

jh150034-NA21

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回転円盤（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の適用範囲を拡大することを目的として、共同研究を行った。まず、高温領域と低温領域が共存する降着流において重要になる熱伝導項を陽的差分によって扱う **super time stepping** 法に基づく熱伝導モジュールを実装した。また、一般相対論的な輻射磁気流体コードを回転ブラックホール降着流に適用し、硬 X 線を放射する高温領域が形成されることを示した。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を実施し、輻射場・重力場の陰解法ソルバーの並列性能向上についても検討した。

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）
輻射輸送方程式直接解法の実装、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）

輻射磁気流体コードの実装

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（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、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）

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）

Super time stepping を用いた熱伝導モジ
ュールの実装

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し、降着円盤の理論シミュレーション研究において世界を牽引することにある。

本研究ではまず、昨年度までの共同研究で開発した、一般相対論化した輻射磁気流体コードをブラックホールの周りの降着流に適用することにより、ブラックホールの回転が降着円盤からの輻射やジェット形成に及ぼす影響を明らかにする。本グループはこの分野において先駆的な成果をあげてきたが、同様なコードが米国においても開発され、国際競争が激しくなってきた。この競走に勝ち残るため、チームの力を結集した取組を行う。次世代のエクサフロップス計算機を視野に入れ、輻射輸送方程式を角度積分せず各光線方向について解く解法の実装にも取り組む。

本研究ではまた、輻射や熱伝導の時間スケールが力学的時間スケールに比べて短い系を扱うことができるシミュレーションコードの効率を高めることを目指す。第一のアプローチとして、陽的な差分法の安定性条件から決まる時間刻みの上限よりも長い時間刻みを用いることができる **super time stepping** 法を適用する。この解法は陽的な解法であるため、コア数が多い場合でも高い並列効率を維持できる。第二に、輻射場や重力場の計算に陰解法を適用する際にあらわれる大規模連立方程式を解くマトリクスソルバーの効率改善を図る。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

東京大学情報基盤センターの中島研吾氏らと定期的に打合せを実施して同氏らによって開発されてきたマトリクスソルバーを輻射場、重力場の陰解法に適用する作業を進めた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

磁気流体方程式の差分解法として HLLD 法 (Miyoshi and Kusano 2005) に基づく高次精度のシミュレーションエンジンを実装した宇宙磁気流

体シミュレーションソフトウェア CANS+を整備・公開し、降着円盤の大局的 3 次元シミュレーションに適用可能にするとともに、シミュレーションスクール等の教材等として活用した。

輻射と物質の相互作用が重要になる場合に適用可能な輻射磁気流体コードとして、輻射輸送方程式を角度方向に積分したモーメント式を解く 1 次モーメント法 (M1 法) に基づく相対論的な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、輻射圧で加速されて噴出するジェットに輻射抵抗が及ぼす影響等を明らかにした。

また、この輻射磁気流体コードを一般相対論的な輻射磁気流体コードに拡張してブラックホール降着円盤の時間発展を調べ、方位角磁場が準周期的に反転する円盤ダイナモが発生することを明らかにした。輻射輸送方程式を各光線方向について解く輻射輸送の直接解法の実装にも着手した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) Super Time Stepping 法を用いた熱伝導方程式の陽的解法の実装

低温領域と高温領域が共存する降着円盤では熱伝導を考慮することが必要になる。熱伝導の時間スケールが円盤の回転タイムスケール等に比べて短い場合、熱伝導方程式に陽的差分法を適用すると安定条件を満たす時間刻みが短くなり、計算に多くのタイムステップを要する。他方、陰的差分を適用した場合には並列効率が低下する。そこで、太陽大気シミュレーション等で用いられている Super Time Stepping 法に基づく熱伝導モジュールを実装した。

採用した解法は Meyer et al. (2014) による時間 2 次精度の Runge-Kutta-Legendre 法である。この解法では微分方程式 $du/dt=Lu(t)$ を、多項式 R_s を用いて $u(t+\tau)=R_s(\tau L)u(t)$ のように近似的に解く。ここで、 $R_s(z)=a_s+b_sP_s(1+w_1z)$ は $|R_s(z)|<1$ を満たす関数、 P_s は s 次のルジャンドル多項式で

ある。 $R_s(\tau L)$ が $\exp(\tau L)=1+(\tau L)+(\tau L)^2/2+\dots$ と時間 τ について 2 次の項まで一致するように a_s, b_s, w_1 等を決定することにより、時間 2 次精度の解法が得られる。

この方法により数値的に安定に解を求めることができる時間刻みの上限 τ_{\max} は $\tau_{\max} = \Delta t / w_1 = \Delta t (s^2 + s - 2) / 4$ で与えられる。ここで Δt は陽的差分法によって安定に計算可能な時間刻みの最大値である。たとえば $s = 10$ とすれば時間刻みを Δt よりも 25 倍大きく選ぶことができる。この熱伝導モジュールを磁場方向に依存する非等方熱伝導問題に適用した。図 1 にブラックホール降着流における高温円盤 (ハードステート) から低温円盤 (ソフトステート) への状態遷移過程の軸対称 2 次元磁気流体シミュレーションに適用した例を示す。左図は熱伝導を考慮しない場合、右図は熱伝導を考慮した場合の温度分布である。低温領域を囲む高温コロナからの熱伝導により、熱伝導を考慮した場合、低温円盤と高温コロナの境界が広がり、赤道面付近の温度も高くなっている。

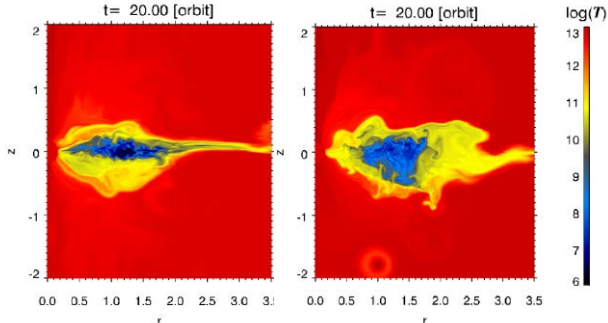


図 1 : ブラックホールへの軸対称降着流における高温円盤から低温円盤への状態遷移の磁気流体計算例。カラーは温度分布。左 : 熱伝導を考慮しない場合。右 : 熱伝導を考慮した場合。長さの単位は $10r_s$ 。

(2) 回転ブラックホール近傍の降着流シミュレーションの実施

昨年度実装した 1 次モーメント法 (M1 法) に基づく一般相対論的輻射磁気流体コードを回転ブラックホール近傍の物理、特に硬 X 線放射領域の形成機構の 3 次元シミュレーションに適用した (Takahashi et al. 2016 ApJ in press)。図 2 に

太陽の 10 倍の質量のブラックホールのまわりに形成される降着円盤の大局的シミュレーション結果を示す。この計算例では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熱平衡状態にあり、その温度は 1 千万度程度となる。

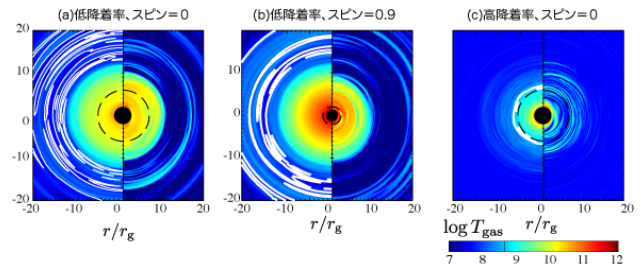


図 2 赤道面のガス温度の分布。ガス温度と輻射温度の比が 10 倍となる箇所を白い線で示す。黒い破線は最終安定軌道半径。

ブラックホール近傍では降着時間が冷却時間よりも短くなるため円盤物質の冷却効率が低下し、ガス温度が 100 億度程度まで上がることが明らかになった (図 2)。このような高温領域では円盤から放射された軟 X 線が逆コンプトン散乱されて硬 X 線が放射される。冷却時間はガス密度に反比例するため、降着率が増加してガス密度が増えるにしたがって円盤ガスは冷えやすくなり、高温領域のサイズは小さくなることがわかった (図 2 右図)。

ブラックホールの回転の効果を調べたところ、高速回転するブラックホールの場合、高温領域の温度がより高くなることが明らかになった (図 2 中央図)。これは、回転エネルギーの一部が円盤加熱に用いられているためだと思われる。回転するブラックホールのエルゴ領域を磁場が貫くと時空の引きずりによって磁場が捻られ、回転エネルギーの一部が磁気圏に輸送される。この機構は Blandford Znajek (BZ) 機構と呼ばれ、ジェット形成に重要な役割を果たすと考えられている。解析の結果、BZ 機構によって運ばれる回転エネルギーの大部分はアウトフロー方向へと運ばれるが、一部円盤へと運ばれる事が解った。そのエネルギーフラックスはブラックホール近傍における降着ガスのエネルギーフラックスよりも大きい。このことから回転エネルギーの一部が磁気エネルギーと

して円盤へ運ばれ、散逸により円盤加熱へと寄与していると考えられる。

(3) 中性子星への超臨界降着シミュレーション
 高降着円盤は膨大なエネルギーを解放するため、ブラックホールの様なエネルギーを吸い込む天体では可能であるが、中性子星の様な硬い表面がある天体では難しいと考えられていた。しかし 2015 年に X 線で非常に明るく輝く天体から X 線パルスが発見され、この中心天体が中性子星である事が解った。つまり中性子星への超臨界降着が可能である事が観測的に解ったのである。

そこで中性子星への超臨界降着を理論的に説明できるか、そして可能である場合に観測される光度を説明できるか、を調べるため、一般相対論的輻射磁気流体計算を行った。図 3 にその結果を示す。左は中性子星、右はブラックホールの場合の計算結果である。それぞれのパネルの左右のカラーはガス密度と輻射エネルギー密度、カラーの線はガスと輻射場の流線、白線は光球面を示す。

まずこの図から中性子星への超臨界降着が可能である事が解る。赤道面から降着するガスは中性子星表面に堆積し、高密度領域を作る。輻射エネルギーも中性子星表面に溜められるが、より光学的に薄い上空へと運ばれていく。このエネルギーは膨大なため、その輻射圧によって光球面の内側からも強いアウトフローが作られる事が解る。その結果、ガス供給量が同程度でもブラックホールに比べて中性子星からは非常に強いアウトフローが作られる。同時に非常に明るく輝くため、2015 年に観測された中性子星の光度を説明できる。

この計算では中性子星の回転は無視していたが、アウトフローのパワーは中性子星の回転にあまり依らないことも解った。一方でブラックホールが回転している場合、Blandford & Znajek 効果によってブラックホールの回転エネルギーが引き抜かれるため、さらに強いパワーを持つ事が解った。従って降着率を同程度とした場合、アウトフローのパワーは高速回転ブラックホール>中性子星>無回転ブラックホールとなる事が解った。

ただしこの計算では中性子星自身が持つ磁場を無視していた。強磁場中性子星ではアルヴェーン半径が中性子星半径を超えるため、中性子星自身の磁場が円盤構造やアウトフロー構造に影響を与える可能性がある。これは今後の課題である。

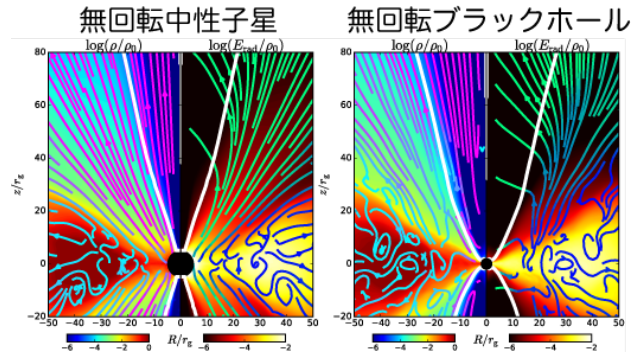


図 3 中性子星(左)とブラックホール(右)への超臨界降着の様子。左右のカラーはガス密度と輻射エネルギー密度、線はガスと輻射場の流線、白線は光球面を示す。

(4) 輻射輸送方程式の直接解法の実装

輻射輸送方程式を運動量空間で積分し、輻射場をモーメント量によって記述する近似は計算量を劇的に軽減する事ができる。しかし、モーメント量による記述は(a)光線同士が衝突して非物理的な衝撃波を作る、(b)光の伝搬方向と光のエネルギーの伝搬方向のずれを考慮することができない、といった弱点がある。これらはジェットやアウトフローの構造、円盤表面での反射光を扱う際に問題になる。

そこで我々は各光線方向について特殊相対論的輻射輸送方程式を解く数値解法を開発している。空間 3 次元に加え、光線方向について 2 次元の自由度を残し、輻射輸送方程式を振動数空間で積分することにより、5 次元問題としている。基礎方程式は以下の通りである

$$\partial_t I + n^i \partial_i I = q^{-3} \left[\chi_a B - q^4 (\chi_a + \chi_s) I + \frac{\chi_s}{4\pi} E_{r,0} \right] \quad (1)$$

ここで I , B は振動数空間で積分された輻射強度と黒体放射強度, $E_{r,0} = \int I_0 d\Omega_0$ は共同座標系でみた輻射エネルギー密度, n^i は光子の伝搬方向, χ_a, χ_s

は吸収、散乱オパシティ、 $q = (1 - n_j v^j) / \sqrt{1 - v^2}$ はドップラー因子である。簡単のため散乱は等方的であると仮定したが、トムソン散乱を考慮することもできる。なお、式(1)は $E_{r,0}$ に積分が含まれているため、微積分方程式になっている。

式(1)の左辺は光子の伝搬を記述し、典型的時間は光の横断時間程度である。ブラックホール降着円盤ではガスや波の運動速度が光速近くで伝搬するため、これらの項は陽的に時間積分可能である。一方、右辺は吸収や散乱を記述しており、光学的に厚い場合にその時間スケールは力学的時間より短く、硬い方程式になる。そこで operator splitting を使い、右辺のみ陰解法を適用する。こうすることで空間全体に渡る行列反転は不要となり、計算コストは激減する。ただし右辺の散乱については積分が入るため、光線方向を N_i とした場合、各空間グリッド上で $N_d \times N_d$ の密行列の反転が必要となる。等方散乱の場合、行列はシンプルになり、その計算量はたかだか N_d 程度となる。

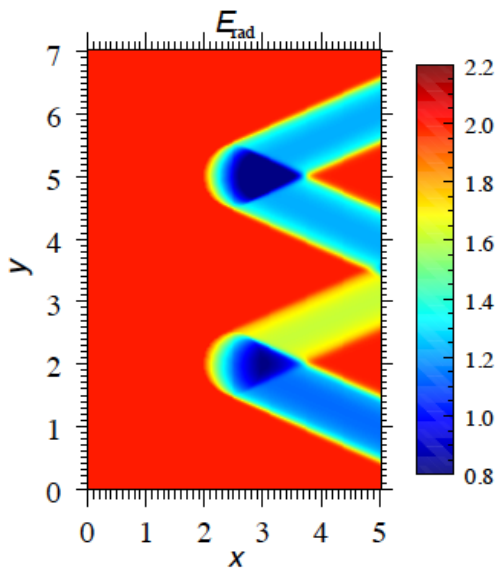


図 4 振動数空間で積分した特殊相対論的輻射輸送の数値計算結果。上下、左の境界から右上、右下に向かって光を照射する。 $(x,y)=(3,2)$, $(3,5)$ には光の吸収体がある。吸収体の背後にそれぞれ 2 つの影が見て取れる。

図 4 に計算例を示す。この計算では上下と左の境界から、右上、右下 22.5° 方向に輻射を注入した。 $(x,y)=(3,2)$, $(3,5)$ には 2 つの吸収体がある。

吸収体の背後にはそれぞれ影が出来ている事が解る。さらに 2 つの吸収体の影を見比べると下の吸収体にできた 2 つの影に明るさの違いが見て取れる。これは吸収体が光速に近い速度を持っており、光子と吸収体の運動方向の違いによって吸収の強さが異なるため (ドップラー効果) である。

(5) 輻射スペクトル計算コードの開発

シミュレーションによって得られた密度、温度分布のもとでモンテカルロ法を用いて光子輸送を計算する一般相対論的輻射スペクトル計算コードを開発している。測地線方程式を解いて光子軌道を計算するスキームとして 5 次および 8 次の embedded Runge-Kutta 法 (adaptive stepsize control アルゴリズムにより積分のステップ幅を変化させながら計算する Runge-Kutta 法)を用いた光子軌道計算モジュールを作成した (図 5)。

ブラックホールに近づくにつれて光子はブラックホールのスピンによる時空の引きずり効果で方位角成分を増加させつつ、かつ強重力によりブラックホールに引き付けられるため、ブラックホール上空の北極と南極付近の両方を通過する軌道を描く。特異点(北極と南極)付近の軌道もこのコードで安定に解けていることが確認できた。

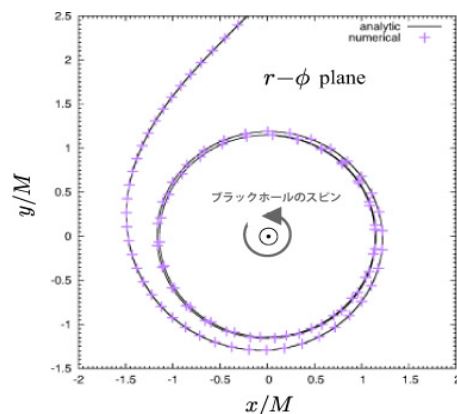


図 5 一般相対論的な光子軌道のテスト計算。数値解 (紫色の点) は解析解 (黒色の実線) とよく一致している。

中間報告後、モンテカルロ法に基づくシンクロトロン放射・吸収、および一般相対論的輻射輸送計算に必要な各メッシュでの座標変換の計算モジ

ジュールを作成し、モンテカルロ法に基づく一般相対論的な輻射スペクトル計算コードを開発した。

(6) 陰解法に適用できるマトリクスソルバーの実装と効率改善

東京大学情報基盤センターの中島研吾氏らによる行列解法ライブラリを実アプリケーションに適用するためのコード開発作業を行った。具体的な課題として、デカルト座標系において、輻射拡散方程式と非線形エネルギー方程式を連立させて解く問題を取り上げた。これまでの実装では、非線形連立方程式を線形化してニュートン法で解くループ内に、線形拡散方程式を解く（ガウス・ザイデル法をスムーザとして解く）フルマルチグリッド法を配置していた。この方法では、問題によっては（ニュートン法での）収束が非常に悪くなるほか、並列性能も高くないという問題点があった。

そこで、フルマルチグリッド法の部分を、共役勾配法系統の解法に置き換えて、最適な方法を探ることにした。ここで、障壁となったのは、既存の行列反転ライブラリを用いるためには、線形拡散方程式の拡散係数から行列要素データを作成しなければならない点である。降着円盤の局所計算では、 x 方向にずれ周期境界を用いているため、行列が複雑な非対称行列となり、かつ、その「ずれ」の量が毎ステップ異なるため、行列要素データの作成が非常に煩雑になる。

そこで、共役勾配法系統（具体的には **BiCGSTAB** 法）のアルゴリズムでは、行列が常に「行列とベクトルの積」で現れることに着目し、その部分の計算を既存のガウス・ザイデル法のコード（の再利用）で実行するプログラムを作成することにした。こうすることで、ユーザー側からは、行列を意識せずに **BiCGSTAB** 法を用いることが出来る他、ずれ周期境界を含め、複雑な境界条件にも柔軟に対応できるというメリットがある。この手法の開発は、平成 27 年度中に終わることはできなかったため、平成 28 年度も継続して行い、実用化する。

(7) 降着円盤シミュレータの整備・公開

高次精度磁気流体シミュレータ CANS+のエンジン部分について OpenMP によるスレッド並列化を行った。その結果、既存の MPI 並列化と組み合わせたハイブリッド並列計算が可能となり、並列数 1000 以上の場合においても、コア数にスケールする効率が得られるコードになった。このコードは全国の大学院生・若手研究者を対象とする宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクールの教材としても活用されている。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

高温領域と低温領域が共存する降着流の計算に適用可能な、Super Time Stepping 法に基づく並列効率の高い熱伝導モジュールを実装することができた。今後、ブラックホール降着流におけるハードステートとソフトステートの間の状態遷移の 3 次元磁気流体計算に適用していく。

一般相対論的輻射磁気流体コードについては、1 次モーメント法のコードが完成し、回転ブラックホールや中性子星のまわりの降着円盤のシミュレーションに本格的に適用されるようになった。このコードを高次精度化し、磁場等の数値散逸を抑えることが課題として残されている。

輻射輸送方程式のモーメント式を使わずに、各光線方向について輻射輸送方程式を解く直接解法の実装が進展してきた。次世代のエクサフロップス計算機を視野に入れて開発を継続していく。

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は、一般相対論的な多波長輻射スペクトル計算コードの開発が進展した。ブラックホール候補天体の X 線スペクトル観測で期待されていた **Astro-H** (**Hitomi**) 衛星は残念ながら運用断念となったが、今後、シミュレーションコードをブラックホール降着流の輻射スペクトル計算に適用し、NASA の **Nustar** 衛星等によるブラックホール候補天体の観測と比較していく。

輻射場等の陰解法に適用するマトリクスソルバーについては本年度検討することができなかった以下の先進的な手法についても検討を行う。

- ・ GPBiCG 法による反復法
 - ・ ILUT (p,d,t) 前処理
 - ・ HID (Hierarchical Interface Decomposition)
- または領域間オーバーラップを深くとることによる並列前処理の安定化

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- ・ Takahashi, H. R., Ohsuga, K., 'Radiation Drag Effects in Black Hole Outflows from Super-critical Accretion Disks via Special Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations', Publ. Astron. Soc. Japan, 67, 60 (2015)
- ・ Minoshima, T., Hirose, S., Sano, T., 'Dependence of the saturation level of magnetorotational instability on gas pressure and magnetic Prandtl number', Astrophysical Journal 808, 54 (2015)
- ・ Hirose, S., 'Magnetic turbulence and thermodynamics in the inner region of protoplanetary discs', Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 448, 3105-3120 (2015)
- ・ Matsumoto, T., Onishi, T., Tokuda, K., Inutsuka, S., 'An origin of arc structures deeply embedded in dense molecular cloud cores', Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 449, Issue 1, p.L123-L127 (2015)
- ・ Ohsuga, K., Takahashi, H. R., 'A Numerical Scheme for Special Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving Time-dependent Radiative Transfer Equation', Astrophysical Journal, 818, 162 (2016)
- ・ Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., Wada, K., 'Radiation Hydrodynamic Simulations of Line-Driven Disk Winds for Ultra Fast Outflows', Publ. Astron. Soc. Japan 68, 1616 (2016)
- ・ Takahashi, H. R., Ohsuga, K., Kawashima T.,

Sekiguchi Y. 'Formation of Overheated Regions and Truncated Disks around Black Holes; Three-dimensional General Relativistic Radiation-magnetohydrodynamics Simulations', Astrophysical Journal in press (2016)

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

- ・ Hirose, S., 'Thermal equilibrium curves of accretion discs with ionization transitions', The Magneto-Rotational Instability confronts the observations, Tagungsstätte Schloss Ringberg, Germany, Apr 13 - Apr 17, 2015
- ・ Matsumoto, R., Kawashima, T., Yatabe, K., 'Global Magnetohydrodynamic Simulations of State Transitions in Black Hole Accretion Flows', Black Hole Accretion and AGN Feedback, Shanghai, China, Jun 1 - 6, 2015
- ・ Takahashi, H. R., Ohsuga, K., Kawashima, T., Sekiguchi, T., 'Numerical Study of Super Critical Accretion Disks', Black Hole Accretion and AGN Feedback, Shanghai, China, Jun 1-6, 2015
- ・ Kawashima, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., 'Time Evolution of the SgrA* Accretion Flow Interacting with a Gas Cloud', Black Hole Accretion and AGN Feedback, Shanghai, China, June 1-6, 2015
- ・ Kawashima, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., 'On the time evolution of the Sgr A* accretion flow interacting with the G2 cloud' The 8th East Asia VLBI Workshop 2015, Sapporo, Japan, July, 2015
- ・ Hirose, S., 'Accretion flows in thermal equilibrium in the inner region of protoplanetary disks', Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, JAMSTEC, Japan, Sep 29 - Oct 2, 2015
- ・ Kawashima, T., Ohsuga, K., Takahashi, H. R.,

Mineshige, S., Yoshida, T., Matsumoto, R., 'Photon Spectra of Super-critical Black Hole Accretion Flows' Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the Astro-H Era, Tokyo, Japan, Oct 21-Oct 22, 2015

- Hirose, S., 'Thermal stability of radiation-dominated standard accretion disks', Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the Astro-H Era, Rikkyo University, Tokyo, Japan, Oct 21-Oct 22, 2015
- Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Kawashima, T. & Sekiguchi, Y. 'Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Disks and Outflows', Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), Nara, Japan, Nov. 4 - 8, 2015
- Kawashima, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., 'Time evolution of the Sgr A* accretion flow interacting with the G2 cloud' QUCS2015, Nara, Japan, November, 2015
- Matsumoto, T., 'Theoretical Models and Observing Simulations of Protostellar Binary Systems', ALMA Workshop on Formation and Evolution of Disks around Protostars, NAOJ, Japan 2015 年 12 月 13 日
- Matsumoto, R., 'Magnetorotational Instability and Magnetic Reconnection in Differentially Rotating, Gravitationally Stratified Disks', US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2016, Napa, California, US, March 7-11, 2016
- Takahashi, H.R., '3D-reconnection of supercritical accretion disks in relativistic radiation magnetohydrodynamics', US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2016, Napa, California, US, March 7-11, 2016

(4) 国内会議発表

- 川島朋尚, 'ブラックホール超臨界降着流・アウトフローの輻射スペクトル：超高光度 X 線源へ

の応用', 降着円盤大研究会 2015, 京都大学, 2015 年 6 月 21 日 -22 日

- 高橋博之, '高エネルギー天文学、特に降着円盤における輻射過程とシミュレーション研究の現状', Solar-C 時代の太陽研究, 国立天文台, 2015 年 7 月 3 日

- 高橋博之, '恒星質量ブラックホール降着円盤シミュレーション研究の現状', 超巨大ブラックホール降着円盤スペクトルの解釈を巡って, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)淵野辺キャンパス, 2015 年 8 月 10 日 -11 日

- 高橋博之, '一般相対論的輻射磁気流体計算による円盤コロナの形成について', 日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015 年 9 月 10 日

- 松本倫明, 西合一矢, 高桑繁久, '連星降着モデルで探る周連星円盤の構造', 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学, 2015 年 9 月 10 日

- 松本倫明, '高解像観測時代の高解像シミュレーション - 高密度分子雲コア MC27/L1521F のモデリング', 星形成の諸階層 - 銀河から惑星まで -, 四季倶楽部 フォレスト箱根, 2015 年 9 月 14 日

- 川島朋尚, 秋山和徳, 紀基樹, 松本洋介, 松元亮治, 'ガス雲と相互作用する巨大ブラックホール高温降着流: 3 次元 MHD シミュレーションから予測する観測的特徴', 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学, 2015 年 9 月 10 日

- 松元亮治, 川島朋尚, 町田真美, 松本洋介, 'ブラックホール降着円盤における状態遷移の磁気流体シミュレーション', 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015 年 9 月 26 日

- 高橋博之, '超臨界降着円盤の円盤構造', 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015 年 9 月 26 日

- 川島朋尚, 松本洋介, 松元亮治, 'ガス雲と相互作用する高温降着流: 3 次元磁気流体数値実験で探る観測的特徴', 日本流体力学会年会 2015, 東京工業大学, 2015 年 9 月 26 日

- 高橋博之, 'ブラックホール周りにおける高温ガス雲形成の一般相対論的輻射磁気流体シミュレ

ーション’, 第 28 回理論懇シンポジウム, 大阪大学, 2015 年 12 月 23 日-25 日

・高橋博之, ‘Numerical Study of Super Critical Accretion Disks’, 天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング, 国立天文台水沢, 2016 年 1 月 28 日-29 日

・川島朋尚, 嶺重慎, 大須賀健, 小川拓未, ‘ULX パルサーの超臨界降着シミュレーション’, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京, 2016 年 3 月

・松本倫明, 西合一矢, 高桑繁久, ‘連星降着モデルで探る周連星円盤の構造 II’, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2016 年 3 月 14 日

・高橋博之, ‘中性子星周囲の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’, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016 年 3 月 14 日-17 日

・高橋博之, ‘一般相対論的輻射流体による超臨界降着円盤シミュレーション’, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016 年 3 月 14 日-17 日

・高橋博之, ‘相対論的輻射磁気流体シミュレーションで探る超臨界降着円盤構造’, 第 9 回現象解析特別セミナー, 茨城大学, 2016 年 3 月 20 日-21 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)