira<sup>3</sup>, Takayuki Umeda<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 九大総理工, <sup>2</sup> 青学大理工, <sup>3</sup> 高エネルギー加速器研究機構, <sup>4</sup> 名大 STE 研

<sup>1</sup>ESST Kyushu Univ., <sup>2</sup>Aoyama Gakuin Univ., <sup>3</sup>KEK, <sup>4</sup>STEL Nagoya Univ.

An extreme case of a shock (gradient) drift acceleration process of reflected electrons at low Mach number collisionless shocks is investigated by utilizing one-dimensional electromagnetic full particle simulation. A relativistic shock drift acceleration occurs even in a low Mach number ( $< 10$ ) moderate quasi-perpendicular shock if a ratio of electron plasma to cyclotron frequencies is small and a plasma beta is high. Such a condition may be realized in some astrophysical environments like a large scale shock in a galaxy cluster, a cosmic ray modified subshock of a supernova remnant, etc. For an almost perpendicular shock with a Mach number of 7.8, a plasma beta of 3, and the frequency ratio of 3, the shock drift acceleration leads to upstream relativistic reflected electrons forming a local relativistic ring-beam distribution function. Additional periodic simulations with a local approximation indicate that the reflected electrons may be possible to self-generate upstream oblique waves, and further be back-scattered toward a downstream by those waves. Coherent wave packets play an important role in the process of back-scattering of the reflected electrons.

キーワード: 相対論的電子加速, 衝撃波, 低マッハ数

Keywords: relativistic electron acceleration, shock, low Mach number

PEM026-20

会場:101

時間:5月25日 09:15-09:30

## プラズマ衝撃波による沿磁力線加速 Field aligned accelerations by plasma shock waves

竹内 智<sup>1\*</sup>

Satoshi Takeuchi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 山梨大学

<sup>1</sup>University of Yamanashi

超新星残骸の衝撃波面に沿って高エネルギー粒子の分布が観測されている。ここでは、この高エネルギー粒子加速の現象を説明するために、星間磁場中を伝播する衝撃波の磁場に沿った粒子加速のモデルを提案する。相対論的な運動方程式の理論的解析から、最高エネルギー利得の公式が導き出された。テスト粒子によって獲得されるエネルギー利得は、衝撃波速度や衝撃波磁場と星間磁場の交差角度、星間磁場の強さ、加速時間の積によって与えられることが示された。

超新星残骸の強い衝撃波は、宇宙線の高エネルギー加速器の候補として注目されている。粒子加速の機構としては、2つのタイプの拡散型衝撃波 (Diffusive Shock Acceleration: DSA) によって説明される。1つは星間磁場の方向が衝撃波面の法線に垂直となる垂直衝撃波であり、もう1つは星間磁場の方向が衝撃波面の法線に平行となる平行衝撃波である。ここで提案する衝撃波のモデルは、星間磁場の方向が衝撃波面の法線に垂直であり、かつ衝撃波の磁場の方向にも垂直となる衝撃波である。

一様で定常な星間磁場中を伝播するプラズマ衝撃波を考える。衝撃波の磁場は星間磁場と平行であり、衝撃波の電場は星間磁場と垂直の方向となるような電磁場配置を考える。実験室系では、衝撃波の磁場の方向に電場は存在しないので、沿磁力線加速を予測することは困難である。そこで、衝撃波の座標系に乗ってテスト粒子が感じる電場と磁場について考える。波の座標系では、衝撃波の電場は消失する。一方、星間磁場は移動するため電場が発生するが、電場の方向は衝撃波の磁場と同じ方向となる。したがって、衝撃波面の近傍に存在するテスト粒子は、沿磁力線方向の電場によって加速されることになる。

テスト粒子が獲得するエネルギー利得は、星間磁場と衝撃波の磁場が交差する角度に依存することが導き出された。角度が90度よりも小さいと利得は小さくなる。ところが角度が90度よりも大きくなると、衝撃波の磁場と逆方向の磁場成分ができるため、衝撃波の前面に磁気中性面が形成されることが分かった。磁気中性面に捕捉されたテスト粒子は捕捉から逃れることができない [1]。その上、磁気中性面の近傍では磁場の方向に電場が存在するため、際限なく加速が継続されることが示された。

超新星残骸の衝撃波面では幅の狭いフィラメントがいくつか観測されている [2]。これは衝撃波の磁場に巻きついていく荷電粒子である可能性が高い。また、加速時間が短い高エネルギー現象も観測されている [3]。これらの現象は、ここで提案した沿磁力線加速の機構で説明が可能である。したがって、沿磁力線加速は超新星残骸の有望な加速機構の一つとして考えることができる。

[1] S. Takeuchi: Phys. Plasmas, Vol.12, 102901 1-6 (2005).

[2] A. Bamba et al.: Astrophys. J. Vol.589, 827 (2003).

[3] Y. Uchiyama et al.: Nature, Vol.449, 576-578 (2007).

キーワード: プラズマ衝撃波, 沿磁力線加速, 超新星残骸

Keywords: plasma shock wave, field aligned acceleration, supernova remnant

PEM026-21

会場:101

時間:5月25日 09:30-09:45

## 準垂直衝撃波の衝撃波遷移層中の電子加速プロセス Electron acceleration in the foot region of a quasi-perpendicular shock

篠原 育<sup>1\*</sup>, 藤本 正樹<sup>1</sup>

Iku Shinohara<sup>1\*</sup>, Masaki Fujimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所 / 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>ISAS/JAXA

We have carried out a three-dimensional simulation of a quasi-perpendicular shock. The full mass ratio  $M/m=1840$  was taken for this simulation, and we can access cross-scale coupling processes in the shock transition though only one ion inertia length square was allocated to the shock plane. In this simulation, efficient production of non-thermal electrons is observed. As reported by Shinohara and Fujimoto (2011), complicated wave activity is found at the most front end of the shock foot region. Comparing with results of 1-D and 2-D simulations with the same parameters, we found that both non-thermal electrons and wave activity emerge only in the 3-D simulation. Detailed analysis of accelerated electron trajectories shows that the acceleration efficiency depends on the phase of the shock self-reformation. Accelerated electrons are keep staying in the foot region due to the scattering by the electromagnetic field fluctuation. The final stage of acceleration at the lamp region occurs during the steepen phase of the self-reformation. The electron acceleration is observed in higher mass ratio runs. We will discuss physics of electron acceleration mechanism and its relation with three-dimensional behavior of the shock transition region.

キーワード: 準垂直衝撃波, 電子加速

Keywords: quasi-perpendicular shock, electron acceleration

PEM026-22

会場:101

時間:5月25日 09:45-10:00

## 電子・陽電子・イオンプラズマ中の相対論的垂直衝撃波粒子加速におけるシンクロトロン-ワイベル不安定の効果 Effects of Synchrotron-Weibel Instabilities on Relativistic Perpendicular Shock Acceleration in Pair-Ion Plasmas

加藤 藍<sup>1\*</sup>

Ai Kato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Dept. Earth & planet. Sci., Univ. Tokyo

近年様々な天体で相対論的粒子はシンクロトロン放射として観測されているが、その加速メカニズムは未解決問題である。これらの非熱的粒子を生成する天体、例えば Pulsar, AGN, GRB には相対論的プラズマ流とともに衝撃波が存在している。したがって、相対論的衝撃波が粒子加速に重要な役割を担っていると考えられる。

しかし、無衝突衝撃波粒子加速において、上流のエネルギーが下流のプラズマにどのように配分され、どのメカニズムが非熱的粒子を生じるのかは、未だ解明されていない。これらは MHD のマクロな視点では解明できないため、ミクロな粒子加速メカニズムを追うために用いられている研究手法が PIC シミュレーションである。Hoshino et al.(1992) や Amato & Arons(2006) においても、電子・陽電子・イオンプラズマの中での相対論的衝撃波は PIC シミュレーションで研究されており、電子・陽電子プラズマがシンクロトロン不安定によって衝撃波近傍で効率よく加速されることがわかっている。

今回の発表では、電子・陽電子・イオンプラズマにおける衝撃波粒子加速の 2 次元シミュレーションの結果を紹介する。 $\sigma = 1$  のプラズマでは、シンクロトロン不安定だけでなく、2 次元構造を伴うワイベル不安定が粒子加速に効くことが予想される。私たちは、背景磁場を面内方向と面外方向と変えて計算し、それぞれ上に挙げた 2 つの粒子加速メカニズムがどのように作用するか、そして電子・陽電子加速効率にもたらす効果を議論した。ワイベル不安定は面外の背景磁場にのみ抑制されるため、背景磁場が面外方向の場合は 1 次元同様にシンクロトロン不安定により陽電子が加速された。背景磁場が面内方向の場合はワイベル不安定による電子の加速が見られるようになるが、 $\sigma(\text{elec}) = 0.02$  のプラズマでもシンクロトロン不安定による陽電子加速が確認できた。

PEM026-23

会場:101

時間:5月25日 10:00-10:15

## 垂直衝撃波の再形成に関する2次元全粒子シミュレーション On the reformation at perpendicular shock: 2D full PIC simulation

木谷 佳隆<sup>1\*</sup>, 梅田 隆行<sup>1</sup>, 荻野 竜樹<sup>1</sup>, 松清 修一<sup>2</sup>  
Yoshitaka Kidani<sup>1\*</sup>, Takayuki Umeda<sup>1</sup>, Tatsuki Ogino<sup>1</sup>, Shuichi Matsukiyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 九州大学総合総合理工学研究院  
<sup>1</sup>STEL, Nagoya Univ., <sup>2</sup>ESST, Kyushu Univ.

A full particle-in-cell (PIC) simulation study is carried out on the reformation at a quasi-perpendicular collisionless shock with a relatively low Alfvén Mach number ( $MA=5$ ) and shock-normal angle of 80 degrees. Previous self-consistent one-dimensional (1D) hybrid and full PIC simulations have demonstrated that ion kinetics is essential for the non-stationarity of perpendicular collisionless shocks. These results have shown that reflection of ions at the shock front is responsible for the periodic collapse and redevelopment of a new shock front on a timescale of the ion cyclotron period, which is called the shock reformation. Recent 2D hybrid and full PIC simulations, however, suggested that the shock reformation does not take place in exactly-perpendicular shocks with  $MA \sim 5$ . By contrast, another 2D hybrid PIC simulation showed that the shock reformation persists in quasi-perpendicular shocks  $MA \sim 5$ . Although these recent two works seem to be inconsistent with each other, this reason is not well understood because of several differences in simulation conditions.

In the present study, we performed a 2D full PIC simulation of a quasi-perpendicular shock to make a direct comparison between quasi- and exactly-perpendicular shocks with almost the same condition. It is found that the time development of the shock magnetic field averaged over the shock-tangential direction shows the transition from the reformation to no-reformation phase, which is consistent with the recent full PIC simulation results of exactly-perpendicular shocks. On the other hand, local shock magnetic field shows the evident shock reformation, and the period of the reformation is changed in the no-reformation phase.

キーワード: 垂直衝撃波, 粒子シミュレーション, 再形成  
Keywords: perpendicular shock, PIC simulation, reformation

PEM026-24

会場:101

時間:5月25日 10:15-10:30

## イオンスケール揺らぎ存在下における電子の衝撃波ドリフト加速の効率 Efficiency of Electron Shock Drift Acceleration in the Presence of Ion-scale Rippling

天野 孝伸<sup>1\*</sup>

Takanobu Amano<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名大・理

<sup>1</sup>Dept. Phys., Nagoya Univ.

It is known that a number of plasma instabilities are excited in and around collisionless shocks and are believed to play the role for the dissipation at the shocks. Among them, the electromagnetic ion cyclotron (EMIC) instability can be excited by the temperature anisotropy of ions at the quasi-perpendicular shock transition region. Particle-in-cell (PIC) and hybrid simulations have demonstrated that the shock surface is strongly modulated most likely due to this instability. The spatiotemporal scale of the resulting ripple structure is determined by Larmor radius and frequency of ions. The rippling can, however, also affect the dynamics of electrons.

We have investigated the trajectories of electrons within the shock in the presence of the rippling. The electromagnetic field in the time-dependent (i.e., rippled) shock structure is given by an analytical form. Test-particle trajectories in the assumed field are then followed numerically. We have found that some electrons are "trapped" in the transverse direction due to the compression of the magnetic field. These trapped electrons are eventually transmitted to the downstream even when the initial pitch angles (in the de Hoffmann Teller frame) are out of the loss cone. The resulting energy gain of these electrons are larger than those expected from simple adiabatic theory. We will also present a more detailed analysis of the acceleration mechanism. The efficiency, and the consequence of this study are discussed in a quantitative fashion.

キーワード: 無衝突衝撃波, 粒子加速

Keywords: collisionless shock, particle acceleration

## 宇宙線修正衝撃波の安定性問題 Stability problem of cosmic ray modified shock

齋藤 達彦<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>1</sup>

Tatsuhiko Saito<sup>1\*</sup>, Masahiro Hoshino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>EPS, The University of Tokyo

エネルギーが  $10^{15.5}$  eV までの宇宙線は主に銀河系内で起きた超新星爆発が起源と考えられている。爆発時に発生する衝撃波が宇宙空間を伝播していく過程で高エネルギー粒子が生成される。こうした衝撃波における粒子加速理論として一般的なのが Bell (1978)、Blandford & Ostriker (1978) 等によって提唱された、Diffusive Shock Acceleration (DSA) 理論である。しかしながら、DSA 理論によって実現可能な最大加速エネルギーは、 $10^{14}$  eV にとどまり、観測結果とオーダーで1桁のギャップが存在するため、DSA 理論のみでは、宇宙線の加速問題を十分には説明できず、これは、未だ解決されていない問題である。

この問題に対して、1つの知見を与えるのが、Drury & Volk (1981) らによって提唱された、「宇宙線修正衝撃波」である。この系では、衝撃波近傍で加速された宇宙線が衝撃波に対して反作用を及ぼし、衝撃波の圧縮率をより高めて、さらに高エネルギーな粒子を生成できるようになる。近年の超新星残骸の観測からも、このメカニズムが働いていることで、下流の熱的プラズマの温度が Rankine-Hugoniot 関係から与えられる値よりも低くなっていることが示唆されており (Hughes 2000, Helder et al. 2009)、衝撃波での粒子加速において非線形修正加速が十分に考慮される可能性がある。

本研究では、Drury & Volk によって提案された「2流体モデル」を用いて、この機構を議論した。背景プラズマと宇宙線からなる系では、Rankine-Hugoniot 関係を満たす衝撃波解が複数存在する場合がある。この時、それぞれの解を数値計算によって時間発展させると、それぞれの解の間で、衝撃波構造の遷移が見られ、安定解と不安定解が存在することが分かり、宇宙線は圧力が最大または最小になるように変化していく。さらに、不安定解においては衝撃波の構造遷移過程で衝撃波波面が波打つ波形不安定がおきることが、Mond & Drury 1998 によって理論的に予測されているが、本研究では2流体モデルの2次元シミュレーションを行い、この不安定性について調べた。

キーワード: 宇宙線, 衝撃波加速, 安定性

Keywords: cosmic rays, shock acceleration, stability

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PEM026-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月25日10:30-13:00

## 太陽風と局所的磁場を持つ誘電物体との相互作用に関する2次元プラソフシミュレーション

Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body with magnetic anomaly

伊藤 陽介<sup>1\*</sup>

Yosuke Ito<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory

月のような固有磁場を持たない誘電物体に太陽風が当たると、夜側にウェイクと呼ばれる真空の領域が形成される。これは太陽風速度がイオンの熱速度に比べてはるかに大きく、イオンが月の夜側に侵入することができないためである。ところが、2009年に日本の月周回衛星「かぐや」が月面上空100kmよりイオン密度、電子密度、磁場の観測を行ったところ、ウェイク内部にてイオンが観測された。これは月表面の磁気異常とIMFとの相互作用により、月昼側の太陽風イオンが散乱・加速され、月裏側に侵入したためと考えられている。本研究では月に見立てた誘電物体に弱いダイポール磁場を配置し、太陽風との相互作用についての2次元プラソフシミュレーションを行った。磁気異常によって散乱された太陽風イオンの軌道について調べる。

PEM026-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## BENの低周波成分の励起メカニズムに関する粒子シミュレーション Particle simulations about generation mechanism of low frequency component of BEN

広野 哲也<sup>1</sup>, 三宅 壮聡<sup>1\*</sup>, 大村 善治<sup>2</sup>, 小嶋 浩嗣<sup>2</sup>

Tetsuya Hirono<sup>1</sup>, Taketoshi Miyake<sup>1\*</sup>, Yoshiharu Omura<sup>2</sup>, Hirotsugu Kojima<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山県立大学, <sup>2</sup> 京都大学生存圏研究所

<sup>1</sup> Toyama Prefectural University, <sup>2</sup> RISH, Kyoto University

地球磁気圏のプラズマシート境界層を始めとする様々な領域で広帯域静電ノイズ (BEN) が観測されている。BENの波形は Geotail 衛星の観測結果によって、静電孤立波 (ESW) の孤立したパルス状の波形によって構成されていることが確認された。しかし、BENの高周波成分は ESWとして説明できるが、その低周波成分の波動モード、励起メカニズムに関しては未解明である。本研究では 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。観測結果によると BENの低周波成分は磁場に垂直方向に振動している。そこで、ビーム不安定性の長時間発展の結果現れる磁場に垂直方向の低周波波動に着目し、そのパラメータ依存性について検討した。

シミュレーションを実行した結果、磁場が強くイオンの磁場に垂直方向の温度が高い場合では、初期段階において磁場に垂直方向に揃ったポテンシャル構造を持つ ESWが励起され、さらに時間が経過すると、磁場に垂直方向の波動が成長した。このシミュレーションで得られた電界をフーリエ解析した結果、BENの低周波成分に見られるような磁場に垂直方向の広帯域な低周波波動が確認できた。さらに様々なパラメータでシミュレーションを実行、比較することで低周波波動が励起される条件を検証した。

キーワード: 広帯域静電ノイズ, 粒子シミュレーション, 低周波プラズマ波動

Keywords: Broadband Electrostatic Noise, Particle simulation, Low frequency plasma wave

## 磁気回転不安定性の非線形段階における初期磁場構造の影響

## The influence of the initial magnetic field configuration on the nonlinear state of MRI

齋 和人<sup>1\*</sup>, 寺田 直樹<sup>1</sup>, 加藤 雄人<sup>1</sup>, 松本 洋介<sup>2</sup>

Kazuhito Sai<sup>1\*</sup>, Naoki Terada<sup>1</sup>, Yuto Katoh<sup>1</sup>, Yosuke Matsumoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・地球物理, <sup>2</sup> 名古屋大・STE 研

<sup>1</sup>Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku, <sup>2</sup>STE Lab., Nagoya

磁気回転不安定性(以下、MRI)は、降着円盤を始めとした差動回転する系において生じる MHD 不安定性の一種である。MRI は、差動回転する系において、磁場の増幅を引き起こし、その結果として、磁気乱流状態を生み出す。そのため、質量降着や、質量放出、惑星形成といった降着円盤内で生じる様々な現象を解き明かす上で、MRI とその磁気乱流の理解が必要とされている。

MRI 乱流とそれによる応力の、密度構造や、プラズマ といった初期条件に対する依存性を解明するため、今までに多くの三次元の数値シミュレーション研究が行われてきている。それによると、初期磁場の構造によって、得られる飽和状態が大きく異なることが指摘されている。Hawley et al. (1995) によると、密度一様とした非層化モデル中で、初期磁場が円盤に垂直な場合と、円盤ガスの回転方向を向く場合とを比べた際に、飽和状態の乱流応力やプラズマ が約 2 桁異なるといった結果が示されている。

しかし、現在多く行われている、中心天体の重力により密度成層したモデル(層化モデル)のシミュレーション研究では、初期磁場の設定としては、方位角成分のみの場合と、磁場の垂直成分が正弦波分布(空間平均が0)となるような場合がほとんどである。現在考えられている降着円盤の形成過程は、磁力線方向に運動して磁力線に垂直な面にガスが集まり、それが中心天体の重力に引き寄せられてスピナアップし、円盤が形成される、というものである。従って、磁場の初期条件として、円盤に垂直方向の成分の空間平均が0とならない場合を考える必要がある。

そこで私たちは、独自に開発を進めている三次元 MHD コードを用いて、層化モデルの下、磁場の垂直成分が空間平均しても0にならないという初期条件で、MRI のシミュレーション研究を行った。その結果、非線形段階に移行後も緩やかな磁場の増幅が確認された。また、飽和段階に至る前で、観測から示唆されているよりも強い乱流応力と、円盤の赤道面付近における質量降着流が確認された。さらに、円盤を数周するだけで密度構造が初期状態から大きく逸脱し、そのため、計算モデルが局所近似を用いていることに伴い課されていた「シミュレーション空間全体がケプラー回転する」という境界条件が破綻することが確認された。本発表では、これまでのシミュレーションによって得られた結果に基づいて、MRI 乱流による乱流応力や磁場の増幅が円盤ガスの運動へ及ぼす影響について議論する。一方、円盤形成過程を考慮すると、磁場の初期条件として円盤に垂直方向の成分と、方位角方向の成分の両方を持っている場合も想定し得る。本発表では、方位角方向成分を考慮した初期磁場構造での磁気回転不安定性についてもシミュレーションを実施し、非線形飽和レベルの初期磁場構造に対する依存性について議論する。

キーワード: MHD, 降着円盤, 磁気回転不安定性

Keywords: MHD, accretion disk, magneto - rotational instability

PEM026-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## ドリフト波乱流中の渦構造におけるイオン組成の効果 Effect of ion composition on vortex structures in drift wave turbulence

福永 航平<sup>1\*</sup>, 成行 泰裕<sup>2</sup>

Kouhei Fukunaga<sup>1\*</sup>, Yasuhiro Nariyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知高専・専攻科, <sup>2</sup> 高知高専・電気情報

<sup>1</sup>Advanced course, KNCT, <sup>2</sup>EE, KNCT

電離圏、イオトーラス、実験室中の磁化プラズマには圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それらによってドリフト波乱流が励起されると考えられる。このようなドリフト波乱流を記述する基本的な方程式としては、Hasegawa-Mima方程式がよく知られている。近年、熱の輸送現象に大きく寄与するドリフト波のマイクロスケールの揺動の「寄り集まり(パンチング)」によって生じる周方向の流れの塊(ストリーマー)が実験室プラズマ中で観測され、さらにこのストリーマー構造がHasegawa-Mima方程式から導かれる非線形方程式のソリトン解(渦構造)に対応していることが指摘された。しかし、Hasegawa-Mima方程式では温度を0とした単一粒子種の運動を仮定しているため、温度比やイオン組成が構造の振る舞いにどのような影響を与えるかは明らかにされていない。

本研究では、まず始めに反磁性ドリフトを考慮した多種イオンプラズマ中のHasegawa-Mima方程式の導出を行う。次に、導出したHasegawa-Mima方程式からKdV方程式の導出を行い、ソリトン解の温度比、イオン組成への依存性の評価を示す。

キーワード: ドリフト波, 渦構造, イオン組成

Keywords: drift wave, vortex structures, ion composition

## 疑似乱数との比較による銀河中心デシメートルパルス存在の検証 Confirmation of Decimeter Radio Pulses From our Galaxy Center Comparing with a Time Series of Pseudo Random Number

西阪 飛鳥<sup>1\*</sup>, 大家 寛<sup>1</sup>, 小野 高幸<sup>2</sup>  
Asuka Nishizaka<sup>1\*</sup>, Hiroshi Oya<sup>1</sup>, Takayuki Ono<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・地球物理, <sup>2</sup> 東北大学・理

<sup>1</sup>Geophys. Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Geophys. Sci., Tohoku Univ.

In 1999, the discovery of 24 kinds of radio pulses was made in the decimeter radio wave frequency range [Oya and Iizima, 1999]. The levels of these pulses were in a range with the order of about 0.1% of the background level of the decimeter radio waves from the center part of our Galaxy. As origins of these decimeter radio wave pulses, the authors proposed possible radiations from the rotating black holes in the center part of our Galaxy. The 24 kinds of periods ranging from 0.327214sec to 129.992sec are considered to be generated from the rotating Kerr black holes coinciding with the rotation periods of black holes. Further studies for the radiation characteristics of Kerr black holes [Oya,2011] indicate that the detectable period of the radio wave pulses have sources near the event horizon. These works also indicate that the rotation periods show divergence for the radiation sources which are located at the position a part from the event horizon. The deviation rate of the rotation period becomes larger corresponding to longer distance apart from the event horizon, even in the region close to the event horizon. It is further clarified by his paper that the red shift rate of the radiated electromagnetic waves varies as a function of the source position, approximately depending on the root of the deviation rate of distance from the event horizon. When it is assumed that the radiation frequency is controlled by the red shift rate, it is suggested that the decimeter radio wave pulse period is spread wider than the cases of decimeter radio wave pulses. To confirm this theoretical prediction, we observed center part of our Galaxy at 1.4GHz with 10m dish antenna, in 2007 and 2008 at Fukui University of Technology where the receiving systems for decimeter radio waves are facilitated.

The present studies are concerned with analyses of the observation data of decimeter radio wave pulses whose levels show a range from 1/1000 to 1/10000 of the background level of the decimeter radio waves from the center part of our Galaxy. To search for the pulse shape, then, 1200000 times of period coherent accumulations of time series data, i.e. box-car method, have been applied, after the coarse decision of the pulse periods by applying FFT method. For this purpose, the data during 21 days observations are utilized. To carry out the box-car method, the periods for analyses have been swept with step of 4/100000 of the center periods for search. The obtained wave forms are evaluated defining the index which gives identification of the quality of the detected pulse forms distinguished from background noise.

Because of the extremely low signal to noise ratio with the order of 0.01% of the background noise level, comparison of the analyzed results with those for time series of pseudo random numbers has been made. Consequently it is verified that the results for decimeter pulses are confident; we can utilize them to investigate the deviation of the period to compare with that of decimeter radio wave pulses.

### Reference

- (1)Oya.H. and M.Iizima, Clusters of Super Massive Black Holes in the Central Region of Our Galaxy Observed by Decimeter Radio Wave Pulses: Discovery of 24 Super Massive Black Holes and Their Motions, Tohoku Geophys. J.,35, 1-78(1999)
- (2)Oya.H, On the Detection of Rotation Periods of Kerr Black Holes, submitted to Apj(2011)

PEM026-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## 太陽風アルフェン波シミュレーションのための新しい数値計算法：Vlasov-MHD モデルの開発

A new numerical method for simulating the solar wind Alfvén waves: Development of the Vlasov-MHD model

成行 泰裕<sup>1\*</sup>, 梅田 隆行<sup>2</sup>, 羽田 亨<sup>3</sup>

Yasuhiro Nariyuki<sup>1\*</sup>, Takayuki Umeda<sup>2</sup>, Tohru Hada<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高知高専・電気情報, <sup>2</sup> 名大・STE 研, <sup>3</sup> 九大・総理工

<sup>1</sup>EE, KNCT, <sup>2</sup>STEL, Nagoya Univ., <sup>3</sup>ESST, Kyushu Univ.

本講演では、太陽コロナ・太陽風プラズマ中のアルフェン波の非線形発展を解析するための新しい計算モデル (Vlasov-MHD) モデルについて報告する。Vlasov-MHD モデルは、背景磁場に平行 (垂直) 方向の成分を Vlasov(MHD) 方程式で解析するモデルで、非線形性があまり大きくない場合には、アルフェン波の線形・非線形発展を正確に記述することが出来る。講演では、Vlasov-MHD モデルのコロナ加熱・太陽風加速への適用についても述べる。

キーワード: ブラソフシミュレーション, 太陽風, アルフェン波

Keywords: Vlasov simulation, solar wind, Alfvén wave

PEM026-P08

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## イオ-木星系のためのセミディスクリット中心スキームを用いた磁気多流体コードの開発

### Development of a new multi-fluid code for the Io-Jupiter system based on the semi-discrete central scheme

松田 和也<sup>1\*</sup>, 寺田 直樹<sup>1</sup>, 加藤 雄人<sup>1</sup>, 三澤 浩昭<sup>1</sup>  
Kazuya Matsuda<sup>1\*</sup>, Naoki Terada<sup>1</sup>, Yuto Katoh<sup>1</sup>, Hiroaki Misawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Science, Tohoku Univ.

Subcorotation of Iogenic plasma in the Io plasma torus has been understood as electric drift by a perpendicular electric field with respect to the Jovian magnetic field. A part of the radially integrated potential has been considered to be imposed along the magnetic field lines. The purpose of this study is to clarify where and how the actual the electric fields arise in the Io-Jupiter system. Here, we take notice of the importance of the electron convection term in the generalized Ohm's law. We applied a semi-discrete central scheme to extended MHD equations which include the electron convection term and prescribe the dynamics of one or two ion species, and investigated the role of the electron convection term in a one-dimensional model of the Io-Jupiter system.

We find that the parallel electric field arising from the electron convection term works like negative pressure. For the cases of steady state discontinuities, the sum of the electric force arising from the electron convection term and a steepening effect due to the ion convection term balance with the ion pressure gradient. An electrostatic potential difference across a discontinuity equals the electron kinetic energy obtained from a transition through the discontinuity. The electron convection term enables us to describe a situation in which a parallel electric field and parallel electron acceleration coexist, which is impossible for ideal or resistive MHD.

Each ion sound mode becomes unstable if the parallel current density exceeds some threshold associated with the individual ion temperature. If the sound mode of the cold ions is unstable and that of the hot ions is stable with the specific current density, the growth of the unstable sound mode saturates after a while. At this stage cold ions gather around the high density region since the negative pressure arising from the electron convection term exceeds the pressure of the cold ions. The discrete parallel electric field forms at the boundary of the high- and low-density regions and prevents cold ions from going through the field. Although the growth rate of the ion sound mode does not reproduce that of the actual Debye-scale ion acoustic mode, the process of the wave growth and saturation would approximate that of the Debye-scale current driven instability in the large spatial and temporal scales.

PEM026-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## MHD および PIC シミュレーションへの高速ポアソン解法の導入 Implementation of a fast Poisson solver into MHD and PIC simulations

松本 洋介<sup>1\*</sup>

Yosuke Matsumoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup> STEL, Nagoya University

Poisson equation appears in various situations in numerical simulations of space plasmas. For example, the electrostatic potential in the ionosphere is obtained by solving the Poisson equation with the field-aligned current given by the global MHD simulation of the magnetosphere.

The equation is generally solved by iterative solvers. Successive Over-Relaxation (SOR) and Conjugate Gradient (CG) methods are of well used solvers, but the number of iterations increases as  $N^{3/2}$  as the system size ( $N \times N$ ) increases. Thus a fast Poisson solver is necessary in a large-scale numerical simulation.

In this presentation, an implementation of Multigrid poisson solver into a MHD simulation code and its application to the global MHD simulation are shown. The solver is implemented in order to remove the monopole of the magnetic field that arises due to the numerical discretization. This enables us to examine a large scale global MHD simulation with keeping  $\text{div}(\mathbf{B})$  negligibly small. The multigrid solver is also applied to the PIC simulation code in which Maxwell equations are solved implicitly. This enables us to simulate under larger  $c/v_{te} = \omega_{pe} / \Omega_{ge} / \sqrt{\beta}$  parameters with a large time step.

キーワード: PIC シミュレーション, MHD シミュレーション, ポアソン方程式, マルチグリッド, SOR 法

Keywords: PIC simulation, MHD simulation, Poisson equation, Multigrid, SOR method

## ラグランジュ座標系における HLLD 近似リーマン解法 The HLLD approximate Riemann solver in Lagrangian coordinate system

三好 隆博<sup>1\*</sup>, 草野 完也<sup>2</sup>

Takahiro Miyoshi<sup>1\*</sup>, Kanya Kusano<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ., <sup>2</sup>STEL, Nagoya Univ.

磁気流体力学 (MHD) 方程式はプラズマの巨視的ダイナミクスを記述する極めて重要な基礎方程式である。理想 MHD 方程式は非線形双曲型保存則であるため、非線形シミュレーションにおいて速進衝撃波や遅進衝撃波などの不連続解がしばしば出現する。それ故、近年、MHD 方程式に対する衝撃波捕獲法が急速に発展してきた。特に、MHD 方程式の数学的性質をよく反映した近似リーマン解法が幾つか提案され [1,2]、実際の物理シミュレーション研究に用いられるようになった。近似リーマン解法では、セル境界におけるリーマン問題の厳密解または近似解をセル全体にわたって積分することによって数値解が安定に得られる。しかし、強い衝撃波相互作用問題など極めて強い不連続を含む問題については、一様なオイラー座標系格子で取り扱いは容易でなく、ラグランジュ型の数値解法がより適切な場合がある。そこで本研究では、ラグランジュ型数値解法の基礎となるラグランジュ座標系における MHD リーマン問題の近似解を探索する。MHD 方程式はラグランジュ質量座標系において保存形式で書きあらわされるため [3]、オイラー座標系における HLL 型の近似手法が適用可能である。特に、ラグランジュ質量座標系におけるリーマンファンを 5 つの波で分解する HLLD 型の近似解 [2] を求め、その性質について詳細に議論を行う。

[1] Brio, Wu, J. Comput. Phys., 75 (1988), 400

[2] Miyoshi, Kusano, J. Comput. Phys., 208 (2005), 315.

[3] Dai, Woodward, J. Comput. Phys., 111 (1994), 354.

キーワード: MHD, 衝撃波捕獲法, ラグランジュ座標系, 保存則, HLLD 近似リーマン解法

Keywords: MHD, shock capturing scheme, Lagrange coordinates, conservation laws, HLLD approximate Riemann solver

PEM026-P11

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## 無電極電気推進における回転電界型プラズマ加速の実験的研究 Experimental Study of Plasma Acceleration Using Rotating Electric Field for Electrodeless Plasma Thruster

西田 浩之<sup>1\*</sup>, 中村隆弘<sup>1</sup>, 横井賢二<sup>1</sup>, 松岡健之<sup>2</sup>, 船木一幸<sup>2</sup>, 篠原俊二郎<sup>1</sup>, 谷川隆夫<sup>3</sup>, 羽田 亨<sup>4</sup>

Hiroyuki Nishida<sup>1\*</sup>, Takahiro Nakamura<sup>1</sup>, Kenji Yokoi<sup>1</sup>, Takeshi Matsuoka<sup>2</sup>, Ikkoh Funaki<sup>2</sup>, shunjiro Shinohara<sup>1</sup>, Takao Tanikawa<sup>3</sup>, Tohru Hada<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京農工大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 東海大学, <sup>4</sup> 九大院総理工

<sup>1</sup>Tokyo Univ. Agriculture and Technology, <sup>2</sup>JAXA, <sup>3</sup>Tokai University, <sup>4</sup>Kyushu University

比推力が大きい電気推進は、宇宙探査や大規模宇宙輸送など長期にわたる宇宙ミッションに適した宇宙推進システムである。電気推進は既にいくつかの宇宙ミッションにおいて成功を収めその有用性が実証されている。しかしながら、従来型の電気推進機にはプラズマの加速・生成のプロセスにおいて放電電極とプラズマが接触し、それによって発生する電極損耗が推進機の寿命を減じてしまう問題がある。そこで本研究では、ヘリコンプラズマを用いた完全無電極である電気推進の開発を目指し研究を行っている。プラズマに回転電界と外部磁場を印加することで電磁加速を行う“リサーチ加速型”に焦点を当て、加速コンセプト実証の為にスケールモデル実験を行っており、その結果について報告する。

キーワード: ヘリコンプラズマ, 無電極電気推進, 回転電界

Keywords: helicon plasma, electrodeless electric propulsion, rotating electric field

PEM026-P12

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## 磁気セイル周りの太陽風プラズマ挙動に関する2次元Hybrid-PICシミュレーション Two-Dimensional Hybrid-PIC Simulation of Solar Wind Plasma Flow around Magnetic Sail

松本 正晴<sup>1\*</sup>, 梶村 好宏<sup>1</sup>, 臼井 英之<sup>2</sup>, 船木 一幸<sup>1</sup>, 篠原 育<sup>1</sup>  
Masaharu Matsumoto<sup>1\*</sup>, Yoshihiro Kajimura<sup>1</sup>, Hideyuki Usui<sup>2</sup>, Ikkoh Funaki<sup>1</sup>, Iku Shinohara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科

<sup>1</sup>JAXA/ISAS, <sup>2</sup>Kobe university

太陽から噴出する高速の無衝突プラズマ流である太陽風を人工的な磁気圏を展開することによって受け止め、宇宙機の推進力を得る先進的宇宙推進システムである磁気セイル、ならびに磁気プラズマセイルが近年提案され研究が進められている。磁気セイルは宇宙機に搭載した超伝導コイルのみでダイポール磁気圏を展開するシステムであり、太陽風と磁気圏の相互作用の結果として推力を発生させる。太陽風エネルギーを推進力に利用するこれらの推進機は従来提案の電気推進機に比べ、高いエネルギー変換効率が達成できると期待されている。磁気セイルの推力は、磁気圏境界における太陽風のイオン Larmor 半径と磁気圏代表長の比によって特徴付けられることが過去の研究から明らかとなっているが、磁気圏代表長に比べイオン Larmor 半径が長い、いわゆるイオン慣性スケールでは、イオンの運動効果を考慮に入れた物理モデルを選択しなければ正確な推進性能を把握することはできない。そこで本研究では2次元 Hybrid-PIC シミュレーションにより、磁気セイル周りの太陽風プラズマ流の挙動や磁気セイルの推進性能に関する計算を行った。

計算結果として、磁気セイルが持つ磁気モーメントに対する惑星間磁場の向きの違いが、磁気セイルが形成する小型磁気圏の上流側で発生する衝撃波の構造に大きな影響を与えることがわかった。これは惑星間磁場の向きによって磁気圏周辺に発生する磁気リコネクションポイントの位置が変化することによって、太陽風の流れ場が変化することによる。特に太陽風の流れ方向に対して惑星間磁場が平行方向の場合では、垂直な場合に比べ、衝撃波による数密度の不連続面が不鮮明になるなど、イオン運動の効果が強調され、非定常で複雑な流れ場となることがわかった。また、惑星間磁場がないと仮定した場合に比べ、太陽風の流れ方向に対して惑星間磁場が垂直方向にある場合、磁気セイルの推力は増加する傾向にあること、また、惑星間磁場が平行方向にある場合は磁気セイルの推進方向に垂直方向に周期的な揚力が発生することがわかった。

キーワード: 磁気セイル, 磁気圏, ハイブリッド粒子シミュレーション

Keywords: Magnetic Sail, Magnetosphere, Hybrid-PIC Simulation

PEM026-P13

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 10:30-13:00

## 次世代無電極プラズマ推進機関の開発とモデリング Research and development of next generation electrodeless plasma thrusters

羽田 亨<sup>1\*</sup>, 大塚 史子<sup>1</sup>, 山之口 和輝<sup>1</sup>, 篠原俊二郎<sup>2</sup>, 西田浩之<sup>2</sup>, 谷川隆夫<sup>3</sup>, 船木一幸<sup>4</sup>, 松岡健之<sup>4</sup>

Tohru Hada<sup>1\*</sup>, Fumiko Otsuka<sup>1</sup>, Kazuki Yamanokuchi<sup>1</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>2</sup>, Hiroyuki Nishida<sup>2</sup>, Takao Tanikawa<sup>3</sup>, Ikkoh Funaki<sup>4</sup>, Takeshi Matsuoka<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 九大院総理工, <sup>2</sup> 東京農工大, <sup>3</sup> 東海大, <sup>4</sup> JAXA

<sup>1</sup> Kyushu University, <sup>2</sup> Tokyo Univ. of Agriculture & Technology, <sup>3</sup> Tokai University, <sup>4</sup> JAXA

宇宙空間での衛星推進および制御、特に外惑星探査等の長距離航行ミッションにおいて、比推力の大きな電気推進機関は有用であり、今後の宇宙開発での活躍が期待されている。一方、イオンエンジンや DC アークジェットなど、既に実用化されている電気推進機関は有電極であり、プラズマとの接触による電極摩耗が長時間オペレーションのネックとなっている。この問題を根本的に解決するために、我々は外部アンテナにより生成したヘリコンプラズマを外部電磁場で加速する、生成・加速の両段階ともに電極を使用しない「完全無電極」推進機関を提案し、HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thruster) project として研究をすすめてきた。

学会では、このプロジェクトの背景・目的について紹介した後、研究の現状と展望を述べる。プラズマの無電極生成については、ヘリコン波（宇宙でのホイッスラー波と同等）による方式がほぼ確立しており、定常かつ安定なプラズマ供給源として推進機関への応用が可能であると考えられる。一方、プラズマの無電極加速について、現在のところ「回転磁場方式」、「回転電場方式」、および「ポンドロモータイヴ方式」についての計算機実験および室内実験を行っている。加速原理、推力のスケールリング則などについて紹介する。

ヘリコンプラズマは、プラズマの生成・損失が比較的早い時間スケールで起き、また粒子間衝突が無視できない散逸的媒体であるが、その他の側面では宇宙プラズマとの共通点も多く、連携により、SGEPSS 分野から航空宇宙分野への具体的貢献が期待できる。また、無電極加速により定常推進力を得るためには「プラズマ非線形効果」が本質的に重要であり、純粋に科学的な側面からも興味深い研究課題である。これらの点についても強調する予定である。

キーワード: ヘリコンプラズマ, 電気推進機関, 無電極推進

Keywords: helicon plasma, electric thruster, electrodeless thruster