

# 粒子シミュレーションに見る宇宙空間で発生する大規模渦

中村琢磨, 篠原育

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

takuma@stp.isas.jaxa.jp

**概要：** 地球周辺の宇宙空間を満たす宇宙プラズマはほぼ無衝突と見なせる程希薄（極高レイノルズ数）であるが、人工衛星の観測によると、性質の違う2領域間で衝突の効果より数桁も素早くプラズマの混合が起こることが知られている。この原因として、2領域の境界層で発生する流体的不安定が発達した「渦」と、プラズマ特有の「磁気リコネクション」という爆発現象が挙げられている。申請者は、流体的・プラズマ的なこれらの現象が非線形に結びつくことでより効率的にプラズマの混合が促される様子を粒子シミュレーションにより定量的に示した。近年、このような非線形結合は実際に地球近傍の宇宙空間（太陽風と地球磁気圏の境界領域）で観測されており、宇宙空間物理で最重要課題である惑星磁気圏への太陽風流入問題の解決が期待される。本研究のように巨大な時空スケールで発展する流体的不安定と粒子レベルでの混合現象を同時に解くためには多大な計算機資源を必要とするが、近年の計算機資源の拡大によりようやく実現可能になってきた。

## 1 はじめに

地球近傍の宇宙空間はほぼ無衝突と見なせる非常に希薄（ $\sim 1/\text{cc}$ ）で高温（ $\sim 10^5\text{K}$ ）なプラズマ粒子（99%以上が水素イオンと電子）で満たされている。このような宇宙プラズマ中では粒子間の衝突による効果は期待できないにもかかわらず、人工衛星の観測によるとプラズマを構成する粒子はマクスウェル分布に近い分布をしている。これは電磁場を介したプラズマ粒子同士の相互作用が原因である。つまり、宇宙プラズマ中に起こる現象を理解するためには電磁場を介した複雑な粒子の運動を理解する必要がある。

宇宙プラズマ中で起こる現象のスケールは、数万キロを超えることが多いため、人工衛星によるその場観測では全体像を捉えることは難しく、また実験室での再現も難しいため、数値シミュレーションによる研究が必要不可欠である。ところが、数値シミュレーションによって微視的な粒子の運動を解きつつ大規模に変動する巨視的な現象を解くには多大な計算機資源を必要とするため、従来は、微視的な粒子の運動だけを捉えるか、もしくは粒子の運動を無視し流体的に巨視的な現象だけを捉える計算が行われてきた。しかし、近年の計算機資源の拡大に伴い、微視的な粒子の運動を捉えつつ巨視的な現象を計算することが可能になってきた。実際に本研究では、宇宙プラズマ中で発生する数万キロメートルサイズの巨視的渦現象をプラズマ粒子の運動を解く Particle-In-Cell(PIC)法で計算することに成功した。

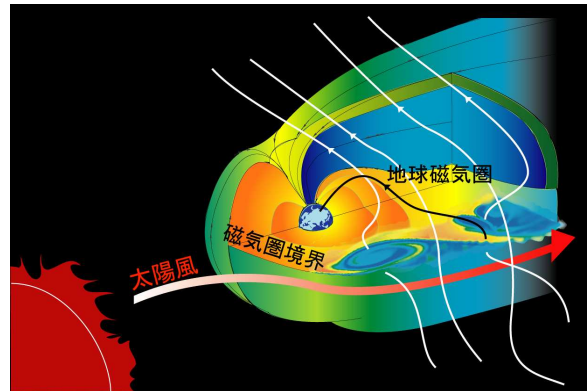


図1：太陽風領域と地球磁気圏との境界で発生する数万キロメートルサイズの渦（電磁流体シミュレーション結果[1]を用いたイメージ図）。

## 2 宇宙プラズマ中に発生する大規模渦

太陽風起源のプラズマで満たされている地球磁気圏内のプラズマ物理を理解するには、そもそも磁気圏境界面を通して太陽風がどのように・どれだけ流入してきたかを知る必要があるが未だ定量的な理解はなされていない。このように磁気圏境界面の物理を定量的に理解することは磁気圏への太陽風流入問題を解決し、磁気圏物理を理解する上での最重要課題となっている。

人工衛星の観測によって、磁気圏境界では太陽風起源と磁気圏起源のプラズマが混合している境界層が形成されていることが分かっている。この混合は粒子間衝突で考えられるより数桁も素早く起こっている。このような素早い混合を生む原因として、高速に流れる太陽風によって励起される流体的な不安定が成長した「渦」（[1]、図1）と、太陽風磁場と地球の固有磁場との間で起こるプラ

ズマ特有の爆発現象である「磁気リコネクション」が挙げられている。近年、電磁流体シミュレーションにより流体的・電磁的なこれら二つの現象が非線形に結合することでより効率的にプラズマの混合が起こる可能性が示された [2]。実際に、人工衛星によって渦と磁気リコネクションが同時に発生している様子も観測されている。しかし、流体計算や人工衛星の観測からは、この非線形結合によるプラズマ粒子の混合を定量的に調べることができないため、粒子の運動を追うことのできる粒子シミュレーションを行う必要がある。

### 3 粒子シミュレーション

申請者は流体的に大規模な渦現象が磁気リコネクションと結合する様子を粒子シミュレーションで捉えることに初めて成功した。また、渦内で起こるプラズマ混合を定量的に評価し、渦の成長する時間スケールで効率的に混合が進むことを示した。さらにプラズマ（主に電子）が渦内で相対論的なエネルギーにまで加速される様子を捉えた（図2）。つまり、境界で発生する渦は混合だけでなく強い粒子加速をもたらすことを示した。

本計算は  $960 \times 960$  個の格子上に約  $10^8$  個の粒子を配置し PIC 法によって行った。計算に必要なメモリ量は約 80Gbyte であり、ベクトル並列型計算機 NEC sx6 を 2 ノード(16CPU)使用し必要な時間ステップ (20 万ステップ) を約 100 時間で計算した。並列化には MPI を使用した。しかし、本計算では、イオンと電子の質量比=100(本来は 1837)という近似を用いているため、現実的なパラメータに対する定量的な評価はできていない。現実的なパラメータで計算するには約 2 桁大きい計算 (1.28Tbyte, 300 万ステップ) が必要であり、次世代大型計算機の使用が期待される。

また現在、JAXA-ESA 共同の地球磁気圏観測ミッション (「SCOPE/Cross-Scale : 2017 年打ち上げ予定」) が進行している。このミッションでは、粒子スケールを解像できる優れた時空間分解能を持つ親衛星とそれを囲う 10 機以上の子衛星による同時観測を行うことで、微視的スケールから巨視的スケールまでを同時に観測することが可能となる。このミッションにより現実的なパラメータでの次世代計算結果に実証的基盤を与えることが可能なため、太陽風流入問題に最終的な決着がもたらされ、さらには、宇宙プラズマ全体へと適応できる混合過程・境界面物理の普遍的な理解を得ることが期待される。

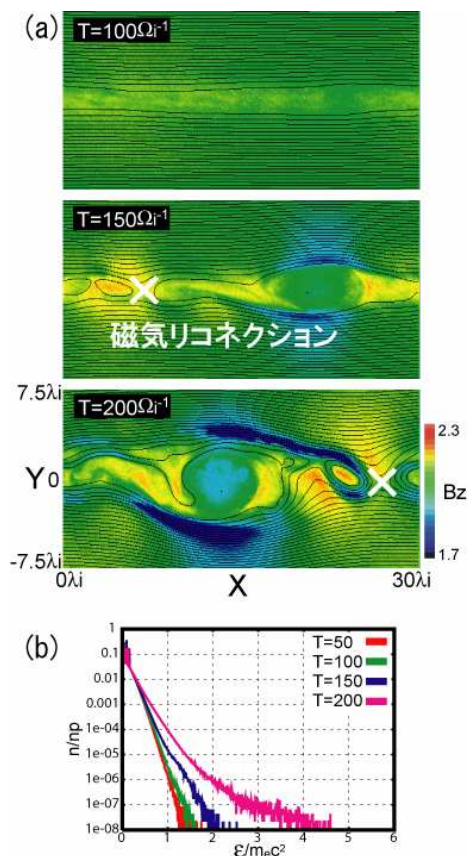


図2 : (a)渦の時間発展。T~150 より磁気リコネクションが開始し、T~200 で渦が成熟。(b)全計算領域の電子のエネルギースペクトル。T=150 から T=200 にかけて高エネルギー電子が急増する。

### 4 まとめ

申請者は、宇宙プラズマ中に発生する大規模渦が磁気リコネクションを伴って発展する様子を粒子シミュレーションで捉えることに初めて成功した。これにより、地球磁気圏境界面の物理を理解し太陽風流入問題の解決へ大きく前進した。しかし、現実的なパラメータの元での定量的な解決にはさらに大きな計算機資源が要求される。また、本研究のように流体的な大規模プラズマ現象を粒子シミュレーションで捉えるという計算技術は宇宙プラズマ物理を理解する上で大変重要であり、宇宙空間で起こる他の様々な現象へ応用し宇宙プラズマ物理の発展へ大きく貢献すること期待される。

### 参考文献

- [1] T.K.M. Nakamura et al., Decay of MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortices mediated by parasitic electron dynamics, *Phys. Rev. Lett.*, 92, 145001, 2004
- [2] T.K.M. Nakamura et al., The structure of an MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortex: Two-dimensional two-fluid simulations including finite electron inertial effects, *J. Geophys. Res.*, in press