

jh140042-NA23

次世代降着円盤シミュレータの開発

松元亮治（千葉大学）

概要 重力を及ぼす天体のまわりに形成される降着円盤の時間発展を計算する 3 次元磁気流体シミュレータを改訂して、その適用範囲を拡大することを目的として、共同研究を実施した。まず、HLLD 法に基づく高次精度の磁気流体コードを実装したシミュレーションソフトウェア CANS+を整備・公開し、シミュレーションスクール等で使用した。また、一般相対論的な 3 次元輻射磁気流体コードを作成してブラックホール近傍のシミュレーションを可能にし、高い降着率を持つブラックホール降着流におけるダイナモ計算やジェット形成に適用した。輻射輸送方程式を各光線方向について解く直接解法の実装、シミュレーション結果に基づく輻射スペクトル計算モジュールの作成も進めている。自己重力計算モジュールを実装した解適合格子法に基づく流体シミュレーションコード SFUMATO の公開を進め、利用者からのフィードバックを加えた改訂を行っている。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

□ 超大規模データ処理系応用分野

□ 超大容量ネットワーク技術分野

□ 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

松元亮治（千葉大学、代表者）、全体統括、
降着円盤シミュレーション実施

片桐孝洋（東京大学・情報基盤センター、
副代表）、陰解法に適用できる並列性能の高
い連立 1 次方程式解法の実装

廣瀬重信（海洋研究開発機構、副代表）
陰的差分を用いた輻射磁気流体コードの並
列性能向上、降着円盤への適用

大須賀 健（国立天文台・理論研究部）
輻射輸送方程式解法の実装、降着円盤シミ
ュレーションへの適用

高橋博之（国立天文台・天文シミュレーシ
ョンプロジェクト）
一般相対論的輻射磁気流体コードの実装、
降着円盤への適用

松本倫明（法政大学・人間環境学部）
AMR 法に基づく自己重力磁気流体コードの
並列性能向上、星形成領域への適用

町田真美（九州大学・大学院理学研究院）

2 温度降着円盤の大局的 3 次元磁気流体数
値実験の実施、スペクトル計算

松本洋介（千葉大学・大学院理学研究科）

シミュレーションコードのチューニング、
コード整備・公開

花輪知幸（千葉大学・先進科学センター）

自己重力磁気流体コードの並列性能向上

中村賢仁（九州産業大学・工学部）

陰的差分を用いた熱伝導モジュールの並列
性能向上、降着円盤への適用

川島朋尚（国立天文台）

超臨界降着流の輻射スペクトル計算

朝比奈雄太（千葉大学・大学院理学研究科）

一般相対論的輻射磁気流体コードの実装、
降着円盤、ジェット形成への適用

工藤祐己（千葉大学・大学院理学研究科）

陰的差分を用いた熱伝導モジュールの並列
性能向上、降着円盤への適用

谷田部紘希（千葉大学・大学院理学研究科）

降着円盤状態遷移シミュレーションの実施

中島研吾（東京大学・情報基盤センター）

陰解法に適用できる並列性能の高い連立 1
次方程式解法の実装、並列性能向上

松本正晴（東京大学・情報基盤センター）

陰解法に適用できる並列性能の高い連立 1
次方程式解法の実装、並列性能向上

2. 研究の目的と意義

本共同研究の目的は、重力を及ぼす天体の周りに形成される降着円盤の時間発展を計算する 3 次元磁気流体シミュレータを改訂して、その適用可能範囲を拡大することにある。降着円盤では磁気ストレスに起因する角運動量輸送や輻射と物質の相互作用などを考慮する必要があり、磁場と輻射を考慮した輻射磁気流体シミュレーションが必要になる。我々は、これまでの共同研究によって輻射輸送方程式を角度方向に積分したモーメント式を差分法によって解く解法を実装してきた。

本研究では一般相対論化した輻射磁気流体コードをシミュレータに実装し、ブラックホール近傍のシミュレーションに適用可能にする。次世代のエクサフロップス計算機を視野に入れて吸収・散乱を考慮した輻射輸送方程式を角度積分せずに各光線方向について解く解法を実装すること、シミュレーション結果をもとに輻射スペクトルを計算するモジュールを実装することも目的とする。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

輻射の時間スケールが力学的時間スケールに比べて短い系では輻射場の計算に陰解法を用いるため、大規模な連立方程式を解く必要がある。また、星形成や活動銀河中心核円盤等、自己重力を考慮する必要がある場合はポアソン方程式の解法の効率を高めることも必要である。本研究では、並列効率の高い陽的差分法に基づくコード開発に加え、差分法向けに最適化された行列解法ライブラリを開発している東京大学情報基盤センターの中島研吾氏らとの共同研究によって、輻射場、重力場の陰的解法の並列効率を高めることを目指す。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

昨年度まで実施していた共同研究「天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション」では、輻射輸送方程式を角度方向に積分した 0 次、1 次のモーメント式を解く 1 次モーメント法 (M1 法) に基づく特殊相対論的輻射磁気流体コードを実装して球対称降着流の上限光度であるエディントン光度

に対応する降着率 (臨界降着率) よりも高い降着率でブラックホールにガスが落下する超臨界降着流のシミュレーションに適用し、輻射圧で加速され、磁場によって絞られたジェットが噴出することを示した。また、一般相対論的な輻射磁気流体コードのテスト計算を実施した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) CANS+コードの整備

次世代降着円盤シミュレータの基盤となる磁気流体コードの実装、並列計算におけるコードの最適化を進めた。それらを整備し、典型的な天体磁気流体現象の初期条件、境界条件等をあらかじめ準備してシミュレーションを簡便に実行できるようにした基本課題モジュール群と磁気流体方程式の時間発展を差分法によって数値的に解くシミュレーションエンジンをパッケージ化した CANS+ <http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/cans/>

を公開した。CANS+の特徴として、

- 近似リーマン解法 HLLD をベースとした有限体積法 (Miyoshi & Kusano, 2005)
- MP5 法を用いた高次精度 (空間 5 次精度) の数値補間法 (Suresh & Huynh, 1998)
- 数値的単極磁場を取り除くための hyperbolic divergence cleaning 法 (Dedner et al., 2002) が挙げられる。これらを実装することにより降着円盤で重要な物理過程である圧縮性磁気流体乱流

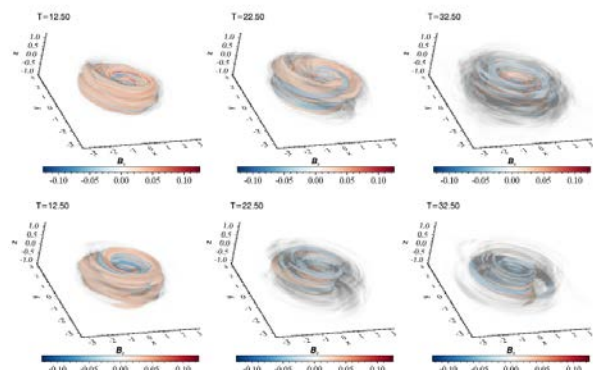


図 1 : CANS+コードによる降着円盤の磁気流体シミュレーション結果。左から右に向かって時間発展している。色はトロイダル磁場成分を表す。上の段は空間 5 次精度の MP5 法、下の段は 2 次精度の MUSCL 法による計算結果を示す。

を減衰させることなく降着円盤の長時間発展を追うことが可能になった。

図 1 は降着円盤の時間発展を MP5 法と 2 次精度の MUSCL 法で比較したものである。ともに、ダイナモ効果による大局的磁場成分の反転（赤→青）が得られているが MP5 法では長時間経過後も円盤構造と磁気乱流が維持されている。

(2) 一般相対論的 3 次元輻射磁気流体コード

我々はこれまで特殊相対論的輻射磁気流体コードを用いて球対称降着流の上限界光度（エディントン光度）に対応する臨界降着率より高い降着率でブラックホールに質量が供給される超臨界円盤からのアウトフローの生成と加速について研究を行ってきた。しかしこの計算ではブラックホールによる重力はニュートン近似を用いて記述していた。そのためブラックホール近傍の物理、特に円盤の内縁半径がどこにあるのか、そしてブラックホールの回転が円盤構造に影響を与えるのか、といった疑問には答えられていなかった。また軸対称を仮定して計算していたため、ガス降着を考える上で必須である円盤内乱流を正しく扱う事ができないという問題があった。

これらの問題を解決すべく我々は 3 次元一般相対論的輻射磁気流体コードを作成した。基礎方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \partial_t(\sqrt{-g}\rho u^t) + \partial_j(\sqrt{-g}\rho u^j) &= 0, \\ \partial_t(\sqrt{-g}T_v^t) + \partial_j(\sqrt{-g}T_v^j) &= \sqrt{-g}T_v^k \Gamma_{vk}^\lambda + \sqrt{-g}G_{vk}, \\ \partial_t(\sqrt{-g}R_v^t) + \partial_j(\sqrt{-g}R_v^j) &= \sqrt{-g}R_v^k \Gamma_{vk}^\lambda - \sqrt{-g}G_{vk}, \\ \partial_t(\sqrt{-g}B^i) &= -\partial_j[\sqrt{-g}(b^j u^i - b^i u^j)] \end{aligned}$$

上から順に質量保存、磁気流体・輻射のエネルギー・運動量保存式、誘導方程式である。 $\sqrt{-g}$, $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$ はメトリックの行列式とクリストッフエル記号で、重力やブラックホールの回転の効果を表す。

輻射場は輻射強度を運動量空間で積分したモーメント量 $R^{\mu\nu}$ によって定式化され、以下の M1 クロージャーを用いて方程式は閉じる

$$R^{\mu\nu} = \frac{4}{3} E_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3} E_R g^{\mu\nu}.$$

ここで $E_R, u_R^\mu, g^{\mu\nu}$ はそれぞれ輻射エネルギー密度、

輻射 4 元速度、メトリックである。輻射とガスは吸収・散乱過程により輻射 4 元力 G^μ を通じてエネルギー・運動量をやり取りする。従ってこれらの式を解くことでガスと輻射を無矛盾に決定する事ができる。重力を表すメトリックは時間に依存せず、シュバルツシルト半径で発散しない Kerr-Schild メトリックを用いた。

このコードを降着円盤の大局的シミュレーションに適用した結果を図 2 に示す。ボリュームでレンダリングした色(青-赤)は密度を表し、線は磁力線を表す。初期条件として太陽の 10 倍の質量の無回転ブラックホール近傍にトーラスを置き、円盤内にはポロイダル磁場が配位されている。円盤内赤道面の密度は 0.1g/cm^3 程度である。計算開始後、軸対称モードの磁気回転不安定性が成長し、角運動量を円盤外縁へと輸送する事でガス降着が始まる。計算開始後 $t=0.02\text{s}$ 程度で降着円盤はブラックホールへ達し、その後準定常的にガスが降着する。ガス降着率は臨界降着率の 1000 倍程度である。円盤内は輻射エネルギーが卓越し、輻射圧、磁気圧、ガス圧の比は $100:10:1$ である。また円盤からはアウトフローが形成され、その速度は $0.3c$ 程度となる(図 2, 上下にのびる青い領域)。これらの結果はこれまでの特殊相対論的輻射磁気流体シミュレーション結果と矛盾は無い事が確かめられた。

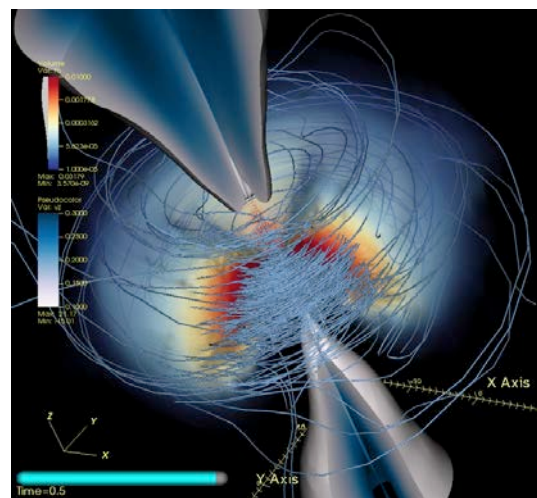


図 2：一般相対論的輻射磁気流体計算結果。青-赤のレンダリングデータは密度、線は磁力線、上下にのびる青いボリュームデータはアウトフロー速度を表す。

また、これまで取り扱う事ができなかった効果として 3 次元効果がある。図 3 は $r=10r_g$ での (r_g はシュバルツシルト半径) トロイダル磁場の時間変化を示す。トロイダル磁場の極性が時間と共に変化していることがわかる。これは円盤内でダイナモ機構が働き、定常的な磁場増幅が起きていることを示している。このようなダイナモ機構が一般相対論効果を含めた輻射磁気流体計算でわかったのは初めてである。

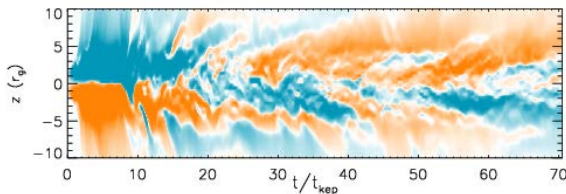


図 3: $r=10r_g$ でのトロイダル磁場の時間進化。オレンジと青はそれぞれケプラー回転方向に対して順方向と逆方向の磁場を表す。

円盤内はガス密度が高く、吸収・散乱に対して光学的に厚いためにガスと輻射が熱平衡状態にあり、その温度は 1 億程度となる。ブラックホール近傍ではガス温度と輻射温度の間にズレが生じ、ガス温度は 100 億程度まで上がる(図 4 左上)。この輻射温度とガス温度がずれる半径が円盤の内縁半径と見なせる。従来の理論的考察ではこの半径はガスがブラックホールの周りをケプラー回転できる限界の半径 (Innermost Stable Circular Orbit, ISCO) で決まっていたと考えられていた。

今回の計算の結果、円盤内縁半径は ISCO よりも外側にあり、磁場形状に依存する事がわかった。子午面内の磁場が強い場合、磁気回転不安定性によって方位角磁場が作られる。この方位角磁場と子午面磁場によって強い角運動量輸送が働き、ガスはブラックホールへと素早く落ちることができる。その結果、ガスと輻射は熱平衡にならず、ブラックホール近傍に高温ガス雲が形成される。一方トロイダル磁場が優勢な場合、磁気トルクは比較的弱く、ガスと輻射は熱平衡になりやすいため、円盤内縁半径は内側へと移動する事が解った。

高効率の角運動量輸送によって高温ガス雲がブラックホール近傍に形成されると、円盤から放射

された軟 X 線が高温ガスによって逆コンプトン散乱されることにより、観測される硬 X 線を作り出すと考えられる。

このように、磁気的な角運動量輸送率増加に伴うガス温度と輻射温度のずれに起因する高温プラズマによって硬 X 線起源を説明するモデルはこれまでに無く、ガスだけでなく輻射、磁場、重力と行った全ての物理を無矛盾に扱うことで得られた新しい知見である。

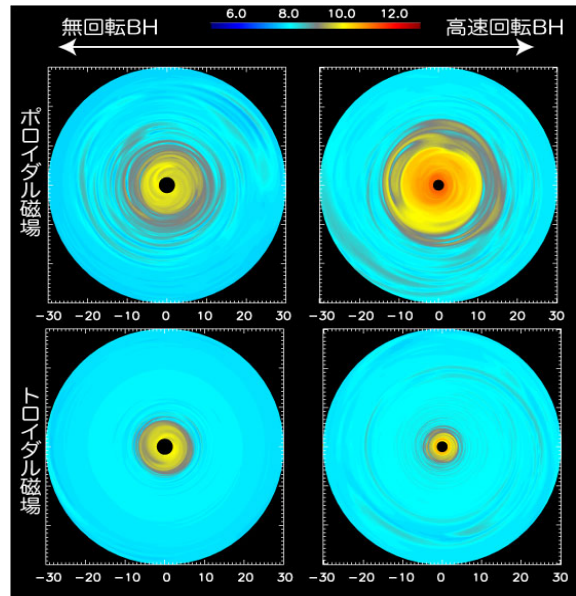


図 4: 赤道面のガス温度分布。左は無回転、右は高速回転するブラックホールの結果。上下は初期磁場配位の違い(上はポロイダル磁場、下はトロイダル磁場)を示す。

(3) 自己重力 AMR コード SFUMATO の試験公開
解適合格子法 (AMR) に基づく自己重力流体コード SFUMATO をコミュニティの一部に試験的に公開した。このコードにはポアソン方程式を、マルチグリッド法を用いて解くモジュールが実装されており、ガス系の自己重力が重要になる星形成や活動銀河中心核、ブラックホールによる恒星の潮汐破壊事象のシミュレーション等に適用することができる。ユーザの一部では既に科学的な成果が出始めている。また、開発者が想定していない計算モデルに利用されることにより、SFUMATO コードの仕様に不具合があることが報告された。これらのユーザからのフィードバックにもとづいて、SFUMATO コードの仕様の変更を検討した。

SFUMATO コードを用いて実施した集団的星形成のシミュレーションでは、ベースグリッドが 512^3 メッシュという比較的大規模な計算においても、現実的な計算が可能であることを示した。また、シンク粒子法を実装し、シンク粒子数が 1000 個程度の場合でも現実的な計算時間で計算を実施可能にした。分子雲コアの分裂のシミュレーションでは、乱流をともなった分子雲コアが重力収縮中に分裂して多重星系を形成し、多重星の周囲に擾乱が伝播してアーク状の構造が形成されることを確認した。このようなアーク状の構造は、最近の ALMA 望遠鏡による観測で発見された。このシミュレーションでは自己重力 AMR の特性を活かして高解像を可能にただけではなく、前述のシンク粒子法によって長時間の進化を追跡可能にした。

連星のガス降着のシミュレーションでは、連星を取り囲む円盤である周連星円盤を調べた。連星に向かって落下するガスは角運動量を持っているため、直接連星に落下せずに、一旦周連星円盤に落下する。連星からの重力トルクによって、周連星円盤には渦状腕が形成される。このような渦状腕は、最近の ALMA 望遠鏡による観測で発見された。このシミュレーションでは AMR の特性を活かし、従来よりも高解像なシミュレーションを実現した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

開発した高次精度の磁気流体コードは CANS+ として整備し、公開されている。また、本年度千葉大で開催した「宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクール」で CANS+ を使った演習を行い、シミュレーション初心者にも使いやすいコードとして利用されている。今後は、本研究グループで開発した輻射磁気流体方程式のソルバー等を CANS+ に実装して公開することにより、コミュニティの幅広いニーズに応えていく予定である。

昨年度から開発してきた一般相対論的輻射磁気流体コードを用いて 3 次元計算を行うことで、ブラックホール超臨界降着円盤の 3 次元構造がわかってきた。特に、磁場による角運動量輸送効率

が高く、降着時間スケールが短くなる場合、ブラックホール近傍においてガス温度が輻射温度よりかなり高くなる領域が出現することが明らかになった。ブラックホールの回転の効果を取り入れたコードも実装され、ブラックホールの回転による有効ポテンシャルの変化がジェットやアウトフローのダイナミクスに及ぼす影響を調べるのが可能になった。

シミュレーション結果に基づく輻射スペクトル計算について、現在、効率の良い疑似乱数の生成アルゴリズムである Mersenne twister 法をこれまでわれわれが用いてきたモンテカルロ法に基づく特殊相対論的輻射スペクトル計算コードに実装中である。また、輻射磁気流体シミュレーション結果を用いて輻射スペクトルを計算する際に、シンクロトロン放射を考慮する計算モジュールを実装してテスト中である。今後は、このコードを CANS+ の解析用モジュールとして整備し、公開していく予定である。

ブラックホールの近傍では一般相対論的效果を考慮した輻射スペクトル計算をすることが必要不可欠である。今年度は一般相対論的輻射スペクトル計算コードの開発に着手し、測地線方程式を 4 次精度 Runge-Kutta 法で解く計算モジュールを作成した (図 5 参照)。今後、より効率的に正確な解を求めるために、adaptive stepsize control algorithm により積分の stepsize を変化させながら計算する embedded Runge-Kutta method に変更する。この embedded Runge-Kutta method にはいくつか種類があるので (Fehlberg 1970, Dormand & Prince 1980, Cash & Karp 1990)、実際に測地線方程式を解いて性能評価を行い、最適な方法を採用する。今後はこの計算モジュールをこれまでに用いてきた輻射スペクトル計算コードに実装し、一般相対論的輻射スペクトル計算コードを完成させブラックホール降着流の輻射スペクトルを計算する予定である。

輻射輸送方程式を各光線方向について解く直接解法コードの実装とテスト計算も進展している。

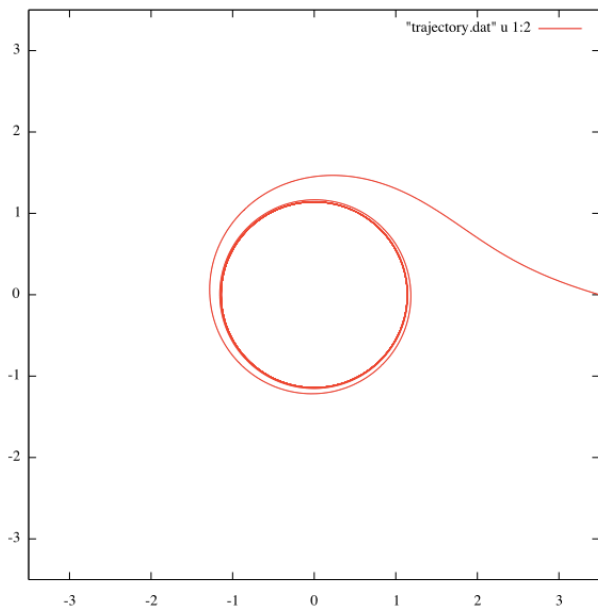


図 5：反時計回りに回転するブラックホール近傍の光子軌道のテスト計算結果。長さの単位はブラックホール質量。回転ブラックホールによる時空の引きずりにより光子は回転しながらブラックホールに吸い込まれていく。

自己重力 AMR コード SFUMATO について、今後は磁場を考慮したシミュレーションを遂行し、星形成における磁場の役割について定量的に調べる。磁場はすでに SFUMATO コードに実装済である。分子雲スケールのシミュレーションである集団的星形成のシミュレーションでは、とくに両極性拡散による磁場の散逸が重要になる。そこで SFUMATO への両極性拡散の実装についても今後検討する。SFUMATO コードの公開にともなうユーザからのフィードバックを検討し、SFUMATO コードをさらに発展させるべく、開発を継続する。

以上のように陽的差分に基づく磁気流体コード、ポアソンソルバーを実装した自己重力流体・磁気流体 AMR コード、回転ブラックホールに適用可能な一般相対論的輻射磁気流体コード、シミュレーション結果に基づく輻射スペクトル計算コードの開発と降着円盤シミュレータへの実装は順調に進んでいる。今後は、super time stepping 法を用いた陽的な熱伝導モジュールの実装、輻射輸送方程式の直接解法の実装と、陰的解法の高速度化についての研究を加速する。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- H. R. Takahashi, K. Ohsuga, ‘Radiation Drag Effects in Black Hole Outflows from Super-critical Accretion Disks via Special Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations’, Publ. Astron. Soc. Japan 印刷中
- K. Hashizume, K. Ohsuga, T. Kawashima, and M. Tanaka, ‘Radiation Hydrodynamics Simulations of Wide-angle Outflows from Super-critical Accretion Disks around Black Holes’, Publ. Astron. Soc. Japan 印刷中
- S. Hirose, ‘Magnetic turbulence and thermodynamics in the inner region of protoplanetary discs’, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 448, 3105–3120, 2015
- T. Matsumoto, T. Onishi, K. Tokuda, S. Inutsuka, ‘An origin of arc structures deeply embedded in dense molecular cloud cores’, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. Letters, 449, L123–L127, 2015
- T. Matsumoto, K. Dobashi, T. Shimoikura, ‘Star Formation in Turbulent Molecular Clouds with Colliding Flow’, Astrophys. J. 801, article id. 77 (21pages), 2015
- Y. Asahina, T. Ogawa, T. Kawashima, N. Furukawa, R. Enokiya, H. Yamamoto, Y. Fukui, and R. Matsumoto, ‘Magnetohydrodynamic Simulations of a Jet Drilling an HI Cloud: Shock Induced Formation of Molecular Clouds and Jet Breakup’, Astrophys. J. 789, article id. 79 (11pages), 2014
- S. Hirose, O. Blaes, J.H. Krolik, M.S.B. Coleman, T. Sano, ‘Convection Causes Enhanced Magnetic Turbulence in Accretion Disks in Outburst’, Astrophys. J. 787, article id 1(14pages), 2014
- K. Dobashi, T. Matsumoto, T. Shimoikura, H. Saito, K. Akisato, K. Ohashi, K. Nakagomi,

‘Colliding Filaments and a Massive Dense Core in the Cygnus OB 7 Molecular Cloud’, *Astrophys. J.* 797, article id. 58 (22pages), 2014

- S. Takakuwa, M. Saito, K. Saigo, T. Matsumoto, J. Lim, T. Hanawa, P.T.P. Ho,, ‘Angular Momentum Exchange by Gravitational Torques and Infall in the Circumbinary Disk of the Protostellar System L1551 NE’, *Astrophys. J.* 796, article id. 1 (17pages), 2014

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

- T. Kawashima, T. Ogawa, T. Ono, H. Oda, R. Matsumoto, ‘X-ray Flares Induced by the Magnetic Reconnection in Black Hole Accretion Flows’, MR2014, Tokyo, Japan, May, 20-22, 2014
- R. Matsumoto, Y. Kudoh, Y. Asahina, M. Machida, T. Kawashima, ‘Global Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Dynamos’, MR2014, Tokyo, Japan, May 20-22, 2014
- T. Kawashima, T. Ogawa, T. Ono, H. Oda, R. Matsumoto, ‘Three-Dimensional MHD simulations of Disk Dynamos’, 4th East Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, Harbin, China, July 28-August 1, 2014
- S. Hirose, ‘Radiation MHD Simulations of Accretion Disks’, in 4th East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, Harbin Institute of Technology, July 28-August 1, 2014
- S. Hirose, ‘Magnetic turbulence in inner radii of protoplanetary disks’, in Non-ideal MHD, Stability, and Dissipation in Protoplanetary Disks, Niels Bohr Institute, August 4-8, 2014

(4) 国内会議発表

- 川島朋尚、大須賀 健、松元亮治 「巨大ブラックホールによる潮汐破壊事象の磁気流体・輻射流体数値実験」地球惑星科学連合 2014 年大会、パシフィコ横浜、2014 年 5 月
- 廣瀬重信、「熱対流によって強められる磁気乱流」、乱流研究のフロンティア(京大 数理解析研究所 RIMS 研究集会)、京都大学数理解析研究所, 2014 年 7 月 23-25 日
- 高橋博之、’Relativistic Magnetic Reconnection’, 超新星/ガンマ線バースト研究会 2014、理化学研究所、2014 年 8 月 25 日-27 日 (invited)
- 高橋博之、大須賀健、「超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション」、日本天文学会秋季年会、山形大学、2014 年 9 月 11 日
- 松本倫明、土橋 一仁、下井倉ともみ、「乱流と衝突をともなう高密度分子雲における集団的星形成」、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学、2014 年 9 月
- 川島朋尚、松元亮治、「ブラックホール降着流を通過するガス雲による降着率変化」日本流体力学会年会 2014、東北大学、2014 年 9 月
- 高橋博之、大須賀健、’Numerical Study of Supercritical Accretion Disks’, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ、新潟、2014 年 11 月 20 日
- 川島朋尚、松元亮治、「ブラックホール降着流とガス雲の相互作用による質量降着率と磁場の時間変化」、Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ、新潟、2014 年 11 月 21 日
- 高橋博之、大須賀健、関口雄一郎、川島朋尚、「ブラックホール降着円盤の 3 次元一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション」、第 27 回 理論懇シンポジウム、2014 年 12 月 24 日-26 日
- 松本倫明、土橋 一仁、下井倉ともみ、「乱流と衝突をともなう高密度分子雲における集団的星形成 II」、日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2015 年 3 月
- 松本倫明、徳田一起、大西利和、犬塚修一郎、

「分子雲コアの中心に存在するアーク構造の起源」日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2015 年 3 月

- ・ 廣瀬重信, FU Ori アウトバーストと原始惑星系円盤の熱不安定について, 日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015 年 3 月 19 日
- ・ 川島朋尚, 松元亮治, 「ガス雲の通過に伴う銀河中心ブラックホール高温降着流の光度変化」日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2015 年 3 月 20 日
- ・ 高橋博之, 大須賀健, 関口雄一郎, 川島朋尚, 「一般相対論的輻射磁気流体計算で探る高降着率円盤構造」、日本天文学会春季年会、大阪大学、2015 年 3 月 21 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

(プレス発表)

双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻き、2014 年 12 月 4 日、高桑繁久、斎藤正雄、西合一矢、松本倫明、Jeremy Lim, 花輪知幸、Paul T.P. Ho、国立天文台