

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究(研究課題)

研究期間：2009～2011

課題番号：21200050

研究課題名（和文）

次世代第一原理粒子シミュレーションによる無衝突衝撃波の粒子加速機構の解明

研究課題名（英文）

Study of particle acceleration processes at collisionless shocks via next-generation and first-principle particle simulations.

研究代表者

梅田 隆行 (UMEDA TAKAYUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：40432215

研究成果の概要（和文）：

大規模な2次元全粒子シミュレーションにより、垂直衝撃波の非定常性について研究を行い、以下の成果を得た。衝撃波面におけるイオンの反射によってイオンと電子に相対速度が生じ、電子スケールの変形不安定性によって電磁ホイッスラー波動が励起する。このホイッスラー波動はリップルと呼ばれるイオンスケールの衝撃波面の変動と磁氣的相互作用し、互いに強め合う。その結果、衝撃波面に入射する上流イオンと波面で反射するイオンが激しく散乱され、周期的かつコヒーレントなイオンの反射を抑制し、衝撃波の再形成が消滅する。以上により、垂直衝撃波の非定常性の1つである再形成の存在の有無が、電子スケールの微視的不安定性にコントロールされていることを明らかにし、電子-イオン-流体間のスケール間結合過程が存在することを示した。

研究成果の概要（英文）：

Large-scale two-dimensional full particle-in-cell simulations are carried out for studying non-stationarity of perpendicular shocks. It is confirmed that the persistence and absence of the self-reformation is controlled by micro-instabilities at the shock front. When electromagnetic whistler mode waves are strongly excited by the modified two-stream instability, both incoming and reflected ions are strongly scattered and the shock reformation becomes absent. On the other hand, when electrostatic waves are weakly excited or there is no micro-instabilities, reflected ions show a coherent behavior and the shock reformation is persistent. In this case, however, the reformation period is modified essentially due to the shock front ripples. The present simulation result suggests that the structure and dynamics of shocks are affected by the cross-scale coupling between electron-scale micro-instabilities and ion-scale shock-front ripples.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
総計	20,800,000	6,240,000	27,040,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学、物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、宇宙・天体プラズマ、超高層物理学、計算科学、次世代スーパーコンピュータ

1. 研究開始当初の背景

地球に降り注ぐ高エネルギー粒子である宇宙線の起源は未解明の問題である。宇宙線のエネルギーは最大でデカジュール(10の20乗電子ボルト)にも達し、エネルギー密度は宇宙背景放射や星光、星間磁場のエネルギー密度と同程度である。つまり宇宙線は我々の銀河の基本構成要素である。非熱的粒子である高エネルギー宇宙線の生成は、活動銀河核ジェット、ガンマ線バースト、超新星残骸、恒星間・惑星間空間および恒星・惑星磁気圏など、至る所に普遍的に存在する無衝突衝撃波で起きていると考えられているが、その粒子加速機構は数十年の未解決問題である。希薄な宇宙プラズマ中に存在する無衝突衝撃波は、磁気流体力学的なマクロ構造と、重いイオンの粒子的な振る舞いおよび軽い電子の粒子的な振る舞いが相互作用し、時間的・空間的なマルチスケール・マルチ物理性を生み出していることが、人工衛星による地球磁気圏衝撃波の直接観測により明らかとなっている。無衝突衝撃波での非線形物理過程を完全に解明するためにはプラズマの第一原理を計算機シミュレーションにより解くことが不可欠である。しかし、流体スケールの衝撃波のマクロなダイナミクスを電子スケールのマイクロな素過程から解き明かすには、膨大な計算機資源が必要である。

近年のスーパーコンピュータはスカラCPUを用いたクラスター型超並列計算機が主流となっており、研究開始当時は「次世代スーパーコンピュータ」と呼ばれていた京コンピュータも演算コア数が10万以上の分散メモリ型スカラ超並列計算機である。そのため、スカラ超並列計算機において高効率に動作するシミュレーションコードの開発は急務である。

2. 研究の目的

地球磁気圏・惑星間空間衝撃波や超新星残骸高マッハ数衝撃波などの様々なパラメータ環境下の無衝突衝撃波に対して、イオンと電子の異スケール間の物理過程の結合を含めた大規模2次元シミュレーションを行い、異スケール間の物理結合の存在を明らかにする。

また、無衝突衝撃波の粒子加速機構に関してプラズマ物理学的視点による第一原理計算機シミュレーションを行い、地球磁気圏物理学および高エネルギー天文学において観測事実に基づいて提唱されている粒子加速モデルの検証を目指すとともに、京コンピュータのプロトアーキテクチャとされるFujitsu FXや、クラスター型計算機の代表であるT2Kタイプのスーパーコンピュータにおいてチューニングを行うとともに、分散メ

モリ型超並列計算機に対応した並列化を試みる。

3. 研究の方法

最近の1次元計算によって、イオン-電子間のスケール間結合を含む衝撃波の諸物理はマッハ数に依存して定性的に変化する可能性が指摘されている。しかも、スケール間結合の発現にはしばしば多次元性が本質的役割を果たすと考えられており、プラズマの第一原理に基づいた多次元粒子コードによる研究が不可欠である。しかし、既存の衝撃波の粒子シミュレーションでは、磁場あるいはプラズマ粒子の圧力によりプラズマを圧縮することでコンピュータ内に衝撃波を生成しており、高速で伝播する衝撃波を有限のコンピュータメモリ内で解析するために膨大な計算リソースが必要であった。この解決策として、本研究グループが所有する世界的にもユニークな「衝撃波静止系モデル」により、衝撃波が止まった系でその振る舞いを解析する。これにより、従来の衝撃波シミュレーション手法に比べて必要な計算リソースを20分の1以下に節約できる。

本研究では特に、衝撃波面接線方向に対して、イオン慣性長の5倍以上のシミュレーション空間を確保し、「リップル」と呼ばれる衝撃波面の波打ち現象を含めたシミュレーションを行う。これにより、衝撃波面のイオンスケールの非定常性が電子のマイクロ素過程に与える影響を解析する。

4. 研究成果

①低マッハ数衝撃波における再形成の条件

無衝突衝撃波の波面法線方向と磁場方向が垂直に近い場合、衝撃波上流から流入するイオンが周期的に反射され、衝撃波面が周期的に発達と消滅を繰り返す、再形成と呼ばれる現象がある。本研究では特に、アルフヴェンマッハ数が6程度の低マッハ数(準)垂直衝撃波における、2次元空間での衝撃波面の非定常性について解析を行った。

過去の研究では、衝撃波の再形成の有無が衝撃波の法線方向と磁場のなす角(衝撃波角)に依存していることが示唆されていたため、本研究では衝撃波角の異なる2次元シミュレーションを数例行い、それらを直接比較した。その結果、衝撃波角が90度に近い垂直衝撃波では再形成とリップルの物理過程においてほとんど違いがなく、衝撃波角依存性は小さいことがわかった。更に、過去の研究において衝撃波角依存性として誤認されていた要因は、衝撃波面の電磁場の時系列データの取り扱いに違いがあったためであることを同定した。即ち、衝撃波面に平均化し

た時系列データを解析した場合、リップルによって位相が異なった再形成を平均化することによって見掛け上、衝撃波再形成が抑制されたように見え、衝撃波面のある局所的な時系列データを解析した場合はリップルによって周期が変化した再形成が見える。

次に、衝撃波遷移領域で生じる電子スケールの微視的不安定性に着目し、励起される波動の特性が、衝撃波上流の速度と電子の熱速度の比に左右されることを明らかにした。上流速度が非常に速い場合には電子サイクロトロン高調波が励起するが、この波動はイオンの散乱にはあまり影響しない。上流速度が電子の熱速度よりも小さい場合にはホイッスラー波が励起し、衝撃波の磁場と相互作用を起こす。

更に、リップルと呼ばれる衝撃波面がイオンスケールで空間的に変動する現象に着目し、大規模な2次元粒子シミュレーションを行った。リップルがない場合、衝撃波は1次元シミュレーションと同様の時間発展を見せる。リップルが存在する場合は、衝撃波遷移領域で励起した波動の特性によって、再形成の存在が左右されることを明らかにした。微視的不安定性によって電磁的電子サイクロトロン（ホイッスラー）波が励起する場合、ホイッスラー波がリップルを強めて、そのリップルによってホイッスラー波がさらに強まる波動-波動相互作用が生じる。その結果、遷移領域の反射イオンがホイッスラー波によって激しく散乱され、十分な量のイオンが衝撃波面前方に反射されずに、再形成が消失する。次に Whistler 波が励起されない場合は、リップルによってイオンの反射周期が乱され、その結果再形成周期が長くなる。

以上より、低マッハ数垂直衝撃波において再形成が生じる条件を明らかにし、電子スケールの波動が流体スケールの衝撃波の構造に影響を与え得る、スケール間結合の存在を示した。

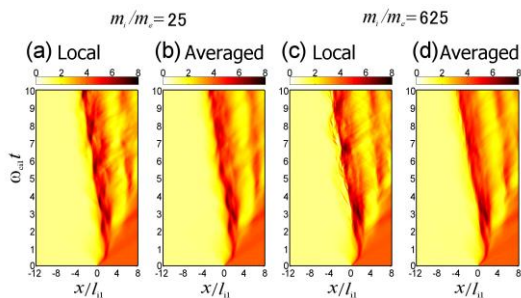


Fig.1 2次元シミュレーションで得られた衝撃波磁場の時間変化。衝撃波面接線方向について、ある一点を選んで変化をみた場合と平均化した場合で、衝撃波面の時間的振動（再形成）の様相が異なる。

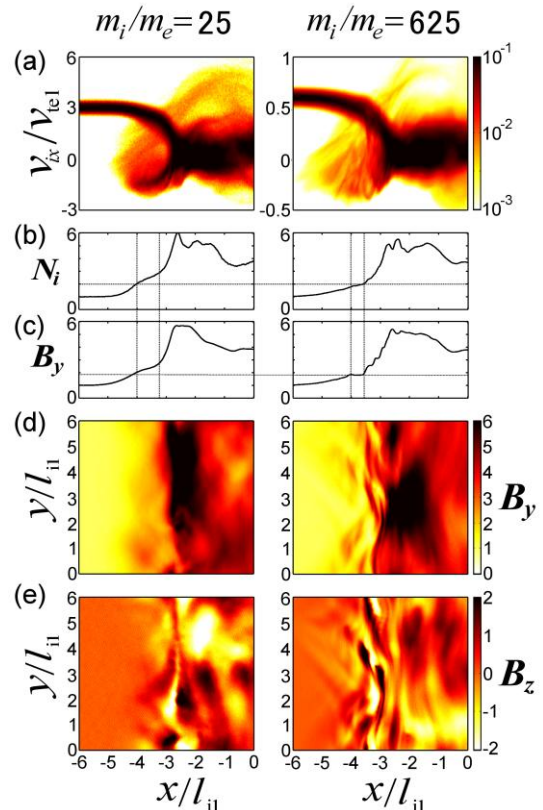


Fig.2 2次元シミュレーションで得られた衝撃の構造。イオン-電子質量比を変えることで、衝撃波面で生じる不安定性のモードが変化する。質量比が大きい場合は電磁的ホイッスラー波が励起し、衝撃波面のリップルと激しく相互作用し、イオンを散乱する。

② 準垂直衝撃波における電子加速

準垂直衝撃波では、特定の条件下において衝撃波上流から流入する電子が衝撃波面で反射されながら加速する現象が生じ、衝撃波ドリフト加速（SDA）として知られている。本研究では反射した電子によって形成した速度分布関数に着目し、微視的不安定性によって励起する波動の解析を行った。

まず、地球衝撃波上流で観測される電子プラズマ放射に着目した電子ビーム不安定性の2次元粒子シミュレーションを行った。半平行方向に伝搬する2つの電子プラズマ波動の3波共鳴によって、プラズマ周波数の2倍の周波数で電波放射が起こることを確認した。次に、電子ビーム不安定性によって励起された電子プラズマ波動が後方散乱される過程について調べた結果、大振幅電子プラズマ波のパラメトリック崩壊によって励起する前進イオン音波と後進電子プラズマ波の振幅は非常に小さいことが明らかとなった。一方で、イオン音波の熱雑音によって直接後方散乱された電子プラズマ波の振幅のほうが大きくなることが分かった。この結果は、

従来の理論から推測されていると電子プラズマ放射過程とは大きく異なっている。

次に、1次元准垂直衝撃波のシミュレーションを行い、SDAを再現するとともに、SDAによって形成した電子の速度分布関数をもとに微視的不安定性の解析を行った。更に、大規模2次元シミュレーションにより、衝撃波面のリップルが存在する条件下におけるSDAについて解析を行ったところ、リップルに伴って励起する低周波のプラズマ波動によって電子が磁場に平行方向に加熱され、電子の反射の要因となる磁気ミラー効果が弱められることを明らかにした。

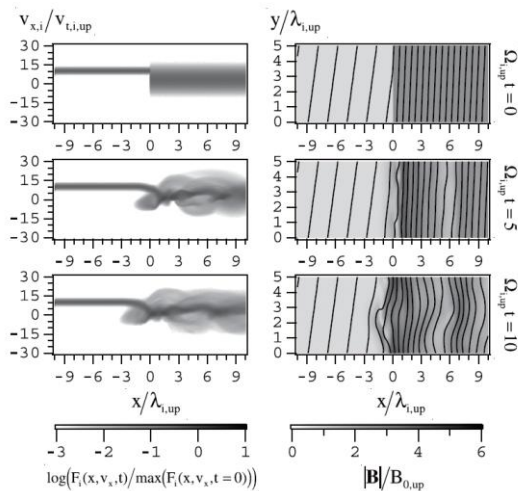


Fig.3 準垂直衝撃波の時間発展。(左)イオンの x - v_x 位相密度及び(右)磁場成分 B_y の強度と磁力線。リップルによって衝撃波面の磁場がゆがめられている。

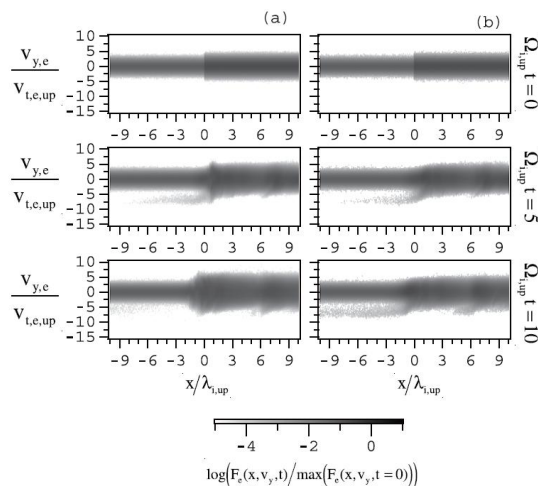


Fig.4 電子の x - v_x 位相密度。(a) y 方向の空間領域がイオン慣性長の5倍。(b) y 方向の空間領域がイオン慣性長の1倍。(a)では、リップルの出現によってSDAが抑えられている。

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7件)

- ① T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, and R. Yamazaki, Microinstabilities at perpendicular collisionless shocks: A comparison of full particle simulations with different ion to electron mass ratio, *Phys. Plasmas*, Vol.19, 042109, 2012. (10.1063/1.3703319) (査読有り)
- ② T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, and R. Yamazaki, Modified two-stream instability at perpendicular collisionless shocks: Full particle simulations, *J. Geophys. Res.*, Vol.117, A03206, 2012. (10.1029/2011JA017182) (査読有り)
- ③ S. Matsukiyo, Y. Ohira, R. Yamazaki, and T. Umeda, Relativistic electron shock drift acceleration in low Mach number galaxy cluster shocks, *Astrophys. J.*, Vol.742, 2011. (10.1088/0004-637X/742/1/47) (査読有り)
- ④ S. Saito and T. Umeda, Suppression of reflected electrons by kinetic Alfvén turbulence in a quasi-perpendicular shock: Particle-in-cell simulations, *Astrophys. J.*, Vol.736, 2011. (10.1088/0004-637X/736/1/35) (査読有り)
- ⑤ T. Umeda, M. Yamao, and R. Yamazaki, Cross-scale coupling at a perpendicular collisionless shock, *Planet. Space Sci.*, Vol.59, 449-455, 2011. (査読有り)
- ⑥ T. Umeda, Y. Kidani, M. Yamao, S. Matsukiyo, and R. Yamazaki, On the reformation at quasi- and exactly-perpendicular shocks: Full particle-in-cell simulations, *J. Geophys. Res.*, Vol.115, A10250, 2010. (10.1029/2010JA015458) (査読有り)
- ⑦ T. Umeda, Electromagnetic plasma emission during beam-plasma interaction: Parametric decay versus induced scattering, *J. Geophys. Res.*, Vol.115, A01204, 2010. (10.1029/2009JA014643) (査読有り)

[学会発表] (計23件)

- ① 梅田 隆行, 木谷 佳隆, 松清 修二, 山崎了, 垂直衝撃波の再形成, *日本天文学会2012年春季年会*, 2012年3月20日, 龍谷大学.
- ② T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, On the reformation at perpendicular shocks, *American Geophysical Union (AGU) 2011*

Fall meeting, 2011 年 12 月 6 日, San Francisco, USA.

- ③ Y. Kidani, T. Umeda, S. Matsukiyo, T. Ogino, Modified two-stream instability at perpendicular shocks: Full particle simulations, *American Geophysical Union (AGU) 2011 Fall meeting*, 2011 年 12 月 6 日, San Francisco, USA.
- ④ 木谷 佳隆, 梅田 隆行, 松清 修一, 荻野 竜樹, Modified two-stream instability at perpendicular shocks: Full particle simulations, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011 年 11 月 4 日, 神戸大学.
- ⑤ 梅田 隆行, 全粒子コードの高次精度化, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011 年 11 月 3 日, 神戸大学.
- ⑥ T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, Dynamics of quasi-perpendicular shocks: Recent results issued from 2D PIC simulation, *30th General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI)*, 2011 年 8 月 15 日, Istanbul, Turkey. (招待講演)
- ⑦ Y. Kidani, T. Umeda, S. Matsukiyo, T. Ogino, On the reformation at perpendicular shocks: full particle-in-cell simulation, *10th International School for Space Simulations (ISSS-10)*, 2011 年 7 月 26 日, Banff, Canada.
- ⑧ 木谷 佳隆, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 松清 修一, 垂直衝撃波の再形成に関する 2 次元全粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ.
- ⑨ 松清 修一, 山崎 了, 大平 豊, 梅田 隆行, 低マッハ数衝撃波による相対論的電子加速, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ.
- ⑩ 木谷 佳隆, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 松清 修一, On the reformation at a quasi-perpendicular shock: Full particle-in-cell simulation, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010 年 11 月 1 日, 沖縄県市町村自治会館.
- ⑪ T. Umeda, Electromagnetic plasma emission during beam-plasma interaction, *2010 Asia-Pacific Radio Science Conference*, 2010 年 9 月 26 日, 富山市国際会議場. (招待講演)
- ⑫ T. Umeda, M. Yamao, Y. Kidani, R. Yamazaki, Cross-scale coupling at a collisionless shock, *38th COSPAR Scientific Assembly*, 2010 年 7 月 18 日, Bremen, Germany.
- ⑬ 梅田 隆行, 松清 修一, 山崎 了, 松本 洋介, 粒子シミュレーション研究の最近

の動向, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 26 日, 幕張メッセ. (招待講演)

- ⑭ 木谷 佳隆, 梅田 隆行, 山尾 政博, 山崎 了, 衝撃波静止系による準垂直衝撃波の 2 次元粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 25 日, 幕張メッセ.
- ⑮ 松清 修一, 梅田 隆行, 山崎 了, 大平 豊, 高ベータ準垂直衝撃波における電子加速, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 23 日, 幕張メッセ.
- ⑯ 梅田 隆行, 山尾 政博, 木谷 佳隆, 山崎 了, 垂直衝撃波におけるスケール間結合, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 23 日, 幕張メッセ.
- ⑰ T. Umeda, M. Yamao, R. Yamazaki, Cross-scale coupling at a collisionless shock, *American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall meeting*, 2009 年 12 月 16 日, San Francisco, USA.
- ⑱ M. Yamao, T. Umeda, R. Yamazaki, T. Ogino Two-dimensional particle simulation of a perpendicular shock with a shock rest frame model, *American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall meeting*, 2009 年 12 月 16 日, San Francisco, USA.
- ⑲ 山尾 政博, 梅田 隆行, 山崎 了, 荻野 竜樹, 低マッハ数無衝突垂直衝撃波における微視的不安定性, 第 126 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009 年 9 月 28 日, 金沢大学.
- ⑳ T. Umeda, M. Yamao, R. Yamazaki, Cross-scale coupling at a collisionless shock, *International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) 11th Scientific Assembly*, 2009 年 8 月 25 日, Sopron, Hungary.

他 3 件

〔図書〕 (計 1 件)

- ① T. Umeda, Electromagnetic waves in plasma (In: *Wave Propagation*, Edited by A. Petrin) pp.311-330, InTech, 2011.

〔その他〕 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

・梅田 隆行 (UMEDA, Takayuki)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号: 40432215

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

- 山崎 了 (YAMAZAKI, Ryo)
青山学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：40420509
- 松清 修一 (MATSUKIYO, Shuichi)
九州大学・総合理工学研究院・助教
研究者番号：00380709
- 天野 孝伸 (AMANO, Takanobu)
名古屋大学・理学研究科・特任助教
研究者番号：00514853
- 杉山 徹 (SUGIYAMA, Tooru)
海洋開発研究機構・研究員
研究者番号：20399570
- 齊藤 慎司 (SAITO, Shinji)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・研究員
(H 2 2)

- 情報通信研究機構・研究員 (H 2 3)
研究者番号：60528165
- (4) 研究協力者
 - 山尾 雅博 (YAMA0, Masahiro)
名古屋大学・工学研究科・修士課程
(H 2 1)
 - 木谷 佳隆 (KIDANI, Yoshitaka)
名古屋大学・工学研究科・修士課程
(H 2 2 - 2 3)
 - 大平 豊 (Ohira, Yutaka)
大阪大学・理学研究科・特別研究員 (DC2)
(H 2 1)
 - 高エネルギー加速器研究機構・研究員
(H 2 2 - 2 3 : 連携研究者)