

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18540236  
 研究課題名（和文） カーブラックホール近傍での磁気リコネクションによる相対論的ジェット形成機構の解明  
 研究課題名（英文） A Study on Formation Mechanism of Relativistic Jets due to Magnetic Reconnection around Kerr Black Hole

研究代表者  
 小出 眞路（KOIDE SHINJI）  
 熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
 研究者番号：20234677

## 研究成果の概要（和文）：

相対論的宇宙ジェットの形成機構として回転するブラックホール周辺での磁場とプラズマの相互作用による磁気的モデルが注目されている。本課題の当初の目的はその磁気的モデルにおける磁気リコネクションの役割を一般相対論的電磁流体力学(抵抗性 GRMHD)の数値計算により検証することであった。しかし、単純な相対論的オームの法則を用いると、因果律が満たされないという因果律の問題に直面した。この問題を解決し抵抗性 GRMHD を基礎付ける『一般化 GRMHD』を導出し、その方程式の諸特性を解明し数値計算の基礎を与えた。

## 研究成果の概要（英文）：

Recently, a model of magnetically-driven jet has become promising as a formation mechanism of cosmic relativistic jets. To investigate the influence of magnetic reconnection in the formation, we have to perform a numerical simulation of general relativistic magnetohydrodynamics with finite resistivity (resistive GRMHD). When we use the standard relativistic Ohm's law, we can not avoid the break-down of causality. To fix this problem, we derived a set of generalized GRMHD equations and revealed its nature. These results provide a base of the resistive GRMHD simulations.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	330,000	2,730,000

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：理論天文学，ブラックホール，プラズマ，ジェット，磁場

## 1. 研究開始当初の背景

われわれは本研究課題開始当初までブラックホール磁気圏のプラズマの挙動を解明するために一般相対論的な理想 MHD 数値計算を世界に先駆けて行い、ブラックホールのまわりのプラズマと磁場の相互作用による特異な現象を解明してきた[1-3]。われわれが開発した数値計算法は改良が加えられ現在一般相対論的 MHD (GRMHD) 数値シミュレーションとして広く行われるようになった。しかし、それらの GRMHD 数値計算はすべて電気抵抗をゼロとした理想 MHD 近似を用いており、さらに放射や粒子素過程を無視するなどかなり大胆な(非現実的な)近似となっている。実際、GRMHD 数値計算を用いた結果において回転するブラックホールのエルゴ領域と降着円盤をつなぐような閉じた磁束管があると磁束管は引き伸ばされ、磁気島の形成が見られる(図1参照)[4]。これは理想 GRMHD 数値計算の結果であるので磁気リコネクションは起こらず、本来磁気島は現れないはずである。

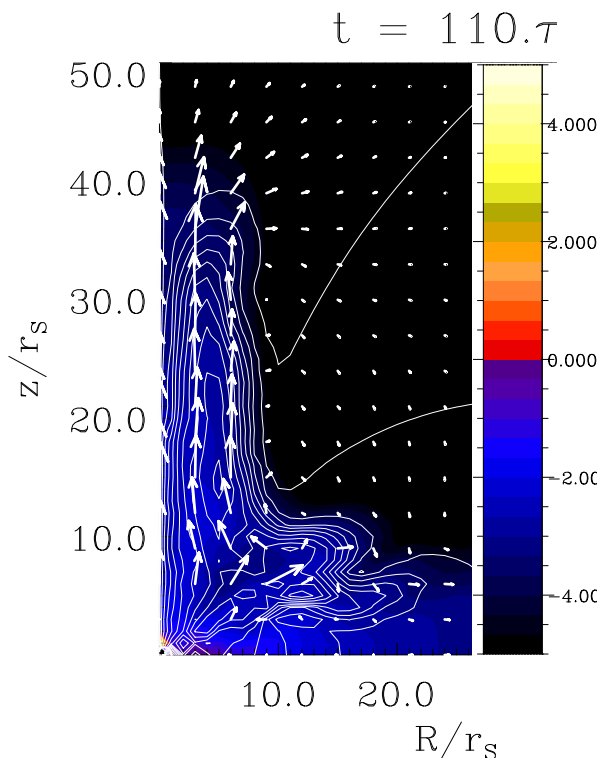


図1 回転するブラックホール(回転パラメータ0.99995)の降着円盤付近のプラズマと磁場の相互作用により形成されたジェット。カラーは密度の対数、白い実線は磁束面、矢印は速度を表す。ジェットの速度は光速の60%程度である。磁気島の形成がジェットの内部および降着円盤表面付近に見られる。ここで、 $r_s$  はシュワルツシルト半径、 $t$  は  $r_s$  を光速で割った時間の次元を持った量である。

すなわち、これらの磁気島は数値的なものであり、数値誤差に起因する。その数値的な磁気島の形成は数値計算に非物理的な影響を与えている可能性があり避けるべきである。しかし、いずれにしても、磁気リコネクションが起こりやすい反平行磁場がブラックホール磁気圏には自然と形成されることを示唆している。このような反平行磁場のあるようなブラックホール磁気圏では磁気リコネクションが起こっていると考えるのは自然であろう。ブラックホール磁気圏での磁気リコネクションの役割については、それによるブラックホール回転エネルギーの引き抜き機構などブラックホールのまわりで特異な役割を担っている可能性がある。ブラックホール周辺のプラズマ中の磁気リコネクションを調べるためには電気抵抗を考慮した相対論的 MHD (抵抗性 RMHD) の数値計算が必要である。単純に相対論的なオームの法則を用いて電気抵抗を入れると、群速度が光速を超える電磁波モードが現れる。このことは超光速通信の実現を意味することになり、因果律に反することになる。この因果律問題により抵抗性 RMHD の研究はほとんど進んでこなかった。

## 参考文献

- [1] S. Koide, K. Shibata, T. Kudoh, and D. L. Meier, *Science*, 295, 1688 (2002).
- [2] S. Koide, *Phys. Rev. D* 67, 104010 (2003).
- [3] S. Koide, *Astrophys. J. Lett*, 606, L45 (2004).
- [4] S. Koide, K. Shibata, and T. Kudoh, *Phys. Rev. D*, 74, 044005 (2006).

## 2. 研究の目的

この研究計画の当初は既に関係されていた理想 GRMHD 数値計算プログラムに単純に電気抵抗を考慮することにより、ブラックホールまわりのジェット形成における磁気リコネクションによる追加速を調べようとするものであった。これは観測されるジェット内での磁気エネルギーと運動エネルギーの比(この比を  $\beta$  という)が理論の予測よりもはるかに小さいという問題(  $\beta$  問題)を解決するひとつのモデルを与えると期待される。しかし、GRMHD に電気抵抗を単純に入れると群速度が光速を超える電磁波モードが現れる因果律の問題に直面した。われわれはそ

の問題を一般相対論的 2 流体方程式から導いた 1 流体方程式を用いて因果律に反しない一般化 GRMHD 方程式を導出し、抵抗性 GRMHD 数値シミュレーションの発展の基礎を与えることを目的とする。

### 3. 研究の方法

ブラックホール磁気圏での磁気リコネクションの関連する諸現象を明らかにするために電気抵抗を考慮した GRMHD (抵抗性 GRMHD) の数値計算を行うというのが本研究課題の当初予定していた方法である。しかし、通常用いられてきた相対論的オームの法則を用いると因果律が破れるという問題に直面し、抵抗性 GRMHD 方程式を考え直さざるをえなかった。そこでわれわれは一般相対論的 2 流体近似を基礎においた方法を用いる。それにより得られる一般化された GRMHD 方程式は理想 GRMHD 方程式と比べて格段と複雑で非相対論的 MHD の数値計算法がほぼそのまま利用できた理想 GRMHD の数値計算とは全く異なる数値計算法を開発する必要がある。当面そのように非常に複雑な方程式を取り扱うのは難しいと思われるので、何らかの近似を行う必要がある。宇宙プラズマの状態条件を考慮するなどして抵抗性 GRMHD の数値計算法を開発を行う。

### 4. 研究成果

(1) 本研究課題の初年度に当たる平成 18 年度において抵抗性 GRMHD 計算プログラムの開発を始めた。しかし、因果律の問題に突き当たり開発は頓挫した。平成 19 年度はブラックホール磁気圏での磁気リコネクションの関わる現象について数値計算に頼らず解析的な検討を進めた。とくに、磁気リコネクションによるカーブラックホール回転エネルギーの引き抜き機構を提案し、引き抜きの条件を解析的に調べた。ここでエネルギー引き抜きの条件を大局的な磁場は無視するなど非常に簡単化したモデルを用いた。その結果、磁気リコネクションによりブラックホールのエネルギーを引き抜くにはエルゴ領域内において相対論的な磁気リコネクションが起こらなくてはならないことが分かった。相対論的磁気リコネクションは巨大楕円銀河 M87 中心などにある活動銀河核のブラックホール付近では起こる可能性があるが、銀河系内のマイクロクエサ (GRS1915+105 など) のブラックホールでは必要とされる磁場は強すぎて起こらないと考えられる。

(2) われわれは抵抗性 GRMHD 方程式の因果律の問題を解決するために、まずは特殊相対論的 MHD (RMHD) 方程式を電子・陽電子プラズマ (対プラズマ) の 2 流体近似から 1 流体方程式 (一般化 RMHD 方程式) を導出して再検討した。その結果、オームの法則において電子・陽電子の慣性を無視せず (すなわち、電流の時間微分の項を無視しない)、プラズマパラメータが 1 よりも大きいというプラズマの条件を満たせば電磁波の群速度は光速を超えないことを明らかにした。逆に、この群速度が光速を超えないという条件から因果律を満たす RMHD 方程式を提示することができる。さらに、一般の質量比の 2 流体についても同じように因果律を満たす一般化 RMHD 方程式の導出に成功した。これは電子・イオンプラズマ (通常プラズマ) の RMHD 方程式を与える。対プラズマと通常プラズマの一般化 RMHD 方程式を比較することにより両者のプラズマの定性的な違いが分かった。定量的な違いについてはまず一般化 RMHD 方程式を線形化しプラズマ振動、アルフベン波などのプラズマの基本となるモードについてその伝播モードを調べた。

(3) 平成 20 年度はブラックホールのまわりで起こる磁気リコネクションに関連した現象を解明するために一般相対論的 2 流体方程式より一般化された GRMHD 方程式の導出を行った。ここで、これまで用いられてきた理想 GRMHD のオームの法則に単純に電気抵抗を入れると因果律を満たさなくなる原因を明らかにし、一般化されたオームの法則を用いる必要性を示した。さらに、電子・イオンプラズマと電子・陽電子プラズマのそれぞれの特性を考慮した一般化された相対論的 MHD 方程式を提案し、その方程式系の基本的特性を明らかにした。さらに、一般化された GRMHD 方程式の示唆するさまざまな奇妙なプラズマ現象について解析をはじめた。その中でも、太陽質量程度のブラックホール近傍のような大きな潮汐力のあるところでは、電荷分離により電気抵抗がなくても磁気リコネクションが起こりうることを示唆した。さらに、そのような特異な磁気リコネクションが起こるのに必要な電荷分離について線形解析を行い、自発的に電荷分離が起こる条件を明らかにした。今後、そのような特異な磁気リコネクションや電荷分離について計算するための一般化された GRMHD 方程式を用いた数値計算法を開発し、大規模計算を行うためには一般化された相対論的オームの法則を取り扱う必要がある。その計算は膨大になるためにまともなそれを計算することは得策ではないと思われる。何らかの一般化されたオームの

法則の近似式を用いる必要があるが、一般にそれにより因果律を満たさなくなることが多い。そのような因果律の問題を回避しながらブラックホール磁気圏の数値計算を行うための検討を行う必要がある。

#### 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7件)

Shinji Koide, Generalized relativistic magnetohydrodynamic equations for pair and electron-ion plasmas, The Astrophysical Journal, 査読あり, **696**, 2009, pp. 2220-2233.

小出眞路, ブラックホール磁気圏と相対論的ジェット, 日本物理学会誌, 査読あり, **64**, 2009, pp. 373-378.

Shinji Koide, Propagation of electromagnetic waves in resistive pair plasma and causal relativistic magnetohydrodynamics, Physical Review D, 査読あり, **78**, 2008, 125026.

Shinji Koide, Kenzo Arai, Energy extraction from a rotating black hole by magnetic reconnection in the ergosphere, The Astrophysical Journal, 査読あり, **682**, 2008, pp. 1124-1133.

小出眞路, 宇宙ジェットと高速プラズマ回転流の謎, 査読あり, **83**, 2007, pp. 378-386.

[学会発表](計10件)

小出眞路, 一般化された GRMHD 方程式の示唆するブラックホール周辺プラズマの奇妙な振る舞い, 日本地球惑星科学連合3学会宇宙プラズマ合同シンポジウム, 2010.5.24(月), 幕張メッセ.

Shinji Koide, Generalized GRMHD equations of plasmas in black hole magnetospheres, 第19回一般相対論と重力研究会(JGRG19), 2009.12.2(水), 立教大学.

Shinji Koide, Energy extraction from rotating black hole by magnetic reconnection, SCSAMM Workshop, 2009.8.28(金), University of Maryland.

小出眞路, 電子・陽電子プラズマと電子・イオンプラズマの相対論的MHDについ

て, 日本物理学会, 2009.3.28(土), 立教大学.

小出眞路, ブラックホール磁気圏におけるMHD近似の適用限界, 日本天文学会, 2009.03.25(水), 大阪府立大学.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

小出眞路 (Koide Shinji)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 20234677

##### (2)研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号: