

高速磁気リコネクションにおける乱流効果 Effects of turbulence in fast magnetic reconnection

東森 一晃^{1*}, 横井 喜充², 星野 真弘¹
Katsuaki Higashimori^{1*}, Nobumitsu Yokoi², Masahiro Hoshino¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² 東京大学生産技術研究所

¹University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, ²University of Tokyo, Institute of Industrial Science

宇宙空間での磁気レイノルズ数 R_m は非常に大きく、例えば太陽風や地球磁気圏をはじめ、一般に乱流状態であることが多い。そして乱流は磁気リコネクションや衝撃波での統計加速など、様々な現象で重要な役割を果たすと考えられている。我々が注目するのは、乱流と磁気リコネクションの関係性である。

磁気リコネクションは、磁場のエネルギーを効率的にプラズマの熱・運動エネルギーに変換する特有の現象として1960年頃から注目され研究されている。磁気リコネクションに関する代表的な理論 [Sweet, 1958; Parker, 1957] から、磁気リコネクションのエネルギー変換効率は磁気レイノルズ数に依存 ($R_m^{-1/2}$ に比例) することがよく知られているが、磁気レイノルズ数が大きな宇宙空間では、観測される高効率のエネルギー変換を説明できないという大きな問題であった。近年、この問題を解決する候補の一つとして乱流が注目されている。例えば大規模な数値計算によって、高磁気レイノルズ数下で乱れが存在すると、リコネクション効率の磁気レイノルズ数依存性がなくなることがわかってきた [Loureiro+, 2009]。また乱流理論の観点から、磁気リコネクションで自発的に発達する乱流の重要性が指摘されている [Yokoi and Hoshino, 2011]。ここでは、対称性の破れによって生じるクロスヘリシティ（マクロに定義された乱流の物理量）の効果によって、リコネクション効率が劇的に上昇するという理論的予測がある。

我々は、乱流と磁気リコネクションの関係性を明らかにするために、MHD 乱流モデル [e.g., Yoshizawa, 1990] に基づいたレイノルズ平均型のMHD 乱流シミュレーションコードを開発した。開発したシミュレーションコードでは、通常のMHD 方程式系に加え、クロスヘリシティと乱流エネルギーの時間発展方程式を解く。そしてこれらマクロに定義された乱流の物理量が Ohm の法則中に現れる乱流起電力を介して、磁場や速度場などの平均場と相互に影響しあうシステムとなっている。シミュレーション結果によると、理論的予測と同様に、リコネクションアウトフローに沿ったクロスヘリシティの生成が見られた。そしてこのクロスヘリシティの空間非一様性により、リコネクション点付近に実効的な乱流拡散が局在化し、効率の良い磁気リコネクションに発展することがわかった。本講演では今回用いた乱流モデルの概要と、高効率の磁気リコネクションでの乱れの輸送と局在化の重要性について、シミュレーション結果を基に議論する。

キーワード: 磁気リコネクション, 乱流, クロスヘリシティ, 層流, リコネクション効率, シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, turbulence, cross-helicity, laminar flow, reconnection rate, simulation

宇宙プラズマシミュレーションにおけるハイブリッドおよびHall MHDモデルの再考

Revisiting hybrid and Hall MHD models for space plasma simulations

天野 孝伸^{1*}

Takanobu Amano^{1*}

¹ 東京大学 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

One of the outstanding difficulties for modeling space plasma phenomena is the huge gap between many different temporal and spatial scales. Accordingly, there exist several physical models suitable to describe phenomena occurring on a specific scale. The well-known magnetohydrodynamics (MHD) description gives an adequate view for macroscopic phenomena like global magnetospheric dynamics. On the other hand, key phenomena such as reconnection at the near earth neutral line is believed to be crucial even for the global dynamics of the magnetosphere. This calls for a more sophisticated model that is able to, at least in an approximate manner, describe kinetic effects controlling the key processes, while keeping the global dynamics yet computationally tractable. It is known that when the spatial scale becomes of the order of ion inertial length, the Hall term starts to play a role. Indeed, the importance of the Hall term in reconnection physics has been recognized for years. The Hall MHD model would therefore be the simplest model beyond ideal MHD. One may also include kinetic effects by treating ions as an ensemble of macroscopic particles rather than a fluid. The hybrid model usually do so while approximating electrons as a massless charge-neutralizing fluid, thus ignoring their finite inertia and kinetic effects. Since these models do not include high frequency waves associated with electron scale physics, computational requirement is much less than the fully kinetic model in which both electron and ions are treated as kinetic particles. It appears that they are useful tools to describe physics beyond ideal MHD. In reality, however, they tend to be numerically unstable when dealing with the scale length smaller than the ion inertial length. Because of this, the applicability of the models have been severely limited to date.

Here, we look for the reason for the numerical difficulty and reconsider the formulation of these models. By analyzing the linearized magnetic field induction equation including the Hall current, we find that the problem seems to become ill-conditioned for the high frequency whistler mode branch. Namely, for whistler waves, even a small numerical error in the ion fluid velocity would be substantially amplified, implying a numerical instability. We suggest that the problem may be resolved by retaining an approximate non-zero electron inertial current term. Since the exact expression for the electron inertial current is not desirable for our purpose of describing waves with frequency much smaller than the electron cyclotron frequency, we assume that electrons are magnetized. Under this assumption, the electron inertial current may be approximated by a temporal derivative of the electric drift velocity, which makes the equation of motion of the electron fluid as essentially an equation describing time evolution for the electric field. In this model, the induction equation no longer involves explicit dependence on the ion fluid velocity. Linear analysis has been carried out to find that the present model gives an adequate description for scales larger than the electron inertial length. Comparisons with other models (MHD, Hall MHD, two fluid) as well as the applicability of the model will be addressed.

キーワード: 宇宙プラズマ, シミュレーション

Keywords: space plasma, numerical simulation

太陽ダイナモ周期活動の赤道非対称性に関するシミュレーション研究 Simulation study on the hemispheric asymmetry of the solar dynamo cycle based on the flux transport dynamo model

宿谷 大志^{1*}, 草野 完也¹
Daishi Shukuya^{1*}, Kanya Kusano¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所
¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

太陽の南北半球の極磁場の極性が11年周期で反転現象を起こすことは広く知られている。また、その反転時期が南北の極でずれを持っていることは Babcock (1959) によって指摘されている。さらに、Svalgaard and Kamide (2013) によれば極磁場反転の南北でのずれと黒点活動の南北半球非対称性との間には関係があるという観測的考察も進められている。しかし、黒点活動や極磁場反転の南北半球非対称性が何を原因として起きるのか、その原因とメカニズムはほとんど解明されていない。

本研究では、太陽ダイナモの赤道に対する南北半球非対称性の原因を磁場の南北半球対称成分(四重極子型成分)と反対称成分(双極子型成分)の混在による効果と考え、その影響が太陽活動の周期性の乱れとどのように関わっているかを理論的に考察する。このため、Choudhuri et al. (2004) による SURYA コードを参考に磁束輸送ダイナモモデル (Chatterjee et al. 2004) の軸対称平均場ダイナモコードを改良すると共に、これを用いた太陽ダイナモサイクルシミュレーションを2次元子午面上で行った。さらに、Nishikawa and Kusano (2008) に従い磁場を赤道に対する南北半球対称成分と反対称成分に分離することで、両成分の時間発展のパラメータ依存性や位相関係について調べた。その結果、双極子型成分が支配的な場合でも四重極子型成分が残り、二つの成分が共存することで南北半球対称性に僅かな破れが生じることを確認した。

本公演では、この対称性の破れが黒点活動と極磁場反転にどのような影響を与えるかを考察する。さらに、この対称性の破れがダイナモモデルの線形過程(運動学的ダイナモ過程)と浮上磁場に起因する非線形過程のそれぞれにどう関係しているかを議論する予定である。

キーワード: 太陽ダイナモ, シミュレーション
Keywords: solar dynamo, simulation

太陽風プラズマと月面局所磁場の相互作用に関する粒子シミュレーション Particle-In-Cell simulation on the interactions between the solar wind and a magnetic anomaly on the moon

梅澤 美佐子^{1*}, 臼井 英之¹, 松本 正晴¹, 西野 真木², 三宅 洋平¹

Misako Umezawa^{1*}, Hideyuki Usui¹, Masaharu Matsumoto¹, Masaki N Nishino², Yohei Miyake¹

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

¹Graduate school of system informatics, ²JAXA/ISAS

本研究の目的は、月面で発見された磁気異常と太陽風の相互作用において特に磁気異常上空の太陽風応答や場の構造をプラズマ運動論的観点から明らかにすることである。研究手法としてプラズマ粒子シミュレーションを用いる。特に磁場密度が高い領域の空間解像度を上げるために適合格子細分化法を導入したプラズマ粒子シミュレーションコード PARMER を用いた。まずは、宇宙空間中に置かれた小型ダイポール磁場を想定し、それと太陽風プラズマの相互作用に関する基礎的なシミュレーションを行った。その後、月面磁気異常の具体例としてはライナーガンマに着目し、その太陽風との相互作用に関するシミュレーション解析を行った。

我々が対象としている代表的なダイポール磁場は、その中心と太陽風動圧の釣り合い点との距離が太陽風イオンの慣性長よりも小さくかつ電子ジャイロ半径よりは十分大きい、いわゆるメソスケール規模を想定している。地球規模のダイポール場と違い、メソスケール磁場の場合、磁場に対する電子とイオンのダイナミクスの違いが磁気圏形成やそれに関連するプラズマ現象に大きく影響すると予想される。すなわち、磁場を媒介した電子とイオンのスケールカップリングが重要となる。これまでのシミュレーション結果では、イオンラーマ半径より小さい磁場構造においてもメソスケールの磁気圏が形成されることがわかった。太陽風動圧と磁場の釣り合い点近傍において、イオンと電子の電荷分離が生じ、その結果生じる局所電場により、本来このスケールでは非磁化とみなされるイオン流も大きく影響を受けることを明らかにした。メソスケール磁気圏形成時における磁気圏前面でのプラズマ環境に特に着目し、電場構造や太陽風の速度分布や反射成分の有無についての解析結果を示す。

また月面磁気異常の一例としてはライナーガンマをモデルとして採用しそのプラズマ粒子シミュレーションを行った。太陽風に対してダイポール磁場がほぼ垂直に位置するため、ライナーガンマ上空ではプラズマおよび磁場密度の増加がみられるが、IMFの方向によってその違いがみられた。また磁場の影響により太陽風イオンがライナーガンマ領域の月面にほとんど達しないことも明らかになった。これらの現象について月面上空でのプラズマダイナミクスや電界構造を考慮しつつ議論する。

キーワード: プラズマ粒子シミュレーション, 磁気異常, 小型ダイポール磁場, 太陽風, ライナーガンマ

Keywords: Plasma particle simulation, magnetic anomaly, small-scale magnetic dipole, solar wind, Reiner Gamma

複数の衝撃波による粒子加速の数値実験 Numerical study on particle acceleration in multi-shock system

中野谷 賢^{1*}, 羽田 亨¹, 松清 修一¹

Masaru Nakanotani^{1*}, Tohru Hada¹, Shuichi Matsukiyo¹

¹ 九大総理工

¹ ESST, Kyushu Univ

宇宙線が生成されるメカニズムとして、無衝突衝撃波によるフェルミ加速が有力視されている。いままでに、この加速機構に関する研究は盛んに行われてきたが、そのほとんどは単一の衝撃波による加速を前提としたものである。その一方で、宇宙空間には無数の衝撃波が普遍的に存在しており、状況によっては二つの衝撃波が接近・衝突することもある。太陽圏を例にとれば、地球磁気圏衝撃波や太陽圏終端衝撃波への惑星間空間衝撃波の衝突は珍しくない。本研究では、衝撃波が2つ存在する場合の粒子加速過程を議論する。

まず、簡単なテスト粒子計算によって、衝撃波が2つ存在する場合に衝撃波統計加速がどのように働くのかを調べ、拡散輸送方程式に基づく理論的考察を行った。その結果、粒子のエネルギースペクトルは2つ(以上)のベキを持ち、ベキは高エネルギー側でよりハードになることが分かった。これは、エネルギーの高い粒子は大きな拡散係数を持つので、2つの衝撃波をまたいでより効率的な加速を受けることが可能なためである。通常、衝撃波の圧縮比により決まるベキ指数は、この場合、単一衝撃波での最大圧縮比4を超える圧縮比での値を取りうるということが分かった。

一方、上の議論とは独立に、2つの衝撃波が衝突する場合の粒子加速過程を1次元フル粒子(PIC)計算により調べた。衝撃波同士の衝突過程を議論した数値実験としては、過去にハイブリッド計算による例があり[Cargill et al., 1986]、特に超臨界垂直衝撃波同士の衝突において効率的な粒子(イオン)加速が起こることが報告されている。しかしながら、一般にハイブリッド計算では電子ダイナミクスを解かないため、粒子の初期加速過程に重要な影響を与える可能性のある、衝突前後の衝撃波のマイクロ構造までは正しく再現されない。ここでは、PIC計算によって超臨界垂直衝撃波同士の衝突を再現し、衝突前後の衝撃波の電磁場構造を詳細に調べるとともに、衝突に伴って起こるイオンおよび電子の加速過程を議論する。

キーワード: 複数衝撃波, 粒子加速, 数値実験

Keywords: multi-shock waves, particle acceleration, numerical simulation

宇宙線変成衝撃波と磁場の効果 The effect of magnetic field on cosmic ray modified shocks

齋藤 達彦^{1*}, 星野 真弘¹, 天野 孝伸¹
Tatsuhiko Saito^{1*}, Masahiro Hoshino¹, Takanobu Amano¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻
¹Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

銀河宇宙線は超新星残骸衝撃波において加速されていると考えられている。この加速プロセスが進行して非線形段階に到達すると宇宙線は衝撃波に対して陽に反作用を及ぼすと想定される (Drury & Voelk 1981)。最近の超新星残骸の観測において、この反作用効果が実際に置けていると示唆される結果がいくつか報告されている (Helder et al. 2009; Hughes et al. 2000; Vink et al. 2006)。これら宇宙線によって構造が大きく変化した衝撃波は特に「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれている。

他方、銀河宇宙線の衝撃波加速においては最高エネルギー問題が大きな課題となっている。これに対して衝撃波近傍での磁場増幅により解決しようとする試みが多数提案されている。Malkov et al. (2010) はその中でも宇宙線の反作用、具体的には宇宙線の圧力勾配に起因する不安定 (Drury & Falle 1986) の効果が磁場増幅に対して支配的であると述べている。

本研究では、この不安定の磁場増幅効果並びに衝撃波との相互作用について数値計算により調べることを目的としている。同種のMHD計算がDrury & Downes (2012) で行われているが、彼らは衝撃波上流の precursor 領域のみを扱っており、衝撃波が系に含まれていない。本研究では衝撃波も含めて自己無撞着に再現し、宇宙線の反作用、衝撃波構造、磁場構造を統一的に議論する。その上で磁場増幅量と衝撃波パラメータの関係を評価する。

キーワード: 宇宙線, 衝撃波
Keywords: cosmic rays, shock

磁化プラズマ内への外部電磁場浸透の1次元PICシミュレーション：無電極電気推進の開発に向けて 1D PIC simulation of electromagnetic field penetration into magnetized plasmas for electrodeless electric thrusters

大塚 史子^{1*}, 羽田 亨¹, 篠原 俊二郎², 谷川 隆夫³
Fumiko Otsuka^{1*}, Tohru Hada¹, Shunjiro Shinohara², Takao Tanikawa³

¹ 九大・総理工, ² 東京農工大・工, ³ 東海大・総科研
¹ESST, Kyushu Univ., ²Inst. Eng, TUAT, ³RIST, Tokai Univ.

無電極電気推進では、プラズマ外部に電極群を設置することで、プラズマとの接触による電極群損耗を回避できる反面、プラズマが加速されるためには、外部電磁場がプラズマ内部に効率よく浸透する必要がある。前回の講演では、外部電磁場の完全浸透を仮定し、テスト粒子計算によりポンドロモータイプ加速/イオンサイクロトロン共鳴 (PA/ICR) を利用した無電極電気推進における推力算出を行った。しかし、外部電磁場の完全浸透は非現実的な仮定である。

本講演では、PA/ICR による無電極電気推進の開発を念頭に、外部電磁場の磁化プラズマ内への浸透過程を1次元粒子シミュレーションにより議論する。ここで、外部電磁場はイオンサイクロトロン周波数近傍の横波の電磁場を想定する。電磁場励起手法として、電極板を利用した静電的励起と電流アンテナを利用した電磁的励起のふたつを検討する。それぞれの手法に対し、外部電磁場の浸透度を定量化し、PA/ICR に適した電磁場励起手法のパラメータ探査を行う。また、浸透度の解析的導出も試みる。さらに、得られた最適な外部電磁場パラメータに対し、PA/ICR におけるエネルギー変換効率などを議論する。なお、粒子計算コードは VORPAL(Tech-X 社) を用いる。

キーワード: 外部電磁場, 電場浸透, 無電極電気推進, プラズマ加速, ポンドロモータイプ力, PIC シミュレーション

Keywords: external electromagnetic field, electric field penetration, electrodeless electric thruster, plasma acceleration, ponderomotive force, PIC simulation

RMF型加速機構におけるプラズマパラメータと磁場浸透の関係

The relationship between the parameters plasma and penetration of magnetic fields due to the RMF acceleration

山之口 和輝^{1*}, 羽田 亨¹, 篠原 俊二郎²

Kazuki Yamanokuchi^{1*}, Tohru Hada¹, Shunjiro Shinohara²

¹ 九大総理工, ² 東京農工大

¹ ESST, Kyushu Univ., ² TUAT

惑星探査などの長期ミッションにおいて高比推力の電気推進機関が有効であり注目されている。これは推進剤にプラズマを用い、これを加速することにより推進力を得る方法である。一方、イオンエンジン等、既存の電気推進機関の多くは内部に電極を有しており、この電極がプラズマと接触することで電極摩耗が生じ、寿命を制限していること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電極がプラズマに接触しない完全無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を行っている (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 [4]。さらに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のローレンツ力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ により軸方向の定常推進力が得られるはずである [5]。

本講演では、RMF型加速機構について、数値シミュレーションを行った結果を発表する。Particle-In-Cell 法により2次元の粒子モデルを考え、プラズマに外部回転磁場がどのように浸透するかを考察する。ローレンツ力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ によって軸方向の推進力を得るため、誘起される周方向電流が高いほど得られるスラストは大きくなり、電気推進として有効である。そのため今回は様々なプラズマのパラメータと外部回転磁場のパラメータに依存してどのように磁場浸透の空間・時間スケールおよび誘起される周方向電流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] A.L.Hoffman, Nuclear Fusion, vol. 40, No.8, 1523, 2000.

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

キーワード: 電気推進機関, 無電極プラズマ加速, 回転磁場, 数値解析

Keywords: Electric thruster, Electrodeless plasma acceleration, Rotating Magnetic Field, Numerical simulation

ヘリコン波の分散関係とその散逸過程 Dispersion relation of helicon waves with dissipation

諫山 翔伍^{1*}, 羽田 亨¹, 谷川 隆夫², 篠原 俊二郎³
Shogo Isayama^{1*}, Tohru Hada¹, Takao Tanikawa², Shunjiro Shinohara³

¹九州大学総合理工学府, ²東海大学総合科学技術研究所, ³東京農工大学大学院工学研究院

¹Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²Research Institute of Science and Technology Tokai University,

³Institute of Engineering, Agriculture and Technology, Tokyo University

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。一方、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行っている(HEATプロジェクト)。

無電極推進機関は、主にプラズマ生成部とプラズマ加速部からなる。特に、プラズマ生成に関しては、「ヘリコン波」というプラズマ波動をガス内に伝播させることにより効率よくプラズマを生成する技術がほぼ確立している。その一方、なぜヘリコン波がプラズマを生成するのか、という最も基本的な問題については、未解決の課題が多い。これはプラズマ生成過程が、波動の電磁場による電子加速、加速電子による中性粒子の電離、中性粒子を多く含むプラズマ中のヘリコン波伝播、さらにはプラズマ励起による分散関係の時間発展等、多くの複雑な物理過程を含み、これらが互いに影響しあう複合過程だからである。ヘリコンプラズマ生成過程を理解するための第一段階として、非一様円柱プラズマ中にヘリコン波が伝播する際にどのような電場ができ、それがどのような電子加速を引き起こすか、を理解するために、本研究では散逸がある場合のヘリコン波の分散関係を正確に求める。

ヘリコン波の分散関係は円柱プラズマ(r - z)を仮定し、励起周波数帯 ω_{ci} (イオンサイクロトロン周波数) $\ll \ll \omega_{ce}$ (電子サイクロトロン周波数)の条件下で導かれる。ヘリコン波は軸方向背景磁場 B_0 に対してある角度をもって伝播するホイッスラー波動といえる。閉じた円柱チャンバー内を想定し、軸方向波数(k_z)をある境界条件によって定めると、分散関係より、背景磁場に対して平行方向に近い角度で伝播するヘリコン波(k_H :長波長)と垂直方向に近い角度で伝播するTG波(k_{TG} :短波長)2つのモードの解が得られる。また、それぞれの解(波数)は密度勾配によって変化し、ある密度の点において2つの解は完全に一致する。Shamrai等は、ヘリコン波は非一様プラズマ中を伝播する際、ある密度点でTG波へモード変換し、このTG波が電子を効率よく加速し、プラズマ生成の主役となっている事を主張している。本研究ではまず、流体モデルにおいてプラズマ密度の非一様性、散逸がある場合の分散関係を正確に求め、衝突を介した波動の電子加速について議論する。さらに1次元PICシミュレーションによって、分散関係を議論し、また散逸過程を解析する。

キーワード: 電気推進機関, 無電極推進, ヘリコン波, TG (Trivelpiece-Gould) 波

Keywords: Electric thrusters, The electrodeless thrusters, Helicon wave, TG(Trivelpiece-Gould)wave

磁気リコネクションの AMR-PIC シミュレーションにおける開放境界条件の開発 An open boundary condition in the AMR-PIC simulations of magnetic reconnection

藤本 桂三^{1*}

Keizo Fujimoto^{1*}

¹ 国立天文台理論研究部

¹Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

One of the main issues on magnetic reconnection processes is the mechanism breaking the frozen-in condition around the x-line and providing the electric resistivity in collisionless plasmas. It has been recognized empirically in magnetohydrodynamic simulations that the Petschek-type fast reconnection can be achieved only when an intense resistivity arises locally near the x-line. However, the generation mechanism of the resistive effects in collisionless plasmas is poorly understood in the kinetic framework. In 2D reconnection, it has been demonstrated by kinetic simulations that the momentum transport due to the Speiser-type motion of the electrons around the x-line gives rise to the so-called inertia resistivity which results in the electron viscosity term in the generalized Ohm's law. Although the electron viscosity gives sufficient dissipation for supporting the reconnection electric field under the thin current layer on the order of the electron inertia length, such a thin current sheet has been observed neither in the laboratory experiments nor in the geomagnetosphere. Recent 3D particle-in-cell (PIC) simulations with the adaptive mesh refinement (AMR) have revealed that an electromagnetic turbulence in the current density direction gives rise to significant anomalous dissipation in association with plasmoid formations and enhances the effective width of the current sheet. However, the observations in space and laboratory have shown even wider current sheet during the fast reconnection, which implies the existence of more intense turbulence. It is reasonable to expect that, in a much larger system in the current density direction, the plasmoid formations are more three dimensional, which results in more turbulent current sheet.

The previous AMR-PIC simulations of magnetic reconnection have employed the periodic boundary condition in the outflow direction and the conducting wall condition in the upstream direction. These boundary conditions have an advantage that the implementation is easy, but they require very large system size for one to investigate the quasi-steady reconnection processes. Furthermore, the particles split around the x-line accumulate eventually in the downstream region, so that the number of the super-particles in the system increases as reconnection goes on. In order to achieve more efficient simulations of quasi-steady reconnection, we have developed an open boundary condition for the AMR-PIC model both in the downstream and upstream directions. The open boundary condition allows the particles and magnetic flux to leave the system in the downstream direction and to enter the system in the upstream direction. There are two advantages of using the open boundary condition: the first is to enable us to shrink the system size drastically in the reconnection plane, and the second is that the total number of the super-particles in the system is decreased. As a result, the redundant computer resources can be used to increase the system size in the out-of-plane direction. We expect that by using the open boundary condition one can obtain one order larger system size in the current density direction.

In this paper, we show initial results of the 2D AMR-PIC simulations of magnetic reconnection under the open boundary condition. It is described that the initial current sheet plasma is removed from the system and quasi-steady reconnection is achieved. By comparing to the results of the previous AMR-PIC simulations, we will discuss the efficiency by using the new boundary condition.

Keywords: magnetic reconnection, AMR-PIC model, open boundary, turbulence

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

上野 悟志^{1*}, 梅田 隆行¹, 中村 琢磨², 松本 洋介³, 町田 忍¹

Satoshi Ueno^{1*}, Takayuki Umeda¹, Takuma Nakamura², Yosuke Matsumoto³, Shinobu Machida¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² ロスアラモス国立研究所, ³ 千葉大学大学院理学研究科

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Los Alamos National Laboratory, ³Graduate School of Science, Chiba University

宇宙プラズマ中の不安定現象の一つであるケルビン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI) は速度シアによって起こる流体的不安定であり、主に低緯度磁気境界層で発生することが知られている。本研究では、2次元ブラソフシミュレーションにより、KH 渦の回転方向に対するイオンのジャイロ運動の向きが異なる二通りのシミュレーションを行い、KHI の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の影響について調べた。

KH 渦の回転方向に対してイオンのジャイロ運動が順方向である場合 (Run B)、イオンのジャイロ半径に相当する空間波長モードの成長率が、逆方向の場合 (Run A) に対して低くなることが分かった。これは、イオンジャイロ運動の安定化効果によるものである。また、KH 渦の外縁におけるイオン密度の勾配及び速度シアの半幅が、Run A の場合はイオンのジャイロ半径より薄くなり、二次的な不安定が起こる。一方 Run B の場合は、イオン密度の勾配及び速度シアの半幅がイオンジャイロ半径と同じくらいの厚さになるため、二次的な不安定性は抑制される。

キーワード: ケルビン・ヘルムホルツ不安定性, ブラソフシミュレーション, 宇宙プラズマ, イオンジャイロ運動

Keywords: Kelvin-Helmholtz instability, Vlasov simulation, space plasma, ion gyro motion

Enceladus 衛星起源水分子による電子ピッチ角散乱のテスト粒子シミュレーション Test-particle simulation of electron pitch angle scattering into the Saturn's atmosphere by neutral H₂O from Enceladus

田所 裕康^{1*}, 加藤 雄人²
Hiroyasu Tadokoro^{1*}, Yuto Katoh²

¹ 東京工科大学, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Tokyo University of Technology, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Cassini observations revealed that Saturn's moon Enceladus (3.95R_s) ejects neutral H₂O from its southern pole with temporal variability [e.g., Hansen et al., 2006]. This volcanic activity, so-called 'plumes', leads to the electromagnetic coupling between Saturn's ionosphere and plasmas around Enceladus. The coupling causes auroral activities around the footprint of Enceladus [Pryor et al., 2011]. They discovered Enceladus footprint aurora with temporal variability and reported that observed field aligned fluxes of electrons and ions are sufficient to brighten the footprint aurora observed by EUV onboard Cassini. They interpreted that the variability of auroral brightness reflects variations of plume activities. In contrast, an electron precipitation into the atmosphere through pitch-angle scattering also causes auroral emissions. The dominant physical process controlling the activity of the footprint aurora is still controversial.

In the present study, for the quantitative evaluation of auroral emissions caused by the pitch-angle scattering through elastic collisions between magnetospheric electrons and H₂O particles, we have developed a spatially one dimensional test-particle simulation code with monoenergetic electron along a dipole magnetic field at Enceladus ($L = 3.95$). We assume that the initial velocity distribution of energetic electrons at the magnetic equator forms a velocity distribution with a loss-cone. It is assumed that the cross sections of elastic collisions are Born-dipole approximation [Khakoo et al., 2008]. An interaction between an electron and a background neutral cloud is solved by the Monte-Carlo method using the differential cross sections of elastic collisions for H₂O. We show a preliminary result of the variability of precipitating electrons with several hundred eV to several keV and estimation of the expected brightness of auroral emissions.

キーワード: 電子ピッチ角散乱, 電子-中性衝突, エンケラドス, テスト粒子シミュレーション, 土星
Keywords: electron pitch angle scattering, electron-neutral interactions, Enceladus, test-particle simulation, Saturn

磁気回転不安定性による磁気乱流の時間発展

Study of the time evolution of magnetic turbulence induced by the magneto-rotational instability

齋 和人^{1*}, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹

Kazuhiro Sai^{1*}, Yuto Katoh¹, Naoki Terada¹

¹ 東北大学・理・地球物理

¹Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

磁気回転不安定性 (MRI) は降着円盤中における乱流生成機構であり、乱流中での物理過程の理解が必要とされている。MRI 乱流の時間変化は、背景磁場の鉛直成分の有無により乱流場が決定されることが指摘されている (Sai et al., 2013)。特に、このような場合、乱流応力の強度はスパイク状の時間変化を示し、この時間変動が、質量降着などに寄与する平均乱流応力の大部分を生じていることが指摘されている (e.g., Sano & Inutsuka, 2001)。そのため、円盤内乱流における乱流の強さの決定要因の解明の上で、乱流の時間発展の理解が必要とされている。しかしながら、この時間発展について、これまで本格的な解析は行われてこなかった。

私たちのグループでは、MRI 乱流中における物理過程を明らかにすることを目的に、3次元の磁気流体力学 (MHD) の数値シミュレーション研究を行った。それにより、MRI の非線形段階における物理過程の大部分を解明することができた。特に、非線形段階において最大振幅となる特徴的なモードが存在することが確認された。本講演では、この最大振幅モードの特徴、及び、乱流の飽和と緩和過程について報告する。

解析の結果、確認された最大振幅のモードは、Sano & Inutsuka (2001) らによって確認された、チャンネル流を形成したものと同一のものであると考えられる。これまで、非線形段階におけるチャンネル流の形成は、乱流中で増幅した磁場と MRI の最大成長モードとの関係によるものと考えられていた (Sano & Inutsuka, 2001)。しかし、私たちのグループにおける詳細な解析により、非線形段階における最大振幅モードは、MRI 分散関係によって説明可能であるが、その波形は、円盤の厚さと背景磁場の鉛直成分によって決定されており、これまで指摘されていたような、乱流中で増幅した磁場の影響によるものではないことが明らかとなった。また、乱流の飽和と緩和の過程においては、パラサイト不安定性 (Goodman & Xu, 1994) が励起していることを示唆する結果が得られた。さらに、MHD 方程式中の各項を評価することで、非線形段階における乱流の緩和が生じるための条件式を導くことができた。この式から、乱流中の磁場の鉛直成分の増幅が緩和に強く影響していることが示唆された。この磁場の鉛直成分の増幅はパラサイト不安定性によるものと示唆される。加えて、この緩和条件式を用いることにより、乱流応力最大振幅モードが決定される理由についても矛盾なく説明することが可能となった。

最大振幅モードの理解により、これまで確認はされていたがその理由が不明のままとされていた、磁場の方位角方向成分と動径方向成分の持つエネルギー比に関して、矛盾なく説明することが可能となった。これらの成果は、円盤の大局的磁場構造に関する情報が得られれば、局所的な乱流場において支配的な乱流場の構造を推測できることを意味している。乱流の性質に関する背景磁場依存性は、円盤内でのダストの合体成長の議論や、円盤内乱流における MRI の影響を評価する上でも強力なツールになるものと期待される。

キーワード: 降着円盤, 磁気流体力学, 乱流, 磁気回転不安定性

Keywords: accretion disk, magnetohydrodynamics, turbulence, magneto-rotational instability

多成分プラズマにおける斜め伝播 EMIC 波の線形分散解析 Linear dispersion analyses on EMIC waves in oblique propagation in multi-component plasmas

杉山 肇^{1*}, 大村 善治¹
Hajime Sugiyama^{1*}, Yoshiharu Omura¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Reserach Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

地球磁気圏内の放射線帯に存在する高エネルギー粒子は人工衛星に悪影響を与えることが知られている。例えば相対論的電子は衛星の深部に侵入し帯電破壊を引き起こす。この高エネルギー粒子は磁気嵐が生じると一旦減少することが知られている。磁気嵐と共に観測されている L モード電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC 波) によって、相対論的電子がピッチ角散乱を受け、極域に降下していることが原因ではないかと近年指摘されている。そこで本研究では多成分プラズマにおける EMIC 波の線形分散解析を行う。特に斜め伝播時の成長率や偏波特性に関して詳細に調べる

解析に際して、京都大学生存圏研究所で長年開発されてきたプラズマ分散関係解析プログラム KUPDAP (Kyoto University Plasma Dispersion Analysis Package) の改良を行った。本発表では KUPDAP の基本的な機能と及び偏波特性を表示するなどの追加された機能を説明し、デモンストレーションを行う。

キーワード: 多成分プラズマ, 電磁イオンサイクロトロン波, 斜め伝播, 線形分散解析

Keywords: multi-component plasma, EMIC, oblique propagation, linear dispersion analysis