

# 粒子シミュレーションに見る宇宙プラズマ中の大規模乱流現象

中村琢磨, 篠原育, 藤本正樹

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:** 宇宙空間を満たすプラズマガスは、極高レイノルズ数なため乱流的である。このような宇宙プラズマ中で起こる乱流によるプラズマ構成粒子の加速やエネルギー輸送過程を理解し、宇宙プラズマ乱流の果たす役割を理解するためには粒子シミュレーションが必須である。しかし、粒子シミュレーションは非常に計算負荷が大きいため大規模乱流への適応は現在の計算機資源では不可能である。そこで申請者は、様々なサイズの渦に対する粒子シミュレーションを行い、渦のサイズ依存性を理解することで大小様々な渦の混在する乱流現象を理解しようと試みた。その結果、①渦内部で「磁気リコネクション」というプラズマ特有の爆発現象が発生しプラズマ粒子を激しく加速すること、②この粒子加速は渦が「小さく」・「速く」巻き上がるほど効率的であることが分かった。本結果は、より乱流的であるほどプラズマ粒子は加速されやすいことを意味しており、宇宙プラズマ乱流は強力な粒子加速機構であることを示している。本研究のような粒子シミュレーションによる渦のサイズに対するサーベイは近年の計算機資源の進化により実現可能となった。

## 1 はじめに

宇宙空間は非常に希薄で高温なプラズマガスで満たされている（例えば、地球近傍では数密度約  $1/\text{cc}$ 、温度約  $10^5\text{K}$ ）。このような希薄（極高レイノルズ数）なプラズマは乱流的であるため、宇宙プラズマ中の乱流の果たす役割を理解することは宇宙プラズマ物理学において重要課題となっている。実際に、人工衛星による直接観測により太陽風中や地球磁気圏内など様々な場所で乱流現象は観測されているが、大規模な空間スケールで発生する乱流現象を人工衛星によるその場観測によって解明することは難しい。そこで、数値シミュレーションによる数値的な研究が行われてきた。

宇宙プラズマ現象を扱う数値シミュレーションには大きく分けて、電磁流体(MHD)シミュレーションと粒子シミュレーションがある。ほぼ完全電離しているプラズマ粒子は、電磁場を介して相互作用するため、その運動は非常に複雑となる。しかし、比較的大きな空間スケールでは粒子の運動効果は淘汰され速度分布がマクスウェル分布に近づくため、流体近似の MHD シミュレーションが有用となる。一方、粒子の運動が無視できないような小スケールの物理を扱う場合は計算負荷の大きい粒子シミュレーションが必要となる。

大規模乱流現象を数値シミュレーションで扱う場合は、巨大な空間スケールを扱うために MHD シミュレーションが主流であった。しかし、乱流を構成する渦はその内部に粒子効果の無視できない小スケール領域を生み出す性質があるため、大小様々な渦によって構成される宇宙プラズマ乱流

の性質を真に理解するには渦内部の細かい構造を解像できる粒子シミュレーションが必須である。ところが、現在の計算機資源で大規模乱流現象全体を粒子シミュレーションで再現することは不可能であるため、宇宙プラズマ乱流が果たすことが期待されるプラズマ粒子の加速・加熱・エネルギー輸送といった役割は未だ解明されていない。

そこで、申請者はサイズの違う渦それぞれの性質を高解像度粒子シミュレーションにより理解し、渦のサイズ依存性を理解することで、大小様々なスケールの混在する大規模乱流の果たす役割を明らかにすることを試みた。

## 2 計算手法

本研究では、プラズマ粒子の運動を解く方法として Particle-In-Cell(PIC)法を用いている。具体的には、電磁場の変動はマクスウェル方程式をセル上に差分して解き、計算空間を自由に飛び回る粒子の運動と電磁場の変動の相互作用を計算する際に PIC 法を用いる。ここで、PIC 法計算部は扱う粒子数にほぼ比例して負荷が増えるが、現実的な粒子数で計算することは次々世代計算機を用いても不可能であるため、ある決まった量の粒子の集団を一つの超粒子とする近似を用いて計算している。しかし、物理的に有効な粒子効果が現れる超粒子数の計算を行うために従来は小さい計算空間しか確保できなかった。ところが、近年の計算機資源の進化により、これまで MHD シミュレーションしか行えなかった大スケール現象に対しても粒子シミュレーションが可能になりつつある。

本研究では大規模乱流を担う大規模渦（粒子スケールの100倍以上）を含み様々なサイズの渦に対して粒子シミュレーションを行い、渦のサイズ依存性を理解する。本計算で扱った最大サイズの渦の計算は、使用メモリ約600Gbyte 計算時間80時間(宇宙航空研究開発機構の NEC-sx9,16CPU 使用,MPI 並列)である。

### 3 計算結果及び議論

中性流体と違い宇宙プラズマガスの運動は磁力線に凍結しやすい性質がある。そのため、渦が巻き上がると渦の内部に次々に磁力線が巻き込まれ、渦に内部に磁場のエネルギーが溜まる。すると、その磁場エネルギーが磁気リコネクションというプラズマ特有の爆発現象によって一気に解放される[1,2]。この爆発現象により、渦の構造が大きく乱されると同時にプラズマ粒子が激しく加速される。一般に磁気リコネクションによる磁気エネルギー解放率、すなわち粒子の加速効率は解放される磁気エネルギーにのみ依存することが知られているが、本研究により渦の内部で磁気リコネクションが起こる場合、エネルギー解放率は渦運動の運動エネルギーによってさらに高められるという驚くべき結果が得られた[図1b]。さらに、様々なサイズの渦による粒子加速効率を調べると、渦がより「小さく」・「速く」巻き上がるほど、より強く効率的に粒子が加速されることが分かった。この結果は、乱流中に「小さく」・「速く」巻き上がる渦が多く存在する状態、つまり宇宙プラズマガスがより乱流的になるほど、乱流全体により大量の磁気エネルギーの解放及びそれに伴う大量の粒子加速が起こることを意味しており、乱流現象が宇宙プラズマにおける強力な粒子加速機構となっていることを意味している。

### 4 次世代計算に対する期待

現在使用している粒子コードで行った最大サイズの計算は計算メモリ約50TBで、宇宙航空研究開発機構のFX-1を5776コア使用し(MPI並列)実効効率9%のスケラブルな結果を得ることに成功しており、本コードは次世代計算に十分対応していると考えられる。

一方、本研究により、粒子加速機構としての宇宙プラズマ乱流の役割が示されたが、実際にMHDシミュレーションで行われてきたような統計的に解析ができる程度に多数の渦を含む大規模乱流を

粒子シミュレーションにより直接計算し定量的な加速効率を求めるには、少なくとも本研究における最大渦計算の数百倍の計算メモリ(約1Pbyte)が必要となるが、このような大規模乱流シミュレーションは次世代計算機によりいよいよ実行可能な範囲である。

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、粒子スケールを解像しつつ大規模現象を捉えることが可能となる。このミッションにおいて乱流現象は最優先の観測対象となっており[図1]、次世代計算で可能になる定量的な乱流物理の理解に実証的基盤を与えることが可能となる。このように、近未来には次世代計算を行うことで直接観測が不可能な宇宙空間にも適応できる普遍的な宇宙プラズマ乱流物理の理解が得られると期待できる。

### 参考文献

- [1] Nakamura, T.K.M., et al., *J. Geophys. Res.* 113, A09204, doi:10.1029/2007JA012803 (2008)
- [2] Nakamura, T.K.M., and M. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, 165002 (2009)

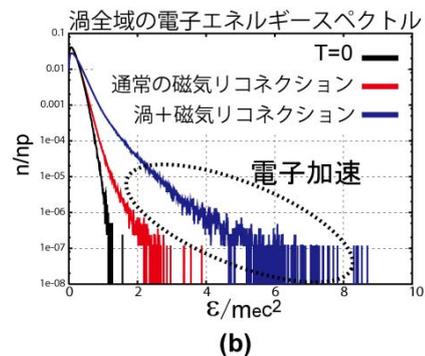
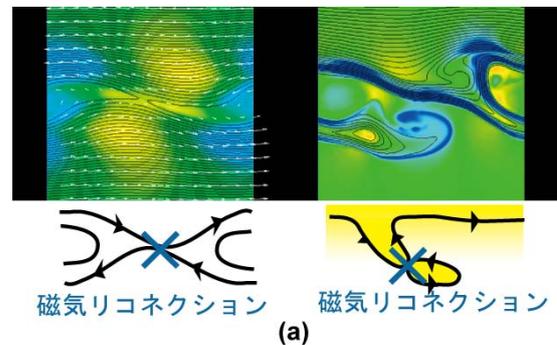


図1 : (a)渦内磁気リコネクションのシミュレーション結果[1]。SCOPE 提案書に掲載。(b)渦内リコネクションによって得られた電子エネルギースペクトル。