

課題番号 11-NA08

宇宙物理学を対象とする GPGPU 磁気流体シミュレーションのさらなる開拓と普及

村主崇行（京都大学）

概要 GPGPU 磁気流体計算によって実現したい課題候補のうち、原始惑星系円盤での放電現象のシミュレーションにまず取り組み、「初期状態から散逸が入っていれば MRI は起こらないが、MRI を起こしたあとで同じ強さの散逸を入れても、電離率が自己維持されるため、MRI が消滅しない」という、放電現象によって MRI が維持される領域が存在することを発見した。この現象がおこるための、エネルギー収支から決まる条件もつきとめた。原始惑星系円盤のグローバルモデルにもとづく電離率や破壊電場強度の分布をもとに、この条件をあてはめ MRI が自己維持される領域を探したところ、それはおもに円盤の上空（一声、円盤の典型的な厚みの 3 倍以上）に限られることもわかった。しかし、本年度の主眼であった、TSUBAME2.0 の規模を生かした大解像度の磁気流体シミュレーションについては成功せずに終わった。

1. 研究の目的と意義

本研究の目的は、宇宙物理学を対象とする GPGPU 磁気流体シミュレーションの開拓と普及のふたつである。すなわち、1 つには平成 22 年度から、本学際大規模 公募型共同研究の枠組みで開発を進めている、GPGPU クラスタ型コンピューター向けの 3 次元磁気流体コードの開発を続行し、さまざまな物理的効果を取り入れ、また最適化を進める。そのことで、磁気流体力学が中心となるより多様な問題を解いていくのが 2 つ目の目標である。このために宇宙物理学の共同研究者と協力し、以下のグランドチャレンジ的課題候補のなかから、状況に応じ問題を選び挑戦していく。

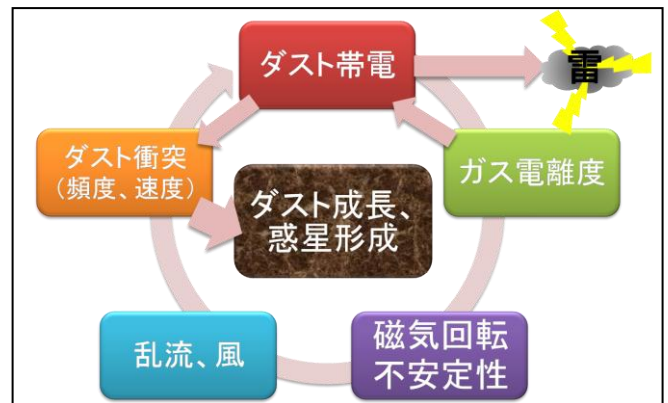
【1】 原始惑星系円盤における磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability, MRI) の、全円盤を表現したグローバルシミュレーション。

【2】 原始惑星系円盤において期待される円盤風や放電現象の高解像度シミュレーション。

【3】 原始惑星系円盤における、磁気流体と惑星の相互作用のシミュレーション。

【4】 超新星爆発などにトリガーされる、星間ガスの磁気流体乱流の数値シミュレーション。

磁気流体力学は電離気体、プラズマの挙動を記



述する基本方程式のひとつであり、宇宙物理学にくわえて太陽、地球磁気圏、核融合炉の研究などにも使われている。GPGPU を使うことで、いままでにない高解像度・高速の時期流体力学シミュレーションが可能になれば、これらの学問をも活性化し、太陽フレアの予測、人工衛星の設計などを通じて人類の生活にも直接の利益をもたらさう。

宇宙のさまざまな天体の活動において、磁場は中心的な役割を果たしており、そのような天体現象の解明に磁気流体シミュレーションは重要な役割を果たす。

たとえば、この研究で扱う原始惑星系円盤とは、宇宙で生まれたばかりの恒星の周りに形成される、おもに水素分子ガスと氷や岩石の固体微粒子からなる円盤状の天体である。原始惑星系円盤の中ではさまざまな電磁気的プロセスがはたらいっていることが最近分かってきている（上図）。磁気回転不

安定性 (MRI) はその中核をなす物理素過程であり、さまざまな回転する天体ではたらく、初期の非常に弱い磁場、天体の活動に主要な影響を及ぼすまで成長させる役割をはたす。MRI の存在や線形成長段階はよく理解されている。しかし、肝心の、MRI の非線形段階、十分成長しきった段階の性質については、その天体の全体を考慮にいたしたシミュレーションを行わないかぎり理解できない。この MRI のグローバルシミュレーション (課題【1】) は膨大な解像度と演算能力が必要なため、いままで手をつけられていないグランドチャレンジの 1 つである。原始惑星系円盤中で MRI に起因して生じる円盤風や放電現象は、原始惑星系円盤の観測から内部状態を読みだすうえで重要である (課題【2】)。また、原始惑星系円盤の進化は、その中での惑星形成と深くかかわっている (課題【3】)。くわえて、星・惑星形成の初期条件を決める星間乱流においても、磁場は重要な役割を果たしている (課題【4】)。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

当研究は、おもに東京工業大学の超大規模 GPU 並列計算機 TSUBAME2.0 および京都大学白眉センターの小規模 GPU クラスタ計算機を利用して行った。また、当研究に参加した研究者の所属する大学は、京都大学 (村主崇行)、長崎大学 (濱田剛)、名古屋大学 (犬塚修一郎・鈴木建・奥住聡)、青山学院大学 (井上剛志) および武藤恭之 (東京工業大学) であった。

(2) 共同研究分野

当研究の分野は超大規模数値計算系応用分野であり、宇宙物理学の専門家と計算機科学の専門家が共同して研究を行った。

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

東京工業大学のスパコン、TSUBAME 2.0 は、国内で利用可能な GPGPU スパコンとしては比類ない規模の申し分ない環境であり、大規模 GPU 磁気流体コードの開発・運用にはうってつけの環境であった。また、昨年度とくらべ、多数の宇宙物理学の専門家を共同研究メンバーに迎え入れたため、アイデアを出し合って宇宙物理学的課題を柔軟に切り替えてゆけたことも良かった。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

当年度では、後述するコードの開発状況などをふまえて研究をすすめた結果、まず前述の 4 課題のうち課題【2】の研究を進めてきた。

磁気回転不安定性 (MRI) [1] は、さまざまな種類の降着円盤において角運動量輸送の要因とみなされているが、とくに原始惑星系円盤においては、非常に弱電離であるため、磁気散逸の効果が無視できない。磁気散逸係数が大きくなれば、MRI が不活性な領域、dead zone が生じると考えられている [2]。この dead zone がいつ、どこにあるのかは原始惑星系円盤の進化史を解き明かすうえで重要である。

ここで、MRI が飽和したまま磁気散逸係数を上げていくと、飽和状態での電流は一定なので電場が上がっていく。そこで電場がある一定値を超えれば静電破壊が起こるため、プラズマの電離率が上がる。この静電破壊現象により、従来 dead zone とみなされてきた領域でも MRI が電離率を自己維持し、乱流領域が拡大するのではないかという指摘があった [3]。このような静電破壊現象は、以下のような非線形オーム則をつかえば簡潔にモデル化できる。

$$\mathbf{E} = \frac{4\pi}{c^2} \eta(J) \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \eta(J) &= \eta_0 \quad \text{if } J < J_{\text{crit}}, \\ &= \frac{J_{\text{crit}}}{J} \eta_0 \quad \text{if } J > J_{\text{crit}}. \end{aligned} \quad (2)$$

我々は、このような静電破壊現象をモデル化した非線形オーム則をとりいれた、以下のような磁気流体方程式をモデル化し、三次元、局所円盤のシミュレーションを行った。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla \left(P + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho} (\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B}) - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} + 3\Omega^2 x \hat{\mathbf{x}}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E}, \quad (5)$$

ここで、圧力にかんしては次のように等温の状態方程式からさだめ、

$$P = c_s^2 \rho, \quad (6)$$

また電場、電流場については非線形オーム則をふまえ、MHD 近似にもとづいて、次のように与える。

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{4\pi}{c^2} \eta (J) \mathbf{J}, \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}, \quad (8)$$

シミュレーションの結果、「初期状態から散逸が入っていれば MRI は起こらないが、まず磁気散逸係数が 0 の状態で MRI を起こしたあとで同じ強さの散逸を入れても、電離率が自己維持されるため、MRI が消滅しない」というパラメータ領域が実際にあることを示した。

さらに、初期磁場の強さ (plasma β)、磁気拡散係数 (η) および静電破壊電流 (J_{crit}) を様々に変えてパラメータサーベイを行い、そのような「MRI の自己維持」がおこる領域をさぐりだした (図 1)。これらのパラメータを振ると、MRI active 領域、MRI dead 領域、MRI sustained 領域に分類できる挙動が観測された。それぞれ、MRI active 領域 (○) は MRI が層流状態から発生できまた定常的に存在する領域 (図 2 a)、MRI sustained 領域 (△) は、MRI は層流状態から自発的には発生しないものの、いったん導入されれば自己維持できる領域 (図 2 b)、MRI dead 領域 (×) は MRI が存在できず、初期条件として与えても消滅してしまう領

域 (図 2 c) である。また MRI アクティブ領域の中でも、(図 2 d) のように、電流が定常状態とはほどおおく、数周期単位で大きな脈動を繰り返す状態があることもわかった。このとき電流の三次元分布を可視化してみると、(図 3) のように多数の放電領域が帯状に形成されていることがわかった。

以上の実験によりもとまった MRI active 領域、MRI sustained 領域、MRI dead 領域のための条件をもとに、このような静電破壊現象によって MRI が維持されるための、エネルギー収支から決まる条件もつきとめた。原始惑星系円盤のグローバルモデルにもとづく電離率や破壊電場強度の分布をもとに、この条件をあてはめ MRI が自己維持される領域を探したところ、それはおもに円盤の上空 (一声、円盤の典型的な厚みの 3 倍以上) に限られることもわかった (図 4)。

- [1] Balbus & Hawley (1991), "A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution," *Astrophysical Journal*, vol. 376, p. 214
 [2] Gammie (1996), "Layered Accretion in T Tauri Disks," *Astrophysical Journal*, vol. 457, p. 355
 [3] Inutsuka & Sano (2005), "Self-sustained Ionization and Vanishing Dead Zones in Protoplanetary Disks," *Astrophysical Journal*, vol. 628, p. L155

(2) 当初計画の達成状況について

確かに本年度は、【2】の原始惑星系円盤における放電現象のシミュレーションについては、小解像度・パラメータ探索型シミュレーションを実行し、一定の物理的成果を得て、論文にまとめた。また【4】の星間流体乱流シミュレーションについては、昨年度を上回る解像度のシミュレーションを実現し、現在解析を進めている。しかし、本年度の主眼であった、TSUBAME2.0 の規模を生かした大解像度の磁気流体シミュレーションについてはついに成功しなかった。目標としたグランドチャレンジ現象に対する私の物理的理解は浅すぎ、それを順次埋めるべき沢山のテスト計算を行うには私は怠惰すぎ、そしてコードの自主開発にこだわったことが失敗の原因である。ともすれば新しいもの、原理はよく分からないが動くものに

興味をひかれがちな私の性格は、確かに私をプログラミング一般や学部教養から始め、やがて宇宙物理学、関数型プログラミングや GPGPU といった幅広い学問の入り口まで導いてくれたものの、それぞれを深く理解しようとはしてこなかった。確かに、これまでに蓄積された膨大な学問の歴史を前にし、さらに異分野を橋渡しするような研究をするには、ライブラリを信じ、教科書を速読するような能力も役立つかもしれない。だが、そのような対処だけでは、手許にあるコード---磁気流体のテスト問題は解くことができてもグローバル円盤という複雑な物理を扱うことができない---に対し有効な解決策を取ることができなかった。本研究のようなグランドチャレンジを率いるには、私にはまだ研究者の資質として足りないものがあった。失敗の責任は唯一のプログラミング担当者であった私にあり共同研究者たちにはない。

今後の展望

そこでまず、粒子法にてマルチ GPU・磁気流体計算を実現している Gavurov[4]らのグループらと連携して彼らのコードを原始惑星系円盤用に改造したり、高品質で多機能なオープンソース磁気流体コードを開発している Stone[5][6]らのグループと連携して彼らのコードの GPU 化計画に初期段階から参与したりするなど、コード開発者としてのゼロ---すなわち先行者の優れたコードを読むところから鍛錬を始めることにした。

また一方で私は本年度、別途の研究で、テンソル記法を含む記号計算、マルチスレッドおよびGPU向けのコード生成、および生成したコードの遺伝的アルゴリズムによる自動チューニングの機能を兼ね備えた、偏微分方程式ソルバ向けのドメイン特化言語 Paraiso[7]を開発した。これにより、簡潔な数学的記述から並列化済みコードが生成できるため、様々な物理・素過程に対応する偏微分方程式、およびその離散化法を漸次、あるいは網羅的にテストし、学習していくことができる。

もちろん、そのようなことを実現するにはいま

の Paraiso は未熟すぎる。プログラマは怠惰でいつづけるために、そして仲間に怠惰な思いをさせるために、怠惰を経営する必要がある。私は日々の時間の使い方を記録するようにし、また、ともすれば散逸しがちなノートを管理するために電子ノートを導入した。

この失敗を建設的なものにするためにこれを報告し公開する。私が再び信頼されることがないように---少なくとも、公開され十分にテストされたコードなくしては。

[4] Gavurov & Nitadori (2011), "Astrophysical weighted particle magnetohydrodynamics," vol. 414, Issue 1, p.129
 [5] Gardiner & Stone (2005), "An unsplit Godunov method for ideal MHD via constrained transport," Journal of Computational Physics, vol.205 p.509
 [6] - (2008), "An unsplit Godunov method for ideal MHD via constrained transport in three dimensions," Journal of Computational Physics, vol.227 p.4123.
 [7]Muranushi (2012) "Paraiso : An Automated Tuning Framework for Explicit Solvers of Partial Differential Equations," accepted to Computational Science and Discovery.

4. 研究成果リスト

- (1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)
 - ・ Muranushi, Okuzumi and Inutsuka 2012, Astrophysical Journal に投稿中
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
 - ・ Takayuki Muranushi, "Lightning in Protostellar Disks," Formation of Stars & Planets 2011
- (4) 国内会議発表
 - ・ 村主 崇行 (2011), "原始惑星系円盤の磁気回転不安定性に弱電離プラズマ放電が及ぼす影響," 日本天文学会 2012 年秋季年会
 - ・ 村主 崇行 (2011), "GPU クラスタとプログラム自動生成による磁気流体シミュレーション", Plasma Conference 2011
 - ・ 村主崇行、「プログラミングという作業の革新」、理論天文学宇宙物理学理論懇親会
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

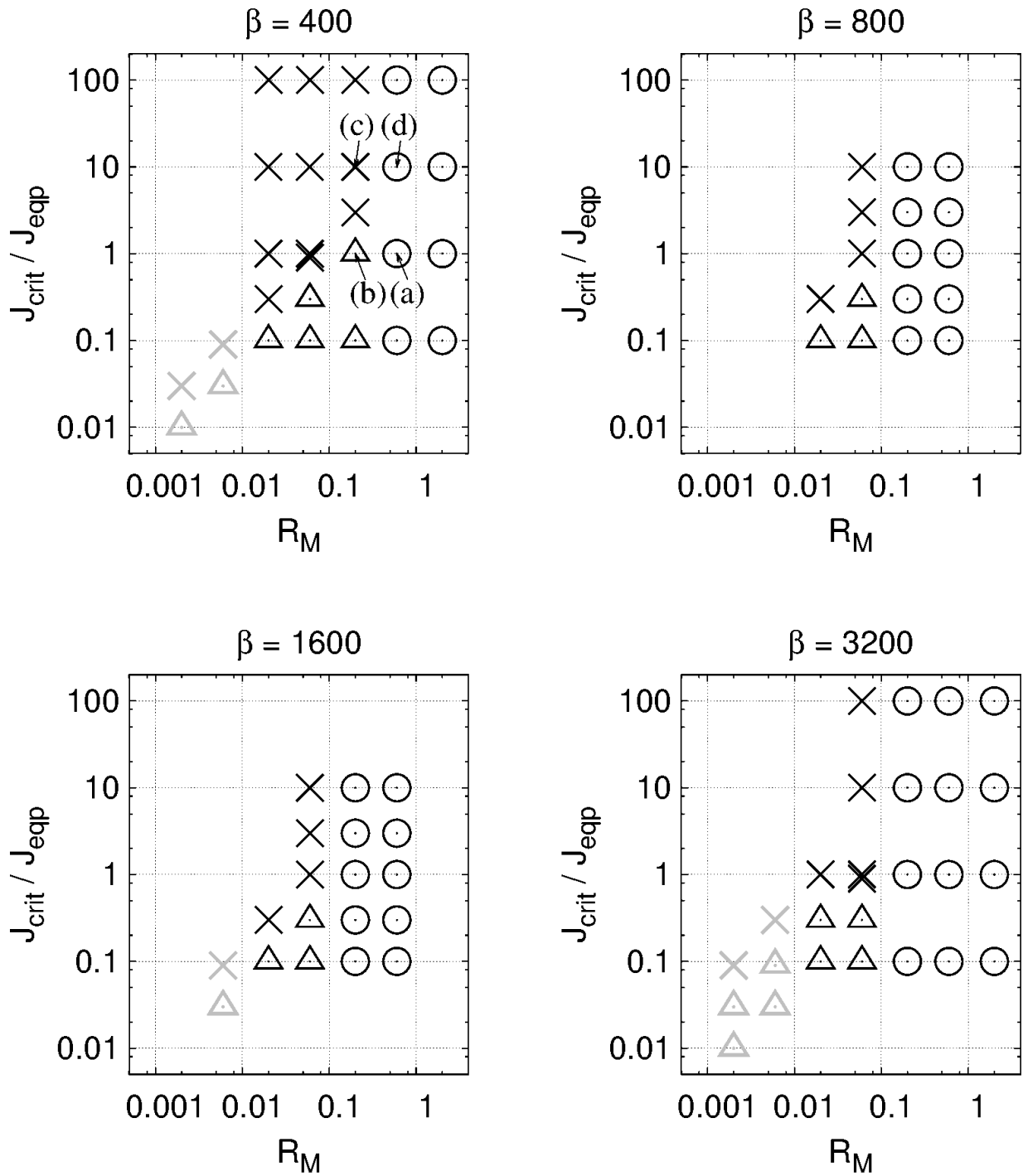


図 1 : 初期磁場の強さ(plasma β)、磁気拡散係数 (η) および静電破壊電流 (J_{crit}) をかえて、非線形磁気散逸法則入りの局所円盤磁気流体シミュレーションをおこない、その結果をもとにプラズマの挙動を MRI active 領域、MRI dead 領域、MRI sustained 領域に分類したもの。中間報告時点にくらべて調査点の数が増え、ここには示さないか論文(1)では $\beta=25600$ までの領域について調査している。

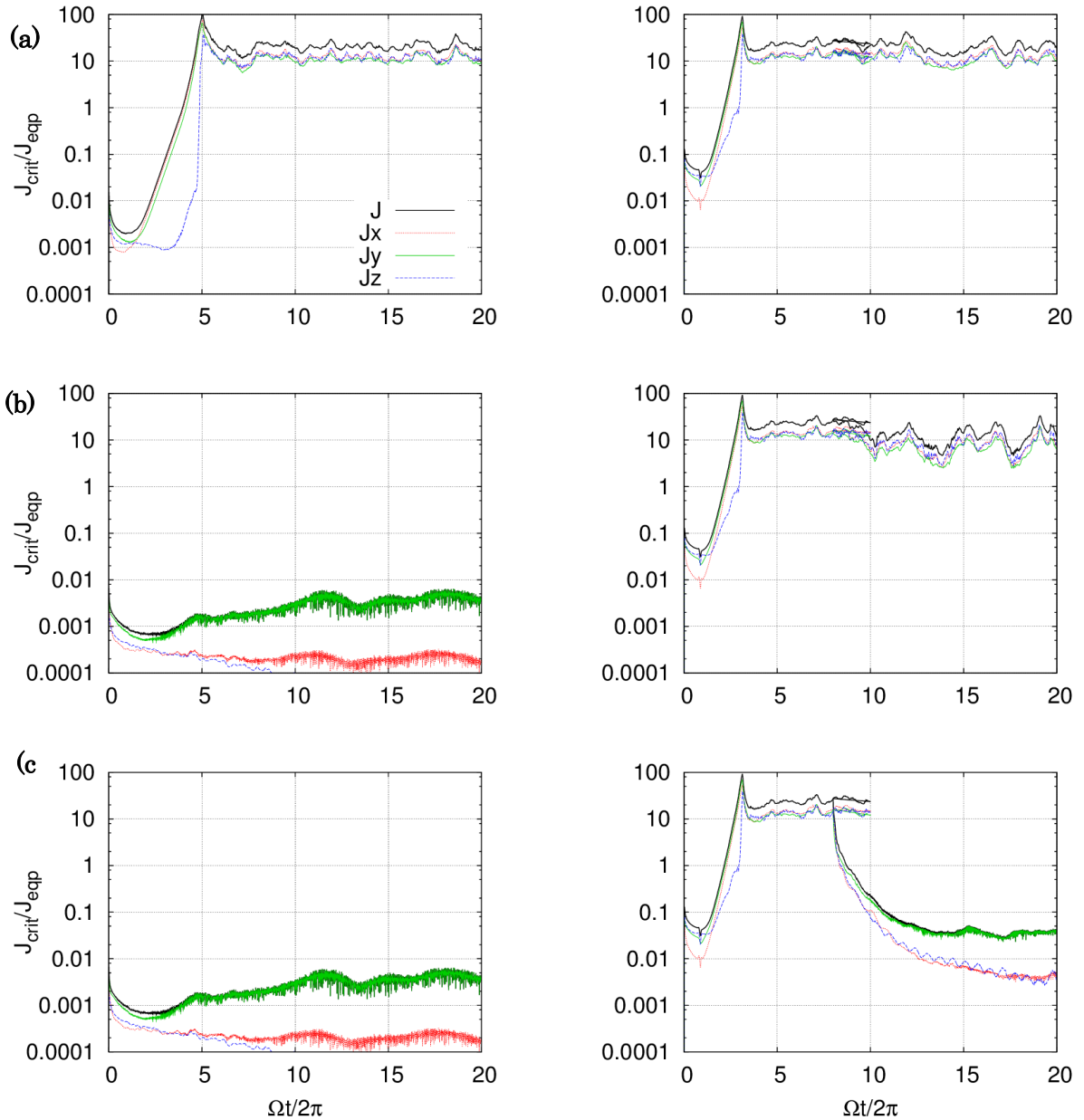
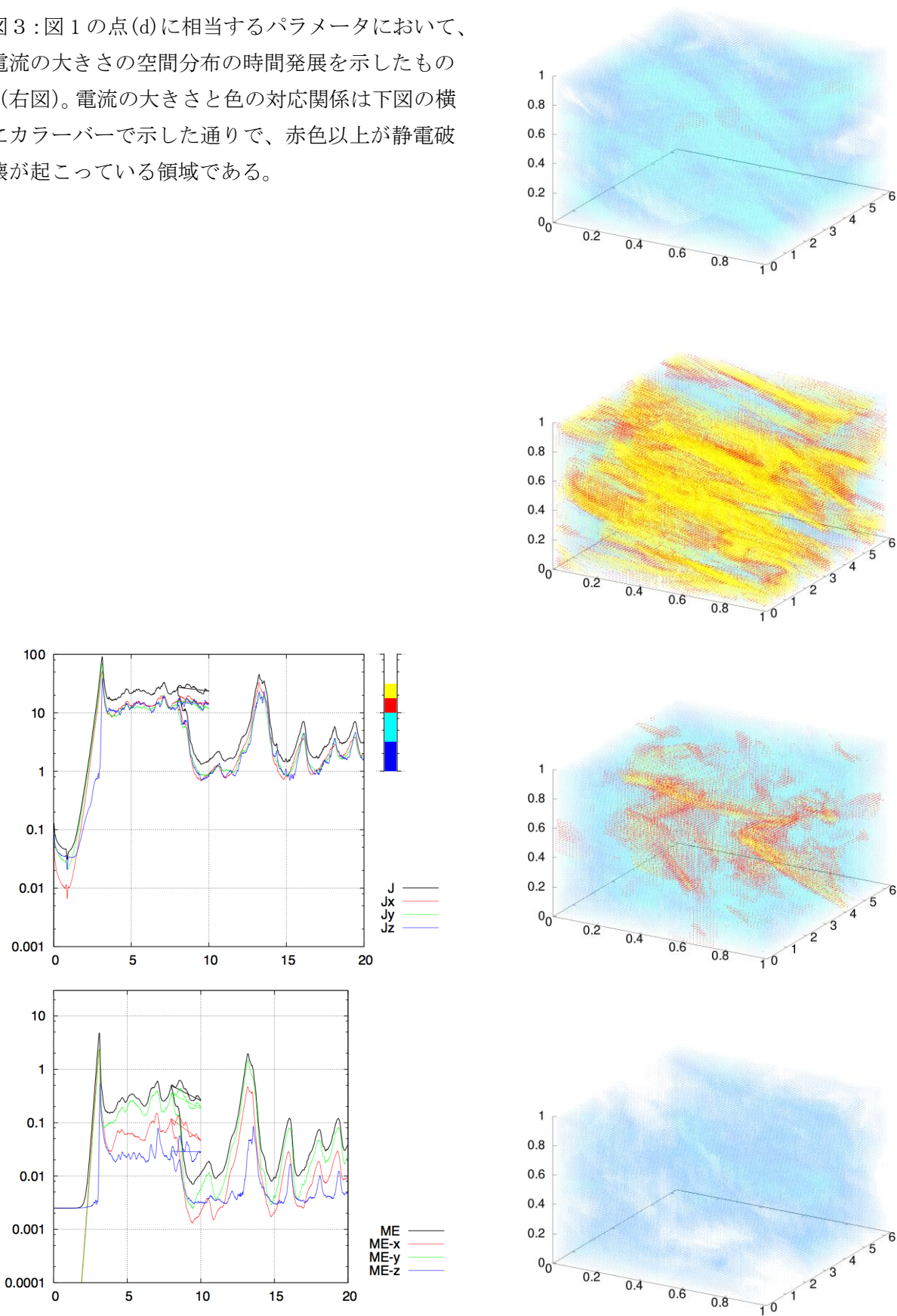


図 2 : (a)MRI active 領域、(b)MRI sustained 領域、(c)MRI dead 領域の特徴的な振る舞いとして、電流の大きさを空間平均したものの時間発展をプロットしたもの。左側は層流の初期条件からスタートしたもの、右側はいったん抵抗なしモデルで MRI を立ち上げたあと、時間を戻して抵抗を入れたもの。(b)では、最終的にまったくおなじ抵抗モデルであっても、初期条件に MRI があれば MRI が存続し、なければ MRI は消えたままという MRI の自己維持現象がみられる。(A: $\beta=400$, $R_M=1.0$, $J_{crit}=1.0$; B: $\beta=400$, $R_M=0.1$, $J_{crit}=10$; C: $\beta=400$, $R_M=0.1$, $J_{crit}=1.0$;))

図 3 : 図 1 の点 (d) に相当するパラメータにおいて、電流の大きさの空間分布の時間発展を示したもの (右図)。電流の大きさと色の対応関係は下図の横にカラーバーで示した通りで、赤色以上が静電破壊が起こっている領域である。



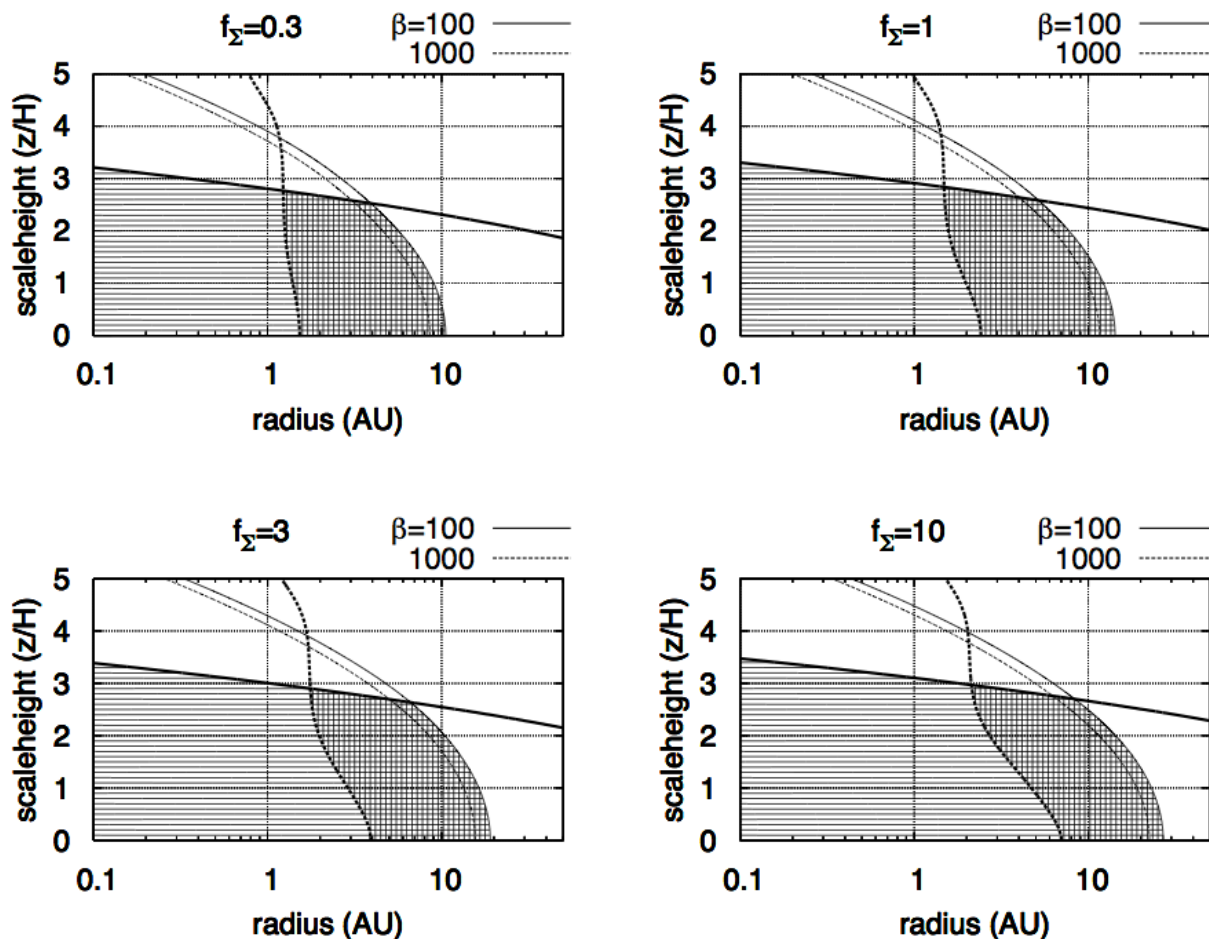


図 4：原始惑星系円盤の Minimum Mass Solar Nebula モデル[8]において、今回判明した MRI の自己維持モデルをもとに Dead Zone の分布を見積もったもの。細い実線および破線は、円盤の磁化率 β が 100 および 1000 である場合の Dead Zone 境界をあらわす曲線で、従来研究ではこの内側が Dead Zone となるとされてきた [9]。もし、MRI の飽和電流が静電破壊電流を超えれば必ず MRI が自己維持されるとすれば、Dead Zone は縦線で記した領域まで縮小する。これに対し当研究では、非線形オーム則をとりいれた MRI の三次元シミュレーションにより、MRI が自己維持するためのエネルギー収支から決まる条件をつきとめ、Dead Zone は横線で示した領域までしか縮小しないと結論づけた。

[8] Hayashi et. al. (1985), "Formation of the solar system," Protostars and Planets II, p.1100
 [9] Sano et. al. (2000), "Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks. II. Ionization State and Unstable Regions," Astrophysical Journal, v.543, p.486