

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800279

研究課題名(和文) 相対論的傾圧効果による磁場生成に関する理論及びシミュレーション研究

研究課題名(英文) Theoretical and numerical study on magnetic field generation by relativistic baroclinic effect

研究代表者

川面 洋平 (Kawazura, Yohei)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：80725375

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：四次元時空内で保存する相対論的ヘリシティが流体要素のラベリング対称性に起因することを示した。次に相対論的電磁流体力学(MHD)の最小作用原理を定式化した。この作用原理はこれまで提案されていた電磁流体タイプのモデルを包括している。またこの作用原理から導出した相対論的Hall MHDでは、イオンのスキン長程度の空間スケールをもった無衝突磁気リコネクションが起こり得る。さらに相対論的Hall MHDでは速い磁気音波が光速限界に達するため、シアAlfven波と速い磁気音波の群速度面が融合する。また高強度レーザー実験を模した数値計算により相対論的傾圧効果が有効になるプラズマ領域を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We found the relativistic helicity, which is conserved in four-dimensional space time, is originated from the relabeling symmetry of a fluid element. Next we formulated the action principle for the extended relativistic magnetohydrodynamics (MHD). This action principle encompasses other magnetohydrodynamic models. The relativistic Hall MHD model, which is derived by this action principle, includes electron's thermal inertia; and thus it is possible to induce collision less magnetic reconnection with ion skin depth scale. Furthermore, in relativistic Hall MHD, since the fast magnetosonic wave reaches to the light limit, the fast wave group surface coalesce with that of the shear Alfven wave. We conducted a numerical simulation for ultra-high intensity laser experiment, and elucidated the plasma regime where the relativistic baroclinic effect is finite.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：電磁流体力学 最小作用の原理 リラベリング対称性 相対論

1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する磁場の起源は未解決の問題である。プラズマの流体描像において、磁場を生成するためには傾圧効果と呼ばれるある種の熱力学的非平衡性が必要である。しかし、初期宇宙においてはこのような熱力学的非平衡性は小さいと考えられている。このパラドックスを解決するためにこれまで多くの研究がなされてきた。これに対し、最近提案された相対論的傾圧効果[1]が注目を浴びている。この効果はプラズマの流れの速さが相対論的であるときに、その速さの勾配と熱力学変数の勾配の向きが異なるときに磁場を生成するというものである。通常の熱的傾圧効果と異なり、相対論的傾圧効果は熱力学的に平衡に近い系でも有効であると予測されている。磁場は流れの渦と似た数学的性質を帯びており、相対論的な流れによる渦とその流れにより生成される磁場の作り出す構造や性質は興味深い対称であり、より詳細な理論研究が期待されていた。また近年の高強度レーザー技術の進展により、相対論的傾圧効果の実験的検証を行える可能性があり、そのための予備シミュレーションも必要であった。

2. 研究の目的

本研究では理論・シミュレーションの両面から相対論的傾圧効果がもたらす磁場・渦構造の解析を行う。理論面では特に渦構造の代表例として挙げられるヘリシティに着目し、相対論的傾圧効果が存在するときのヘリシティ保存に関連した対称性を導く。さらに相対論的電磁流体力学(MHD)および Hall 効果や電子慣性を含んだ相対論的拡張 MHD を考察する。対称性を明らかにするためには作用を知る必要があるため、まず相対論的拡張 MHD の最小作用原理を定式化する。さらに相対論的拡張 MHD 方程式の数学的構造、及び線形波動の性質を明らかにする。数値計算では相対論的傾圧効果の実証に向けて、高強度レーザー実験に妥当なパラメータ領域でシミュレーションを行う。

3. 研究の方法

ヘリシティは非相対論においては熱的傾圧効果が無いときに保存することが知られているが、相対論的傾圧効果が存在すると、渦生成により保存が破れる。しかし我々の以前の研究で、より一般的に定義したヘリシティは保存することが示されていた[2]。一方で、一般に保存量は作用の対称性に関連している。本研究ではまず相対論的ヘリシティ保存の対称性とは何であるのかを示す。そのために流体要素と共動する座標系、すなわち Lagrange 描像における最小作用の原理を考え、その作用の対称性を調べる。次に Euler 描像に変数変換を行い、なぜ観測者座標系でヘリシティの保存が破れるのかを明らかにする。次に相対論的電磁流体力学(MHD)に

Hall 効果や電子慣性を加えた相対論的拡張 MHD を考える。対称性を考察するためにはまず作用が必要であるので、相対論的拡張 MHD を導出する最小作用の原理を定式化する。定式化の方針としては、非相対論的拡張 MHD[3]、及び相対論的中性流体[4]で用いられている束縛条件付き最小作用の原理を相対論的拡張 MHD に適応する。次に最小作用の原理から導出された相対論的拡張 MHD の線形波動解析を行った。また数値計算では相対論的二流体プラズマのシミュレーションコードを作成し、現在実験可能なプラズマパラメータと、現実的ではないが将来的に到達可能なパラメータで相対論的傾圧効果を検証した。

4. 研究成果

(1) 相対論的ヘリシティを導く対称性
相対論的中性流体の Lagrange 描像における作用は Salmon によって提案されていた[5]。まずこの作用を準中性条件を仮定しない荷電流体と MHD に拡張した。次に作用に内在する対称性を調べたところ、非相対論における作用と同様に、流体要素のラベリング対称性が存在し、この対称性から Lagrange 座標におけるヘリシティ保存が導出できることがわかった。一般に対称性から保存則を導出した場合、保存則は四次元空間内の非発散の形に書ける。今回発見した Lagrange 座標におけるヘリシティ保存則も同様に四次元空間内の非発散の形になる(いわゆる保存流)。一方、以前我々が発見した Euler 描像におけるヘリシティ保存則は四次元時空間内の非発散の形にはなっていなかった。その理由は Lagrange 座標と Euler 座標の間の体積要素の変換則にあることを突き止めた。非相対論的な場合、Lagrange 座標と Euler 座標の体積要素は共に空間座標軸で張られる。一方相対論的な場合は、Lagrange 座標では、時間軸が固有時であるため、空間座標軸のみで張られるが、Euler 座標では時間軸と空間軸が入り交じる。これは Euler 座標における体積要素が四次元時空間内の微分 3 形式であるためである。

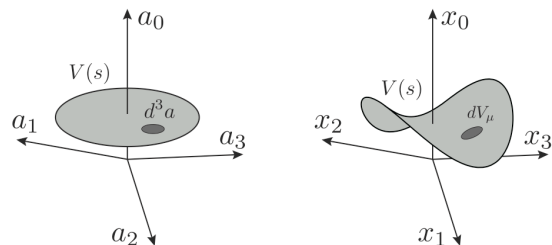


図1：相対論的 Lagrange 描像(左)と Euler 描像(右)における体積要素の関係

(2) 相対論的拡張 MHD の最小作用原理

(1) で解析を行った相対論的荷電流体と MHD は実用の上では制約が大きい。そこで近年提案された相対論的拡張 MHD[6]に注目

した。このモデルは従来の相対論的 MHD に Hall 効果、電子の静止質量慣性及び熱的慣性、電子傾圧効果を含めたものである。まず束縛付き最小作用原理を構築した。定式化の上で重要なことはイオンと電子それぞれの四元速度ノルムが 1 となる条件を適切に加えることである。この束縛付き最小作用原理は重心運動量密度と電流の Clebsch 変数表示を導く。さらに Clebsch 変数を重心運動量密度と電流に変数変換することで、共変 Poisson 括弧を用いた非正準最小作用原理に変換できることを示した。この定式化において重要なことは相対論的 MHD はこれまで提案されてきた多くの電磁流体モデル(非相対論的 Hall MHD, 非相対論的電子慣性 MHD, 相対論的 MHD)を包含しているため、今回発見した最小作用原理はそれらすべてを導出できる点である。その意味でこの最小作用原理は電磁流体モデルの“統一理論”と呼ぶことができるであろう。また相対論的拡張 MHD は電子とイオンの質量比をゼロとして電子の静止質量慣性を無視しても、電子の熱的慣性が残っている。静止質量慣性の特徴的空間スケールは電子のスキン長であり、これはイオンのスキン長のおよそ $1/40$ である。しかし電子の熱的慣性の空間スケールは電子温度と共に増加するため、高温な電子では電子スキン長がイオンスキン長と同程度になる。このときイオンスキン長程度のスケールを持った無衝突磁気リコネクションが生じる可能性を発見した。従って、相対論的プラズマでは非相対論的プラズマと比較して、大きな空間スケールを持った磁気リコネクションが生じうる。

(3) 相対論的 Hall MHD の線形波動特性
相対論的拡張 MHD の性質を調べるために、電子の静止質量慣性・熱的慣性の両方を無視した相対論的 Hall MHD の線形波動解析を行った。線形分散関係を導出し、伝播特性を示す Friedrichs ダイアグラムを描いたところ興味深い性質が明らかになった。非相対論的 Hall MHD の場合は磁場に平行方向の速い磁気音波の位相速度及び群速度が Hall パラメータの増加と共に増すので、Hall 効果が強いときダンベル型の群速度面を形成する。相対論的 Hall MHD では、Hall パラメータを増加させても磁場に平行方向の群速度は光速を超えられない。一方で磁場に垂直方向の群速度は Hall パラメータと共に減少する。一方でシアアルフベン波は Hall パラメータの増加と共に分散的になり、磁場に垂直方向の群速度が増加する。Hall パラメータを増加させていくとある時点で、速い磁気音波の群速度面とシアアルフベン波の群速度面が衝突する。これにより、速い磁気音波の群速度面はダンベル型にはならず、シアアルフベン波の群速度面と融合する。この特徴は非相対論的な場合と顕著に異なる。

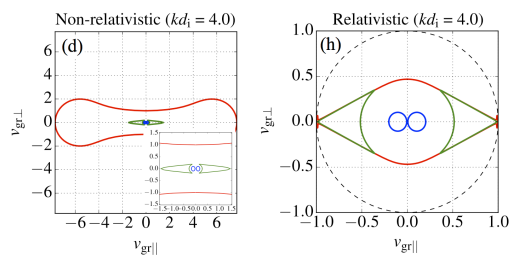


図 2：非相対論的 Hall MHD (左) と相対論 Hall MHD (右) の群速度面。赤線、緑線、青線、破線はそれぞれ速い磁気音波、シアアルフベン波、遅い磁気音波、光速を示す。

(4) 相対論的二流体プラズマの数値計算
相対論的傾圧効果の実証に向けて、高強度レーザー実験に妥当なプラズマパラメータを用いた数値計算を行った。まず HLLC 法を用いた相対論的二流体プラズマのシミュレーションコードを作成した。参考文献[7]で示されているプラズマパラメータを用いて数値計算を行ったところ、同文献の磁場強度分布の測定結果と同様の計算結果を得た。一方で相対論的傾圧効果と熱的傾圧を比較したところ、熱的傾圧傾圧効果が支配的であることがわかった。従って同文献の実験における磁場生成は相対論的傾圧効果によるものではなかった。そこで、現在の実験では達成されていない高温のプラズマを設定(電子温度 100MeV)したところ、相対論的傾圧効果と熱的傾圧が同程度になることがわかった。

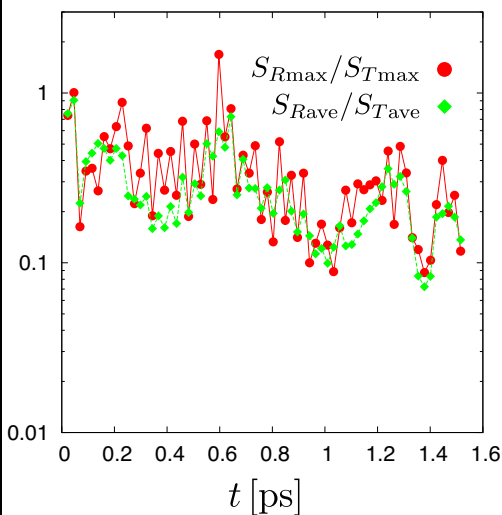


図 3：相対論的傾圧効果と熱的傾圧効果の比 (赤丸：最大値，緑丸：平均値)

参考文献:

[1] S. M. Mahajan and Z. Yoshida Phys. Rev. Lett. **105**, 095005 (2010).
 [2] Z. Yoshida, Y. Kawazura, and T. Yokoyama, J. Math. Phys. **55**, 043101 (2014).
 [3] Z. Yoshida and E. Hameiri, J. Phys. A: Math.

Theor. **46**, 335502 (2013).

[4] B. F. Schutz and R. Sorkin, *Ann. Phys.* **107**, 1 (1977).

[5] R. Salmon, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **20** 225 (1988).

[6] S. Koide, *Astrophys. J.* **696**, 2220 (2009).

[7] S. Mondal, et al., *PNAS*, **21**, 8011–8015 (2012).

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 4 件)

① Y. Kawazura, G. Miloshevich, and P. J. Morrison, "Action Principles for Relativistic Extended Magnetohydrodynamics: A Unified Theory of Magnetofluid Models," *Physics of Plasmas*, 査読有, **24**, 022103 (10pp) (2017) DOI: 10.1063/1.4975013

② Y. Kawazura, N. Takahashi, Z. Yoshida, M. Nishiura, T. Nogami, A. Kashyap, Y. Yano, H. Saitoh, M. Yamasaki, T. Mushiake, and M. Nakatsuka, "Anisotropy in broad component of H α line in the magnetospheric device RT-1," *Plasma and Fusion Research*, 査読有, **11** 2402024 (5pp) (2016) DOI: 10.1585/pfr.11.2402024

③ Y. Kawazura, Z. Yoshida, M. Nishiura, H. Saitoh, Y. Yano, T. Nogami, N. Sato, M. Yamasaki, A. Kashyap and T. Mushiake, "Observation of particle acceleration in laboratory magnetosphere," *Physics of Plasmas*, 査読有, **22**, 112503 (8pp) (2015) DOI: 10.1063/1.4935894

④ Y. Kawazura, Z. Yoshida and Y. Fukumoto, "Relabeling symmetry in relativistic fluids and plasmas," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 査読有, **47** 465501 (17pp) (2014) DOI: 10.1088/1751-8113/47/46/465501

[学会発表] (計 10 件)

① G. Miloshevich, Y. Kawazura, P. J. Morrison, "Covariant Hamiltonian theory of extended MHD and applications to collisionless reconnection", *The Sherwood Fusion Theory Conference*, 2017年5月1日, Annapolis (USA)

② Y. Kawazura, G. Miloshevich, P. J. Morrison, "Action Principle for Relativistic Extended Magnetohydrodynamics", *2nd Geometric Algorithms and Methods for Plasma Physics Workshop*, 2016年9月12日, Garching (Germany)

③ Y. Kawazura, "Particle acceleration in

laboratory magnetosphere", *6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas*, 2016年7月14日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

④ 川面洋平, 吉田善章, 西浦正樹, Kashyap Ankur, 矢野善久, 齋藤晴彦, 山崎 美由梨, 虫明敏生, 高橋典生, 中塚正崇, "磁気圏型装置 RT-1 における反磁性信号の遷移現象", *日本物理学会第 71 回年次大会*, 2016年03月20日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

⑤ Y. Kawazura, Z. Yoshida, M. Nishiura, Y. Yano, H. Saitoh, T. Nogami, T. Mushiake, M. Yamasaki, A. Kashyap, N. Takahashi, and M. Nakatsuka, "Anisotropy in broad component of H α line in the magnetospheric device RT-1", *25th International Toki Conference (ITC-25)*, 2015年11月03日, セラトピア土岐 (岐阜県土岐市)

⑥ 川面洋平, 吉田善章, 西浦正樹, 矢野善久, 山崎美由梨, 虫明敏生, Kashyap Ankur, 高橋典生, 中塚正崇, 佐藤直木, "磁気圏型プラズマ装置 RT-1 におけるイオン温度非等方性の生成機構", *日本物理学会 2015 年秋季大会*, 2015年09月17日, 関西大学 (大阪府吹田市)

⑦ Yohei Kawazura, Zensho Yoshida and Yasuhide Fukumoto, "Relabeling symmetry in relativistic fluids and plasmas", *56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics*, 2014年10月28日, New Orleans, Louisiana (USA)

⑧ 川面洋平, 吉田善章, 福本康秀, "相対論的流体/プラズマにおけるリラベリング対称性", *第 63 回理論応用力学講演会*, 2014年09月28日, 東京工業大学(東京都, 目黒区)

⑨ 川面洋平, 吉田善章, 福本康秀, "相対論的流体/プラズマにおけるリラベリング対称性", *日本流体力学会年会 2014*, 2014年09月16日, 東北大学 (宮城県, 仙台市)

⑩ 川面洋平, 吉田善章, "高強度レーザー実験における相対論効果による種磁場形成の数値計算", *日本地球惑星科学連合 連合大会*, 2014年04月29日, パシフィコ横浜会議センター (神奈川県, 横浜市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

川面 洋平 (Yohei, Kawazura)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：80725375