

[共同研究成果]

降着円盤中での磁気乱流生成過程に関する計算機実験

齋和人、加藤雄人、寺田直樹、小野高幸
東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻

降着円盤中での磁気乱流生成過程として、磁気回転不安定性が重要な役割を果たすと考えられている。本研究は、磁気回転不安定性の成長および非線形段階で生じる乱流の性質が、初期条件として与える背景磁場の方向及び強さに対して持つ依存性を、独自に開発した3次元磁気流体コードを用いた計算機実験により定量的に明らかにした。

1. はじめに

本共同研究課題は、宇宙プラズマ中でのプラズマ波動-粒子間のエネルギー交換の素過程を担う電磁プラズマ不安定性について、微視的および巨視的不安定性を扱う計算機実験を実施して、エネルギー交換過程の定量的評価を行う事を目的に行われた。本稿では特に、巨視的不安定性として降着円盤内で生じる磁気回転不安定性を取り上げ、独自に開発した3次元磁気流体コードを用いた計算機実験により得られた成果について報告する。

1.1 降着円盤と磁気回転不安定性

降着円盤とは、原始星やブラックホールなどの天体の周りを取り巻くガスが、その天体の周りを回転運動し、重力と遠心力の釣り合いにより円盤状の構造を形成したものである。円盤ガスは中心天体へ少しずつ落下していることが観測から明らかとなっており、これを質量降着と呼ぶ。質量降着が生じるためには、円盤ガスは持っていた角運動量を失う必要があり、「円盤内が乱流状態となっており、乱流によって生じる応力が効率的に角運動量を外側に輸送している」と考えることにより説明できる。円盤内の乱流を生成するメカニズムとして重要と考えられているのが、本研究で着目する磁気回転不安定性 (Magneto-Rotational Instability、以下 MRI) である。MRIによって生じる円盤内乱流 (以下、MRI 乱流) は、質量放出や惑星形成など降着円盤で生じる現象に大きく影響を及ぼすことも指摘されており、MRI 乱流の特性の解明が必要とされている。

降着円盤の円盤ガスは、重力と遠心力とがほぼ釣り合っていると考えられるため、中心天体に近い領域では回転速度が速く、遠い領域では回転速度が遅い差動回転した状態になっていることが分かる。MRI は、磁気流体力学 (Magneto Hydro Dynamics、以下 MHD) において、差動回転する回転円筒内で生じる不安定性である。円盤ガスが完全電離した流体であるとして、差動回転する円盤ガスを磁力線が貫いている状態を考える。ここで、磁力線に擾乱が与えられると、磁力線により繋がれた流体要素は元の回転の軌道から内側もしくは外側へ変位することになる。この時、角運動量の保存から、内側へ移動したものは回転速度が速く、外側へ移動したものは回転速度が遅くなる。この速度差によって磁力線は引き延ばされるが、磁力線の張力により、流体要素には速度差を小さくする方向に力が働く。その結果、流体要素に働く重力と遠心力との釣り合いが崩れ、内側へ移動した流体要素はさらに内側へ、外側へ移動した流体要素はさらに外側へと移動し、始めは小さな揺らぎだったものが大きな変動へと成長していく。以上の一連の過程が、MRI の線形成長過程で生じており、変動が成長し非線形段階に至ることで、MRI 乱流が生成されると考えられる。MRI の詳細については参考文献[1][2]等も参照されたい。

1.2 本研究の目的

MRI 乱流の特性を定量的に理解する上で、計算機実験が大きな役割を果たしている。本研究では独自に開発した3次元のMHDコードを用いて計算機実験を実施し、円盤ガスを貫く磁力線の方向及び強さがMRI乱流に及ぼす影響を定量的に明らかとする。MHDコードを用いた計算機実験によるMRI乱流の研究は数多く実施されているが、用いられてきた背景磁場の条件は限定的なもの

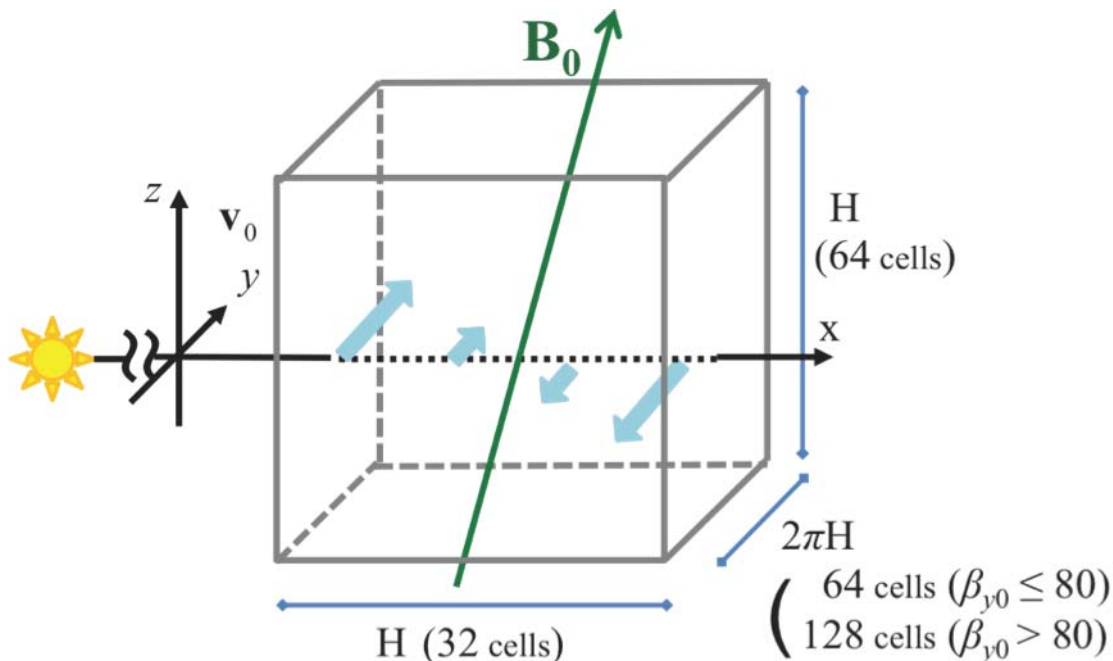


図 1. シミュレーション空間の概要

であった。降着円盤を貫く背景磁場としては、多様な状況が考えられることから、本研究により明らかにされる MRI 乱流の背景磁場依存性は、降着円盤中で生じる MRI 乱流の理解に大きく貢献することが期待される。

2. モデルの概要

本研究では空間 3 次元の抵抗性 MHD シミュレーションコードを独自に構築して用いた。コードの詳細は[1][2]に基づいており、ここでは概要を述べる。

2.1 円盤モデルとシミュレーション空間

MRI の計算機実験では、円盤モデルとして、計算領域中で密度と圧力が一様な「非層化モデル」と、中心天体の重力により円盤ガスの密度および圧力が円盤の回転軸方向に分布を持つ「層化モデル」が用いられる。本稿で示す計算機実験では、MRI 乱流の基本的性質を明らかとするために、パーカー不安定性等の別なプラズマ不安定性が生じず MRI のみの成長が議論できる「非層化モデル」を用いる。

MRI 乱流の空間スケールは降着円盤の大きさに比べて小さいため、計算機実験では円盤ガスの回転に乗った座標系を用いて、円盤の一部分だけを切り取りその内部におけるガスの運動ならびに磁場の変動を解き進める Local shearing box モデル[3]を採用する。このモデルでは、シミュレーション空間として切り取られる領域が十分小さく、曲率による影響が無視できるとして、図 1 に示すような 3 次元直交座標を用いる。中心天体から離れる方向に x 軸、円盤ガスの回転方向に y 軸、円盤ガスの回転軸方向に z 軸を取る。計算機実験の初期条件として背景磁場を y-z 面内に与え、背景磁場の z 成分（以下、鉛直成分）および y 成分（以下、方位角成分）の大きさを变化させた場合における、シミュレーション中で生じる MRI 乱流の様相の変化を調べる。

シミュレーション空間の大きさは、図 1 に示すようにスケールハイト H を基準として設定する。MRI の線形成長率が最大となるモードを精度よく解く為には、十分な空間分解能を確保してシミュレーションを実施する必要がある。そこで本研究では、計算機実験で用いる初期条件での最大成長波長を線形解析から求めて、過去の研究[3]を参考にグリッド幅が MRI の最大成長波長の 1/8 以下となるように、用いる格子点数を定める。

2.2 基礎方程式

基礎方程式として、以下に示す抵抗性 MHD 方程式系を用いる。なお円盤ガスの速度に関しては、回転に由来する成分 (\mathbf{V}_0) と変動成分 (\mathbf{v}) とに分け、 \mathbf{V}_0 は解析的に与えられることから、 \mathbf{v} の時間発展のみを解く。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \{(\mathbf{V}_0 + \mathbf{v}) \cdot \nabla\} \rho = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \{(\mathbf{V}_0 + \mathbf{v}) \cdot \nabla\} \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{1}{8\pi\rho} \nabla B^2 + \frac{1}{4\pi\rho} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - 2\Omega \mathbf{e}_z \times \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{V}_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \{(\mathbf{V}_0 + \mathbf{v}) \times \mathbf{B} - \eta(\nabla \times \mathbf{B})\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \{(\mathbf{V}_0 + \mathbf{v}) \cdot \nabla\} p = -\gamma p(\nabla \cdot \mathbf{v}) + (\gamma - 1)\eta \left(\frac{|\nabla \times \mathbf{B}|}{4\pi} \right)^2 \quad (4)$$

ここで ρ 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{B} 、 p および η はそれぞれ密度、速度、磁場、圧力および抵抗を示し、比熱比 γ は $5/3$ とする。円盤の回転に乗った系を考えているため、運動方程式(2)にコリオリ力(右辺第4項)が含まれている。以上の方程式を、Kudoh and Shibata [4]による CIP-MoCCT 法に独自の改良を加えた計算スキームである RCIP-CMoCCT 法[1]を用いて、シミュレーションコードを構築した。

2.3 初期条件

背景磁場を鉛直成分のみの場合、方位角成分のみの場合、ならびに鉛直成分と方位角成分の双方を持つ場合の3パターンを考え、それぞれのパターンで各成分の大きさを変化させて計算機実験を実施し、シミュレーション中での乱流応力の時間発展を調べた。初期条件を設定するにあたって、以下の無次元パラメータ β_{y0} および β_{z0} を導入する。

$$\beta_{y0} \equiv \frac{8\pi p_0}{B_{y0}^2} \quad (5)$$

$$\beta_{z0} \equiv \frac{8\pi p_0}{B_{z0}^2} \quad (6)$$

ここで p_0 は初期条件として与えるプラズマ圧、 B_{y0} および B_{z0} は背景磁場の方位角成分および鉛直成分である。

3. 結果と考察：MRI の背景磁場依存性

図2にシミュレーション結果の一例を示す。図2(a)は背景磁場として鉛直成分のみを与えた場合 ($\beta_{z0} = 400$) の計算結果で、シミュレーション空間中で生じた乱流応力の空間平均値 $\langle W_{xy} \rangle$ の時間発展を示している。乱流応力は円盤内乱流の強さを表す指標とされており、円盤ガスの質量降着率もこの乱流応力に比例することが知られている。ここで、

$$W_{xy} \equiv \rho v_x v_y - \frac{B_x B_y}{4\pi} \quad (7)$$

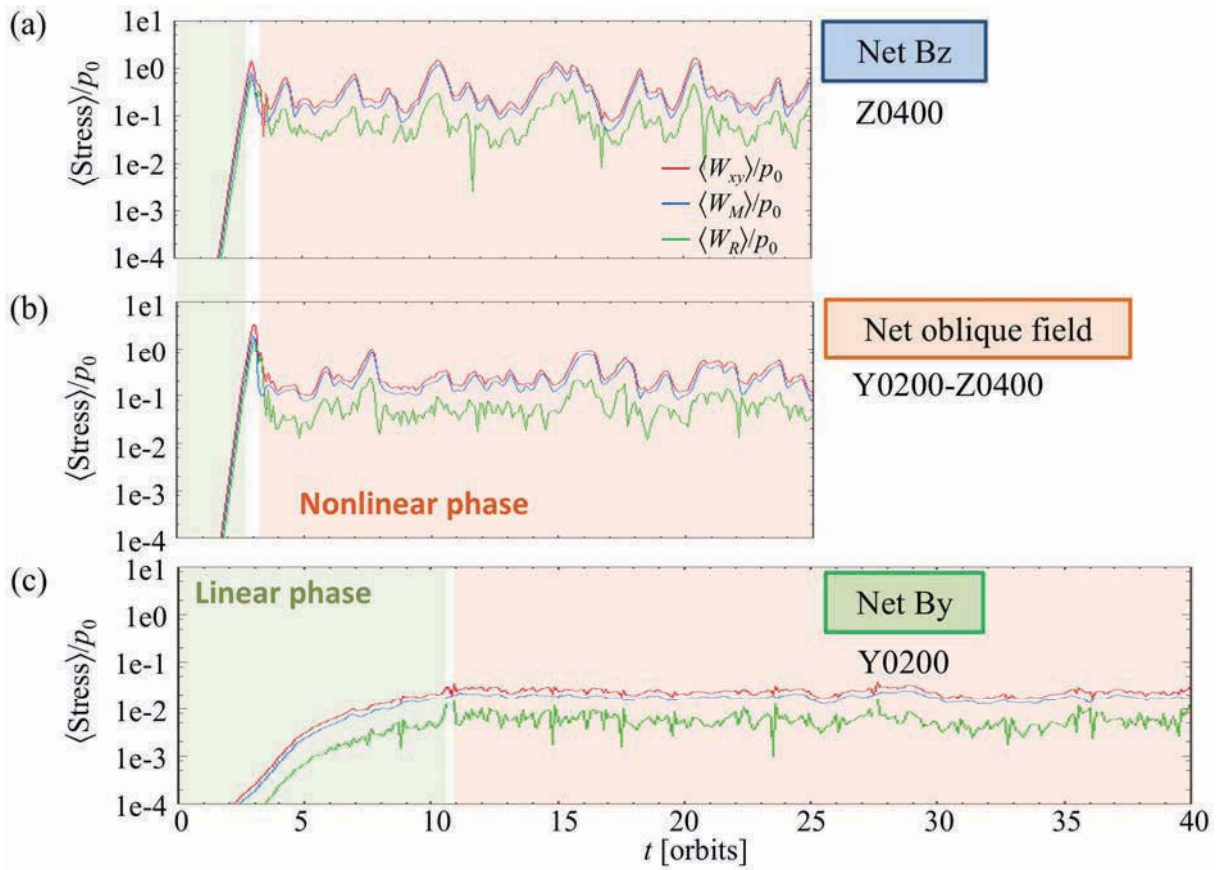


図 2. 背景磁場が(a)鉛直成分のみ、(b)両成分、(c)方位角成分のみの条件での乱流応力の時間発展 (Sai et al.[2]より)

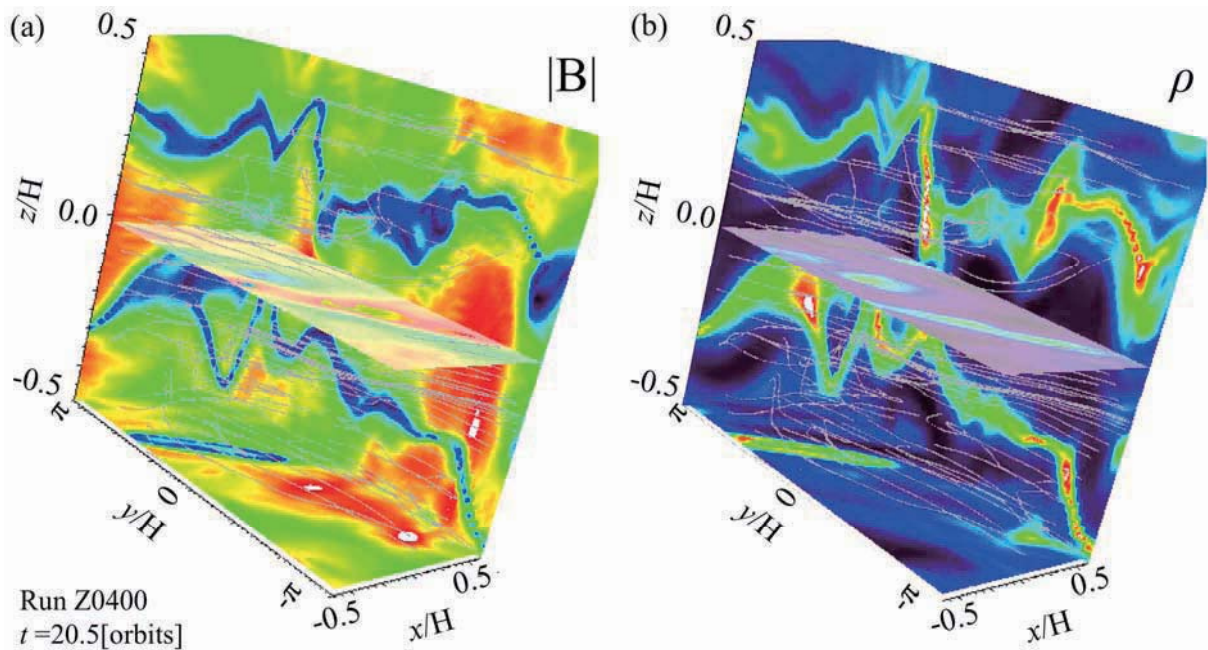


図 3. 背景磁場が鉛直成分のみの条件での計算結果の一例。非線形段階に相当する時間帯での (a)磁場強度および(b)密度の各断面での大きさをカラーコンターで示している。寒色系から暖色系になるほど値が大きいことを示す。図中の白線は磁力線を示している。

である。(6)式の右辺第一項と第二項はそれぞれレイノルズ応力 ($W_R = \rho v_x v_y$) ならびにマクスウェル応力 ($W_M = -B_x B_y / (4\pi)$) に対応し、図 2(a)には各成分の時間発展をあわせて示している。図 2(a)から、シミュレーションの初期にはMRIが線形成長し、乱流応力が大きくなっていく様相が示されており、また、マクスウェル応力が卓越していることが示されている。シミュレーション結果の解析から、この乱流応力の増加はMRIの成長率が最大となるモードの成長に起因するものであることと、その成長率は線形解析による結果と一致することが確かめられている。MRIの線形成長による乱流応力の増加は3公転周期程で飽和し、非線形段階へと遷移して、乱流応力の増加と減衰が周期的に繰り返される様相が示されている。

図 2(a)のシミュレーション結果について、非線形段階に相当する時間帯での、背景磁場強度とプラズマ密度の空間分布を、磁力線とともに図 3に示す。この結果から、非線形段階ではz軸方向に波数を持つモードが発生しており、また、磁場強度の小さい領域にプラズマ密度が集中する特徴的な構造が形成されていることが分かる。図 2(a)に示されている乱流応力の増加と減衰は、図 3に示されている構造の成長と緩和によって生じていることが明らかとされた。

次に、背景磁場に鉛直成分と方位角成分の両方を与えた場合 ($\beta_{y0} = 200$ 、 $\beta_{z0} = 400$) と、方位角成分のみを与えた場合 ($\beta_{y0} = 200$) の計算結果を図 2(b)と図 2(c)に示す。図 2(a)との比較から、図 2(b)の時間発展は図 2(a)と類似している一方、図 2(c)は乱流応力が小さく、成長率(グラフの傾き)も小さいことが分かる。

図 2 で示された MRI 乱流の背景磁場依存性をより詳細に議論するために、背景磁場の鉛直成分および方位角成分を変化させてシミュレーションを実施した。その結果のまとめを図 4 に示す。図 4(a)は鉛直成分を一定として方位角成分を変化させた場合、図 4(b)は方位角成分を一定として

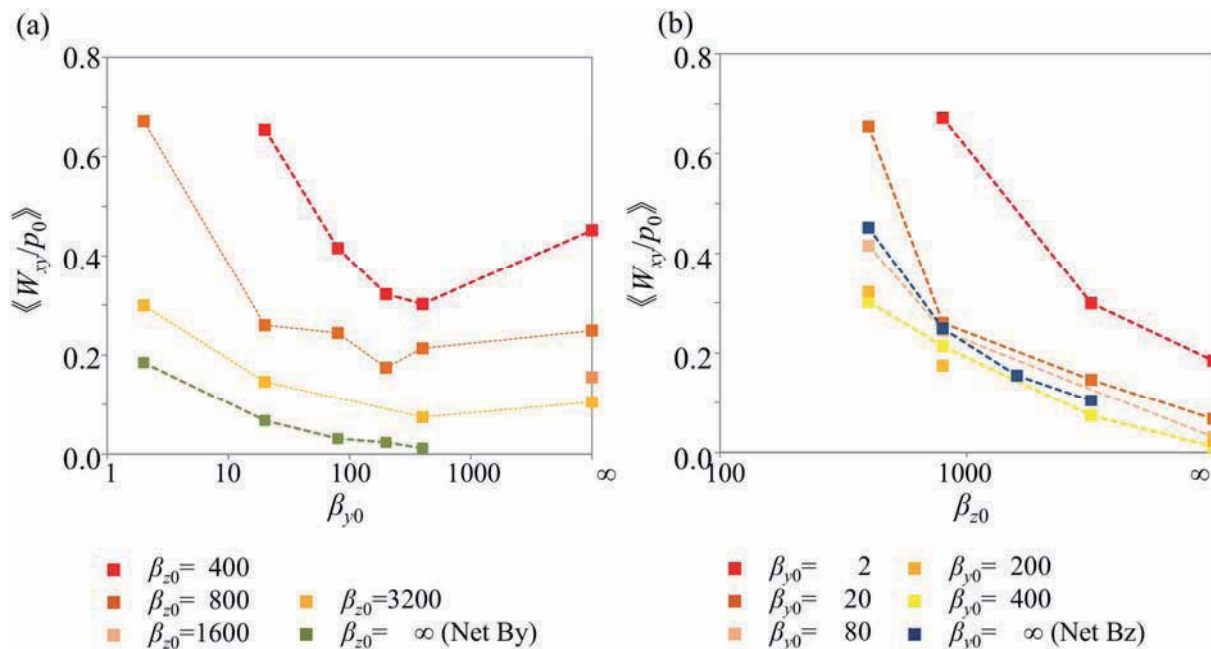


図 4. 計算機実験から得られた MRI 乱流の初期磁場依存性 (Sai et al.[2]より)。(a)背景磁場の鉛直成分を一定として方位角成分を変化させた場合、および(b)方位角成分を一定として鉛直成分を変化させた場合の、MRI 乱流の強さを示している。

鉛直成分を変化させた場合における、乱流応力の時間平均 $\langle\langle W_{xy} \rangle\rangle$ (MRI 乱流の強さ) を示している。図 4(a) から、背景磁場が鉛直成分のみの場合 ($\beta_{y,0} = \infty$) に比べて、方位角成分を与えると乱流応力は減少傾向を示すものの ($\beta_{y,0} = 400$)、方位角成分を大きく ($\beta_{y,0}$ を小さく) していくと乱流応力は増加傾向を示すことが明らかとなった。一方で図 4(b) から、方位角成分を一定としたまま、鉛直成分を大きく ($\beta_{z,0}$ を小さく) していくと、乱流応力はそれに比例して増加する傾向を示すことが明らかとなった。以上の結果から、MRI 乱流は背景磁場の鉛直成分と方位角成分との双方に依存することを、非線形過程まで含めたシミュレーションにより定量的に明らかにした。

4. まとめ

本稿では、降着円盤内の乱流を生成する物理素過程として重要と考えられている MRI について取り上げ、独自に開発した 3 次元 MHD コードを用いた計算機実験により、MRI 乱流の背景磁場依存性を議論した。計算機実験の結果から、MRI 乱流は背景磁場の鉛直成分と方位角成分の両者に依存し、単調な依存性を示さないことを定量的に明らかにした。以上の結果は、様々な背景磁場配位における MRI 乱流の特性を初めて明らかにする成果として、学術誌に出版済みである [1]。

降着円盤では背景磁場は鉛直成分を持ち、円盤の時間発展に伴ってガスの周回運動により方位角成分がより支配的になると考えられている。背景磁場配位に対する依存性を明らかにした本研究の成果は、円盤の進化に伴う磁気乱流強度の時間発展、延いては中心天体への質量降着、円盤風、円盤ガスの混合、円盤中央面へのダスト沈殿などの時間発展の理解に大きく寄与すると考える。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターとの平成 24 年度共同研究課題「惑星磁気圏における電磁プラズマ不安定についての計算機実験」による成果であり、スーパーコンピュータを利用することで実現できた課題である。本研究課題で用いたシミュレーションコードの開発にあたっては、同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただき、計算機実験を実施する上でもご支援をいただいたことで、大きな効果を得ることができた。図 3 の作図にあたっては HPCI 戦略プログラム分野 5 のユーザー支援チームに支援を受け、3 次元可視化手法に関して千葉大学理学研究科の松本洋介博士に多大なサポートをいただいた。

参考文献

- [1] Sai, K., Y. Katoh, N. Terada, and T. Ono, Effect of background magnetic field on turbulence driven by magnetorotational instability in accretion disks, *Astrophys. J.*, 767, 165, 2013.
- [2] 齋和人, 寺田直樹, 加藤雄人, 小野高幸, 降着円盤における磁気回転不安定性の数値実験, *SENAC*, 43(2), 45, 2010.
- [3] Hawley, J. F., C. F. Gammie, and S. A. Balbus, Local three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of accretion disks, *Astrophys. J.*, 440, 742, 1995.
- [4] Kudoh, T., K. Shibata, Magnetically driven jets from accretion disks. II. Nonsteady solutions and comparison with steady solutions, *Astrophys. J.*, 476, 632, 1997.