

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400479

研究課題名(和文) 太陽圏終端衝撃波のマイクロ～メソスケール構造と粒子加速

研究課題名(英文) Micro to mesoscale structures of the heliospheric termination shock and the associated particle acceleration

研究代表者

松清 修一 (Matsukiyo, Shuichi)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：00380709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：無衝突プラズマの第一原理計算であるフル粒子シミュレーションを用いて太陽圏終端衝撃波を再現し、遷移層のマイクロ～メソスケール構造およびその粒子加速過程への寄与を明らかにした。イオン加速については、従来、終端衝撃波で加速される宇宙線異常成分の初期加速機構として、衝撃波サーフィン加速モデルが最有力視されてきたが、ピックアップイオンの影響を陽に考慮することで同加速モデルが働かなくなること、代わりに衝撃波ドリフト加速が働く可能性が高いことを示した。これまでほとんど議論されなかった電子加速については、遷移層のマルチスケール構造を介した波動粒子相互作用が非熱的電子の生成に寄与することを示した。

研究成果の概要(英文)：Full particle-in-cell simulations, known as a first principle simulation method of collisionless plasmas, are used to reproduce the heliospheric termination shock and to examine micro-to meso-scale structures of the shock transition region and their effects on particle acceleration processes.

In terms of ion acceleration, shock surfing acceleration (SSA) model had been a most plausible model as the mechanism of initial acceleration of anomalous cosmic rays which were believed to be accelerated at the termination shock. This study revealed that the SSA does not work if the presence of right amount of pickup ions are taken into account. Instead, it was shown that shock drift acceleration is a more plausible mechanism. Electron acceleration at the termination shock, on the other hand, had not been strenuously discussed. Here, it was demonstrated that wave-particle interactions through the multi-scale structures in the transition region result in locally producing non-thermal electrons.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：太陽圏終端衝撃波 粒子加速 数値シミュレーション ピックアップイオン

1. 研究開始当初の背景

ボイジャー探査機による初の直接観測によって、太陽圏終端衝撃波での粒子加速効率が、従来の予測に反して低いことが分かっていた。終端衝撃波は、地球で観測される宇宙線異常成分の生成現場であると長年考えられており、しかもその認識は無衝突衝撃波による宇宙線の標準加速理論に基づいたものであったため、低い加速効率の原因解明は重要な課題であった。

2. 研究の目的

終端衝撃波を含む太陽圏外縁部では、太陽風起源の電子とイオンに加え、星間空間起源のイオン種であるピックアップイオンが含まれる。ボイジャーの観測結果から、このピックアップイオンの相対密度が従来の見積もりよりもかなり高いことが示唆されていた。そこで本研究では、ピックアップイオンが衝撃波の電磁場構造に与える影響を調べ、さらに遷移層近傍で起こる粒子加速の初期段階への影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

終端衝撃波は太陽から 100 億 km 以上彼方に位置しており、この位置では太陽風のスパイラル磁場ベクトルと衝撃波面法線方向は垂直に近くなる。一般に、このような準垂直衝撃波では、遷移層で大振幅の電子スケール波動が励起され、これがしばしば衝撃波の大規模な時空間構造にまで影響を与える。このような電子スケールのミクロ構造から遷移層の全体構造までを正しく再現するために、本研究ではフル粒子シミュレーションを用いた。フル粒子シミュレーションでは、多数の電子およびイオンの運動方程式と、電磁場のマクスウェル方程式を連立させて解くため、無衝突プラズマの第一原理シミュレーションと呼ばれる。大規模なフル粒子シミュレーションを行って終端衝撃波を再現し、そのミクロ～メソスケールにわたる構造と粒子加速過程について、特にピックアップイオンの果たす役割に注目して議論した。

4. 研究成果

はじめに、1次元シミュレーションによって様々なパラメータに対する衝撃波構造の依存性を系統的に調べた。遷移層で物理量が急激に変化する領域をランプと呼ぶが、ここでしばしば入射イオンの一部が反射され、その上流側に磁場や密度が緩やかに上昇するフットと呼ばれる領域が形成される。終端衝撃波では、太陽風イオンが作るフットに加えて、ピックアップイオンが作るより大きな空間スケールにまで広がる拡張されたフットが存在する。地球近傍で観測される衝撃波では、通常フットやランプを含む遷移層の磁場波形と静電ポテンシャルの波形はよく似ている。しかし、ピックアップイオンの相対密

度 (N_{PU}) が 20%以上になると、衝撃波の磁場波形とポテンシャル波形が陽に違いを見せるようになる。磁場波形は太陽風密度を反映しやすいのに対して、ポテンシャルは衝撃波面で反射された反射ピックアップイオンのダイナミクスを反映しやすいためである。特に、拡張されたフットでのポテンシャル上昇が顕著で、結果としてランプでのポテンシャル上昇が大きく抑えられる。磁場波形とポテンシャル波形の違いはマッハ数が大きいほど顕著になる。下流の熱エネルギーの大半 (90%以上) はピックアップイオンが担うが、拡張されたフット領域で変形 2 流体不安定性による太陽風プラズマの加熱が若干見られた。 $N_{PU}=20\%$ 以下なら衝撃波面のリフォーメーションが顕著に見られるが、 $N_{PU}=30\%$ になると抑えられる。リフォーメーションはまた、拡張されたフット領域で不安定性による太陽風の加熱が起こる場合や、太陽風の温度が高い場合にも抑制されることが分かった。

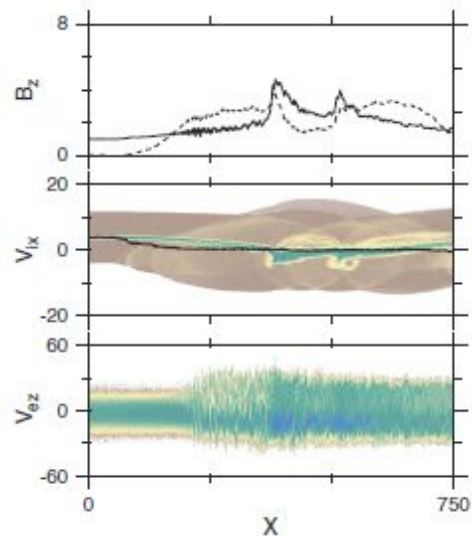


図1 1次元シミュレーションで再現された終端衝撃波の典型的な遷移層構造 (上: 磁場 (実線) およびポテンシャル (破線) 波形、中: イオン位相空間、下) 電子位相空間)

従来、終端衝撃波が加速現場だと考えられていた宇宙線異常成分は、高エネルギーのピックアップイオンであることが観測的に確立している。このため、ピックアップイオンを選択的に加速できる理論モデルが構築されてきた。最も有力視されてきたのが衝撃波サーフィン加速モデルであるが、このモデルが働く前提として、遷移層での電子スケールの非常に急峻なポテンシャル上昇が必要とされている。しかしボイジャーのデータからは、終端衝撃波近傍で $N_{PU}=20 \sim 30\%$ のピックアップイオンの存在が示唆されている。前述のように、この場合ポテンシャル上昇の大半は空間スケールの大きい拡張されたフット領域で起こり、ランプでの上昇はわずかである。結果として、1次元シミュレーションではピックアップイオンの衝撃波サーフィン加速は確認されなかった。一方、衝撃波角(衝撃波面法線ベクトルと上流磁場ベクトルの

なす角)を90度から下げていくと、80度以下で電子が、60度でピックアップイオンが加速されることが分かった。この場合の加速機構は衝撃波ドリフト加速として知られるものである。加速された粒子は衝撃波で反射されて上流に逆流しており、上流の非熱的成分となっている。衝撃波サーフィン加速よりも加速効率は悪いが、このことはボイジャーのデータとも整合的である。また、従来、終端衝撃波での電子加速については系統的な議論がほとんどなされておらず、電子の加速機構として衝撃波ドリフト加速が効くことを、フル粒子シミュレーションで初めて示した。

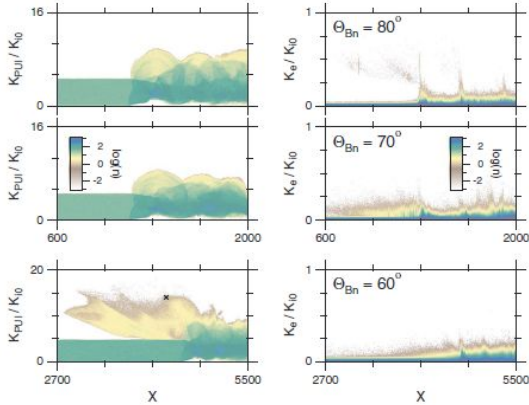


図2 さまざまな衝撃波角に対する遷移層近傍での粒子のエネルギー分布。(左:ピックアップイオン, 右:電子)

1次元シミュレーションの結果を踏まえて行った2次元シミュレーションでは、衝撃波構造・粒子加速機構ともに大きな違いが見られた。背景磁場をXY面内にとり、上流の流れを-X方向にとった計算を行った。まず、比較的大きなメソスケールの構造として、Y方向にイオン慣性長の数倍の波長を持つ、リップルと呼ばれる磁場および密度の変動が見られた。その振幅は上流の背景磁場や密度と同じオーダーに達する。一方で、Y方向に平均化してXのみの関数として見たときの磁場や密度波形は、1次元シミュレーションのものとはよく一致した。ミクロスケールに着目すると、(拡張された)フットでの変形2流体不安定性に加え、リップルで歪んだ衝撃波面に沿う方向に伝搬するホイスラー波の励起

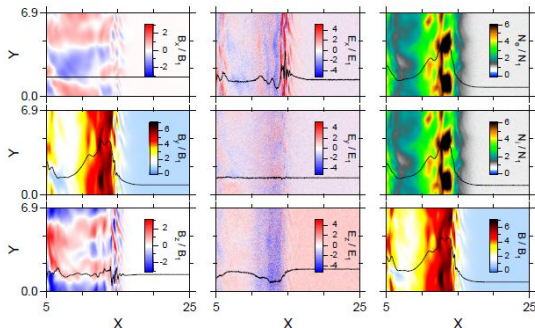


図3 2次元シミュレーションで再現された遷移層構造(左:磁場(Bx, By, Bz)、中:電場(Ex, Ey, Ez)、右:密度(Ne, Ni)および磁場強度(B))

を確認した。このホイスラー波は、遷移層での局所的な電子の温度異方性に起因するホイスラー不安定性によるものであると考えられる。

上述のメソスケール~ミクロスケールの波動構造が電子加速に与える影響を検討した。多次元化によって衝撃波での電子の反射率が大きく下がった。元来、電子の反射は、衝撃波で圧縮・強化される磁場によるミラー反射に起因する。リップル構造を含む多次元系では、衝撃波面に沿って1次元の場合よりも磁場の弱い領域が見れる。遷移層にさしかかった電子は、対流によって下流方向に流されつつ、磁力線に沿って衝撃波面を長距離にわたって移動する。多くの電子は、この間に局所的に磁場の弱い領域を見つけてそこから簡単に下流に透過してしまう。このため、1次元シミュレーションで見られた、衝撃波ドリフト加速を受けて反射される電子が見られなくなった。しかしながら、遷移層から下流にかけて、電子分布関数に非熱的に加速された成分が新たに見られた。この非熱的電子の挙動を詳細に調べたところ、電子は加速時に、主に磁力線に対して垂直方向のエネルギーを得ており、これは衝撃波ドリフト加速の特徴と明らかに異なる。加速を受ける間、電子は衝撃波面の限られた領域に留まっており、この領域で電子温度異方性起源のホイスラー波が励起されていることを確認した。電子の挙動は、磁力線に平行および反平行方向に伝搬するホイスラー波との相互作用によって加速されていることを示唆している。加速時の対流電場(衝撃波面に沿う方向(Z方向)の構造的電場)の役割、平行衝撃波でのイオン加速モデルとして知られる捕捉イオンモデルとの共通点・相違点の精査など、今後さらに詳しい解析が必要である。

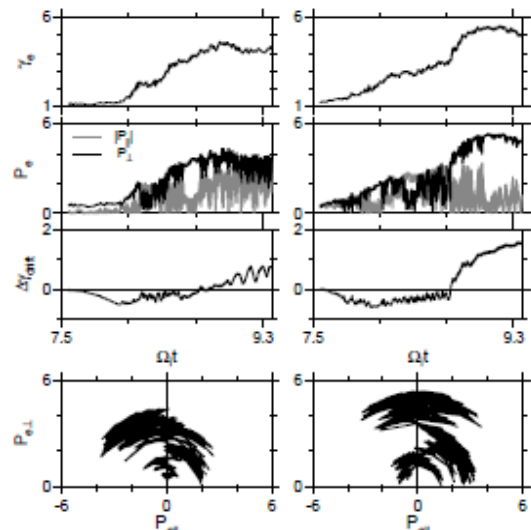


図4 遷移層での2つの被加速電子の挙動(上3段はエネルギー、運動量、ドリフト加速によるエネルギー増分の各時系列、下段は運動量空間における電子の軌道)

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 9 件)

1. S. Matsukiyo, Local interactions between collisionless shock and plasma: Waves, multi-scale physics, particle acceleration/heating, *Journal of Plasma and Fusion Research*, 92, 87, 2016 (査読有)
URL: [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_02/jspf2016_02-jp.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_02/jspf2016_02-<u>jp.pdf</u>)
 2. S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, Electron Acceleration at a High Beta and Low Mach Number Rippled Shock, *Journal of Physics: Conference Series*, 642, 012017, 2015 (査読有)
DOI: 10.1088/1742-6596/642/1/012017
 3. S. Matsukiyo, M. Scholer, Simulations of pickup ion mediated quasi-perpendicular shocks: Implications for the heliospheric termination shock, *Journal of Geophysical Research*, 119, 2388, 2014 (査読有)
DOI: 10.1002/2013JA019654
 4. T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, Dynamics and microinstabilities at perpendicular collisionless shock: A comparison of large-scale two-dimensional full particle simulations with different ion to electron mass ratio, *Physics of Plasmas*, 21, 022102, 2014 (査読有)
DOI: 10.1063/1.4863836
- [学会発表](計 60 件)
1. S. Matsukiyo, T. Umeda, Electron scale instabilities in the foot of a perpendicular shock, AGU fall meeting 2015, 2015.12.17, San Francisco (USA)
 2. 松清 修一, 無衝突衝撃波遷移層での微視的不安定性, H27 年度名古屋大学太陽地球環境研究所共同研究集会「STE シミュレーション研究会 - エクサスケールに向けて -」, 2015.09.30, 京都大学(京都市)
 3. S. Matsukiyo, PIC Simulation of High Beta and Low Mach Number Astrophysical Shocks: Microstructures and Electron Acceleration, 5th East-Asia School and Workshop on Laboratory Space and Astrophysical plasmas, 2015.08.21, Pohang (Korea) (invited)
 4. 松清 修一, 梅田 隆行, 荻野 正雄, 無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性の多次元実パラメータ計算, 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告シンポジウム, 2015.06.03, 名古屋大学(名古屋市)
 5. 松清 修一, 松本 洋介, 高ベータ低マッハ数衝撃波における電子加速, JpGU meeting 2015, 2015.05.25, 幕張メッセ(千葉市)
 6. S. Matsukiyo, Electron acceleration at a high beta shock, 14th Annual International Astrophysics Conference, 2015.04.21, Tampa (USA) (invited)
 7. S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, Microphysics of a multidimensional high beta low Mach number shock, AGU fall meeting 2014, 2014.12.15, San Francisco (USA)
 8. T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, Reformation and microinstabilities at perpendicular collisionless shocks, AGU fall meeting 2014, 2014.12.15, San Francisco (USA)
 9. 松清 修一, 松本 洋介, 高ベータ低マッハ数衝撃波の多次元構造と粒子加速, Plasma Conference 2014, 2014.11.18, 朱鷺メッセ(新潟市)
 10. 梅田 隆行, 木谷 佳隆, 松清 修一, 垂直衝撃波における再形成と微視的不安定性, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回講演会, 2014.11.03, 信州大学(松本市)
 11. S. Matsukiyo, PIC simulation of heliospheric termination shock, Taiwan-Japan Workshop 2014: Laboratory Astrophysics with Ultra Intense Lasers, 2014.10.17, Taoyuan (Taiwan)
 12. S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, 2D Structure of a High Beta Shock and the Associated Particle Acceleration, AOGS 11th Annual Meeting, 2014.07.29, Royton Sapporo Hotel (Sapporo)
 13. 松清 修一, 無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性の多次元実パラメータ計算, 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告シンポジウム, 2014.05.13, 名古屋大学(名古屋市)
 14. 松清 修一, 松本 洋介, 高ベータ無衝突衝撃波の 2 次元構造と粒子加速に関するフル粒子計算, 日本地球惑星科学連合大会 2014, 2014.04.30, パシフィコ横浜(横浜市)
 15. S. Matsukiyo, Microstructure of shock transition region in space and

laboratory plasmas, ISSI team meeting: Physics of the injection of particle acceleration at astrophysical heliospheric, and laboratory collisionless shocks, 2014.03.17, Bern (Switzerland)

16. S. Matsukiyo, Collisionless shocks in magnetized and unmagnetized plasmas: PIC simulation and laser experiment, Japan-US Workshop on Laboratory Astrophysics – Collisionless shock experiment using high-power laser systems -, 2014.02.24, Osaka Univ. (Osaka) (invited)
17. 松清 修一, 低マッハ数衝撃波における相対論的電子加速, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2013, 2013.11.19, パレス松洲 (宮城県)
18. 松清 修一, 高マッハ数無衝突衝撃波生成の理論, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013.09.27, 高知大学 (高知市)
19. S. Matsukiyo, PIC simulations of the termination shock, 8th European Workshop on Collisionless shocks, 2013.06.06, Paris (France) (invited)
20. 松清 修一, M. Scholer, 終端衝撃波における電子加速, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.05.23, 幕張メッセ (千葉市)
21. S. Matsukiyo, M. Scholer, PIC simulations on the termination shock: Microstructure and electron acceleration, 2013 AGU Meeting of Americas, 2013.05.17, Cancun (Mexico) (invited)
22. S. Matsukiyo, M. Scholer, Burst of reflected electrons in nonstationary quasi-perpendicular shocks, 2013 AGU Meeting of Americas, 2013.05.17, Cancun (Mexico)

〔図書〕(計 0 件)

〔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://www.esst.kyushu-u.ac.jp/~space/matsukiyo/res_shock.html

6 . 研究組織

(1) 研究代表者
松清 修一 (MATSUKIYO, Shuichi)
九州大学・大学院総合理工学研究院・助教
研究者番号 : 0 0 3 8 0 7 0 9

(2) 研究分担者
()

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

研究者番号 :