

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871054

研究課題名(和文)パルサー終端衝撃波における新しい粒子加速過程の探求

研究課題名(英文)Basic plasma processes in the termination shock in a striped pulsar wind

研究代表者

銭谷 誠司(Zenitani, Seiji)

国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号：10623952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁気リコネクションと衝撃波のそれぞれの素過程について、基礎的な研究を行った。磁気リコネクション系を議論するために必要な重要領域の定義を提案し、さらに粒子軌道との関係について考察した。次に、粒子シミュレーションで相対論的高速で流れる粒子分布を扱うためのアルゴリズムを提案し、相対論的磁気リコネクションの重要領域の電磁流体的な力学関係を議論した。公開磁気流体コードを開発してシミュレーション研究を行い、リコネクションと衝撃波との相互作用を議論した。磁気流体コードを併用して、かにパルサー系で起きるガンマ線爆発(フレア)現象を説明するモデルを考案した。

研究成果の概要(英文)：We conducted basic researches on magnetic reconnection and magnetohydrodynamic (MHD) shocks. We proposed a new definition of the central region of magnetic reconnection and then further discussed particle dynamics in the reconnection magnetic geometry. Next we organized a fundamental algorithm to deal with relativistically-moving plasma distribution in particle-in-cell (PIC) simulations. By using a relativistic PIC simulation, we studied the electromagnetic balance in the central region of relativistic magnetic reconnection. We also developed a shock-capturing MHD code, which is publicly available. We studied the interaction between magnetic reconnection and MHD shocks. We also proposed a new mechanism to explain gamma-ray flares in a Crab pulsar system, by using MHD simulations.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：磁気リコネクション 衝撃波 磁気流体力学 相対論

1. 研究開始当初の背景

パルサー磁気圏の外側では、超高速の電子・陽電子プラズマ流（パルサー風）が流れ出していると考えられている。パルサーは磁極を傾けたまま高速回転しているため、磁場はトロイダル状に巻き込まれて、自転の反周期毎に極性が入れ替わる構造（図1）をしている。極性の境目には、強い電流が流れる電流シートが存在する。このような電流シートを挟んで反転磁場が次々とやってくる構造（“Striped Wind”）は、プラズマとともに遠方に運ばれていき、0.1パーセク彼方の終端衝撃波を経て、その外側のシンクロトロン星雲にプラズマと磁気エネルギーを供給していると考えられている。このような系では、逆向きの磁力線がつながり変わる磁気リコネクションと、高速の流れによってできる衝撃波が相互に作用しあって、プラズマの急激な熱化やそれに伴う高エネルギー粒子加速などが起きていると考えられている。しかし、このような終端衝撃波系の詳細な物理機構はよくわかっていない。

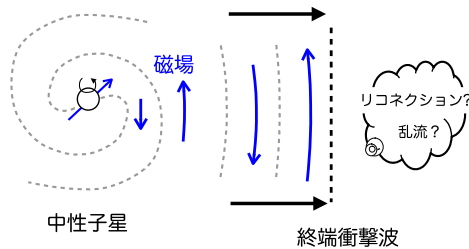


図1 パルサー終端衝撃波系の模式図

2. 研究の目的

本研究では、プラズマ物理の議論を基礎にして、パルサー風終端衝撃波系の基礎をなす磁気リコネクションと衝撃波の相互作用の物理を理解する。特に、運動論物理を詳しく探求し、磁気リコネクション=衝撃波系で起きるであろう高エネルギー粒子加速に注目して、その物理機構を解明する。最終的にはパルサー星雲の生成理論にも踏み込む予定であった。

3. 研究の方法

磁気リコネクション・衝撃波などのプラズマ素過程の非線形発展を、主に数値シミュレーションを用いて研究する。1つは、シミュレーション空間に多数の仮想プラズマ粒子を配置して、その粒子運動を1つ1つ解き進めたのち、粒子情報をもとに電磁場を解き進めていくプラズマ粒子（PIC）シミュレーションである。PICシミュレーションは計算コストがかかるものの、プラズマ素過程のほぼすべての物理を再現できる。また、磁気リコネクションと衝撃波構造の全体像を把握するために、衝撃波対応型の磁気流体コードを

用いたシミュレーション研究も行った。

4. 研究成果

磁気リコネクションの物理では、磁力線が繋ぎ変わるX点近くを「磁気拡散領域」あるいは「磁気散逸領域」と呼んで、リコネクション過程を駆動する重要な領域だと考えている。複数のリコネクション領域が高速で流れる複雑な系を議論するためには、リコネクションの重要領域自体をきちんと定義しておく必要がある。そこで我々は、プラズマ物理学の基本概念に立ち返って「磁気拡散領域」とされる領域の定義を再検討した。そして、拡散効果を表す簡単な表式を考案したうえで、ブラソフ型の運動論シミュレーションを使って、磁気リコネクション領域の中央に「磁気拡散」的な領域が存在することを確かめた [5]。

こうしたリコネクションの中心領域の外側（下流側）には、我々が「イオン電流層」領域と呼ぶ特徴的な領域が存在する。イオン電流層では、プラズマ物理の重要条件の1つであるイオン理想条件 ( $E + V_i \times B = 0$ ) が成り立っていない。そして、このことを理由にして、イオン電流層がリコネクションの中心領域の一部だとする意見もある。我々は、PICシミュレーションを使って磁気リコネクション系を再現し、イオン電流層におけるプラズマの性質を詳しく解析した。イオン電流層付近では、磁力線は図2で示すような歪んだ構造をしており、その中を個々のプラズマ粒子が運動している。我々はこの問題が、1980年代の宇宙プラズマ研究で議論された粒子軌道の非線形力学問題に相当することに注目した。そして、このことにヒントを得て、イオン粒子が新しいタイプの安定軌道を運動していることを発見した。また、プラズマ粒子が磁力線の周りをジャイロ回転している場合には、プラズマ理想条件がよく成立する。しかしイオン電流層では、そもそもイオンがジャイロ回転していないために、イオン理想条件が成立していない ( $E + V_i \times B = 0$ ) ことがわかった [8]。

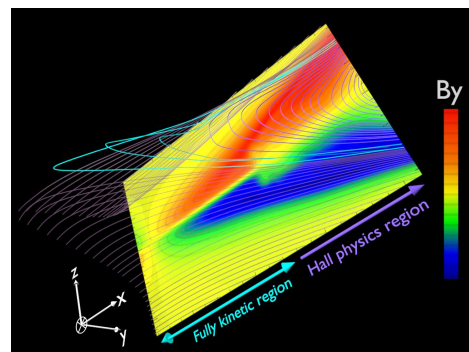


図2 磁気リコネクション系における磁力線の3次元構造

次に、相対論的なプラズマ流を粒子シミュレーションで再現するための数値解法を検討した。静止系では、運動論プラズマの速度分布関数は全ての方向に対称であるが、相対論的高速で流れ込んでくるプラズマ系では速度分布関数全体をローレンツ変換する必要がある。このとき、個々の粒子速度に応じて空間要素のローレンツ収縮の仕方が変わるため、観測者から見た分布関数は対称でなくなり、図3に示すように運動方向（左右方向）に歪んで見えるようになる。このような分布関数をPICシミュレーションで再現する数値解法は知られておらず、本研究と並行して論文が出始めたところであった（Swisdak 2013, Melzani et al. 2014）。そこで我々は、静止系の相対論的高温プラズマ分布関数を生成するSobol (1976)の方法を紹介したうえで、空間要素も含めてローレンツ変換を扱う汎用アルゴリズムを提案した [2]。この数値解法のベンチマーク結果を図3の中に示している。この手法によって、相対論的高速で運動する相対論的高温プラズマ（パルサー風の電流層部分）をPICシミュレーションで適切に再現できるようになった。この成果は、PICシミュレーション分野の基盤になる重要アルゴリズムである。

さらに、この数値解法を用いて、特殊相対論効果が効く相対論磁気リコネクションのPICシミュレーション研究を行った。リコネクション領域付近のプラズマの粒子の統計量を解析し、磁気流量量と対応させて議論した結果、リコネクション点付近で加速された高エネルギー粒子成分がリコネクション物理にとって重要な実効的な電気抵抗を担っていることがわかった。本稿執筆現在（2016年6月）この結果についての投稿論文の準備を進めているところである。

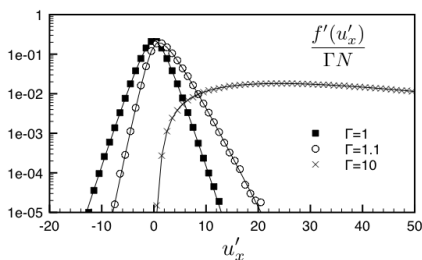


図3 相対論的高速プラズマ流における粒子速度分布問題

また、磁気リコネクションと衝撃波の相互作用を理解するために、磁気リコネクションジェットに伴う周辺構造を磁気流体（MHD）シミュレーションを用いて調査した。この際に関与した衝撃波対応型のシミュレーションコードを「OpenMHD」と銘打って一般向けに公開している。そして、典型的な磁場が強

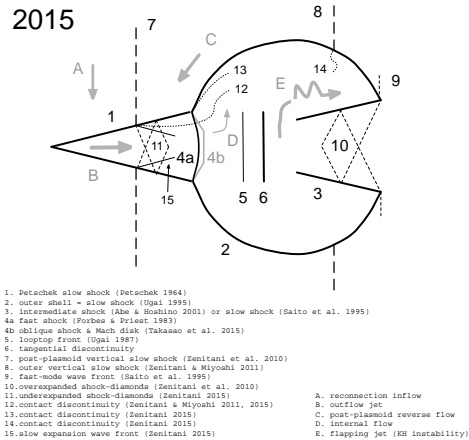


図4 磁気リコネクション系におけるさまざまな衝撃波構造

い（プラズマ圧：磁気圧の比率 = プラズマが低い）リコネクション系では、リコネクションジェットの速度が音速を超えるため、周辺にさまざまな衝撃波構造を生成することがわかった（図4）。この結果を圧縮性流体力学の立場から議論し、整理した [3]。

こうした理解のもとに、かにパルサー系で起きるガンマ線爆発（フレア）現象を説明するための新しいモデルを検討した。相対論的に拡張した磁気流体コードを使ってシミュレーションを繰り返し、パルサー風電流層のような複数の電流層が隣り合う系では、電流層が1つの簡単な系よりも爆発的なリコネクション現象を起こしやすいことを突き止めた（共著論文 [7,4]）。

一方、本来意図した当初の計画では、相対論衝撃波系の多次元プラズマ粒子シミュレーションを行い、幾つかの粒子加速の可能性を探るはずであった。本件については、現在も計算および解析を進めている途中であり、最終的な結論には至っていない。一連の結果の理解の上に立ち、引き続き計算および解析を進めていく予定である。

## 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11件)

[1] M. Hesse, N. Aunai, J. Birn, P. Cassak, R. E. Denton, J. F. Drake, T. Gombosi, M. Hoshino, W. Matthaeus, D. Sibeck, and S. Zenitani, “Theory and Modeling for the Magnetospheric Multiscale Mission,” Space Science Reviews 199, 577-630, doi:10.1007/s11214-014-0078-y (2016) 査読有

[2] S. Zenitani, “Loading Relativistic Maxwell Distributions in Particle

Simulations,” *Physics of Plasmas* 22, 042116, doi: 10.1063/1.4919383 (2015) 査読有

[3] S. Zenitani, “Magnetohydrodynamic structure of a plasmoid in fast reconnection in low beta plasmas: Shock-shock interactions,” *Physics of Plasmas* 22, 032114, doi:10.1063/1.4916104 (2015) 査読有

[4] J. Pétri, M. Takamoto, H. Baty, and S. Zenitani, “Explosive reconnection of double tearing modes in relativistic plasmas with application to the Crab nebula,” *Plasma Physics and Controlled Fusion* 57, 014034, doi:10.1088/0741-3335/57/1/014034 (2015) 査読有

[5] S. Zenitani, & T. Umeda, “Some remarks on the diffusion regions in magnetic reconnection,” *Physics of Plasmas* 21, 034503, doi:10.1063/1.4869717 (2014) 査読有

[6] 銭谷誠司、高橋博之、相対論領域のリコネクション、*プラズマ核融合学会誌* 89、845-848、

[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2013\\_12/jspf2013\\_12-845.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_12/jspf2013_12-845.pdf) (2013) 査読なし

[7] H. Baty, J. Pétri, and S. Zenitani, “Explosive reconnection of double tearing modes in relativistic plasmas: application to the Crab flares,” *MNRAS Letters* 436, L20, doi:10.1093/mnras/slt104 (2013) 査読有

[8] S. Zenitani, I. Shinohara, T. Nagai, & T. Wada, “Kinetic aspects of the ion current layer in a reconnection outflow exhaust,” *Physics of Plasmas* 20, 092120, doi: 10.1063/1.4821963 (2013) 査読有

〔学会発表〕(計 21 件)

[1] S. Zenitani, Particle dynamics and nongyrotropic distribution functions in collisionless magnetic reconnection, International GEMSIS and ASINACTR-G2602 Workshop, 名古屋大学、愛知県名古屋市、2016/03/22-25

[2] S. Zenitani, Particle acceleration in magnetic reconnection, CTA 研究会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015」, 宇宙線研究所、千葉県柏市、2016/01/13

[3] 銭谷誠司、Kinetic Ohm's law in relativistic magnetic reconnection, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、東京大学、東京都文京区、2015/11/01-03

[4] S. Zenitani, High-speed fluid dynamics in magnetic reconnection in a low-beta plasma, Chapman Conference on Magnetospheric Dynamics, Fairbanks (USA), 2015/09/27-10/02

[5] S. Zenitani, Particle acceleration in

relativistic magnetic reconnection, AOGS 12th Annual Meeting, Singapore (Singapore), 2015/08/02-07

[6] S. Zenitani, Numerical Modeling of Relativistic Reconnection: Kinetic, Two-fluid, and MHD Simulations, Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics, Krakow (Poland), 2015/04/20-24

[7] 銭谷誠司、相対論磁気リコネクション、宇宙プラズマ理論研究会、東北大学、宮城県仙台市、2014/08/13-15

[8] S. Zenitani, Magnetic diffusion and ion nonlinear dynamics in magnetic reconnection, US-Japan Workshop on Reconnection MR2014, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 2014/05/20-24

[9] S. Zenitani, The structure of the diffusion region in collisionless reconnection: Theory, simulation, and observation, Parker reconnection Workshop, Sao Jose dos Campos (Brazil), 2014/03/18-21

[10] 銭谷誠司、相対論磁気リコネクション研究の現状、ブラックホール磁気圏勉強会、熊本大学、熊本県熊本市、2014/03/03-04

[11] S. Zenitani, Magnetic diffusion and ion nonlinear dynamics in magnetic reconnection, ISAS Workshop: Magnetospheric Plasmas, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo, 2013/11/11-13

[12] S. Zenitani, Magnetic diffusion and ion nonlinear dynamics in magnetic reconnection, The 11th International School / Symposium for Space Simulations (ISSS-11), National Central University, Taoyuan (Taiwan), 2013/07/21-28

〔図書〕(計 1 件)

M. Yamada, J. Yoo, and S. Zenitani, in “Magnetic Reconnection: Concepts and Applications,” edited by Walter Gonzalez and Eugene Parker, Springer, chapter 4, pp. 143-179 (2016)

〔その他〕

ホームページ等  
天体プラズマシミュレーションコード「OpenMHD」

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/openmhd-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

銭谷誠司 (ZENITANI, Seiji)

国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号: 10623952

(2)研究協力者

篠原育 (SHINOHARA, Iku)  
宇宙科学研究所・学際科学研究系・准教授  
研究者番号：20301723

長井嗣信 (NAGAI, Tsugunobu)  
東京工業大学・地球惑星科学・教授  
研究者番号：60260527

梅田隆行 (UMEDA, Takayuki)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・統合データサイエンスセンター・講師  
研究者番号：40432215

和田智秀 (WADA, Tomohide)  
筑波技術大学・客員研究員  
研究者番号： N/A