

平成 22 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340171

研究課題名 (和文) 相対論衝撃波での航跡場加速

研究課題名 (英文) Wakefield Acceleration in Relativistic Shock Waves

研究代表者

星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90241257

研究成果の概要 (和文)：相対論的衝撃波で励起される大振幅電磁波による航跡場加速を粒子シミュレーションを用いて調べた。相対論的衝撃波では、衝撃波面でのシンクロトロン不安定によって大振幅先駆波 (プリカーサー) が発達することが知られているが、本研究ではそのプリカーサー波動のポンデラモーティブ力に起因する航跡場による加速を研究した。航跡場加速は、レーザー実験において次世代の加速器としても着目されているが、天体・宇宙プラズマ中の衝撃波では、衝撃波上流で加速された粒子が衝撃波構造を変える自己変調の機構が介在するので、プリカーサー波動は乱流的になり、非コヒーレントな状況での航跡場加速を考える必要がある。大規模粒子シミュレーションを行うことにより、衝撃波上流での非コヒーレント場における航跡場加速が高効率の加速機構であることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：We studied wakefield acceleration under large amplitude waves generated in a relativistic shock wave by using a particle-in-cell simulation. It is known that the large-amplitude precursor wave generated by synchrotron maser instability at the shock front can propagate toward the upstream region. We investigated the interaction between the precursor wave and plasmas through ponderomotive force. The wakefield acceleration is known to be a new generation scheme for particle accelerator in laser-laboratory plasma, while in the astrophysical settings, the nature of the precursor wave become more or less turbulent, and we need to understand the wakefield acceleration under incoherent fields. We found that the wakefield acceleration under the incoherent shock upstream waves can be regarded as a high efficient acceleration mechanism by a large-scale, particle-in-cell simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：宇宙・天体プラズマ、衝撃波、粒子加速、相対論プラズマ、宇宙線

1. 研究開始当初の背景

無衝突衝撃波は、超音速プラズマの運動エネルギーを熱エネルギーに変換すると同時に、熱的プラズマのエネルギーを遥かに凌駕する非熱的粒子を生成する機構であることがよく知られている。そして、宇宙においては宇宙線や高エネルギー粒子の起源、およびそれに伴う天体の構造や進化を知る上で重要な物理素過程である。例えば、太陽フレアにより励起された惑星間空間衝撃波（マッハ数10程度）、超新星爆発にともなう衝撃波（マッハ数は100以上）、活動銀河核ジェットでの相対論的衝撃波（流速のローレンツ因子10程度）、パルサー風と星雲の境界に形成される超相対論的衝撃波（流速のローレンツ因子 10^6 - 10^7 ）など、宇宙において衝撃波は様々な高エネルギー現象で発現し、宇宙の理解に欠かせない基本要素である。

無衝突衝撃波は、プラズマの強い非線形現象に支配されるため、そこでの粒子加速を理解するのはこれまで非常に困難であった。しかし近年スーパー・コンピューターを用いた大規模な粒子シミュレーションにより、自己無撞着な形でプラズマ中の大振幅波動励起や、その波動と粒子の相互作用を調べることが可能になり、粒子加速の研究は急速に進展してきた。また高機能磁気圏衛星による「その場」観測により、衝撃波領域での電磁波動スペクトルや速度分布関数の高品質なデータが取得できるようになり、加速の条件が明らかにされつつある。更に高空間分解能の天文衛星による電波からX線・ガンマ線観測から、超新星爆発に伴う衝撃波近傍の微細構造や粒子エネルギースペクトルが観測できるようになり、衝撃波の研究には目覚ましい進歩があった。このように衝撃波の物理は、数値シミュレーション、磁気圏その場観測、宇宙天体観測の知見が有機的に生かされた研究が行われるようになってきている。しかし、これまで「非相対論的衝撃波」（衝撃波上流

の流速が光速に対して遅い場合）の研究は、比較の数多くの研究が行われてきているが、「相対論的衝撃波」（衝撃波上流の流速がほぼ光速の場合）は、ようやく研究が始まったところであり、未解決の課題が山積している。

衝撃波での粒子加速では、非相対論的、相対論的に関わらず、粒子加速を理解するには衝撃波領域で励起される波動が重要なカギを握る。そして「相対論的衝撃波」の特徴の一つは、衝撃波近傍で励起される大振幅の波動のエネルギーが、低周波動だけでなく高周波の電磁波にも分配され、背景磁場のオーダーを越える大振幅の電磁波が励起されることである。大振幅電磁波が励起される相対論衝撃波では、粒子加速においても、非相対論衝撃波では無視できた高周波電磁場の影響も重要になると考えられてきた (Langdon et al., Physical Review Letter, 1988)。

例えば、大振幅の電磁波に着目した先行研究として、衝撃波下流域でのサイクロトロン共鳴による粒子加速が提案された (Hoshino et al., Astrophysical Journal, 1992)。電子・陽電子を主成分とするプラズマに少数のイオンが混在した系では、衝撃波下流域でイオン粒子によるサイクロトロン・メーザー不安定によって励起された波動と高エネルギー陽電子・電子とのサイクロトロン共鳴がプラズマ加速に有効に働くことが議論され、この加速過程は、かに星雲でのシンクロトロン放射に適應する理論モデルにもうまく説明できることが示された。

相対論的衝撃波における高周波電磁波は、波の群速度が衝撃波の伝搬速度より速いので、衝撃波下流だけでなく上流に向かって伝搬する。そのため先行研究で議論された衝撃波下流域だけでなく、衝撃波上流域でも重要になってくると考えられる。しかし、先行研究であったサイクロトロン共鳴による加速は、上流の温度が冷たい粒子では共鳴条件を満たさないため、衝撃波上流域での波動によ

る粒子加速機構が働かないと考えられていた。

2. 研究の目的

本研究では、このような状況を念頭に置き、相対論衝撃波上流域での大振幅波動による新しい加速過程を探る。大振幅波動と粒子のとの相互作用には、サイクロトロン共鳴型以外にも、波動の位相コヒーレンスがよい場合は、プラズマ動重力(ponderomotive force)を介した相互作用が考えられる。本研究では、この非線形相互作用に着目した研究を行うことが主な目的である。特に、プラズマ組成がイオンと電子からなる媒質では、大振幅先駆波によるプラズマ動重力(ponderomotive force)が電子に選択的に働くので、衝撃波上流において静電場が励起されて、航跡場加速(wakefield acceleration)が働くことが期待される。

航跡場加速は、レーザープラズマ中での新しいプラズマ加速として、1979年のTajima and Dawson (PRL)の発見によって始まった研究である。大振幅のレーザー光(photon)をプラズマ中に注入することにより、レーザー光の伝播に伴いプラズマ振動(plasmon)が励起されて、相対論的電子ビームが得られることが明らかにされ、その後レーザー加速器やそれを用いた医療への応用可能性など幅広い研究が展開されつつある新しい研究分野となっている。

衝撃波系においては、大振幅先駆波の励起は、衝撃波上流を超音速で流れる電子が衝撃波面と衝突した際のシンクロトロン・メーザー不安定からくるが、先駆波による航跡場加速が起きると衝撃波上流の電子が加熱・加速されて、先駆波の強度や周波数特性が変化する。そのため衝撃波系での航跡場加速は、先駆波と上流プラズマの相互作用による自己変調を受ける非線形システムとなっているので、レーザープラズマの航跡場加速をそのまま単純には応用は出来ない。また衝撃波領域では、自己変調を受けることで波動の位相が崩れた非コヒーレントな状況での航跡場加速を考える必要があり、コヒーレンスが悪い状況でどのような加速が働くは全く未知

である。

本研究では、レーザープラズマ中で研究が行われてきた航跡場加速を、相対論衝撃波に応用することで、また従来考えられていない位相コヒーレンスが悪くなった状況での、加速効率について考察する。

3. 研究の方法

これまで我々は非相対論および相対論衝撃波の数値シミュレーション研究を行ってきた実績があり(e.g., Hoshino et al., ApJ, 1992; Hoshino and Shimada, ApJ, 2002)、これらの知見を生かして、相対論衝撃波での航跡場加速を調べる。

衝撃波系での航跡場加速では、非コヒーレントな波動中での加速が重要になるので、上流に向かって伝搬するプリカーサー波動中では、伝搬方向に加速される「前方加速」だけでなく逆方向に加速される「後方加速」も重要になると考えられる。

(1) まず1次元の周期系で電磁波からラングミュア波への崩壊過程を調べる。次に開放系において、右側境界から有限幅の電磁波とプラズマ中に注入することによる波の崩壊過程を調べる。最後に、本格的な衝撃波系での計算を行い、電磁場のスペクトルと高エネルギー電子の分布関数を吟味することにより、「前方加速」と「後方加速」のメカニズムを解明する。

(2) 相対論衝撃波のアルフベン・マッハ数による航跡場加速の加速効率を評価する。一般にレーザー・ビーム実験の航跡場加速では、背景磁場の無いプラズマでの粒子加速を考えているが、衝撃波系では有限の背景磁場がある系での加速研究となる。そのため、背景磁場の影響、つまりアルフベン・マッハ数の粒子加速への違いを評価する。

(3) 上流のプラズマ温度の影響も評価する。有限温度によりサイクロトロン減衰効果により、シンクロトロン・メーザー不安定による先駆波の放射特性が変わることが予想される。

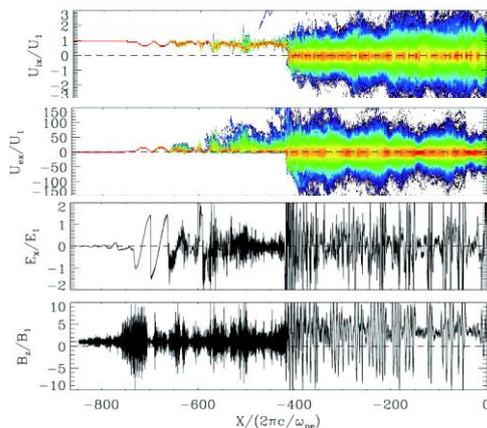
(4) 最後に、2次元に拡張して衝撃波における航跡場加速の多次元効果を調べる。先駆

波（電磁波）は、衝撃波面での揺らぎにより空間的に弱い非一様性を有する。このために起きる波動の自己収束過程などについても評価する。

4. 研究成果

航跡場加速は、現在レーザー・ビーム物理において活発な研究が行われているが、それを宇宙プラズマへ応用する研究は殆ど行われていなかった。Chen et al., PRL (2002)によって、宇宙での超最高エネルギー宇宙線 (10^{21} eV) を生成する過程として、航跡場加速の野心的な提案がされたが、大振幅電磁波の存在を仮定した上での研究であった。また、Lyubarsky, ApJ (2006)の衝撃波プリカーサーの理論シミュレーション研究では、電磁波動の励起とその反作用で起きる静電ポテンシャルについて明らかにされたが、航跡場加速が有効に働く非線形段階までの計算は行われていない。そのため天体・宇宙プラズマにおける粒子加速としては、かならずしも未だ広く受け入れられている加速機構ではなかった。

今回の研究では、宇宙で標準的に想定できるプラズマ・パラメータの相対論衝撃波で、電磁場の励起から航跡場加速まですべてを自己無撞着に含むシステムの中で、高エネルギー粒子加速が起きることが示すことができ、相対論衝撃波での新しい加速機構の提案を行った。



具体的には、(1) 相対論的衝撃波領域を電子慣性長の数千倍程度のサイズとった1次元大規模計算を行い、衝撃波面からの上流に

伝搬するXモードの電磁波の励起（一番下の図）、それに伴う航跡場としての静電場（下から2番目の図）を再現した。(2) 電磁波および静電場の波形は、位相が崩れた乱流的な変動を示しており、電子の位相空間（上から2番目の図）に見られるように、エネルギー空間に広がった加速を受けていること、(3) イオンの位相空間（一番上の図）からは、航跡場加速は基本的に制電場加速であるため、質量比に応じた速度変調を受けていることなどが分かった。

また、(4) 加速効率、最大加速エネルギーが、上流の流速のバルクのエネルギーに対して、(系のスケール) / (電子慣性長) 倍まで達することが明らかになった。更に、(5) 2次元の衝撃波系での予備的なシミュレーションも行い、従来から懸念されていた横方向の非コヒーレンスによるポンデラモーティブ力の軽減効果が起きても、1次元衝撃波とあまり変わらない加速を受けることも明らかになってきた。

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 17 件) すべて査読有

- ① N. Shimada, M. Hoshino, and T. Amano, Structure of a Strong Supernova Shock Wave and Rapid Electron Acceleration Confined in its Transition Region, *Physics of Plasmas*, 17, 032902 (2010)
- ② T. Amano and M. Hoshino, Electron Shock Surfing Acceleration in Multidimensions: Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Collisionless Perpendicular Shock, *Astrophys. J.*, 690, 244-251 (2009)
- ③ E.E. Grigorenko, M. Hoshino, M. Hirai, T. Mukai and L.M. Zelenyi, “Geography” of ion acceleration in the magnetotail: X-line versus Current sheet effects, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2008JA013610 (2009)
- ④ C. H. Jaroschek and M. Hoshino, Radiation Dominated Relativistic Current Sheets, *Phys. Rev. Letters*, 103(7)DOI:10.1103/PhysRevLett.103.075002 (2009)
- ⑤ T. Amano and M. Hoshino, Nonlinear Evolution of Buneman Instability and Its

- Implication for Electron Acceleration in High Mach Number Collisionless Perpendicular Shocks, *Physics of Plasmas*, 16, DOI:10.1063/1.3240336 (2009)
- ⑥ W. Baumjohann, A. Matsuoka, W. Magnes, K.-H. Glassmeier^c, R. Nakamura, H. Biernat, M. Delva, K. Schwingenschuh, T. Zhang, H.-U. Auster, K.-H. Fornacon, U. Motschmann, I. Richter, A. Balogh, C. Carr, M. Dougherty, P. J. Cargill, T. S. Horbury, E. A. Lucek, F. Tohyama, T. Takahashi, M. Tanaka, T. Nagai, H. Tsunakawa, M. Matsushima, M. Shinohara, H. Kawano, A. Yoshikawa, H. Shibuya, T. Nakagawa, M. Hoshino, Y. Tanaka, R. Kataoka, B. J. Anderson, C. T. Russell, Magnetic Field Investigation of Mercury's Magnetosphere and the Inner Heliosphere by MMO/MGF, *Planetary Space Science*, in press (2009)
- ⑦ C. Jaroschek and M. Hoshino, Stochastic Particle Acceleration by the Forced Interaction of Relativistic Current Sheets, *Adv. Space. Res.*, 41, 481-490 (2008)
- ⑧ M. Hoshino, Wakefield Acceleration by Radiation Pressure in Relativistic Shock Waves, *Astrophys. J.*, 672, 940-956 (2008)
- ⑨ Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, R. Akiba, M. Fujimoto, H. Hasegawa, H. Hayakawa, M. Hirahara, M. Hoshino, S. Machida, T. Mukai, T. Nagai, T. Nagatsuma, M. Nakamura, K. Oyama, E. Sagawa, S. Sasaki, K. Seki, and T. Terasawa, Low energy charged particle measurement by MAP-PACE onboard SELENE, *Earth, Planet and Space*, 60, 375-385 (2008)
- ⑩ K. Nagata, M. Hoshino, C. Jaroschek, and H. Takabe, Interaction between Alternating Magnetic Fields and a Relativistic Collisionless Shock, *Astrophys. J.*, 680, 627-638 (2008)
- ⑪ S. Zenitani and M. Hoshino, The Role of Guide Field in Relativistic Pair Plasma Reconnection, *Astrophys. J.*, 677, 530-544 (2008)
- ⑫ A.S. Sharma, R. Nakamura, A. Runov, E.E. Grigorenko, H. Hasegawa, M. Hoshino, P.Louarn, C.J. Owen, A. Petrukovich, J.-A. Sauvaud, V.S. Semenov, V.A. Sergeev, J.A. Slavin, B.U.O. Sonnerup, L.M. Zelenyi, G. Fruit, S. Haaland, H. Malova, and K. Snekvik, Transient and localized processes in the magnetotail: A review, *Annales Geophysicae*, 26 (4), 955-1006 (2008)
- ⑬ Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, T. Kato, H. Takabe, and M. Hoshino, Nonthermal Acceleration of Charged Particles due to an Incoherent Wakefield Induced by a Large-Amplitude Light Pulse, *Astrophys. J. Lett.*, 682, L113-L116 (2008)
- ⑭ S. Imada, M. Hoshino, and T. Mukai, The Dawn-Dusk Asymmetry of Energetic Electron in the Earth's Magnetotail: Observation and Transport Models, *J. Geophys. Res.*, 113(A11), 10.1029/2008JA013610 (2008)
- ⑮ T. Amano and M. Hoshino, Electron Injection at High Mach Number Quasi-Perpendicular Shocks: Surfing and Drift Acceleration, *Astrophys. J.*, 661, 190 (2007)
- ⑯ W. Baumjohann, A. Roux, O. Le Contel, R. Nakamura, J. Birn, M. Hoshino, A. T. Y. Lui, C. J. Owen, J.-A. Sauvaud, A. Vaivads, D. Fontaine, and A. Rounov, Dynamics of Thin Current Sheets: Cluster Observations, *Annales Geophysicae*, 21, 1-25 (2007)
- ⑰ S. Zeniani and M. Hoshino, Particle Acceleration and Magnetic Dissipation in Relativistic Current Sheet of Pair Plasmas, *Astrophys. J.*, 670, 702-726 (2007)
- [学会発表] (計 16 件)
- ① M. Hoshino, Reconnection in Relativistic and Strongly Magnetized Plasmas and Their Radiation, Workshop on Opportunities in Plasma Astrophysics, Princeton Plasma Physics Laboratory, New Jersey (January 18, 2010)
- ② M. Hoshino, Collisionless Shocks as Particle Accelerator in the Universe, Workshop on indirect dark matter search, IMPU/University of Tokyo, Kashiwa (December 7, 2009)
- ③ M. Hoshino, Particle Acceleration and Magnetic Field Generation in Relativistic Shocks, 5th Korean Astrophysics Workshop on Shock Wave, Turbulence, and Particle Acceleration, APCTP, Pohang, Korea (November 18, 2009)
- ④ M. Hoshino, Lecture on Particle

- Acceleration in Shock Waves, International School-Particle Acceleration in the Universe, GCOE Program/Nagoya University (November 12, 2009)
- ⑤ M. Hoshino, Particle Acceleration and Injection in Non-Relativistic Magnetosonic Shocks, Nonlinear Processes in Astrophysical Plasmas: Particle Acceleration, Magnetic Field Amplification, and Radiation Signatures, Kavli Institute for Theoretical Physics, San Diego, USA (September 25, 2009)
- ⑥ M. Hoshino, Toward Understanding of Electron Fermi Acceleration in Magnetosonic Shocks: Plasma Physics View, TeV Particle Astrophysics 2009, SLAC National Accelerator Laboratory, USA (July, 27, 2009)
- ⑦ M. Hoshino, Particle Acceleration and Injection Problem in Collisionless Shocks, The high-energy astrophysics of outflow from compact objects, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany (December 11, 2008)
- ⑧ M. Hoshino, Particle Energization of Magnetic Reconnection in Space and Astrophysical Plasmas, 2008 Huntsville Workshop: The physical processes for energy and plasma transport across magnetic boundaries, Huntsville, Alabama, USA (October 26, 2008)
- ⑨ M. Hoshino, Particle Acceleration and Injection Problem in Relativistic and Nonrelativistic Shocks, Kinetic Modeling of Astrophysical Plasmas, Krakow, Poland (October 6, 2008)
- ⑩ M. Hoshino, Particle Acceleration in Relativistic Astrophysical Shocks, International Congress on Plasma Physics (ICPP 2008), Fukuoka, Japan (September 8, 2008)
- ⑪ M. Hoshino, Shock Injection Problem and Beyond in Hybrid/Particle-in-Cell Simulations, COSPAR, Montreal, Canada (July 14, 2008)
- ⑫ M. Hoshino, Relativistic Shock Acceleration with Intense Electromagnetic Fields, 7th International Workshop on Nonlinear Waves and Turbulence in Space Plasmas, Beaulieu, France (April 23, 2008)
- ⑬ M. Hoshino, Relativistic Shock and Particle Acceleration with Intense Electromagnetic Fields, International Workshop on Plasma Shock and Particle Acceleration, Senri-Chikusa, Osaka (January 11, 2008)
- ⑭ M. Hoshino, Cosmic Ray Acceleration by Wakefield, 2nd International JEM-EUSO meeting, RIKEN, Saitama (November 11, 2007)
- ⑮ M. Hoshino, Particle Acceleration by Radiation Pressure in Relativistic Shock Waves, ASTRONUM 2007 International Conference, Paris, France (June 12, 2007)
- ⑯ M. Hoshino, Nonlinear Electromagnetic Waves and Nonthermal Particle Acceleration in Relativistic Shock Waves, Japan-Korea Mini-Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas, Daejeon, Korea (April 11, 2007)
- 〔図書〕 (計 3 件)
- ① 星野真弘、シミュレーション天文学、第 6.1 章「プラズマ粒子シミュレーション」、シリーズ現代の天文学、日本評論社 (2007)
- ② 星野真弘、天体物理学の基礎 II、第 2 章「プラズマと電磁流体」、シリーズ現代の天文学、日本評論社 (2008)
- ③ 星野真弘、宇宙プラズマの粒子シミュレーション (5.2 章)、計算力学シミュレーションハンドブック、丸善株式会社 (2009)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：90241257