

Fast magnetic reconnection onset for different equilibrium configurations: from analytical results to 3D simulations

*Fulvia Pucci¹, Marco Velli², Ganapati Sahoo³, Anna Tenerani², Luca Biferale³

1. National Institute for Fusion Science (NIFS), 2. UCLA, 3. UNITOV

We investigate the onset of fast magnetic reconnection starting from equilibrium configurations relevant for astrophysical as well as for laboratory plasmas, that differ from the simple Harris current sheet configuration. In particular we present an analytical as well as a numerical study of the linear instability for equilibrium magnetic fields which go to zero at the boundary of the domain and of a double current sheet system, the latter previously studied as a proxy for the $m=1$ kink mode in cylindrical plasma. We show how the "ideal" tearing trigger condition is changed by assuming such different equilibrium profiles. Finally we present results for incompressible 3D MHD simulations of a double current sheet, in triperiodic geometry. We examine and contrast the destabilization and transition to turbulence describing the evolution of the magnetic energy and dissipation, and possible application to heliospheric phenomena, in particular CME evolution and relaxation.

Keywords: plasma physics, space plasma, magnetic reconnection

High-order leapfrog scheme of the Vlasov-Ampère system for the electrostatic plasma

*Tsung-Che Tsai¹, Ling-Hsiao Lyu², Wen-Chieh Hsieh²

1. National Center for High-performance Computing, National Applied Research Laboratories, 2. Graduate Institute of Space Science, National Central University

The simulation result of Vlasov code has high signal-to-noise ratio, in comparison to PIC (particle-in-cell) code. In the past, due to the scarcity of computing power, most researchers use PIC code as a tool toward novel explorations and investigations. With the rapidly enhancement in computing power of supercomputers, the high resource-demanding Vlasov simulation of potency has become wildly adoptable and efficiently achievable. In this study, we adopt grid-base Eulerian solver, instead of the customary semi-Lagrangian method, to solve Vlasov-Ampère equations for electrostatic plasma. We use three-step high-order leapfrog scheme for the solutions of energy-conserving Vlasov-Ampère equations. We use fifth-order central finite difference method to calculate the first derivative in Vlasov equation along the real space. We use cubic spline method to calculate the first derivative and integration along velocity space in the Vlasov equation and Ampère law without magnetic field, respectively. We use forth-order leapfrog method for time stepping. Subsequently, we examine the correctness of grid-base Eulerian solver in solving Vlasov-Ampère equations for electrostatic plasma by linear Landau damping test.

Keywords: Vlasov simulation, electrostatic plasma

Evaluation of Numerical Properties of Constrained-Transport-Type Schemes for Hybrid Simulations

*天野 孝伸¹

*Takanobu Amano¹

1. 東京大学 地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

Numerical simulations of space and astrophysical plasmas need an accurate method for solving Maxwell's equations. The divergence-free property of the magnetic field is the fundamental constraint in the system that must be satisfied in a numerical solution because otherwise, the simulation will become unstable. The Constrained-Transport (CT) scheme, which exactly preserves the discrete divergence-free property, has been quite successful in numerical Magnetohydrodynamics (MHD). In recent years, the CT scheme for Maxwell's equations has been ingeniously combined with an HLL-type (Harten-Lax-Van Leer) Riemann solver for the hydrodynamics part in a consistent fashion. The scheme known as the HLL-UCT shows excellent performance in numerical MHD as well as two-fluid plasma simulations.

It is straightforward to apply the same technique to kinetic Particle-in-Cell (PIC) type simulation method. However, the numerical properties of the scheme as applied to kinetic simulations are not known very well. In fact, artifacts arising from numerical noise inherent in the PIC method (which is absent in a grid-based fluid code) should carefully be analyzed.

In this study, we apply the HLL-UCT scheme to a quasi-neutral plasma hybrid code in which ions are treated as kinetic macroparticles whereas electrons are assumed to be a fluid. We found that naive application of HLL-UCT to a hybrid code may lead to artificial heating and/or cooling of ions, presumably because of excessive dissipation in the HLL-UCT scheme. We thus quantify the numerical artifact by extensive numerical experiments with varying mesh size, the number of particles per cell, plasma beta, etc. We found that the numerical heating/cooling may be explained by absorption (or dissipation) of spontaneous emission of waves arising from a discrete particle effect. Practical workarounds to minimize the numerical artifact for long time simulations will be discussed.

キーワード：マクスウェル方程式、数値シミュレーション、プラズマ

Keywords: Maxwell's equations, numerical simulation, plasmas

Designing high-order finite difference scheme for magnetohydrodynamics: shock capturing and divergence-free conditions.

*簗島 敬¹、三好 隆博²

*Takashi Minoshima¹, Takahiro Miyoshi²

1. 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野、2. 広島大学 大学院理学研究科

1. Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Graduate School of Science, Hiroshima University

Space and astrophysical plasmas are rich in dynamic phenomena such as convection, eruption, shock, accretion, and so on. Their macroscopic dynamics is well described by magnetohydrodynamics (MHD). Since the system of MHD equations are highly nonlinear, a numerical simulation is an indispensable tool to reveal its complicated physics.

The plasma is frequently associated with supersonic flows such as the coronal mass ejection, supernova, and jet, which yield various shocks and discontinuities. Furthermore, these flows are almost inviscid, thus will become turbulent. Reliable MHD simulations need to resolve these phenomena simultaneously, which is a contradictory issue for computational fluid dynamics and thus is challenging. Moreover, the MHD simulation should carefully handle errors of the divergence for magnetic field, which is not necessarily free in numerical simulations.

Many works have been devoted to develop exact or approximate Riemann solvers (upwind schemes) for (M)HD to accurately capture shocks and discontinuities. Nowadays, such shock capturing schemes are adopted as a standard method for MHD simulations (Kritsuk et al. 2011). On the other hand, various high-order interpolation techniques are proposed to improve the resolution of small scale structure (e.g., turbulence), and they can be incorporated into shock capturing schemes.

Shock capturing schemes are based on the finite volume method, which automatically satisfies the conservation laws but has a difficulty in achieving high order of accuracy in multi-dimension. The finite difference method is rather convenient for designing multidimensional high-order scheme. Conservative finite difference schemes have been proposed by approximating fluxes to high order, and succeeded in high resolution MHD simulations (Jiang et al. 1999; Mignone et al. 2010).

We consider another type of the conservative finite difference scheme for MHD, which interpolates physical variables to high order and utilize a variety of Riemann solvers to capture shocks. We also take special care of the divergence-free condition for magnetic field. Combination of the upwind scheme and the constrained transport (UCT) method, which satisfies divergence-free condition within machine accuracy without violating upwind property (via Riemann solvers), is thought to be a powerful strategy especially for low beta plasmas. We test various type of the UCT method. In this paper, we will present details of our code design and its performance, especially focusing on the comparison among different interpolation techniques, Riemann solvers, and UCT methods.

キーワード：磁気流体シミュレーション、数値計算手法

Keywords: MHD simulation, Numerical method

1次元静電ブラソフシミュレーションによる電離圏観測ロケットウェイク近傍の電子速度分布の検討

Study of anisotropic electrons distributed around the wake of an ionospheric sounding rocket by a 1D Vlasov-Poisson simulation

*遠藤 研¹、熊本 篤志¹、加藤 雄人¹

*Ken Endo¹, Atsushi Kumamoto¹, Yuto Katoh¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

電離圏観測ロケットは電離圏大気中を超音速で運動するため、その後方に航跡（ウェイク）と呼ばれる低プラズマ密度領域を形成する。ロケットのウェイク中では、ウェイク中のUHR周波数やプラズマ周波数、Zモードカットオフ周波数付近の周波数帯でプラズマ波動が観測されることがYamamoto[PhD. thesis, Tohoku University, 2001]によって報告されている。その後、Endo et al. [JGR, 2015]では、S-520-26ロケット実験でのプラズマ波動観測データをもとに、その波動のモードが短波長の静電波（静電的電子サイクロトロン高調波（ESCH）、UHRモード波動）であると結論された。この波動は、同実験で観測されたホイッスラーモード帯の波動とともに、ロケットのスピント位相に応じた強度変化を示していた。この結果は、速度空間上で異方性をもつ電子がロケット周囲のウェイクに対応した空間分布をもち、それに応じてそれぞれのプラズマ波動が励起・成長していたことを示唆している。しかし、ウェイク内外においていかなる速度分布のプラズマがどのような空間分布で存在していたかについては未だ明らかになっていない。

そこで我々は、ウェイク近傍における速度分布関数の空間分布について考察するため、一次元空間に設定した低密度領域の両側から背景の高密度プラズマが流れ込む現象を模擬するシミュレーションコードを開発している。磁力線方向の一次元空間を仮定し、空間範囲は $-600\lambda_D \leq X \leq 600\lambda_D$ (λ_D : デバイ長) とする。ここで、空間のグリッド幅は $\Delta X = \lambda_D$ とする。初期の真空領域は $-25\lambda_D \leq X \leq 25\lambda_D$ に設定する。また、粒子の運動は磁力線方向一次元のみを解き、電子の速度空間範囲は $-10V_{the} \leq V_e \leq 10V_{the}$ (V_{the} : 電子熱速度)、イオンの速度空間範囲は $-15V_{thi} \leq V_i \leq 15V_{thi}$ (V_{thi} : イオン熱速度) として取り扱う。速度空間のグリッド幅は、電子は $\Delta V_e = 0.1V_{the}$ 、イオンは $\Delta V_i = 0.0025V_{the}$ とする。シミュレーションの時間ステップ Δt は、 $\Delta t = 0.1\omega_p^{-1}$ (ω_p : プラズマ周波数) として計算する。そのため、計算を安定に解くためのクーラン条件は、電場を E と表すと $E/E_0 \leq 1$ ($E_0 = \lambda_D \omega_p^2 m_e / e$, m_e : 電子質量, e : 電気素量) となる。計算機で解く方程式は、電子・イオンのブラソフ方程式及び電場を決定するポアソン方程式に限定する。速度分布関数の時間発展は有理関数CIP法[Xiao et al., CPC, 1996]、電荷の分布に対応した電場の分布はフーリエ変換を利用した方法[Birdsall and Langton, Taylor & Francis Group, 2008]で求める。シミュレーションで再現される粒子の速度分布関数及び電場の時間変化は、それらのウェイク軸方向の空間分布とみなす。

現在の設定では、ウェイク境界のすぐ外側に、時間とともに振幅が増大する電場振動が現れ、 $t = 469\Delta t$ (下流3.4mm相当) でクーラン条件が破られるため、それ以降の計算は行っていない。しかし、本研究では少なくともウェイク尾部（下流約0.4m）付近までの速度分布関数の議論が必要と考えており、電場振動の選択的減衰、初期ウェイク境界の密度勾配の緩和等の対策を検討している。電子の速度分布異方性に関しては、現コードの $t < 469\Delta t$ の範囲でも現れており、ウェイク内側ではマルチビーム型の電子速度分布関数が、ウェイク境界外側では単一のビーム型分布関数が得られている。前者はウェイク外から内側に向かって電場振動に伴って周期的に流れ込む電子によって、また、後者はウェイク外側から内側に流れ込もうとする電子が境界の分極電場により反射されることによって起きていると考えられる。

本発表では、シミュレーションの設定や手法について概要を説明し計算結果を報告するとともに、特に電子

速度分布関数の空間分布やそれがつくられる物理過程に焦点を当て、議論を行う。

キーワード：ウェイク、観測ロケット、静電ブラソフシミュレーション、速度分布関数、電離圏

Keywords: wake, sounding rocket, Vlasov-Poisson simulation, velocity distribution function, ionosphere

極域電離圏飛翔体周辺のプラズマじょう乱に関する粒子シミュレーション Particle Simulations on Near-Spacecraft Plasma Perturbations in Polar Ionospheric Environment

*三宅 洋平¹、佐々木 紫²、臼井 英之²

*Yohei Miyake¹, Yukari Sasaki², Hideyuki Usui²

1. 神戸大学計算科学教育センター、2. 神戸大学大学院システム情報学研究科

1. Education Center on Computational Science and Engineering, Kobe University, 2. Graduate School of System Informatics, Kobe University

本発表では、神戸大学とノルウェー・オスロ大学の連携により進められている、極域飛翔体－電離圏プラズマ相互作用の数値シミュレーション研究について報告する。極域電離圏カスプ領域では、様々な空間スケールをもつプラズマ密度の疎密構造（イレギュラリティ）が形成されることが知られる。ノルウェーでは当該現象の本質的な解明のため、ICIキャンペーンと呼ばれる一連のロケット実験を実施してきた。しかし飛翔体周辺に生じるウェイクやシースといったプラズマじょう乱が飛翔体による「その場」観測に及ぼす影響は、十分に理解されているとはいいがたい。本研究では、衛星プラズマ相互作用の数値解析で実績のある3次元のプラズマ粒子シミュレーション手法を当該課題に適用し、観測ロケットや低軌道衛星周辺のプラズマ環境じょう乱の発生メカニズムを解明することを目標とする。

これまでに①ロケット表面帯電の磁力線方向とスピン軸のなす角に対する依存性や、②電離圏プラズマ電子の磁化に起因するロケット／衛星ウェイク構造の非対称性、を確認するとともに、それに関連した飛翔体周辺での電子ダイナミクスに関して新たな知見を得た。特に衛星近傍では、シース電場と背景磁場で決定されるE×Bドリフトの他に、シース内の密度勾配に起因する反磁性効果に基づく環状電流が存在する可能性が示唆された。現在は、衛星電位やウェイク周辺領域の空間電位に見られる固有振動と、プラズマ波動モードの関連を解明するための調査を開始しており、その初期結果も報告する。

キーワード：極域電離圏プラズマ、観測ロケット、衛星帯電、ウェイク、プラズマ粒子シミュレーション

Keywords: Polar Ionospheric plasma, sounding rocket, spacecraft charging, wake, PIC simulation

プラズマ波動電界による人工衛星電位変動現象の数値モデリング

Numerical Modeling of Plasma Wave Electric Field Effects on Spacecraft Charging

*三宅 洋平¹、桐山 武士³、加藤 雄人²、臼井 英之³

*Yohei Miyake¹, Takeshi Kiriya³, Yuto Katoh², Hideyuki Usui³

1. 神戸大学計算科学教育センター、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 神戸大学大学院システム情報学研究科

1. Education Center on Computational Science and Engineering, Kobe University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of System Informatics, Kobe University

本研究では、プラズマ波動の時間変動電界中の人工衛星電位変動現象をプラズマ粒子シミュレーションにより再現する。バンアレンプローブによる最近の観測ではコーラス波動の検出と同時刻に衛星電位の変動が確認されており[e.g., Malaspina et al., 2014]、波動電界による光電子放出電流の変動が原因と予想されている。これまでに本現象の波動周波数や背景磁場強度に対する依存性がチャンパー実験により調査されている[Wang et al., 2014a; 2014b]が、同時に波動の偏波や衛星形状による影響など理解が十分でない点も指摘されている。また衛星電位の計測は、衛星筐体とプローブ間の電位差を測ることにより行われるため、本現象を正しく理解するためには、衛星筐体とプローブ電位それぞれの波動電界に対する応答（の違い）を考慮する必要がある。

本発表では、これらの問題に関して、プラズマ粒子シミュレーションを用いた数値研究経過を報告する。ここで対象とするVLF波動の典型的な波長スケールは衛星サイズより十分に大きい。したがって波動電界は空間的に一様な交番電界であるとして、シミュレーション空間中に印加した。この計算モデルにより、右回り円偏波を持つ波動電界に対して、光電子電流の変調とそれに起因する衛星電位変動を再現することに成功した。また高周波シースの理論[Boehm et al., 1994]を応用する形で、本現象の理論的なモデル化も開始している。初期結果として、波動電界強度が200 mV/m以下のシミュレーション結果を良く説明できる定式化を得た。

キーワード：プラズマ波動、衛星帯電、波動電界、コーラス波動、光電子放出、プラズマ粒子シミュレーション

Keywords: plasma wave, spacecraft charging, wave electric field, chorus waves, photoelectron emission, particle-in-cell simulation

BEN低周波成分に関する3次元電磁粒子シミュレーション

3D Electromagnetic Particle Simulations about the Low Frequency Component of BEN

*三宅 壯聡¹、佐治 昌哉¹、岡田 雅樹²、大村 善治³

*Taketoshi Miyake¹, Masaya Saji¹, Masaki Okada², Yoshiharu Omura³

1. 富山県立大学工学部情報システム工学科、2. 国立極地研究所、3. 京都大学生存圏研究所

1. Department of Informatic system, Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 2. National Institute of Polar Research, 3. Research Institute of Sustainable Humanosphere, Kyoto University

これまでに、BENの低周波成分が、その高周波成分であるESWと同様にビーム不安定性の非線形発展の結果励起されるという仮定に基づき、ビーム不安定性からの低周波波動励起に関する2次元粒子シミュレーションを行った。その結果、磁場に垂直方向のイオン温度と低周波波動との関係は見られたが、ビーム不安定性とBENの低周波成分との明確な関係は確認できなかった。そこでGeotail衛星に搭載されている電場観測機(EFD)によって観測されたBENの低周波成分について統計解析を行い、BENの発生しやすい磁場強度とイオン密度・イオン温度の関係を調査した。BEN低周波成分をスペクトル形状によって分類して解析したところ、BEN低周波成分のスペクトルには異なる2パターンが存在することがわかった。それぞれのスペクトルを持つBEN低周波成分が観測される条件について統計解析を行い、特定されたプラズマパラメータを初期条件とする3次元電磁粒子シミュレーションを行った。その結果、どちらの条件でも低周波波動の励起が確認された。しかし現在のシミュレーションはコードの制約から時間・空間的に十分な規模では無いため、確認された低周波波動が安定に発達するかは不明である。今後はシミュレーションコードを改良して、十分な時間・空間規模のシミュレーションを実行し、BEN低周波成分の励起メカニズムを解明する。

キーワード：広帯域静電ノイズ、3次元電磁粒子シミュレーション、Geotail衛星

Keywords: Broadband Electrostatic Noise, 3-dimensional Electromagnetic Particle Simulations, Geotail Spacecraft