

12-NA15

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）

概要 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、様々な天体現象に適用した。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いて輻射流束を計算する 1 次モーメント法に基づくコードを中心天体からの照射光と降着円盤からの散乱・再放射光を別々に計算するように改訂し、中心天体からの輻射に照射された円盤の構造を求める計算を実施した。ブラックホール近傍では特徴的な速度が光速に近づくため輻射輸送の時間スケールと力学的時間スケールが同程度になり、陽的差分を適用することができる。1 次モーメント法に基づく相対論的輻射磁気流体コードを用いて輻射圧優勢な降着円盤から準相対論的速度のジェットが噴出することを示した。各光線方向の輻射輸送方程式を短い特性曲線法を用いて直接解くことにより、太陽彩層における針状構造（スピキュール）を再現することにも成功した。

1. 研究の目的と意義

本共同研究の目的は、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天体活動現象の大規模シミュレーションに適用することである。

我々のグループでは、磁場と物質の相互作用を扱う 3 次元磁気流体コードを作成して、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）の時間変動とジェット形成（図 1）、渦状銀河における磁場増幅と維持（銀河ダイナモ）、星形成や重力崩壊型超新星爆発、太陽内部からの磁束浮上と活動領域の形成等のシミュレーションを世界に先駆けて実施してきた。しかし、これまで実施されてきた天体現象の 3 次元磁気流体計算では断熱変化や等温変化を仮定することが多く、多くの天体で重要になる輻射加熱・冷却に起因する熱不安定性の成長や状態遷移を扱うことができていなかった。

高光度の天体では輻射圧も重要になる。球対称系において輻射が及ぼす力が重力と等しくなる光度はエディントン光度と呼ばれ、この光度に対応する降着率（臨界降着率）を超えて物質が降着する超臨界降着流では輻射圧によって磁気流体が加速

され、噴出する。2011 年に系外銀河中心核の巨大ブラックホールの潮汐力によって星が破壊されたと考えられる増光現象が観測された。Swift J1644+57 と命名されたこの天体では増光直後に相対論的なジェットが噴出しており、潮汐破壊された天体物質がブラックホールに超臨界降着してジェットを噴出したと考えられる。この天体では降着率が次第に減少して亜臨界降着に至るまでの過程が観測されており、巨大ブラックホール周辺の降着円盤を探る絶好の機会になっている。このような系の進化計算に適用することができる輻射磁気流体コードを整備することが急務である。

輻射磁気流体のシミュレーション手法としては光線方向に沿う輻射の吸収・散乱・再放射を記述する輻射輸送方程式を角度方向に積分し、輻射流束を輻射エネルギー密度の勾配を用いて近似的に計算する流束制限拡散（Flux Limited Diffusion: FLD）法がこれまで用いられてきた。しかしながら、FLD 法では密度の濃い領域の背後にできる影を精度良く扱えない等の問題がある。そこで、本共同研究では輻射輸送方程式の角度方向に関する 1 次のモーメント式を解いて輻射流束と輻射エネルギー密度の時間発展を計算する 1 次モーメント（M1）法に基づく輻射磁気流体コードの開発を進めてきた。さらに、短い特性曲線法を用いて各光線方向の輻射輸送方程式を直接解くコードの実装と太陽表面現象への適用も試みている。

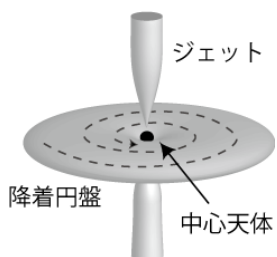


図 1 降着円盤とジェットの模式図

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大学名と研究体制

共同研究実施大学： 東京大学

本共同研究は以下の研究者によって実施した。

千葉大学・大学院理学研究科

松元亮治, 松本洋介, 川島朋尚,

朝比奈雄太

千葉大学・先進科学センター

花輪知幸

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

廣瀬重信

東京大学・大学院理学系研究科

横山央明, 堀田英之, 鳥海 森, 飯島陽久

東京大学・情報基盤センター

中島研吾, 片桐孝洋

国立天文台・理論研究部

大須賀健, 高橋博之

法政大学・人間環境学部

松本倫明

九州大学・大学院理学研究院

町田真美

九州産業大学・工学部

中村賢仁

プリンストン大学

富田賢吾

(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

輻射と磁気流体の相互作用を考慮した輻射磁気流体コードを天体活動現象に適用し、輻射による加熱、冷却、輻射圧による加速などの物理過程を考慮した 2 次元、3 次元シミュレーションを実施する点に特色がある。軸対称性を仮定した輻射磁気流体シミュレーションで多くの研究実績がある大須賀健氏、降着円盤の 3 次元輻射磁気流体計算のパイオニアである廣瀬重信氏をメンバーに加え、天体現象の輻射磁気流体計算についての all Japan チームで研究に取り組んでいる。

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陽的差分によって計算する手法を適用している点にも特色がある。

原始惑星円盤のように輻射のタイムスケールが力学的タイムスケールより短い系では陰的差分が必要になる。その並列効率改善のためには大規模連立方程式のソルバーについての豊富な知識と経験が必要であるため、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研吾氏、片桐氏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 HLLD+MP5 法を用いた降着円盤の数値実験

昨年度までの共同研究で開発した円筒座標系の 3 次元磁気流体コードを用い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実施した。このコードは散逸性磁気流体方程式を差分化し、メッシュ境界におけるリーマン問題を、HLLD 法 (Miyoshi and Kusano 2005) を用いて近似的に解くことによって時間発展を計算する陽的差分コードであり、5000 コア以上を使用した場合でもコア数に比例する性能が得られる。降着円盤の 3 次元計算では円盤中を高速回転する電流シートにおける数値散逸を低減させることが必須になるが、数値振動を抑制するために導入するリミターによる散逸が無視できない。そこで、メッシュ境界値を空間 5 次精度で計算することによってリミターの許容範囲を広げる MP5 法を採用した。

図 2 に $(N_r, N_\phi, N_z) = (256, 64, 256)$ メッシュを用い、FX10 を用いて実施したシミュレーション結果の例を示す。左図は我々の銀河系の中心にある巨大ブラックホール Sgr A* に落下しつつある地球程度の質量を持つガス雲と降着円盤の衝突をシミュレートした結果である。このガス雲は 2013 年末に Sgr A* に最接近して潮汐破壊されることが予報されており、全世界で様々な波長域での観測が計画

されている。図は衝突中の円盤の密度分布を示す。ブラックホールへの降着率は 10 倍以上、X 線強度は 100 倍以上になるという結果が得られた。今後、観測との比較を行っていく予定である。

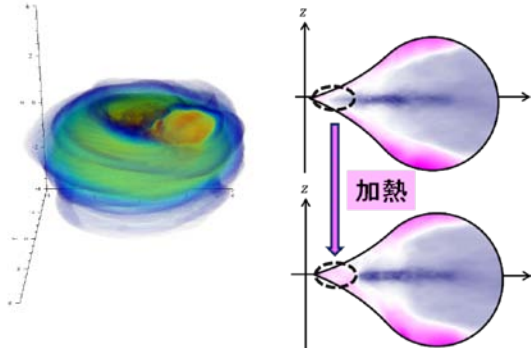


図 2 左図：降着円盤とガス雲衝突の 3 次元磁気流体シミュレーション結果。衝突後の密度分布。右図：冷却不安定成長後の温度分布。青い部分は低温領域。準周期的に発生する磁気エネルギー解放によりブラックホール近傍の円盤は高温状態に保たれる。

図 2 の右図は HLLD+MP5 コードを用いて実施した輻射冷却を考慮した 3 次元磁気流体シミュレーション結果の温度分布を示す。円盤密度が臨界値を超えた場合に成長する冷却不安定性の成長がシミュレートされている。冷却にともなって円盤は鉛直方向に収縮して密度が増加し、赤道面付近の温度が低下する。また、方位角方向（トロイダル方向）の磁場が強まり、円盤は磁気圧で支えられるようになる。このような円盤は光学的に薄い状態に保たれたまま増光する。この状態はブラックホール候補天体が増光するアウトバースト時に観測される明るいハードステートに対応している。

磁場を考慮しない従来の降着円盤理論では冷却不安定性の成長によって円盤は光学的に厚い低温円盤（ソフトステート円盤）に遷移することが予想され、光学的に薄くて明るい状態（明るいハードステート）がなぜ実現されるのかは謎であった。シミュレーションの結果、冷却不安定性によって強められた方位角磁場とブラックホール近傍で準周期的に方向を反転するダイナモ磁場の相互作用

によって磁気エネルギーの爆発的解放（フレア）が間歇的に発生してプラズマを噴出するという結果が得られた。この際に円盤を加熱するため、ブラックホール近傍の円盤は降着率がさらに高くなっても光学的に薄い高温状態に保たれ、明るいハードステートが維持されることがわかった。以上により、明るいハードステートの起源、ハードステートからソフトステートへの遷移時に観測される準周期的な X 線強度変動とジェット噴出機構を明らかにすることができた (Matsumoto et al. 2013 投稿準備中)。

3.2 中心天体に照射された降着円盤への適用

輻射輸送方程式の光線方向に関する 0 次と 1 次のモーメント式を解く 1 次モーメント (M1) 法に基づく輻射流体・輻射磁気流体コードを入射光と散乱・再放射光を別成分として扱うように改良して中心天体に照射された降着円盤に適用した。

振動数 ν ，単位ベクトル \mathbf{n} の方向に伝わる輻射の強度を $I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n})$ とするとき、輻射輸送方程式は次式で記述される。

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

ここで、 σ_ν は吸収断面積、 $\sigma_{\nu,s}$ は散乱断面積である。1 次モーメント法では輻射輸送方程式を各光線方向について解く代わりに光線方向について積分した以下の物理量を用い、

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

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

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

光線方向に関する 0 次、1 次のモーメント式

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

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

を差分化して解く。ただし、このままでは方程式

が閉じないため、以下の関係 (M-1 クロージャー) が成立すると仮定する。

$$\bar{\mathbf{P}}_v = \left(\frac{1-\chi}{2} \bar{\mathbf{I}} + \frac{3\chi-1}{2} \mathbf{nn} \right) \mathbf{E}_v$$

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

本グループの花輪らはクロージャー関係を満たす輻射場を以下のように再構成することによってメッシュ境界における輻射流束等をより精度良く求めることができる輻射流体コードを開発した (Kanno, Harada, and Hanawa 2013)。

$$I_v(\mathbf{n}) = \frac{3E_v}{8\pi} \frac{(1-\beta^2)^3}{3+\beta^2} (1-\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})^{-4}$$

$$\beta = \frac{3f}{2+\sqrt{4-3f^2}} \quad \boldsymbol{\beta} = \beta \frac{\mathbf{F}_v}{|\mathbf{F}_v|}$$

1 次モーメント法による輻射輸送計算では中心星からの照射光と円盤からの散乱・再放射光が交わる領域で誤差が大きくなる。この誤差を小さくするため、照射光と散乱・再放射光を

$$\mathbf{E}_v = \mathbf{E}_v' + \mathbf{E}_v'' \quad \mathbf{F}_v = \mathbf{F}_v' + \mathbf{F}_v''$$

のように、別成分として扱った。

中心星から 100 天文単位より内側に幾何学的に薄い円盤、外に幾何学的に厚い円盤が存在する場合に、この円盤が中心星からの輻射に照射される輻射流体計算を実施した。系が準定常状態になったときの温度・密度分布 (左図) と波長 $1.58 \mu\text{m}$ の輻射のエネルギー密度分布を図 3 に示す。

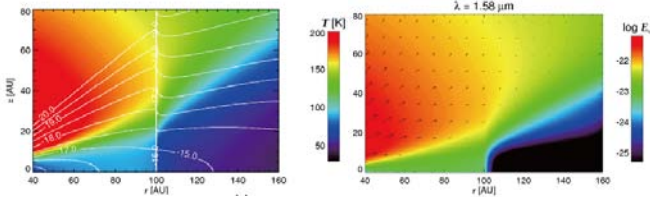


図 3 輻射流体計算によって求めた準定常状態の温度分布 (左図) と輻射エネルギー密度の分布 (右図)。白い実線は密度等高線を示す。

3.3 相対論的輻射磁気流体コードの適用

これまで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

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

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

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。非相対論的な場合と同様に M-1 クロージャー

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

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。以上の流体 5 本, Maxwell 方程式 6 本, 輻射 4 本の計 15 本の双曲型方程式を数値的に解く。

輻射や有限の電気伝導度を考慮すると, 系の力学的時間スケールの他に, 輻射とガスが相互作用する時間 (冷却時間) や電場が散逸する時間が特徴的な時間スケールとして現れる。ブラックホール近傍では系を特徴づける速度は光速となるため, 力学的時間はメッシュサイズを光が横断する時間となる。一方, 冷却時間や電場が散逸する時間は密度や温度といった物理量に依存し, 力学的時間に比べて遥かに短くなる場合がある。そのため, 陽的時間積分を用いた場合, タイムステップは力学的時間に比べて遥かに小さい値を用いなければならない。我々はこの問題を回避するために半陰的数値解法を導入し, 力学的時間と同程度の大きさで時間積分することに成功した (Takahashi et al. 2012)。この方法は大規模な行列反転を必要としないため, 高い並列化効率が得られる。

ブラックホール降着流への適用可能性を確かめるため、電気抵抗を無視し、軸対称性を仮定した相対論的輻射磁気流体(Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics, R2MHD)数値計算を行った。図 4 にその結果を示す。左はガス密度、右は観測者系でみた輻射エネルギー密度を表す。左右の図の矢印はそれぞれ速度場と輻射フラックスを示す。

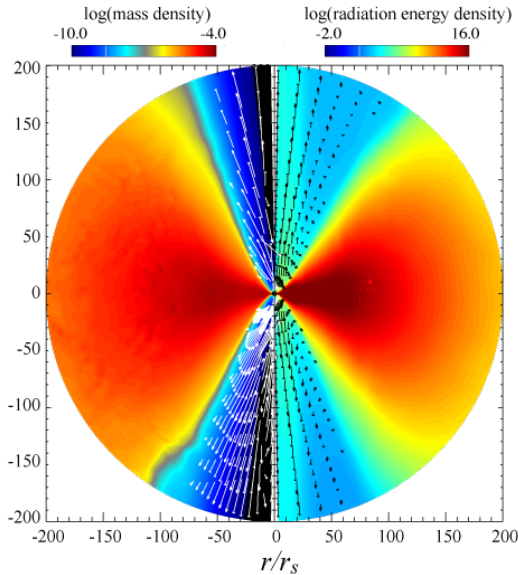


図 4 相対論的輻射磁気流体コードを用いたブラックホール降着円盤の 2 次元軸対称計算。左右のカラーはそれぞれ質量密度と輻射エネルギー。矢印は速度場と輻射フラックス。

円盤内部では磁気回転不安定性が成長し、磁気エネルギーが蓄えられる。それと同時に角運動量は外側へと輸送されるため、ガスはブラックホールへと降着する。エディントン降着率を超える超臨界降着円盤内部は密度が高く、自由-自由放射や電子散乱に対して光学的に厚い。そのため輻射は円盤内に閉じ込められてガスと熱平衡状態となり、その温度はおおよそ 10^8K 程度となる。しかしブラックホール近傍では冷却時間に比べてガスの降着時間が短くなるため、ガスと輻射の温度に大きな差が生じる。このためにガスの温度はヴィリアル温度程度まで上昇する。この高温ガスが持つ熱エネルギーの一部は輻射として軸方向に照射される。この輻射によってガスは軸方向に絞られ、高速ジェット(おおよそ光速の 40%程度)が形成される。高速ジェットの外側にはより広い開口角を持つア

ウトフローが形成される。このアウトフローは輻射による加速だけでなく、円盤から照射された光による減速も受ける。そのためアウトフローの速度は絞られたジェットよりも小さくなることがわかった (Takahashi et al. 2013 投稿準備中)。

輻射圧を考慮した降着円盤の計算はこれまで大須賀ら(2009)によって行われてきたが、今回相対論的効果まで含めた計算を行い、ジェットが相対論的速度まで加速されることを初めて示した。今後は「京」を用いて 3 次元高解像度計算を行い、ジェットや円盤風の加速メカニズムや構造を解明していく予定である。

3.4 矮新星降着円盤の輻射磁気流体計算

急激な増光(アウトバースト)を周期的に繰り返す矮新星は、白色矮星と晩期型主系列星からなる近接連星系であり、白色矮星の周囲に形成された降着円盤が活動していると考えられている。矮新星ではアウトバースト時の高温円盤と静穏期の低温円盤で角運動量輸送パラメータ α の値が約一桁も異なることが示唆されているが、その物理的理由は未解明である。また、電離度が低いと考えられる低温ブランチにおいて磁気乱流が維持されるかどうかについてもわかっていない。

これらの課題に答える輻射磁気流体力学シミュレーションを行うためのコード開発とそのテストを行った。本課題では FLD 近似を適用した。この計算では輻射エネルギーの(制限付き)拡散方程式と輻射-ガス間のエネルギー交換を連立して陰的に解く部分が最も負荷が高い。この部分の数値解法として、ニュートン・ラブソン法とマルチグリッド法(スムーサはガウス・ザイデル法)を採用した。また、時間方向のサブステップを動的に導入することで、ロバストネスを高めた。

対象とするガスの温度範囲では、水素分子の解離(再結合)、水素原子の電離(再結合)が起こるため、水素分子、水素原子、ヘリウム原子ほか太陽組成を仮定したサハの電離公式を解いて状態方程式のテーブルをあらかじめ作成した。また、不透明度(オパシティ)テーブルを作成し、それを

用いてシミュレーションを実施した。

理想磁気流体を仮定し、また水素分子の解離(再結合)は考慮しない状態方程式を用いて降着円盤の一部を計算対象とするシアリングボックスシミュレーションを行った結果、高温と低温の2つの解ブランチが得られた。特に、面密度が $200\text{g}/\text{cm}^2$ では、高温と低温の2つの解の他に、それらの中間の温度にももう一つ解が存在し、熱平衡解曲線が全体としてS字カーブとなることが示唆された。

3.5 太陽彩層の輻射磁気流体シミュレーション

昨年度開発した輻射輸送方程式の直接解法を太陽大気に適用した。太陽内部は高温のため、太陽内部からの輻射による加熱が太陽大気のダイナミクスに影響を及ぼす。輻射による加熱項 Q_{rad} は局所熱力学平衡を仮定し、散乱を無視した定常状態の輻射輸送方程式

$$\frac{dI_v}{ds} = \rho\kappa_v(\rho, T)(B_v(T) - I_v)$$

を短い特性曲線法を用いて直接解くことによって求めた。 ds は光線方向の線素である。本課題では振動数依存性を考えない単色近似を用い、Rosseland 平均した不透明度 κ を用いる。輻射強度 I が求まれば、この I を角度方向に積分して平均輻射強度 J を求めることにより $Q_{\text{rad}} = 4\pi\rho\kappa(J - B(T))$ から Q_{rad} が求まる。

図5に太陽内部の対流層からコロナまでを含む2次元輻射磁気流体シミュレーションの結果を示

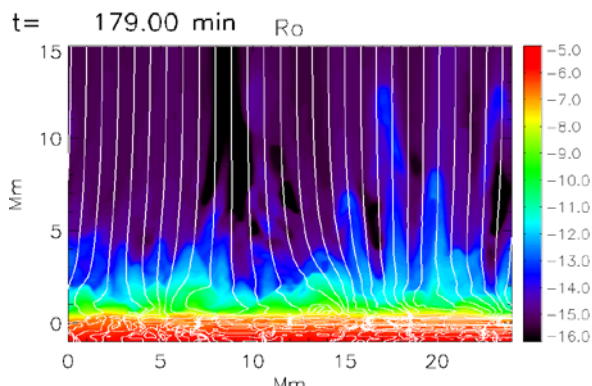


図5 太陽大気シミュレーション結果の密度分布。複数の針状構造(スピキュール)が形成されている。

す。スピキュールと呼ばれる針状構造があらわれている。再現されたスピキュールの寿命、サイズは観測と整合的であった。

スピキュールはコロナへのエネルギー輸送過程の一つとして注目されている。本研究により、アルフベン波による長周期のエネルギー輸送がスピキュール生成において大きな役割を果たすことが明らかになった。また、スピキュールより小さく短周期の構造も見られた。これは圧縮性擾乱によって駆動される構造に対応していると考えられる。

3.6 陰解法のマトリクスソルバーの高速化

方程式が比較的簡単な、磁場に沿った非等方な熱伝導方程式についてマトリクスソルバーの高速化を試みた。係数行列が非対称であるため、前処理付き Krylov 法の一種であり、安定性に優れた Flexible GMRES 法を実装した。また Krylov 系解法で多くの時間を要する行列ベクトル積の高速化のため、DIAGONAL storage format (DIA), ELLpack-itpack format (ELL), Compressed Sparse Row format (CSR) などの係数行列の保存方法について、実際に実装して速度を比較検証した。その結果、有限差分的なステンシルに対して比較的高速な DIA 形式を採用することにした。今後、実際の計算中に現れる係数行列に対して、不完全 LU 分解などを前処理としたときにどの程度の収束改善が期待出来るか調べ、最適な前処理を選択する。

(2) 当初計画の達成状況について

陽的差分法を用いた円筒座標系コードを用いた降着円盤シミュレーションでは HLLD 法に基づく 3次元磁気流体コードを空間 5 次精度化した HLLD+MP5 コードが完成し、プロダクションランが実施された。特に、冷却不安定性の成長をシミュレートして明るいハードステートの起源を明らかにするという目標が達成された。このコードを磁気流体公開コード CANS に組み込んで公開する準備も進んでいる。1次モーメント法に基づく相対論的輻射磁気流体コードを実装して相対論的ジェット形成計算を行うという目標も2次元軸対称計

算の範囲で達成された。実効効率はまだ 10%程度で改善の余地があるが、「京」を用いた 3 次元計算の準備が整った。

ブラックホール近傍の輻射磁気流体計算では半陰的解法を適用することによって大規模な行列反転を回避し、高い並列効率を得た。矮新星や太陽大気の輻射磁気流体計算に現れるマトリクスソルバー高速化については係数行列が比較的単純な場合についてのテスト計算で進展があった。実際の計算にあらわれる行列について最適な前処理を選択する課題が残されている。

振動数依存性を含めた、1 次モーメント法に基づく輻射流体コードを実装して原始星からの輻射が原始星円盤に及ぼす計算が実施され、輻射磁気流体コードを用いた活動銀河中心の計算も試みられた。また、短い特性曲線法を用いた太陽大気の輻射磁気流体計算でもプロダクションランが行われ、当初計画の目標は、ほぼ達成された。

4. 今後の展望

HLLD+MP5 法に基づく円筒座標系 3 次元散逸性磁気流体コードを用いた降着円盤状態遷移のプロダクションランが可能になり、大規模シミュレーションを実施中である。今後は 1 次モーメント法に基づく相対論的輻射磁気流体コードを「京」等に実装して巨大ブラックホールによる恒星の潮汐破壊現象と考えられている Swift J1644+57 における相対論的ジェット噴出などを調べる計画である。Swift J1644+57 は巨大ブラックホールへの降着率変化に伴う活動性の変化を数年間という短い時間スケールで観測できる貴重な天体であり、観測と理論シミュレーションの連携によってこの機会を最大限に活用したい。

矮新星降着円盤等、輻射のタイムスケールが力学的タイムスケールよりも短い現象に関しては陰的解法が必要になる。コード改訂によって収束性能は改善されたが、東京大学情報基盤センターの中島研吾教授らの協力を得てさらに効率を高めていきたい。

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）

- Kanno, Y., Harada, T., and Hanawa, T., Kinetic Scheme for Solving M1 Model of Radiative Transfer, Publ. Astron. Soc. Japan (印刷中), 2013
- Machida, M., Nakamura, K.E., Kudoh, T., Akahori, T. Sofue, Y., and Matsumoto, R., Dynamo Activities Driven by Magnetorotational Instability and the Parker Instability in Galactic Gaseous Disks, *Astrophys. J.* 764, article id 81 (9 pages), 2013
- Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Sekiguchi, Y., Inoue, T., and Tomida, K., Explicit-Implicit Scheme for Relativistic Radiation Hydrodynamics, *Astrophys. J.*, 764, article id 122 (13 pages), 2013
- Tomida, K., Tomisaka, K., Matsumoto, T., Hori, Y., Okuzumi, S. Machida, M. N., Saigo, K. Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Protostellar Core Formation, *Astrophys. J.* 763, article id. 6, (29pp), 2013
- Furuya, K., Aikawa, Y., Tomida, K., Matsumoto, T., Saigo, K., Tomisaka, K., Hersant, F., Wakelam, V., Chemistry in the First Hydrostatic Core Stage by Adopting Three-dimensional Radiation Hydrodynamic Simulations, *Astrophys. J.* 758, article id. 86, (20pp), 2012
- Okuzumi, S. and Hirose, S., Planetesimal Formation in Magnetorotationally Dead Zones: Critical Dependence on the Net Vertical Magnetic Flux, *Astrophys. J. Letter*, 753, L8(5pp), 2012
- 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* 752, article id 18, 2012

- Hotta, H., and Yokoyama, T., Generation of Twist on Magnetic Flux Tubes at the Base of the Solar Convection Zone, *Astron. Astrophys.* 548, A74, 2012
 - Hotta, H., Rempel, M., and Yokoyama, T., Magnetic Field Intensification by Three-dimensional Explosion Process, *Astrophys. J.*, 759, L25, 2012
- (2) 国際会議プロシーディングス
- Matsumoto T., Machida, M. N., Inutsuka, S., Protostellar collapse of magneto-turbulent cloud cores: formation of protoplanetary disks and outflows, *Proc. International Conference on Simulation Technology (JSST 2012)*, pp.295-300 (印刷中), 2013
 - Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Magnetic Energy Release in Relativistic Plasma, *Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-ray Bursts*, *Proceedings of the IAU Symposium Vol. 279*, p.405-406, 2012
 - Ohsuga, K., Radiation-MHD Simulations of Black Hole Accretion Flows and Outflows, *AGN Winds in Charleston*, *ASP Conference Series Vol. 460*, p.176, 2012
 - Toriumi, S., Yokoyama, T., Numerical Simulation and SOT Magnetogram Analysis of the Small-scale Magnetic Elements in a Solar Emerging Flux Region, Ed. Leon Golub, Ineke De Moortel and Toshifumi Shimizu, *ASP Conference Series*, Vol. 456, *Astronomical Society of the Pacific*, p.33, 2012
- (3) 国際会議発表
- Matsumoto, T., Protostellar collapse of magneto-turbulent cloud cores: formation of protoplanetary disks and outflows, *Star Formation 2012*, *NAOJ, Japan*, Dec 10-12, 2012
 - Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., and Matsumoto, R., Comptonized Radiation MHD Outflows from Super-Eddington Black Hole Accretion Flows, the Third Cross-Strait Astrophysics Symposium, *Xiamen, China*, Dec. 6-8, 2012
 - Matsumoto, R. and Machida, M., Magnetic Fields in Astrophysical Disks, *APCTP Workshop on Astrophysics: Magnetic Fields in Astrophysics*, *Postech, Pohang, Korea*, Nov. 21, 2012
 - Hanawa, T., Kanno, Y., and Harada, T., Reconstruction Method for M1 Equations of Radiative Transfer, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012*, *Kyoto, Japan*, Nov. 2, 2012
 - Matsumoto, T., Machida, M.N., and Inutsuka, S., Protostellar Collapse of Magneto-Turbulent Cloud Core: Formation of Protoplanetary Disks and Outflows, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012*, *Kyoto, Japan*, Nov. 1, 2012
 - Asahina, Y., Ogawa, T., Matsumoto, R., Magnetohydrodynamic Simulations of the Formation of Molecular Clouds in Our Galactic Center, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012*, *Kyoto, Japan*, Nov. 1, 2012
 - Matsumoto, R., Global Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Dynamos, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012*, *Kyoto, Japan*, Oct.31, 2012
 - Ohsuga, K. Radiation Magnetohydrodynamics of Black Hole Accretion Flows and Outflows, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012*, *Kyoto, Japan*, Oct. 31, 2012
 - Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., and Matsumoto, R., 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*, *Kyoto, Japan*, October 31, 2012
 - Harada, T., Kanno, Y., and Hanawa, T., Vertical Structure of Irradiated Protoplanetary Disks, *East Asia Numerical Astrophysics Meeting*

- EANAM2012, Kyoto, Japan, Oct. 30–Nov. 2, 2012
- Ono, T., Ogawa, T., Machida, M., Matsumoto, R., Global Three-dimensional Magneto-hydrodynamic Simulations of Cooling Instability in Black Hole Accretion Disks, East Asia Numerical Astrophysics Meeting EANAM2012, Kyoto, Japan, Oct. 29–Nov. 2, 2012
 - Takahashi, H.R., Magnetic Reconnection in Relativistic Plasmas, East Asia Numerical Astrophysics Meeting, Kyoto University, Kyoto, Japan, October 29 – November 2, 2012
 - Matsumoto, T., Protostellar collapse of magneto-turbulent cloud cores: formation of protoplanetary disks and outflows, JSST2012, Kobe, Japan, Sep 27–28, 2012
 - Hotta, H. Parity of Solar Global Magnetic Field in 2D Flux-transport Dynamo, ISSI workshop “Helioseismology and dynamics of the solar interior”, Bern, Switzerland, Sept. 25, 2012
 - Ohsga, K., Simulations of the Radiation-pressure Instability of Disk and Outflow, Accretion Flow Instabilities, Warsaw, Poland, Sept. 4–7, 2012
 - Matsumoto, R., Global Simulations of Magnetic Environments around Compact Objects, IAU Symposium 290, Feeding Compact Objects: Accretion on All Scales, Beijing, China, Aug. 20–24, 2012
 - Iijima, H. and Yokoyama, T., The role of Magnetic Field on the Scale of Solar Surface Convection, Hinode-6 Meeting, University of St Andrews, Aug. 14–17, 2012
 - Ohsga, K., Overview of Recent Advances in Accretion Disk Theory, X-ray Binaries. Celebrating 50 Years Since the Discovery of Sco X-1, Boston, USA, July 10–12, 2012
 - Takahashi, H.R., Numerical Study of Relativistic Magnetohydrodynamic Reconnection and its Radiative Effects, Thirteenth Marcel Grossmann Meeting MG13, Stockholm University, Stockholm, Sweden, July 1–7, 2012
 - Ohsga, K., Radiation-MHD Simulations of Accretion Flows and Outflows around Black Holes, ASTRONUM 2012, Hawaii, USA, June 24–29, 2012
 - Matsumoto, R., Three-dimensional Magneto hydrodynamic Simulations of Disk Dynamos, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2012, Princeton, USA, May 23–25, 2012
 - Takahashi, H.R., Radiative MHD Simulation of Relativistic Magnetic Reconnection, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2012, Princeton, USA, May 23–25, 2012
 - Hirose, S., and Turner, N. J., Heating and Cooling Protoplanetary Disks, in Revealing Evolution of Protoplanetary Disks in the ALMA Era, Kyoto, Japan, May 8–11, 2012
- (4) 国内会議発表**
- 松元亮治, 降着円盤の角運動量輸送問題, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 28 日
 - 堀田英之, 横山央明, 表面付近を取り入れた太陽全球殻熱対流数値計算により実現される対流スペクトル, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26 日
 - 松元亮治, 小野貴史, 小川崇之, 町田真美, 川島朋尚, 小田寛, 大須賀健, 巨大ブラックホール降着流の磁気流体数値実験の進展, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
 - 川島朋尚, 大須賀健, 薄井竜一, 河合誠之, 松元亮治, 突発天体 Swift J1644+57 の再バースト予測ーリミットサイクル・シナリオの提案, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 21 日
 - 川島朋尚, 大須賀健, 嶺重慎, 松元亮治, ブラックホール輻射磁気流体アウトフローのコンプトン冷却, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
 - 花輪知幸, 菅野裕次, 原田哲弥, 遷移円盤の多色輻射モデル, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学,

2013 年 3 月 21 日

- 廣瀬重信, Omer Blaes, Matt Coleman, Julian Krolik, 佐野孝好, 輻射磁気流体力学計算による矮新星降着円盤の熱平衡曲線, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
- 堀田英之, 横山央明, Matthias Rempel, 表面付近を含んだ球殻計算で明らかにする太陽内部熱対流構造, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
- 飯島陽久, 横山央明, 太陽静穏領域における超粒状斑と磁気ネットワークの関係について, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
- 大須賀健, 高橋博之, 相対論的輻射流体力学計算の新展開, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 22 日
- 松本倫明, 土橋一仁, 下井倉ともみ, 乱流と降着流をもった分子雲における集団的星形成, 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 2013 年 3 月 20 日
- 堀田英之, 横山央明, 磁束浮上中のねじり生成機構に関する研究, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 20 日
- 島海森, 横山央明, 磁束浮上直前に見られる水平発散流の磁場強度・ねじれ強度依存性, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 20 日
- 飯島陽久, 横山央明, 太陽光球磁場とスピキュールの関係について, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 20 日
- 松元亮治, 川島朋尚, 小野貴史, 朝比奈雄太, 恒星破壊に伴うブラックホール降着流のスペクトル状態変化モデル, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日
- 小野貴史, 小川崇之, 川島朋尚, 町田真美, 松元亮治, 降着円盤ダイナモと状態遷移の大局的 3 次元磁気流体計算, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日
- 工藤祐己, 松元亮治, 非熱的粒子を考慮した円盤ダイナモの 3 次元磁気流体計算, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日
- 町田真美, 中村賢仁, 松元亮治, 銀河ガス円盤ダイナモの初期磁場構造依存性について, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日
- 原田哲弥, 菅野裕次, 花輪知幸, M1 モデルによる原始惑星系円盤の輻射平衡モデル, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日,
- 菅野裕次, 原田哲弥, 花輪知幸, 内縁をもつ原始惑星系円盤での散乱・吸収・再放射, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 19 日,
- 堀田英之, 横山央明, 太陽対流層底での磁束のねじれ生成機構, 日本流体力学会, 高知大学, 2012 年 9 月 16 日
- 飯島陽久, 横山央明, 太陽表面における磁気エネルギースペクトルの由来, 日本流体力学会, 高知大学, 2012 年 9 月 16 日
- 町田真美, 中村賢仁, 松元亮治, 銀河ガス円盤における磁気流体ダイナモ機構の探求, 日本流体力学会, 高知大学, 2012 年 9 月 16 日
- 松元亮治, 小川崇之, 朝比奈雄太, 小野貴史, 工藤祐己, 鈴木健太郎, 松本洋介, 川島朋尚, 高次精度磁気流体コードの天体ダイナモ計算への適用, 日本流体力学会, 高知大学, 2012 年 9 月 16 日
- 朝比奈雄太, 小川崇之, 松元亮治, 冷却過程を考慮した磁気タワージェットと星間ガス相互作用の磁気流体シミュレーション, 日本流体力学会, 高知大学, 2012 年 9 月 16 日
- 堀田英之, Matthias Rempel, 横山央明, 飯田佑輔, Yuhong Fan, 音速抑制法を用いた太陽内部熱対流数値計算, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 2012 年 5 月 22 日
- 飯島陽久, 横山央明, 太陽表面对流スケールに対する磁場の役割, 地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 2012 年 5 月 22 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- 大須賀健, 『ゼロからわかるブラックホール』講談社ブルーバックス, 第 28 回 (2012 年) 講談社科学出版賞受賞