

10-NA06

## 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** 磁場と輻射が関与する天体活動現象の大規模3次元シミュレーションを実施するため、輻射と物質の相互作用を考慮した輻射磁気流体コードの並列効率を高めて超並列計算機に実装する共同研究を実施した。磁気流体部分には近似リーマン解法の一つであるHLLD法に基づくシミュレーションエンジンを実装し、降着円盤の大局的3次元磁気流体計算に適用した。輻射輸送については流束制限拡散近似に基づく陰的ソルバーの並列効率を高めて惑星形成の母胎となる原始惑星系円盤の3次元シミュレーションに適用する作業を進めている。降着率変化に伴う降着円盤状態変化の全貌を解明するため、磁気流体方程式に加えて輻射輸送方程式の1次のモーメント式を解く輻射磁気流体コードを作成し、テスト計算を実施した。また、適合格子細分化法(AMR法)を用いた自己重力磁気流体シミュレーションコードSFUMATOのチューニングを実施した。

### 1. 研究の目的と意義

激しい時間変動やX線・ガンマ線放射、ジェット噴出等を伴う活動的な天体現象の多くには磁気エネルギーの蓄積と解放が関与している。我々のグループでは、磁場と物質の相互作用をマクロに扱う磁気流体近似に基づく3次元磁気流体コードを作成して、太陽表面における活動領域の形成、爆発的なエネルギー解放(太陽フレア)、渦状銀河における磁場の増幅と維持(銀河ダイナモ)、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、宇宙ジェット形成、星形成や重力崩壊型超新星爆発等のシミュレーション等を世界に先駆けて実施してきた。

磁気流体シミュレーションの対象のひとつである降着円盤と宇宙ジェットの模式図を図1に示す。

回転しながら中心天体に向かって落下する物質は中心天体の重力と回転によって働く遠心力がつりあう半径で円軌道を描く。この物質の角運動量を抜き取ることができれば、回転物質をさらに落下させることができ、この際に解放される重力エネルギーをエネルギー源として円盤を加熱したりジェットを加速したりすることができる。回転物質の降着を可能にする角運動量輸送機構は長年の謎で



図1：降着円盤とジェットの模式図

図1に示すように、降着円盤は中心天体の重力と回転によって働く遠心力がつりあう半径で円軌道を描く。この物質の角運動量を抜き取ることができれば、回転物質をさらに落下させることができ、この際に解放される重力エネルギーをエネルギー源として円盤を加熱したりジェットを加速したりすることができる。回転物質の降着を可能にする角運動量輸送機構は長年の謎で

あったが、3次元磁気流体シミュレーションの結果、差動回転する磁気流体中で成長する磁気回転不安定性によって生成された乱流磁場の磁気ストレスによって角運動量が効率的に輸送されることが明らかになり、現象論的な角運動量輸送パラメータを導入することなく、降着円盤の時間発展を直接計算によって調べることが可能になった。

降着円盤は降着物質が解放する重力エネルギーによって加熱され光を放射する。円盤の光度が増大すると輻射冷却によって円盤構造が変化する。図2に降着円盤において加熱と冷却がつりあう熱平衡曲線を示す。横軸が降着円盤の面密度、縦軸が物質の降着率である。降着率が低く、円盤が光学的に薄い場合、円盤内部での磁気エネルギー散逸に伴う加熱と降着に伴う動径方向の熱輸送(移流)が釣り合った状態で円盤は進化する(左側の太い熱平衡曲線)。

我々のグループでは降着円盤全体を計算領域に含め、輻射冷却を無視した大局的な3次元磁気流

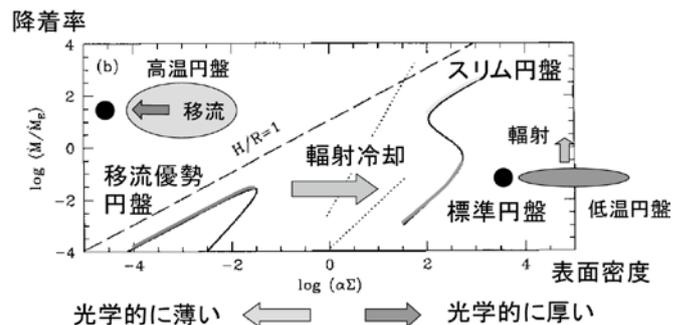


図2：降着円盤の熱平衡曲線。

体シミュレーションによって移流優勢状態の降着円盤の進化を調べ、円盤内部はガス圧と磁気圧の比  $\beta$  が 10 程度の準定常状態に至ること、円盤表面に浮上した磁気ループがねじられて膨張し、噴出流が形成されることなどを明らかにしてきた。

降着率が增大して表面密度が増えると輻射冷却が加熱を凌駕し、左側の光学的に薄い高温状態（ハードステート）から右側の光学的に厚い低温状態（ソフトステート）に状態遷移する。ブラックホール候補天体が急激に明るくなるアウトバーストと呼ばれる現象の途中に、このようなハードステートからソフトステートへの遷移が観測されている。図 3 にその模式図を示す。この図は星の進化を理解する鍵になった HR 図に相当する図であり、横軸が硬 X 線強度と軟 X 線強度の比（色）、縦軸が光度を示す。アウトバースト初期には硬 X 線が強いハードステート状態で光度が上昇する。この状態は図 2 の左側の熱平衡曲線を右上に移動する段階にあたる。光度が球対称降着の場合に輻射圧が重力を凌駕する臨界光度（エディントン光度： $L_E$ ）の 10% 程度に達すると軟 X 線が強いソフトステートへの遷移が起こる。この間に準周期的な光度変動（Quasi-Periodic Oscillation: QPO）やジェット噴出が観測される。

図 3 の破線は 2009 年に国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に取り付けられた全天 X

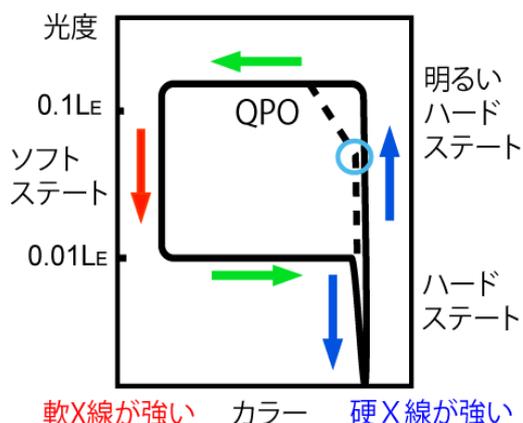


図 3 ブラックホール候補天体増光時の進化経路。横軸は硬 X 線強度と軟 X 線強度の比、縦軸は光度。破線は MAXI で観測された XTE J1752-223 の進化経路。

線監視装置 MAXI によって観測されたブラックホール候補天体 XTE J1752-223 の進化経路である。太陽の 10 倍程度の質量のブラックホールはサイズが 100km 程度と小さいため、現象の時間スケールが短く、増光から減光までのサイクルは数カ月で完了する。

ハードステートからソフトステートへの状態遷移は輻射冷却が加熱を凌駕することによって発生するため、その過程をシミュレートするためには輻射冷却を考慮する必要がある。さらに、光度が上昇すると輻射圧が重要になる。このような過程を扱うためには輻射と磁気流体の相互作用を考慮した輻射磁気流体シミュレーションが必要である。輻射と物質の相互作用を含めた計算は、惑星形成の母胎となった原始惑星系円盤（降着円盤の一種）の構造と進化を理解するためにも不可欠である。

輻射磁気流体の研究は始まったばかりであり、シミュレーション手法を確立し、その並列性能を高めることにより世界に先駆けた研究を展開することができる。この手法は降着円盤のみならず、星形成過程や重力崩壊型超新星爆発におけるニュートリノと磁気流体の相互作用についても適用でき、応用範囲は広い。

本研究の目的は、様々な天体現象で重要になる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の並列効率を高め、超並列計算機を用いた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。輻射の時間スケールが系の力学的タイムスケールに比べて短い現象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。この部分の並列性能向上をはかり、1000 コア以上を用いた場合でもコア数に比例する性能向上が得られるようにする。また、空間スケールが大きく変化する宇宙現象を、多層格子法、適合格子細分化法（AMR 法）を用いてシミュレートする際の輻射場の陰的解法を改良し、並列効率を高めることを目指す。

具体的な対象としては星形成過程や重力を及ぼす天体の周りに形成される降着円盤、原始星円盤、銀河ガス円盤などの回転ガス円盤を扱う。

## 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

東京大学

### (2) 共同研究分野

超大規模計算系応用分野

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

天体活動現象に適用可能な流体・磁気流体の計算手法についてはこれまで多くの研究が行われ、我々のグループにおいても磁気流体シミュレーションコードを並列計算機に実装し、高い並列効率を得てきた。輻射磁気流体のシミュレーション手法として輻射流束と輻射エネルギー勾配を関係づけた表式を用いる Flux Limited Diffusion (FLD) 法、輻射輸送方程式の1次のモーメント式を解く M1 法、輻射輸送方程式を解く ART 法などが提案されているが、いずれの手法も実装が始まったばかりであり、数値的精度、安定性、並列効率等の面で多くの改良要素がある。また、星形成や超新星爆発等、現象の空間スケールが大きく変化する宇宙現象のシミュレーションで使用される多層格子、適合格子上で輻射場を解く並列効率の高い計算方法を実装したい。こ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り、数値天体物理分野の研究者と計算機科学分野の研究者が共同でアルゴリズムを改良し、並列効率を高めていく必要がある。

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, 小田 寛, 三上隼人,

川島朋尚, 小川崇之

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

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

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

総合研究大学院大学

富田賢吾

## 3. 研究成果の詳細

### (1) 近似リーマン解法に基づく磁気流体シミュレーションエンジンの実装

我々のグループでは降着円盤の磁気流体シミュレータの開発を進めてきた。このシミュレータのプラットフォームは我々が開発して公開済の宇宙磁気流体シミュレーションソフトウェア CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) であり、従来実装していた Modified Lax-Wendroff 法, Roe 法, CIP-MOCCT 法のシミュレーションエンジンに加えて HLLD 法 (Miyoshi and Kusano 2005) に基づく磁気流体シミュレーションエンジンを実装した。

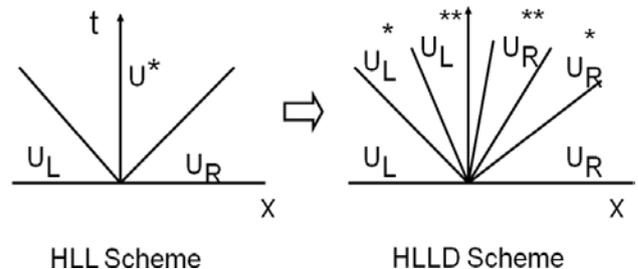


図4 セル境界でのリーマン解法。HLL 法では中間状態を1状態で近似するため数値拡散が大きい。HLLD 法では中間状態を4状態で近似する。

HLLD 法は近似リーマン解法の一つであり図4のようにセル境界での不連続面の分解を近似的に解くことによってセル境界を横切る流束を数値的に求め、各セル内の物理量の時間変化を計算する手法である。広く使われている HLL 法 (図4左) では、中間状態を1状態で近似するため数値拡散が大きい。HLLD 法 (図4右) では速度と圧力が

連続で密度が不連続に変化する接触不連続面，磁場方向が変化する不連続面を扱うことができるようにするため，4個の中間状態があるという近似のもとでリーマン問題を解く。

HLLD法に基づくシミュレーションコードは数値振動を起こしにくく，また，エネルギーが保存されるという利点がある。そこで，HLLD法を用いて円筒座標系3次元の磁気流体方程式を解くモジュールをHA8000に実装してテスト計算を行った。図5に結果を示す。使用したメッシュ数は $(N_r, N_\phi, N_z)=(1024, 32, 1024)$ ，100タイムステップの計算を実施した。512コアまでのテスト計算では，ほぼコア数に比例する性能が得られている。

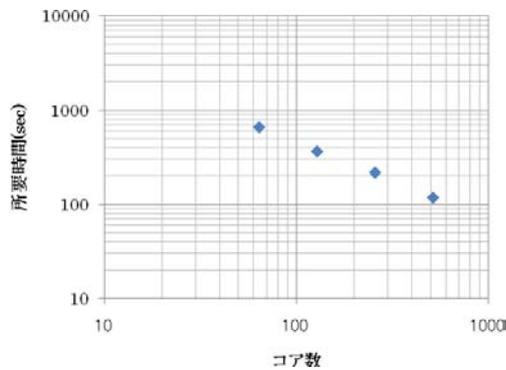


図5 HA8000に実装したHLLD法に基づく円筒座標系3次元磁気流体コードの並列性能。

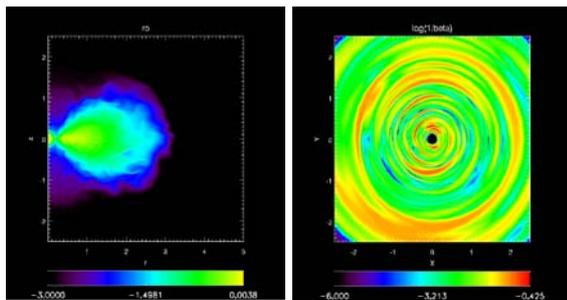


図6 HLLD法に基づく円筒座標系3次元磁気流体コードを用いた回転トーラスのシミュレーション結果。15回転後の密度分布(左図)と赤道面での $\log(1/\beta)$ の分布(右図)を示す。

図6にHLLD法に基づくコードを用いて実施した回転トーラスの3次元シミュレーション結果を示す。メッシュ数は $(N_r, N_\phi, N_z)=(240, 34, 400)$ ，15回転後の密度分布(左図)と $\log(1/\beta)$ の分布(右

図)を示す。 $\beta$ はガス圧と磁気圧の比の値である。磁気回転不安定性の成長に伴って $\beta < 10$ の領域が渦状に形成されていること，角運動量を失った物質が中心天体に落下すること等，従来のシミュレーション結果を再現することができている。

(2) 流束制限拡散近似を用いた原始惑星系円盤の輻射磁気流体シミュレーション

原始惑星系円盤における惑星形成プロセスを理解するためには，円盤内の温度構造を知ることが極めて重要である。原始惑星系円盤の温度構造は，加熱(=粘性加熱と中心星からの可視光照射)と冷却(=円盤表面からの赤外線輻射)のバランスによって決まる。近年，円盤内の粘性加熱は，磁気回転不安定性が駆動する磁気乱流の散逸によるものと考えられているが，その加熱率(散逸率)を正確に求めるためには，直接数値計算によるアプローチが不可欠となる。

そこで，我々は，原始惑星系円盤の一部をシアリングボックスで近似し，その垂直方向の熱バランスを「第一原理」から求めることを目的とした3次元輻射磁気流体力学シミュレーションを行っている。また，原始惑星系円盤は，温度が低いため，弱電離プラズマとなっている。そのため，シミュレーションとともに，電離度を求めるための計算(中心星からのX線による電離とダスト粒子への自由電子吸着のバランス方程式を解く)も逐次行っている。

本シミュレーションで用いる輻射磁気流体力学方程式では，輻射輸送に関して「流束制限つき拡散近似」と呼ばれる方法を採用しており，その結果，輻射輸送に関する独立変数は輻射エネルギー密度だけになる(輻射流束は，輻射エネルギー密度の勾配に常に比例する)。また，原始惑星系円盤においては，興味がある磁気流体力学のタイムスケール(円盤の回転周期)に比べて，輻射輸送のタイムスケールが極端に短いという特徴がある。そのため，磁気流体力学部分を時間陽的に，輻射輸送部分を時間陰的に解いている。このとき，輻射輸送部分は「流束制限つき輻射拡散(線形拡散

方程式)」と「ガス輻射間のエネルギー交換（非線形方程式）」から成るが、これらを同時に陰的に解く必要がある。そこで、非線形方程式を解くニュートンラプソン法に、線形拡散方程式を解く行列反転ソルバーを組み込むアルゴリズムを構築している。

一般に、疎行列を係数とする連立一次方程式の求解は科学技術シミュレーションにおいて、最も計算時間を要するプロセスの一つであり、特に大規模問題においてその傾向は顕著である。本シミュレーションにおいても、計算時間全体の80%以上を占める。そこで、高速で安定な解法の選択、開発が必要となる。これまでは、行列反転ソルバーにマルチグリッド法（スムーザ＝ガウスザイデル法）を採用してきたが、例えば、256コアによるフラットMPIの場合の並列効率は約60%であった。

図7は、本シミュレーション結果の一例で、熱平衡状態にある原始惑星系降着円盤の磁場構造（線は磁力線、色は磁場の強さ、黄色い面は粘性加熱率の等値面）を表す。円盤構造は垂直方向に、大まかに三層に分かれ、それぞれ以下の特徴を持つことが明らかとなった。

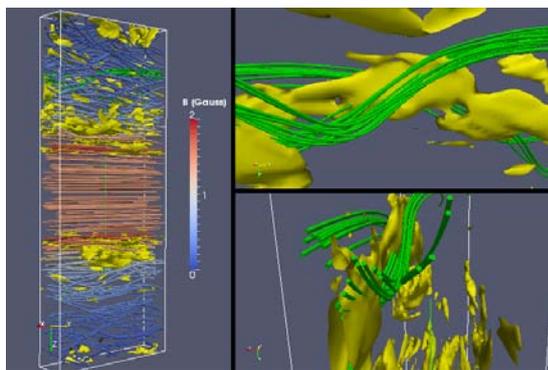


図7：原始惑星系降着円盤の3次元輻射磁気流体シミュレーション結果。

- ・不活性領域：円盤赤道面近傍は電離度が低く、磁気乱流が抑制されるため、磁力線はほとんどまっすぐな状態にある。その結果、粘性散逸はほとんど起きず、また、中心星からの可視光照射も届かないため、温度は最も低い。
- ・活性層：不活性領域を挟んで、活性層が存在す

る。ここは、円盤の表面部分に相当し、外部からの電離源（中心星からのX線）がよく届くため、電離度が高い。そのため、磁気乱流が最も良く発達し、粘性加熱率も高い。粘性加熱率の等値面が、磁気回転不安定性の結果、水平方向に引き伸ばされていることが特徴である。

・大気層：活性層の外側はガスの密度・圧力は低く、円盤の大気部分に相当する。ここでは、ガスに比べて活性層から供給された磁場が卓越しているため、磁気乱流は抑制されるが、その一方で別の不安定性（パーカー不安定性）が発達する。このパーカー不安定性のため、粘性加熱率の等値面は、垂直方向に引き伸ばされている。

今回、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究プロジェクトとして、特にメニーコアにおける並列性能向上を目指した、前処理付き反復法の開発を進めている。

本研究は、大規模問題向けの連立一次方程式解法としてクリロフ部分空間法に基づく反復解法の代表的な手法として、BiCGSTAB、GPBiCGを使用する。反復解法の安定な収束のためには、問題の特質も考慮に入れた適切な前処理手法の選択が重要であるが、本研究では様々な科学技術計算に広く使用されている不完全LU分解(ILU)を採用する。また、本研究では、MPIを使用した並列化を行うため、対象とする形状の特性、対称性等を考慮した領域分割手法を採用し、領域分割のための専用ツールを開発している。この領域分割ツールを使用することにより、領域間の隣接情報、通信テーブル等並列計算に必要な情報を自動的に生成することができる。

不完全LU分解による前処理は大域的なデータ参照が必要なため、本来並列化は困難であるが、本研究では不完全LU前処理時に領域外の影響を考慮しない局所前処理手法を適用する。局所前処理手法による反復解法を使用すると、領域数が増加した場合、特に場の係数の空間的分布が急激に変化している場合には収束が悪化する場合がある。このための対策として、領域間オーバーラップを

深くとって局所前処理手法を安定化するアプローチが広く使用されている。本研究で開発する領域分割ツールでは領域間オーバーラップ深さを自由に選択することができる。また、局所前処理手法を安定化させるためには、通常内点～外点の順番で番号付けされる局所分散データの要素番号を、依存関係に従って並び替えることが有効であることは知られている。領域分割ツールではこのような並び替え機能もサポートしている。

(3) 1次モーメント法に基づく輻射磁気流体シミュレーション

流束制限拡散近似では輻射流束が輻射エネルギー密度の勾配に比例すると仮定し、輻射流束の時間変化を陽には計算しない。この近似は輻射強度  $I(t, x, y, z, \nu, \theta, \phi)$  についての輸送方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + n \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$

を光線方向について積分した0次のモーメント式、すなわち輻射エネルギー密度  $E_r = \int I d\Omega / c$  ( $d\Omega$  は微小立体角)の時間発展のみを計算することに相当する。次のレベルの近似として輻射輸送方程式の1次のモーメント式を用いて輻射流束  $F_r = \int I \boldsymbol{\ell} d\Omega$  ( $\boldsymbol{\ell}$  は光線方向の単位ベクトル)の時間発展を陽に解く1次モーメント法(M1法)がある。

相対論的な場合まで考慮した輻射磁気流体方程式はローレンツ因子を  $\gamma$ ,  $D = \rho \gamma$ , 全エネルギーを  $E$ , 全運動量流束を  $F$ , 全応力テンソルを  $P_t$ , 輻射応力テンソルを  $P_r$  として

$$\begin{aligned} \partial_t D + \nabla \cdot (D\mathbf{v}) &= 0, \\ \partial_t E_t + \nabla \cdot \mathbf{F}_t &= 0, \\ \partial_t \mathbf{F}_t + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_t &= 0, \\ \partial_t \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) &= 0, \\ \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} &= 0, \\ \partial_t E_r + \nabla \cdot \mathbf{F}_r &= S_E \\ \partial_t \mathbf{F}_r + \nabla \cdot \mathbf{P}_r &= \mathbf{S}_F, \end{aligned}$$

流体とともに動く系で輻射は等方的、すなわち

$$P_0^{ij} = \frac{\delta^{ij}}{3} E_0$$

と仮定して観測者系にローレンツ変換し,  $v/c$  の1次まで展開すると次式を得る。

$$P_r^{ij} = \frac{\delta^{ij}}{3} E_r + \frac{\beta^i F_r^j}{c} + \frac{\beta^j F_r^i}{c} - \frac{2}{3} \delta^{ij} \frac{\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{F}_r}{c}$$

基礎方程式は以下の形をしている。

$$\partial_t \mathcal{U} + \nabla \cdot \mathcal{F} = \mathcal{S}$$

これをオペレータスプリットして

$$\partial_t \mathcal{U} + \nabla \cdot \mathcal{F} = 0$$

をHLL法で陽的に解き、次式を陰的に解く。

$$\partial_t \mathcal{U} = \mathcal{S}$$

このコードを実装してテスト計算を実施した。

(4) 適合格子細分化法を用いた自己重力磁気流体シミュレーションコードの最適化

適合格子細分化法(AMR法)に基づく自己重力磁気流体シミュレーションコード SFUMATO のチューニングを行った。SFUMATO コードは、磁気流体部分はスケーラビリティが良いが、自己重力部分はスケーラビリティが悪いことが問題であった。これは、前者の支配方程式が双曲型であり、後者の支配方程式が楕円型であるためである。自己重力部分では転送がボトルネックになっていた。

そこで、転送回数を減らす工夫を施し、自己重力部分の計算速度が典型的に20～30%高速化した(図8)。しかし、自己重力部分のスケーラビリティはあまり改善しなかった。スケーラビリティの抜本的な改善は今後の課題である。

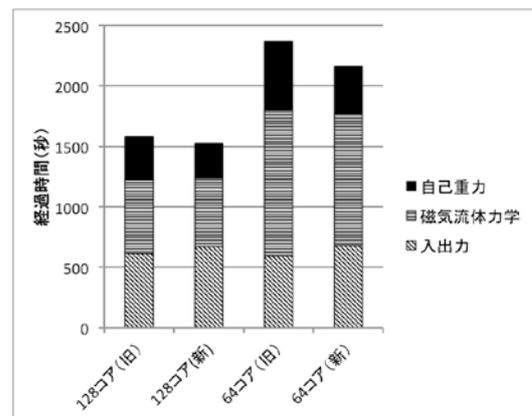


図8 AMRコードの各部分の経過時間。128コアと64コアにおける計算をチューニング前後で比較した。自己重力部分に改善が見られる。

#### 4. これまでの進捗状況と今後の展望

天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーションを行うためのコード開発を行ってきた。磁気流体部分に関しては近似リーマン解法的一种であるHLLD法に基づく円筒座標系3次元の磁気流体コードをHA8000に実装し、コア数に比例する並列性能が得られている。磁気流体部分は陽的な差分法による計算であるため、1024以上のコアを用いた場合でも十分に高い並列性能が期待できる。

HLLD法に基づく磁気流体コードは数値的振動の少ない解が得られるという利点を持つ。大局的な3次元磁気流体シミュレーションの結果、磁気回転不安定性の成長、磁気ストレスによる角運動量輸送による物質降着など、従来のコードで得られていた結果が再現されつつある。しかしながら、磁場方向が反転する電流層が高速で運動する場合に磁場の数値的散逸が大きくなるという問題点もあることがわかった。磁気流体の回転を差し引いた速度を用いた方程式系を解く速度参照法等を適用して磁場の数値的散逸を抑えることを試みている。方位角方向のメッシュ数が128メッシュ以下の場合でも磁場の数値的散逸が十分に小さくなるようにコードを改訂した上で、降着円盤の大局的3次元シミュレーションに適用していく。

共同研究メンバーである廣瀬は流束制限拡散近似(FLD近似)を採用した輻射磁気流体シミュレーションコードを用いて、原始惑星系円盤の一部を取り出した3次元輻射磁気流体シミュレーションを実施し、中心星からのX線照射等も考慮して原始惑星系円盤における磁気乱流構造、温度構造等を求めた。これらは惑星形成過程を理解する上で不可欠な情報である。このコードの並列効率を高めるため、局所不完全LU分解を前処理とする連立1次方程式の反復解法コードの実装に着手した。今後は、この高速な行列反転ソルバーを用いることで、原始惑星系円盤全体をターゲットした3次元輻射磁気流体力学シミュレーションを行う。

共同研究メンバーの大須賀らはFLD近似に基づく2次元軸対称輻射磁気流体コードを用いてブラックホール降着円盤のシミュレーションを実施し、

降着率が高い場合、輻射圧によって加速され、磁場によって回転軸方向に絞り込まれたジェットが噴出するという結果を得た。本共同研究では、この計算を3次元に拡張することにより、円盤内部での磁気回転不安定性の成長による磁気乱流生成と磁場の増幅・飽和過程をセルフコンシステントに扱ったシミュレーションを実施することを目指している。ブラックホール近傍では特徴的な速度が光速になり、クーラン条件から制限される時間刻みが輻射によるエネルギー輸送のタイムスケールにくらべて小さくなるため輻射と物質の相互作用項も陽的に計算でき、高い並列性能が得られると期待される。FLD法に基づく3次元輻射磁気流体コードの開発と並行して、輻射流束の時間発展を計算する1次モーメント法のコード開発を進め、テスト計算を実施した。

適合格子細分化法(AMR)法に基づく自己重力磁気流体コードのチューニングを行い、自己重力部分の並列効率を改善したが、さらに改善の余地がある。AMR法に基づく輻射磁気流体コードについても今後、同様なチューニングを進める。

ブラックホール降着円盤に関しては、磁気流体部分をHLLD法、輻射エネルギー密度と輻射流束の時間発展をHLL法を用いて解くモジュールを実装し、図9に模式的に示すような、降着率変動に伴う進化の全貌を明らかにしていきたい。

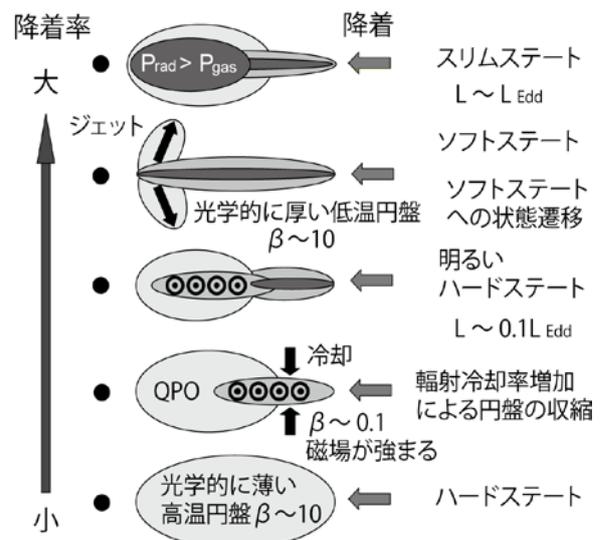


図9 降着率増加に伴うブラックホール候補天体の進化の模式図。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 国際会議発表

- Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Heinzeller, D., and Matsumoto, R., Radiative Properties of Supercritical Accretion Flows around Stellar Mass BHs, Relativistic Whirlwind, May 31-June 4, 2010, Trieste, Italy (oral)
- Machida, M., Nakamura, K.E., Oda, H., Ohsuga, K., and Matsumoto, R., Global MHD Simulation of Accretion Flows including Cooling, Relativistic Whirlwind, May 31-June 4, 2010, Trieste, Italy (invited talk)
- Matsumoto, R., Global MHD Simulations of Black Hole Accretion Flows and QPOs, Relativistic Whirlwind, May 31-June 4, 2010, Trieste, Italy (invited talk)
- Ohsuga, K., Radiation MHD Simulations of Black Hole Accretion Flow and Outflow, Relativistic Whirlwind, May 31-June 4, 2010, Trieste, Italy (invited talk)
- Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Yoshida, T., Heinzeller, D., and Matsumoto, R., Photon Spectra of Supercritical Accretion Flows around Black Holes via Monte Carlo Method, 4<sup>th</sup> East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Nov. 2-5, 2010, Taipei (oral)
- Matsumoto, R., Global Magnetohydrodynamic Simulations of Dynamos, Quasi-Periodic Oscillations, and State Transitions in Black Hole Accretion Flows, 4<sup>th</sup> East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Nov. 2-5, 2010, Taipei (invited talk)
- Ohsuga, K., Two-dimensional Global Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Flow and Outflow, 4<sup>th</sup> East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Nov. 2-5, 2010, Taipei (oral)
- Matsumoto, R., Global Magnetohydrodynamic Simulations of State Transitions in Black Hole

Candidates, 4<sup>th</sup> International MAXI workshop, The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources, Nov. 30-Dec. 2, 2010, Aoyama, Tokyo (invited talk)

- Matsumoto, R., Global Simulations of Magnetic Energy Release and Dynamos in Accretion Disks, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2010, Dec. 6-9, 2010, Nara (poster)

### (2) 国内会議発表

- 松元亮治, 町田真美, 小川崇之, 降着円盤における準周期振動の3次元磁気流体数値実験, 流体力学会, 2010年9月9日~11日, 北海道大学
- 川島朋尚, 大須賀健, 嶺重慎, 吉田鉄生, Heinzeller, D., 松元亮治, ブラックホール超臨界降着流の輻射特性, 日本天文学会, 2010年9月22日~9月24日, 金沢大学
- 廣瀬重信, Turner, N., 原始惑星系円盤の熱力学構造 II, 日本天文学会, 2010年9月22日~9月24日, 金沢大学
- 町田真美, 中村賢仁, 大須賀健, 小田寛, 松元亮治, 磁気圧優勢円盤に関する3次元磁気流体数値実験, 日本天文学会, 2010年9月22日~9月24日, 金沢大学
- 松本倫明, 町田正博, 犬塚修一郎, 乱流分子雲コアにおける回転円盤とアウトフローの形成, 日本天文学会, 2010年9月22日~9月24日, 金沢大学
- 松元亮治, 小川崇之, 朝比奈雄太, 小田寛, 町田真美, 降着円盤磁気流体シミュレータの開発(8):準周期振動と状態遷移への適用, 日本天文学会, 2010年9月22日~9月24日, 金沢大学