

機関番号：12501

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340040

研究課題名 (和文) 磁気流体シミュレータによる降着円盤の時間変動と  
ジェット形成機構の解明研究課題名 (英文) Developments of Numerical Magnetohydrodynamic Simulators of  
Accretion Disks with Application to Time Variabilities and Jet Formation

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

研究成果の概要 (和文) : 3次元磁気流体コードを改訂して超並列計算機に実装し、降着円盤の大局的シミュレーションに適用可能にした。このコードを用いてジェット伝播計算を実施し、ジェットと星間ガスの境界に分子ガスの鞘が形成されることを示した。シミュレーション結果から輻射スペクトルを計算するモジュールも実装し、超高光度X線源のスペクトルを再現した。また、降着円盤内部で平均磁場方向が準周期的に反転するダイナモが発生することを示した。

研究成果の概要 (英文) : Three-dimensional magnetohydrodynamic codes applicable to global simulations of accretion disks have been implemented to massive parallel computers. By applying this code, we showed that molecular sheath is formed at the interface between the jet and the interstellar matter. We also implemented photon transfer codes to compute the radiation spectrum from the simulation results. Based on the results of radiation hydrodynamic simulations of supercritical black hole accretion flows, we reproduced the X-ray spectra observed in ultraluminous X-ray sources (ULXs). We also showed by three-dimensional magnetohydrodynamic simulations that the direction of mean magnetic fields in accretion disks reverses quasi-periodically by dynamo action.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学、数値天体物理学、磁気流体力学、降着円盤、宇宙ジェット

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 重力を及ぼす天体のまわりに形成される回転ガス円盤 (降着円盤) は、重力エネルギーを解放することにより、種々の天体活動現象を駆動するエンジンになる。降着円盤の構造と進化を解明することは天体物理学の最重要課題のひとつである。

(2) Balbus and Hawley (1991) によって降着円盤における磁気回転不安定性の重要性が指摘されたことを契機として降着円盤の3次

元磁気流体シミュレーションが実施されてきた。町田・中村・松元ら(2006)は輻射冷却を考慮した大局的な3次元磁気流体シミュレーションを世界ではじめて実施し、降着率が臨界値を超えると冷却不安定性により円盤が鉛直収縮して磁気圧で支えられた中間状態に至ることを示した。その後の進化を追跡するには、数値的に安定であり、輻射と磁気流体の相互作用を扱うことができるシミュレーションコードが必要である。

(3) 松元・横山らは様々な宇宙磁気流体現象に適用可能な磁気流体シミュレータ CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) を開発してきた。CANS は MPI を用いて並列化済であるが、ベクトル計算機用に最適化されていた。これを、超並列スカラ並列計算機等でも高い実効性能が得られるように改訂する必要があった。

## 2. 研究の目的

(1) 降着円盤の磁気流体シミュレーションエンジンをスカラ並列計算機上でも高い実効性能が得られるように改訂する。また数値流体力学研究の最新の成果と輻射・相対論効果を組み込むことにより流体・磁場・輻射が複合した天体現象の数値実験に適した新世代のシミュレータに発展させる。シミュレーション結果の解析・可視化ツールも整備する。  
 (2) 降着円盤の時間変動とジェット形成機構を、輻射を考慮した磁気流体シミュレーションによって明らかにする。特に光学的に薄い円盤から光学的に厚い円盤への状態遷移過程、臨界光度 (エディントン光度) に近い明るい降着円盤の安定性と輻射圧で加速されたジェットの形成機構を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 宇宙磁気流体シミュレータ CANS の各モジュールを、マルチコア CPU を搭載したスカラ並列計算機の最高性能を発揮できるように改訂する。あわせて、グラフィックプロセッサ (GPU) の性能を発揮することができる流体・磁気流体コードの実装を進める。  
 (2) 磁気流体の時間発展を計算するシミュレーションエンジンとして、従来実装してきた修正 Lax-Wendroff 法、Roe 法、CIP 法のエンジンに加えて、Miyoshi and Kusano (2005) によって提唱された HLLD 法のシミュレーションエンジンを実装してシミュレーションを実施する。  
 (3) 光学的に薄い領域から厚い領域までを扱うことができるようにするために、流束制限拡散 (FLD) 近似に基づく輻射磁気流体コードを実装してシミュレーションを実施する。拡散近似を用いず、輻射輸送方程式のモーメント式を解くモジュールの実装、相対論的輻射流体への拡張も行う。降着円盤が光学的に薄い状態から光学的に厚い状態に遷移する過程で形成される磁気圧優勢な円盤の定常解を求め、シミュレーションと比較可能にする。輻射圧で加速されるジェット形成シミュレーションも実施する。  
 (4) 相対論的な磁気流体コードを実装して磁気ループ膨張のシミュレーションを実施し、自己相似的膨張を仮定して求めた解析解と比較することによって相対論的コードの計算精度を検証する。

(5) シミュレーションによって得られた密度、温度、速度分布をもとにして光子輸送のモンテカルロ計算を行うことにより輻射スペクトルを計算するモジュールを実装して輻射スペクトルを求め、観測と比較する。

## 4. 研究成果

### (1) HLLD 法に基づく磁気流体エンジンの実装

宇宙磁気流体シミュレータ CANS のシミュレーションエンジン (磁気流体方程式の時間発展を解くモジュール) を、マルチコア CPU を搭載したスカラ並列計算機において高い実効性能が得られるように最適化するとともに、HLLD 法に基づく 3 次元磁気流体エンジンを実装した。

HLLD 法 (Miyoshi and Kusano 2005) はセル境界におけるリーマン問題を図 1 のように 4 個の中間状態を用いて近似的に解く手法である。中間状態を 1 状態で近似する HLL 法にくらべて密度や磁場の不連続面における数値散逸を小さくできるという利点がある。

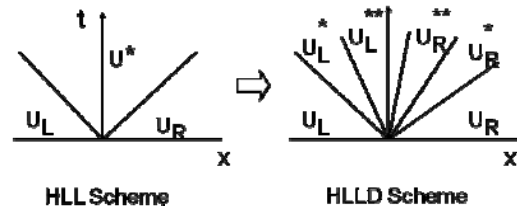


図 1 セル境界における近似リーマン解法

3 次元カーテシアン座標及び円筒座標の HLLD コードを国立天文台に導入されたスカラ並列計算機 XT4 に実装し、最適化を行った結果、修正 Lax-Wendroff (MLW) 法のシミュレーションエンジンの 2.5 倍程度の計算時間で計算が実施できるようになった。また、コア数に比例する並列性能が得られた (図 2)。

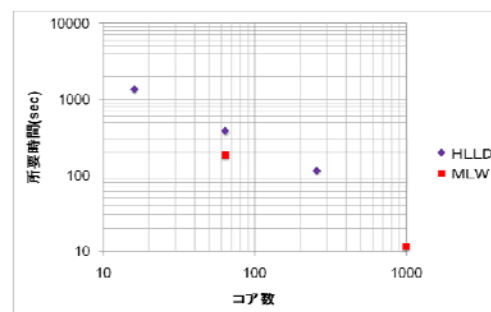


図 2 国立天文台のスカラ並列計算機 XT4 に実装した磁気流体シミュレーションエンジンの並列性能。円筒座標系 3 次元コードを用いた  $256 \times 32 \times 400$  メッシュ、1000 ステップの計算の所要時間。

スカラ並列計算機用に最適化した円筒座標系の 3 次元 HLLD コードを用いて降着円

盤の大局的 3 次元磁気流体シミュレーションを実施した。図 3 に計算結果の一例を示す。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数値的振動が小さい計算結果を得ることができた。磁場方向が反転する領域における数値的散逸を抑えるため、セル境界の物理量を空間 5 次精度の近似式を用いて求める MP5 法を用いたコードも実装した。

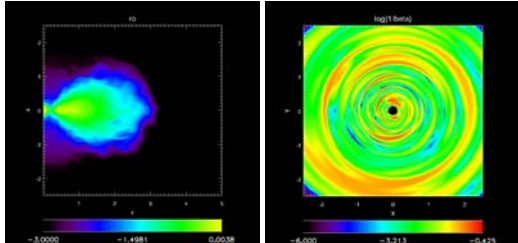


図 3 HLLD 法に基づく円筒座標系 3 次元磁気流体コードを用いた回転トーラスのシミュレーション結果。15 回転後の密度分布 (左図) と赤道面での  $\log(1/\beta)$  の分布 (右図) を示す。 $\beta$  = ガス圧/磁気圧。

#### (2) 流体・磁気流体コードの GPU への実装

Roe 法及び修正 Lax-Wendroff 法に基づく流体・磁気流体シミュレーションエンジンをグラフィックプロセッサ (GPU) 向きに最適化して実装し、2 次元コードにおいて GPU 1 台で約 100GFLOPS の実効性能を得ることができた。

#### (3) ジェット伝播シミュレーションの実施

磁気流体シミュレータ CANS に新たに実装した HLLD 法に基づく磁気流体コードを用いて、ジェットと中性水素ガス雲の相互作用のシミュレーションを実施した。星間ガスの加熱・冷却過程を考慮したシミュレーションの結果、ジェット先端に形成される衝撃波面で圧縮された中性水素ガスが冷えて、図 4 のようにジェットを包む鞘状の低温高密度領域 (分子ガス層) が形成されることが示された (Asahina et al. 2011 投稿準備中)。

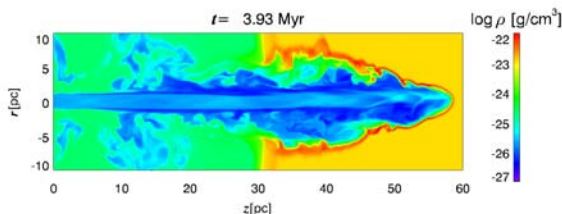


図 4 HLLD 法のコードを用いたジェットと中性水素ガス相互作用の 3 次元シミュレーション結果。メッシュ数は  $150 \times 150 \times 560$ 。色は密度分布を示す。

#### (4) 円盤ダイナモシミュレーション

我々は、銀河円盤の大局的 3 次元磁気流体シミュレーションにより、差動回転に起因する磁気回転不安定性と磁気浮力に起因する

パーカー不安定性の相乗効果により、円盤内部の方位角磁場方向が準周期的に反転する円盤ダイナモが発生することを指摘してきた (Nishikori, Machida and Matsumoto 2006)。図 5 に、この機構の模式図を示す。

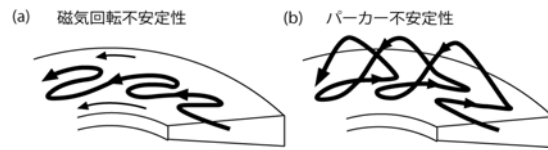


図 5 円盤ダイナモにおける方位角磁場の反転機構。(a) 磁気回転不安定性が成長する。(b) 強められた方位角磁場がパーカー不安定性によって浮上する。方位角方向の磁束は保存されるため、円盤内の方位角磁場は逆転し、この磁場が磁気回転不安定性によって強められる。

Nishikori ら (2006) の計算では赤道面対称性が仮定されていた。町田・松元ら (2011、投稿準備中) は赤道面の上下を計算領域に含め、赤道面対称性を仮定しない大局的な 3 次元磁気流体シミュレーションを実施し、この場合にも方位角磁場方向が回転周期の 10 倍程度の時間で反転する準周期的ダイナモが発生することを示した (図 6)。

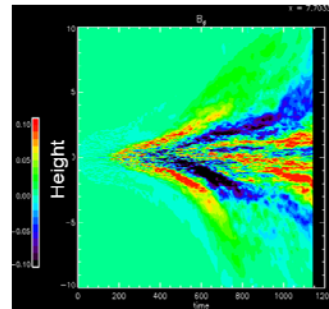


図 6 円盤ダイナモの大局的 3 次元磁気流体シミュレーションから得られたバタフライダイアグラム。色は方位角磁場を示す。

分担者である横山らは磁気流体コードを適用することにより、磁束浮上過程、太陽内部における磁場の増幅・維持過程等のシミュレーションを実施した (Toriumi et al. 2011, Hotta et al. 2011)。

#### (5) 超臨界降着流のシミュレーションと超高光度 X 線源 (ULXs) への適用

流束制限拡散 (FLD) 近似に基づく軸対称輻射流体コードに、逆コンプトン散乱によるプラズマ冷却効果を組み込み、エディントン光度  $L_E$  に対応する臨界降着率よりも高い降着率で恒星質量ブラックホールに降着する超臨界降着流のシミュレーションを実施した (図 7)。その結果、輻射圧によって加速されて円盤から噴出するアウトフロー領域の温

度を従来の計算よりも正確に評価することが可能になり、降着率が臨界降着率に比べて十分に高い場合、アウトフロー領域での逆コンプトン散乱によるスペクトル硬化が重要になる新たな状態が生じることを示すことができた (Kawashima et al. 2009)。

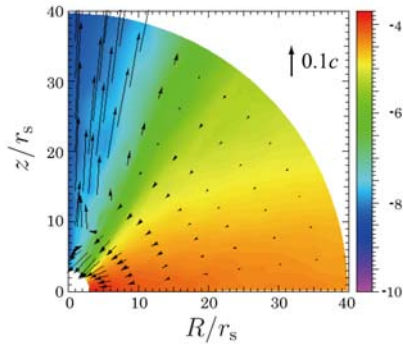


図 7 ブラックホールへの超臨界降着流の輻射流体シミュレーション結果。色は密度、矢印は速度をあらわす。

超臨界降着流からの輻射スペクトルを求めるため、シミュレーションから得られた密度、温度、速度分布をもとにして熱制動放射、自由・自由吸収、コンプトン散乱等を考慮した光子輸送のモンテカルロ計算を実施した。流体静止系にローレンツ変換してからコンプトン散乱の計算を実施することにより、バルクコンプトン散乱の影響も取り入れた。得られた輻射スペクトルを図 8 に示す。

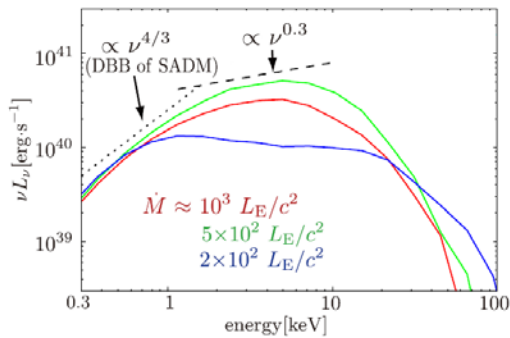


図 8 ブラックホールへの超臨界降着の輻射流体シミュレーション結果から求めた輻射スペクトル。

降着率が  $200 L_E/c^2$  程度の場合には超音速で落下する降着流がブラックホール近傍における角運動量ポテンシャルの壁で反射される領域に  $10^{8.5} \text{K}$  程度の衝撃波加熱領域が形成され、この領域での熱的なコンプトン散乱によって  $10 \text{keV}$  以上まで冪関数則にしたがう輻射スペクトルが得られた。降着率がさらに高まると回転軸付近の高温低密度のジェットの外側を流れる低温高密度のアウトフロー領域で散乱・吸収される光子が増え、 $5 \text{keV}$  程度

にピークを持つ輻射スペクトルが得られた。回転軸方向から観測した場合の光度は  $10^{40} \text{erg/s}$  以上になり、系外銀河で観測される超高光度 X 線源 (ULX) の光度、輻射スペクトルを説明することができた (Kawashima et al. 2011 投稿準備中)。今後、磁場を考慮した輻射磁気流体シミュレーション結果に基づく輻射スペクトル計算を実施する。

#### (6) 相対論的磁気流体シミュレーション

HLL 法に基づく相対論的磁気流体エンジンを用いて磁気ループ膨張の相対論的磁気流体シミュレーションを実施した。解析的に求めた自己相似解とシミュレーション結果の密度分布を図 9 に示す。両者を比較することによって衝撃波の位置や膨張領域の速度分布が精度良く計算できていることが確認でき、相対論的磁気流体コードを検証することができた (Takahashi et al. 2011)。

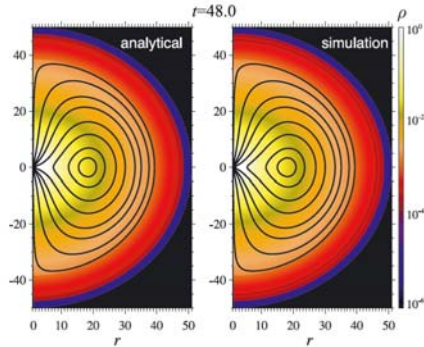


図 9 相対論的磁気ループ膨張の密度分布(カラー)と磁力線(実線)。左図は自己相似解、右図はシミュレーション結果。

#### (7) 磁気圧優勢円盤の定常解

方位角磁場を考慮したブラックホール降着円盤の定常解を求め、光学的に薄い円盤と光学的に厚い円盤を結ぶ熱平衡解が存在することを示した (Oda et al. 2009)。横軸を表面密度、縦軸を降着率とした場合の熱平衡曲線を図 10 に示す。光学的に薄い円盤への降着率増大に伴って円盤は方位角磁場で支えられた状態を経て光学的に厚い状態に移る。電子温度とイオン温度が異なる 2 温度円盤への拡張も行った (Oda et al. 2010)。

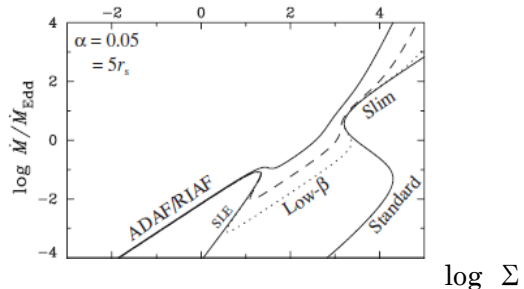


図 10 方位角磁場を考慮したブラックホール降着円盤の熱平衡曲線。横軸は表面密度。

## 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 20 件)

- ① Takahashi, H., Asano, E., Matsumoto, R., Relativistic Expansion of Magnetic Loops at the Self-similar Stage - II. Magnetized outflows interacting with the ambient plasma, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、413 巻、2011、印刷中
- ② Toriumi, S., Miyagoshi, T., Yokoyama, T., Isobe, H., Shibata, K., Dependence of the Magnetic Energy of Solar Active Regions on the Twist Intensity of the Initial Flux Tubes, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、63 巻、2011、407-415
- ③ Hirose, S., Turner, N. J., Heating and Cooling Protostellar Disks, Astrophysical Journal Letters, 査読有、732 巻、2011、L30-L34
- ④ Blaes O., Krolik, J., Hirose, S., Dissipation and Vertical Energy Transport in Radiation-Dominated Accretion Disks, Astrophysical Journal, 査読有、733 巻、2011、110-133
- ⑤ Kigure, H., Takahashi, K., Shibata, K., Yokoyama, T., Nozawa, S., Generation of Alfvén Waves by Magnetic Reconnection, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、62 巻、2010、993-1004
- ⑥ Toriumi, S., Yokoyama, T., Two-step Emergence of the Magnetic Flux Sheet from the Solar Convection Zone, Astrophysical Journal, 査読有、714 巻、2010、505-516
- ⑦ Hotta, H., Yokoyama, T., Solar Parity Issue with Flux-transport Dynamo, Astrophysical Journal Letters, 査読有、714 巻、2010、L308-L312
- ⑧ Oda, H., Machida, M., Nakamura, K.E., Matsumoto, R., Thermal Equilibria of Optically Thin, Magnetically Supported, Two-temperature Black Hole Accretion Disks, Astrophysical Journal, 査読有、712 巻、2010、639-652
- ⑨ Hotta, H., Yokoyama, T., Importance of Surface Turbulent Diffusivity in the Solar Flux-Transport Dynamo, Astrophysical Journal, 査読有、709 巻、2010、1009-1017
- ⑩ Mizuta, A., Kino, M., Nagakura, H., Hysteresis of Backflow Imprinted in

Collimated Jets, Astrophysical Journal Letters, 査読有、709 巻、2010、L83-L87

- ⑪ Takahashi, H.R., Hanawa, T., Matsumoto, R., Extension of the Sweet-Parker Magnetic Reconnection to the Relativistic Plasma, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有、8 巻、2009、246-250
- ⑫ Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Heinzeller, D., Takabe, H., Matsumoto, R., New Spectral State of Supercritical Accretion Flow with Comptonizing Outflow, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、61 巻、2009、769-776
- ⑬ Hirose, S., Blaes, O., Krolik, J.H., Turbulent Stresses in Local Simulations of Radiation-dominated Accretion Disks, and the Possibility of the Lightman-Eardley Instability, Astrophysical Journal, 査読有、704 巻、2009、781-788
- ⑭ Mizuta, A., Aloy, M.A., Angular Energy Distribution of Collapsar-Jets, Astrophysical Journal, 査読有、699 巻、2009、1261-1273
- ⑮ Oda, H., Machida, M., Nakamura, K.E., Matsumoto, R., Thermal Equilibria of Magnetically Supported, Black Hole Accretion Disks, Astrophysical Journal, 査読有、697 巻、2009、16-28
- ⑯ Takahashi, H.R., Asano, E., Matsumoto, R. Relativistic Expansion of Magnetic Loops at the Self-similar Stage, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、394 巻、2009、547-568

[学会発表] (計 101 件)

- ① Matsumoto, R., Global Simulations of Magnetic Energy Release and Dynamos in Accretion Disks, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, 2010 年 12 月 6 日、ホテル日航奈良 (奈良県)
- ② Yokoyama, T., Simulations of a Current Sheet with Initial Finite Perturbations, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, 2010 年 12 月 6 日、ホテル日航奈良 (奈良県)
- ③ Matsumoto, R., Global Magneto-hydrodynamic Simulations of State Transitions in Black Hole Candidates, 4th International MAXI Workshop "The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources", 2010 年 11 月 30 日、青山学院大学 (東京都)

- ④ Matsumoto, R., Global Magneto-hydrodynamic Simulations of Dynamos, Quasi-Periodic Oscillations, and State Transitions in Black Hole Accretion Flows, The Fourth East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 2010年11月4日, Taipei (Taiwan)
- ⑤ 松元亮治, 天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第1回シンポジウム, 2010年9月1日, 東京大学山上会館 (東京都)
- ⑥ Machida, M., Global MHD Simulation of Accretion Flows including Cooling Effects, Relativistic Whirlwind, 2010年6月1日, Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (イタリア)
- ⑦ Matsumoto, R., Global MHD Simulation of Black Hole Accretion Flows and QPOs, Relativistic Whirlwind, 2010年5月31日, Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (イタリア)
- ⑧ 小川崇之, 降着円盤磁気流体シミュレータの開発 (7): 円盤磁場の時間発展, 日本天文学会 2010年春季年会, 2010年3月25日, 広島大学 (広島県)
- ⑨ 松元亮治, 降着円盤磁気流体シミュレータの開発 (6): モジュールの追加, 日本天文学会 2010年春季年会, 2010年3月25日, 広島大学 (広島県)
- ⑩ 松元亮治, Global Magnetohydrodynamic Simulations of Time Variabilities in Black Hole Accretion Flows, 2009 US - Japan Workshop on Reconnection, 2009年10月7日, ウイスコンシン大学マディソン校 (アメリカ)
- ⑪ 松元亮治, 降着円盤磁気流体シミュレータの開発 (5): 円筒座標系 3次元コード, 日本天文学会 2009年秋季年会, 2009年9月16日, 山口大学 (山口県)
- ⑫ Matsumoto, R., Global Magneto-hydrodynamic Simulator of Accretion Disks, 3<sup>rd</sup> East-Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2008年11月10日, 南京 (中国)
- ⑬ Machida, M., Formation of an Inner Torus in Black Hole Accretion Flows, NORDITA Workshop on Turbulence and Oscillations in Accretion Disks, 2008年10月3日～10月17日, Alba Nova University Center (スウェーデン)
- ⑭ 松元亮治, 降着円盤磁気流体シミュレータの開発 (3): スカラー並列計算

機用最適化, 日本天文学会 2008年秋季年会, 2008年9月11日, 岡山理科大学 (岡山県)

- ⑮ Matsumoto, R., Global Simulations of Disk-jet Connection, International Congress on Plasma Physics (ICPP2008), 2008年9月9日, 福岡コンベンションセンター (福岡県)

[その他]

ホームページ等

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

## 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

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

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

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

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

水田 晃 (MIZUTA AKIRA)  
高エネルギー加速器研究機構・研究員  
研究者番号: 90402817  
(H21→H22: 連携研究者)

### (3) 連携研究者

福田 尚也 (FUKUDA NAOYA)  
岡山理科大学・総合情報学部・講師  
研究者番号: 90368613

野澤 恵 (NOZAWA SATOSHI)  
茨城大学・理学部・准教授  
研究者番号: 10261736

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

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

浅野 栄治 (ASANO EIJI)  
京都大学・大学院理学研究科・研究員  
研究者番号: 00456849