

## 粒子シミュレーションによる宇宙機近傍のプラズマ電磁擾乱の研究 Full PIC simulations on plasma electromagnetic disturbance in the vicinity of spacecraft

白井 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

人類の宇宙環境利用がますます盛んになる中、宇宙機とプラズマ (SP) の相互作用の理解が急務となっている。宇宙システムの高時間運用を保障し、また科学衛星の「その場」観測で得られる様々な情報を正しく解釈するには、この SP 相互作用の定量的な理解が不可欠となる。

宇宙環境においては、人工衛星やステーション等の宇宙機は宇宙プラズマとの接触により帯電し、その浮遊電位は衛星表面での電流バランスによって決定される。その電流は、背景プラズマの流入のみならず、衛星表面から放出される光電子や二次電子、そして、イオンエンジンに代表される電気推進器からの能動的なプラズマ噴射からなる。この衛星帯電により衛星周辺のプラズマ環境は影響を受ける。シースやウェイクと呼ばれる非一様なプラズマ領域が衛星近傍やプラズマ流下流に形成されるとともに、衛星周辺の電磁界も擾乱を受ける。これらの SP 相互作用を理解することは科学衛星によるプラズマ環境観測やそのデータ解析において重要である。なぜなら、これにより衛星観測データから衛星起源の人工擾乱の影響を分離することができるからである。また、電界センサーなど衛星搭載観測機器を設計する上で信頼できる観測データを得るには衛星近傍擾乱を最小限に抑えることが必要であるが、この擾乱状態を自己無撞着に得るために、我々は衛星筐体をシミュレーション領域に取り込んだプラズマシミュレーションを行っている。

この SP 相互作用問題を解くために、我々は EMSES プラズマ粒子シミュレーションコードを開発した。EMSES は標準的な電磁 PIC 手法をもとにし、それに衛星の金属筐体をキャパシタンス行列法によりシミュレーション内に取り込む。加えて、衛星表面からの光電子や 2 次電子放出も数値的に再現できる。これまで、EMSES を用いて GEOTAIL、BepiColombo/MMO、そして Solar Probe Plus の各衛星の環境についてシミュレーション研究を行ってきた。

本講演では、まず EMSES における宇宙機の数値的な取り扱いを簡単に紹介し、その後、EMSES を用いて行った科学衛星環境解析の事例をいくつか紹介する。まず、希薄プラズマ流中での Cluster 衛星後方に形成されるウェイク領域とその電界計測への影響に関するシミュレーション結果を紹介する。このシミュレーションでは、mm オーダーの非常に細かいワイヤーブームを数値的に取り込むことに成功し、実パラメータレベルで衛星帯電によるウェイク領域の形成、その電界計測への影響を明らかにすることができた。また、最近の研究トピックとして太陽近傍環境における SP 相互作用の EMSES シミュレーションも紹介する。強い太陽光により光電子放出量が増大し、それにより衛星表面近傍で負電位バリア領域が形成される。これにより正味の光電子量が抑制され結果として衛星は負に帯電するが、この状況での衛星電磁環境について述べる。

キーワード: 衛星プラズマ環境, 宇宙機 - プラズマ相互作用, 電磁粒子シミュレーション, 衛星帯電, 電磁擾乱

Keywords: Spacecraft plasma environment, Spacecraft-plasma interactions, Electromagnetic Particle simulation, Spacecraft charging, electromagnetic disturbance

## 京を用いた磁場連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション General relativistic simulations of magnetized binary neutron star merger on K

木内 建太<sup>1\*</sup>; 久徳 浩太郎<sup>2</sup>; 関口 雄一郎<sup>1</sup>; 柴田 大<sup>1</sup>  
KIUCHI, Kenta<sup>1\*</sup>; KYUTOKU, Koutarou<sup>2</sup>; SEKIGUCHI, Yuichiro<sup>1</sup>; SHIBATA, Masaru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学基礎物理学研究所, <sup>2</sup> ウィスコンシン大学ミルウォーキー校  
<sup>1</sup>Yukawa Institute for Theoretical Physics, <sup>2</sup>University of Wisconsin-Milwaukee

連星中性子星は、中性子星で構成される二重連星であり現在までに9個観測されている。連星中性子星は重力波放出によって、軌道エネルギーと軌道角運動量を徐々に失い、最後には合体に至る。観測されている連星中性子星の内、6個は宇宙年齢以内合体すると見積もられている。合体時に放出される重力波は2017年頃から本格稼働する地上型重力波干渉計 KAGRA や advanced LIGO, advanced VIRGO で年間10回程度観測可能であり、重力波が直接観測されれば、強重力場における一般相対性理論の検証、中性子物質の状態方程式の検証が可能になる。さらに、連星中性子星合体はショートガンマ線バーストと呼ばれる突発的高エネルギー天体現象の有力な駆動源候補であるが、重力波観測によるこの仮説の検証も可能になるかもしれない。さらに、鉄より重い元素の合成現場は超新星爆発であるというのが通説であったが、最新の超新星爆発の理論研究によるとその可能性は極めて難しくなっているため、連星中性子星合体は重元素合成の有力なサイトとして近年精力的に研究されている。

このような背景のもと、連星中性子星合体過程の理論的解明は重要な研究課題となっている。連星合体は典型的に密度が10の15乗グラム毎立方センチメートル、温度が10の10乗度に達する現象であるため、解析的取り扱いが破綻し数値モデル化が必須になる。我々のグループではこの問題に対して数値相対論を用いて取り組んでいる。数値相対論とは、一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式並びに流体方程式、ニュートリノ輻射輸送を連立させて数値的に解くことで強重力場の現象を理論的に解き明かすことを目的とした研究分野である。

パルサーの観測により中性子星が一般に10の12乗程度の磁場を保持していることが観測的に確立しているが、さらに10の14乗の強磁場を持つ強磁場中性子星の存在が観測的に示唆され注目を浴びている。しかし、連星合体過程で磁場がどのような役割を果たすかは良く分かっていない。合体過程では様々な流体不安定性が磁場の増幅機構となり得るが、この種の不安定性は短波長であるため、高解像度数値シミュレーションが必須になる。既存のシミュレーションでは不安定モードを十分に解像出来ているとは言い難く、科学的結果に疑問が残る状況であった。我々はスーパーコンピュータ京を使用することで世界最高解像度のシミュレーションを実行し、連星中性子星合体過程における磁場の役割を明確にした。以下に合体過程と磁場増幅機構を項目別に記す。

### (1) 連星合体時の接触面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性

連星合体時には互いの星表面付近で速度差が生じるためケルビン-ヘルムホルツ不安定になる。その結果、渦が生じるが、線形解析によるとより短波長のモードが大きな成長率を持つことが分かる。磁場が存在すると渦によって磁力線が引き伸ばされるため磁場が増幅すると考えられているが、今回我々のグループはこの磁場増幅が有意に起こることを数値相対論シミュレーションで初めて示した。解像度に対する計算結果の収束性チェックを行うことで、最大磁場が合体の前後で少なくとも30倍近く増幅されることが分かった。既存のシミュレーションで用いられていた解像度では高々増幅率は数倍であり十分な解像度がないと答えを間違えることを示した。

### (2) 合体後に形成される超大質量中性子星内部における磁気回転不安定性

連星合体の後、強い微分回転と熱的圧力に支えられた超大質量中性子星が過渡的に形成される。この星は磁気回転不安定性に対して不安定であるが、高密度/高角速度のため不安定モードは非常に短くなる。我々のシミュレーションでは、このモードによる磁場増幅を解像することに成功した。その結果、超大質量中性子星は10の16乗から17乗程度の強い磁場を持つことが分かった。

### (3) ブラックホール降着円盤における磁気回転不安定性と質量放出

超大質量中性子星は非軸対称構造に起因する角運動量輸送と重力波による角運動量放出によって、最終的にブラックホールに重力崩壊する。降着円盤内部では磁気乱流による角運動量輸送が起こるとともに、降着円盤表面はケルビン-ヘルムホルツ不安定になる。これらの物理機構で生成された渦がエネルギーを外向きに運ぶことで、円盤風が駆動されることが分かった。

本講演ではシミュレーション結果を詳細に紹介する予定である。

## 有限体積マルチモーメント移流法を用いた電磁ブラソフシミュレーション Electromagnetic Vlasov simulations of magnetized plasma with a finite-volume multi-moment advection scheme

箕島 敬<sup>1\*</sup>; 松本 洋介<sup>2</sup>; 天野 孝伸<sup>3</sup>

MINOSHIMA, Takashi<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Yosuke<sup>2</sup>; AMANO, Takanobu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, <sup>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

The Vlasov simulation, which directly discretizes the Vlasov equation on grid points in phase space, has been proposed as an alternative method to the common Particle-In-Cell simulation, to improve the accuracy of kinetic plasma simulations. Although the electrostatic Vlasov simulations have been successfully carried out thus far, the electromagnetic Vlasov simulation of magnetized plasma is still limited, owing to numerical difficulty in solving the distribution function in velocity space.

To overcome the difficulty, we develop a new numerical scheme, specifically designed to solve the Vlasov equation in magnetized plasma. The scheme advances multiple piecewise moments of a physical profile based on their governing equations, to preserve the profile with high accuracy. The scheme allows us to perform a long-time calculation of the distribution function of magnetized plasma with small numerical diffusion.

In this talk, we first present the scheme and its performance. Then, we report the application of the scheme to two-dimensional (2D3V) electromagnetic Vlasov simulations. Long-time simulations of the linear wave propagation in magnetized plasma are conducted with quite small numerical errors. We also conduct the simulation of collisionless magnetic reconnection. The simulation resolves macroscopic structure without numerical noise, and is in good agreement with previous studies. Furthermore, the simulation resolves microscopic structure of the non-Maxwellian plasma velocity distribution around the reconnection site, e.g., acceleration by the reconnection electric field at the X-point, high energy beams around the boundary layer, and heating by the magnetic compression at the downstream. Since the simulations have been successfully carried out with the grid size much larger than the Debye length, the Vlasov simulation is a powerful technique to treat global-scale kinetic plasma phenomena.

キーワード: 移流方程式, ブラソフシミュレーション, 磁気リコネクション

Keywords: Advection equation, Vlasov simulations, Magnetic reconnection

## プラズマハイブリッドシミュレーションモデルの一般化 Generalization of Plasma Hybrid Simulation Model

天野 孝伸<sup>1\*</sup>; 東森 一晃<sup>1</sup>; 白川 慶介<sup>1</sup>  
AMANO, Takanobu<sup>1\*</sup>; HIGASHIMORI, Katsuaki<sup>1</sup>; SHIRAKAWA, Keisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻

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

宇宙プラズマの非線形現象を扱う自己無撞着な数値シミュレーションモデルとして、イオンを運動論的に扱い電子を慣性の無視できる流体として扱うハイブリッドモデルが広く用いられている。この手法は電磁流体スケールからイオンの慣性長のスケールまでを正しく取り扱うことが出来るが、一方で質量0の電子の存在を仮定しているため高周波の whistler 波の取り扱いが困難であり、このため数値的安定性に問題を抱えていた。我々は最近、ハイブリッドモデルに電子慣性効果を「適切に」組み込むことによってこの問題が解決できること、またこれによって低密度領域や真空領域の扱いが可能になることを示した。本研究ではこのモデルを更に発展させ、電子の運動論的效果を組み込む手法の可能性について議論する。

電子の運動論的效果は一般的には最も原始的な Vlasov-Maxwell 方程式を用いなければ扱うことが出来ないと考えられている。このモデルでは電磁波や Langmuir 波などの高周波の波動までが全て含まれており、特に宇宙プラズマでは多くの場合において電子のプラズマ周波数とサイクロトロン周波数は前者の方が非常に大きいため、計算量が莫大になってしまうという問題が有る。逆に考えれば、例えば電子と whistler 波とのサイクロトロン共鳴などを考える際には高周波成分による寄与は小さいと考えられ、近似的には準中性条件が成り立っているものと予想される。そこで本講演では電荷中性条件を仮定した、イオンと電子を共に運動論的に粒子として扱う手法の是非を検討する。基本方程式としては Maxwell 方程式の変位電流を無視した Vlasov-Ampere 方程式系を採用し、静電場についての Poisson 方程式は用いない。従って本モデルでは電場は通常一般化されたオームの法則に対応する方程式から決定する必要があるが、この電場の決定方程式を Vlasov-Ampere 方程式系より厳密に導出した。講演ではこの厳密な方程式を用いることによって電荷中性条件を仮定しながらも電子サイクロトロン共鳴の正しい取り扱いが可能とあることを示す。

キーワード: プラズマ, 数値シミュレーション

Keywords: plasma, numerical simulation

## 磁気圏 MHD シミュレーションコードの Xeon Phi に対する最適化 Optimization of Magnetohydrodynamic Simulation Code for Planetary Magnetosphere to Xeon Phi

深沢 圭一郎<sup>1\*</sup>

FUKAZAWA, Keiichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>九州大学情報基盤研究開発センター

<sup>1</sup>Research Institute for Information Technology, Kyushu University

For investigating the global structures of plasma, such as the planetary magnetospheres, the Magnetohydrodynamic (MHD) equations are often used, in which full kinetics of plasma are neglected by taking the moments of the Vlasov equations. The MHD equations are highly nonlinear and are very complex to solve by hand calculations. Thus computer simulations play essential roles in studies of global magnetosphere.

The numerical MHD code for the magnetosphere has been optimized for vector-type supercomputers for a long time because the MHD code is a kind of fluid code and most of supercomputers with vector processors have high performance to solve the fluid codes in 1990's. These codes often have achieved a very high computational efficiency (the ratio of the effective performance to the theoretical performance). However, almost 100% of the "Top 500" supercomputer systems in the world adopt the massively parallel scalar type processors and more than 85% of systems consist of the x86 processor architecture in these days. The other scalar type computers are POWER and SPARC architectures. Recently the new coprocessor Xeon Phi which has many cores (~60 cores) of X86 architecture is introduced to the supercomputer system and achieved good performance of the Linpack benchmark.

In this study I evaluate the performance of MHD code for the planetary magnetosphere on the single Xeon Phi coprocessor. For the performance evaluation, I use the three-dimensional domain decomposition method and a cache-hit type of three-dimensional domain decomposition method with the flat MPI and hybrid MPI. As the results, I found that normal three-dimensional decomposition of the MHD model with the hybrid MPI is suitable for Xeon Phi coprocessor and achieved computing performance efficiency of ~7%. Furthermore, I add the optimization to the MHD code based on the Xeon Phi architecture and obtained the computing performance efficiency of almost 10% which is the double performance of FX10 single node.

## NICTサイエンスクラウドを活用した高速データ処理技術によるグローバルMHDシミュレーションの流体要素追尾 A Study of Fluid Element Tracing in Global MHD Simulations via Parallel Data Processing on the NICT Science Cloud

村田 健史<sup>1\*</sup>; 深沢 圭一郎<sup>2</sup>; 郭 智宏<sup>3</sup>; 海老原 祐輔<sup>4</sup>; 才田 聡子<sup>5</sup>; 藤田 茂<sup>6</sup>; 田中 高史<sup>7</sup>; 久保田 康文<sup>1</sup>; 渡邊 英伸<sup>1</sup>; 建部 修見<sup>8</sup>; 田中 昌宏<sup>8</sup>; 木村 映善<sup>9</sup>

MURATA, Ken T.<sup>1\*</sup>; FUKAZAWA, Keiichiro<sup>2</sup>; GUO, Zhihong<sup>3</sup>; EBIHARA, Yusuke<sup>4</sup>; SAITA, Satoko<sup>5</sup>; FUJITA, Shigeru<sup>6</sup>; TANAKA, Takashi<sup>7</sup>; KUBOTA, Yasubumi<sup>1</sup>; WATANABE, Hidenobu<sup>1</sup>; TATEBE, Osamu<sup>8</sup>; TANAKA, Masahiro<sup>8</sup>; KIMURA, Eizen<sup>9</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 九州大学, <sup>3</sup> 株式会社数理技研, <sup>4</sup> 京都大学, <sup>5</sup> 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構, <sup>6</sup> 気象大学校, <sup>7</sup> 九州大学宙空環境研究センター, <sup>8</sup> 筑波大学, <sup>9</sup> 愛媛大学

<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>SURIGIKEN Co.,Ltd., <sup>4</sup>Kyoto University, <sup>5</sup>Research Organization of Information and Systems, <sup>6</sup>Meteorological College, Japan Meteorological Agency, <sup>7</sup>SERC, Kyushu University, <sup>8</sup>University of Tsukuba, <sup>9</sup>Ehime University

地球磁気圏と太陽風の相互作用を理解するため、3次元グローバルMHDシミュレーションを用いて研究が行われてきた。MHDシミュレーションデータを可視化する際に、磁力線の可視化は物理を理解する上で重要である。しかし精度よく磁力線を追尾し可視化することは、大規模な時系列データを処理する必要があるため困難であった。我々は大規模データを処理することができるNICTサイエンスクラウドを利用することで磁力線追尾可視化技法の開発を行ってきた。本論文ではこれまでの開発の現状について紹介する。

