

## 四元数によるジャイロカイネティクス

# 中村 匡 [1]  
[1] 福井県大

## Quaternion Expression of Gyrokinetics

# Tadas Nakamura[1]  
[1] FPU

[https://www.fpu.ac.jp/faculty\\_members/tadas.html](https://www.fpu.ac.jp/faculty_members/tadas.html)

It is known J.C. Maxwell used Hamilton's quaternions to express Maxwell equations in his masterpiece "Treatise on Electricity and Magnetism." The theory of vector analysis, which is familiar to us in modern physics, is developed a little after that by W. Gibbs and O. Heaviside. At the end of the 19th century and the beginning of the 20th century, there arises a heated controversy on this topic. Which is the better description of electromagnetism: the Gibbs/Heaviside's vector analysis or quaternions?

It turned out more and more physicists prefer the vector analysis and few people pay attention to quaternions in the latter half of the 20th century. However, quaternions resurrect in the 21st century in connection with computer graphics; the quaternion is found to be suitable to calculate 3 dimensional rotations in games or movies. Now more and more computer engineers learn the theory of quaternion for this purpose.

This fact suggests quaternions are suitable to express something related rotations, whereas vectors are good for parallel transition. In the controversy of quaternion vs vector analysis, it is regarded as a disadvantage of quaternions that square of its vector component becomes negative. However, this is reasonable when we consider a quaternion represents rotation. When we express 2 dimensional rotation by an ordinary complex number, the fact that the square of its imaginary part becomes negative corresponds to 180 degree rotation. A similar interpretation is possible for quaternions and negative square of the vector component (imaginary component) is understandable in the same way.

Provided that quaternions are suitable for rotations, it is expected they are useful to express particle gyration in magnetized plasmas. The gyration in a 2 dimensional plane is often expressed by a complex exponential function in plasma physics. It can be extended to 3 dimensional case when we introduce quaternions to express rotations. The exponential function of quaternions becomes considerably complicated due to their anti-commutable nature and we need to use Baker-Campbell-Hausdorff formula for multiplications. This complication is essential to express the complicated nature of 3 dimensional rotations. Applications to numerical calculations and drift approximations will be discussed in the talk.

マックスウェルが著書「Treatise on Electricity and Magnetism」で書いたマックスウェル方程式は、ベクトル解析ではなくハミルトンの四元数を使っていたことはよく知られている（初出の論文では四元数ではなく、成分ごとの表記になっている）。その後、ギブスとヘビサイドによって、ベクトル解析が案出され、19世紀のおわりから20世紀のはじめにかけて、四元数とベクトル解析のどちらが物理の表記として適しているかが論争になった。

結局、ベクトル解析が一般にひろまって、20世紀の後半は四元数は数学家が群論などのかかわりで研究する対象になり、物理学の分野ではあまり知られることはなかった。ところが、21世紀にはいってゲームなどのコンピューターグラフィックスの分野で、3次元回転への応用の利便性によって、ふたたび四元数が注目されるようになり、現在では書店のコンピューターサイエンスのコーナーに四元数の教科書がならんでいるのが見られる。

四元数は複素数の拡張であり、虚数部分が  $i$  ひとつではなく、 $i, j, k$  の三成分ある数学構造である。ハミルトンはこの虚数部の間に  $ij = -ji$  のような非可換性を導入することにより、整合性のある四元数の体系をつくった。3次元回転は非可換（回転の順序によって結果が違う）なので、この四元数の非可換性と相性が高い。前述の四元数かベクトル解析か、という論争がでは、四元数の利点として回転のとりあつかいやすさがあげられた反面、欠点としてベクトル部分の自乗が負の数になるという指摘があった。しかし、ベクトル解析流のベクトルを平行移動、四元数を回転移動に対応する数学的構造だとすると、自乗が負になるのは、むしろ納得ができる。たとえば、2次元ベクトルを普通の複素数であらわすと、その虚数部の自乗が負になるのは180度の回転に対応して自然である。

四元数が回転をあらわすとすれば、磁化プラズマにおいて重要なジャイロ運動をあらわすのに適しているのでは、と考えるのは自然なことであろう。2次元運動の場合はジャイロ運動を複素数であらわすのは一般によくやられることである。本研究ではそれを四元数を使って3次元に拡張するとどうなるかを考える。この場合、有限角の回転は2次元と同様に指数関数であらわされるが、四元数の非可換性により、指数関数のあつかいが複雑になる。この複雑さこそ、3次元空間でのジャイロ運動の複雑さである。講演では数値計算やドリフト近似への応用なども考える。

## 非ガウス統計にしたがうプラズマの現象論的記述について

# 羽田 亨 [1]  
[1] 九大総理工

## Phenomenological description of a plasma obeying non-gaussian statistics

# Tohru Hada[1]  
[1] IGSES, Kyushu Univ

Space plasma is tenuous and collisionless, and thus the description of the space plasma using classical fluid formulation can be justified only for a limited range of time and spatial scales. However, since this 'limited range' spans over many orders of magnitude, the fluid formulation has been successful in explaining the majority of space plasma phenomena of our interest. On the other hand, there also exist important phenomena where the classical fluid formulation fails to describe, for example, transport of cosmic rays where their scattering statistics by MHD turbulence can be non-Gaussian, phenomena within Debye scales or non-neutral plasma where the presence of long-range interaction is essential. Based on this perspective, we introduce our recent attempt to describe the complex behavior of space plasma that obeys non-Gaussian statistics. The evolution equations naturally involve fractional differential/integral operators, representing the non-locality and the memory effect. There are a few critical issues to be resolved, such as the non-physical evolution for the sub-diffusive regime and the non-unique definition of the fractional derivatives. We will present a few concrete examples to discuss how the proper phenomenology should be defined for describing the evolution of space plasma.

よく知られているように、宇宙プラズマは希薄で無衝突であり、古典的な流体近似が成り立つのは限られた時間・空間スケールにおいてのみである。もちろんこの時間・空間スケールがかなりの「実用的な」幅を持つため、多くの現象を流体の枠組みで捉えることができているわけであるが、たとえば宇宙線のように（乱流との）衝突統計が非古典的であり得る場合や、デバイ長以下スケールの現象、非中性プラズマ（長距離相関）など、非局所相互作用・時間のメモリー効果が本質的な領域は多く存在するし、さらにこれらは将来の宇宙プラズマ研究の重要なフロンティアとなっていくであろう。また、無数の粒子運動の持つ莫大な情報を少数のマクロ変数の時間発展として記述することは、物理現象を理解するための必要条件である。これらの観点から、ここ数年にわたり考察している、非ガウス統計にしたがうプラズマを現象論的に記述する試みを紹介する。発展方程式系には、ほぼ必然的に非整数階微積分があらわれ、自然に非局所相互作用と時間メモリー効果が導入される。一方で、この試みには、非整数階微積分の定義の非唯一性、サブ拡散領域での非物理的振る舞いなど、いくつかの困難さも伴う。あくまでも宇宙プラズマという多体系の粗視化極限として発展方程式系が決まることを前提として、現象論的記述がどのようなものであるべきか、なるべく具体例を多く示しながら説明する。

## 磁気圏にジャイロ流体モデルを用いたフィードバック不安定性の理論解析

# 西村 征也 [1]  
[1] 法政大・理工・電気電子

## Theoretical analysis of feedback instability using gyrofluid model for magnetosphere

# Seiya Nishimura[1]  
[1] Hosei Univ.

The feedback instability occurs in the coupled system of the magnetosphere and ionosphere, which is a theoretical model explaining the spontaneous development of the quiet aurora arc. In this study, we extend the model of the magnetosphere to the gyrofluid model used in the study of the magnetic confinement fusion plasma. This extension makes it possible to properly discuss kinetic effects on the feedback instability in the framework of the fluid model. Using the derived model, the linear stability analysis of the low-frequency feedback instability is performed. It is found that high-wavenumber modes are strongly affected by the kinetic effects. In particular, the stabilizing effect of the electron Landau damping is dominant and stronger for the high-parallel-wavenumber modes. This result indicates that a mode with the smallest parallel wave number primarily grows during the spontaneous development of the quiet aurora arc.

フィードバック不安定性は静穏時オーロラアークの自発的な発達を記述するための理論モデルである。フィードバック不安定性は、磁気圏と電離圏の結合系において生じる。本研究においては、磁気圏のモデルを磁場閉じ込め核融合プラズマの研究において用いられているジャイロ流体モデルへと拡張した。この拡張により、流体モデルのフレームワークにおいてフィードバック不安定性に対する運動論的効果を適切に議論することが可能となった。導出されたモデルを用いて低周波のフィードバック不安定性の線形安定性解析を行った。高波数のモードは運動論的効果によって強く影響を受けることが分かった。特に、電子ランダウ減衰の効果が支配的であり、その効果は磁力線方向の波数の高いモードに対して、より強いことが分かった。この結果は、静穏時オーロラアークの自発的な発達においては、磁力線方向の波数の最も小さいモードが主に成長していることを示唆する。

## 磁力線長の不均一性を考慮に入れた M-I 結合系での Feedback 不安定性の解析

# 伊藤 諒 [1]; 渡邊 智彦 [2]; 前山 伸也 [2]  
[1] 名大・理; [2] 名大・理・物理

## Analysis of feedback instability in the M-I coupling system with inhomogeneity of field-line length

# Ryo Ito[1]; Tomo-Hiko Watanabe[2]; Shinya Maeyama[2]  
[1] Science, Nagoya Univ.; [2] Dept. Physics, Nagoya Univ.

Aurora that colors the polar night has attracted people from ancient times. However, the physics mechanism is still unsolved, and various studies are still in progress. A possible model that explains spontaneous development of auroras is the feedback instability. Physics essence of the feedback instability is a resonance of the Alfvén wave propagating in the ionosphere.

In the previous research (T.-H. Watanabe 2010), for the sake of simplicity, the length of the earth's magnetic field lines was assumed to be uniform, but in reality, it is not uniform. Purpose of our research is to reveal what influences on the feedback instability arise by means of the realistic magnetic configuration. As the first step, following the previous research (T.-H. Watanabe), we investigate the case with the uniform field-line length as a linearized initial value problem. While the previous research focused on the eigenmode solution, existence of the eigenmode is not guaranteed in the inhomogeneous field-line length case. Therefore, we developed a new formulation by means of the Laplace transform, and find a solution starting from an arbitrary initial condition. In this formulation, the eigenmode is represented in terms of a pole in the inverse Laplace transform. We are currently revisiting the previous study by means of the new approach, and promoting comparison with a result of linear simulation that numerically solves the initial value problem. Then, we will promote the calculation by replacing the model with inhomogeneity of the magnetic field-line length.

極夜を彩るオーロラは、太古の昔より多くの人々を魅了し続けてきた。しかし、そのメカニズムはいまだ未解決な部分があり、現在も様々な研究が進められている。オーロラの自発的な発達を説明するモデルとして、フィードバック不安定性がある。フィードバック不安定性の要点は、地球の磁力線に沿って伝搬する Alfvén 波と電離圏を水平方向に伝搬するプラズマの密度波が共鳴して不安定性が成長するというものである。

先行研究 (T.-H. Watanabe 2010) では簡単のため、地球の磁力線の長さを全て均一として扱っていたが、実際の地球の磁力線の長さは均一ではない。我々の研究の目的は、現実的な磁場配位がフィードバック不安定性にどのような影響を与えるかを調査することである。まず、最初に先行研究 (T.-H. Watanabe 2010) に倣って地球の磁力線を一定とした場合について、線形初期値問題を解析的に取り扱う。従来解析では固有モードを仮定していたが、磁力線長の不均一性がある場合は固有モードが得られる保証はない。そのため、ラプラス変換を用いた定式化を導出し、任意の初期条件から出発した場合の解を求める。この定式化では、従来固有モードは、逆ラプラス変換の極で表される。現在、我々は先行研究 [1] の結果の再現および、初期値問題を数値的に解く線形シミュレーションとの比較を進めている。その後、実際に地球の磁力線の長さを取り入れたモデルに置き換えて計算を行う。

## 一様抵抗テアリング不安定性の線形理論

# 清水 徹 [1]  
[1] RCSCE, 愛媛大

## Linear theory of tearing instability under uniform resistivity

# Tohru Shimizu[1]  
[1] RCSCE, Ehime Univ.

The linear perturbation equations of the tearing instability derived in FKR theory (Furth, et.al., Phys. Fluids, 1963) and Loureiro theory (Loureiro, et.al., Phys. Plasmas, 2007) are numerically examined as initial value problems, where the inner and outer regions are seamlessly resolved under uniform resistivity. In this study, the uniform resistivity assumed in the outer region plays an important role of essentially changing all the conclusions derived in those theories. First, it suggests that FKR theory fails to find the higher growth rate solution. Second, the upper limit of the growth rate predicted in Loureiro theory modified by the resistive MHD outer region is shown to be partially consistent with the growth rate in the beginning of each tearing instability observed in the compressible and viscous MHD simulation of the plasmoid instability (PI) based on uniform resistivity. Finally, the linear theory cannot directly support the existence of the critical Lundquist number  $S_{L,c}$  for PI based on uniform resistivity. If  $S_{L,c}$  exists, the basic mechanism of PI must be fully nonlinear, a condition that is not studied in this paper.

磁気再結合過程の磁気流体力学的 (MHD) な理論としては Sweet-Parker、Pestschek と並んで、FKR 理論 (Furth, et.al., Phys. Fluids, 1963) があり、これらは 50 年以上の長きに渡り数多くの研究がなされてきた。前 2 つは定常理論であり、FKR 理論は線形理論である。また、FKR 理論の発展として、Loureiro 理論 (Loureiro, et.al., Phys. Plasmas, 2007) があり、現在、これは乱流的な磁気再結合 (プラズモイド不安定性) の最重要理論と考えられている。本研究では、FKR と Loureiro 線形理論の問題点を指摘し、それらに代わる新しい線形理論を提唱する。そこで、Outer Region を抵抗性 MHD で考えることの重要性が指摘される。新しい理論はプラズモイド不安定性の MHD シミュレーションと比較され、ある範囲内で、矛盾しない結果が得られた。本講演では、MHD 磁気再結合問題の本質を明らかにし、数値的研究の危険性について指摘する。さらに、新しい線形理論に関して、現在進行中のいくつかの派生研究 (粘性効果、非定常性への拡張) についても紹介する。

## 斜め伝搬ホイッスラー波動による電子のピッチ角拡散過程

# 大塚 史子 [1]; 岡 光夫 [2]; 松清 修一 [3]

[1] 九大総理工; [2] カリフォルニア大学バークレー校・宇宙科学; [3] 九大・総理工

### Pitch angle diffusion of electrons by oblique whistler waves

# Fumiko Otsuka[1]; Mitsuo Oka[2]; Shuichi Matsukiyo[3]

[1] ESST, Kyushu Univ; [2] SSL, UC Berkeley; [3] ESST Kyushu Univ.

Wave-particle interaction plays an important role in particle scattering process in collisionless plasma. Especially the pitch angle diffusion is essential and fundamental to the energy and spatial diffusion processes. Electromagnetic whistler mode waves have been observed near the Earth's bow shock and in the Earth's magnetosphere. These waves are thought to be responsible for the electron scattering (e.g., Oka et al., 2017, Wang et al., 2019). For obliquely propagating whistler waves, not only fundamental cyclotron resonance, but also other resonances, such as transit time resonance, anomalous cyclotron resonance, higher-harmonic cyclotron resonance can come into play (Terasawa and Matsukiyo, 2012).

In this presentation, we study the interaction between electrons and oblique whistler waves by performing test particle simulations. We specify the oblique whistler waves obeying cold plasma dispersion relation. We integrate the motion of relativistic electrons in the given electromagnetic field, and evaluate the pitch angle diffusion coefficient. We compare the scattering processes for the monochromatic wave and multi-waves with broadband spectrum, and also discuss the dependence of the wave propagation angle relative to the background magnetic field. The results will be applied to understanding of the electron scattering process in the Earth's bow shock.

無衝突プラズマでは、波動-粒子相互作用が粒子の散乱過程において重要な役割を果たす。特にピッチ角拡散は、エネルギー拡散や空間拡散過程において不可欠な基本過程である。ホイッスラー波動は地球バウショック近傍や地球磁気圏内で観測されており、電子の散乱・加速に寄与していると考えられる (e.g., Oka et al., 2017, Wang et al., 2019)。ホイッスラー波動が背景磁場に対して斜めに伝搬する場合、基本のサイクロトロン共鳴に加え、ランダウ共鳴や異常サイクロトロン共鳴が起こり、伝搬角が大きい領域でこれらの効果が有意になることが報告されている (Terasawa and Matsukiyo, 2012)。

本講演では、斜め伝搬ホイッスラー波動と電子の相互作用をテスト粒子計算により議論する。冷たいプラズマの分散関係に従うホイッスラー波動を与え、ピッチ角拡散係数を評価する。まず、平行伝搬ホイッスラー波動において、単色な波動と広い周波数帯を持った複数波動を仮定し、ピッチ角拡散係数を比較する。次に斜め伝搬ホイッスラー波動においても同様の計算を行い、ランダウ共鳴や異常サイクロトロン共鳴の効果を議論する。平行伝搬ホイッスラー波動において、広帯域の波動スペクトルを仮定した場合、波動の振幅が十分小さければ準線形理論が適用できる (e.g., Tao, et al., 2011)。斜め伝搬ホイッスラー波動を用いた場合、散乱の効率が準線形理論の予測よりも上昇するか否かを検証する。最後に、テスト粒子計算により得られたピッチ角拡散係数をもとに、無衝突衝撃波の PIC シミュレーション (Otsuka, et al., 2019, JpGU poster) で得られる高エネルギー電子のピッチ角分布や空間分布を考察する。

## Nonlinear Trapping Conditions of relativistic electrons interacting with whistler-mode chorus emissions at oblique angles

# Yoshiharu Omura[1]; Yikai Hsieh[2]

[1] RISH, Kyoto Univ.; [2] RISH, Kyoto Univ.

We have derived explicit formulae of inhomogeneity factors controlling the nonlinear trapping conditions for Landau and cyclotron resonances to analyze nonlinear wave trapping and associated acceleration of energetic electrons by an obliquely propagating chorus element generated at the magnetic equator. In evaluating the frequency sweep rate of the chorus element as observed at fixed positions, we assumed the quasi-parallel propagation. We find efficient acceleration of relativistic electrons by nonlinear trapping at Landau resonance with obliquely propagating whistler-mode chorus emissions. The acceleration is due to the perpendicular component of the wave electric field rather than the parallel electric field. We performed test particle simulations to confirm that nonlinear wave trapping by both Landau and cyclotron resonances can take place for a wide range of energies, resulting in efficient acceleration of relativistic electrons.

### Reference:

Omura, Y., Hsieh, Y.-K., Foster, J. C., Erickson, P. J., Kletzing, C. A., & Baker, D. N. (2019). Cyclotron acceleration of relativistic electrons through Landau resonance with obliquely propagating whistler-mode chorus emissions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 2795&#8211;2810. <https://doi.org/10.1029/2018JA026374>

## 磁気流体力学方程式に対する多状態 AUSM 系スキーム

# 箕島 敬 [1]; 北村 圭一 [2]; 三好 隆博 [3]  
[1] JAMSTEC; [2] 横国大・工; [3] 広大・理・物理

### Multi-state AUSM-type scheme for magnetohydrodynamics

# Takashi Minoshima[1]; Keiichi Kitamura[2]; Takahiro Miyoshi[3]  
[1] JAMSTEC; [2] YNU; [3] Phys. Sci., Hiroshima Univ.

The magnetohydrodynamic (MHD) simulation has been extensively employed to study nonlinear dynamics in space and astrophysical plasmas. To capture high speed flows, discontinuities, and shocks in these plasmas, many modern MHD simulation codes are based on upwind schemes (Godunov methods, flux difference splitting methods, and flux vector splitting methods). Numerous studies have been devoted to develop robust and accurate schemes for MHD simulations. In particular, Miyoshi and Kusano (2005) developed the HLLD scheme that can capture the fast mode shock, the rotational discontinuity, and the contact discontinuity. By virtue of its high accuracy and robustness, the scheme becomes a de fact standard for MHD simulations of space and astrophysical plasmas.

The Advection Upstream Splitting Method (AUSM; Liou et al.1993) and its variants (e.g., Liou 1996) have been developed to solve the Euler equation in aerodynamics. The AUSM-type schemes are alternative to other upwind schemes (Godunov, FDS, and FVS), in order to improve accuracy, robustness, and computational efficiency. Recent AUSM-type schemes are formulated to extend to all-speed regimes so that they can solve complex flow problems involving a wide range of Mach numbers (e.g., Liou 2006). The schemes are also known to be robust against a multidimensional shock anomaly at a high Mach number (carbuncle phenomena), whereas familiar multi-state Riemann solvers such as Roe and HLLC(D) schemes tend to suffer from it. Since these advantages are quite useful for MHD simulations as well, the extension of the scheme has been proposed thus far (Han et al. 2009, Kitamura et al. 2019). However, their schemes are not designed to capture the rotational discontinuity, and thus the accuracy may be insufficient to resolve the Alfvén wave.

In this study, we propose a new AUSM-type scheme that can capture the multiple MHD discontinuities. The numerical flux is split into mass flux, pressure flux, and magnetic tension flux that is proportional to the normal component of the magnetic field. We derive the magnetic tension flux that is consistent with the HLLD solution so as to capture the rotational discontinuity. We also modify the mass and pressure fluxes based on the Simple Low-dissipation AUSM (SLAU) schemes (Shima and Kitamura 2011, Kitamura and Shima 2013), in order to improve the robustness against the shock anomaly and the resolution of low speed flows. Various benchmark tests are conducted to evaluate the capability of the scheme. In particular, the scheme successfully solves a multidimensional MHD shock without the anomaly. Details of the scheme and its performance will be presented.



## 運動論的線形解析の固有値問題としての定式化

# 天野 孝伸 [1]

[1] 東大・理

## Eigenvalue Problem Formulation for Linear Kinetic Plasma Dispersion Analysis

# Takanobu Amano[1]

[1] University of Tokyo

The quality of space plasma measurements by in-situ spacecraft observations have been improved remarkably in recent years. The high temporal, energy, and angular resolutions of distribution function measurements in space allows us to look into detailed structures in velocity space. The distribution functions that deviate substantially from conventional Maxwellian or bi-Maxwellian are now commonly observed in many space plasma environments. Similarly, non-Maxwellian distribution functions are found in Particle-In-Cell (PIC) simulations as well.

Linear kinetic dispersion analysis has conventionally been performed assuming that the zeroth-order velocity distribution function can be represented by a superposition of Maxwellian distribution functions. It is very well known that the linear response for Maxwellian velocity distribution function is described by the standard plasma dispersion function. This allows us to make use of the conventional methodology in plasma physics in pursuing linear analysis. However, if the distribution function is far from Maxwellian, we need to adopt a different approach.

Another problem in conventional linear dispersion analysis is that it is essentially a root-finding problem. In other words, we usually start with an initial guess and try to find a solution iteratively. If we know a good initial guess, the convergence to the solution can be quite fast. Otherwise, we need trial and error with various (often randomly chosen) initial guesses. Since it is difficult to find all the (physically relevant) solutions, in general, we can not prove whether or not the system is stable (i.e., no mode with a positive growth rate) with this approach. Similarly, it is not easy to write a computer code that automatically surveys physical solutions for a wide range of parameter space.

In this report, we present a formulation of kinetic plasma dispersion analysis as an eigenvalue problem. The advantage of the eigenvalue problem formulation is that all the solutions (or eigenvalues) can be automatically obtained numerically without an iterative root-finding procedure. The basic idea is to expand the linearized distribution function with an appropriate orthogonal function basis that allows analytic continuation into the lower half of the complex velocity plane. As a proof of concept, we present the result obtained for the simplest example of electrostatic waves in an unmagnetized electron plasma. We will also discuss extensions of the method, including, multiple species, magnetized plasmas, electromagnetic waves, and non-Maxwellian distribution functions.

## A comparison of relativistic particle integrators in a fast magnetized flow

# Seiji Zenitani[1]; Tsunehiko Kato[2]

[1] Kobe U; [2] CfCA, NAOJ

The particle-in-cell (PIC) method is one of the most important methods to study complex plasma phenomena in space. Basic frameworks and detailed numerical schemes for PIC simulation have long been established. For example, the Boris (1970) integrator to advance particles was proposed a half century ago. However, there is a renewed attention to basic numerical schemes for PIC simulation, in particular in particle integrators. For example, Vay (2008) and Higuera & Cary (2017) have proposed numerical schemes to preserve the force-free condition,  $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = 0$ , which is ideal to study fast magnetized flows. The authors have also proposed higher-accuracy extensions of the popular Boris scheme (SZ & Umeda 2018, SZ & Kato 2019).

In this contribution, we will present a comparison of various particle integrators for PIC simulation. Carrying out 14,000 long-term test-particle simulations, we have carefully checked particle motions in the electromagnetic field, which is relevant to perpendicular shocks. We have found that the popular Boris solver numerically accelerates particles. The boost amplitude is proportional to  $(\Delta t)^2$ . One can suppress the boost by using higher-accuracy Boris-type schemes. The force-free schemes are supposed to be free from the boost, however, surprisingly, we have found that the Higuera-Cary scheme often decelerates particles. We will present second-order theories on the force balance and the angle accuracy to explain the numerical acceleration/deceleration.

## ジャイロ運動論的シミュレーションコードの双極型磁場配位への拡張

# 渡邊 智彦 [1]  
[1] 名大・理・物理

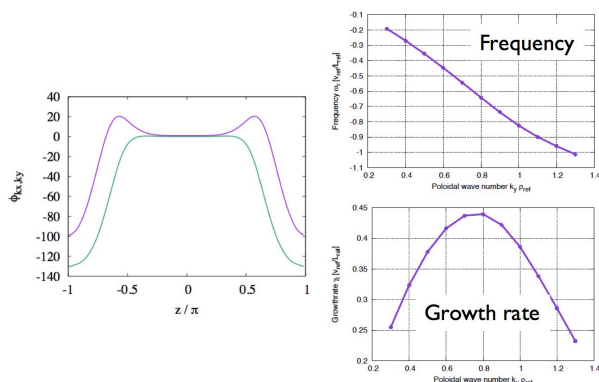
### Extension of a gyrokinetic simulation code to dipolar geometries

# Tomo-Hiko Watanabe[1]  
[1] Dept. Physics, Nagoya Univ.

A variety of space plasma phenomena in the Earth's magnetosphere are related to magnetized plasma instabilities, such as the kinetic-ballooning instability and the trapped-particle driven instability, and share common physics processes with magnetic fusion plasmas. The gyrokinetic equations have been widely used in theoretical and numerical studies on micro-scale (or kinetic) dynamics of fusion plasmas. Therefore, it is natural to consider application of the gyrokinetics to space plasmas as well.

We have developed the GKV code [1] for studying drift wave turbulence and zonal flows in tokamak and helical plasmas, and has extended the code to dipolar geometries. The initial result for the ring dipole configuration shows destabilization of a drift wave in the inner side of the torus. Figure shows the eigenfunction along the field line, the eigenfrequency and the linear growth rate of the ion temperature gradient mode in the zero beta limit. In the dipole configuration case, thus, that a stronger instability drive is found near by the Earth side boundary. This is attributed to the assumption of a constant pressure along the field line. We are currently extending the theoretical and numerical models to incorporate the non-uniform pressure distribution, and are applying the gyrokinetic code to shear Alfvén wave resonance.

[1] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24-32 (2006).



## Experimental investigations on space and astrophysical phenomena with intense lasers

# Yasuhiro Kuramitsu[1]

[1] GSE, Osaka Univ.

We have been working on model experiments of space and astrophysical phenomena, such as collisionless shocks, magnetic reconnections, and particle acceleration, using high power lasers. In laboratories, one can access the global structures of phenomena and the local information of plasmas in a controlled manner, and thus, the laboratory experiments can be a complementary tool to investigate space and astrophysical phenomena. We report our recent progress on collisionless shocks and particle acceleration in laser experiments together with the relevant numerical experiments.

## ピッチ角異方性を取り入れた統計的衝撃波ドリフト加速モデルによる非相対論的電子加速の理論解析

# 加藤 拓馬 [1]; 天野 孝伸 [1]  
[1] 東大・理

### A theory of a non-relativistic electron acceleration by the stochastic shock drift acceleration with a pitch-angle anisotropy

# Takuma Kato[1]; Takanobu Amano[1]  
[1] University of Tokyo

The acceleration of the cosmic ray is one of the important subjects in astrophysics. Galactic cosmic rays are believed to be accelerated by the 1st order Fermi acceleration (e.g. Drury 1983) at a supernova remnant (SNR) shock. However, this acceleration process is not efficient for non-relativistic electrons (with energies  $< 1\text{MeV}$ ). Then an alternative acceleration process of such electrons is needed to explain observed electron fluxes at SNRs. This is called the electron injection problem. It has still been discussed.

We proposed the stochastic shock drift acceleration as a plausible acceleration model of non-relativistic electrons (Katou and Amano 2019). This model takes into account both an adiabatic acceleration in the shock transition region and a stochastic pitch-angle scattering by whistler waves. Our previous study showed that this model reproduces a power-law energy spectrum and cutoff energy consistent with in-situ observations at the Earth's bow shock. However, we cannot discuss an electron distribution around the cutoff energy since the assumption of an isotropic pitch-angle distribution, which is considered in previous model, is not satisfied. In this study, we extend our model to include the dependence of an electron distribution on the pitch-angle. The new model considers the dependence of the distribution function on energy, space, and pitch-angle. We use the numerical code to solve the model equation. In this presentation, we discuss the spatial and pitch-angle dependence of distribution function near the cutoff energy and the dependence on macroscopic parameters (e.g. shock velocity and shock normal angle) of shocks.

宇宙線の加速は、宇宙物理学における重要なテーマの一つである。宇宙線のうち、銀河宇宙線と呼ばれるものは、超新星残骸における Fermi 加速 (e.g. Drury 1983) によって生成されていると広く信じられている。しかし超新星残骸では、Fermi 加速は非相対論的電子 ( $< 1\text{MeV}$ ) に関しては非効率であり、観測された電子フラックス量を説明するためには、これらの電子について別の加速過程が必要である。この問題は電子注入問題と呼ばれていて、現在においても未解決である。

我々はこの電子加速過程として、衝撃波遷移層における断熱的な電子加速過程にホイッスラー波によるピッチ角散乱の効果を取り入れた統計的衝撃波ドリフト加速モデルを提案した (Katou and Amano 2019)。これまでの研究で、この加速モデルがエネルギースペクトルの形 (ベキ型) やカットオフ・エネルギーが、地球バウ・ショックにおける衛星観測と整合的であり、非相対論的電子の加速機構として有用である可能性が高いことが判明した。しかしカットオフエネルギー付近のエネルギー帯では、これまでの研究で仮定していた粒子分布のピッチ角等方性が崩れてしまうため、既存のモデルを適用できなかった。そこで本研究では、これまで構築した統計的ドリフト加速の理論を電子のピッチ角異方性を考慮できるように拡張し、カットオフ付近における電子加速について議論する。新しいモデルでは、既存のモデルで考えていたエネルギー依存性に加えて、空間・ピッチ角依存性について考慮する。ピッチ角異方性を含めた粒子の分布関数の理論計算は解析的に行うことが難しいため、計算は数値的に行う。本発表では、拡張したモデルを元に求めたカットオフ付近における空間分布やピッチ角分布の、衝撃波のマクロ・パラメーター (衝撃波速度・衝撃波角など) に関する依存性について議論する。

## 相対論的衝撃波における高強度電磁波放射と粒子加速

# 岩本 昌倫 [1]; 天野 孝伸 [1]; 星野 真弘 [1]; 松本 洋介 [2]  
[1] 東大・理; [2] 千葉大理

## Intense electromagnetic wave emission and associated particle acceleration in relativistic shocks

# Masanori Iwamoto[1]; Takanobu Amano[1]; Masahiro Hoshino[1]; Yosuke Matsumoto[2]  
[1] University of Tokyo; [2] Chiba University

The acceleration mechanism for generating ultra-high-energy cosmic rays (UHECRs) is one of the most important unsolved problems in astrophysics. Relativistic shocks in extragalactic astrophysical objects such as jets from active galactic nuclei (AGNs) and gamma-ray bursts (GRBs) are considered as efficient acceleration sites and commonly proposed sources for UHECRs. Observations of anisotropy in the arrival direction of the UHECRs favor the extragalactic origin.

In relativistic shocks, large-amplitude electromagnetic waves are excited by synchrotron maser instability (SMI) in the shock transition and propagate upstream (Hoshino & Arons 1991). The precursor wave emission via the SMI is widely studied by means of 1D particle-in-cell (PIC) simulations. Hoshino (2008) demonstrated that the pump electromagnetic wave decays into a Langmuir wave via parametric decay instability and found that nonthermal particles are generated in the manner analogous to wakefield acceleration (WFA) during the nonlinear process of the Langmuir wave collapse. The WFA is first proposed in laboratory plasmas (Tajima & Dawson 1979) and recently applied for UHECR acceleration (e.g., Chen et al. 2002). The WFA in the context of relativistic shocks is considered a promising candidate for UHECR acceleration.

It was believed that in multidimensional shocks, the intense wave emission via the SMI would cease soon due to inhomogeneity along the shock surface. Recently, however, our high-resolution 2D PIC simulations in pair plasmas showed that the wave emission continues (Iwamoto et al. 2017, 2018). Although our studies give positive results for the WFA in relativistic shocks, we could not directly demonstrate it because finite mass difference of two opposite charges is essential for exciting the wakefield.

In this presentation, by performing 2D PIC simulation of ion-electron shocks, we will demonstrate that the wakefield is indeed induced by the large-amplitude precursor wave. Especially for relatively high magnetization, the precursor wave amplitude is significantly amplified and exceeds that in pair plasmas due to a positive feedback process associated with ion-electron coupling through the wakefield. Nonthermal electrons and ions are generated during the nonlinear process of the wakefield collapse and the particle energy spectrum shows a power-law distribution.

## Vlasov code simulation of contact discontinuities

# Takayuki Umeda[1]; Naru Tsujine[2]; Yasuhiro Nariyuki[3]

[1] ISEE, Nagoya Univ.; [2] University of Toyama; [3] Faculty of Human Development, Univ. Toyama

The stability of contact discontinuities formed by the relaxation of two Maxwellian plasmas with different number density but the same plasma thermal pressure is studied by means of a one-dimensional electrostatic full Vlasov simulation. Our simulation runs with various combination of the ion-to-electron ratio of the high-density and low-density regions showed that transition layers of density and temperature without jump in the plasma thermal pressure are obtained when the electron temperatures in the high-density and low-density regions are almost equal to each other. However, the stable structure of the contact discontinuity with a sharp transition layer on the Debye scale is not maintained. It is suggested that non-Maxwellian velocity distributions are necessary for the stable structure of contact discontinuities.

## ULF wave modulation of the whistler-mode chorus generation in the inner magnetosphere

# Yuto Katoh[1]; Lunjin Chen[2]

[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] U Texas, Dallas

We carry out electron hybrid code simulations for the study the modulation of the generation process of whistler-mode chorus emissions under the presence of ULF waves in the inner magnetosphere. Previous studies revealed properties of chorus generation depending on the number density of energetic electrons [Katoh et al., JGR 2011], temperature anisotropy of velocity distribution function [Katoh et al., JGR 2018], and spatial gradient of the background magnetic field [Katoh and Omura, JGR 2013]. The properties of both energetic electrons and the background magnetic field are also varied by the presence of ULF waves in the inner magnetosphere [e.g., Xia et al., 2016]. The range of parameters controlling chorus generation should be examined by a self-consistent simulation reproducing the generation process of chorus emissions. By referring the variation of the background magnetic field for toroidal and poloidal mode ULF waves, we carry out a series of electron hybrid code simulations for the condition of chorus generation. Simulation results clarify that the variation of the spatial gradient of the background magnetic field controls whether or not distinct chorus emissions are generated from the magnetic equator. The results of the present study serve useful information in understanding in-situ observation of both chorus and ULF waves and related wave-particle interactions occurring in the inner magnetosphere.



## 高速イオンによる低域混成波不安定性とその非線形発展に関する粒子シミュレーション

# 小谷 翼 [1]; 樋田 美栄子 [2]; 森高 外征雄 [2]; 田口 聡 [3]  
[1] 京大・理・地惑; [2] 核融合研; [3] 京大理

### PIC simulation on nonlinear development of lower-hybrid instabilities driven by energetic ions.

# Tsubasa Kotani[1]; Mieko Toida[2]; Toseo Moritaka[2]; Satoshi Taguchi[3]  
[1] Earth and Planetary Sciences, Kyoto Univ.; [2] NIFS; [3] Grad school of Science, Kyoto Univ.

Instabilities driven by energetic ions are important issues both for space plasmas and magnetic fusion plasmas. Radio Frequency (RF) waves in the range from the ion cyclotron frequency to the lower hybrid resonance frequency are often observed during the period of neutral beam injection (NBI) in Large Helical Device (LHD) plasmas. These waves can be excited by instabilities due to energetic ions generated by the NBI perpendicular to the magnetic field. Some studies indicate that these waves contribute the ion energization in the magnetosphere.

Using a one-dimensional, electromagnetic, Particle-In-Cell (PIC) code, we study instabilities driven by energetic ions assuming that the energetic ions have a non-Maxwellian ring-like distribution in the velocity space perpendicular to the magnetic field. This PIC code enables us to self-consistently simulate full dynamics of electrons and ions and evolution of electromagnetic fields, using the full Maxwell's equations and the equations of motion of particles. We focus on the nonlinear evolution of LHW and ICEs caused by continuous energetic-ion injection into a plasma.

Simulating in the 50 times periods of ion-cyclotron period, LHW grows stronger in the initial phase although ICEs grow gradually. In the lower-hybrid frequency region, the peak wave number increases as time proceeds.

高速イオンが引き起こす不安定性は核融合プラズマや宇宙プラズマに共通する重要な物理過程である。大型ヘリカル装置を始めとする磁場閉し込めプラズマ実験装置では、プラズマ加熱のために高速の中性粒子注入されることで磁場に垂直なリング状の速度分布をもつ高速イオンが生じる。その結果、イオンサイクロロン放射や低域混成波といった磁場に垂直に伝搬する波動が励起されると考えられている。地球磁気圏では、これらの波が地球大気からの酸素イオンの流出に寄与していると指摘されている。本研究では、磁場に垂直なリング状の速度分布をもつ高速イオンがもたらす低域混成波不安定性とその非線形発展を、空間1次元の電磁粒子シミュレーションを用いて調べている。特に、高速粒子をプラズマに注入し続けることによる効果に注目している。イオンサイクロロン周期の50倍程度の時間でシミュレーションを行なったところ、初期では低域混成波が強く不安定になり、時間が経過していくにつれてイオンサイクロロン放射が少しずつ強くなること明らかにした。また、低域混成波の振動数帯で不安定になる波動の波数が時間と共に大きくなること明らかにした。講演では、初期にのみ高速イオンを配置した場合のシミュレーションとの比較や、高速粒子の速度分布がデルタ関数的な場合と広がりを持つ場合の比較についても報告する。

## 相対論的電子-イオンプラズマ中のシンクロトロンメーザー不安定性による電子加速

# 江崎 陽大 [1]; 松清 修一 [2]; 羽田 亨 [3]  
[1] 九大・総理工・大海; [2] 九大・総理工; [3] 九大総理工

### Electron acceleration through synchrotron maser instability in a relativistic electron-proton plasma

# Yodai Esaki[1]; Shuichi Matsukiyo[2]; Tohru Hada[3]  
[1] ESST, Kyushu Univ.; [2] ESST Kyushu Univ.; [3] IGSES, Kyushu Univ

The acceleration mechanism of high energy cosmic rays is still controversial. Neutron stars, active galactic nuclei and gamma-ray bursts are thought to be the possible sources of the cosmic rays. Furthermore, high-intensity electromagnetic radiations are observed around such high energy astrophysical objects. It is known that large-amplitude electromagnetic waves are excited in relativistic shock fronts by synchrotron maser instability (SMI). SMI is generated through the resonance between relativistic cyclotron motions of a plasma and electromagnetic waves. Previously, the SMI in an electron-positron plasma was extensively studied by Hoshino & Arons et al. (1991) and Iwamoto et al. (2017), but few studies have focused on SMI in an electron-proton plasma which is more general in space. In this presentation, we report the results of numerical simulation of SMI in an electron-proton plasma, using particle-in-cell simulation. The system has one spatial dimension(x direction) and the boundary conditions are periodic. The plasma is uniformly magnetized, with ambient magnetic field in the z-direction. The initial plasma distribution function is a ring distribution for both electrons and protons. The plasma temperature is  $T_{e,p}/m_{e,p}c^2=3.9 \times 10^{-3}$ , the Lorentz factor of the ring is  $\gamma_0=40$ , the relativistic cyclotron frequency  $\Omega_{ce}/\omega_{pe}=2.23 \times 10^{-1}$ , the mass ratio  $m_i/m_e=20$ , and the system size  $L/(c/\Omega_{ce})=1.14 \times 10^2$ . Two instabilities, electron-SMI and proton-SMI, are generated. The latter has larger spatio-temporal scales than the former. Some of the electrons accelerated by the electron-SMI are further accelerated efficiently by the proton-SMI. In the presentation we discuss linear dispersion relation of the electron- and proton-SMI.

観測される宇宙線のうち特にエネルギーの高いものについては、その加速機構はほとんどわかっていない。宇宙線の加速現場として考えられている中性子星や活動銀河核、ガンマ線バーストなどでは、高輝度の電磁放射も観測されており、上記のような高エネルギー天体では粒子加速と高輝度電磁放射が同時に起こっていると考えられる。粒子加速と高輝度電磁放射の両方を説明する物理機構としてシンクロトロンメーザー不安定性 (SMI) が知られている。SMIは、プラズマが磁力線垂直方向に相対論的な運動エネルギーを持つ場合に起こる不安定性で、相対論的なサイクロトロン共鳴によって電磁場を励起する。これまでに、Hoshino and Arons (1991) や Iwamoto et al. (2017) によって電子-陽電子プラズマ中の SMI の研究が行われているが、宇宙でより一般的な電子-イオンプラズマについてはあまり調べられていない。本研究では、電子-イオンプラズマ中の SMI の詳細を明らかにすることを目的とする。

相対論的電子-イオンプラズマ中の SMI について、1次元 Particle In Cell シミュレーションを用いて数値実験を行った。1次元 (x 方向) 周期境界を仮定し、一様背景磁場 (z 方向) のもと、一様な電子-イオンプラズマという条件で計算を行う。粒子の初期分布関数は、相対論的リング分布 (磁力線垂直方向に相対論的な運動エネルギーを持つ分布) とし、他の初期条件は、リング分布のローレンツ因子  $\gamma_0:40$ , 温度  $T_e/m_e c^2:3.9 \times 10^{-3}$ , 相対論的なサイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比  $\Omega_{ce}/\omega_{pe}:2.23 \times 10^{-1}$ , 質量比  $m_i/m_e:20$ , システムサイズ  $L/(c/\Omega_{ce}):1.14 \times 10^2$  とした。結果として、異なる時間帯で2つの不安定性が見られた。どちらの不安定性においても電磁場のエネルギーが上昇し、1つ目の不安定性では電子が、2つ目ではイオンがエネルギーを失っている。ここでは、1つ目の不安定性を電子 SMI、2つ目の不安定性をイオン SMI と呼ぶ。電子 SMI ではイオンのエネルギーはほとんど変化しておらず、これは電子 SMI がイオンの影響を受けないことを示唆している。イオン SMI の際には、電子もエネルギーを得ていることがわかった。また、電磁場の3方向成分それぞれについてのエネルギー-時間発展を見ると、電子 SMI ではそれぞれのエネルギーの増加に偏りがなかったことに対し、イオン SMI では電場の y 方向成分が他の成分に比べて大きく成長した。電子の運動量空間での分布を見ると、電子 SMI で分布が幅を持った後、イオン SMI で一部の電子が x 方向に大きく加速されていることがわかった。これらから電子は、イオン SMI によってエネルギーを得た y 方向電場と背景磁場による  $E \times B$  ドリフトによって加速されたと考えられる。最終的に、被加速電子のエネルギーとイオンのエネルギーは同程度になった。以上の内容に加えて、相対論的電子-イオンプラズマの線形分散関係についても議論する。

## 無衝突垂直衝撃波遷移層におけるイオンスケール不安定性の上流パラメータ依存性

# 西貝 拓朗 [1]; 天野 孝伸 [2]  
[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理

## Ion scale instabilities in the transition layer of collisionless perpendicular shock: Dependence on upstream parameters

# Takuro Nishigai[1]; Takanobu Amano[2]  
[1] Earth and Planetary Science, Tokyo Univ.; [2] University of Tokyo

The acceleration of cosmic rays (high-energy charged particles) is one of the most important problems in the space physics. The collisionless shock waves in plasmas have been studied over half a century because they are believed to be the major source of cosmic rays. In this study, we investigate plasma instabilities in the collisionless shock transition layer and associated particle acceleration and heating processes. In the transition layer, there are three electromagnetic field structures called foot, ramp and overshoot that are generated by the ions reflected by a potential barrier in the shock (reflected ion). In the regions, various kinds of instabilities are excited and energy exchange proceeds between three plasma species, i.e., upstream ions, electrons and reflected ions.

Low-frequency and long-wavelength instabilities generated in the transition layer strongly affect the global electromagnetic structure of the shock. In particular, we focus on Mirror instability, Alfvén Ion Cyclotron (AIC) instability and Weibel instability, all of which are excited by an effective temperature anisotropy generated by the reflected ions. It is well known that Mirror and AIC instabilities generate a rippled shock surface (Winske & Quest, 1988). On the other hand, it has been found that the Weibel instability dominates at very high Mach number shocks. The magnetic field amplified by the Weibel instability eventually dissipates via spontaneous turbulent magnetic reconnection that produces high-energy electrons (Matsumoto et al., 2015). This means that a fraction of the reflected ions' kinetic energy is converted into the upstream electrons and ions through magnetic field amplification. It is a very hot topic that requires further investigation. Qualitatively, the Weibel instability will be the dominant mode at very high Mach numbers (or weak magnetic field), and otherwise, the rippling mode (Mirror and AIC) should be dominant. However, the parameter dependence of the transition between the two regimes has not been understood.

In this study, we adopt an idealized model for describing the dynamics in the shock transition layer. We consider a homogeneous plasma in the upstream rest frame, which consists of three particle species: the upstream ions, upstream electrons, and reflected ions. The initial velocity distributions are assumed to be Maxwellian distributions for the upstream ions and electrons while the reflected ions form a ring distribution in the direction perpendicular to the ambient magnetic field. An initial result of two-dimensional Particle-in-Cell (PIC) simulation shows that the upstream electrons are mainly heated in the perpendicular direction by electrostatic waves in the initial phase. On the other hand, almost no change was observed in the ion velocity distribution at this stage. In the subsequent phase, we observed a growth of the AIC instability and pitch-angle scattering of the reflected ions by the generated waves. In this presentation, we will report simulation results on the transition between different regimes that will happen depending on upstream physical parameters such as the Alfvén Mach number, plasma-to-cyclotron frequency ratio, and ion-to-electron mass ratio.

プラズマ中の無衝突衝撃波が半世紀以上にわたり、多様なアプローチによって研究が行われているのは、無衝突衝撃波が宇宙物理学の最も重要な課題の一つである宇宙線（高エネルギー粒子）の生成に大きく関与しているためである。本研究では無衝突衝撃波の遷移層領域におけるプラズマ不安定性およびそれに伴う粒子の加熱・加速過程を調べる。衝撃波上流から下流に流入するイオンのうち、衝撃波面のポテンシャル障壁を越えられない一部の粒子は衝撃波面で跳ね返り（反射イオン）、上流から流入するイオンと相互作用する。この反射イオンの効果によって遷移層に foot, ramp, overshoot と呼ばれる構造が形成される。この衝撃波遷移層では様々な時間スケール、空間スケールで不安定性が進行し、それに伴い上流電子、上流イオン、反射イオンの3粒子種間でのエネルギーのやりとりが行われる。

遷移層で発生する不安定性の中で、低周波、長波長領域のものは衝撃波全体の電磁場構造に大きな影響を与えることになるが、その中でも特に本研究で着目するのは、反射イオンがもたらす実効的な温度異方性を自由エネルギーとして成長する Mirror 不安定性、Alfvén Ion Cyclotron (AIC) 不安定性、Weibel 不安定性の3種である。Mirror、AIC 不安定はリップルと呼ばれる衝撃波面が波打つような構造を作り出すことが知られている (Winske & Quest, 1988)。また最近では、衝撃波のマッハ数が大きい場合には Weibel 不安定が励起され、これに伴う磁場増幅、さらには増幅された磁場の自発的な磁気再結合による散逸を介した電子加速過程が議論されている (Matsumoto et al., 2015)。これは反射イオンのエネルギー（衝撃波の運動エネルギー）の一部が、磁場増幅を介して上流電子やイオンに輸送されていることを意味し、さらなる解析が求められるホットなトピックとなっている。定性的には Weibel 不安定性は、マッハ数が高い（磁場が弱い）衝撃波において支配的になり、そうでない場合にはリップル（AIC/Mirror）が支配的になると考えられているものの、両者の切り替わりのパラメータ依存性は理解されていない。

本研究では、衝撃波の遷移層を理想化したモデルとして、上流静止系で、空間一様性を仮定し、上流電子、上流イオン、反射イオンの3成分からなる系を考える。ここで上流電子・上流イオンの初期速度分布としてはマクスウェル分布を、反射イオンについては磁力線垂直方向にリング状に分布する速度分布（リング分布）を仮定した。この条件下で二次元PICシミュレーションを行った初期結果では、初期フェーズでは静電波動により上流電子のみが磁場に垂直方向に大きく加熱されたものの、その段階ではイオンの速度分布にほとんど変化は見られなかった。その後のフェーズにおいてAIC不安定が支配的な構造が現れ、反射イオンがピッチ角散乱される様子が見られた。本発表ではアルフベンマッハ数やサイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比、電子・イオンの質量比といった物理パラメータに対する不安定性の性質の遷移を調べた結果を報告する。

## 高強度レーザーを用いた衝撃波リフォーメーションの実証実験

# 樋口 琢海 [1]; 松清 修一 [2]; 羽田 亨 [3]; 村上 洋大 [4]  
[1] 九大・総理工・大海; [2] 九大・総理工; [3] 九大総理工; [4] 九大・総理工・大海

### High power laser experiment on shock reformation

# Takumi Higuchi[1]; Shuichi Matsukiyo[2]; Tohru Hada[3]; Hiroo Murakami[4]  
[1] ESST, Kyushu Univ.; [2] ESST Kyushu Univ.; [3] IGSES, Kyushu Univ.; [4] ESST, IGSES, Kyushu Univ.

Collisionless shocks often play essential roles in various high-energy phenomena in space. They are different from the usual collisional shocks in various ways. In this presentation, we discuss the so-called "shock reformation," one of the features unique to the collisionless shock. It is a periodic collapse and formation of the shock front that occurs even when the upstream plasma is uniform and time-stationary. Within the shock reformation cycle, the shock foot, ramp, overshoot, and the ion reflection from the shock front all repeat to appear and disappear. The shock reformation was theoretically predicted in the 1980s by computer simulations but has not been identified in laboratory experiments. This research aims at the first demonstration of shock reformation using the Gekko XII high power laser at the Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University.

The experimental method is as follows. An aluminum foil target surrounded by nitrogen gas, to which an external magnetic field is applied, is irradiated by the Gekko XII laser ( $\sim 600\text{ J} \times 4$  beams, a wavelength of 1053 nm, a Gaussian long pulse (1.3 ns)). The target plasma sweeps the magnetized gas plasma, which is produced by the intense radiation due to laser-foil interaction. As a result, a shock wave is generated in the magnetized gas plasma. The target is an aluminum foil of 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  1-2 mm. A focal spot size of the laser is 0.3-2.8mm. The gas pressure is 0, 2.5, 5 Torr. We utilize a number of diagnostics such as self-emission measurement, shadow measurement, collective Thomson scattering(CTS) measurement. The external magnetic field parallel to the target surface is applied by a Helmholtz coil (50 turns  $\times$  4). Using a capacitor bank consisting of two 3 mF  $\times$  4 capacitors, charging at 1.4 kV and driving a pulse current with a duration of about several hundred microseconds, a uniform magnetic field of about 4 T is applied in the region of interest. In the ILE experiment conducted in June 2019, we confirmed the generation of shock waves for each gas pressure. Furthermore, the experiment with the external magnetic field of 2.8 T was succeeded and found that the characteristic of shock propagation is different from the cases without an external magnetic field. In the forthcoming ILE experiment scheduled in August, we will conduct experiments with an external magnetic field of 3.5 T or more to demonstrate the shock wave reformation. Detailed results of the analysis will be presented.

宇宙における高エネルギー現象では、しばしば無衝突衝撃波が重要な役割を果たす。無衝突衝撃波の散逸機構は複雑で、未だよくわかっていない。散逸機構の一つとして知られる衝撃波リフォーメーションは、上流プラズマが完全に一様・定常な場合でも発現する衝撃波面の周期的な崩壊・再形成過程であり、無衝突系に特有の現象である。衝撃波による反射イオンのジャイロ運動に伴って、フットやランプ、オーバーシュートと呼ばれる構造が形成・崩壊を繰り返す。1980年代に理論的に予測されたが、未だ実証されるには至っていない。本研究では、再現性やパラメータの制御に優れている大阪大学レーザー科学研究所 (ILE) との共同実験により、宇宙のその場観測では実現していない衝撃波リフォーメーションの実証を目指す。

実験方法は、以下のとおりである。外部磁場を印加した窒素ガス中のアルミ箔ターゲットに激光 12 号レーザーを照射し、ターゲットプラズマが超音速で磁化したガスプラズマを掃きためることで、磁化ガスプラズマ中に衝撃波を生成する。照射レーザーは $\sim 600\text{ J} \times 4$  ビーム、波長は 1053nm、ガウス型長パルス (1.3ns) で、照射スポット径は 0.3~2.8mm である。ターゲットは 3mm $\times$ 3mm $\times$ 1~2mm のアルミ箔で、ガス圧は 0,2.5,5Torr とした。光学計測として、自発光計測、シャドウ計測、協同トムソン散乱計測を用いた。ヘルムホルツコイル (50 回巻 $\times$ 4) によってターゲット面に対して平行方向の外部磁場を印加する。3mF $\times$ 4 のコンデンサ 2 個から成るキャパシタバンクを用い、1.4kV で充電し、持続時間数百  $\mu\text{ s}$  程度のパルス電流を駆動することで、2つのコイル間に 4T 程度の一様磁場を印加する。これまでに得た、広空間領域にわたる外部磁場生成および衝撃波遷移層のプラズマ局所量計測のノウハウを活用し、衝撃波面のイオンジャイロスケールの周期的な時間・空間変動を捉える。特に、遷移層内部の局所量の計測に有効な協同トムソン散乱計測により、衝撃波再形成の周期性を捉える。

2019 年 6 月に行った実験では、各ガス圧に対して衝撃波の生成を確認した。また、外部磁場 2.8T を印加した実験をはじめて行い、自発光計測により、非磁化中との大きな違いを捉えることに成功した。8 月に行われる実験では、外部磁場 3.5T 以上の実験を行い、衝撃波リフォーメーションの実証を目指す。解析が間に合えばその結果も報告する。

## 高強度レーザーによる衝撃波リフォーメーション実証実験のための数値シミュレーション

# 村上 洋大 [1]; 松清 修一 [2]; 羽田 亨 [3]  
[1] 九大・総理工・大海; [2] 九大・総理工; [3] 九大総理工

### One-dimensional PIC simulation of shock reformation reproduced in high power laser experiment

# Hiroo Murakami[1]; Shuichi Matsukiyo[2]; Tohru Hada[3]  
[1] ESST, IGSES, Kyushu Univ.; [2] ESST Kyushu Univ.; [3] IGSES, Kyushu Univ

We have performed experimental demonstration of a shock reformation using a high power laser at the Institute of laser engineering (ILE) at Osaka University. In shock reformation a shock front is periodically formed and destroyed in a time scale of the gyro motion of ions reflected at the shock. It was predicted by particle-in-cell simulation in the 80's, but has not been verified observationally. In the experiment, the supersonic target plasma generated by ablating a flat target foil with high power laser sweeps a surrounding magnetized gas plasma to form a shock in it. In this study we reproduce the interaction between the magnetized gas plasma and the un-magnetized target plasma using full particle-in-cell simulation, and clarify the measurement conditions and setting of the experiment for demonstration of reformation.

As initial conditions, one-dimensional space ( $x$  direction) is divided into two regions. The right side is filled with the magnetized gas plasma, and the left side is filled with the un-magnetized target plasma. While the gas plasma is at rest, the target plasma is continuously injected from the left side boundary with a supersonic flow velocity. The magnetic field in the gas plasma is in the  $z$  direction. The density ratio of the target plasma to the gas plasma is 9, the temperature ratio is 4, the ratio of the electron plasma frequency to the electron cyclotron frequency in the gas plasma is 10, and the ratio of the flow velocity of the target plasma to Alfvén velocity in the gas plasma is 12. Also, ion to electron mass ratio of in both regions is 100. A discontinuity is formed between the target plasma and the gas plasma (contact discontinuity), and a shock is generated in the gas plasma. We confirmed that a part of the target plasma penetrates into the gas plasma across the contact discontinuity, and some target plasma is reflected at the discontinuity. On the other hand, the gas plasma easily penetrates into the target plasma across the discontinuity, and those gas plasma ions are accelerated. Furthermore, we confirmed that shock reformation occurs in the gas plasma. We will also discuss the measurement conditions suitable for the experiment by examining the time-space scale of the shock reformation.

我々は現在、大阪大学レーザー科学研究所 (ILE) との共同実験により、高強度レーザーを用いた衝撃波リフォーメーションの実験的実証を試みている。リフォーメーションとは、衝撃波面で反射されたイオンのジャイロ運動に伴って、波面が周期的に形成・崩壊を繰り返す現象で、80年代に粒子シミュレーションによって予測されたが、未だ観測的実証はなされていない。実験では、平板ターゲットを高強度レーザーでアブレーションしてできる高速ターゲットプラズマが、3.5T程度の外部磁場を印加した雰囲気ガスプラズマを掃きためることで、雰囲気ガスプラズマ中に衝撃波を生成する。本研究では、この磁化したガスプラズマと磁化していないターゲットプラズマの相互作用をフル粒子計算を用いて再現し、リフォーメーションの実証に必要な実験設定や計測のための条件を明らかにする。

フル粒子計算では、初期に1次元空間 ( $x$  方向) を2つの領域に分け、右側に磁化したガスプラズマ、左側に磁化していないターゲットプラズマを詰める。ガスプラズマは静止しているとし、 $z$  方向に磁場を印加する。ターゲットプラズマは有限速度で継続的に左側境界から注入されてガスプラズマを押し、ターゲットプラズマとガスプラズマの密度比は9、温度比は4、ガスプラズマ中の電子プラズマ振動数とサイクロトロン振動数の比は10とし、ターゲットプラズマの入射速度とガスプラズマ中のアルフベン速度の比は12とした。また、両プラズマ中のイオンと電子の質量比は100とした。ターゲットプラズマとガスプラズマの間に不連続面が形成されるとともに、ガスプラズマ中に衝撃波が発生した。ターゲットプラズマのごく一部は不連続面を超えてガスプラズマ中に侵入し、また一部は不連続面で反射されることが分かった。一方ガスプラズマは比較的容易に不連続面を超えてターゲットプラズマ中に侵入でき、侵入したガスプラズマイオンは加速されることが分かった。さらに、衝撃波でガスプラズマ中のイオンの一部が反射されてリフォーメーションが起こることを確認した。発表では、リフォーメーションの時間・空間スケールを精査し、実験での計測条件を検討する。

## 太陽風と火星起源イオンのフォボス表面への衝突の数値実験

# 田邊 正樹 [1]; 寺田 直樹 [2]; 三宅 洋平 [3]; 白井 英之 [4]

[1] 東北大・理・宇宙地球物理; [2] 東北大・理・地物; [3] 神戸大学; [4] 神戸大・システム情報

## Numerical simulations of the solar wind and ions of martian origin precipitating onto the surface of Phobos

# Masaki Tanabe[1]; Naoki Terada[2]; Yohei Miyake[3]; Hideyuki Usui[4]

[1] Dep. Geophysics, Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] Kobe Univ.; [4] System informatics, Kobe Univ

<http://pat.gp.tohoku.ac.jp/>

We investigate the trajectories and precipitations of the solar wind plasma and ions of martian origin onto the surface of Phobos using electrostatic particle-in-cell (PIC) and test particle simulations. While the origin of Phobos is still unclear, the two hypotheses, captured origin or giant impact origin, have been proposed. The captured scenario is based on the fact that Phobos has reflection spectra resembling D-type asteroids. But this scenario has difficulty in explaining Phobos orbit (nearly circle and small inclination). On the other hand, giant impact scenario relatively naturally explains the characteristics of the orbit. However, it is unclear whether the mixture of martian mantle and impact asteroid materials have reflection spectra similar to those of Phobos. To elucidate the giant impact scenario, we have to reveal the alternations of the surface materials and spectra by space weathering and/or the impact of small dusts. For revealing the effects of space weathering processes by the solar wind plasma and ions of martian origin, we examine the distribution of ions precipitating onto the surface of Phobos.

The orbits of ions originating from the atmosphere of Mars are affected by electromagnetic fields generated by the solar wind-Phobos interaction. For this reason, we need to evaluate the electric potential around Phobos to track these ions. We calculate a quasi-steady state solution of the electric potential around Phobos in the solar wind using a self-consistent PIC simulation. Though Phobos mean size is about 11 km, we changed it to 1 km in simulation to save computational resources. We used the approximately the real ratios of the solar wind bulk to thermal velocities and Phobos size to ion gyro radius. 2-D electrostatic PIC simulations were performed under a southward interplanetary magnetic field condition. We found that the night side of Phobos is negatively charged and it decreases in the deep inside the wake region. The surface charging was stronger around the pole. Then, we calculated the orbits of ions of martian origin to estimate the amount of incident ions to the Phobos surface using a test particle simulation. In this presentation, we show the electric potential around Phobos and the distribution of incident ions for each species of ions originating from Mars.

私たちは太陽風プラズマと火星大気から流出するイオンの追跡を行い、それらが火星の衛星フォボスの表面に衝突する過程の数値シミュレーションを行った。フォボスの起源は、始原小惑星の捕獲説と巨大衝突説が有力視されているが未決着である。捕獲説は、フォボスがD型小惑星に似た反射スペクトルを持つことに依るが、衛星軌道(真円に近く、赤道面に沿った軌道)の説明は困難である。巨大衝突説は、衛星軌道の特徴を比較的自然的に説明するが、火星マントル物質と衝突天体物質の混合物が、フォボスと同様の反射スペクトルを持つかは不明である。巨大衝突説を立証するためには、宇宙風化作用や微小天体衝突によるフォボス表層物質の変成と反射スペクトルの変化を明らかにする必要がある。そこで本研究は、太陽風プラズマのみならず、火星大気から流出するイオンの影響も含めた宇宙風化作用を明らかにすべく、これらのイオンのフォボス表面への衝突分布を調査した。

火星大気起源のイオンは、太陽風相互作用によりフォボス周辺に作られた電磁場によって軌道が曲げられて表面に衝突するため、追跡を行うためにはフォボス周辺の静電ポテンシャル分布を見積もる必要がある。そこで私たちは表面の静電ポテンシャル分布を自己無撞着に解けるPICコードを用いて、太陽風条件下における準定常状態のフォボス周辺ポテンシャル分布を計算した。フォボスのサイズは現実の1/11サイズである1 kmとし、太陽風速度とイオン・電子それぞれの熱速度の比、さらにフォボスサイズに対するイオンのジャイロ半径の比を現実と揃え、南向き磁場の下で2次元の静電プラズマ粒子シミュレーションを行った。その結果フォボス夜側において負の帯電がみられた。また、夜側の中央付近では負の帯電が多少弱められているという結果が得られた。また帯電による電場は夜側において極に近づくほど強く発生していることもわかった。そしてここで得られた電磁場環境の元でテスト粒子シミュレーションを行い、火星大気起源イオンの軌道を追った。本発表では計算資源の都合上スケールダウンを行って計算した静電プラズマ粒子シミュレーションの結果を示した後、火星起源イオンについてイオン種ごとの軌道を示してフォボス表面にアクセスするイオンの衝突分布を議論する。

## 宇宙エレベータとデブリとの衝突の数値シミュレーション

# 梶田 大智 [1]; 羽田 亨 [2]; 松清 修一 [3]; 辻野 勇樹 [4]  
[1] 九大・総理工・大海; [2] 九大総理工; [3] 九大・総理工; [4] 九大・総理工・大海

### Numerical simulation of a collision between space elevator and space debris

# Daichi Sugita[1]; Tohru Hada[2]; Shuichi Matsukiyo[3]; Yuki Tsujino[4]  
[1] ESST, Kyushu Univ.; [2] IGSES, Kyushu Univ.; [3] ESST Kyushu Univ.; [4] ESST, Kyushu Univ.

The main elements of the space elevator are a long and sturdy cable that extends from the ground to the outer space (up to  $\sim 16$  Re) and a vehicle (climber) that can travel back and forth along the cable. If it is realized, the system will be a completely new traffic infrastructure that can be used continuously for a long time. The space elevator has the advantages of costs, environmental impact, and safety aspects compared to conventional rockets. Also, the cost-effectiveness of launching spacecraft from the space elevator has been discussed. Despite the early proposal of the key concepts (the idea of a “tower” reaching geosynchronous orbit was proposed by a Russian scientist Konstantin Tsiolkovsky in 1895), the space elevator was far from realization due to the high technical demands of the cable. However, with the discovery and development of new materials typified by carbon nanotubes, the feasibility has increased, and there appear an increasing number of academic studies, for example, on the conceptual design (e.g., Edwards, 2007), and climber and wind influence (e.g., Lang, 2005, Williams, 2009), although there are still many unsolved issues.

In this presentation, we discuss the collision of space debris with the elevator. It is well known that the near-earth environment is filled with an enormous number of space debris with a variety of sizes and weights. Although the population is relatively low, there are large and heavy debris (such as “dead satellites”) that may hit the space elevator in a long time scale, giving a significant impact to the elevator. In order to proceed, we first developed a numerical model to simulate the motion of the cable using the lumped-mass model, i.e., the cable is represented by a continuous elastic spring-mass point system. The following forces are included in the model: gravitational force due to the Earth, the centrifugal force and the Coriolis force due to the rotation of the Earth, internal stress and internal dissipation due to the cable. After determining the equilibrium positions of the mass points, we then checked small-amplitude oscillations of the system and verified that they correspond to those obtained by eigenvalue analysis. We observe that, when a large impact is given to the cable, the cable response becomes nonlinear in the sense that the cable no longer oscillates around its equilibrium solution, but it can fall to the ground or cable rupture can take place. Detailed parameter analysis will be presented for varying magnitudes of the impact, locations where the impact is given, and the direction of the impact.

ロケットに代わる新たな宇宙への輸送手段として宇宙エレベータが提唱されている。これは地上から宇宙（16Re程度）にまでケーブルを設置し、ケーブル上の昇降機（クライマー）により地上と宇宙を行き来する輸送システムである。したがって、ロケットのように使い捨てではなく、長期にわたって継続的に利用できる交通インフラとなる。また、宇宙エレベータ上から効率よく探査機や宇宙船を出発させることができる。従来のロケットと比較し、宇宙エレベータはコスト、環境への影響、安全面で優れているが、宇宙エレベータの技術的要求は高く、実現には程遠いものであった。しかし近年になって、カーボンナノチューブに代表される新素材の発見と開発をきっかけに実用に耐えるケーブルの実現性が高まり、研究が本格化している。Edwards[2007]による宇宙エレベータの概念設計に始まり、Lang[2005], Williams[2009]たちのケーブルの展開や、クライマーや風の影響についての学術的研究はあるが、いずれも研究の初期段階であり、検討すべき課題は多い。

地球近傍、特に低軌道(2000km)以下には数多くのデブリが存在するため、長時間スケールではこれらと宇宙エレベータの衝突事故を考慮する必要がある。本研究では宇宙エレベータに大きな衝撃が与えられた時のケーブルのダイナミクスに注目した。まず、ケーブルの運動をシミュレートするための数値モデルを開発した。ケーブルは Lumped Mass 法により多数の弾性ばね-質点系として近似し、これらの地球による重力、地球の自転に起因する遠心力とコリオリ力、ケーブルの伸縮による内部応力を考慮した。質点の力学的平衡位置を決定し、固有値問題の解として微小振動スペクトルを求め、これがシミュレーションによるケーブル微小振動の結果と一致することを確認した。次に、各質点に微小ではなく有限の力積が加わる場合を想定し、力積の大きさ、方向を変えた時のケーブル運動を計算した。ケーブルの有限振幅振動と地球への落下について、またケーブルに加わる張力が限界値を超えた場合にケーブルが切断されることをとりいれたモデルを用いて破壊条件を求めた結果を報告する。



## 非対称磁気リコネクションアウトフローの構造

# 近藤 光志 [1]  
[1] 愛媛大・RCSCE

## Structure of the asymmetric reconnection outflow

# Koji Kondoh[1]  
[1] RCSCE, Ehime Univ.

<http://www.cosmos.ehime-u.ac.jp/>

Most popular and simple magnetic reconnection is the symmetric anti-parallel magnetic reconnection. In this case, the magnetic reconnection outflow can be accelerated over Alfvén speed. Then, the outflow is decelerated by the fast shock formed behind the plasmoid. Therefore the fastest reconnection outflow is observed in the reconnection fan. On the other hand, in the case of asymmetric reconnection, the structure of the reconnection outflow is quite different. In this study, I show that the maximum value in outflow speed is observed in the lower beta side plasmoid, and the slow outflow region is formed between the reconnection fan and the plasmoid.

最もシンプルな磁気リコネクションは、対称反平行磁気リコネクションであり、その場合、リコネクションアウトフローは、急速にアルフヴェン速度以上まで加速されることが可能である。またそののち、プラズモイド後方に形成されるファーストショックで急激な減速を受けることになる。そのため、アウトフローの最大速度は、スローショックに挟まれたリコネクションファン内で観測される。一方、電流層を挟んで両側の磁場強度などが非対称な非対称反平行磁気リコネクションでは、リコネクションアウトフローの構造が大きく異なることがわかってきた。本研究では、特に、アウトフローの最大値は、非対称度に関係なくリコネクションファン内よりもプラズマ $\beta$ の低い側のプラズモイド内で観測されることを示す。また、リコネクションファン内とプラズモイド内の間の領域に低速領域が形成され、その低速領域は高 $\beta$ 側プラズモイドが低 $\beta$ 側プラズモイドへ侵入することによる磁場の屈曲域と一致することを示す。

## Plasma dynamics and field evolution in large-scale magnetic reconnection

# Masao Nakamura[1]

[1] Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefect. Univ.

We investigate an evolution of large scale two-dimensional magnetic reconnection by means of a two-dimensional hybrid simulation. In the evolution, the electromagnetic field structures, e.g. Hall magnetic field around the diffusion region, are developed by the local plasma dynamics. Some of these field are considered to be phasestanding field structures and others are propagating away as plasma waves. Therefore histories of the evolution are partly recorded in the local and/or border structures in the whole magnetic reconnection region. We discuss the causal relationship between the plasma dynamics and field evolution in large-scale magnetic reconnection.

## 畳み込みニューラルネットワーク (CNNs) を用いたショックレットの識別モデル 開発

# 田中 孝佳 [1]; 羽田 亨 [2]; 松清 修一 [3]  
[1] 九大・総理工; [2] 九大総理工; [3] 九大・総理工

### Identification of Shocklets using Convolutional Neural Networks (CNNs)

# Takayoshi Tanaka[1]; Tohru Hada[2]; Shuichi Matsukiyo[3]  
[1] IGSES, Kyushu Univ; [2] IGSES, Kyushu Univ; [3] ESST Kyushu Univ.

Large amplitude magnetohydrodynamic (MHD) waves are ubiquitous in space, in particular, in the solar wind and regions near collisionless shocks. One type of those large amplitude waves is the so-called shocklet, found in the foreshock region of collisionless shocks. They are steepened low-frequency MHD waves with high-frequency precursor waves attached at the steepened front and are believed to be the product of nonlinear evolution of finite amplitude MHD waves. Statistical analysis of shocklets demands a large amount of magnetic field data and the identification of shocklets within the data. This is an enormously time-consuming effort as long as we rely on the conventional method of identifying the shocklets by visual inspection of time series. In this study, therefore, we will develop a model to detect shocklets using the neural network (hereafter, NN).

The NNs are mathematical models of information processing that simulate the cerebral nerve system, which is the core of information processing systems. Among various types of the NNs, we make use of the convolutional neural networks (CNNs), known to be suited for processing data that has a known grid-like topology. Examples for the CNNs applications include time-series data, which can be thought of as a 1-D grid taking samples at regular time intervals, and image data, which can be thought of as a 2-D grid of pixels. CNNs have been tremendously successful in practical applications (Goodfellow et al 2016). They are widely used in the field of image recognition. CNN was trained to identify low-frequency plasma waves that occur in the upstream region of Saturn using images constructed from the Cassini magnetometer time series data with an accuracy of 94% plus or minus 2% (Ruhunusiri, 2018).

In this research, shocklets and turbulence time series obtained by the Magnetospheric Multiscale (MMS) are converted into images and given as an input to the CNN. Here, for identification, background turbulence other than shocklets, magnetometer noise, and satellite vibration is defined as turbulence. The three components of the magnetic field data are converted into image data. The implementation of the CNN for wave identification consists of three steps: training, verification, and testing. Training and verification are used to select the most accurate CNNs architecture. Tests are used to assess whether CNNs have been able to identify shocklets from all waveforms. These CNNs enable shocklets and turbulence to be recognized by extracting shocklet and turbulence features and validating the classified ones. In the poster, we will show that CNNs can be successfully used to identify the shocklets from multi-point observation satellite data.

太陽風中や衝撃波近傍などでは大振幅の磁気流体 (MHD) 波動が存在し、非線形発展をしている。この非線形波動の一種に、急峻化した大振幅低周波波動に高周波波動が伴うショックレットと呼ばれる波動がある。ショックレットの詳細な統計量の議論には、多くの磁場データ解析が必要であるが、従来は目視によりショックレットを同定していたため、膨大な磁場データの解析には莫大な時間がかかり、一部のデータしか解析できなかった。そこで本研究ではニューラルネットワーク (以下 NNs) を用いて、ショックレットを膨大な磁場データの中から高速・高精度で識別するモデルを開発する。

NNs とは動物の脳神経系を模擬した情報処理の数理的モデルである。NNs の一種に畳み込みニューラルネットワーク (以下 CNNs) がある。CNNs とは、格子状のトポロジーを持つデータの処理に使われる特殊なニューラルネットワークである。格子状のトポロジーを有するデータの例としては時系列データがあり、これは等時間間隔で習得したサンプルが一次元に配列されたものや、画像データではピクセルが二次元に配列されたものである (Goodfellow et al 2016)。CNNs は画像認識分野で広く用いられており、その一例に、短点観測衛星カッシーニにより得られた磁場データに対して CNNs を適用し、土星におけるプラズマ波を 94 % プラスマイナス 2 % の精度で識別した研究がある (Ruhunusiri 2018)。

本研究では、地球磁気圏多点観測衛星 MMS の時系列磁力計データから得られたショックレットと乱流を画像に変換し、CNNs に入力する。ここで識別のためにショックレット以外の背景乱流、磁力計ノイズ、衛星の振動を乱流とする。磁場 3 成分のデータを各画像に変換する。波識別のための CNNs の実装は訓練・検証・テストの 3 ステップである。訓練と検証は、最も精度の高い CNNs の構造を選択するために使用する。テストは CNNs がすべての波形からショックレットを識別できているかを評価するために使用する。これらの CNNs により、ショックレットと乱流の特徴量を抽出し、分類したものを検証することによりショックレットと乱流の識別を可能にする。上記の実験結果を基に、地球磁気圏における多点観測衛星データから、CNNs を用いてショックレットを識別するモデルを提示する。

## pyCANS+コードの開発

# 松本 洋介 [1]

[1] 千葉大理

## Development of pyCANS+

# Yosuke Matsumoto[1]

[1] Chiba University

Magnetohydrodynamic simulations have played important roles for understanding space and astrophysical phenomena. We have developed a high-order (greater than the fifth), shock-capturing code CANS+ (Matsumoto et al., PASJ, 2019), and shown its high-capability of solving shock waves and turbulence simultaneously both of which are inherently important in those circumstances. I recently proposed that CANS+'s heavy computational workload, which is mainly due to the high-order reconstruction and the approximate Riemann solver, can be replaced by simple matrix-vector computations of a pre-trained neural network prediction. In this idea, we have to prepare a large set of training data, with which the over-fitting problem must be addressed to construct a general-purpose neural network.

To overcome this difficulty, I propose a *on-the-fly* training during MHD simulations of a particular problem. A neural network is trained during the simulation run using the data during a time interval. After acquiring a sufficiently high prediction accuracy, the reconstruction and the numerical flux calculation procedures are then replaced by the neural network's prediction. The accuracy is continuously checked afterward, and the procedure returns to the training phase when the accuracy became lower than a threshold value. Because Chainer, which is the framework I use for constructing a neural network, is based on Python language and CANS+ and other common simulation codes are written in Fortran or C languages, we have to adopt mixed program languages for this strategy. We adopted f2py, which is a part of the Numpy library, to automatically generate an interface between Python and Fortran programs. By using f2py functionality, the main program of CANS+ written in Fortran can be replaced by a Python program. CANS+ code can benefit from this mixed programming in accessing not only Chainer but also other useful Python libraries such as the HDF5 data IO library. I present detailed implementation of Python programs into CANS+ code by using f2py library.