

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800101

研究課題名(和文) 相対論的2流体モデルで明らかにするパルサー風のシグマ問題

研究課題名(英文) Relativistic Two-fluid Plasma Simulation Model and Application to Pulsar Winds

研究代表者

天野 孝伸 (Amano, Takano)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：00514853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：相対論的プラズマダイナミクスを記述する数値シミュレーションモデルとして、現在は相対論的磁気流体(MHD)方程式が標準的に用いられている。本研究ではその拡張として電子・イオンを別個の流体として扱う相対論的2流体モデルの開発を行った。具体的には、数値シミュレーションコードを開発・テスト問題へ適用、また相対論的MHD方程式の結果との比較を通して、相対論的MHD方程式の代替モデルとしての可能性を詳細に検討した。その結果、本モデルは相対論的MHDには無い長所を備えていることが分かり、今後の更なる発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：The relativistic two-fluid plasma simulation model has been investigated as a possible alternative to relativistic magnetohydrodynamics (RMHD) equations. The model deals with electron and ion fluids separately and is thus a superset of the RMHD model. A new numerical scheme has been developed that exactly satisfies the mathematical constraints in the basic equation, which leads to better numerical stability. We have confirmed that the new model has indeed advantages over the RMHD, both in terms of physics and numerics.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：プラズマ 相対論 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

パルサー、活動銀河核中心、ガンマ線バーストなど宇宙における超相対論的なプラズマと電磁場の果たす役割の重要性は既に広く認識されている。このような現象の数値モデルとして現在では一般的に、相対論的な磁気流体力学(Magnetohydrodynamics = MHD)モデルが広く用いられていた。しかしながら、電気抵抗を無視した理想 MHD モデルは高エネルギー天体現象において近年着目されている磁気リコネクション等に伴う磁場散逸(すなわち電気抵抗)を陽に取り扱うことが出来ない。その一方で、有限の電気抵抗を取り入れた抵抗性の相対論的 MHD は数値的に解きにくい(硬い)方程式系になることが知られており、また理論的にも、相対論的プラズマにおけるオームの法則は必ずしも確立されたものでは無かった。さらに、相対論的プラズマにおいては低周波の相対論的 MHD 波動から高周波の電磁波へのモード変換が効率良く起こる可能性も示唆されており、場合によっては必ずしも相対論的 MHD が適したモデルとは言えない状況にあった。

2. 研究の目的

本研究の最大の目的は相対論的 MHD モデルから脱却し、高強度電磁波や有限電気抵抗の効果などを取り入れた相対論的 2 流体モデルの数値シミュレーションコードを開発し、これを高エネルギー天体現象へ適用可能なモデルとして確立することである。

相対論的 2 流体モデルは電子と陽子(もしくは電子と陽電子)を別個の流体として独立に扱い、電磁場を介してその両者を連結させたモデルである。これは物理的にもより近似の少ないモデルではあるが、運動論効果は無視しているため、マクロな問題への適用も十分視野に入ってくる。その一方で相対論的 MHD では無視している電磁波モードを正しく取り入れており、また電気抵抗を 2 流体間の摩擦として取り入れることで、自然な形でオームの法則が得られる。これらの特徴から、相対論的 2 流体モデルは MHD の代替モデルとして、非常に有望である。一方で、現状ではコミュニティで広く使われているモデルでは無いことから、数値シミュレーションの手法や方程式系の性質などが必ずしも良く理解されておらず、これを明らかにすることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 天体プラズマにおいては超音速の流れが頻繁に見られるため、衝撃波や不連続を精度良く扱う近似リーマン解法が好んで用いられる。ところが近似リーマン解法は電磁場の拘束条件を考慮しないため、マクスウェル方程式との組み合わせの相性が悪いという問題があった。さらに、相対論的 2 流体モデル

は MHD モデルと異なり、磁場の誘導方程式だけでなく、変位電流まで含めた完全なマクスウェル方程式を扱う。従って、電場 E および磁場 B に関する拘束条件($\text{div}(E) = \dots$, $\text{div}(B) = 0$)の両方を同時に満たさなければならない。この点は磁場に関する拘束条件($\text{div}(B)=0$)のみを満たせば良い MHD とは大きく異なるため、MHD で用いられる標準的な数値手法をそのまま適用することは困難である。

近年では近似リーマン解法とマクスウェル方程式の解法を巧みに矛盾なく組み合わせた HLL-UCT 法と呼ばれる手法が提唱され MHD 方程式への適用で成功を納めていた。事前の詳細検討から、この HLL-UCT 法は MHD 以外のモデルにも適用可能と予想されたため、この手法を採用し、数値シミュレーションコードの開発を行った。

(2) 天体プラズマは高温・希薄であるため電気抵抗が非常に小さく、電磁エネルギーの散逸は無視出来ると考えられ、通常は理想 MHD 近似が用いられる。ところが観測的には非常に効率良い電磁エネルギーの散逸が示唆されており、有限の電気抵抗の効果を含めた抵抗性 MHD モデルの重要性も認識されている。しかしながら、抵抗性 MHD 方程式は数値的に硬い方程式になっており、解きにくいことが知られている。また、物理的にも抵抗性 MHD のオームの法則の妥当性については議論の余地が残っている。

相対論的 2 流体モデルにおいては、各流体の運動方程式に 2 流体間の摩擦に相当する項を導入することにより、実効的な電気抵抗の効果を表すことが出来る。従って、この効果を数値シミュレーションコードに実装し、既存の抵抗性 MHD モデルに対する利点を調べた。

4. 研究成果

以下で詳細に述べるように、相対論的 2 流体モデルは低周波・長波長近似では相対論的 MHD に帰着し、有限の電気抵抗を自然に導入することが出来るモデルであることが分かった。また十分な空間解像度を持つ場合には自然に 2 流体効果が含まれるため、例えば磁気リコネクションなどのマイクロ物理が重要になる問題にも適したモデルであると結論付けた。

(1) HLL-UCT 法をより一般的な方程式系である相対論的 2 流体方程式系に適用することに成功した。このためには、物理量の格子点への配置方法が鍵となった。プラズマ粒子シミュレーション等でマクスウェル方程式の拘束条件を満たすために通常用いられる Yee 格子は近似リーマン解法を用いる相対論的 2 流体コードには適さず、異なる配置を採用することで全体として矛盾の無い数値スキーム

を構築することに成功した。具体的には、近似リーマン解法とマクスウェル方程式の性質を考慮し、流体量をセル中心に、電磁場ベクトルの各成分を各方向のセル境界に配置する手法が理に合っていることを示した。

この手法を実装したシミュレーションコードを実際に開発し、様々なテスト問題に対して適用した。これにより多次元で複雑な不連続が多数発生するような問題においても、数値的に安定にシミュレーションが可能なロバストなアルゴリズムであることを示した。

さらにその応用として、準中性条件を仮定した非相対論的な2流体モデルにおいても同様の手法が適用可能であることを示した。このモデルでは電磁波モードを陽に含めないモデルであるため、低周波・長波長では非相対論的MHDに帰着する。一方でイオン慣性長および電子慣性長のスケールでは2流体効果が正しく取り入れられ、マルチスケールな物理モデルとして重要になることを指摘した。

(2) これまでに2流体間の摩擦項を導入することで、実質的な電気抵抗の効果を得られることは既に知られていたが、そのモデルと抵抗性MHDで用いられるオームの法則との関係性は明らかでなかった。本研究では、摩擦項の形を工夫することで、低周波・長波長近似で既存の抵抗性MHDのオームの法則に一致する形を新たに導いた。実際にこの方程式系を用いて磁気拡散テスト問題を行い、その妥当性を示した。これにより、相対論的な2流体モデルがある極限において抵抗性MHDを良く近似するモデルであることを明らかにした。

また電子・陽子系の2次元の磁気リコネクション問題においては、十分な空間解像度がある場合には2流体効果が現れ、速い磁気リコネクションが達成されることも示した。これは、相対論的な電子・陽子プラズマにおける2流体的な磁気リコネクションの初めての数値シミュレーション結果である。

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12件、全て査読有り)

Persistence of precursor waves in two-dimensional relativistic shocks, M Iwamoto, T Amano, M Hoshino, Y Matsumoto, *The Astrophysical Journal* 840 (1), 52, 2017, doi:10.3847/1538-4357/aa6d6f
A new framework for magnetohydrodynamic simulations with anisotropic pressure, K Hirabayashi,

M Hoshino, T Amano, *Journal of Computational Physics* 327, 851-872, 2016, doi:10.1016/j.jcp.2016.09.064
A second-order divergence-constrained multidimensional numerical scheme for relativistic two-fluid electrodynamics, T Amano, *The Astrophysical Journal* 831 (1), 100, 2016, doi:10.3847/0004-637X/831/1/100
A high-order relativistic two-fluid electrodynamic scheme with consistent reconstruction of electromagnetic fields and a multidimensional Riemann solver for electromagnetism, DS Balsara, T Amano, S Garain, J Kim, *Journal of Computational Physics* 318, 169-200, 2016, doi:10.1016/j.jcp.2016.05.006
Divergence-free approximate Riemann solver for the quasi-neutral two-fluid plasma model, T Amano, *Journal of Computational Physics* 299, 863-886, 2015, doi:10.1016/j.jcp.2015.07.035
A finite volume formulation of the multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma, T Minoshima, Y Matsumoto, T Amano, *Computer Physics Communications* 187, 137-151, 2015, doi:10.1016/j.cpc.2014.10.023
Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave, Y Matsumoto, T Amano, TN Kato, M Hoshino, *Science* 347 (6225), 974-978, 2015, doi:10.1126/science.1260168
First-principles simulations of electrostatic interactions between dust grains, H Itou, T Amano, M Hoshino, *Physics of Plasmas* 21 (12), 123707, 2014, doi:10.1063/1.4904373
A robust method for handling low density regions in hybrid simulations for collisionless plasmas, T Amano, K Higashimori, K Shirakawa, *Journal of Computational Physics* 275, 197-212, 2014, doi:10.1016/j.jcp.2014.06.048
Electron acceleration in a nonrelativistic shock with very high Alfvén Mach number, Y Matsumoto, T Amano, M Hoshino, *Physical review letters* 111 (21), 215003, 2013, doi:10.1103/PhysRevLett.111.215003
Stability of Cosmic-Ray Modified Shocks: Two-fluid Approach, T Saito, M Hoshino, T Amano, *The Astrophysical Journal* 775 (2), 130, 2013,

doi:10.1088/0004-637X/775/2/130
The role of superluminal
electromagnetic waves in pulsar wind
termination shocks, T Amano, JG Kirk,
The Astrophysical Journal 770 (1), 18,
2013,
doi:10.1088/0004-637X/770/1/18

〔学会発表〕(計 10 件, 全て招待講演)

Amano, T., Kinetic Simulations of
Particle Acceleration and Transport
around Collisionless Shocks, AOGS
13th Annual Meeting, Beijing, China,
Aug. 1, 2016

Amano, T., Particle Acceleration and
Transport at Collisionless Shocks,
6th East-Asia Workshop on Laboratory,
Space, Astrophysical Plasmas,
International Congress Center,
Ibaraki, Tsukuba, Japan, Jul. 11,
2016

Amano, T., Key Issues in Particle
Acceleration Theory at Collisionless
Shocks, 18th International Congress
on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan,
Jun. 29, 2016

Amano, T., Energetic Particle Hybrid
Code and Its Application, 11th
International Conference on
Numerical Modeling of Space Plasma
Flows (ASTRONUM2016), Monterey, USA,
Jun. 9, 2016

Amano, T., Superluminal
Electromagnetic Waves in Highly
Magnetized Relativistic Shocks, 5th
East-Asia School and Workshop on
Laboratory, Space, Astrophysical
Plasmas Pohang, Korea, Aug. 21, 2015

Amano, T., Quasi-neutral Two-fluid
Plasma Simulation Model, 10th
International Conference on
Numerical Modeling of Space Plasma
Flows (ASTRONUM 2015), Avignon,
France, Jun. 10, 2015

Amano, T., Hoshino, M., Matsumoto, Y.,
Physics of Very High Mach Number
Collisionless Shocks, The Many Facets
of Supernova Remnants, Rikkyo
University, Toshima-ku, Tokyo, Japan,
Nov. 10, 2014

Amano, T., Kirk, J. G., Relativistic
Electromagnetic Two-fluid
Simulations of Pulsar Wind
Termination Shocks, The 6th
East-Asian Numerical Astrophysics
Meeting (EANAM6), Suwon, Korea, Sep.
18, 2014

Amano, T., Higashimori, K., Shirakawa,
K., Robust Handling of Low Density

Regions in Hybrid Simulations, 9th
International Conference on
Numerical Modeling of Space Plasma
Flows (ASTRONUM 2014), Long Beach,
USA, Jun. 25, 2014
Amano, T., Kirk, J. G., Relativistic
Pulsar Wind Termination Shocks
Modified by Superluminal
Electromagnetic Waves, 8th
International Conference on
Numerical Modeling of Space Plasma
Flows (ASTRONUM 2013), Biarritz,
France, Jul. 1, 2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天野 孝伸 (AMANO, Takanobu)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 00514853