

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25年 5月 7日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740323

研究課題名（和文）

高マッハ数非定常衝撃波の観測的実証研究に向けた数値実験

研究課題名（英文）

Simulation studies on high Mach number nonstationary collisionless shocks

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：00380709

研究成果の概要（和文）：

高マッハ数無衝突衝撃波の非定常的振る舞いのうち、リフォーメーションと呼ばれる衝撃波面の周期的な形成・崩壊過程に注目した。リフォーメーションは、数値実験によって予言された高マッハ数衝撃波の自発的な振る舞いであり、その観測的実証は未だなされていない。ここでは、リフォーメーションの基本特性を数値実験により明らかにし、特にこれに付随して起こる反射電子バーストに着目して、衛星観測の際にこれをリフォーメーションのメジャーとして用いるための知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

It is known that a high Mach number collisionless shock is often self-reforming, i.e., the shock front is cyclically formed and destroyed even though the upstream plasma parameters are steady. The self-reformation was originally found in numerical simulation studies, while its observational proof has not been established. In this study the basic features of the self-reformation is revealed by using numerical simulations. In particular we focus the phenomenon called reflected electron burst accompanied by the self-reformation and discuss how the characteristics of the self-reformation are transferred through it to a remote upstream region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：宇宙プラズマ、非定常衝撃波、数値実験、リフォーメーション

1. 研究開始当初の背景

高マッハ数無衝突衝撃波の非定常的振る舞いは、古くから地球磁気圏衝撃波などの衛星観測により知られていた。非定常性の起源にはさまざまな要因が考えられていたが、中

でもリフォーメーションと呼ばれる衝撃波面の周期的な形成・崩壊現象は外的要因（上流プラズマの揺動や非局所効果など）によらず、高マッハ数衝撃波が示す自発的な振る舞いとして注目されてきた。リフォーメーション

ンに伴って、衝撃波近傍でさまざまな大振幅波動が励起されたり、粒子加速が起こって非熱的粒子が生成されたりすると考えられており、衝撃波におけるエネルギー変換過程を理解する上で、リフォーメーションの果たす役割を理解することが重要であると認識されていた。

元来、リフォーメーションは数値実験によって発見された現象で、観測的実証が大きな課題であった。単一衛星による直接観測では時間と空間の分離が不可能なことから、現在主流の数基の衛星による編隊観測でもリフォーメーションの特徴である周期性を捉えるには観測点が足りないこと、などが観測的実証が困難な要因であった。

2. 研究の目的

無衝突衝撃波では、一部の荷電粒子は衝撃波を横断して自由に動き回ることができる。この特徴を利用すれば、上流で観測される衝撃波からの反射粒子の特性から、衝撃波面の動的振る舞いの情報をリモートに引き出せる可能性がある。本研究では、リフォーメーションの観測的実証を念頭に、高精度の数値実験を行ってリフォーメーションの物理を詳細に理解し、特に衝撃波上流においてリモートにリフォーメーションの特徴を捉えるための基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

テスト粒子計算とフル粒子計算を併用した。

テスト粒子計算では、リフォーメーションのさまざまなフェーズに対応した衝撃波の電磁場構造をモデル化して与え、衝撃波近傍でのテスト粒子の振る舞いを調べて上流の分布関数を測定する。ただし、プラズマ分布関数の変化による電磁場構造へのフィードバックは考慮しない。

フル粒子計算では、プラズマの第一原理シミュレーションと呼ばれる1次元および2次元フル粒子コードを用いて自己無撞着に衝撃波を再現する。衝撃波遷移層の多スケール構造を明らかにし、これと相関する上流のプラズマ分布関数の特徴を議論する。さらに、上流において仮想人工衛星が観測する各種物理量の時系列データについてその特徴を精査し、リフォーメーションが上流でどのように観測されるかを議論する。

4. 研究成果

リフォーメーションでは、フット、ランプ、オーバーシュートと呼ばれる遷移層の各構造の振幅や空間スケールが周期的に変化する(図1)。ここではまず、テスト粒子計算によって、衝撃波で反射されたプラズマの分布関数が、リフォーメーションに

よってどのような時空間変化を示すかについて調べた。

リフォーメーションの異なるフェーズにおける衝撃波の電磁場構造を定常的なものとして与えたケースでは、電子の振る舞いは概ね断熱的であった。磁気ミラー効果による電子の反射率は、磁場とポテンシャルの最大振幅およびその空間形状によって大きく変わり、上流で観測される反射電子のロスコーン分布の形状の違いとして現れることが分かった。遷移層に微視的スケール波動を加えると、非断熱性のため反射電子分布のロスコーンが不鮮明になった(図1)。イオンについては、ラーモア半径がランプの空間スケールよりも大きいから、非断熱性の効果が顕著になる。この場合、ある粒子が反射されるかどうかは衝撃波入射時のジャイロ位相に大きく影響される。結果として上流の位相空間に筋構造が現れ、ジャイロ位相バンチングとして観測される。

衝撃波構造を時間的に変化させ、リフォーメーションを模擬した計算では、上流での反射電子およびイオン密度流束の周期的変化が見られた。変化の振幅は衝撃波からの距離に近いほど大きく、周期はリフォーメーションのそれと一致する。電子については、磁場のオーバーシュートが崩壊するタイミングで多量の反射電子が生成される、いわゆる反射電子バーストが観測されたのに加え、ロスコーン角よりも小さなピッチ

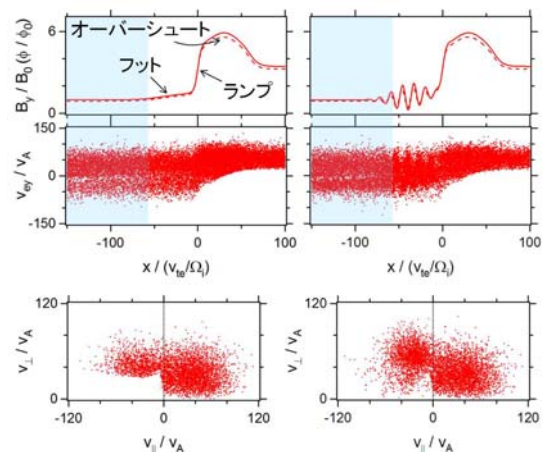


図1. テスト粒子計算によって再現された反射電子の振る舞い。上から、磁場(実線)およびポテンシャル(破線)波形、電子の v_y - x 位相空間分布、上流電子の速度空間分布を表す。右はフットに電子スケール波動を加えた場合。

角を持つ反射ビームが周期的に生成されることが分かった。

テスト粒子計算に続いてフル粒子計算を行った。1次元計算によって衝撃波リフォーメーションを再現し、衝撃波構造と上流におけるプラズマ分布関数の相関について議論した。リフォーメーションでは、磁場のオーバーシュートが卓越する位相と、それが

消失して上流側にフットが発達する位相が交互に現れる (図2左)。前者の位相では、‘磁場の壁’によって多くの入射電子がミラー反射され、オーバーシュートが消失するタイミングで強い磁場に補足されていたさらに多くの電子が一気に解放されて、それらが磁力線に沿って上流に背走する反射電子バーストが見られた。詳細な解析により、電子の反射過程には非定常な衝撃波面における非共平面磁場が重要な役割を果たしていることが分かった。また、反射電子の中に、位相空間の局所的な高密度塊が間欠的に見られた (例えば図2右の上から2つ目のパネルの矢印)。これらはフット領域で励起された斜めホイッスラー波に捕捉された電子が波束とともに放出されたもので、遷移層 (フット) での波動励起を反映するものである。さらに、リフォーメーションに伴って形成されたイオンホールに一部の電子が捕捉され、ホールとともに下流に伝播していく過程で衝撃波の動的電場によって加速され、下流で間欠的に生成される高エネルギー成分となることが分かった。リフォーメーションは2次元計算でも確認されたが、リップル構造の影響で、衝撃波面に沿う方向の位置によってその位相が異なる。遷移層における微視的不安定性の詳細な解析により、イオン電子質量比が小さい (100 以下) と、遷移層で電子サイクロトンドリフト不安定性 (ECDI) が励起され、質量比が大きい (256 以上) と、変形2流体不安定性 (MTSI) が支配的に励起されることが分かった。後者は衝撃波面方向のリップル構造と結合している可能性がある。

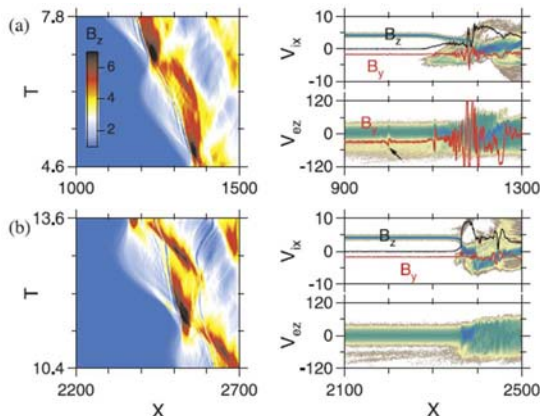


図2. フル粒子計算によって再現された非定常衝撃波と反射電子バースト。上から、衝撃波角 $= 81^\circ$ および 84° の場合。左は、リフォーメーションのおよそ1周期にわたる磁場強度の時空間発展を表す。右はある時刻のスナップショットで、カラースケールはイオン (上) および電子 (下) の位相空間密度を、黒線と赤線はそれぞれ磁場波形の B_z と B_y 成分を表す。

反射電子バーストに注目して、シミュレーション空間に仮想衛星を飛ばして衝撃波上流側で観測した際の時系列データの特徴を調べた。反射電子の沿磁力線方向の平均速度

や電子の最高エネルギーの時系列は、リフォーメーションの周期性をよく反映する (図3の下2つのパネル)。一方で、密度や沿磁力線方向の流束、全エネルギーの時系列には、より細かい変動が見られた (図3の上3つのパネル)。これらの変動は、遷移層での波動粒子相互作用を通じて形成された高密度電子塊を仮想衛星が捉えたことに起因することが分かった。

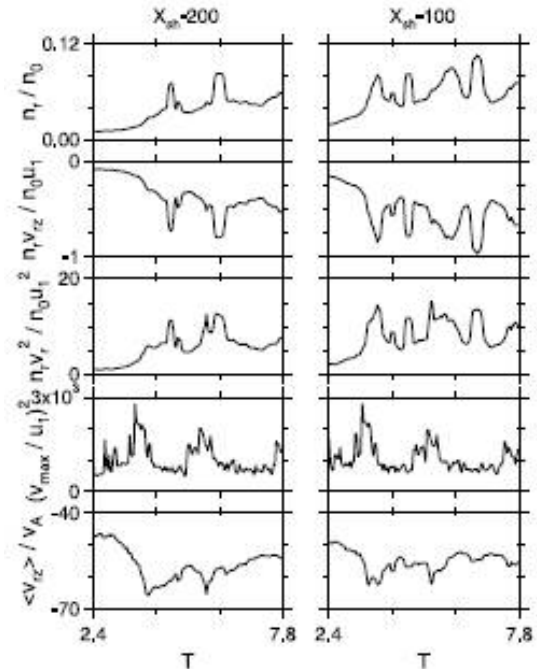


図3. 上流の仮想衛星が捉えた時系列データ。左右の違いは衝撃波からの距離 (右が衝撃波に近い)。上から、反射電子の密度、沿磁力線方向の流束、全エネルギー、最高エネルギー、沿磁力線方向の平均速度を表す。

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 T. Terasawa, S. Matsukiyo, Cyclotron Resonant Interactions in Cosmic Particle Accelerators, Space Sci. Rev., 査読有, vol.173, issue 1-4, pp.623-640, 2012
- ② S. Matsukiyo, M. Scholer, Dynamics of energetic electrons in nonstationary quasi-perpendicular shocks, J. Geophys. Res., 査読有, vol. 117, issue A11, A11105, 2012
- ③ T. Umeda, S. Matsukiyo, T. Amano, Y. Miyoshi, A numerical electromagnetic linear dispersion relation for Maxwellian ring-beam velocity distributions, Phys. Plasmas, 査読有, vol.19, issue 7, 072107, 2012

- ④ T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, Microinstabilities at perpendicular collisionless shocks: A comparison of full particle simulations with different ion to electron mass ratio, Phys. Plasmas, 査読有, vol. 19, issue 4, 042109, 2012
- ⑤ T. Umeda, Y. Kidani, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, Modified two-stream instability at perpendicular collisionless shocks: Full particle simulations, J. Geophys. Res., vol. 117, issue A3, A03206, 2012
- ⑥ S. Matsukiyo, Y. Ohira, R. Yamazaki, T. Umeda, Relativistic electron shock drift acceleration in low Mach number galaxy cluster shocks, Astrophys., J., 査読有, vol. 742, issue 1, 47, 2011
- ⑦ S. Matsukiyo, M. Scholer, Microstructure of the heliospheric termination shock: Full particle electrodynamic simulations, J. Geophys. Res., 査読有, vol. 116, issue A8, A08106, 2011
- ⑧ H. Comisel, M. Scholer, J. Soucek, S. Matsukiyo, Non-stationarity of the quasi-perpendicular bow shock: comparison between Cluster observations and simulations, Ann. Geophys., 査読有, vol. 29, issue 2, pp.263-274, 2011
- ⑨ T. Umeda, Y. Kidani, M. Yamao, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, On the reformation at quasi- and exactly perpendicular shocks: Full particle-in-cell simulations, J. Geophys. Res., 査読有, vol. 115, issue A10, A10250, 2010
- [学会発表] (計 39 件)
- ① 松清修一, Manfred Scholer, 太陽圏終端衝撃波の PIC シミュレーション, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013. 03. 29, 東広島市
- ② 中野谷賢, 松清修一, 羽田亨, 無衝突衝撃波における注入問題, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013. 03. 29, 東広島市
- ③ 蔵満康浩, 坂和洋一, 森田太智, 森高外征雄, 佐野孝好, 高部英明, 富田健太郎, 内野喜一郎, 松清修一, 水田晃, 大西直文, 高マッハ数無衝突衝撃波の実験的研究, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013. 03. 29, 東広島市
- ④ 松清修一, 太陽圏終端衝撃波における粒子加速, STE シミュレーション研究会/STP シミュレーション・モデリング技法勉強会, 2013. 03. 21, 名古屋市
- ⑤ 松清修一, Manfred Scholer, 無衝突プラズマが支配する太陽地球系の物理, 第 28 回九州山口プラズマ研究会, 2012. 11. 10, 由布市
- ⑥ 松清修一, 非定常衝撃波における反射電子バースト, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2012. 10. 21, 札幌市
- ⑦ 木下雄策, 松清修一, 羽田亨, 非定常地球磁気圏衝撃波の同時多点観測, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2012. 10. 22, 札幌市
- ⑧ 安倍元彦, 羽田亨, 松清修一, 変成衝撃波による衝撃波統計加速のテスト粒子シミュレーション, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2012. 10. 22, 札幌市
- ⑨ 松清修一, 太陽圏終端衝撃波の PIC 計算: パラメータ調査, 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2012. 10. 06, 八王子市
- ⑩ S. Matsukiyo, M. Scholer, Microstructure of the Termination Shock: Full PIC Simulation, AOGS-AGU(WPGM) Joint Assembly, 2012. 08. 16, Singapore
- ⑪ 梅田隆行, 木谷佳隆, 松清修一, 低マッハ数垂直衝撃波の再形成, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012. 05. 22, 千葉市
- ⑫ 松清修一, Manfred Scholer, 終端衝撃波の構造: パラメータ調査, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012. 05. 20, 千葉市
- ⑬ 松清修一, 赤水透, 羽田亨, 多イオン種プラズマ中の高位相速度波動の励起と粒子加速, 日本天文学会 2012 春季年会, 2012. 03. 19, 京都市
- ⑭ 松清修一, 多イオン種プラズマ中の SPA 波動の励起, 第 199 回生存圏シンポジウム「SGEPSS 波動分科会」～波動観測データ解析と将来の波動観測技術～, 2012. 03. 09, 宇治市
- ⑮ 松清修一, 多イオン種プラズマ中の Super Alfvénic 波動の励起と粒子加速, 粒子加速に関する小研究会, 2012. 03. 02, 柏市
- ⑯ 松清修一, 太陽圏終端衝撃波の構造, 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2011. 12. 16, 豊中市
- ⑰ 松清修一, Manfred Scholer, 太陽圏終端衝撃波のフル粒子シミュレーション, Plasma Conference 2011, 2011. 11. 22, 金沢市
- ⑱ 松清修一, 多イオン種プラズマ中の非 MHD 波動励起と粒子加速, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011. 11. 03, 神戸市
- ⑲ 岩本一慶, 松清修一, 羽田亨, 重イオンを含むプラズマ中の高位相速度非 MHD 波動を介した高エネルギー粒子加速, 第

- 130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011.11.05, 神戸市
- ⑳ 赤水透, 松清修一, 羽田亨, 太陽フレアに伴う高位相速度非 MHD 波動の非線形励起, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011.11.04, 神戸市
- ㉑ 兒玉真一郎, 松清修一, 羽田亨, 衝撃波ドリフト加速に伴う電子注入過程, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011.11.04, 神戸市
- ㉒ 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 simulation, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011.11.04, 神戸市
- ㉓ S. Matsukiyo, M. Scholer, Full Particle Simulation on Microstructure of Heliospheric Termination Shock, 2011 International Space Plasma Symposium (ISPS2011), 2011.08.15, Taiwan
- ㉔ S. Matsukiyo, M. Scholer, Ion dynamics and microstructure of the heliospheric termination shock, Asia Oceania Geosciences Society 2011 (AOGS2011) 8th Annual Meeting, 2011.08.08, Taiwan
- ㉕ S. Matsukiyo, Full Particle-In-Cell Simulation on Collisionless Shocks: Electron and Ion Dynamics in the Transition Region, The 10th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-10), 2011.07.27, Canada
- ㉖ Y. Kidani, T. Umeda, S. Matsukiyo, R. Yamazaki, On the reformation at perpendicular shocks: full particle-in-cell simulations, The 10th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-10), 2011.07.26, Canada
- ㉗ 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, 2011.05.25, 千葉市
- ㉘ 松清修一, Manfred Scholer, 太陽圏終端衝撃波の構造, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.05.27, 千葉市
- ㉙ 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, 2011.05.25, 千葉市
- ㊀ 松清修一, 大平豊, 山崎了, 梅田隆行, 低マッハ数衝撃波における相対論的衝撃波ドリフト加速, 平成 22 年度電波科学計算機実験シンポジウム, 2011.03.07, 宇治市
- ㊁ 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・地球惑星圏学会講演会, 2010.11.01, 那覇市
- ㊂ 豊増良太, 松清修一, 羽田亨, 反射イオンを用いた非定常衝撃波のリモートセンシング, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2010.11.01, 那覇市
- ㊃ 松清修一, 非定常準垂直衝撃波における非熱的電子の振る舞い, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2010.10.31, 那覇市
- ㊄ 松清修一, 準垂直無衝突衝撃波における電子加速: 衝撃波ドリフト加速再考, HEAP2010 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2010.10.14, つくば市
- ㊅ S. Matsukiyo, M. Scholer, Kinetics of high energy electrons in nonstationary quasiperpendicular shocks, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010.09.24, 富山市
- ㊆ S. Matsukiyo, Mach number dependence of electron heating at high Mach number interplanetary shocks in the inner heliosphere, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010.07.21, Germany
- ㊇ S. Matsukiyo, M. Scholer, Nonthermal electrons produced by supercritical quasi-perpendicular shocks, 2010 International Space Plasma Symposium, 2010.06.28, Taiwan
- ㊈ 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, 2010.05.23, 千葉市
- ㊉ 平川貴之, 松清修一, 羽田亨, 反射電子を利用した衝撃波の動的振舞いのリモートセンシング, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010.05.26, 千葉市

[その他]

ホームページ

<http://www.esst.kyushu-u.ac.jp/~space/matsukiyo/>

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: 00380709

(2) 研究分担者

()

(3) 連携研究者

()