

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287151

研究課題名(和文) 無衝突系の降着円盤における磁気回転不安定と粒子加速

研究課題名(英文) Magneto-rotational Instability and Particle Acceleration in Collisionless Accretion Disk

研究代表者

星野 真弘 (Hoshino, Masahiro)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90241257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：降着円盤は宇宙において普遍的構造であり、円盤ガスが中心天体に降着することで莫大な重力エネルギーを開放することが知られている。これまでガス降着のメカニズムとして、「磁気回転不安定(MRI)」と呼ばれる電磁流体波動を介した降着メカニズムが重要であることが知られていた。しかし、ブラックホールなど中心天体の質量が大きな降着円盤では、無衝突プラズマ系であることが知られており、電磁流体近似が成り立たない。本研究では、プラズマ粒子コードを用いたシミュレーションを行い、無衝突系のガス降着率が、従来の電磁流体近似よりも10倍程度促進され、更に高エネルギー粒子が効率よく生成されることを見出した。

研究成果の概要(英文)：Accretion disk is a ubiquitous structure in universe, and it is known that a huge gravitational energy can be released during the gas accretion into the central object. So far the magneto-rotational instability (MRI) is known to play a significant role on the gas accretion mechanism through a magneto-hydro-dynamic (MHD) wave. However, accretion disks with massive central objects such as black holes are believed to be in collisionless plasma state, and MHD approximation should break down. In our research project, we performed a large-scale computer simulation with electromagnetic particle-in-cell code, and found that the accretion rate can be enhanced more than 10 times than the standard MHD accretion disk. Furthermore, we found that high energy particles can be efficiently generated.

研究分野：宇宙惑星プラズマ物理学

キーワード：降着円盤 磁気回転不安定 磁気リコネクション 粒子シミュレーション 粒子加速 角運動量輸送  
宇宙物理 ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

重力回転系の天体では、しばしば周辺の物質が円盤状になって回転する降着円盤を形成するが、その物質が中心天体に向かって落下するには角運動量を外側へ輸送することが必要である。そのメカニズムは長い間未解決であったが、1991年にBalbusとHawleyは、電磁流体波を介して角運動量を輸送するプラズマ不安定(磁気回転不安定、MRI)の重要性を指摘した。このMRIは、1960年代にChandrasekharやVelikovらによっても調べられていたが、BalbusとHawleyらの研究を受けて、近年、国内外で降着円盤の研究は大きく進展した。しかし、これまでの研究は、主に電磁流体近似のもとでの研究でありプラズマ運動論の役割は今後の研究課題となっていた。

実際、ブラックホール周りにできる高エネルギー天体の降着円盤では、しばしば電子とイオンの温度が異なることが観測されており、無衝突プラズマ過程を理解する必要があった。プラズマ運動論を部分的に取り入れた研究として、ランダウ流体近似(ランダウ減衰効果を取り入れた温度異方性を記述する状態方程式)を用いた電磁流体シミュレーションが、2005年にQuataert and Stoneによって行われ、MRIの成長率が増大すること、MHD近似より長波長の波が励起されることが示されていた。しかし、ランダウ流体近似ではマイクロ過程の記述は不完全であり、マイクロ過程を正確に取り扱った研究が必要とされていた。

2. 研究の目的

降着円盤の磁気回転不安定(Magneto-Rotational Instability, MRI)は、角運動量輸送を担うメカニズムとして、電磁流体の枠組みで数多くの研究がなされてきたが、プラズマ運動論を考慮した研究は、その重要性にもかかわらず殆ど行われていなかった。実際ブラックホール天体の降着円盤では粒子の平均自由行程が特徴的な降着円盤のスケールよりも長いと考えられている。本研究では、PIC(Particle-In-Cell)法による電磁粒子コードで、無衝突系MRIの非線形時間発展を調べ、降着円盤におけるプラズマ運動論効果を考慮した角運動量輸送やプラズマ加熱・粒子加速を解明することを目的とする。特に、MRIダイナモ作用に伴い形成される温度異方性とそれによる磁場飽和過程、降着円盤中の乱流リコネクションによる粒子加速などを明らかにする。

3. 研究の方法

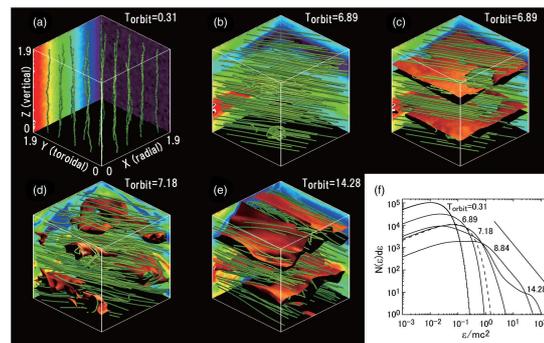
降着円盤の局所系(中心天体から十分離れた領域での部分系)でのプラズマ動力学を粒子コード(PIC)を用いて解明する。独自に開発してきた粒子コードをもとに、ケプラー運動をする回転系のコードに改良した。動径方向の境界条件は、MHDシミュレーションで用い

られているShearing Box Boundaryを改良して、ケプラー回転の下で境界を跨る粒子運動と電場のポワソン方程式の整合性を満たす境界条件を開発した。粒子系での境界条件のスキームを開発するとともに、世界に先駆けて粒子系(無衝突プラズマ系)でのMRI計算を行い、マイクロ過程を含んだ降着円盤の角運動量輸送や粒子加速について解明した。

4. 研究成果

磁気回転不安定(MRI)では、不安定の成長に伴って微分回転(ケプラー回転)による磁場の引き延ばし効果によって磁場強度が大きくなる。一方磁気リコネクションにより磁場は散逸するので、微分回転によるダイナモ作用と磁気リコネクションの散逸効果のつり合いで、磁場の飽和レベルを決定される。無衝突系での飽和レベルは、磁気リコネクションが起きると2重断熱定理より磁場に平行方向の圧力が垂直方向の圧力よりも高くなるので、引き続き磁気リコネクションを起こすことを妨げる効果が表れるため、電磁流体近似のMRIと比べると、磁場の飽和レベルが上がることを予言した。実際我々のPICシミュレーションにより、この予想が正しいことを確かめ、MHD近似に比べて無衝突系では降着率が10倍程度増大することを見出した。

またPICシミュレーションの結果、熱的プラズマのエネルギーを凌駕する非熱的な高エネルギー粒子が、乱流磁気リコネクションによって効率よく生成されることも明らかにした。下図に示したのは、MRIの時間発展であるが(緑が磁力線、赤が密度の等値面、右下図がエネルギースペクトル)、MRIの時間発展に伴って非熱の高エネルギー粒子が生成されることがわかる。



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17件)(すべて査読有)

K. Hirabayashi and M. Hoshino, Stratified simulations of collisionless accretion disks, *Astrophys. J.*, in press (2017)

K. Hirabayashi and M. Hoshino, Instability of non-uniform toroidal

magnetic fields in accretion disk, *Astrophys. J.*, DOI: 10.3847/0004-637X/822/2/87 (2016)

K. Hirabayashi, M. Hoshino, and T. Amano, A new framework for magneto-hydrodynamic simulations with anisotropic pressure, *J. Computational Phys.*, 327, 851-872, <http://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.09.064> (2016)

M. Hoshino, Angular momentum transport and particle acceleration during magneto rotational instability in a kinetic accretion disk, *Physical Review Letters*, DOI:10.1103/PhysRevLett.114.061101 (2015)

K. Higashimori and M. Hoshino, Ion beta dependence on the development of Alfvénic fluctuations in reconnection jets, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1002/2014JA020544 (2015)

M. Hoshino and K. Higashimori, Generation of Alfvénic waves and turbulence in reconnection jets, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1002/2014JA020520 (2015)

Y. Matsumoto, T. Amano, T. Kato, and M. Hoshino, Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave, *Science*, 347, 6225, 974-978 DOI: 10.1126/science.1260168 (2015)

K. Shirakawa and M. Hoshino, Asymmetric evolution of magnetic reconnection in collisionless accretion disk, *Physics of Plasmas*, 21 (6), DOI:10.1063/1.4875739 (2014)

M. Hesse, N. Aunai, J. Birn, P. Cassak, R. E. Denton, J. F. Drake, T. Gombosi, M. Hoshino, W. Matthaeus, D. Sibeck, and S. Zenitani, Theory and modeling for Magnetospheric Multiscale Mission, *Space Science Reviews*, DOI:10.1007/s11214-014-0078-7 (2014)

H. Itou, T. Amano and M. Hoshino, First-principles simulations of electrostatic interactions between dust grains, *Physics of Plasmas*, 21 (12), DOI:10.1063/1.4904373 (2014)

M. Hoshino, Particle acceleration during magnetorotational instability in a collisionless accretion disk, *Astrophys. J.*, DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/118 (2013)

Y. Matsumoto, T. Amano and M. Hoshino, Electron acceleration in a nonrelativistic very high Alfvén Mach number shock, *Physical Review Letters*, DOI:10.1103/PhysRevLett.111.215003 (2013)

K. Higashimori, N. Yokoi, and M. Hoshino, Explosive Turbulent Magnetic Reconnection, *Physical Review Letters*, DOI:10.1103/PhysRevLett.110.255001 (2013)

A. V. Artemyev, M. Hoshino, V. N. Lutsenko, A. A. Petrukovich, S. Imada, and L. M. Zelenyi, Double power-law spectra of energetic electrons in the Earth magnetotail, *Ann. Geophys.*, 31, 910106, doi:10.5194/angeo-31-91-2013 (2013)

T. Saito, M. Hoshino, and T. Amano, Stability of cosmic ray modified shocks: Two-fluid approach, *Astrophys. J.*, DOI:10.1088/0004-637X/775/2/130 (2013)

K. Hirabayashi and M. Hoshino, Magnetic reconnection under anisotropic MHD approximation, *Physics of Plasmas*, 20 (11), DOI: 10.1063/1.4831754 (2013)

N. Yokoi, K. Higashimori, and M. Hoshino, Transport enhancement and suppression in turbulent magnetic reconnection: A self-consistent turbulent model, *Physics of Plasmas*, 20 (12), DOI:10.1063/1.4851976 (2013)

〔学会発表〕(計 11 件)

K. Hirabayashi and M. Hoshino, 6<sup>th</sup> East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, International Congress Center, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Ibaragi (July 11-16, 2016)

K. Hirabayashi and M. Hoshino, 6<sup>th</sup> East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, International Congress Center, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Ibaragi (July 11-16, 2016)

M. Hoshino, Magnetic reconnection in accretion disks with anisotropic plasma pressure, IPELS2015, Institute of Physics, Pitlochry, United Kingdom (August 23-28, 2015)

M. Hoshino, Kinetic aspects of Magnetorotational instability, Nordic Institute for Theoretical Physics/NORDITA workshop, Stockholm, Sweden (August 7, 2015)

M. Hoshino, Particle-in-cell simulation for Magnetorotational instability, International Space Simulation School/ISSS12, Prague, Czech Republic (July 3-10, 2015)

M. Hoshino, Collisionless accretion disks: Role of reconnection in anisotropic plasmas, Workshop on Relativistic Jets: Creation, Dynamics and Internal Physics, Krakow, Poland (April 20-24, 2015)

M. Hoshino, Particle Acceleration and Angular Momentum Transport by Magneto-Rotational Instability in Kinetic Accretion Disks, 8<sup>th</sup> Korean Astrophysics Workshop on High-Beta Plasma in the Universe, Jeju Island, Korea (November 10-13, 2014)

M. Hoshino, High Energy Particle Acceleration in Accretion Disc, Astronomy and Astrophysics from ALMA, Observatorio Cerro Calan, Universidad de Chili, Santiago, Chili (November 7-8, 2013)

M. Hoshino, Angular Momentum Transport and Particle Acceleration in Accretion Disk, International School/Symposium for Space Simulation (ISSS), Taipei, Taiwan (July 21-29, 2013)

M. Hoshino, Particle Acceleration and Magnetic Reconnection during Magnetorotational Instability in Collisionless Accretion Disk, Asia Pacific Physics Conference (APPC), Makuhari Messe, Chiba, Chiba, Japan (July 14-19, 2013)

M. Hoshino, Particle Acceleration and Angular Momentum Transport during Magnetorotational Instability in Collisionless Accretion Disk, IPELS, Hakuba Tokyu Hotel, Hakuba, Nagano, Japan (July 1-5, 2013)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/people/hoshino\\_masahiro/](http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/people/hoshino_masahiro/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

星野 真弘 (HOSHINO, Masahiro)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90241257