

機関番号： 82401  
 研究種目： 研究活動スタート支援  
 研究期間： 2009～2010  
 課題番号： 21840061  
 研究課題名（和文）  
 無衝突磁気リコネクションにともなう3次元磁気拡散機構の解明  
 研究課題名（英文）  
 3D dissipation mechanism in collisionless magnetic reconnection  
 研究代表者  
 藤本 桂三 (FUJIMOTO KEIZO)  
 独立行政法人理化学研究所・戒崎計算宇宙物理研究室・基礎科学特別研究員  
 研究者番号： 90553800

## 研究成果の概要（和文）：

適合細分化格子を用いた3次元電磁粒子コードの超並列化をおこない、分散メモリ型計算機において高い並列化効率（128コア並列で80%）を実現した。これにより、従来よりもはるかに多くの計算機資源を利用できるようになり、より大規模な粒子計算が可能になった。本コードを用いて磁気リコネクションの大規模な3次元シミュレーションを実施した結果、磁気中性線近傍に形成される薄い電流層に沿って電子スケールの電磁波動が励起されることが見出された。

## 研究成果の概要（英文）：

Massively parallel model of the 3D electromagnetic particle-in-cell code with adaptive mesh refinement has been developed and achieved high parallel efficiency (80% for 128-core parallelization) on a distributed memory system. This enables us to use much more computer resources and to perform larger-scale particle simulations. By using this code, we have conducted a large-scale 3D simulation of magnetic reconnection and found that an electron-scale electromagnetic mode is triggered in the thin current layer formed around the magnetic neutral line.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：超並列計算、電磁粒子シミュレーション、適合細分化格子、磁気リコネクション、3次元シミュレーション、磁気拡散過程

## 1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは、プラズマ中で磁力線がつながりかわる（“リコネクト”する）ことによって、磁場のエネルギーをプラズマの運動エネルギーに変換する現象であり、地球磁気圏プラズマから、太陽プラズマ、高エネルギー天体プラズマ、核融合プラズマにいたるまで、あらゆる磁化プラズマに共通の現象である。しかも、プラズマのごく一部の領域で起きる局所的な現象であるにもかかわらず、しばしばグローバルな磁場構造そのものを変えてしまいシステムのエネルギー状態に大きな影響をあたえるため、その物理素過程の解明は非常に重要である。問題となるプラズマの多くはその衝突周波数が対象となる現象の周波数に比べて十分に小さいため、一般的に“無衝突”プラズマとして取り扱われる。しかし、無衝突プラズマにおいて高速磁気リコネクションを可能にする磁気拡散機構（電気抵抗生成機構）は未だに明らかになっていない。

これまで、磁気リコネクションのモデル化は、大規模構造については MHD (Magnetohydrodynamics) シミュレーションによって、また、磁気中性線近傍に形成される磁気拡散領域周辺の振る舞いについては電磁粒子シミュレーションによって、それぞれ独立になされてきた。MHD モデルでは磁気拡散過程を陽に記述できないため、拡散係数（電気抵抗率）を人為的に与える必要があるが、その時間・空間的な与え方によって計算結果が大きく変わることが知られている（例えば、*Ugai* [Phys. Plasmas, Vol.2, 388, 1995]）。一方、電磁粒子モデルでは計算機資源の制約から大規模構造の変化を追うことができない。従来の2次元電磁粒子シミュレーションでは、電子スケールの磁気拡散領域（電子磁気拡散領域）の形成に伴って電子慣性効果（電子が有限時間加速されることによって等価的な電気抵抗が生じるという効果）が強化され、一時的に高速磁気リコネクションが実現されることが知られている（例えば、*Shay et al.* [J. Geophys. Res., Vol.106, 3759, 2001]）。しかし、大規模な構造の中で本当に電子慣性効果が長時間維持されるかどうかは自明ではない。

これに対して、申請者は、PIC (Particle-In-Cell) 法を用いた従来の電磁粒子コードに適合細分化格子 (AMR: Adaptive Mesh Refinement) を適用した新しいコード (AMR-PIC コード) を開発し、磁気拡散領域周辺の微細構造を詳細に捉えながら大規模構

造の時間発展を記述することに成功している。このコードを用いて大規模な2次元シミュレーションを実施した結果、電子磁気拡散領域が下流方向に伸張し、電子慣性効果だけでは高速磁気リコネクションが長時間維持されないことが明らかになった。しかし、薄く伸びた電流層は電流密度方向（第3次元方向）には安定ではなく、低域混成ドリフト不安定性やキンク不安定性、2流体不安定性に対して不安定である。そのため、現実の3次元空間では電子慣性効果による電気抵抗だけではなく波動粒子相互作用による異常電気抵抗が発生し、高いリコネクション効率が維持されている可能性が高い。実際、反並行磁場に対して垂直な面内で行った2次元粒子シミュレーション (*Shinohara et al.* [Phys. Rev. Lett., Vol.87, 095001, 2001]) では、キンク不安定性に伴って電気抵抗が発生することがわかっている。しかしながら、計算機資源の制約から、テアリング不安定性とキンク不安定性を同時に記述できるような大きな計算領域で3次元シミュレーションを実施することは非常に困難であるため、キンク不安定性が磁気リコネクションに与える影響は明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究の目的は以下の2つに要約される。

- (1) 既存の3次元 AMR-PIC コードを超並列化し大規模な3次元電磁粒子シミュレーションを実現する。
- (2) (1)において完成した超並列 AMR-PIC コードを用いて無衝突磁気リコネクションの大規模な3次元シミュレーションを実施し、キンク不安定性が磁気拡散過程に与える効果を解明する。

## 3. 研究の方法

大規模な3次元粒子シミュレーションを実現するため、PIC法を用いた従来の電磁粒子コードをそのまま使うのではなくこれにAMRを適用した独自のコード (AMR-PIC コード) を使う。AMR法とはあらかじめ与えられた分割指標に従って、計算格子の大きさを計算とともに動的に変化させる手法である。例えば、図1は電流層の時間発展を計算した場合のある時間における計算格子の空間分布を示している。このとき、細分化格子は図の中心付近に形成された磁気中性線近傍に選択的に与えられており、効率よく高解像度計算が実現されていることがわかる。

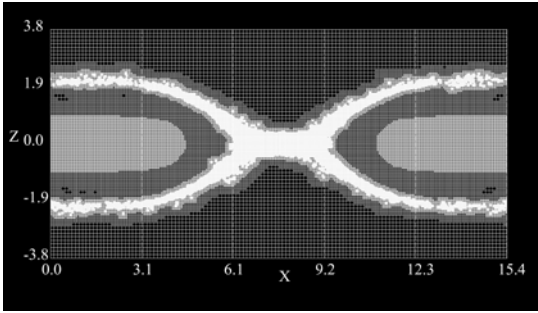
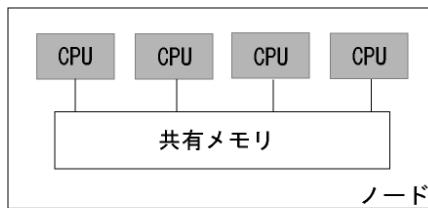
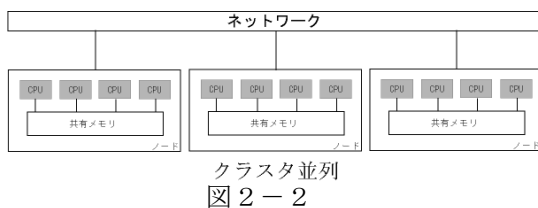


図1：電流層の時間発展に伴う計算格子の空間分布。図の中心付近に磁気中性線が形成されている。

これまでの3次元AMR-PICコードはOpenMPによるスレッド並列計算(図2-1)にのみ対応していたため、使用できるCPU数やメモリ容量に大きな制約があった。本研究ではより多くのCPU・計算メモリを確保するためにMPI(Message-Passing Interface)によるクラスタ並列化(図2-2)を行い、大規模な3次元計算を可能にする粒子コードを開発する。分散メモリシステムにおいてプラズマ粒子シミュレーションの並列化効率を上げるためには、プロセス間の通信回数及び通信量を極力小さくし、かつ、プロセス間の負荷バランスを維持しながら計算を進める必要がある。



スレッド並列  
図2-1



クラスタ並列  
図2-2

次に、開発したコードを用いて大規模な3次元電磁粒子シミュレーションを実施し、準定常的な無衝突磁気リコネクション過程において磁気拡散がどのように維持されているのかを明らかにする。具体的には、高速磁気リコネクションにともなって磁気中性線近傍に形成される薄い電流層において励起される不安定波動を調べ、それが磁気拡散機構に果たす役割を明らかにする。イオンと電子のスケールを十分分離できるようにイオンと電子の質量比は100で実施する。シミュレーションはハリストイブの電流層から開始する。計算領域のサイズは $80\lambda_i$ (磁場方向)  $\times$   $10\lambda_i$ (電流方向)  $\times$   $80\lambda_i$ (ここで $\lambda_i$

はイオンの慣性長)程度にとる。

#### 4. 研究成果

図3に本研究で開発した超並列AMR-PICコードの並列計算性能を示す。性能評価は、磁気リコネクションのテスト計算を用いて実施された。これまでのAMR-PICコードでは電荷保存則を保持するためにポアソン方程式を解いていた。しかし、ポアソン方程式を解くためには大域的な演算をおこなう必要があり、並列計算にもなると非常に多くの通信が発生する。そのため、図3(一点破線)からもわかるように、多並列時において並列化効率が極めて悪くなるという欠点がある。そこで、本研究では、電荷保存法 *Villaseñor and Buneman* [Comput. Phys. Commun., Vol. 69, 306, 1992]) とスムージング法を組み合わせることによって、ポアソン方程式を用いないAMR-PICコードの開発に成功した。これにより、多並列時における並列化効率が大幅に改善した(図3の実線)。さらに、磁気リコネクションの粒子シミュレーションでは、現象の時間発展とともに粒子の空間分布が大きく変わるため、プロセス間の負荷バランスを維持することが困難であった。本研究では、各プロセス(CPU)の分担領域(ブロック)を現象の時間発展とともに動的に変化させ、ブロック当たりの粒子数がおおむね均等になるように調節することによって負荷バランスを維持する手法(適合ブロック法)を考案した。適合ブロック法を用いることで、並列化効率をさらに改善させることに成功し、128コア並列において並列化効率80%を達成した。仮にアムダールの法則が成り立つとすると、これは並列化率99.8%に相当する。

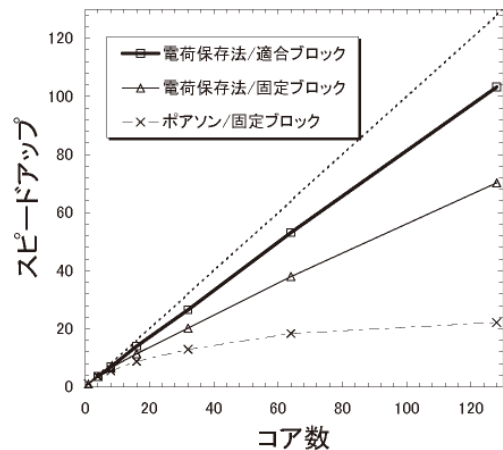


図3：分散メモリ型計算機におけるAMR-PICコードの並列計算性能。

本コードの完成によってより大規模な電磁粒子シミュレーションが可能になった。現在、国内外のスーパーコンピュータシステムは分散メモリ型が主流であり、次世代計算機『京』に代表されるように、今後もこの流れは続くと考えられる。したがって、本コードの重要性は、今後、ますます大きくなるのが期待される。計算機性能という観点から言えば、国内の計算機は米国のものに比

べてはるかに劣っている。そのため、AMR 法を適用した本コードの開発は、日本の国際競争力を高めるといっても大きな意義があると考えている。

次に、完成した超並列 AMR-PIC コードを用いて、磁気リコネクションの大規模な 3 次元電磁粒子シミュレーションを実施した。図 4 にシミュレーション結果を示す。上段は  $yz$  平面（主磁場に垂直な面）における波数スペクトルであり、磁気リコネクションの 3 次元性を示すものである。まず、シミュレーション初期に比較的短波長の波動が現れる。これは低域混成ドリフト波 (LHDI) である。LHDI はプラズマシートの密度勾配にともなう反磁性電流を自由エネルギーとして励起する電流駆動型不安定性である。LHDI は電流層の脇（密度勾配が大きいところ）に励起するため、磁気中性線近傍のプラズマにはほとんど影響を与えない。さらに、高速磁気リコネクションの発動にともなう密度勾配が解消されるため、LHDI は急速に安定化される。これに対して、高速磁気リコネクション時に薄い電流層に励起されるのは、 $m_y=2$  程度の長波長モードである。このモードは電流層をキンクさせる電磁波であり、 $k_y L_e \sim 1$  ( $L_e$  は電流層の幅) のようなスケールを持つと考えられる。図 4 から、このモードが電流層に潜在的に存在しており、特に伸長した電流層が分裂したとき（図 5）に強化されることがわかる。興味深い点は、波長が電子のメアンダリングスケールと同程度であるということである。このため、この電磁波動は電流の主な担い手である電子を散乱させ電気抵抗を発生させることができる。

これまででも、磁気リコネクションの初期段階や低質量比の場合にキンクモードが励起することは知られていた [Karimabadi *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, 1401, 2003; Fujimoto, *Physics of Plasmas*, Vol. 16, 042103, 2009] が、比較的大きな質量比の場合でも準定常リコネクション過程においてキンクモードが励起することを示したのは本研究がはじめてである。そして、このモードは電気抵抗を与えるため磁気リコネクション過程において重要な役割を担っている可能性がある。さらに、波動の周波数が低域混成周波数帯であるため、地球磁気圏における観測事実（例えば、Zhou *et al.* [Journal of Geophysical Research, Vol. 114, A02216, 2009]）とも整合的である。

今後、線形解析によって電磁波動の特性が明らかになり、さらに、それがどの程度磁気拡散過程に寄与しているのかが解明されれば、大規模な磁気リコネクション過程における磁気拡散機構のモデル化が可能になり、包括的な磁気リコネクションモデルの構築に向けて大きく前進することが期待される。

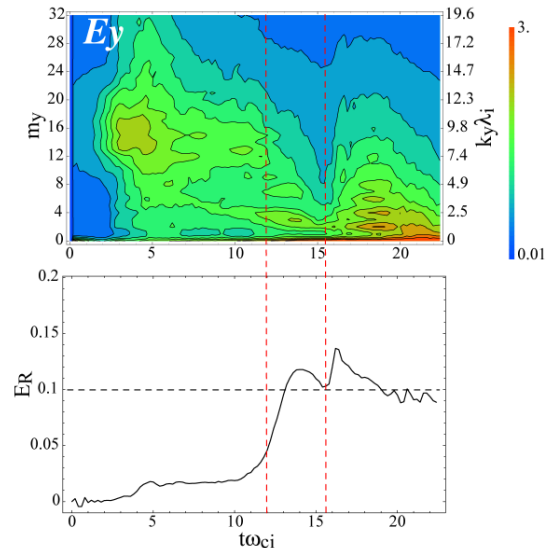


図 4：磁気中性線近傍を横切る  $yz$  平面（主磁場に垂直な面）における電場  $E_y$  の波数スペクトル（上段）とリコネクション電場（下段）の時間変化。

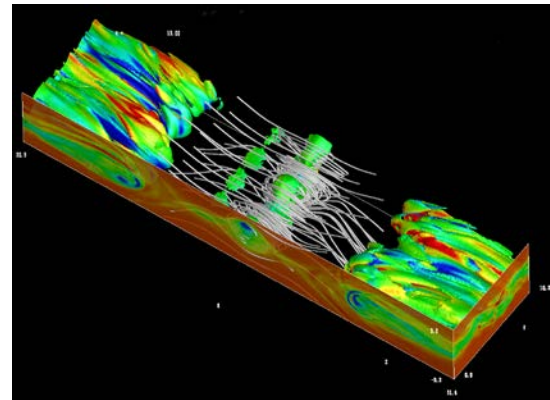


図 5：電流層の 3 次元構造。電流密度  $j_y$ （2 次元断面）、電流強度（等値面）、および、磁力線が描かれている。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- ① K. Fujimoto, Dissipation mechanism in 3D collisionless magnetic reconnection, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, in press, 2011.
- ② K. Fujimoto and R. Sydora, Particle description of the electron diffusion region in collisionless magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol. 16, pp. 112309-1 - 112309-5, 2009.
- ③ K. Fujimoto, Fast magnetic reconnection in a kinked current sheet, *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol. 16, pp. 042103-1 - 042103-11, 2009.

- ④ K. Fujimoto, Fast magnetic reconnection associated with kink modes, *Journal of Plasma Fusion Research Series*, 査読有, Vol. 8, pp. 212-216, 2009.

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① K. Fujimoto, Dissipation mechanism in 3D magnetic reconnection, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, 2010 年 11 月 1 日, 奈良県奈良市.
- ② 藤本桂三, Massively parallel computing of electromagnetic particle-in-cell model using adaptive mesh and adaptive block: Part I, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010 年 10 月 31 日, 沖縄県那覇市.
- ③ K. Fujimoto, Dissipation mechanism in 3D collisionless magnetic reconnection, International Congress on Plasma Physics 2010, 2010 年 8 月 12 日, チリ国サンチアゴ市.
- ④ 藤本桂三, Particle description of the dissipation processes in collisionless magnetic reconnection, 第 126 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009 年 9 月 30 日, 石川県金沢市.
- ⑤ 藤本桂三, キンクした電流層における高速磁気リコネクション, 地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 20 日, 千葉県千葉市.

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 桂三 (FUJIMOTO KEIZO)

独立行政法人理化学研究所・茨崎計算宇宙物理研究室・基礎科学特別研究員  
90553800

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者