

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740304
 研究課題名（和文） 高マッハ数無衝突衝撃波における散逸機構としての微視的不安定性
 研究課題名（英文） Microinstabilities as dissipation mechanisms of high Mach number 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）：

無衝突衝撃波における散逸機構の変遷に、遷移層での微視的不安定性が大きな役割を果たしていることを明らかにした。遷移層でのイオンの挙動は、電子スケールの不安定波動による影響を少なからず受ける。その結果、マッハ数が10程度以下の場合、衝撃波再形成過程の時間・空間スケールが顕著に大きくなることが分かった。また、電子加熱効率のマッハ数依存性が、マッハ数～数十を臨界点として大きく変化することを見出した。

研究成果の概要（英文）：

It is revealed that dissipation processes in a transition region of a collisionless shock are deeply related with microinstabilities generated there. The resultant micro-scale waves give strong influence on local ion dynamics leading to remarkable modification of spatio-temporal scales of a shock reformation process. Furthermore, it is shown that Mach number dependence of electron heating rate drastically changes at the Mach number of a few tens.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	570,000	3,470,000

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、無衝突衝撃波、微視的不安定性、異常散逸

1. 研究開始当初の背景

高マッハ数無衝突衝撃波の散逸過程において、プラズマの微視的不安定性が何らかの形で重要な役割を果たしている可能性があることは従来から指摘されていたものの、そ

の具体的描像はあまり理解されていなかった。地球磁気圏衝撃波の衛星観測では、理論的予測に反して電子加熱効率が低い（予想以上に不安定性の影響が小さい）といった問題がある一方で、超新星残骸衝撃波の観測から

は積極的な電子加熱・加速を示唆するデータが得られていた。当時の数値実験研究では、後者を支持する結果が得られていただけでなく、十分大きなマッハ数において電子スケールの不安定波動が衝撃波再形成過程をも抑制する（不安定性の影響が甚大）といった報告が行われていた。これらの違いを理解するためには、マッハ数によってプラズマと不安定波動の間の相互作用が定性的・定量的にどのように変化するかを詳しく調べる必要があると考えた。奇しくも次期水星探査計画（BepiColombo 計画）が立ち上がっており、水星軌道近傍を通過する幅広い（1 から数 10 にわたる）マッハ数の惑星間空間衝撃波の観測が期待される中、これに先駆けて高マッハ数衝撃波の散逸過程における微視的不安定性の役割について、理論的枠組みの構築が急務であった。

2. 研究の目的

遷移層における微視的不安定性が、高マッハ数衝撃波の散逸過程に与える影響を詳細に理解することを目的とする。具体的には、電子加熱とイオン加熱それぞれについて、以下の各点を明らかにする。

<電子加熱> 加熱効率のパラメータ依存性を詳細に調べ、観測事実（地球磁気圏衝撃波では加熱効率が低く、超新星残骸衝撃波などの超高マッハ数域では高い）との整合性を議論する。

<イオン加熱> 電子スケール不安定性がイオンの挙動に与える影響を議論する。イオンの挙動は比較的マクロな衝撃波再形成過程と密接に関係しているため、不安定性がこれに大きな影響を与えると、衝撃波の主要散逸機構が変わる可能性がある。主要散逸機構の変遷が起こる臨界マッハ数の存在可能性を検討する。

3. 研究の方法

プラズマの第一原理に則したフル粒子シミュレーションと拡張した準線形解析を用いた。

フル粒子シミュレーションでは、多数の超粒子（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同時に解くことで、電磁場とプラズマ粒子の挙動を自己無撞着に解き進める。計算領域の左側の境界から磁化プラズマを継続的に入射し、右側の境界に反射壁を置けば、反射したプラズマと入射プラズマの相互作用で衝撃波下流の圧縮されたプラズマが生成される。同時に、入射プラズマとの境界に衝撃波が形成され、時間とともに上流側（左側）に伝搬する（図 1）。上の方法を用いて、さまざまな衝撃波の長時間発展を 1 次元計算で再現し、遷移層での微視的不安定性が、電子やイオンの加熱に与え

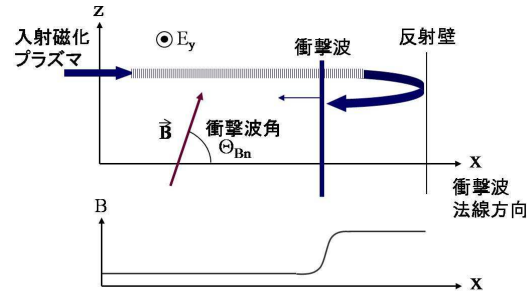


図1. 反射壁法を用いた衝撃波の数値実験

る影響、さらには衝撃波再形成過程に与える影響を議論した。必要に応じて、遷移層の物理過程を詳細に調べるため、その一部のみを拡大して周期境界条件を仮定した 2 次元計算を行った。

シミュレーション結果を踏まえ、遷移層における電子加熱効率のパラメータ依存性をより詳細に評価するため、拡張した準線形解析を用いた。分布関数の時間発展を記述するブラソフ方程式において、波動-粒子相互作用の効果を最低次の非線形項として考慮したものを準線形方程式というが、この方程式の 2 次の速度モーメントをとると運動エネルギー（温度）の時間発展方程式が得られる。これを数値的に解いて、不安定性による電子温度の飽和レベルを議論した。

4. 研究成果

1 次元フル粒子シミュレーションで準垂直衝撃波の長時間発展を再現し、遷移層での不安定波動強度と衝撃波再形成過程の時間・空間スケール（ τ , L ）の相関を調べた。

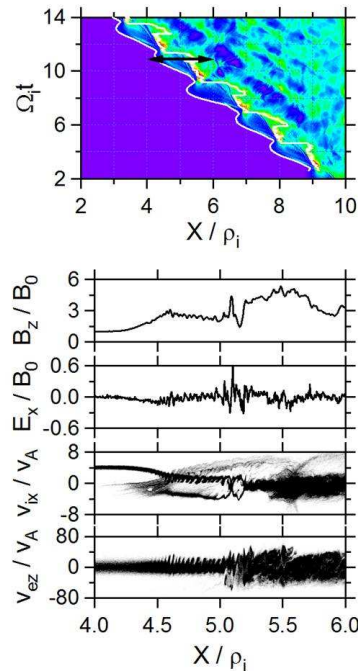


図2. 1次元計算によって再現された衝撃波の磁場強度の時空間発展（最上段）と、電磁場および位相空間のスナップショット（位置と時刻は最上段に矢印で示した）。

図2はマッハ数4 ($M_A = 4$)、衝撃波角84度 ($\Theta_{Bn} = 84$: 図1参照)の場合の磁場強度の時空間発展(最上段)と、最上段に矢印で示した領域の電磁場構造および位相空間のスナップショットである。磁場強度が局所的に大きいオーバーシュートが準周期的に再形成される様子が示されている(衝撃波再形成)。スナップショットには、遷移層で励起された変形2流体不安定性(MTSI)による波状構造が見られる。遷移層の一部を模擬して行った2次元周期境界計算でも、広いパラメータ域でMTSIが支配的となることを確認した。最上段の白線で囲まれた領域をフット領域と定義し、そこでの波動エネルギーの平均値(δE^2)、再形成周期(τ)、フットの平均的サイズ(L)とその分散(ΔL)、および平均磁場強度(B_{ave})を衝撃波角の関数として図

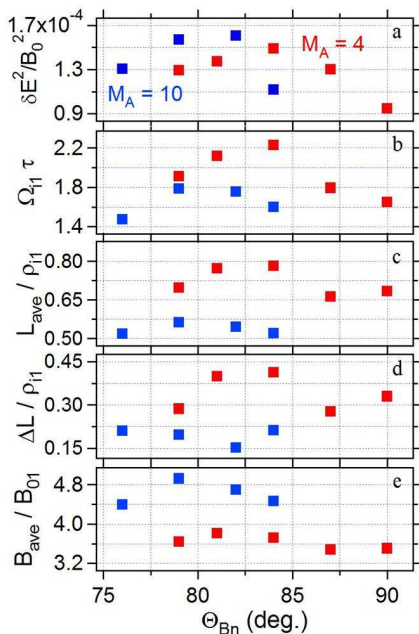


図3. 微視的不安定性と衝撃波再形成における各物理量の衝撃波角依存性

3に示した。上3つのパネルはどれもよく似た上に凸の関数であり、不安定波動のエネルギーが大きいほど τ や L が大きくなるのが分かる。ただし、 M_A が大きくなると、イオンの反射率が上がって B_{ave} が上昇するため、 τ や L は総じて減少する。しかしながら、 $M_A = 20$ までは依然として衝撃波再形成が起こることを確認した。 τ や L の変化率(もしくは ΔL)も高マッハ数では小さくなっている。このことは、波動がイオンの挙動に与える影響が、高マッハ数では相対的に小さくなることを意味するが、これは、 M_A (すなわち系の自由エネルギー)を大きくしても波動強度がそれほど変わらないという、MTSIの特徴(後述)のためである。

一方で、上の1次元計算ではMTSIによる電子加熱が見られた。加熱機構とその効率の詳細を調べるため、拡張した準線形解析を行

った。準線形方程式のモーメントをとって得られる温度の時間発展方程式と電磁場エネルギーの時間発展方程式、系のエネルギー保存則からなる閉じた方程式系を数値的に解き、電子温度の飽和レベルを議論した。ここでは少数自由度のモデル方程式を解くので、通常フル粒子シミュレーションで科されるようなパラメータの制限が必要ないという利点がある。計算の結果、加熱後の電子温度はマッハ数にあまり依存しないことが明らかになった(図4)。(初期のプラズマベータ

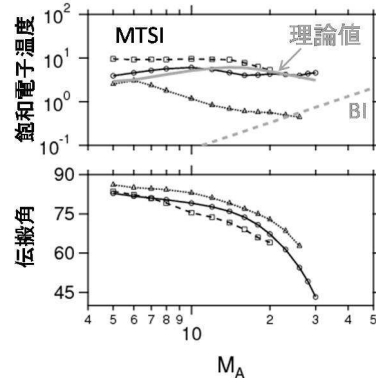


図4. MTSIによる飽和電子温度と波動の伝搬角に対する拡張した準線形解析。グレー破線は捕捉理論から見積もったBIによる飽和電子温度。

値(プラズマ圧と磁気圧の比)や電子プラズマ/サイクロトロン周波数比にもほとんど依存しない。)加熱の主因は、波動の電場成分のうち、磁力線に沿う成分を介したランダウ型の共鳴相互作用であり、電子ランダウ減衰により電場が十分小さくなったところで飽和状態に至る。飽和状態が満たすべき条件を定式化することに成功し、MTSIではマッハ数と伝搬角の関係から、電子温度の飽和レベルがほぼ一定となることを示した。結果を1次元フル粒子シミュレーションと比較し良好一致をみた(図5の点A~C)。

MTSIは $M_A > 30 \sim 40$ となると励起されないことが知られており、その場合はBuneman不安定性(BI)がこれに取って代わるといわれている。BIによる電子加熱効率を見積もるため、これが起こる条件(人為的

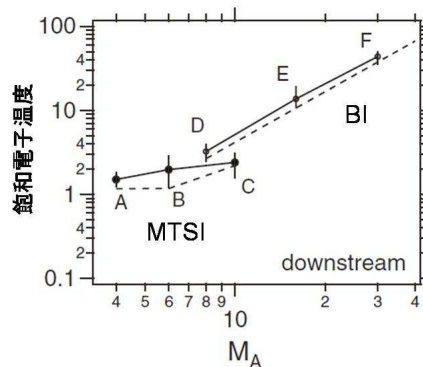


図5. シミュレーションによる衝撃波下流電子温度の測定。破線は理論値。

にイオン-電子間質量比を小さく設定)で1次元フル粒子シミュレーションを行い、下流の電子温度を測定した結果が図5の点D~Fである。MTSIと異なり、 MA^2 に比例して電子温度が上昇する。大振幅静電場による捕捉理論を用いてこれをよく説明できる(D~Fの下にひいた破線)ので、より現実的なパラメータにあてはめて前述のMTSIによる飽和レベルと比較した(図4グレー破線)。両者の交点は、条件にもよるがマッハ数にしておおむね数10(20~50)の位置に現れ、この点を境に衝撃波における電子加熱過程が定性的・定量的に大きく変化することを見出した。これを臨界マッハ数とみなせば、水星の近日点付近(~0.3AU)を通過する惑星間空間衝撃波の推定マッハ数が最大で40程度であることから、次期水星探査において加熱過程の変遷を直接観測できる可能性がある。

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7件)

- ① S. Matsukiyo, Mach Number Dependence of Electron Heating in High Mach Number Quasiperpendicular Shocks, *Phys. Plasmas*, 査読有, vol.17, issue 4, pp.042901, 2010
- ② 松清修一、プラズマ粒子シミュレーションによる非定常衝撃波に関する研究、平成21年度JAXAスーパーコンピュータシステム利用成果報告書、査読無、in press
- ③ 松清修一、平川貴之、羽田亨、梅田隆行、衝撃波上流における反射電子の振る舞い、平成21年度STEシミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会合同研究集会プロシーディング、査読無、pp. 49-52、2010
- ④ 梅田隆行、山尾雅博、木谷佳隆、齊籐慎司、山崎了、松清修一、大平豊、杉山徹、衝撃波静止系コードによるスケール間結合の研究、21年度STEシミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会合同研究集会プロシーディング、査読無、pp. 53-56、2010
- ⑤ 松清修一、種々の不安定性に伴う高マッハ数衝撃波における電子加熱、平成20年度宇宙科学情報解析センタースーパーコンピュータ共同利用研究利用成果報告、査読無、pp. 30-31、2009
- ⑥ 松清修一、高マッハ数衝撃波近傍における荷電粒子の加速・加熱に関する数値実験、平成19年度JAXAスーパーコンピュータシステム利用成果報告書、査読無、pp. 171-172、2008

[学会発表] (計26件)

- ① S. Matsukiyo, Mach number dependence of electron heating in supercritical quasi-perpendicular shocks, *Solar Energetic Particles: Origin and Environmental Impacts*, 2010/01/12, Kyoto, Japan
- ② 松清修一、衝撃波遷移層の微視的不安定性にもなう電子加熱効率のマッハ数依存性、高エネルギー宇宙物理学研究会、2009/11/28、廿日市市
- ③ S. Matsukiyo, Electron Heating through microinstabilities in High Mach Number Quasi-Perpendicular Shocks, 5th Korean Astrophysics Workshop on Shock Waves, Turbulence, and Particle Acceleration, 2009/11/19, Pohang, Korea
- ④ 梅田隆行、山尾雅博、木谷佳隆、齊籐慎司、山崎了、松清修一、大平豊、杉山徹、衝撃波静止系コードによるスケール間結合の研究、平成21年度STEシミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会合同研究集会、2009/10/29、仙台市
- ⑤ 松清修一、平川貴之、羽田亨、梅田隆行、衝撃波上流における反射電子の振る舞い、平成21年度STEシミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会合同研究集会、2009/10/29、仙台市
- ⑥ 松清修一、衝撃波における電子加熱のマッハ数依存性、第126回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2009/09/30、金沢市
- ⑦ 松清修一、高マッハ数衝撃波における電子加熱効率のマッハ数依存性、NICT計算機シミュレーション研究会、2009/08/04、福岡市
- ⑧ S. Matsukiyo, M. Scholer, Efficiency of Electron Heating in High Mach Number Quasi-Perpendicular Shocks, *The 9th International School for Space Simulations*, 2009/07/06, France
- ⑨ 松清修一、衝撃波再形成過程におけるスケール間結合、日本地区惑星科学連合2009年大会、2009/05/21、千葉市
- ⑩ S. Matsukiyo, M. Scholer, Electron heating through microinstabilities in high Mach number quasi-perpendicular shocks, 8th Annual International Astrophysics Conference, 2009/05/06, Hawaii, USA
- ⑪ 松清修一、M. Scholer、高マッハ数衝撃波遷移層における電子加熱、日本物理学会第64回年次大会、2009/03/29、東京都
- ⑫ 松清修一、垂直衝撃波における電子の振る舞い、第121回生存圏シンポジウ

- ム・RISH 電波科学計算機実験 (KDK) シンポジウム、2009/03/16、宇治市
- ⑬ S. Matsukiyo, M. Scholer, Microphysics on shock reformation processes, 2nd ISSI workshop on Shock Acceleration Using Strong Turbulence Methods, 2009/03/05, Bern, Switzerland
- ⑭ S. Matsukiyo, T. Hada, Production of backstreaming ions in oblique shocks: 1D PIC simulation, 2nd ISSI workshop on Shock Acceleration Using Strong Turbulence Methods, 2009/03/03, Bern, Switzerland
- ⑮ 松清修一、衝撃波再形成過程再考：遷移層での波動放射の役割、第 115 回生存圏シンポジウム/SGEPSS 波動分科会、2009/02/15、高知県
- ⑯ 松清修一、M. Schoelr、準垂直衝撃波再形成過程の詳細と微視的不安定性、平成 20 年度 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 (STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会)、2009/01/31、名古屋市
- ⑰ S. Matsukiyo, M. Scholer, Quasilinear analysis on electron heating in a foot of a high Mach number shock, KINETIC MODELING OF ASTROPHYSICAL PLASMAS, 2008/10/09, Cracow, Poland
- ⑱ 松清修一、M. Scholer、高マッハ数衝撃波における電子加熱の準線形解析、第 124 回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2008/10/12、仙台市
- ⑲ 松清修一、大規模シミュレーションによる宇宙線衝撃波加速研究の展望、STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、2008/08/06、横浜市
- ⑳ 松清修一、M. Scholer、衝撃波遷移層における電子加熱効率、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008/05/26、千葉市
- ㉑ M. Scholer, H. Comisel, S. Matsukiyo, Instabilities in the Foot Region of Quasi-Perpendicular Shocks: Full Particle Electromagnetic Simulations, AGU Fall Meeting 2007, 2007/12/13, SanFrancisco, USA
- ㉒ S. Matsukiyo, M. Scholer, Role of Modified Two-Stream Instability for Self-Reformation and Ion Acceleration in Quasi-Perpendicular Shocks, AGU Fall Meeting 2007, 2007/12/13, SanFrancisco, USA
- ㉓ 白野博敬、羽田亨、松清修一、Ring-beam instabilities driven by reflected electrons upstream of a quasi-perpendicular shock、地球電磁気・地球惑星圏学会第 122 回講演会、

2008/09/30、名古屋市

- ㉔ S. Matsukiyo, M. Scholer, PIC simulations of quasi-perpendicular shocks: Roles of modified two-stream instability in particle heating, acceleration, and self-reformation processes, AOGS (Asia Oceania Geoscience Society) meeting 2007, 2007/08/04, Bangkok, Thailand
- ㉕ 松清修一、変形 2 流体不安定性を伴う準垂直衝撃波の特徴、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007/05/21、千葉市
- ㉖ S. Matsukiyo, Roles of modified two-stream instability in supercritical shock waves, Japan-Korea Mini-Workshop 2007, 2007/04/04, Daejeon, Korea

[その他]

ホームページ

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

提案書

SCOPE 計画提案書第 2 章 (2-1 節) 執筆
平成 20 年 9 月 30 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松清 修一 (MATSUKIYO SHUICHI)

研究者番号 : 00380709