

機関番号：名古屋大学

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 年度 ～2010 年度

課題番号：20540481

研究課題名（和文） 大振幅磁気流体波の電磁場構造と超相対論的粒子加速

研究課題名（英文） Field structure of large-amplitude magnetohydrodynamic waves and associated ultrarelativistic particle acceleration

研究代表者

大澤 幸治 (Ohsawa Yukiharu)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10115537

研究成果の概要（和文）：

従来、無衝突プラズマにおける磁力線に平行方向の電場は、低周波・長波長の磁気流体現象ではごく弱いと考えられてきたが、本研究では非線形磁気音波における平行電場の強さを理論的に求め、それを相対論的電磁粒子シミュレーションで定量的に確認した。これらの結果から非線形磁気音波においては平行電場は強くなり得ることを示した。

また、上とは別の側面の研究として、プラズマに強い擾乱が与えられたときの磁気流体波の発展を大規模電磁粒子シミュレーションで調べ、磁気音波衝撃波面の後方に大振幅アルヴェン波が形成されること、およびその中で超相対論的電子加速が起こることを見出し、その機構を理論的に解明した。

研究成果の概要（英文）：

In the ideal magnetohydrodynamics, the electric field parallel to the magnetic field is exactly zero, and it was generally thought that the parallel electric field was quite weak in low-frequency, long-wavelength phenomena in a collisionless plasma. We have found, however, that the parallel electric field can be quite strong in nonlinear magnetosonic waves: We have analytically obtained the parallel electric field in nonlinear magnetosonic waves and have quantitatively confirmed the theoretical prediction with relativistic, fully kinetic, fully electromagnetic particle simulations.

We have also numerically studied the evolution of magnetohydrodynamic waves arising from a strong disturbance given to a collisionless plasma. Simulations show that large-amplitude Alfvén waves are generated behind magnetosonic shock fronts. Furthermore, ultrarelativistic electron acceleration can occur in the Alfvén wave region. These mechanisms have been theoretically analyzed in detail.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理、粒子加速、無衝突衝撃波、粒子シミュレーション、磁気流体波

1. 研究開始当初の背景

私どものグループでは、Fermi 加速モデルのような統計的機構ではなく、プラズマ中の大振幅波の中に形成される強力な電磁場によって直接的に荷電粒子が超高エネルギーに加速される機構を見出し、詳細に解析してきた。

その研究の過程で、磁気音波衝撃波において磁力線方向の電場が従来の予想よりもずっと大きくなるのが相対論的電磁粒子シミュレーションによって認識されるようになったが、その理論的解明はなされておらず、大きな謎として残っていた。

また、計算機能力の限界から、粒子加速のシミュレーション研究は主に衝撃波面近傍の現象に限られていたが、本研究の先行研究で、衝撃波面の後方でも新しい粒子加速機構が存在することが私どもの研究で指摘され、さらなる大規模シミュレーションで衝撃波面近傍だけでなく、その後方領域を含んだ広大な領域における大振幅波の発展とその中の粒子加速機構の研究の必要性が認識されてきた。

2. 研究の目的

第一原理に基づいてプラズマ中の荷電粒子機構の体系的理論を構築し、超高エネルギー宇宙線発生機構の理論的基盤をつくる。

3. 研究の方法

理論と計算機シミュレーションを用いる。非線形波動理論を発展させ、それを基に大振幅磁気流体波における荷電粒子の運動を解析する。同時に、相対論的な電磁粒子シミュレーションで大振幅波の発展と個別の粒子運動を自己無動着に調べる。シミュレーションでは個々のイオンおよび電子の軌道を相対論的方程式を積分して求める。電磁場の変動は変位電流を含む full Maxwell 方程式を解く。計算機シミュレーションは理論の検証および新しい未知の現象の発見のための強力な手段である。

4. 研究成果

[平行電場]

理想磁気流体力学では磁力線に平行方向の電場は厳密にゼロであり、無衝突プラズマにおける低周波・長波長の磁気流体的現象では磁力線に平行方向の電場はごく弱いと考えられて来た。しかし、本研究では、非線形磁気音波における平行電場を理論的に求め、それが非常に強くなることを見出した。その強さを平行擬ポテンシャル F (平行電場を磁力線に沿って積分した物理量) で表すと、小振幅パルスでは、高ベータプラズマ (プラ

ズマの熱的圧力が外部磁場の圧力と同程度かそれ以上) の中では

$$eF \sim \Gamma_e T_e \varepsilon$$

の程度 (ここで e は素電荷、 Γ_e は電子の比熱比、 T_e は電子温度、 ε はパルスの振幅である) となる。これはイオン音波における電位によく似た形である。しかし、低ベータでは

$$eF \sim m_i v_A^2 \varepsilon^2$$

となる (ここで、 m_i はイオン質量、 v_A はアルヴェン速度である)。つまり、磁場が強いときには平行擬ポテンシャルは外部磁場の 2 乗と振幅の 2 乗に比例する。

これら 2 つの表式は $\varepsilon \ll 1$ の小振幅パルスに対するものであるが、 $\varepsilon \sim 0(1)$ の大振幅の衝撃波では高ベータでも低ベータでも

$$eF \sim (m_i v_A^2 + \Gamma_e T_e) \varepsilon$$

の式で表されることが分かった。

さらにこれらの理論的予言を相対論的電磁粒子シミュレーションで定量的に確認した。

また、その結果を私どものグループが以前発見した 3 つの粒子加速機構 (捕捉電子の加速 Bessho and Ohsawa, Physics of Plasmas 1999; 相対論的イオンの多段加速 Usami and Ohsawa, Physics of Plasmas 2002; 陽電子の磁力線方向の加速 Hasegawa, Kato, and Ohsawa, Physics of Plasmas 2005) に適用し、これらの加速における平行電場の役割についての理解を一層深めた。例えば、陽電子の磁力線方向の加速については、この新しく得られた平行電場を用いてエネルギー増大率を理論的に示し、それが計算機の結果とよく一致することを確認した。また、ローレンツ因子が 1 万に達する陽電子加速がシミュレーションで実証された。

さらにこの研究を、電子・陽電子・イオンから成る 3 成分プラズマの場合に拡張した。3 成分プラズマでは陽電子密度の増大とともに平行電場の強度が下がり、イオンを含まない純粋な電子・陽電子プラズマでは平行電場はゼロとなる。この性質は、陽電子密度の増大とともに陽電子加速が弱くなるというシミュレーション結果 (Hasegawa and Ohsawa, Physics of Plasmas 2002) を説明する。

[アルヴェン波による粒子加速]

プラズマ中に強い擾乱を与えたときの磁気流体波の発展を粒子シミュレーションで調べ、磁気音波衝撃波の後方にアルヴェン波が形成され、その中で超相対論的電子加速が起こることを見出し、その機構を解明した。従来の研究では粒子加速は衝撃波面近傍で起こるものが主に調べられた (Ohsawa, Physics of Fluids 1985; Toida and Ohsawa, Solar Physics 1997; および上述の 3 つの加

速機構)。これは、衝撃波面近傍では特に強い電場ができ、したがって強い粒子加速が起こるからであるが、同時に、計算機の能力に限りがあり、衝撃波面の後方の広い領域を1つのシミュレーションで調べることができなかったからでもある。

本研究ではプラズマ中に爆発のような強い擾乱が与えられたときに発生する大振幅磁気流体波の発展とその中で起こる粒子加速について調べた。

プラズマに強い擾乱が与えられると、前進 (forward) 衝撃波とその反対方向に伝播する後進 (backward) 衝撃波が発生する。これらは磁気音波の大振幅波であるがそれよりも伝播速度の遅いアルヴェン波が磁気音波衝撃波の後方に形成される。このアルヴェン波の形成過程が計算機シミュレーションによって詳細に調べられた。

さらに、このアルヴェン波領域で3種類の超相対論的電子加速機構が観察された。それらは、1) 強磁場パルスに沿って移動する電子に起こる加速、2) 磁気中性面に沿って移動する電子に起こる加速、および3) アルヴェン波領域を横断する電子に起こる加速である。2) の磁気中性面に沿う加速は、大振幅アルヴェン波では外部磁場よりも磁場変動の振幅が大きいため磁場の極性が変動し、磁気中性面ができること、および波が伝播しているために磁気中性面の両側で横電場が発生していることが重要である (静止している磁気中性面に沿って移動しても加速にはならない)。また、3) に関しては、衝撃波面の後方ではプラズマが磁場を横切って動いており、そのためにプラズマ速度と磁場の両方に直角な方向に電場が発生していることが重要である。

シミュレーションではローレンツ因子が数百に達する加速が観測されている。また、加速される電子は主に衝撃波面の後方から供給されることもこの機構の際立った特徴である。

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 21 件)

1. T. Iwata, S. Takahashi, and Y. Ohsawa, Effect of Magnetic-Field Gradient on Positron Acceleration along the Magnetic Field in an Oblique Shock Wave, Plasma and Fusion Research, 査読有、Vol. 6, 2011, 2401025.
2. H. Kawai, S. Takahashi, Y. Ohsawa, S. Usami, C. Chiu, and W. Horton, Particle acceleration and parallel electric field in shock waves, J. Plasma Fusion

- Res. Series, 査読有、Vol. 9, 2010, pp. 393-397.
3. 大澤幸治: 無衝突衝撃波の強力な電磁場による超相対論的粒子加速, 日本物理学会誌, 査読無、Vol. 65, 2010, pp. 945-952.
4. S. Usami, R. Horiuchi, and Y. Ohsawa, Numerical studies on ultra-relativistic ion Motions in an oblique magnetosonic shock Wave, Phys. Plasmas, 査読有、Vol. 16, 2009, 122104.
5. S. Takahashi, H. Kawai, Y. Ohsawa, S. Usami, C. Chiu, and W. Horton, The effect of parallel electric field in shock waves on the acceleration of relativistic ions, electrons, and positrons, Phys. Plasmas, 査読有、Vol. 16, 2009, 112308.
6. M. Toida, H. Higashino, and Y. Ohsawa, Parametric Studies of High- and Low-Frequency Magnetosonic Waves and Ion Acceleration, J. Plasma Fusion Res. Series, 査読有、Vol. 8, 2009, pp. 826-830.
7. M. Sato and Y. Ohsawa, Simulation Studies of Electron Acceleration to Ultrarelativistic Energies Caused by Small Pulses Generated in Shock Waves, J. Plasma Fusion Res. Series, 査読有、Vol. 9, 2010, pp. 242-245.
8. M. Toida, H. Higashino, and Y. Ohsawa, Effect of ion composition on ion acceleration by magnetosonic shock waves, Phys. Plasmas, 査読有、Vol. 15, 2008, 092305.
9. M. Toida, R. Honma, and Y. Ohsawa, Repeated Interactions of Thermal Ions with an Oblique Shock Wave, 査読有、Vol. 9, 2010, pp. 242-245.
10. S. Takahashi, M. Sato, and Y. Ohsawa, Parallel electric fields in nonlinear magnetosonic waves in an electron-positron-ion plasma, Phys. Plasmas, 査読有、Vol. 15, 2008, 082309.
11. M. Toida, M. Ueno, and Y. Ohsawa, Detrapping of energetic electrons from curved shock front, J. Phys. Soc. Japan, 査読有、Vol. 77, 2008, 084501.
12. M. Sato and Y. Ohsawa, Evolution of magnetohydrodynamic waves and acceleration of particles in a collision of two plasmas, J. Phys. Soc. Japan, 査読有、Vol. 77, 2008, 084502.
13. K. Yamauchi and Y. Ohsawa, Shock formation in a collision of two plasmas with their relative velocity oblique to

the magnetic field, J. Phys. Soc. Japan, 査読有、Vol. 77, 2008, 054501.

14. 大澤幸治：陽電子加速：磁力線に平行な加速、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 828-833.

15. 大澤幸治：重イオン加速、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 822-827.

16. 大澤幸治：反射によるイオン加速と高速イオンの多段加速、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 705-710.

17. 大澤幸治：小パルスによる電子加速、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 699-704.

18. 大澤幸治：捕捉電子の超相対論的加速、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 589-593.

19. 大澤幸治：衝撃波による粒子加速：宇宙プラズマにおける粒子加速と無衝突衝撃波の概観、プラズマ・核融合学会誌、査読無、Vol. 84, 2008, pp. 583-588.

[学会発表] (計 33 件)

1. 高橋聖一、大澤幸治：非線形磁気音波における磁力線方向の電場、STE シミュレーション研究会・STP シミュレーション技法勉強会、2011年3月1日、九州大学

2. Y. Takeyama, S. Nakayama, and Y. Ohsawa, Electron acceleration in Alfvén waves behind magnetosonic shock waves, 20th International Toki Conference (ITC20) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research, Ceratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan
7-10 December 2010. (発表 12月8日)

3. T. Iwata, S. Takahashi, and Y. Ohsawa, Effect of Magnetic-Field Gradient on Positron Acceleration along the Magnetic Field in an Oblique Shock Wave, 20th International Toki Conference (ITC-20) on The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science, Ceratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan
7-10 December 2010. (発表 12月8日)

4. S. Takahashi and Y. Ohsawa, Parallel Electric Field and Particle Acceleration in Oblique Magnetosonic Shock Waves, 52nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society, Chicago, IL,
8-12 November 2010, (発表 11月8日).

5. 竹山洋右、大澤幸治：磁気音波衝撃後部に形成されるアルヴェン波束による電子加速 2、日本物理学会、2010年9月24日、大阪府立大学

6. 高橋聖一、大澤幸治：陽電子加速における磁場勾配の効果、プラズマ科学のフロンテ

ィア 2010 研究会、2010年9月2日、核融合科学研究所

7. 高橋聖一、河合洋将、大澤幸治、宇佐見俊介、Charles Chiu, Wendell Horton：非線形磁気音波中の沿磁力線電場と粒子加速、2010年日本地球惑星科学連合大会、2010年5月23日、千葉幕張メッセ国際会議場

8. 中山俊一、大澤幸治、竹山洋右：磁気音波衝撃波後部に形成されるアルヴェン波束による電子加速、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学

9. S. Takahashi and Y. Ohsawa, Electric field component parallel to the magnetic field in nonlinear magnetosonic waves, 19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research, Ceratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan
8-11 December 2009. (発表 12月8日)

10. S. Takahashi and Y. Ohsawa, Parallel Electric Field in Nonlinear Magnetosonic Waves in Two- and Three-Component Plasmas, 51st American Physical Society Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, GA,
2-6 November 2009, (発表 11月3日).

11. H. Kawai, S. Takahashi, Y. Ohsawa, S. Usami, C. Chiu, and W. Horton, Particle acceleration and parallel electric field in shock waves, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009) and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference (APPTC2009), Aomori, Japan,
27-30 October 2009, (発表 10月27日).

12. 大澤幸治：(招待講演) 無衝突衝撃波と粒子加速、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学

13. 大澤幸治、高橋聖一、河合洋将、C. Chiu, W. Horton：衝撃波中の捕捉電子の加速に対する平行電場の効果 1、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学

14. 河合洋将、高橋聖一、大澤幸治、C. Chiu, W. Horton：衝撃波中の捕捉電子の加速に対する平行電場の効果 2、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学

15. 高橋聖一、大澤幸治：陽電子加速における磁場勾配の効果、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学

16. 高橋聖一、大澤幸治：2成分及び3成分プラズマ中の非線形磁気音波における磁力線方向の電場、プラズマ科学のフロンティア 2009 研究会、2009年9月4日、核融合科学研究所

17. Y. Ohsawa, Parallel Electric Field and Particle Acceleration in Shock Waves,

Invited Seminar at the Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin, 11 August 2009.

18. 河合洋将、高橋聖一、大澤幸治、C. Chiu, W. Horton : 衝撃波における粒子加速に対する平行電場の効果 2、日本物理学会、2009年3月29日、立教学院
19. 大澤幸治、河合洋将、高橋聖一、C. Chiu, W. Horton : 衝撃波における粒子加速に対する平行電場の効果 1、日本物理学会、2009年3月29日、立教学院
20. 高橋聖一、佐藤正俊、大澤幸治 : 2成分及び3成分プラズマ中の非線形磁気音波における磁力線方向の電場、日本物理学会、2009年3月28日、立教学院
21. 佐藤正俊、大澤幸治 : 衝撃波中の小パルスによって引き起こされる電子加速、STE研・NICT 合同シミュレーション研究会、2009年1月31日、名古屋大学
22. 大澤幸治、高橋聖一 : 衝撃波の沿磁力線電場と粒子加速、宇宙関連プラズマ研究会2008、2008年12月16日、JAXA (相模原市)
23. 大澤幸治 : 無衝突衝撃波と粒子加速のシミュレーション、日本物理学会、2008年9月22日、岩手大学
24. 高橋聖一、大澤幸治 : 磁気音波衝撃波における平行電場の非定常性、日本物理学会、2008年9月23日、岩手大学
25. 樋田美栄子、本間亮平、大澤幸治 : 斜め衝撃波による熱的イオンの多段加速、日本物理学会、2008年9月23日、岩手大学
26. M. Toida, H. Higashino, and Y. Ohsawa, Parametric Studies of High- and Low-Frequency Magnetosonic Waves and Ion Acceleration, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Kyushu, 8-12 September 2008.
27. M. Toida, R. Honma, and Y. Ohsawa, Repeated Interactions of Thermal Ions with an Oblique Shock Wave, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Kyushu, 8-12 September 2008.
28. S. Sato and Y. Ohsawa, Simulation Studies of Electron Acceleration to Ultrarelativistic Energies Caused by Small Pulses Generated in Shock Waves, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Kyushu, 8-12 September 2008.
29. S. Takahashi and Y. Ohsawa, Theory and Simulations of Parallel Electric Fields in Nonlinear Magnetosonic Waves: Three-Component Plasma, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Kyushu, 8-12 September 2008.
30. Y. Ohsawa and S. Takahashi, Theory

and Simulations of Parallel Electric Fields in Nonlinear Magnetosonic Waves: Two-Component Plasma, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Kyushu, 8-12 September 2008.

〔図書〕(計1件)

1. 大島隆義、大澤幸治、鈴木順三 : 理工学の基礎 電磁気学 (培風館) 2009年3月

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

<http://plab.phys.nagoya-u.ac.jp/member/ohsawa.html>

6. 研究組織
- (1) 研究代表者
大澤 幸治 (Ohsawa Yukiharu)

研究者番号 : 10115537