

13-NA25

天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション

松元亮治 (千葉大学大学院理学研究科)

輻射と磁気流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを実装し、様々な天体現象に適用している。輻射輸送方程式の光線方向に関する 1 次モーメント式を解く M1 法に基づく相対論的輻射磁気流体コードを用いてブラックホールへの質量供給率が球対称降着の場合の上限光度 (エディントン光度) に対応する臨界降着率よりも遥かに高い場合のシミュレーションを実施し、細く絞られたジェットが噴出すること、輻射が円盤の回転軸方向に強くビーム化され、回転軸方向から観測した場合の光度がエディントン光度を超えることを示した。また、輻射磁気流体方程式の陰的解法の高速度化を試み、差動回転円盤の局所計算に用いられるシアリング境界条件を改良することによって 15%程度高速化することができた。しかしながら、エネルギー輸送の時間スケールが力学的時間スケールに比べて極端に短くない場合の超並列計算では陰的解法よりも Super Time Stepping(STS)を用いた陽的解法が適していることがわかった。一般相対論的輻射磁気流体(GRRMHD)コード、輻射輸送方程式の直接解法コードの開発も進展した。

1. 研究の目的と意義

本研究の目的は、輻射と磁気流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを超並列計算機に実装して宇宙現象の大規模シミュレーションに適用することである。このため、物質による輻射の吸収と散乱を考慮した輻射輸送方程式

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla \right) I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) = -\sigma_{\nu} I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu} S_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu, s} \int g(\mathbf{n}, \mathbf{n}') I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}') d\mathbf{n}'$$

を磁気流体方程式と連立させて系の時間発展を調べる。ここで、 $I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n})$ は単位時間に単位面積を横切って単位ベクトル \mathbf{n} の方向に伝わる振動数 ν の輻射のエネルギー (輻射強度)、 σ_{ν} は吸収断面積、 $\sigma_{\nu, s}$ は散乱断面積、 S_{ν} は輻射の源泉関数 (Source function) である。

輻射輸送方程式は空間 3 次元に振動数と光線方向を加えた 6 次元空間における輸送方程式である。この方程式を光線方向について積分し、次式で定義される輻射エネルギー密度 E_{ν} と輻射流束ベクトル \mathbf{F}_{ν}

$$E_{\nu}(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

$$\mathbf{F}_{\nu}(t, \mathbf{r}) = \int \mathbf{n} I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

を用いて記述される 0 次モーメント式

$$\frac{\partial E_{\nu}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\nu} = \sigma_{\nu} (4\pi S_{\nu} - cE_{\nu})$$

を、 \mathbf{F}_{ν} と E_{ν} の勾配を関係づけた表式を用いて近似的に解く Flux Limited Diffusion (FLD) 法を用いたシミュレーションが実施されてきた。しかしながら、この手法では光学的に厚い領域の背後にできる影を扱うことができないという問題がある。そこで我々は昨年度までの共同研究において輻射輸送方程式の 0 次モーメント式に加えて 1 次のモーメント式

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{\nu}}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{P}}_{\nu} = -c (\sigma_{\nu} + \sigma_{\nu, s}) \mathbf{F}_{\nu}$$

を解いて輻射流束の時間発展を同時に計算する 1 次モーメント法 (M1 法) のコードを開発してきた。ここで $\tilde{\mathbf{P}}_{\nu}$ は次式で定義される輻射ストレステンソルである。

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\nu}(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \mathbf{n} \mathbf{n} I_{\nu}(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

ただし、このままでは方程式が閉じないため、以下の関係 (M1 クロージャー) が成立すると仮定する。

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\nu} = \left(\frac{1-\chi}{2} \tilde{\mathbf{I}} + \frac{3\chi-1}{2} \mathbf{n} \mathbf{n} \right) E_{\nu}$$

$$\chi = \frac{3+4f^2}{5+2\sqrt{4-3f^2}} \quad f = \frac{|\mathbf{F}_{\nu}|}{cE_{\nu}}$$

本共同研究では、1) 1 次モーメント法に基づく輻射磁気流体コードの計算精度、数値的安定性を高めて天体現象のシミュレーションに適用する

こと、2) 輻射輸送方程式を陰的に解く際にあらわれる大規模な連立方程式のロバストで並列効率の高い解法を実装すること、3) 吸収・散乱過程を記述する輻射輸送方程式を光線方向について積分せずに角度依存性を残したまま直接解く解法を実装すること、を目指している。

輻射磁気流体コードを適用する具体的な対象としては、ブラックホールや中性子星などの天体のまわりに形成される降着円盤、惑星形成の母体となる原始星円盤、太陽・恒星大気、天体からの輻射に照射される星間ガス等がある。特に、ブラックホール降着流については近年、球対称降着流の上限光度であるエディントン光度(輻射圧=重力となる光度)程度、あるいはそれ以上の光度で輝く高光度天体が次々に発見されて注目されている。

例えば、2011 年 3 月に発見された Swift J1644+57 という天体では発見時の光度は 10^{48}erg/s を超え、電波放射も観測されたことから相対論的ジェットが噴出したらしい。この現象は遠方の銀河中心に存在する 10^6 太陽質量程度のブラックホールに恒星が接近して潮汐破壊され、エディントン降着率を超える降着率でブラックホールに星の残骸が落下し続けている事象と考えられる(図 1)。

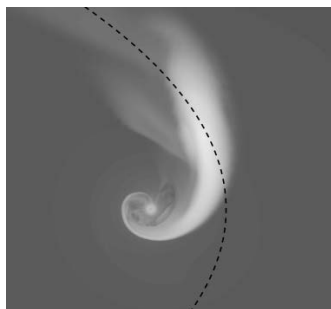


図 1：共同研究メンバーの川島朋尚による潮汐破壊シミュレーション例。濃淡は密度分布。

Swift J1644+57 からは増光後 1 年を経ても 10^6 太陽質量のブラックホールのエディントン光度に対応する光度の X 線放射が観測されていたが 2012 年 8 月に X 線光度が 1 桁以上減少し、その後も暗い状態が続いている。これはブラックホールへの降着率がエディントン降着率以上の超臨界降着状態(図 2 の(i))から、亜臨界降着状態(図 2 の(ii))に遷移したためと解釈できる。

我々は、FLD 法に基づく 2 次元軸対称輻射流体コードを用いて、この状態遷移をシミュレートし、Swift J1644+57 が再増光する可能性があること

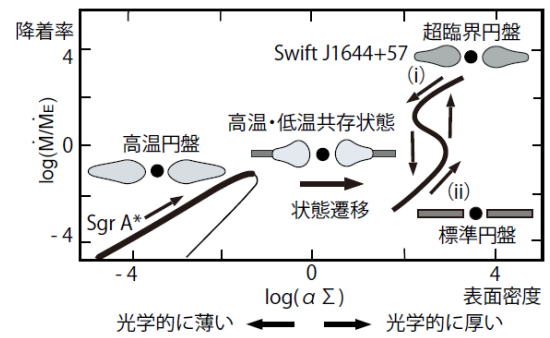


図 2：ブラックホール降着円盤の熱平衡曲線。横軸は表面密度，縦軸は降着率。 \dot{M}_E はエディントン降着率。

を示した(Kawashima et al. 2013)。しかしながらこの計算では増光までの時間を決める角運動量輸送率 α をパラメータとして与えていたため、いつ再増光するかを予測することができていなかった。図 3 の計算例では $\alpha=0.1$ としたが、 $\alpha=0.01$ の場合には再増光までの時間は約 500 日になる。現象論的パラメータを導入することなく角運動量輸送過程を組み込むことができる輻射磁気流体シミュレーションを実施することが急務となっている。

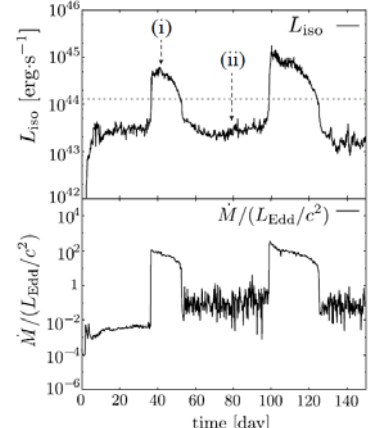


図 3：エディントン降着率の 100 倍の質量供給がある場合の輻射流体計算結果。上段は光度，下段は降着率。亜臨界降着状態(ii)に遷移後、再増光する。

原始惑星系円盤のように輻射の時間スケールが力学的タイムスケールに比べて短い系では輻射輸送方程式を陽的に解く場合の時間刻みが小さくなりすぎるため、陰的な解法等を適用する必要がある。収束が速く、並列効率の高いソルバーを実装することが課題として残されている。

各光線方向の輻射輸送方程式を直接解く解法について、昨年度までの共同研究では散乱が無視できる場合について短い特性曲線法に基づくコードを実装して太陽大気のシミュレーションに適用してきた。散乱を考慮した輻射輸送方程式の直接解法コードを開発することが課題になっている。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

共同研究実施大学：東京大学

共同研究者と役割分担は以下の通りである。

千葉大学・大学院理学研究科

松元亮治（研究代表者）：全体統括、

朝比奈雄太：コード実装、ジェットへの適用

工藤祐己：熱伝導モジュールの並列性能向上

千葉大学・先進科学センター

花輪知幸：M1 コード実装、原始星円盤に適用

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

廣瀬重信（副代表者）：陰的差分を用いた輻射

磁気流体コードの並列性能向上

東京大学・大学院理学系研究科

横山央明：シミュレーションエンジン実装

堀田英之：ダイナモ計算への適用

飯島陽久：輻射輸送方程式解法の実装

東京大学・情報基盤センター

中島研吾，片桐孝洋（副代表者）：

陰的差分を用いた輻射磁気流体コードの連立

一次方程式解法の開発、並列性能向上

国立天文台・理論研究部

大須賀健：輻射輸送方程式直接解法の実装

高橋博之：相対論的輻射磁気流体コード実装

宇宙航空研究開発機構

小田寛：状態遷移シミュレーションの実施

法政大学・人間環境学部

松本倫明：解適合格子法に基づく自己重力磁

気流体コードの並列性能向上

九州大学・大学院理学研究院

町田真美：降着円盤・銀河ガス円盤の大局的

シミュレーション実施

九州産業大学・工学部

中村賢仁：熱伝導モジュールの並列性能向上

上海天文台

川島朋尚：超臨界降着流輻射スペクトル計算

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

従来の輻射磁気流体シミュレーションは流束制限拡散近似（FLD 近似）を用いて実施されることが多かった。この近似を一步進め、輻射強度の光線方向に関する 1 次モーメントである輻射流束の時間発展を計算する M1 法を適用している点に本共同研究の特色がある。M1 法に基づくコードは、輻射流体・輻射磁気流体シミュレーション分野で世界をリードする複数のグループでほぼ同時に開発が進められ、天体现象に適用した結果が公表されはじめたところである。非常に競争が激しい分野であるが、本共同研究を通して M1 法に基づく相対論的輻射磁気流体コードが世界に先駆けて開発され、超並列計算機に実装されてプロダクションランが始まった点に本研究最大の意義がある。

輻射のタイムスケールが力学的タイムスケールに比べて短い場合に必要になる陰的差分は天体シミュレーションの様々な分野で超並列化のネックになっている部分である。関連する問題としては自己重力系におけるポアソンソルバー、磁場方向に依存する非等方熱伝導等があり、問題に応じて前処理の方法、並列化方法等を最適化していく必要がある。大規模連立方程式についての豊富な知識と経験があり、この分野のエキスパートである東京大学情報基盤センターの中島氏、片桐氏にメンバーに加わっていただき、助言を得ている。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

3.1 M1 法に基づく特殊相対論的輻射磁気流体（SRRMHD）コードの適用

我々は相対論的輻射磁気流体コードの開発を進めてきた。このコードでは輻射輸送方程式の光線方向に関する 0 次，1 次のモーメント式

$$\begin{aligned} \partial_i E_r + \partial_j F_r^j &= \rho \kappa \left(4\pi \gamma B - c \gamma E_r + \frac{u_j F_r^j}{c} \right) \\ - \rho \kappa_s \left[\frac{\gamma u^2 E_r}{c} - \frac{\gamma u_i u_j P_r^{ij}}{c} - \left(\gamma^2 + \frac{u^2}{c^2} \right) \frac{u_j F_r^j}{c} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{1}{c^2} \partial_i F_r^i + \partial_j P_r^{ij} = \rho \kappa \left(\frac{4\pi u^i B}{c^2} - \frac{\gamma F_r^i}{c} + \frac{u_k P_r^{ik}}{c} \right) - \rho \kappa_s \left[\frac{\gamma F_r^i}{c} - \frac{\gamma^2 u^i}{c} E_r - \frac{u_k P_r^{ik}}{c} + \frac{u^i}{c} \left(\frac{2\gamma u_j F_r^j - u_j u_k P_r^{jk}}{c^2} \right) \right]$$

を相対論的磁気流体方程式，マクスウェル方程式と連立させて解く。ここで， κ ， κ_s は流体とともに動く共動座標系で定義した吸収，散乱の不透明度， γ はローレンツ因子， B は黒体放射強度である。これらの方程式に加えて M1 クロージャー関係

$$P_r^{ij} = \left(\frac{1-\chi}{2} \delta^{ij} + \frac{3\chi-1}{2} n^i n^j \right) E_r$$

を仮定することによって方程式は閉じる。

磁気散逸は Maxwell 方程式に有限の電気伝導度を仮定することでその効果を取り入れることができる。これらをまとめると流体 5 本，Maxwell 方程式 6 本，放射 4 本の計 15 本の双曲型方程式になり，これらを陽的に解く。本解法の詳細は Takahashi and Ohsuga (2013) に報告されている。

このコードをブラックホールへの超臨界降着流に適用した結果を図 4 に示す。この計算では軸対称性を仮定している。カラーは放射流束，矢印は速度場を示す。ブラックホールは 10 太陽質量を仮定した。ブラックホールへのガス降着率はエディントン降着率の 100 倍程度である。同様な計算は FLD 法に基づく放射磁気流体コードを用いて Ohsuga ら (2009, 2011) によっても実施されているが，非相対論的な計算であるため放射抵抗が無視されており，また放射によるジェットの収束機構が働かないという欠点があった。相対論的なコードを適用した本計算により，これらの効果を考慮することが可能になった。

超臨界降着では多量のガスが降着するために非常に大きな重力エネルギーが解放される。また，円盤内のガス密度が高いために円盤内における放射効率が非常に高い。このため，放射圧がガス圧や磁気

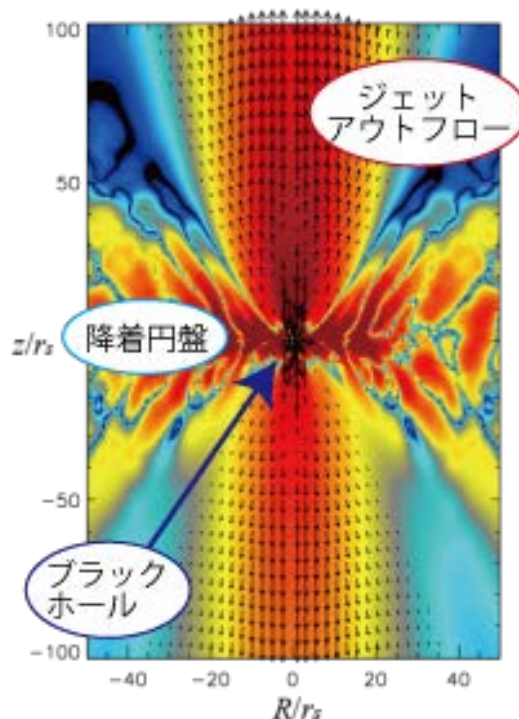


図 4 : 相対論的放射磁気流体コードを用いた超臨界降着流のシミュレーション結果。カラーは放射流束，矢印は速度場を表す。

圧よりも優勢になり，円盤は放射圧によって支えられる。この放射圧によってプラズマが加速されて軸方向に絞られた強いジェットと，より広い開口角を持ったアウトフローが形成された。ジェットとアウトフローの速度は円盤からの放射による加速と周りの放射場との衝突による減速の兼ね合いによって決まり，その速度は光速の 30-40% になることが示された。図 4 に示されているように降着流からの放射は回転軸方向に強くビーム化され，この方向から観測した場合の光度はエディントン光度を超える。

今回の計算ではジェットは放射によって加速され，磁場によるローレンツ力によって細く絞られていることがわかった。つまり，遠心力によって広がる力とローレンツ力と釣り合うことで細いジェット形状を維持している。理論モデルによると，ジェットは円盤からの放射による放射抵抗によって収束すると考えられていたがこの効果はマイナーであり，第 0 近似でジェットはローレンツ力によって収束する，といえる。

3.2 一般相対論的輻射磁気流体 (GRRMHD) コードの開発

ブラックホール近傍では一般相対論の効果が重要になる。特にブラックホールが回転しているとそのエネルギーによって強いアウトフローが形成されることが知られている。そこで本年度後半に GRRMHD コードの構築を行った。メトリックは時間的に一定とし、以下のような Kerr-Schild 座標を用いた。

$$ds^2 = -\alpha^2 dt^2 + \gamma_{ij}(dx^i + \beta^i dt)(dx^j + \beta^j dt)$$

ここで α は lapse 関数で重力ポテンシャルを表し、 β^i は shift と呼ばれるブラックホールの回転による時空の引きずりを表す。解くべき式は

$$T_{\mu\nu}^{\nu} = G_{\mu}{}^{\nu} R_{\mu\nu}^{\nu} = -G_{\mu}{}^{\nu} (\rho u^{\mu})_{;\mu} = 0, \partial_t(\sqrt{-g} B^i) = -\partial_j(B^i v^j - B^j v^i)$$

で、それぞれ磁気流体及び輻射のエネルギー運動量保存、質量保存、誘導方程式である。輻射場はこれまで同様モーメント量で記述し、M-1 クロージャーを仮定すると輻射場のエネルギー運動量テンソルが以下のように与えられる。

$$R^{\mu\nu} = p_r(4u_r^{\mu}u_r^{\nu} + g^{\mu\nu})$$

ここで p_r は輻射圧、 u_r^i は輻射フラックスの強度の指標となる輻射 4 元速度、 $g_{\mu\nu}$ はメトリックの反変成分である。図 5 にテスト計算結果を示す。

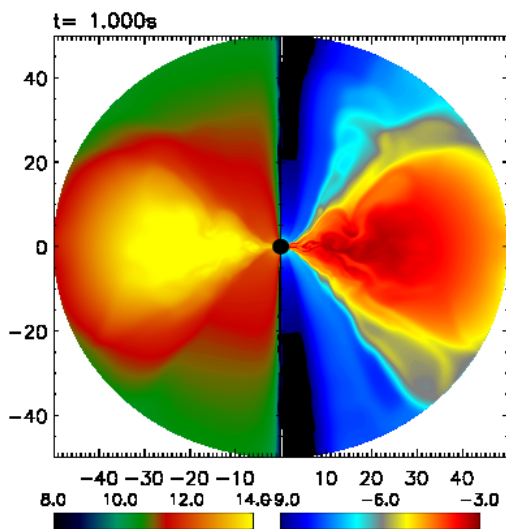


図 5 : GRRMHD による超臨界降着円盤の大局的数値実験結果。左は輻射エネルギー密度、右はガス密度を示す。

3.3 輻射輸送方程式の直接解法の実装

これまで用いてきた SRRMHD コードや現在開発している GRRMHD コードでは輻射場を光線方向についてモーメント展開して 1 次で打ち切ることによって式を簡略化した。この方法は輻射輸送方程式を運動量空間で積分することによって計算コストが軽減されるため、より長時間の計算が可能になるという利点がある。しかし、運動量空間を積分してしまうために光線どうしの衝突といった非物理的な現象を引き起こしてしまうことが知られている。そこで我々は光線方向への依存性は残し、振動数については積分した輻射輸送方程式を解く数値スキームを開発している。この方法はエネルギー空間を積分しているため、輻射スペクトルは得られないが上述の光線の衝突といった問題を回避できる。開発中のコードによる計算例を図 6 に示す。

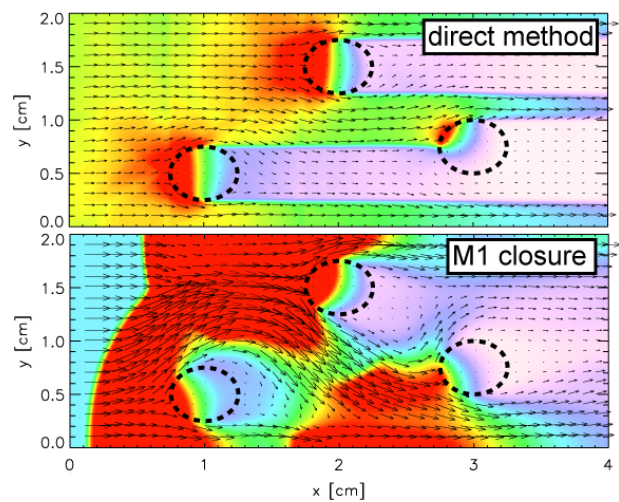


図 6 : 左の境界面から散乱体 (破線) に向けて光を照射した場合の計算結果。(上) 輻射輸送方程式を直接解いた結果。(下) M1 クロージャーによる結果。直接解法では光は散乱体の間を通り、一部は反射されて散乱体の前面で輻射強度が増える。M1 スキームでは入射光と反射光が衝突し、衝撃波の様な非物理的構造が作られる。

3.4 陰解法にあらわれるマトリクスソルバーの高速化

降着円盤の局所 3 次元計算に用いる FLD 法に基づく輻射磁気流体コードについて、本年度前半はまず、昨年度まで開発をしてきたマルチグリッドソルバー (MPI を用いて領域分割による並列化が施してある) について、ボトルネックとなってい

る部分の抽出とその高速化について検討を行った。その結果、まず、ボトルネックとなっている部分は境界条件のモジュールで使用されている `mpi_allgather` であることが判明した。

本コードは、降着円盤の一部を、デカルト座標系 (x, y, z) を用いて取り出すシアリングボックス近似用のコードであり、そのため、動径方向である x 方向の境界条件は y 方向にシアした周期境界となっている。このシアの程度は、毎ステップ変化するため、 y 方向に領域分割した場合に、必要な情報をどのプロセスと通信するかを判定するのは煩雑である。そのため、これまでは x 方向境界のゴーストセルの値を、`mpi_allgather` を使って、 y 方向のすべてのプロセスで共有する方法を取ってきた。この方法は冗長ではあるもの、上記の煩雑さを避けることができる。しかし、前述のとおり、診断の結果、この方法が問題となっていることが判明した。

そのため、毎ステップ、シアの程度から y 方向のどのプロセスと通信するかを特定した上で、`mpi_sendrecv` によって y 方向の情報を共有するようにした。これによって、ボトルネックとなっていた部分に関しては、必要最小限の情報通信で済むようになったが、実際の計算速度では最大 15% 程度の高速化に留まった。

このように、シアリングボックス近似を用いたシミュレーションの一つの問題は、 x 方向の境界条件の複雑さにある。一方、バックグラウンドのシア流は時間的に変化しないので、これを全体の流れ場から差し引くことで数値誤差を減らすことが出来るほか、 x 方向の境界条件の一部を単純化することができる。そこで、本年度はこの方法の実装も行った。実は、これまで x 方向のシミュレーションボックスサイズを大きくした際に x 方向の境界近傍において数値的エネルギー散逸率の評価に数値誤差が大きく影響していた。しかし、バックグラウンドシア流を差し引くことにより、この数値誤差の問題はほぼ完全に解決された。一方、境界条件が単純化されたことによって計算速度が向上したかどうかについては、流れがカオティッ

クであるため判定が難しいが、少なくとも目立った速度向上は見られなかった。

本年度後半には、上に述べた改良点を施したコードを使用して陰解法におけるクーラン数がより大きい問題（すなわち、輻射の時間スケールが、流体の時間スケールに比べてより小さい問題）を解くことを試みた。しかし、この場合、マトリクスソルバーが収束せずに計算が破綻することが度々見られた。主な原因は、線形方程式の解として得られる輻射エネルギーの値から（非線形方程式を通して）求めたガスエネルギーの値が負となることであった。そこで、このような場合には、ニュートン・ラプソンの反復中に限ってガスエネルギーに最低値を設定する、という対策を試みたところ、ほとんどの場合で、計算を安定に進めることが出来るようになった。一方、この方法でもうまくいかない場合は、時間刻みを小さくした上で流体計算からやり直さざるを得ず、今後の課題として残った。

3.5 非等方な拡散項を含む方程式解法的高速化

天体プラズマでは磁力線に沿った方向への熱伝導の効率が流体速度の 1000 倍を超える場合があり、このような硬い方程式系を解く効率的な数値解法が必要となる。光学的に厚い領域の輻射輸送は拡散方程式に従うため、熱伝導方程式の解法を高速化することは輻射輸送方程式の解法を高速化するヒントにもなると期待される。

まず、陰的解法を検討した。係数行列が非対称であるため、前処理付き Krylov 部分空間法の一種であり、安定性に優れたリスタート付の Flexible GMRES 法を実装し、並列化を行った。行列ベクトル積の計算効率化のため、係数行列の保存形式として `DIagonal storage format (DIA)` , `ELLpack-itpack format (ELL)` , `Compressed Sparse Row format (CSR)` について FX10 上で速度の比較を行った結果に基づき、有限差分的なステンシルに対して高速な DIA 形式を採用した。

GMRES 法の前処理として SSOR(対称 SOR)法及び ILU(0)分解(LU 分解のうち係数行列の非ゼロ成分

と同じ場所のみを計算したものを)を試みた結果、SSOR 前処理は緩和パラメータを適切にとることで、5 倍程度の収束率が改善した。マルチグリッド前処理などのより高度な前処理を行った場合、さらに数倍の改善が見込まれる。他方 ILU(0)前処理はゼロピボットが頻繁に表れ、分解がスムーズに行えないことが分かった。

陰的解法とは別のアプローチとして、Super Time Stepping (STS) 法を検討した。STS 法では、複数のステップをひとまとめにして安定性を考えることにより、放物型微分方程式の安定条件を緩和させることができる。STS 法を非等方熱伝導に適用した場合、SSOR 前処理付き GMRES 法のさらに 10 倍程度の改善が見込まれることが分かった。STS 法は陽的な解法であるため、大規模な並列化に伴う性能低下の心配も少ない。以上の理由から、非等方熱伝導の解法として Super Time Stepping 法が有望であるという結論を得た。

(2) 当初計画の達成状況について

【1 次モーメント法に基づくシミュレーションコードの改良と高光度降着流への適用】

特殊相対論的輻射磁気流体 (SRRMHD) コードを用いたブラックホールへの超臨界降着流のシミュレーションを実施し、輻射圧で加速された光速の数 10% の速度を持つジェットが形成されることを示すことができた。ブラックホール降着流の状態遷移等、より長い時間スケールの計算に適用するためには数値的な安定性を改善する必要がある。この課題の達成度は 60% 程度である。

ブラックホール近傍の計算の数値的安定性を高め、また、ブラックホールの回転の効果等を取り入れるため、一般相対論的輻射磁気流体 (GRRMHD) コードの開発を行った。コード開発は順調に進み、テスト計算結果が得られつつある。GRRMHD については当初計画以上に進展したと考えている。

【輻射輸送方程式の直接解法の実装】

振動数積分した輻射輸送方程式の直接解法を実装してテスト計算を実施し、散乱体での反射等の計算において M1 スキームによる計算にあらわれ

る光線衝突による衝撃波の発生等の非物理的な現象を生じない計算結果が得られることを確認した。この課題は当初目的をほぼ達成することができた。

【陰解法に現れるマトリクスソルバーの高速化】

原始惑星系円盤等では輻射拡散方程式とガス・輻射エネルギー交換の非線形方程式を連立させた方程式を陰的に解く必要がある。本年度の目標は、このマトリクスソルバーについて、これまでに実装してきたマルチグリッドソルバーの効率化、高速化をはかることであった。シアリングボックス近似を用いたコードでは、ボトルネックとなっているのはソルバー自身というよりも、MPI で領域分割した場合の境界条件に伴う通信部分であることが判明した。そこで、この境界条件部分の高速化に取り組んだ。結果は、最大でも 15% の速度向上ということで、検討の余地が残されている。当初計画では、1) これまでに実装してきたマルチグリッドソルバーの効率化・高速化、2) 前処理として不完全 LU 分解、反復法として BiCGSTAB, GPBiCG 等のクリロフ部分空間法を用いた手法との並列性能の比較、の 2 点を行う予定であった。このうち、1) については、前節に述べたように、現時点で可能な対策はほとんど行っており、ほぼ 100% の達成度と言って良い。一方、2) については、1) に時間を取られたため、ほとんど進めることが出来なかった。

熱伝導方程式についてはエネルギー輸送の時間スケールが力学的時間スケールよりも短い場合の非等方熱伝導の解法として前処理付き GMRES 法及び Super Time Stepping (STS) 法を検討した。その結果、STS 法が有望であるという結論を得て天体シミュレーションに適用中である。

4. 今後の展望

数値的安定性に改善の余地はあるものの、高光度降着円盤に適用可能な国際競争力のあるコードが実用段階に達したことから、これを用いて超臨界降着状態におけるジェット・アウトフロー形成、降着率の減少に伴う超臨界降着状態から亜臨界降着状態への状態遷移過程等の 3 次元シミュレーシ

ョンを実施する計画である。

ジェット・アウトフローによる質量放出率等は一般相対論的効果，特にブラックホールの回転に依存することが予想される。1) 降着円盤から噴出するジェットの速度は観測される相対論的ジェットを説明できるか，2) ジェット/アウトフローのパワーは観測を説明できるか，また，そのエネルギーの内訳(ガス，磁場，放射)はどのようにになっているのか，3) 強いジェット/アウトフローが形成された場合，ブラックホールへの質量降着率はどの程度になるか，特にその値に上限値はあるのか，について調べる必要がある。これらには一般相対論効果が重要であり，GRRMHD コードを用いて初めて解決する問題である。より数値的に安定な GRRMHD コードを完成させ，降着円盤の大局的な数値実験を行いたい。

他方，M1 スキームに基づく放射磁気流体コードは，光線どうしの衝突のために非物理的な衝撃波面が形成される等の弱点もある。そこで，放射輸送方程式を光線方向について積分せず，角度依存性を残して解く直接解法コードの開発を進める。今年度実装した，振動数について積分した放射輸送方程式を解くコードの効率を高めて計算を実施し，M1 コードによる結果と比較して，M1 コードの精度，適用限界などを明らかにしたい。近い将来，「京」計算機等を用いて放射輸送直接解法に基づく放射磁気流体シミュレーションを実施することを視野に入れて研究を進める計画である。

陰解法に現れるマトリクスソルバーの高速化に関して，本年度は，これまでに実装してきたマルチグリッドソルバーの効率化・高速化を行うとともに，計算をロバストに進めるための処置・工夫を行った。しかしながら，陰解法におけるクーラン数が大きい問題ではマトリクスソルバーが収束せずに計算が破綻する場合が見られた。これは，ガウス・ザイデル法をスムーザとして用いている現在のマルチグリッドソルバーの限界を示している。そこで，今後は，今年度取り組むことが出来なかった，マトリクスソルバー自身をまったく別の方法(すなわち，前述のクリロフ部分空間法)

に変更することを試みる。ただし，シアリングボックス近似を用いているコードに関しては，もし前述のように，境界条件がボトルネックである状況が変わらないとすれば，1) 境界条件を呼び回数が出るだけ少なくなるような手法が最も高速化につながる，2) マトリクス要素の境界条件部分が毎ステップ変化していることから，マトリクス要素生成の高速化もポイントとなる，といったことが予想される。

問題によっては陰解法を用いず，STS(Super Time Stepping)法に基づく陽解法を適用することも試みていく予定である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文(投稿中のものは「投稿中」と明記)

- Takahashi, H.R. and Ohsuga, K., A Numerical Treatment of Anisotropic Radiation Fields Coupled with Relativistic Resistive Magnetofluids, *Astrophysical Journal*, 772, 127 (16pages), 2013
- Kawashima, T., Ohsuga, K., Usui, R., Kawai, N., Negoro, H., and Matsumoto, R., Recurrent Outbursts and Jet Ejections Expected in Swift J1644+57; Limit-Cycle Activities in a Supermassive Black Hole, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, L8 (5pages), 2013
- Kanno, Y., Harada, T., and Hanawa, T., Kinetic Scheme for Solving the M1 Model of Radiative Transfer, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, 72 (19pages), 2013
- Nomura, M., Ohsuga, K., Wada, K., Susa, H., and Misawa, T., Modeling Line-Driven Disk Wind for Broad Absorption Lines of Quasars, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, 40 (10pages), 2013
- Takeuchi, S., Ohsuga, K., and Mineshige, S., Clumpy Outflows from Supercritical Accretion Flow, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, 88 (12pages), 2013
- Yang, X., Yuan, F., Ohsuga, K., and D. Bu, Two

- Dimensional Numerical Simulations of Supercritical Accretion Flows Revisited, *Astrophys. J.* 780, 79 (15pages), 2014
- Turner, N. J., Benisty, M., Dullemond, C. P., and Hirose, S., Herbig Stars' Near-Infrared Excess: An Origin in the Protostellar Disk's Magnetically-Supported Atmosphere, *Astrophys. J.* 780, 42 (9pages), 2014
- (2) 国際会議プロシーディングス
- Hanawa, T., Kanno, Y., and Harada, T., Reconstruction Method for M1 Equations of Radiative Transfer, Proceedings of a 7th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM 2012), Ed. Pogorelov, N. V., Audit, E., and Zank, G. P., Astronomical Society of the Pacific, p.233, 2013
- (3) 国際会議発表
- Matsumoto, R., Kawashima, T., Machida, M., Global Three-dimensional Magneto-hydrodynamic Simulations of Hard-to-Soft Transition and Jet Formation, Suzaku-MAXI 2014, Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, Ehime, Japan, February 19-22, 2014
 - Takahashi, H. R., Numerical Study of Jets from Super Critical Accretion Disks, Suzaku-MAXI 2014, Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, Ehime, Japan, February 19-22, 2014
 - Hirose, S. et al., Thermal Equilibria of Dwarf-Nova Accretion Disks obtained by radiation MHD simulations, Kyoto Mini-Workshop on Dwarf Novae and Related Systems, Kyoto University, October 29, 2013
 - Ohsuga, K., Radiation-MHD Simulations of Accretion Flows and Outflows around Black Holes, Black Holes, Jets, and Outflows, Katmandu, Nepal, Oct. 14-18, 2013 (invited)
 - Matsumoto, R., Ono, T., Oda, H., and Kawashima, T., Magnetohydrodynamic Simulations of the Hard-to-Soft Transition in Black Hole Accretion Flows, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs, Makuhari, Chiba Japan, July 14-19, 2013
 - Kawashima, T., Ohsuga, K., Usui, R., Kawai, N., Negoro, H., Matsumoto, R., Limit-Cycle Activities in a Tidal Disruption Event by a Supermassive Black Hole, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs, Makuhari, Chiba, Japan, July 14-19, 2013
 - Takahashi, H. R., Numerical Study of Supercritical Accretion Flow onto the Black Hole Using Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic code, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs, Makuhari, Chiba, Japan, July 14-19, 2013
 - Takahashi, H. R., Explicit-Implicit Scheme for Relativistic Radiation Hydrodynamics, ASTRONUM 2013, 8th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, Biarritz, France, July 1st - July 5th 2013, (invited)
 - Hanawa, T., Radiative Hydrodynamical Simulations of Protoplanetary Disks, ASTRONUM 2013, 8th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, Biarritz, France, July 1st - July 5th, 2013
 - Matsumoto, R., X-ray Flares Triggered by the Tidal Disruption of a Gas Cloud Approaching the Galactic Center Supermassive Black Hole, 12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS), July 1-5, 2013, Hakuba, Nagano, Japan (invited)
 - Hirose, S. et al., MHD Turbulence in Accretion Disks with Ionization Transitions, Revealing Radiative Processes near Black Holes, Princeton Center for Theoretical Science,

May 3, 2013 (invited)

- Ohsuga, K., Global Simulations of Super-Eddington Accretion Flows and Outflows, Revealing Radiative Processes Near Black Holes, Princeton Center for Theoretical Science, May 1-May 3, 2013 (invited)

(4) 国内会議発表

- 松元亮治, 川島朋尚, Swift J1644+57 が示す巨大ブラックホール降着円盤の状態遷移, 日本天文学会 2014 年春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 22 日
- 川島朋尚, 松元亮治, ガス雲 G2 の衝突による銀河中心 Sgr A* 高温降着流内部での磁場増幅と降着率変化, 日本天文学会 2014 年春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 21 日
- 川島朋尚, 小川崇之, 小田寛, 松元亮治, ブラックホール降着流状態遷移中の準周期的な磁気リコネクション, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013 年 9 月 13 日
- 松元亮治, 小川崇之, 小野貴史, 川島朋尚, 銀河系中心ブラックホールへのガス雲落下の磁気流体数値実験, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013 年 9 月 13 日
- 高橋博之, 大須賀健, 超臨界降着からのアウトフロー形成, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013 年 9 月 13 日
- 廣瀬重信, Omer Blaes, Matt Coleman, Julian Krolik, 佐野孝好, 水素電離を伴う降着円盤におけるエネルギー輸送, 日本流体力学会年会, 東京農工大学, 2013 年 9 月 13 日
- 松元亮治, 小野貴史, 小田寛, 川島朋尚, ブラックホール候補天体の明るいハードステートにおける時間変動の起源, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 10 日-12 日
- 川島朋尚, 大須賀健, 薄井竜一, 河合誠之, 根来均, 松元亮治, 突発天体 Swift J1644+57 の再バースト予測 II: 潮汐破壊星による質量供給率の時間変化を考慮した輻射流体シミュレーション, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013

年 9 月 10 日-12 日

- 川島朋尚, 小川崇之, 松元亮治, 銀河系中心 Sgr A* に接近するガス雲 G2 と高温降着流の相互作用: 3 次元磁気流体シミュレーションによるフレア予測, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 10 日
- 高橋博之, 大須賀健, 超臨界降着流からのジェット・アウトフローの形成, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 12 日
- 廣瀬重信, MHD 乱流のグリッドスケールでのエネルギー散逸率の評価について, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 10 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし