

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 5 月 23 日現在

機関番号： 13901
 研究種目： 基盤研究 (c)
 研究期間： 2009 年度 ～2011 年度
 課題番号： 21540510
 研究課題名 (和文) 無衝突衝撃波の構造形成と粒子加速

研究課題名 (英文) Structure formation and particle acceleration
 in collisionless shock waves

研究代表者

樋田美栄子 (Mieko Toida)
 名古屋大学・理学研究科・助教
 研究者番号: 00273219

研究成果の概要 (和文)： 空間 2 次元・速度 3 次元の相対論的電磁粒子シミュレーションを用いて、外部磁場に対して斜めに伝播する衝撃波の構造形成と粒子加速を調べた。斜め衝撃波は一部の電子を捕捉し超相対論的エネルギーに加速するが、捕捉粒子による不安定性とその非線形発展の結果、電子の解放と追加速が起こり得ることを見出した。また、イオンの多段加速とそれに伴う不安定性の効果を明らかにした。さらに、非線形磁気音波におけるイオン組成の効果について理論を構築し、その理論をシミュレーションで確かめた。

研究成果の概要 (英文)： Structure formation and particle acceleration in shock waves propagating obliquely to an external magnetic field have been studied with two-dimensional (two space coordinates and three velocities), relativistic, electromagnetic, particle simulations. It is found that as a result of the nonlinear evolution of instabilities driven by electrons trapped and energized in an oblique shock wave, some electrons can escape from the wave and can be further accelerated to much higher energies. Repeated acceleration of ions and associated instabilities are also investigated. In addition, a theory for the effects of ion composition on nonlinear magnetosonic waves is developed and is confirmed by numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000 円	330,000 円	1,430,000 円
2010 年度	1,000,000 円	300,000 円	1,300,000 円
2011 年度	900,000 円	270,000 円	1,170,000 円
総計	3,000,000 円	900,000 円	3,900,000 円

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

無衝突プラズマ中で如何にして衝撃波が形成されるかはプラズマ物理の重要な課題であり、理論ならびに計算機シミュレーションによる多くの研究が行われている。また、大出力レーザーを用いた実験室での衝撃波

の研究が、国内外のいくつかの研究機関で始められ、その進展に大きな期待が寄せられている。

無衝突衝撃波は、宇宙高エネルギー粒子生成の謎を解く鍵としても注目されている。宇宙では、太陽、超新星残骸、活動銀河などの多くの場所で高エネルギー粒子の生成を示

す観測結果が数多く報告されている。そして、それら高エネルギー粒子は、衝撃波によって加速されたものとみなされている。しかし、加速機構については、いくつかのモデルはあるものの根本的な解決には至っておらず、その根底にある無衝突衝撃波と粒子加速の問題をプラズマ物理に基づいて解明することが必要不可欠である。

無衝突衝撃波の伝播とそれに伴う様々な現象を理解するためには、粒子シミュレーションが強力な手段となる。そして、そのシミュレーションを用いた研究によって、外部磁場が存在するプラズマ中の衝撃波（磁気音波の衝撃波）は、波面付近に強い電磁場を形成し、その電磁場によって一部の粒子を短時間に高いエネルギーに加速できることが示された。加速機構は、粒子の種類（イオン、重イオン、電子、陽電子、高速粒子など）、外部磁場の強さ、衝撃波の速度や伝播方向によって異なり、様々なものがある。これらの粒子加速に関する従来の研究は、主に空間1次元を仮定していた。しかし近年、スーパーコンピュータの発展により、衝撃波の伝播と粒子加速について物理的意義のある多次元粒子シミュレーション研究が可能になり、空間1次元の理想化された系ではなく、それらでは取り扱えなかった非線形効果を含めた多次元系で、無衝突衝撃波と粒子加速を捉え直す研究が強く望まれていた。

本課題の研究代表者は、平成18-20年度に科研費基盤研究(C)「非線形磁気音波と粒子加速の多次元粒子シミュレーション」において、多次元の相対論的電磁粒子コードを開発し、非線形磁気音波の伝播と粒子加速についての研究を開始していた。

2. 研究の目的

上記の平成18-20年度の基盤研究(C)の成果を発展させ、無衝突衝撃波と粒子加速について大規模な多次元粒子シミュレーションを行う。衝撃波の構造形成とエネルギー輸送における多次元効果について新たな知見を得ることが、研究の目的である。

衝撃波による粒子加速の機構には様々なものがあるが、本研究課題では外部磁場に対して斜め方向に伝播する衝撃波による電子の捕捉と加速、熱的イオンの多段加速などについて研究を行う。それらの被加速粒子が引き起こす不安定性とその非線形発展が、衝撃波中の電磁場の形成と粒子の運動にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。また、宇宙も核融合のプラズマも多種類のイオンを含むが、それらのイオン組成が異なることに注目し、非線形磁気音波におけるイオン組成の効果について定量的な理論を構築する。

3. 研究の方法

多次元の相対論的電磁粒子シミュレーションを用いて研究する。大規模なシミュレーションとなるため、超並列型のスーパーコンピュータで実行する。また、物理機構を明らかにするため、理論・数値解析（非線形波動解析、不安定性の線形解析など）も並行して進める。

以下、シミュレーションの概要を記す。

(1) シミュレーションモデル

イオンと電子を共に粒子として扱う。それら粒子の相対論的運動方程式とMaxwell方程式を連立して解く。無衝突衝撃波においては電子も本質的な役割を果たすので、電子・イオンともにドリフト近似などは行わない。速度は3次元とするが、空間は2次元とする。

(2) 利用計算機

シミュレーションの実行には、核融合科学研究所と名古屋大学のスーパーコンピュータを利用する。いずれも共有・分散メモリ型の並列計算機であり、コードの並列化には、MPI、OpenMP、自動並列化などを用いる。

4. 研究成果

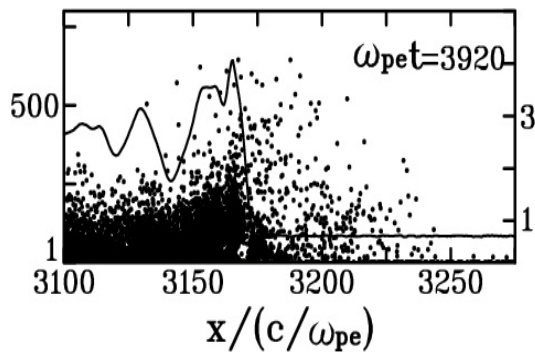
多次元電磁粒子シミュレーションを用いて、斜め衝撃波による電子の捕捉と加速、熱的イオンの多段加速を調べ、加速粒子による電磁場生成や不安定性の効果などを明らかにした。また、磁気音波におけるイオン組成と伝播角の効果を、線形・非線形理論とシミュレーションを用いて詳しく調べた。以下、各々の項目に分けて、成果の概要を記す。

① 外部磁場が強い場合、斜め衝撃波は一部の電子を捕捉し、超相対論的エネルギーに加速することができる。その捕捉電子が衝撃波中の電磁場に及ぼす効果を、相対論的電磁粒子シミュレーションを用いて調べた。空間が1次元の場合は、捕捉粒子自らが作る電磁場によって、捕捉はより安定化することを明らかにした[Toida and Shkii, Phys. Plasmas (2009)]。

さらに空間を2次元に拡張して、シミュレーションを行った。捕捉電子が引き起こすホイッスラー波不安定性とその非線形発展によって、衝撃波面方向に有限な波数を持つ電磁揺動が大振幅へと成長すること、そして、その電磁場揺動によって捕捉電子が高エネルギー

状態を保ったまま衝撃波から解放される場合があることを見出した。また、解放粒子の一部は、衝撃波によって追加速を受け、さらに高いエネルギーになり得ることが分かった [Shikii and Toida, Phys. Plasmas (2010)]。

下図は2次元粒子シミュレーションの結果である。1次元の場合は、高エネルギー電子は衝撃波の主パルス（先頭の一番振幅の大きいパルス）の内部にのみ存在するが、2次元の場合は、ローレンツ因子 γ が100を超えるような超相対論的電子が、衝撃波の上流から下流にわたる広い領域に分布している。これらの電子は、主パルスで捕捉・加速された後に、多次元電磁擾乱の効果によって解放されたものである。解放粒子の一部は、旋回運動によって衝撃波を出入りすることによって、さらに加速されている。



② 熱的イオンと斜め衝撃波との相互作用を粒子シミュレーションで調べ、衝撃波の伝播角が45度に近い場合は、熱的イオンの一部が複数回の加速を受けることを見出した。そして、加速イオンの最高エネルギーについての理論を作り、その理論がシミュレーション結果を説明することを確認した。さらに、2次元シミュレーションを用いて、加速イオンが引き起こす不安定性を調べ、ホイッスラー波不安定性が、衝撃波の電磁場の多次元構造や電子の運動に重要な影響を及ぼすことを示した [Toida and Gohira, Plasma and Fusion Res. (2010)]。

③ 宇宙や実験室のプラズマの多くは多種類のイオンを含むが、イオンの密度比や質量比は大きく異なる。それらのイオン組成の違いが斜め磁気音波の非線形発展に及ぼす影響を解析した。まず、2種イオンプラズマ中の低

周波モードの非線形の振る舞いはKdV方程式で記述されるが、それには適用限界があることを示し、振幅の上限値を波の伝播角とイオン組成の関数として導いた。そして、低周波モードの非線形パルスの振幅がその上限値を超えると、高周波モードの波が生成されることを、計算機シミュレーションによって示した [Toida and Kondo, Phys. Plasmas (2011)]。

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) Mieko Toida and Yuichi Kondo, "Parametric studies of nonlinear oblique magnetosonic waves in two-ion-species plasmas", Physics of Plasmas, Vol. 18, No.6 (2011) 062303 (13pages) 査読有, DOI:10.1063/1.3596381.
- 2) Yuichi Kondo and Mieko Toida: "Effects of Ion Composition on Oblique Magnetosonic waves", Plasma and Fusion Research, Vol. 6, (2011), 241026 査読有, DOI: 10.1585/pfr.6.241026.
- 3) Kenta Shikii and Mieko Toida: "Multi-dimensional Effects on Ultrarelativistic Electrons in an Oblique Shock Wave", Physics of Plasmas, Vol. 17, No.8 (2010) 082316 (7pages) 査読有, DOI:10.1063/1.3479830
- 4) Mieko Toida and Taku Gohira: "Repeated Acceleration of Thermal Ions by an Oblique Shock Wave and Associated Whistler Instabilities", Plasma and Fusion Research, Vol. 5 (2010) S2065 査読有. DOI: 10.1585/pfr.5.S2065
- 5) Kenta Shikii and Mieko Toida: "Detrapping Mechanism of Ultrarelativistic Electrons from an Oblique Shock Wave", Plasma and Fusion Research, Vol. 5 (2010) S2064 査読有. DOI: 10.1585/pfr.5.S2064
- 6) Kenta Shikii and Mieko Toida: "Formation of Parallel Electric Field by Trapped and Energetic Electrons in an Oblique Shock Wave", Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 9 (2010) pp398-403 査読有.
- 7) Mieko Toida and Kenta Shikii: "Effects

of Trapped Electrons on Electromagnetic Fields in an Oblique Shock Wave”, Physics of Plasmas, Vol. 16, No.11 (2009) 112305 (9pages) 査読有.
DOI:10.1063/1.3264736_

- 8) Mieko Toida, Hiroyuki Higashino and Yukiharu Ohsawa: “Parametric Studies of High- and Low-Frequency Magnetosonic Waves and Ion Acceleration in Two-Ion-Species Plasmas,” Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8 (2009) 826-830 査読有.
- 9) Mieko Toida, Ryohei Honma and Yukiharu Ohsawa: “Repeated Interactions of Thermal Ions with an Oblique Shock Wave,” Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8 (2009) 230-233 査読有.

[学会発表] (計 26 件)

- 1) 斜め衝撃波中の高エネルギー電子における電磁揺動の効果
樋田美栄子、城宝潤矢
日本物理学会 2012 年年次大会 関西学院大学 2012 年 3 月 26 日
- 2) 非線形磁気音波の急峻化と分散におけるイオン組成の効果
樋田美栄子、近藤憂一
日本天文学会春季大会、物理学会・天文学会・SGEPSS 合同プラズマ共催セッション、龍谷大学、2012 年 3 月 20 日
- 3) 磁気音波の非線形発展と KdV 方程式の適用限界
樋田美栄子、近藤憂一
STE シミュレーション研究会・プラズママルチスケールシミュレーションの現状と展望、名古屋大学太陽地球環境研究所、広島大学東千田キャンパス 2012 年 3 月 2 日
- 4) 非線形磁気音波のイオン組成と伝播角に対する依存性
樋田美栄子、近藤憂一
Plasma Conference 2011/ 日本物理学会 (領域 2) 2011 年秋季大会、石川県立音楽堂 2011 年 11 月 24 日
- 5) 斜め衝撃波からの捕捉電子の解放と外部磁場に対する依存性
城宝潤矢、樋田美栄子
Plasma Conference 2011/ 日本物理学会 (領域 2) 2011 年秋季大会、石川県立音楽堂 2011 年 11 月 24 日

- 6) Parametric studies of nonlinear oblique magnetosonic waves in two-ion-species plasmas
Mieko Toida, and Yuichi Kondo
53rd Annual Meeting of the APS
Division of Plasma Physics, Salt Lake City, Utah, USA, 14-18 November 2011. GP9-27.
- 7) 斜め磁気音波におけるイオン組成の効果
樋田美栄子、近藤憂一
プラズマシミュレーションシンポジウム 2011
核融合科学研究所
2011 年 9 月 13 日
- 8) 斜め磁気音波の非線形発展におけるイオン組成の効果
樋田美栄子、近藤憂一
プラズマ科学のフロンティア 2011 研究会、核融合科学研究所 2011 年 9 月 8 日
- 9) 衝撃波中の小パルスによる電子加速に対する多次元効果、
樋田美栄子、秋重竹宏
日本物理学会 2011 年年次大会 新潟大学 2011 年 3 月 26 日
- 10) Simulation Studies of
Multidimensional effects on electron acceleration in an oblique shock wave.
Mieko Toida and Kenta Shikii
20th International Toki Conference (ITC20), Toki, Japan, 10 Dec. 2010
- 11) Effect of ion composition on oblique magnetosonic waves
Yuichi Kondo and Mieko Toida
20th International Toki Conference (ITC20), Toki, Japan, 8 Dec. 2010
- 12) Multidimensional effects on electron acceleration by an oblique shock wave.
Mieko Toida, and Kenta Shikii
2010 JIFT Workshop on development of simulation science in plasma physics, Chicago, IL, USA, 12-13 November 2010.
- 13) Multidimensional effects on relativistic electrons in an oblique shock wave.
Mieko Toida, and Kenta Shikii
52nd Annual Meeting of the APS
Division of Plasma Physics
Chicago, IL, USA, 8-12 November 2010.
- 14) 無衝突衝撃波による粒子加速のシミュレーション研究
樋田美栄子

- 応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会主催、第6回プラズマ新領域研究会「PIC法の基礎と応用」、大阪府立大学中ノ島サテライト教室 2010年10月28日
- 15) 斜め磁気音波におけるイオン組成の効果
近藤憂一, 樋田美栄子
日本物理学会 2010年秋季大会 大阪府立大学 2010年9月24日
- 16) 斜め衝撃波中の高エネルギー電子による不安定性とその効果
樋田美栄子、式井建太
日本物理学会 2010年秋季大会 大阪府立大学 2010年9月24日
- 17) 大振幅磁気流体波の電磁場構造と粒子加速 II
樋田美栄子
第4回シミュレーション科学シンポジウム 核融合科学研究所、2010年9月14日
- 18) 斜め衝撃波による電子加速における多次元効果
樋田美栄子、式井建太
2010年日本地球惑星科学連合大会 千葉幕張メッセ国際会議場 2010年5月23日
- 19) 斜め衝撃波による熱的イオンの多段加速と被加速イオンによる不安定性
樋田美栄子, 後平拓
日本物理学会 2010年年次大会 岡山大学 2010年3月23日
- 20) Detrapping mechanism of ultrarelativistic electrons from an oblique shock wave
Kenta Shikii, and Mieko Toida
19th International Toki Conference (ITC19), Toki, Japan, Dec. 2009
- 21) Simulation studies of ion beam production by an oblique shock wave and associated instabilities
Mieko Toida, and Taku Gohira
19th International Toki Conference (ITC19), Toki, Japan, Dec. 2009
- 22) 斜め衝撃波中の捕捉電子による電磁場形成とその効果
樋田美栄子
STEシミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会
仙台市戦災復興記念館 2009年10月29日
- 23) Simulation studies of trapping and acceleration of electrons in an oblique shock wave
Kenta Shikii, and Mieko Toida,
APFA2009/APPTC2009, Aomori, Japan, 28 Oct. 2009, Japan
- 24) 斜め衝撃波による電子の捕捉と加速における多次元効果：シミュレーション
式井建太, 樋田美栄子
日本物理学会 2009年秋季大会 熊本大学 2009年9月27日
- 25) 斜め衝撃波による電子の捕捉と加速における多次元効果：理論
樋田美栄子、式井建太
日本物理学会 2009年秋季大会 熊本大学 2009年9月27日
- 26) 大振幅磁気流体波の電磁場構造と粒子加速
樋田美栄子
第3回シミュレーション科学シンポジウム 核融合科学研究所 2009年9月17日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
樋田美栄子 (TOIDA MIEKO)
名古屋大学・大学院理学研究科
研究者番号：00273219
- (4) 研究協力者
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生
式井建太、後平拓、近藤憂一、
秋重竹弘、城宝潤矢