

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340040

研究課題名(和文) 磁気流体数値実験とX線観測の連携によるブラックホール候補天体の状態遷移過程の解明

研究課題名(英文) Studies of State Transitions in Black Hole Candidates by Collaboration between Magnetohydrodynamic Simulations and X-ray Observations

研究代表者

松元 亮治 (Matsumoto, Ryoji)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00209660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円、(間接経費) 4,020,000円

研究成果の概要(和文)：理論シミュレーション分野と観測分野の連携によってブラックホール候補天体における降着率変動に伴う状態遷移過程についての共同研究を実施した。HLLD法に基づく磁気流体コードを高次精度化してハードステートからソフトステートへの状態遷移に適用した結果、ブラックホール近傍のダイナモ磁場と外側の強い方位角磁場の磁気リコネクションによる加熱と輻射冷却が釣り合う明るいハードステートが維持されることが明らかになった。超臨界降着流の輻射流体シミュレーションも実施し、潮汐破壊事象 Swift J1644+57 で観測された状態遷移等を説明することができた。

研究成果の概要(英文)：State transitions of black hole candidates are studied by collaboration between theoretical/simulation studies and X-ray observations. By applying a higher accuracy magnetohydrodynamic code based on the HLLD scheme to hard-to-soft transitions, we found that luminous hard state is maintained by balancing the magnetic energy release and radiative cooling through magnetic reconnection between dynamo fields near the black hole and strong azimuthal fields in the outer disk. We also explained the state transitions observed during a tidal disruption event Swift J1644+57 by radiation hydrodynamic simulations of supercritical accretion onto a supermassive black hole.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学 X線天文学 降着円盤 磁気流体力学 シミュレーション ブラックホール 宇宙ジェット  
天体プラズマ

1. 研究開始当初の背景

(1) ブラックホール候補天体は急激な増光やスペクトル変化を示す。特に、恒星質量ブラックホールでは硬 X 線が強い状態 (ハードステート) と軟 X 線が強い状態 (ソフトステート) の間の状態遷移が観測される。理論的にはハードステートは光学的に薄い高温円盤に、ソフトステートは光学的に厚い低温円盤に対応すると考えられているが、前者の上限光度を超える「明るいハードステート」が観測されることがあり、この状態を理論的に説明する必要に迫られていた。

(2) 2009 年に国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に全天 X 線監視装置 MAXI が搭載されて観測が開始され、同装置の高い感度と観測頻度を生かしてブラックホール候補天体の増光や状態変化をより早く捉えることが可能になった。また、長期時間変動の継続観測が可能になり、ブラックホール X 線新星の進化経路、特にハードステートとソフトステートの間の遷移過程の詳細が観測的に明らかになるようになっていた。

(3) 我々は、加熱・冷却過程を考慮したブラックホール降着円盤の大局的 3 次元磁気流体シミュレーションを世界に先駆けて実施した。その結果、光学的に薄い高温円盤への降着率増大に伴って円盤密度と輻射冷却率が上昇し、冷却不安定性が成長して円盤が収縮すること、この際に方位角方向の磁場が強められ、円盤が磁場によって支えられた準定常状態に至ることを明らかにした。この中間状態がどの程度安定に存在することができるかを調べることが課題になっていた。

2. 研究の目的

(1) 理論シミュレーション分野と観測分野の連携により、ブラックホールへの降着率の変動に伴う「ブラックホール+降着円盤」系の進化の全貌を解明する。特に、ブラックホール降着円盤の状態遷移過程を 3 次元磁気流体・輻射磁気流体シミュレーションによって明らかにし、観測結果を説明する。

シミュレーション結果に基づき、色 - 光度図上での進化を再現する。

降着率増大に伴って低温強磁場領域が内側に侵入していくという描像を検証する。

MAXI 等で観測された「明るいハードステート」の維持機構を明らかにする。

「明るいハードステート」円盤に蓄積された磁気エネルギーが解放されてジェットを噴出する過程を明らかにする。

エディントン光度に対応する降着率よりも高い降着率で降着する超臨界降着状態と、亜臨界降着状態の遷移過程を明らかにする。

円盤コロナからの熱伝導の影響を明らかにする。

(2) 銀河系内ブラックホール候補天体の明るいハードステートで観測される 10Hz 程度の準周期振動 (Quasi Periodic Oscillation: QPO) の発生過程を明らかにする。100Hz 程度

の高振動数 QPO の発生機構も明らかにし、QPO 観測からブラックホールの質量と円盤構造を推定する方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 説明すべき観測結果と、その理論モデル: 図 1 に典型的な X 線新星の色 - 光度図上での進化経路と MAXI によって観測された X 線新星 XTE J1752-223 (破線) の進化経路を示す。L<sub>E</sub> は球対称降着の場合の上限光度であるエディントン光度である。

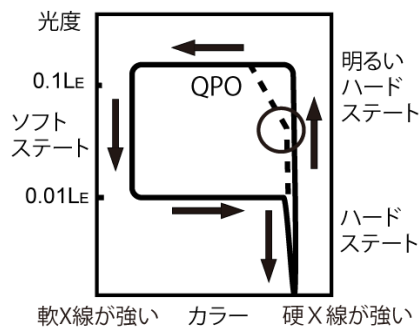


図 1: X 線新星の進化経路。MAXI により XTE J1752-223 (点線) で観測された中間状態。明るいハード状態で準周期振動 (QPO) が観測される。

図 2 に状態遷移の理論モデルを示す。横軸は表面密度、縦軸はエディントン光度に対応する降着率で規格化した降着率、実線は各半径で加熱と冷却が釣り合う熱平衡曲線である。左側のブランチが高温で光学的に薄いハードステートに対応し、右側のブランチが光学的に厚いソフトステートに対応する。

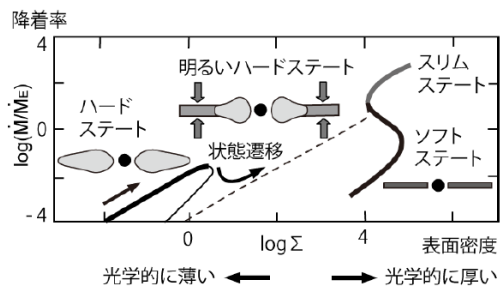


図 2: 降着円盤の熱平衡曲線 (実線)。破線は方位角磁場で支えられる場合の平衡解 (小田・町田ら 2009)。

(2) シミュレーション手法: 降着円盤の時間発展の計算には近似リーマン解法の一様である HLLD 法に基づく円筒座標系 3 次元磁気流体コードを高次精度化したコードを採用した。このコードは数値振動が少なく、従来使用してきた修正 Lax Wendroff 法に基づくコードにくらべて、ハードステートからソフトステートへの状態遷移中に形成される磁気圧優勢円盤をより精度良く扱うことができる。

光学的に厚い領域を含む計算には従来から使用してきた Flux Limited Diffusion (FLD) 法に基づくコードに加えて、輻射輸送

方程式の光線方向に関する1次モーメント式である輻射流束の時間発展を記述する方程式を陽的に解く1次モーメント(M1)法のコードを新たに作成して適用した。シミュレーションには国立天文台のXC30計算機に加えて東京大学のHA8000, FX10, 九州大学のFX10等の超並列計算機を使用した。

(3) 研究体制:以下の3チーム構成とした(印は班長)。シミュレーション実施・可視化・データ解析班(町田真美、松元、廣瀬、中村賢仁、大須賀、宮路、川島、朝比奈、小田)、輻射磁気流体シミュレータ改訂班(廣瀬、花輪、横山、松本倫明、大須賀、高橋博之、朝比奈)、X線観測連携班(根来、山岡、久保田)。グループメンバー間の連携をはかり、共同研究を推進するため、各年度の夏(8月~9月)及び春(2月~3月)に千葉大学で研究推進会議を開催し、進捗状況の報告と討議を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高精度磁気流体コードCANS+の開発

円筒座標系3次元磁気流体コードにおける時間発展計算モジュールとして近似リーマン解法の一つであるHLLD法に基づくエンジンを実装した。磁場の発散を0に保つための解法としてはdiv Bの0からのずれを移流拡散させるGLM法を採用した。

当初は空間2次精度の解法を適用したが、数値振動を抑制するために導入されるリミターにより磁場が散逸しやすいことが判明したため、5点補間によってセル境界値を求め、セル境界の取りうる値の制限を緩める空間5次精度のMP5法を実装した。これにより数値振動を抑えつつ数値散逸が小さい磁気流体計算が可能になった。このコードを、MPIを用いて並列化することにより8000コアに至るまでほぼコア数に比例するストロングスケールの並列性能が得られた。

HLLD+MP5コードを用いて初期に方位角方向の弱い磁場に貫かれた回転トーラスの時間発展を計算した。動径方向、方位角方向、鉛直方向のメッシュ数はそれぞれ256、64、256とした。図3にポロイダル面内の方位角磁場の時間発展を示す。約10回転ごとに方位角磁場方向が反転する準周期的な円盤ダイナモが励起されていることが確認できた。この結果は修正Lax-Wendroff法に基づくコードによるシミュレーション結果(Machida et al. 2013)とほぼ一致した。

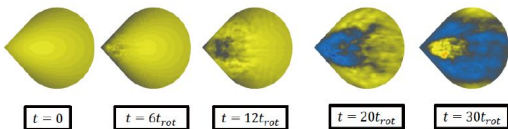


図3: ポロイダル面内の方位角磁場分布の時間発展。カラーは方位角磁場の方向を示す。黄色が正方向、青が負方向。

HLLD+MP5コードの時間方向の計算に3次の

ルンゲクッタ法を採用したコードをCANS+コードとして公開した。このコードのチューニングを行い、FX10で15%の実効効率を得た。

##### (2) 明るいハードステート円盤形成の磁気流体シミュレーション

HLLD+MP5コードを用いてハードステートからソフトステートへの状態遷移の磁気流体シミュレーションを実施した。中心天体は10太陽質量のブラックホールとし、一般相対論効果は擬ニュートンポテンシャルを用いて近似的に扱った。まず、弱い方位角磁場に貫かれた回転トーラスを初期条件として輻射冷却を含めない3次元シミュレーションを実施し、系が準定常状態に至った後、熱制動放射による輻射冷却を導入した。円盤密度が図2のハードステート円盤の上限密度より高い場合、冷却不安定性が成長し、円盤温度が低下する。図4にシミュレーション結果の例を示す。

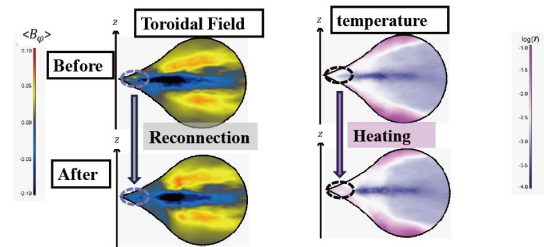


図4: 輻射冷却を考慮したシミュレーション結果。左図はポロイダル面内の方位角磁場分布。右図は温度分布。上図から下図の間に磁気リコネクションが発生し、ブラックホール近傍(破線部)の円盤が加熱されている。

冷却不安定性の成長に伴って10シュバルツシルト半径より外側では赤道面付近の温度が低下し、円盤が鉛直方向に収縮する。このため、方位角方向の磁場が強まり円盤は磁気圧で支えられた状態になる。この段階までの計算結果は従来のコードを用いてすでに得られていた(Machida et al. 2006)。本研究では、この状態に至った後の進化を調べた。

その結果、ブラックホール近傍で円盤ダイナモによる磁場反転が起きた結果、方位角磁場方向が逆向きになる領域が形成され、磁気リコネクションが発生して円盤を加熱するとともにジェットを噴出すること(図5)。磁気リコネクションとジェット噴出が10回転程度の時間スケールで間歇的に発生すること、磁気リコネクションに伴う加熱のため、ブラックホール近傍の円盤は平均すると高温状態に保たれることが明らかになった。

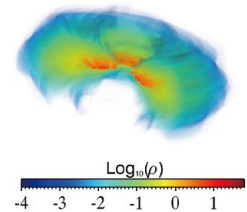


図5: リコネクション発生後の密度分布。

(3) 超臨界降着流の輻射スペクトル計算と超光度 X 線源への適用

研究協力者である川島らは流束制限拡散 (FLD) 近似に基づく極座標 2 次元 (軸対称) 輻射流体コードにコンプトン散乱による加熱・冷却項を組み込んで降着率がエディントン降着率の 100 倍以上の場合のシミュレーションを実施した。中心天体は 10 太陽質量のブラックホールとした。シミュレーションの結果、輻射圧によって加速されたジェット・アウトフローが生成されること、回転軸周辺の低密度領域と降着流の境界 (ファンネル壁) 付近に衝撃波が形成され、降着流が加熱されて 1 億度程度の高温領域が形成されることが示された。

シミュレーションによって得られた密度、温度分布をもとに光子輸送のモンテカルロ計算を行った結果、この高温領域を通過する光子が逆コンプトン散乱されて 10KeV 以上の硬 X 線が放射されること、降着率が高い場合、ファンネル領域が狭くなり、その外側を流れる低温のアウトフローによってコンプトン散乱される光子が増えてスペクトルが軟化し、5KeV 程度にピークを持つ輻射スペクトルが形成されること、回転軸方向から観測した場合の光度はエディントン光度の 10 倍以上に達することができることなどが明らかになった (Kawashima et al. 2012)。得られた輻射スペクトル及び光度は系外銀河で発見された超光度 X 線源 (Ultra-luminous X-ray Sources: ULX) と類似しており、計算結果は ULX が超臨界降着中の恒星質量ブラックホールであることを示唆している。

(4) 潮汐破壊事象 Swift J1644+57 の数値実験

2011 年 3 月 28 日に  $z=0.35$  にある銀河の中心で X 線増光が観測され、光度は  $10^{46}$  erg/s に達した。Swift J1644+57 と名付けられたこの天体のエネルギー源は  $10^6$  太陽質量のブラックホールによる恒星の潮汐破壊であると考えられている。

Swift J1644+57 の増光時の光度は  $10^6$  太陽質量のブラックホールのエディントン光度を超えていることから、潮汐破壊された恒星物質がブラックホールに超臨界降着したと考えられる。超臨界降着状態の円盤は図 6 に示した S 字型の熱平衡曲線の上部、スリム円盤状態にあり、降着率減少にともなってこの曲線上を左下に移動する。ブラックホール近傍の降着率が臨界降着率より小さくなるとスリム円盤解がなくなり、

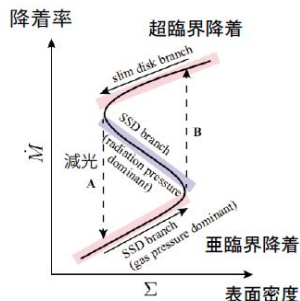


図 6 : 光学的に厚い降着円盤の熱平衡曲線。

円盤は S 字の下辺 (標準円盤) に遷移する。Swift J1644+57 ではこの遷移に対応すると考えられる X 線減光が 2012 年 8 月に発生し、X 線光度は 2 桁減少した。減光直前の光度は  $10^{44}$  erg/s で  $10^6$  太陽質量のブラックホールのエディントン光度であり、上記の解釈と矛盾しない。

潮汐破壊物質が  $10^6$  太陽質量のブラックホールに超臨界降着する場合の時間発展を軸対称 2 次元輻射流体シミュレーションによって調べた (Kawashima et al. 2013)。図 7 に質量供給率がエディントン降着率の 100 倍、粘性パラメータ  $\alpha=0.1$  の場合のシミュレーション結果のスナップショットを示す。

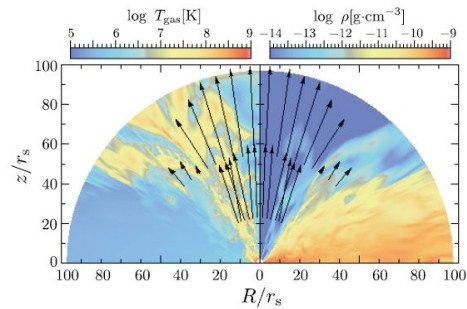


図 7 :  $10^6$  太陽質量の巨大ブラックホールにエディントン降着率の 100 倍の降着率で外部境界から質量が供給される場合のシミュレーション結果。左図は温度分布、右図は密度分布、矢印は速度。

$10^5$ - $10^6$ K のスリム円盤が形成され、輻射圧加速された物質がジェットとして噴出している。ジェット噴出領域には高温領域が形成されており、この領域での逆コンプトン散乱によって X 線が放射されると期待できる。

図 8 に光度 (上段) とブラックホール近傍の降着率 (下段) の時間変動を示す。超臨界降着流 (図の (i)) が形成された後、円盤から噴出するアウトフローによって降着率が減少し、エディントン降着率程度になると亜臨界降着状態 (図の (ii)) に遷移して減光す

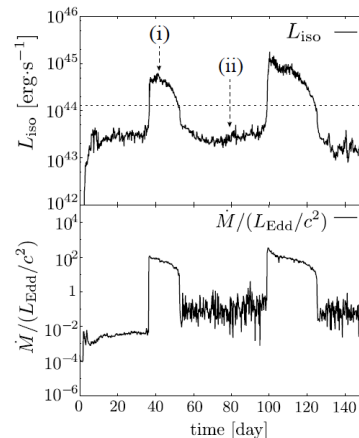


図 8 : エディントン降着率の 100 倍の質量供給がある場合の輻射流体計算結果。上段は光度、下段は降着率。亜臨界降着状態 (ii) に遷移後、再増光する。

る。潮汐破壊物質の供給は続いているため、円盤密度は増加する。その密度がガス圧優勢な亜臨界降着円盤が存在できる上限に達すると超臨界円盤への遷移が起こり、光度はエディントン光度程度まで増加する。再増光までの期間は 50/ 日程度、円盤の一部を取り出した 3 次元磁気流体計算から示唆されているように  $\sim 0.01$  であれば、1 年半後に再増光すると予想される。

#### (5) その他の成果。

分担者の花輪、研究協力者の高橋博之らは 1 次モーメント(M1)法に基づく輻射流体・相対論的輻射磁気流体コードを作成し、原始星円盤、超臨界降着流等に適用してテスト計算を実施した。Hirose et al. (2014)は、わい新星降着円盤の局所 3 次元輻射磁気流体シミュレーションにより S 字型熱平衡曲線の上辺左端近傍では角運動量輸送率が高くなることを明らかにした。研究協力者の朝比奈は超臨界降着円盤等から噴出するジェットと星間 HI ガス雲相互作用の磁気流体シミュレーションを実施し、ジェットによって HI ガスが圧縮されて冷却不安定性が成長し、低温高密度のガス雲(分子雲)が形成されることを示した(Asahina et al. 2014)。

#### 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 16 件)

Asahina, Y., Ogawa, T., Matsumoto, R., Kawashima, T., Furukawa, N., Enokiya, R., Yamamoto, H., Fukui, Y., Magneto-hydrodynamic Simulations of a Jet Drilling an HI Cloud: Shock Induced Formation of Molecular Clouds and Jet Breakup, *Astrophysical Journal*, 査読有、印刷中、2014

Hirose, S., Blaes, O., Krolik, J.H., Coleman, M.S.B., Sano, T., Convection Causes Enhanced Magnetic Turbulence in Accretion Disks in Outburst, *Astrophysical Journal*, 査読有、Vol.787、2014、1 (14pages)

DOI: 10.1088/0004-637X/787/1/1  
Moriwana, K., Sugizaki, M., Nakahira, S., Shidatsu, M., Ueda, Y., Serino, M., Mihara, T., Matsuoka, M., Negoro, H., Kawai, N., MAXI/GSC Discovery of the Black-Hole Candidate MAXI J1305-704, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、Vol.65、2013、L10 (5pages)

DOI: 10.1093/pasj/65.5.L10  
Kawashima, T., Ohsuga, K., Usui, R., Kawai, N., Negoro, H., Matsumoto, R., Recurrent Outbursts and Jet Ejections Expected in Swift J1644+57:

Limit-Cycle Activities in a Supermassive Black Hole, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、Vol.65、2013、L8 (5pages)

DOI: 10.1093/pasj/65.4.L8

Machida, M., Nakamura, K.E., Kudoh, T., Akahori, T., Sofue, Y., Matsumoto, R., Dynamo Activities Driven by Magneto-rotational Instability and the Parker Instability in Galactic Gaseous Disks, *Astrophysical Journal*, 査読有、Vol.764、2013、81 (9pages)

DOI: 10.1088/0004-637X/764/1/81

Yamaoka, K., Allured, R., Kaaret, P., Kennea, J.A., Kawaguchi, T., Gandhi, P., Shaposhnikov, N., Ueda, Y., Nakahira, S., Kotani, T., Negoro, H., Takahashi, I., Yoshida, A., Kawai, N., Sugita, S., Combined Spectral and Timing Analysis of the Black Hole Candidate MAXI J1659-152, Discovered by MAXI and Swift, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、Vol.64、2012、32 (15pages)

DOI: 10.1093/pasj/64.2.32

Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Yoshida, T., Heinzeller, D., Matsumoto, R., Comptonized Photon Spectra of Supercritical Black Hole Accretion Flows with Application to Ultraluminous X-ray Sources, *Astrophysical Journal*, 査読有、Vol.752、2012、18 (12pages)

DOI: 10.1088/0004-637X/752/1/18

Oda, H., Machida, M., Nakamura, K.E., Matsumoto, R., Narayan, R., Global Structure of Optically Thin, Magnetically Supported, Two-Temperature, Black Hole Accretion Disks, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有、Vol.64、No.1、2012、15 (21pages)

DOI: 10.1093/pasj/64.1.15

##### [学会発表](計 84 件)

Negoro, H., MAXI observes black-hole X-ray novae from the beginning to the end, Suzaku-MAXI 2014 "Expanding the Frontiers of the X-ray Universe", 2014 年 2 月 20 日、愛媛大学

Matsumoto, R. 他、Global Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Hard-to-Soft Transition and Jet Formation, Suzaku-MAXI 2014 "Expanding the Frontiers of the X-ray Universe", 2014 年 2 月 19 日~2 月 22 日、愛媛大学

Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Numerical Study of Supercritical Accretion Flow onto the Black Hole Using Relativistic

Radiation Magnetohydrodynamic Code、12th Asia Pacific Physics Conference、2013年7月16日、幕張メッセ  
Kawashima, T., Ohsuga, K. 他、Limit-Cycle Activities in a Tidal Disruption Event by a Supermassive Black Hole、12th Asia Pacific Physics Conference、2013年7月16日、幕張メッセ  
松元亮治、降着円盤の角運動量輸送問題、日本物理学会、2013年3月28日、広島大学  
Hanawa, T.、Reconstruction Method for M1 Equations of Radiative Transfer、East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012、2012年11月2日、京都大学  
Kawashima, T., Ohsuga, K. 他、Hot Spine and Compton-Cooled Sheath Structure of Radiation MHD Jet: Observational Feature of Super-Eddington Black Hole Accretion Flow and Outflow、East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012、2012年10月31日、京都大学  
Matsumoto, R. 他、Global Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Dynamos、East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012、2012年10月31日、京都大学  
Negoro, H.、3 years all-sky X-ray observations with MAXI、Half a Century of X-ray Astronomy、2012年9月20日、Mykonos, Greek  
Matsumoto, R.、Global Simulations of Magnetic Environments around Compact Objects、IAU Symposium 290, Feeding Compact Objects: Accretion on All Scales、2012年8月24日、Beijing (China)  
Negoro, H. 他 MAXI Team、Discoveries of New Black Hole Transients MAXI J1659-152 and MAXI J1543-564、Suzaku 2011, Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond、2011年7月20日～7月22日、SLAC(USA)  
町田真美他、Global 3D MHD Simulations of Disk Dynamo、MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas Workshop、2011年6月8日、北京大学(中国)

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/mhddisk/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松元 亮治 (MATSUMOTO, Ryoji)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：00209660

### (2) 研究分担者

根来 均 (NEGORO, Hitoshi)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号：30300891

花輪 知幸 (HANAWA, Tomoyuki)  
千葉大学・先進科学センター・教授  
研究者番号：50172953

町田 真美 (MACHIDA, Mami)  
九州大学・大学院理学研究院・助教  
研究者番号：50455200

廣瀬 重信 (HIROSE, Shigenobu)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・主任研究員  
研究者番号：90266924

### (3) 連携研究者

大須賀 健 (OHSUGA, Ken)  
国立天文台・理論研究部・助教  
研究者番号：90386508

久保田 あや (KUBOTA, Aya)  
芝浦工業大学・システム理工学部・准教授  
研究者番号：00391938

中村 賢仁 (NAKAMURA, Kenji)  
九州産業大学・工学部・准教授  
研究者番号：00342543

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)  
法政大学・人間環境学部・教授  
研究者番号：60308004

宮路 茂樹 (MIYAJI, Shigeki)  
千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：10157646

山岡 和貴 (YAMAOKA, Kazutaka)  
名古屋大学・大学院理学研究科・特任准教授  
研究者番号：00365016

横山 央明 (YOKOYAMA, Takaaki)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：00311184