

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540535

研究課題名(和文) 無衝突衝撃波中の電磁場による粒子加速と被加速粒子による不安定性の効果

研究課題名(英文) Particle acceleration by a collisionless shock wave and effects of instabilities driven by energetic particles

研究代表者

樋田 美栄子 (Mieko, Toida)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00273219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：無衝突衝撃波と粒子加速はプラズマ物理の重要な課題であると同時に、宇宙の高エネルギー現象との関連からも注目されている。本研究では、多次元電磁粒子シミュレーションを用いて、磁気音波衝撃波の構造形成と粒子加速、加速粒子による不安定性の効果調べた。斜め衝撃波は一部の電子の捕捉し加速するが、それらの電子が引き起こす不安定性によって、捕捉電子の解放と追加速が起こることを明らかにした。また、磁場中の2つのプラズマの相互作用による前進・後進衝撃波の形成過程を、変形二流体不安定性の効果に注目して調べた。さらに、多種のイオンと電子からなるプラズマ中の非線形磁気音波における有限ベータ効果について理論を構築した。

研究成果の概要(英文)：Collisionless shock waves and particle acceleration are important issues in plasma physics and are believed to play essential roles in high-energy phenomena in astrophysical plasmas. We studied structure formation and particle acceleration in magnetosonic shock waves and effects of instabilities driven by accelerated particles. An oblique shock wave can trap and accelerate electrons to ultrarelativistic energies. We showed that instabilities driven by these electrons can cause detrapping and subsequent acceleration of electrons. We also studied formation of forward and reverse shock waves in an external magnetic field with attention to effects of modified two-stream instabilities. In addition, we constructed a theory for finite beta effects on nonlinear magnetosonic waves in a plasma containing electrons and multiple species of ions.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：無衝突衝撃波 粒子加速 不安定性 粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

無衝突衝撃波は、プラズマ物理の重要な課題であり、1960年代から多くの理論研究が行われてきた。また、1980年代から現在に至るまで、無衝突衝撃波の形成と伝播、ならびに、それに伴う様々な非線形現象を統一的に理解することを目指して、粒子シミュレーション研究が盛んに行われている。さらに近年では、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。

一方、無衝突衝撃波は宇宙高エネルギー粒子生成においても重要な役割を果たすと考えられている。宇宙では、太陽、超新星残骸などの多くの場所で高エネルギー粒子の生成が観測されている。そして、フレアや超新星爆発等のプラズマの爆発によって衝撃波が作られ、その衝撃波によって粒子が加速されたとみなされている。加速機構については、フェルミ加速(乱流による散乱を介した加速機構)が標準モデルとされ、それに基づき様々な議論が行われているが、このモデル自身も多くの未解決問題を含んでいる。またこのモデルで、太陽フレアで観測されているような急激な粒子加速を説明することはできない。

外部磁場が存在するプラズマ中の無衝突衝撃波(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、理論と粒子シミュレーションによって明らかにされた。加速効率も極めて高く、太陽フレアでの急激な粒子加速を説明することも可能である。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、様々な機構がある(例えば、Ohsawa, Phys. Rep. (2014))。無衝突衝撃波のシミュレーションでは、電子とイオンがともに本質的役割を果たすため、電子・イオンとも近似のない運動方程式を解く必要がある。そのため、計算機に対する負荷が非常に大きく、長年、空間1次元を仮定したシミュレーションが行われてきた。しかし近年、スーパーコンピュータの発展により、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。

本研究課題の代表者は、本研究の開始以前に、多次元相対論的電磁粒子コードを開発し、無衝突衝撃波についてのシミュレーション研究に着手していた。そして、科学研究費・基盤研究(C)「無衝突衝撃波の構造形成と粒子加速」(平成21-23年度)では、1次元シミュレーションでは見られなかった粒子加速の新たな性質を、多次元電磁粒子コードを用いて発見していた。

2. 研究の目的

上記の平成21-23年度の基盤研究(C)の成果を進展させ、無衝突衝撃波の構造形成と粒子加速における空間多次元効果についての理解を深化させる。特に、高エネルギー粒子が引き起こす不安定性とその非線形発展が、衝撃波の構造や伝播、粒子の運動に及ぼす影響を明らかにする。

磁気音波衝撃波による粒子加速の機構には様々なものがあるが、本研究では、斜め衝撃波による捕捉電子の加速に注目する。平成21-23年度の基盤研究(C)で、空間2次元のシミュレーションで、補足電子の一部が解放される場合があること、解放された粒子は、その後、旋回運動に伴って衝撃波を出入りして、さらに高いエネルギーに加速され得ること等が示された。本研究では、加速粒子が引き起こす不安定性の非線形発展を詳しく調べて、電子の解放の機構を解明する。また、空間多次元の効果、衝撃波の伝播速度、磁場の強さや向き等に、どのように依存するかを明らかにする。

複数の磁気音波衝撃波の形成についての多次元粒子シミュレーション研究を開始する。従来の研究は、一つの衝撃波の波面付近の狭い領域で起こる現象に注目したものであったが、実際の爆発では、複数の大振幅波が励起され、それらが粒子加速に関与すると期待される。そこで、磁化プラズマ中の複数の無衝突衝撃波の形成と粒子加速についての研究を開始する。さらに、粒子加速の理解に必要な不可欠な、非線形磁気音波の理論を構築する。

3. 研究の方法

スーパーコンピュータで、多次元の相対論的電磁粒子シミュレーションを実行する。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。いずれも超並列型のスーパーコンピュータである。コードの並列化には、MPI、OpenMP、自動並列化などを用いる。

本研究課題の科研費で購入したワークステーションで、テスト的な小規模シミュレーションを行う。また、スーパーコンピュータ

による大規模シミュレーションで得られたデータの解析や、不安定性や非線形波動の数値解析等にも、このワークステーションを用いる。

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を調べ、捕捉粒子が引き起こす不安定性の効果を明らかにした。また、2つのプラズマの相互作用による前進・後進衝撃波の形成過程を、変形2流体不安定性の効果に注目して調べた。さらに、多種イオンプラズマ中の非線形磁気音波における有限ベータ効果についての理論を構築した。以下、各々の項目に分けて、成果の概要を記す。

- ① 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。また、空間1次元の相対論的電磁粒子シミュレーションでは、捕捉は非常に安定であるが、空間2次元のシミュレーションでは、1次元の場合とは違って捕捉粒子の解放と追加速が起こることが、平成23年度までに示されていた。本研究では、電子の運動における空間多次元の効果をもより詳しく調べるため、2次元電磁粒子シミュレーションに加えて、衝撃波面方向に平均化した電磁場の中でのテスト電子の軌道を計算した。そしてそれらの結果を比較することによって、衝撃波面に沿った方向に変化する電磁揺動（2次元電磁擾乱）が捕捉粒子の解放を引き起こすことを突き止めた [Toida and Joho, J. Phys. Soc. Jpn. (2012)]。また、捕捉粒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の結果、2次元電磁擾乱が大振幅になることも明らかにした。図1の上段はテスト電子の (x, γ) 分布を、下はシミュレーション電子の分布を表す。2次元電磁擾乱を感じていないテスト電子は、高エネルギー粒子が存在するのは

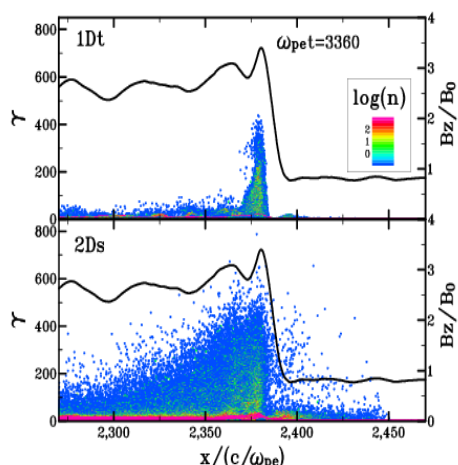


図1：斜め衝撃波中の電子の分布

主パルスの内部だけである。それに対し、2次元電磁擾乱を感じているシミュレーション電子は、上流から下流の広い領域に渡って、高エネルギー粒子が分布している。これらの電子は、主パルスでの捕捉・加速を受けた後、2次元電磁擾乱によって主パルスから解放されたものである。また、上流に解放された電子の一部は、旋回運動に伴って衝撃波を出入りすることにより、更に高いエネルギーへと加速される。

次に、シミュレーションを積み重ねて、斜め衝撃波による電子の加速における多次元効果について、パラメータ依存性を調べた。外部磁場が強くなると、捕捉粒子の開放と追加速が促進されることを示した [Toida and Joho, Plasma Fusion Res. (2013)]。また、解放される電子の割合や追加速の強さが、衝撃波の伝播速度や、外部磁場の向きなどに、どのように依存するかも明らかにした [Toida and Inagaki, Plasma Fusion Res. (2014)]。

- ② 外部磁場中での2つのプラズマが衝突すると、2つの磁気音波衝撃波が形成される。2次元の電磁粒子シミュレーションを用いて、それらの形成過程を変形2流体不安定性の効果に注目して調べた [Toida and Uragami, Phys. Plasmas (2013)]。図2は、2つのプラズマの相対速度と外部磁場が直角の場合のシミュレーション結果であり、1次元的に平均化（外部磁場の方向に平均化）した磁場の時間発展を示す。2つのプラズマの境界付近で磁場が徐々に強くなり、 $\Omega_{i0t} = 1$ (Ω_{i0} はイオンのサイクロトロン周波数)の時刻で2つのパルスが生成される。この分裂は、イオンの反射によるものである。生成された2つのパルスは、その後、前進・後進衝撃波へと発展する。また、磁場の圧縮と並行して変形2流体不安定性が発展し、それらが衝撃波の伝播と多次元構造に影響を与えることを明らかにした。さらに、衝撃波の形成時間や構造が、外部磁場の方向やプラズマの初速度等にどのように依存するかを調べた [Uragami and Toida, Plasma Fusion Res. (2014)]。

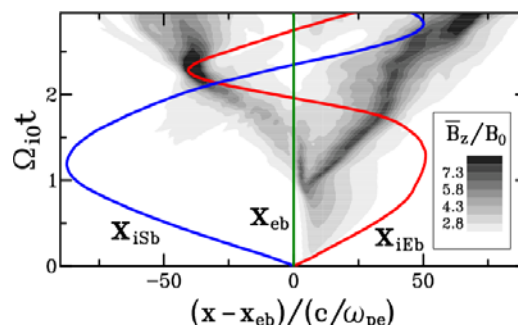
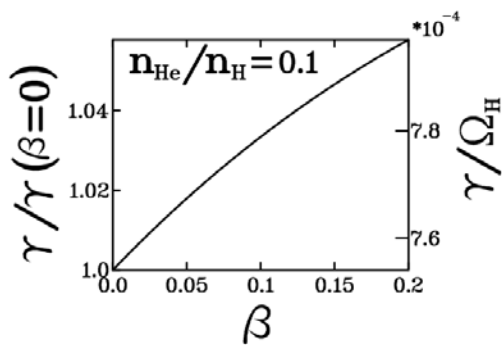


図2：磁場中の2つのプラズマの衝突による前進・後進衝撃波の形成

- ③ 2種類のイオンと電子からなるプラズマ中の磁気音波には、低周波と高周波の2つのモードが存在する。そして、それらの非線形の振る舞いは大きく異なる。例えば、低周波モードの孤立波は、大振幅になると高周波モードのパルスを生成する。そして高周波モードのパルスは、重イオンを加速し減衰する。この減衰は、プラズマが無衝突で、波が磁場に対して直角方向に伝播する場合にも起きる。これまで、これらの現象についての理論を構築してきたが、それらはコールドプラズマ近似に基づくものであった。本研究では、有限温度の効果を含めて理論を拡張した [Toida and Aota, Phys. Plasmas (2013)]. そして、低周波から高周波モードの生成、高周波モードによる重イオンの加速などが、プラズマベータ値にどのように依存するかを、理論的に明らかにした。右図は、密度比 $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}=0.1$ の H-He プラズマにおける高周波モードのパルスの減衰率を β の関数として表したものである。 β とともに減衰率は増加するが、その変化率は β よりも2けた小さい



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 8 件)

- ① T. Uragami and M. Toida:
“Simulation studies of shock formation due to interactions of two plasmas in a magnetic field and modified two-stream instabilities,”
Plasma and Fusion Res. Vol. 9, (2014)
3401035 (5pages) 査読有, DOI:
10.1585/pfr.9.3401035.
- ② M. Toida and J. Inagaki:
“Parametric Studies of Ultrarelativistic Electron Acceleration by an Oblique Shock Wave,”
Plasma and Fusion Res. Vol. 9, (2014)
3401026 (5pages) 査読有, DOI:
10.1585/pfr.9.3401026.

- ③ M. Toida and T. Uragami:
“Shock formation processes due to interactions of two plasmas in a magnetic field and modified two-stream instabilities”,
Phys. Plasmas, Vol. 20, NO. 11 (2013)
112302 (12pages) 査読有, DOI:
10.1063/1.4831771.
- ④ T. Uragami and M. Toida:
“Formation of forward and reverse shock waves in a magnetized plasma: Two-dimensional particle simulations,”
Plasma and Fusion Res. Vol. 8, (2013)
2401155 (5pages) 査読有, DOI:
10.1585/pfr.8.2401155.
- ⑤ M. Toida and Y. Aota:
“Finite beta effects on low- and high-frequency magnetosonic waves in a two-ion-species plasma,”
Phys. Plasmas, Vol. 20, No. 8 (2013)
082301 (17pages) 査読有, DOI:
10.1063/1.4817169.
- ⑥ M. Toida and J. Joho:
“Simulation studies of detrapping of ultrarelativistic electrons from an oblique shock wave due to multidimensional fluctuations,”
Plasma and Fusion Res. Vol. 8, (2013)
2401031 (6pages) 査読有, DOI:
10.1585/pfr.8.2401031.
- ⑦ Y. Aota and M. Toida:
“Theory for finite temperature effects on magnetosonic waves in a two-ion-species plasma,”
Plasma and Fusion Res. Vol. 8, (2013)
2401018 (5pages) 査読有, DOI:
10.1585/pfr.8.2401018.
- ⑧ M. Toida, and J. Joho:
“Effects of electromagnetic fluctuations along shock front on electron motion in an oblique shock wave,”
J. Phys. Soc. Jpn., Vol.81, No.8, (2012)
084502 (8pages) 査読有, DOI:
10.1143/JPSJ.81.084502.

[学会発表] (計 23 件)

- ① 斜め衝撃波中のイオン運動における多次元電磁揺動の効果
稲垣順也、樋田美栄子
Plasma Conference 2014/ 日本物理学会 (領域2) 2014年秋季大会、プラズマ・核融合学会第31回年会、新潟 朱鷺メッセ国際会議場、2014年11月18日-21日 (ポスター発表20日)
- ② 斜め衝撃波による電子の捕捉とイオンの反射

- 樋田美栄子、稲垣順也
Plasma Conference 2014/ 日本物理学会(領域2) 2014年秋季大会、プラズマ・核融合学会第31回年会、新潟 朱鷺メッセ国際会議場、2014年11月18日-21日(発表18日)
- ③ 斜め衝撃波による電子の捕捉とイオンの反射についての多次元粒子シミュレーション
樋田美栄子、稲垣順也
プラズマシミュレータシンポジウム2014、核融合科学研究所(岐阜県・土岐市)、2014年9月10日-12日(発表11日)
- ④ 斜め衝撃波によるイオン反射における多次元電磁揺動の効果
稲垣順也、樋田美栄子
プラズマ科学のフロンティア研究会、核融合科学研究所(岐阜県・土岐市)、2014年8月6日-8日(ポスター発表7日)
- ⑤ 磁場中の二つのプラズマの相互作用による衝撃波の形成と変形二流体不安定性
樋田美栄子、浦上達里
日本物理学会 2013年年次大会、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)、2014年3月27日-30日(発表29日)
- ⑥ 無衝突衝撃波による粒子加速とそれに伴う不安定性
樋田美栄子
核融合科学研究所平成25年度一般共同研究成果報告会、核融合科学研究所(岐阜県・土岐市)、2014年1月24日
- ⑦ 磁場中の二つのプラズマの相互作用による衝撃波の形成過程
樋田美栄子
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、名古屋大学太陽地球環境研究所主催、九州大学(福岡県・福岡市)、2013年12月24日-27日(発表26日)
- ⑧ Simulation studies of shock formation and particle acceleration in a magnetized plasma
M. Toida
2013 JIFT workshop on new aspects of plasma kinetic simulation, National Institute for Fusion Science Toki, Gifu, Japan, November 22-23, 2013, (発表23日)
- ⑨ Shock formation processes in a magnetic field and modified two-stream instabilities
T. Uragami and M. Toida
The 23rd International Toki Conference (ITC-23) on "Large-scale Simulation and Fusion Science"
Ceratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan November 18-21, 2013
(ポスター発表 20日)
- ⑩ Parametric studies of ultrarelativistic electron acceleration by an oblique shock wave
M. Toida and J. Inagaki
The 23rd International Toki Conference (ITC-23) on "Large-scale Simulation and Fusion Science", Ceratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan, November 18-21, 2013 (発表 18日)
- ⑪ 磁化プラズマ中の前進・後進衝撃波の形成についての粒子シミュレーション
樋田美栄子、浦上達里
プラズマシミュレータシンポジウム2013、核融合科学研究所(岐阜県・土岐市) 2013年9月11日、12日(発表12日)
- ⑫ 磁化プラズマ中の前進・後進衝撃波の形成についての多次元粒子シミュレーション
浦上達里、樋田美栄子
プラズマ科学のフロンティア2013研究会、核融合科学研究所(岐阜県・土岐市) 2013年8月21-23日(ポスター発表22日)
- ⑬ Effects of modified two-stream instabilities on formation of forward and reverse shock waves in a magnetic field,
T. Uragami and M. Toida
The 12th Asia Pacific Physics Conference, Makuhari, Chiba, Japan, 15-19 July 2013 (ポスター発表 7月 18日)
- ⑭ Finite beta effects on nonlinear low- and high-frequency magnetosonic waves in a two-ion-species plasma,
Y. Aota and M. Toida
The 12th Asia Pacific Physics Conference, Makuhari, Chiba, Japan, 15-19 July 2013 (ポスター発表 7月 18日)
- ⑮ 強磁場中の斜め衝撃波による電子の超相対論的加速: 多次元電磁揺動の効果、
樋田美栄子、城宝潤矢
日本物理学会 2013 年年次大会、広島大学(広島県・広島市)、2013年3月26日-29日(発表29日)
- ⑯ 斜め衝撃波による電子の捕捉と加速における多次元電磁揺動の効果、
樋田美栄子、城宝潤矢
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
名古屋大学太陽地球環境研究所主催、名古屋大学野依記念学術交流会館(愛知県・名古屋市)、2013年3月21-23日(発表21日)
- ⑰ Formation of forward and reverse shock waves in a magnetized plasma:

- Two-dimensional particle simulations,
T. Uragami and M. Toida
22nd International Toki Conference,
"Cross-Validation of Experiment and
Modeling for Fusion and Astrophysical
Plasmas", Toki, Gifu Japan, 19-22,
November 2012 (ポスター発表 20日)
- ⑱ Theory for finite temperature effects on
magnetosonic waves in two-ion-species
plasmas,
Y. Aota and M. Toida
22nd International Toki Conference,
"Cross-Validation of Experiment and
Modeling for Fusion and Astrophysical
Plasmas", Toki, Gifu, Japan, 19-22
November 2012 (ポスター発表 12月20
日)
- ⑲ Simulation studies of detrapping of
ultrarelativistic electrons from an
oblique shock wave due to
multi-dimensional fluctuations,
M. Toida and J. Joho
22nd International Toki Conference,
"Cross-Validation of Experiment and
Modeling for Fusion and Astrophysical
Plasmas", Toki, Gifu, Japan, 19-22
November 2012 (発表 12月20日)
- ⑳ 磁化プラズマ中の前進・後進衝撃波の形
成と多次元構造
浦上達里、樋田美栄子
日本物理学会 2012 年秋季大会、 横浜
国立大学 (神奈川県・横浜市)、 2012
年 9 月 18-21 日 (発表 19 日)
- ㉑ 多種イオンプラズマ中の直角磁気音波
における有限ベータの効果
青田由希雄、樋田美栄子
日本物理学会 2012 年秋季大会 横浜
国立大学 (神奈川県・横浜市)、 2012
年 9 月 18-21 日 (発表 19 日)
- ㉒ 斜め衝撃波中の高エネルギー電子にお
ける多次元電磁揺動の効果
樋田美栄子、城宝潤矢
プラズマシミュレータシンポジウム
2012、核融合科学研究所 (岐阜県・土岐
市)、2012 年 9 月 11-12 日 (発表 11
日)
- ㉓ 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、城宝潤矢
プラズマ科学のフロンティア 2012 研究
会、核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市)、
2012 年 8 月 7-8 日 (発表 7 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋田美栄子 (TOIDA MIEKO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部

研究者番号：00273219