

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号： 62616  
 研究種目： 研究活動スタート支援  
 研究期間： 2011～2012  
 課題番号： 23840045  
 研究課題名（和文）高エネルギー天体现象における磁気エネルギー解放とフレア機構の解明  
 研究課題名（英文）Magnetic Energy Release in High Energy Astrophysical Phenomena  
 研究代表者  
 高橋 博之（TAKAHASHI HIROYUKI）  
 国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任助教  
 研究者番号： 80613405

研究成果の概要（和文）：モーメント法に基づく相対論的抵抗性輻射磁気流体方程式の数値解法の開発を行った。輻射の吸収項と散乱項について陰的時間積分を採用することにより、従来用いられていた陽的解法に比べて計算コストを大幅に削減することに成功した。さらにこのコードを相対論的磁気リコネクションの問題に適用し、磁気リコネクションに対する輻射の影響を調べた。その結果、放射抵抗の為に磁気エネルギーの解放率は下がることがわかった。

研究成果の概要（英文）：We develop numerical schemes for solving relativistic resistive radiation magnetohydrodynamic equations. Using semi-implicit scheme, we can lower computational costs without preventing massive parallel computing. Then we adopt our code to study radiation effects on the relativistic magnetic reconnection. We found that a radiation drag force slows down an outflow speed, leading to a reduction of energy conversion rate.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：プラズマ・相対論・輻射

## 1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションはその名の通り、非平行形状にある磁力線同士が繋ぎかわる現象である。通常プラズマは電気伝導率が高くプラズマは磁力線に凍結しており、磁力線同士が繋ぎ変わることは無い。しかしプラズマ不安定等の何らかの原因によって電気抵抗が大き

くなると磁力線は繋ぎ変わり、この際磁気エネルギーがプラズマの熱や運動エネルギーに変換される。このような現象は地球磁気圏、太陽、そして実験室プラズマで観測されており、磁気嵐や太陽フレアの起源となる。またそういった天文学的応用だけでなくプラズマの素過程を理解する上でも重要な現象である。

近年磁気リコネクションは強磁場を持つ高エネルギー天体におけるエネルギー解放現象としても注目を集めている。例えばマグネターと呼ばれる $10^{15}$  Gaussもの強磁場を持つ天体からは巨大フレアと呼ばれる現象が観測されており、この現象は磁気エネルギーの解放によって引き起こされていると考えられている。またブラックホール降着円盤内部でも磁気リコネクションは重要な役割を果たす。円盤内では磁気回転不安定性の成長によって磁場が増幅され、その磁気トルクによってガスの角運動量が外側へと輸送される。この角運動量によってガスは降着し同時に重力エネルギーが解放されるが、角運動量輸送率は磁場によって行われるため、磁力線形状やその強さに依存する。従って円盤内部で起こる磁気リコネクションが降着円盤の活動性に大きな影響を与えている可能性がある。また増幅された磁気エネルギーの一部は磁気リコネクションによって熱エネルギーへと変換され、放射によって輻射エネルギーへと変換される。従って磁気リコネクションはブラックホールの重力エネルギーを観測される光へと変換する役割も果たしている。

では高エネルギー天体现象における磁気リコネクションの研究はどこまで進んだのか。非相対論的リコネクションの場合、大別してSweet('58)とParker('57)によって提唱されたSweet-Parker型(以下SP型) Petschek('64)によって提唱されたPetschek型に分けられる。一般にSP型はエネルギー変換速度が遅く、PC型は拡散領域に加えて衝撃波でもエネルギーを解放するため、速いエネルギー解放が可能であることが知られている。近年になって相対論的磁気リコネクションの理論・数値的研究が行われ始めたが、その結果は相対論的効果によって多少の物理プロセスの違いはあるにせよ、エネルギー変換効率という意味では

同じような結果が得られている(Watanabe & Yokoyama '06, Takahashi et al.' 11)。しかしこれらの研究では初期にエネルギーを持っているのは磁場とガスのみであり、かつ、解放された磁気エネルギーは全てガスの運動エネルギーと熱エネルギーへ変換されると仮定していた。つまり輻射は全く考慮されていない。しかし実際はフレア現象で観測されているように、無視できない量のエネルギーが輻射へと変換されていると考えられる。また特にガス質量降着率の高い一部のブラックホール降着円盤ではガスのエネルギーに対して輻射のエネルギーが圧倒的に大きく、かつ光学的厚みも大きい。従って吸収や散乱の効果が重要となる。しかし輻射の効果を考慮に入れた相対論的磁気リコネクションの研究は皆無である。相対論的磁気リコネクションの重要性は様々な天体现象で指摘されているにも関わらず、磁気リコネクション現象そのものの研究はほとんど進展していないと言える。

## 2. 研究の目的

前節で述べたように、高エネルギー天体现象では輻射のエネルギーがガスのエネルギーに比べて大きく、かつ吸収や散乱の効果が無視できない状況が実現される。輻射とガスはこれらの過程を通してエネルギーや運動量のやり取りを行うが、特に高密度天体で重要となる電子散乱の効果は輻射エネルギーが優勢の場合に顕著に働く。そのため輻射エネルギー優勢な降着円盤等では輻射が直接リコネクションのダイナミクスに影響を与えると考えられる。輻射を考慮することは磁気リコネクションによって観測されるフレアを説明するという天文学的意義の他に高エネルギー天体における磁気エネルギー解放機構の物理過程そのものを理解する上でも非常に重要である。そこで本研究では特に輻射圧優勢な降着円盤

に焦点を当て、ガスと磁場、そして輻射を無矛盾に考慮した相対論的抵抗性輻射磁気流体 (Relativistic Resistive Radiation Magnetohydrodynamics, 以下R3MHD) 数値実験を行うことで磁気リコネクションのダイナミクスに迫る。

### 3. 研究の方法

前節の目的の為に、本研究ではR3MHDシミュレーションを行う。高エネルギー天体では密度が高いため、プラズマは流体近似で表すことが出来る。一方、輻射は以下の輻射輸送方程式によって記述される。

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

ここでは  $I_{\nu}$  輻射強度、 $\sigma_{\nu}, \sigma_{\nu, s}$  は吸収、散乱に対する透明度、 $\mathbf{n}$  は光子の運動量空間の方向ベクトルである。この輻射輸送方程式は第一原理に基づいた方程式であるが独立変数が7つあり、かつ式が複雑であるため、流体力学方程式と同時に輻射輸送方程式を数値的に解くことは現在のスーパーコンピュータをもってしても困難である。そこで本研究では輻射輸送方程式を運動量空間で積分した以下の0, 1次モーメント方程式を数値的に解く方法を採用する。

$$\partial_t E_r + \partial_j F_r^j = -G^0$$

$$\partial_t F_r^i + \partial_j P_r^{ij} = -G^i$$

ここで  $E_r, F_r^i, P_r^{ij}$  はそれぞれ輻射エネルギー密度、フラックス、輻射ストレスであり、右辺の  $G^0, G^i$  は輻射4元力と呼ばれ、吸収や散乱による輻射とガスのエネルギー運動量のやり取りを表す。モーメント方程式は1次まで打ち切っており、輻射ストレスを記述する方程式が欠けているため方程式は閉じていない。ここではM-1クロージャーと呼ばれる輻射の

状態方程式に対応する関係式を仮定することによって方程式を閉じる。これら輻射のモーメント方程式と流体力学方程式、Maxwell方程式を連立させて解く。

## 4. 研究成果

### (1) R3MHDコードの開発

前節で導入した輻射のモーメント方程式と流体力学方程式、そしてMaxwell方程式を連立して解くことで、輻射と磁場、そしてガスの時間発展を無矛盾に追うことが出来る。しかしこれらの方程式を解く数値計算法は開発されておらず、磁気リコネクション研究に取りかかる前に数値計算法を開発する必要がある。

そこで本研究ではまず磁場を無視し、輻射モーメント方程式と流体方程式を同時に、かつ安定に解く数値計算法の開発を行った。輻射のモーメント方程式を解く際に問題になるのはモーメント式の右辺に現れる輻射4元力である。従来用いられていた陽的時間積分法では数値計算で用いるタイムステップの大きさ  $\Delta t$  は最も短い物理的時間スケールで制限される。光学的に厚い状況では吸収や散乱のタイムスケールが力学的時間に比べて遥かに短く、その結果  $\Delta t$  は小さい値に制限されるため、系の力学進化を追うことが困難になる。

そこで研究代表者はこの問題を解決するために輻射4元力をその他の項から分離し、一部を陰的に時間積分する半陰的時間積分法を開発した。陰的時間積分を用いた効果を如実に表した結果を図1に示す。この計算では初期に異なる温度を持つガスと輻射を置き、吸収を通して熱平衡状態へと遷移していく過程を示したものである。単純な陽的時間積分法(図中□)に比べて本研究で開発した手法(図中●)を用いると非常に大きなタイムステップを用いても平衡解へと安定に遷移していくことがわかる。この手法を用いることで実際の

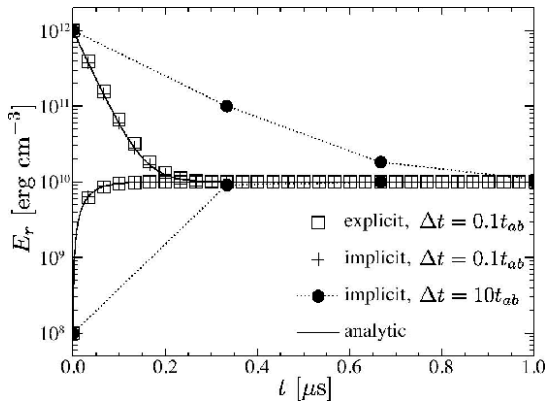


図 1 輻射がガスと吸収を通して熱平衡状態へと遷移していく過程を計算した結果。単純な陽的時間積分(□)に比べて本研究で開発した手法(●)は長いタイムステップを用いても安定に平衡解へと近づいていくことがわかる。

問題に応用した場合、典型的には100倍以上の計算コストの削減につながる。

次に上記で述べた輻射流体方程式に磁場と磁気散逸の効果を含めたR3MHD方程式の数値解法の開発を行った。磁気散逸を考慮した場合、陽的時間積分法を用いると  $\Delta t$  は散逸のタイムスケールによって制限されてしまう。そこで我々は磁気散逸についても陰的時間積分法を適用する (Palenzuela' 09) ことでこの問題を解決し、R3MHDコードを完成させた。

## (2) 輻射を考慮した磁気リコネクション研究

R3MHDコードを用いて磁気リコネクション研究を行った。初期条件としてブラックホール降着円盤内部を想定し、輻射エネルギーがガスの熱エネルギーに比べて卓越した状況を仮定した。その結果を図2に示す。原点付近で磁気リコネクションが起こるとガスは上下から流入し、加熱や加速を受けて左右へとアウトフローとして排出される。その際アウトフローとインフローの間に衝撃波(図中緑線)が形成される。このような衝撃波を持つ磁気リコネクションはPC型と呼ばれておりよく知ら

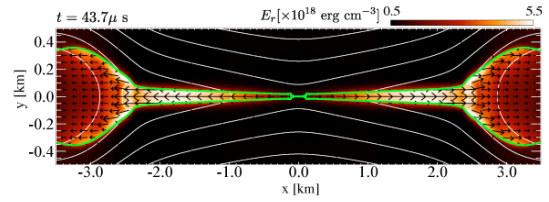


図 2 R3MHD コードを用いた相対論的磁気リコネクション計算の結果。カラーは輻射エネルギー密度、白線は磁力線、矢印は輻射フラックスを表す。

れた構造ではあるが、本研究では輻射圧優勢なプラズマ中でもこのような構造が形成されることを初めて示した。

この初期条件ではガス密度が高く、電子散乱に対して光学的に厚いために輻射はガスに引きずられて左右へ排出される。これはガスから見ると散乱を通して輻射に運動量を渡しているため、ガスの加速効率は輻射を考慮しない場合に比べて下がる。このような効果は放射抵抗と呼ばれており、解放されたエネルギーの一部はガスの加速だけでなく輻射のビームを作ることに使われる。その結果ガスの排出が効率的に行われなくなるため、磁気エネルギーの解放率は下がることがわかった。この効果の大きさは輻射のエネルギー密度と磁場のエネルギー密度の比で決まっており、輻射エネルギー優勢な場合にエネルギー解放率が下がる。従って輻射圧優勢な降着円盤等では非常に重要な役割を果たすと考えられる。

## (3) フレア解明に向けて ～大局的数値実験～

磁気リコネクションによってアウトフローが形成されると、同様に輻射も左右にビーム状に排出されることを示した。この輻射はブラックホール降着円盤で観測されるフレアと関係すると考えられる。アウトフロー方向にいる観測者はフレア現象を観測することが出来るが、上流にいる観測者はフレアを観測することが出来ないと思われる。しかしこの計

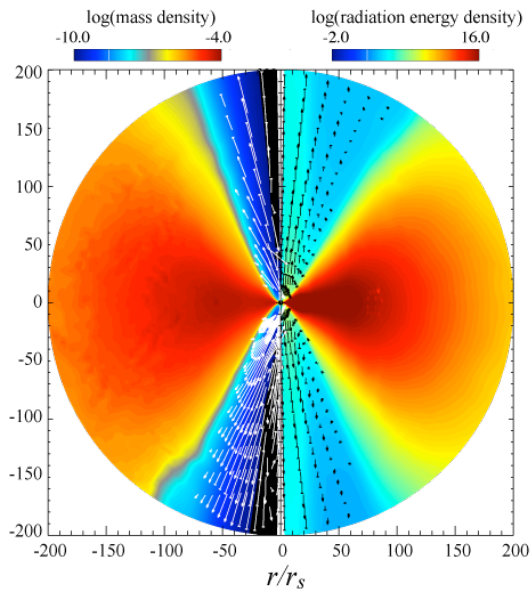


図 3 輻射圧優勢なブラックホール降着円盤の大局的数値実験。左右のカラーはそれぞれガス密度と輻射エネルギー密度を表し、矢印は速度ベクトルと輻射フラックスを表す。

算は非常に局所的な磁気エネルギー解放のみを扱っているため、密度構造、ひいては光学的厚みの変化等を考慮していない。そのためどの方向にいる観測者がどのようなフレアを観測するか、というのはこの結果だけからは一概には言えない。高エネルギー天体現象におけるフレア機構を解明するためには局所的な磁気散逸機構の研究だけでなく、大局的数値計算も同時に行うことが必要不可欠である。

そこで現在研究代表者はフレアの研究対象をブラックホール降着円盤に絞り、大局的数値実験を行っている。図 3 に示すように輻射圧優勢な円盤からはジェットやアウトフローが形成され、磁気エネルギーの一部は円盤から上空コロナへと輸送される。この計算では電気抵抗を無視した計算を行っているが、実際にはコロナへと輸送された磁気エネルギーの一部が磁気リコネクションによって解放され、コロナ加熱やフレアの起源になると考えられる。今後電気抵抗を考慮した計算を行

い、引き続きフレア機構の解明に向けて研究を行っていく。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, 'Numerical Treatment of Anisotropic Radiation Field Coupling with the Relativistic Resistive Magnetofluids', 2013, accepted for publication in ApJ, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013arXiv1306.0049T>, 査読

(2) Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yuichiro Sekiguchi, Tsuyoshi Inoue, Kengo Tomida, 'Explicit-Implicit Scheme for Relativistic Radiation Hydrodynamics', 2013, ApJ, 764, 122, 10.1088/0004-637X/764/2/122, 査読

(3) Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, 'Magnetic Energy Release in Relativistic Plasma', 2012, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 279, 405, 10.1017/S1743921312013567, 非査読

[学会発表] (計 20 件)

(1) H. R. Takahashi, 'explicit-implicit scheme for relativistic radiation hydrodynamics', ASTRONUM 2013, 8th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, July 1st - July 5th 2013, Biarritz, France, (invited)

(2) 高橋 博之, 「超臨界降着流からの放射とアウトフローの形成」, HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム, 2013 年 3 月 5 日-6 日, 富士ソフトアキバプラザ, 東京

(3) 高橋 博之, 「モーメント法における相対論的輻射磁気流体の半陰的解法」, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ WS2013, 2013 年 2 月 18 日-19 日, 千葉大学, 千葉

(4) 高橋 博之, 「相対論的散逸性磁気流体シミュレーション」, 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム 「計算宇宙物理学の新展開」, 2012 年 12 月 22 日-24 日, つくばエポカル, 茨城 (invited)

(5) H. R. Takahashi, 'Magnetic Reconnection in Relativistic Plasmas', East Asia Numerical Astrophysics Meeting, October 29-November 2, 2012, Kyoto

University, Japan

(6) 高橋 博之, 「相対論的輻射(磁気)流体力学」, 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, 2012年8月6日-10日, 千葉大学, 千葉

(7) H. R. Takahashi, 'Numerical Study of Relativistic Magnetohydrodynamic Reconnection and its Radiative Effects', Thirteenth Marcel Grossmann Meeting - MG13, July 1-7, 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden

(8) H. R. Takahashi, 'Radiative MHD Simulation of Relativistic Magnetic Reconnection', 2012 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2012), 2012, May 23-25, Princeton, US (invited)

(9) 高橋 博之, 「相対論的抵抗性輻射磁気流体コードの開発とその応用」, 日本天文学会春期年会, 2012年3月19日-22日, 龍谷大学, 京都

(10) H. R. Takahashi, Ken Ohsuga 'Magnetic Energy Release in Relativistic Plasma', IAU Symposium 279 'Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts', 2012, March 12-16, Nikko, Japan

(11) 高橋 博之, "相対論的磁気リコネクションによるエネルギー解放と輻射による影響", HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム, 2012年3月8日, 秋葉原コンベンションホール, 東京

(12) 高橋 博之, "モーメント法を用いた輻射場と相対論的磁気流体の数値解法", 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ WS2012, 2012年3月5日-6日, 千葉大学, 千葉

(13) 高橋 博之, "相対論的抵抗性輻射磁気流体方程式の数値解法と相対論的磁気リコネクション問題への応用", 第五回ブラックホール磁気圏勉強会, 2012年2月28日-3月1日, 大同大学, 愛媛 (invited)

(14) H. R. Takahashi, 'Numerical Study of Relativistic Magnetic Reconnection with R3MHD Codes', INTERNATIONAL WORKSHOP ON Particles and Radiation from Cosmic Accelerators CA2012, February 20-22, Chiba, Japan, 2012

(15) 高橋 博之, 「相対論的リコネクションと輻射場による影響」, NINS/UT Reconnection Workshop 2012, 2012年2月19日-20日, 学術総合センター, 東京 (invited)

(16) 高橋 博之, 「R3MHD(相対論+電気抵抗+輻射+磁気流体)方程式の数値解法」, SGPSS 波動分科会「一般相対論とMHDプラズマ」, 2011年12月16日-17日, 町屋倶楽部, 福井 (invited)

(17) 高橋 博之, 「磁気リコネクションでフレアを説明できるか?」, AGN-JET WORKSHOP

2011 -他波長放射で探る活動銀河核ジェット-, 2011年9月26日-28日, 国立天文台, 東京

(18) H. R. Takahashi, 「Beyond the Relativistic Magnetohydrodynamics: Numerical Scheme for Relativistic Resistive Radiation Hydrodynamics」, Plasma Conference 2011, 2011, September 24, Ishikawa, Japan

(19) 高橋 博之, 「陰的解法に基づく安定な相対論的輻射磁気流体コードの開発」, 日本天文学会秋期年会, 2011年9月20日, 鹿児島大学, 鹿児島

(20) 高橋 博之, 「陽・陰解法を用いた相対論的輻射磁気流体コードの開発」, 流体力学会, 2011年9月7日, 首都大学東京, 東京

[その他]

ホームページ等

[http://www.cfca.nao.ac.jp/~takhshhr/study\\_radmhd.html](http://www.cfca.nao.ac.jp/~takhshhr/study_radmhd.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 博之 (TAKAHASHI HIROYUKI)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任助教

研究者番号: 80613405

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし