

## 三次元高速磁気再結合過程における磁気中性線形成 Magnetic neutral line formation in three-dimensional spontaneous fast reconnection

清水 徹<sup>1\*</sup>

SHIMIZU, Tohru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学宇宙進化研究センター

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

近年の磁気圏や太陽衛星観測により高速磁気再結合過程の三次元的構造が断片的ではあるがわかってきた。しかし理論的、数値的な研究は一次元電流層においてどのように三次元的な高速磁気再結合過程が起こりうるのかという本質的な問題に未だ十分に答えていない。本研究は、この問題の重要な手がかりとして、二次元高速磁気再結合過程の三次元不安定性について MHD の視点から調べている。この三次元不安定化により、高速磁気再結合過程は非定常（間欠的）かつランダムになり、その磁気中性線は電流方向に強く局在化する。本講演では、磁気中性線の形成過程に注目し、数値的に見られるいくつかの性質について指摘した上で、理論的に考察する。特に、間欠的に発生消滅を繰り返す磁気中性線は電流方向に沿う傾向が見られることが明らかにされる。その傾向はある種の熱ゆらぎのような効果によりマスクされるが、初期状態などの外的な影響に依らないことが示される。

キーワード: 三次元磁気再結合, 磁気流体力学, 磁気中性線, 不安定性

Keywords: Three-dimensional magnetic reconnection, MHD, Magnetic neutral line, instability

イオンスケール電流シート内の磁気リコネクションでの温度異方性の効果:PICシミュレーション

The effect of temperature anisotropy on magnetic reconnection in ion-scale current sheet:PIC simulation

安田 憲生<sup>1\*</sup>, 藤本 正樹<sup>2</sup>, 篠原 育<sup>2</sup>

YASUDA, Norio<sup>1\*</sup>, Masaki Fujimoto<sup>2</sup>, Iku Shinohara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東大・理・地惑, <sup>2</sup>宇宙研/宇宙機構

<sup>1</sup>Univ of Tokyo, <sup>2</sup>ISAS/JAXA

(未定)

キーワード: 宇宙プラズマ, 無衝突磁気リコネクション, PICシミュレーション, 温度異方性

Keywords: Space plasma, Collisionless magnetic reconnection, Particle-in-cell simulation, Temperature anisotropy

## 初期プラズマベータ値に依存したリコネクションアウトフロー構造の変化 Dependence of the initial plasma beta on the structure of the reconnection exhaust

東森 一晃<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>1</sup>, 横井 喜充<sup>2</sup>

HIGASHIMORI, Katsuaki<sup>1\*</sup>, HOSHINO, Masahiro<sup>1</sup>, Nobumitsu Yokoi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学 生産技術研究所

<sup>1</sup>University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, <sup>2</sup>University of Tokyo, Institute of Industrial Science

磁気リコネクションの最も重要な課題一つとして、高磁気レイノルズ数下でどのように高速リコネクションが起こるかという問題がある。この問題を説明するため、例えば、局在化した拡散領域から四方に伸びる遅波衝撃波 [e.g., Petschek, 1964]、ホール効果 [e.g., Birn, et al, 2001]、そして乱流場の存在 [e.g., Matthaeus and Lamkin, 1986] などが議論されている。近年、MHD 乱流の観点からいくつかの高速磁気リコネクション理論が提唱され [e.g., Lazarian and Vishniac, 1999; Yokoi and Hoshino, 2011]、そして、乱流磁気リコネクションはリコネクション問題に留まらず、多くの天体現象で盛んに議論されている (降着円盤での磁気回転不安定などがいい例であるが、そこでは乱流中でのリコネクションがこの不安定の飽和度を定める要因だと考えられている [e.g., Sano, et al., 2004])。

我々は磁気リコネクションでの乱流に注目しており、特に本研究では「無衝突」磁気リコネクションでの自発的乱流形成について、電磁ハイブリッドコードを用いて調べた。我々は、リコネクションアウトフローが乱流に発展するか層流に発展するかが、初期のインフロー領域でのイオンのプラズマベータに強く依存することを主張する。この主張を証明するため、我々は (アルフベン速度を一定に保ちつつ初期のイオン温度を変えることで) 初期のプラズマベータを変えたいくつかのシミュレーション結果を示す。我々の結果によれば、 $b_{i0} < 0.1$  の場合に乱流的なアウトフローが見られ (ただし  $b_{i0}$  は初期インフロー領域でのイオンのプラズマベータ)、 $b_{i0} > 0.1$  では層流的な構造が見られた。加えて繋ぎ変わった磁場のフラックスの総量は、初期のプラズマベータ値が小さいほど大きくなることがわかった。また、そのような低ベータにおける乱流は、電流層中心ではなく、プラズマシート境界層 (PSBL) で励起された電磁波と関連することが示唆されている。本講演では、PSBL 領域で励起された波の性質に注目しつつ、低ベータでこのような乱流構造が見られる理由を主に議論する。

キーワード: リコネクション, 乱流, 層流, ハイブリッドシミュレーション, 運動論, イオン温度

Keywords: reconnection, turbulence, laminar flow, hybrid simulation, kinematics, ion temperature

## Global MHD シミュレーションの拡散領域の評価 Estimations of Diffusion Regions in Global MHD simulations

村田 健史<sup>1\*</sup>, 久保田 康文<sup>1</sup>, 深沢 圭一郎<sup>2</sup>, 亘 慎一<sup>1</sup>, 渡邊 英伸<sup>1</sup>, 山本 和憲<sup>1</sup>, 田中 高史<sup>2</sup>

MURATA, Ken T.<sup>1\*</sup>, KUBOTA, Yasubumi<sup>1</sup>, FUKAZAWA, Keiichiro<sup>2</sup>, WATARI, Shinichi<sup>1</sup>, WATANABE, Hidenobu<sup>1</sup>, YAMAMOTO, Kazunori<sup>1</sup>, TANAKA, Takashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 九州大学

<sup>1</sup>NICT, <sup>2</sup>Kyushu University

これまで、地球磁気圏の Global MHD シミュレーションでは、「磁気圏昼側境界面付近の拡散領域においてリコネクションが起こり、つなぎ変わった太陽風の磁力線が磁気圏内に侵入する」というストーリーが信じられている。しかし、MHD シミュレーション空間のどの場所で、いつ、どの程度の（リコネクションレートで）リコネクションが起こっているのかを明確に説明できる可視化例は、今までになかった。

筆者らは、これまで、Global MHD シミュレーションデータを最高時間分解能で 3 次元時系列可視化する技術を開発し、NICT サイエンスクラウド上で開発した。この技術により、プラズマの磁力線凍結（Frozen-in）を仮定の下で磁力線の対流を完全追跡し、3 次元時系列可視化することができるようになった。

ただし、この方法は Frozen-in を仮定しているため、拡散領域の中の磁力線の追跡を行うことはできない。言い換えると、磁気圏内のどの領域でいつ、どの程度の拡散係数の領域が発生するのかを理解せずに、リコネクション領域の特定は困難である。そこで、本研究では、Global MHD シミュレーション空間内の拡散係数の時間変化を定量的に評価することを行った。手法としては、太陽風中の任意の点の近傍領域の磁束を求め、磁力線の対流とともに磁束がどの程度変化するかで評価することとした。

まず、この手法を、南向成分を持つ太陽風中の磁力線に適用した。その結果、磁気圏上流の惑星間空間において磁束はほぼ保存され、上流において拡散領域は存在しなかった。一方、磁力線が磁気圏昼側境界に近づくと、昼側境界面近傍で拡散領域が発生することが分かった。この Global MHD シミュレーションでは地軸の傾きは含まれていないため、拡散領域は赤道をはさむ磁気圏昼側境界近傍に集中していたが、その範囲は赤道から一定の範囲（南北に 5Re 以上）に広がっていた。拡散領域でリコネクションが起こると仮定すると、この結果は、リコネクション領域が磁気圏昼側で南北方向に広く発生することを示唆している。

本発表では、Frozen-in を仮定した磁力線追尾の方法と、それを基にした拡散領域（拡散係数）の評価方法について議論する。この手法を、様々な太陽風パラメータ（特に Bz や By 成分）において検証し、太陽風パラメータと拡散領域の関係について議論する。

キーワード: Global MHD シミュレーション, 拡散領域, 磁力線, 3 次元可視化, リコネクション

Keywords: Global MHD simulation, diffusion region, magnetic field line, 3D visualization, reconnection

## MHD 波と Abraham-Minkowski 論争 Abraham-Minkowski controversy view from MHD theory

中村 匡<sup>1\*</sup>

NAKAMURA, Tadas<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 福井県立大学

<sup>1</sup>Fukui Prefectural University

誘電媒質中の電磁場の運動量に関する問題は、驚くべきことに100年以上論争が続いているにもかかわらず、いまだに決着のついていない。21世紀になった現在でも、この問題に関して多くの論文が発表されている。1909年にBohm-Abraham効果で有名なAbrahamはこれを $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ とすべきと主張したが、そのすぐあとの1910年にMinkowski空間で知られるMinkowskiは $\mathbf{D} \times \mathbf{B}$ であるという論文を発表した。その後、理論・実験の両面からいくつもの研究が発表されたが、いまだに最終結論には達していない。

この問題の難しさは、理論・実験の双方にある。理論的に電磁場に対する誘電媒質の応答を計算しようと思えば、各分子のダイナミクスを含んだ多体問題を量子力学的効果を勘案して解かねばならず、エネルギー運動量の保存までを含んだ十分正確な解を得るのは困難である。実験的には誘電体を通るときに電磁波に生ずる運動量の微小な変化を計測せねばならず、実験器具等からの運動量流入を正確に評価するのが難しい。

本研究では、この問題をプラズマを媒質として理論的に計算してみた。完全電離の古典プラズマの場合、一般の誘電体と違って媒質(プラズマ粒子)の電磁場に対する応答は電磁気学とニュートン力学を使って簡単に計算でき、少なくとも線形の範囲では十分に正確な解を求めることができる。ここではもっとも単純な均一磁場中を平行伝搬するアルフベン波を例として、波動にともなう運動量を検討する。結果として、いわゆるMinkowski運動量は電磁場の運動量とプラズマ粒子の運動量の和であることが示される。このような示唆をした論文は過去にいくつかあったが、このアルフベン波による計算は、これに対してハードエビデンスを与えることになる。

キーワード: Abraham-Minkowski 論争, 電磁運動量, MHD 波

Keywords: Abraham-Minkowski controversy, electromagnetic momentum, MHD waves

## 非一様円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係 Dispersion relation of helicon waves in a non-uniform cylindrical plasma

諫山 翔伍<sup>1\*</sup>, 羽田 亨<sup>1</sup>, 谷川 隆夫<sup>2</sup>, 篠原 俊二郎<sup>3</sup>

ISAYAMA, Shogo<sup>1\*</sup>, HADA, Tohru<sup>1</sup>, TANIKAWA, Takao<sup>2</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Tokyo University of Agriculture and Technology

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)[1]。

無電極推進機関は、プラズマ生成とプラズマ加速に分けて考えることができるが、このいずれもが科学的にも工学的にもチャレンジングな問題である。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、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、本研究では非一様密度円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係を正確に求め、非一様プラズマ中での波動の分布を明らかにする。

ヘリコン波は非一様プラズマ中を伝播する際、短波長のTG波といわれる散逸的静電波動を励起することが知られている。Shamrai等は、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と主張した[2]。プラズマ密度に非一様性に起因し、ヘリコン波・TG波それぞれの伝搬性・非伝搬性に基いて異なるプラズマ密度領域を定義できる[図1]。まず、基本的なヘリコン波・TG波の伝搬特性を調べるために、WKB的にそれぞれの密度領域で密度一定とした場合のヘリコン波・TG波の解について調べた。しかしこの方法には、密度変化に対してヘリコン波の波長の長さは十分に長い場合、それぞれの点で密度一定とした近似は妥当ではない。密度変化がある場合、径方向に関してフーリエ変換できない、の問題点がある。

そこで、密度非一様円柱プラズマ内の波動伝播を、印加周波数を固有値とする境界値問題としてとらえ、シューティング法により、波動(ヘリコン波・TG波)の周波数と固有関数を求めた。さらに衝突周波数を考慮し、衝突を介したヘリコン波・TG波と電子とのエネルギー交換について調べた。なお、すべての場合においてヘリコン波・TG波をそれぞれ進行波・反射波にモード分解し、合計4つの解について調べた。数値計算の詳細について報告する。

キーワード: 電気推進機関, 無電極推進, ヘリコンプラズマ, ヘリコン波, TG波, 分散関係

Keywords: Electric thrusters, The electrodeless thrusters, Helicon plasma, Helicon wave, TG wave, Dispersion relation

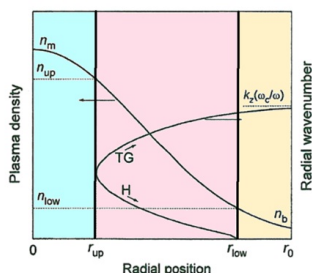


図1 密度変化とヘリコン波・TG波の解

- ・領域a ( $n > n_{up}$ ): ヘリコン波、TG波共に非伝搬。
- ・領域b ( $n_{low} < n < n_{up}$ ): ヘリコン波、TG波共に伝搬可。
- ・領域c ( $n < n_{low}$ ): TG波は伝搬可、ヘリコン波は非伝搬。

## 磁化プラズマへの外部電場浸透の数値解析：電磁場ポンドロモーティブ力による無電極プラズマ推進の開発に向けて

### Numerical study of electric field penetration into magnetized plasmas for a development of electrodeless plasma thruster

大塚 史子<sup>1\*</sup>, 羽田 亨<sup>1</sup>, 篠原 俊二郎<sup>2</sup>, 谷川 隆夫<sup>3</sup>, 松岡 健之<sup>4</sup>

OTSUKA, Fumiko<sup>1\*</sup>, HADA, Tohru<sup>1</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>2</sup>, Takao Tanikawa<sup>3</sup>, Takeshi Matsuoka<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 九大・総理工, <sup>2</sup> 東京農工大・工, <sup>3</sup> 東海大・総科研, <sup>4</sup> JAXA/ISAS

<sup>1</sup> ESST, Kyushu Univ., <sup>2</sup> Inst. Eng, TUAT, <sup>3</sup> RIST, Tokai Univ., <sup>4</sup> JAXA/ISAS

我々は、HEAT プロジェクト (Helicon Electrodeless Advanced Thrusters) の一環として、発散磁場中における電磁場ポンドロモーティブ力を利用した無電極プラズマ推進の研究を行っている。発散磁場中において、イオンジャイロ周波数で振動する電場を外部から印加すると、イオンは電磁場ポンドロモーティブ力により軸方向に加速される。ポンドロモーティブ加速が起こるためには、磁化プラズマ内部にイオンジャイロ周波数近傍の外部電場が浸透する必要がある。

前回の講演では、1次元静電 PIC 計算により、低域混成周波数の外部電場はほぼプラズマ内部に浸透できることを確認したが、イオンジャイロ周波数の外部電場浸透は確認できなかった。線形分散関係より、イオンジャイロ周波数近傍のプラズマ波動は電磁的である。よって、本講演では、粒子計算コード VORPAL(Tech-X 社)を用い、変動磁場の影響も考慮した電磁計算を行い、イオンジャイロ周波数近傍の外部電場が磁化プラズマ内部へ浸透できるか議論し、静電計算との比較を行う。そして、電場浸透の物理過程、および電場浸透の効果がポンドロモーティブ加速へ及ぼす影響を明らかにする。

キーワード: 電気推進, プラズマ加速, 無電極電気推進, ポンドロモーティブ力, 電場浸透

Keywords: electric thruster, plasma acceleration, electrodeless electric thruster, ponderomotive force, electric field penetration

## R M F 型加速機構におけるプラズマ密度分布と磁場浸透の関係

### The relationship between the plasma density profile and penetration of magnetic fields due to the RMF acceleration

山之口 和輝<sup>1\*</sup>, 羽田 亨<sup>2</sup>, 篠原 俊二郎<sup>3</sup>

YAMANOKUCHI, Kazuki<sup>1\*</sup>, HADA, Tohru<sup>2</sup>, Shunjiro Shinohara<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院総合理工学府大海専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院総合理工学研究院流体環境理工学部門, <sup>3</sup>東京農工大学工学研究院

<sup>1</sup>ESST,Kyushu Univ, <sup>2</sup>ESST,Kyushu Univ, <sup>3</sup>Inst. Eng, TUAT

惑星探査などの長期ミッションにおいて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、既存の電気推進機関の多くは電極を有しており、この電極がプラズマと接触することにより生じる電極摩耗が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てい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 ( R M F ) 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 ( F R C ) の方法と同じものである。背景磁場に径方向成分があれば ( 発散磁場配位であれば )、励起された電子電流と背景磁場とのローレンツ力により軸方向の定常推進力が得られるはずである [4]。

本講演では、R M F 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。円柱プラズマを流体として扱い、回転外部磁場を境界条件として与えて発展方程式系を解くことにより、プラズマ内への磁場浸透を定量的に評価することができる。径方向磁場の無い場合については多くの計算があるが [5]、これらの計算では円柱内のプラズマ密度は一樣と仮定するものが多い。しかし、実際の円柱プラズマ内のプラズマ密度は非一樣であり、壁近傍ほどプラズマ密度は低い。外部から印加した回転磁場の円柱プラズマ内への浸透率はプラズマ密度分布に依存する。プラズマ密度が低いほど磁場の浸透率は高いが、得られるスラストは密度に比例して低くなる。非一樣密度の円柱プラズマをモデル化し、プラズマ散逸、外部磁場強度、そして径方向磁場による主要パラメータとプラズマ密度分布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スラストが決まるかを議論する。

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

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

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

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

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

キーワード: 電気推進, 無電極推進, 回転磁場

Keywords: Electric thruster, Electrodeless thruster, Rotating Magnetic Field



## イオンエンジン局所ビームの中和電子ダイナミクスに関する粒子シミュレーション Full particle-in-cell simulation on the dynamics of electrons for charge neutralization of a local ion engine beam

臼井 英之<sup>1\*</sup>, 三宅 洋平<sup>1</sup>

USUI, Hideyuki<sup>1\*</sup>, MIYAKE, Yohei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of system informatics, Kobe University

惑星間航行システムとして実用化されている非化学推進システムの一つに電気推進器がある。その中でも小惑星探査衛星「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンの成功は記憶に新しい。イオンエンジンは、キセノンやアルゴンの中性粒子をエンジン内部で電離し生成イオンを電氣的な力で加速、噴射することにより推力を得る。同時にビーム口横に取り付けられた中和器から電子も外部に放出され、イオンビームの電荷中和をはかる。イオン、電子共、同量のフラックスが排出されるため、マクロ的に見ると、イオンビーム中和は成り立つが、エンジン近傍領域においては、電子とイオンのダイナミクスの違いやそれぞれの放出場所の違いにより、必ずしもイオンビームの電荷中和が成り立っているかどうかは定かでない。このエンジン近傍のプラズマ混合領域において特に中和電子がどのような振る舞いをしているのか、また、それが衛星環境にどのような影響を与えているのかについてプラズマ粒子シミュレーションによって定量的に解析を行った。イオンは電子に比べて十分重く、エンジン内で加速され噴射されたイオンビームはそのまま衛星から離れる方向に伝搬していく。一方、イオン噴射口の横に設置された中和器からはイオンビーム速度より十分大きい熱速度をもつ電子が放出される。この時、電子は正の電位を持つイオンビームに大きく引き寄せられ、ビーム方向のみならずビーム半径方向にも加速を受ける。今回扱うイオンエンジンビームは自然界のものとは違い、非常に局所的でありかつ有限である。そのため、中和電子ダイナミクスはビーム存在領域に大きく影響を受ける。ビーム先端と背景空間との間に大きな電位差があるため、ビーム進行方向に加速を受けた中和電子のうちその電位差を越えられないものは衛星方向へと反射される。またそれらの電子はビーム放出口再び反射されビーム進行方向へと戻る。このようにビーム進行方向に沿って中和電子は複数流体的な振る舞いをしながら全体としてビームとともに伝搬していく。また上述と同じ原理でビーム半径方向にも往復する電子挙動がみられる。これらの電子の振る舞いに関する詳細解析を報告するとともに衛星環境への影響についても議論したい。

キーワード: イオンエンジン, PIC シミュレーション, 電荷中和, 電子ダイナミクス

Keywords: ion engine, PIC simulation, charge neutralization, electron dynamics

## サイクロトロンメーザ機構によって発生するオーロラキロメトリック放射のビーム特性 Angular Beaming Characteristics of Auroral Kilometric Radiation Attributed to Cyclotron Maser Mechanism

今井 雅文<sup>1\*</sup>, 町田 忍<sup>1</sup>

IMAI, Masafumi<sup>1\*</sup>, MACHIDA, Shinobu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 地球物理学分野

<sup>1</sup> Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

オーロラを貫く磁力線上の密度の高い空洞領域に電波源があるとされる地球オーロラキロメトリック放射 (AKR) は右旋・左旋円偏波を伴う周波数 50-700 kHz の自然電波であり、衛星によって幅広く観測されている。理論的な観点から、AKR の右回り異常波 (R-X) モードの発生にはサイクロトロンメーザ不安定性 (CMI) が深く関与しているとされている。また、先行研究では、AKR のビーム構造はコーン状になっていると考えられていたが、近年においては Mutel et al. [2008] で提案された Tangent plane beaming model が最も妥当なモデルとされている。そのモデルでは、電波がその電波源の磁場ベクトルを含む等磁気緯度面に閉じ込められ、徐々に上方向に屈折しながら伝搬してゆく過程が重要である。Menietti et al. [2011] は、このモデルをベースに、電波発生領域には小さな電波源が薄いシート状に集まっているとみなして Ray tracing を行った。そして、得られた結果が AKR の観測と良く一致していることを示した。

これらのことを念頭におきながら、本研究では 2-1/2 次元高周波電磁ハイブリッドコードを用いた数値シミュレーションを実施する。このコードにおいては、冷たい背景電子を流体、波動を励起させる高温電子を相対論効果を取り入れた粒子、イオンを電気的な準中性条件を満たすように固定した成分としてそれぞれ取り扱う。ロスコーン、リングシェル、馬蹄型の速度分布関数をもつ高温電子をシミュレーション領域の中央に配置し、密度の高い背景電子はこの領域を取り囲むように配置する。また、水平方向の両端には電波吸収領域を設け、垂直方向は地球磁場の向きと仮定する。本発表では、AKR のビーム構造及び発生過程に関するシミュレーション結果について報告を行う。

Mutel, R. L., I. W. Christopher, and J. S. Pickett (2008), Cluster multispacecraft determination of AKR angular beaming, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07104, doi:10.1029/2008GL033377.

Menietti, J. D., R. L. Mutel, I. W. Christopher, K. A. Hutchinson, and J. B. Sigwarth (2011), Simultaneous radio and optical observations of auroral structures: Implications for AKR beaming, *J. Geophys. Res.*, 116, A12219, doi:10.1029/2011JA017168.

キーワード: 地球オーロラキロメトリック放射, サイクロトロンメーザ機構, 高周波電磁ハイブリッドコード

Keywords: Earth's Auroral Kilometric Radiation, Cyclotron Maser Mechanism, Electromagnetic Electron Hybrid Code

## 相対論的 Shear flow と乱流における粒子加速 Particle acceleration in relativistic shear flow turbulence

小尾 善男<sup>1\*</sup>, 寺澤 敏夫<sup>2</sup>

OBI, Yoshio<sup>1\*</sup>, TERASAWA, Toshio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 東京大学宇宙線研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tokyo Tech, <sup>2</sup>ICRR, University of Tokyo

相対論的ジェットが存在は、AGN や GRB、マイクロクエーサーといった様々な天体からの非熱的放射の観測により、明らかになっている。ジェットの周辺には、衝撃波だけでなく Shear flow や乱流などの領域が形成されると考えられており、こうした領域で加速された粒子からの放射と思われる観測結果がいくつか報告されている [1,2]。

そこで、我々は、相対論的 Shear flow とそれに付随する乱流によって粒子がどのように加速されるかを検証することにした。過去の先行研究 [3,4] でも、モデル化された乱流場や Shear を持つ速度場での粒子計算は行われてきたが、定常な乱流パワースペクトルによる計算や、定常で不連続な速度 Shear による計算なので、ジェットにより形成される Shear や乱流を適切に再現したかどうか疑問が残る。我々は、より現実的な検証をするために相対論的電磁流体 (RMHD) シミュレーション [5] を行い、そこで得られた電磁場を用いて、テスト粒子計算 [6] をすることにした。

まず、2次元 Kelvin-Helmholtz(KH) 不安定の RMHD シミュレーションを行い、成長が十分飽和するまで計算した。初期条件として、厚さ  $L$  の境界層を挟んで  $y$  方向に  $V_x = \pm 0.6c$  の速度勾配を与え、ガス圧、密度、磁場は一様 (プラズマベータは 1) で、磁場  $B_z$  は  $B_x$  の 5 倍、 $B_y = 0$  とした。また  $x$  方向、 $y$  方向ともに周期境界条件を採用した。一方、テスト粒子計算については、 $xy$  面内で等方な単一エネルギーの粒子群 (13 万個) を与え、その時間発展を追跡した。

その結果、粒子の一部は統計的な加速を受けることが見いだされた。その加速過程は、KH 不安定の時間発展に伴って生じた  $B_z$  の強弱の境界に沿った  $B$  ドリフト加速によるものと解釈される。

本講演では、これらの計算結果に対して、より詳細な考察について発表を行う予定である。

[1] A. A. Abdo et al., ApJ, 719, 1433 (2010)

[2] S. Jester et al., A&A, 373 447 (2001); S. Jester et al., A&A, 431, 477 (2005)

[3] S. O'Sullivan, B. Reville, A. M. Taylor, MNRAS, 400, 248 (2009)

[4] M. Ostrowski, A&A, 335, 134 (1998); M. Ostrowski, A&A, 238, 435 (1990)

[5] A. Mignone, M. Ugliano, G. Bodo, MNRAS, 393, 1141 (2009)

[6] R. Lehe, I. J. Parrish, E. Quataert, ApJ, 707, 404 (2009)

キーワード: 相対論的 Shear flow, 乱流, RMHD シミュレーション, 粒子加速

Keywords: Relativistic shear flow, Turbulence, RMHD simulation, Particle acceleration

## 宇宙線変成衝撃波の構造安定性について Stability of structure of cosmic ray modified shocks

齋藤 達彦<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>2</sup>

SAITO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>, HOSHINO, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>EPS, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

銀河系内部で生成される銀河宇宙線の加速起源は超新星残骸中の衝撃波であると一般に考えられている。天体衝撃波における非熱的粒子の加速においては1次のフェルミ加速と呼ばれる統計的な加速理論が標準なものとなっている。一方で、最近の超新星残骸の詳細な観測によって、衝撃波下流の熱的プラズマの温度が理論値よりも低く、宇宙線のエネルギーが卓越したことがあることが報告されている。こうした状況では、宇宙線が衝撃波に陽に影響を与え、その構造を変化させる、宇宙線の反作用効果が起こると考えられる。このように非線形に発展した衝撃波は「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれ、近年その存在の可能性が議論されている。

本研究では流体スケールでの宇宙線変成衝撃波の安定構造の理解のために、背景の熱的プラズマと宇宙線をともに流体的に取り扱った「MHD2 流体モデル」を基に議論した。このモデルにおいては、宇宙線変成衝撃波のランキン-ユゴニオ関係が多価的になり、1つの上流状態に対して、下流での宇宙線の生成量が異なる3つの状態をとることが可能であることが知られている。この3種の解析的定常解に対して1次元シミュレーションによる時間発展を行った結果、下流で宇宙線を最も生成する場合と最も生成しない場合の2つの構造が安定的に実現されることが分かった。また、両者の中間的な構造は不安定で他2つの安定構造へと遷移することも分かった。そして、この構造の安定性は上流の衝撃波角に依らないことも分かった。

さらに、定常解とは異なる初期状態として、上流にのみ宇宙線が存在するケースと下流にのみ宇宙線が存在するケースを設定してシミュレーションによる時間発展を追った。その結果、解析的定常解の衝撃波構造が非定常においても安定的に実現されることを確認した。

キーワード: 宇宙線, 衝撃波, 非線形発展, 構造安定性

Keywords: cosmic rays, shock, nonlinear evolution, stability of structure

## 超並列電磁粒子コードによる超高マッハ数衝撃波における電子加速 Electron accelerations at super-high Mach number shocks: 2D PIC simulations

松本 洋介<sup>1\*</sup>, 星野 真弘<sup>2</sup>

MATSUMOTO, Yosuke<sup>1\*</sup>, HOSHINO, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, the University of Tokyo

Plasma kinetic processes at collision-less shocks have been investigated and recognized as important for injecting electrons towards so-called the diffusive shock acceleration mechanism. The shock surfing acceleration is one of the prominent mechanisms that can quickly accelerate the electrons at the leading edge of the shock foot region by DC electric fields. The underlying mechanism of the shock surfing acceleration is the plasma kinetic process between the reflected ions and the incoming electrons that leads to the excitation of Buneman instability.

We have examined electron acceleration mechanisms at high Mach number shocks by means of two-dimensional PIC simulations with a large ion-to-electron mass ratio. We found the electrons are effectively accelerated at a super-high Mach number shock ( $M_A \sim 30$  in the shock-rest frame). The shock surfing acceleration is an effective mechanism for accelerating electrons toward the relativistic regime even in two dimension. An additional acceleration by the strong electric fields at the shock surface further energized the pre-accelerated electrons up to  $\gamma \sim 9$ . These two step accelerations are found only in the super-high Mach number shock with a low upstream electron  $\beta_e$  condition.

The conditions of the electron shock surfing acceleration toward the relativistic regime have been derived from one-dimensional arguments [Cargill and Papadopoulos; 1988, Papadopoulos, 1988]. These simple estimations still hold in the present two-dimensional simulations. While all our simulation runs satisfies the unstable condition of the Buneman instability, the shock surfing acceleration was observed in two simulation runs which also satisfied the trapping condition of accelerated electrons by the excited electric field. A similar aspect holds in recent two-dimensional PIC simulations with different parameters from our simulation runs [Umeda et al., 2009; Riquelme and Spitkovsky, 2011].

Exception is also found in a high  $\beta_e$  condition. In this run, the Buneman instability was destabilized in the foot region. However, its peak amplitude is not so large that electrons can be escaped from the trapping region before reaching the relativistic regime. A similar exception was also found by Kato and Takabe [2010]. Although their linear analysis revealed that the foot region in their simulation result was destabilized by the Buneman instability, the resultant energy spectrum showed a Maxwellian like what we see in the present study. These results indicate that we cannot simply understand the high electron  $\beta_e$  simulations from the linear and quasi-linear theories of cold plasma, and detailed analysis of the saturation mechanism of the Buneman instability with finite electron temperature effects is necessary.

キーワード: 超新星残骸, 無衝突衝撃波, 電子加速, 大規模シミュレーション

Keywords: Supernova remnants, collision-less shock, electron acceleration, high performance computing

## 低マッハ数垂直衝撃波の再形成 Reformation at low-Mach-number perpendicular shocks

梅田 隆行<sup>1\*</sup>, 木谷 佳隆<sup>1</sup>, 松清 修一<sup>2</sup>

UMEDA, Takayuki<sup>1\*</sup>, KIDANI, Yoshitaka<sup>1</sup>, MATSUKIYO, Shuichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名大 STE 研, <sup>2</sup> 九大総理工

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

Large-scale two-dimensional full particle-in-cell simulations are carried out for studying periodic self-reformation of supercritical perpendicular shocks. It is confirmed that the structure and dynamics of shocks are affected by the coupling between ripples and microinstabilities at the shock front. The shock reformation is absent when electromagnetic instabilities such as the modified two-stream instability are dominant at the shock foot. Electromagnetic whistler mode waves excited by the modified two-stream instability couples with the shock-front ripples, resulting in strong scattering of reflected ions at the shock front. On the other hand, the shock reformation is persistent when there is no microinstabilities or electrostatic instabilities are dominant at the shock foot. However, the reformation period is modified essentially due to the shock-front ripples because reflected ions are less scattered at the shock front.

キーワード: 衝撃波, 粒子シミュレーション, スケール間結合, 不安定性

Keywords: shock waves, particle simulation, cross-scale coupling, instability

## Enceladus 起源水分子による土星内部磁気圏内電子散乱のテスト粒子解析 Test-particle analysis of electron scattering in the Saturn's inner magnetosphere by neutral H<sub>2</sub>O from Enceladus

田所 裕康<sup>1\*</sup>, 加藤 雄人<sup>1</sup>

TADOKORO, Hiroyasu<sup>1\*</sup>, KATOH, Yuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

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

Cassini observations revealed that Saturn's moon Enceladus ejects neutral H<sub>2</sub>O 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 reported that observed field aligned fluxes of electrons and ions are sufficient to brighten the footprint aurora observed by EUV onboard Cassini. On the other hand, 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 H<sub>2</sub>O particles, we have developed a spatially one dimensional test-particle simulation code 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. An interaction between an electron and a background neutral cloud is solved by the Monte-Carlo method using differential cross sections of elastic collisions for H<sub>2</sub>O. We show a result of the variability of precipitating electrons and estimation of the expected brightness of auroral emissions.

キーワード: テスト粒子シミュレーション, エンケラドス・トーラス, 土星, 弾性衝突, 水分子プルーム, ピッチ角散乱  
Keywords: test particle simulation, Enceladus torus, Saturn, elastic collision, H<sub>2</sub>O plume, pitch angle scattering

## ダイポール磁場中でのホイッスラーモード波動の伝搬についての計算機実験 Simulation study of whistler-mode wave propagation in the dipole coordinate

加藤 雄人<sup>1\*</sup>  
KATO, Yuto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

In the Earth's inner magnetosphere, whistler-mode chorus emissions are observed mostly on the dawn side and are enhanced during geomagnetically disturbed periods. Chorus emissions are narrow band emissions observed in the typical frequency range of  $0.2$  to  $0.8 \omega_{ce}$  with a gap at the half  $\omega_{ce}$ , where  $\omega_{ce}$  represents the electron gyrofrequency at the magnetic equator. Components of emissions in the frequency range lower and higher than  $0.5 \omega_{ce}$  are respectively called the lower-band and upper-band chorus emissions. The gap at  $0.5 \omega_{ce}$  has been understood by the difference of the propagation characteristics of whistler-mode waves of frequency higher or lower than  $0.5 \omega_{ce}$  propagating along the field aligned ducts of enhanced/depleted plasma density [e.g., Bell et al., 2009]. The difference of the characteristics of upper-band and lower-band chorus emissions has been explained by the different propagation properties of whistler-mode waves of different wave frequency. For the discussion of the properties of whistler-mode wave propagation in the dipole magnetic field, we have developed a simulation code with a dipole geometry.

In this presentation we show initial results of the simulation of the whistler-mode wave propagation in the inner magnetosphere. We assume the wave source of monochromatic whistler-mode waves in the equatorial region of the magnetosphere. By assuming a cold plasma density distribution with a spatial gradient in both latitudinal and radial direction in the dipole magnetic field, we study the difference of propagation properties of whistler-mode waves of different wave frequency.



## IMFの回転に伴う地球磁気圏の応答 Response of earth's magnetosphere to IMF rotation

岩立 篤<sup>1\*</sup>  
IWADACHI, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

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

高分解能3次元グローバルMHDシミュレーションを行い、IMFのByとBz成分に依存する地球磁気圏の応答を、電流と渦度の関係に注目することにより調べた。シミュレーションモデルとして、朝夕対称を仮定した2分の1モデルを用いた。格子点は境界の両側1点を除いて $(n_x, n_y, n_z) = (900, 400, 800)$ とし、格子間隔は $dx = dy = dz = 0.1R_E$ とした。これはグローバルMHDシミュレーションにおいてケルビン・ヘルムホルツ不安定による渦の成長を計算できる格子間隔である。太陽風の密度を10個/cc、速度は300km/s、温度は20000Kとした。このときにIMF By=-10nTの定常状態からyz平面上を1分に1度の速さで回転させた条件における地球磁気圏の応答を、電流と渦度を磁力線に平行な成分と垂直な成分に分割することにより考察し、By成分が地球磁気圏に及ぼす影響を明らかにする。

キーワード: MHD, シミュレーション, 磁気リコネクション, ケルビン・ヘルムホルツ, 電流, 渦度  
Keywords: MHD, simulation, Magnetic reconnection, Kelvin-Helmholtz, current, vorticity