

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05367

研究課題名(和文)大振幅磁気流体波の形成と高エネルギー粒子生成についての粒子シミュレーション研究

研究課題名(英文) Particle simulation on large-amplitude magnetohydrodynamic wave and energetic particle generation

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・准教授

研究者番号：00273219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙では様々な場所で高エネルギー粒子が生成されている。これらの粒子は、プラズマ中の大振幅磁気流体波(特に、磁気音波の衝撃波)によって加速されたものだと考えられているが、その詳細な機構は未だ分かっていない。本研究は、電磁粒子シミュレーションを用いて、衝撃波中で電子が励起する電磁擾乱が、イオンや陽電子の加速に及ぼす影響を解明し、衝撃波による粒子加速についての理解を深化させることに成功した。また、高エネルギー粒子による低域混成波不安定性は、宇宙プラズマと核融合プラズマに共通する物理であるが、その非線形発展をシミュレーションで明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

衝撃波による粒子加速とそれに伴う不安定性は、プラズマ物理の重要な課題であるとともに、宇宙の高エネルギー現象の根底にある物理としても注目されている。本研究は、強い磁場中の磁気音波衝撃波による急激な粒子加速について電磁粒子シミュレーションを行い、高エネルギー粒子の生成とその非線形効果について新たな知見を得た。この成果は、太陽フレアやパルサー磁気圏における高エネルギー粒子の生成機構解明に貢献するものである。また、高エネルギー粒子による不安定性に関する成果は、宇宙プラズマ研究のみならず、核融合発電を目指す磁場閉じ込めプラズマ研究への貢献も期待される。

研究成果の概要(英文)：It is known that high energy particles are produced in various astrophysical plasmas, for example solar flares and supernova remnants. The particles are believed to be accelerated by large-amplitude magnetosonic shock waves. However, the detailed mechanisms have not been clarified. Using electromagnetic particle simulations, we have clarified effects of electromagnetic fluctuations excited by trapped electrons on ion acceleration and positron acceleration. We have also studied nonlinear evolution of lower-hybrid wave instabilities driven by energetic particles. This result can contribute to both space plasma physics and fusion plasma physics.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ 非線形磁気音波 衝撃波 粒子加速 不安定性 粒子シミュレーション 平行電場

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気流体波の一つである磁気音波は大振幅になると衝撃波となり得る。しかし、粒子間衝突のほとんど効かない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、完全には分かっておらず、**プラズマ物理の重要な課題**として位置づけられている。1960年代から多くの理論研究(非線形波動理論に基づく構造解析、散逸構造を探るための粒子軌道や不安定性の解析等)が、1980年代からは、無衝突衝撃波の伝播と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を用いた研究が進められている。

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、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。宇宙高エネルギー粒子生成機構の解明には、その**根底にある無衝突衝撃波と粒子加速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。

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で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研究によって明らかにされた[例えば、Ohsawa Phys. Rep. (2014)]。加速効率は極めて高く、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。加速の機構は粒子の種類(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。ただし、これらの研究は長年、空間1次元の理想化された系を仮定して行われてきた。これは、無衝突衝撃波では電子とイオンがともに本質的役割を果たすため、シミュレーションでは電子・イオンともに近似のない運動方程式を解く必要があり、計算機に対する負荷が非常に大きいからであった。

本研究課題の代表者は空間多次元の相対論的電磁粒子コードを開発し、スーパーコンピュータを用いて空間1次元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検証**する研究を進めてきた。そして、1)電子とイオンの加速における衝撃波面の曲率の効果、2)反射イオンによる不安定性と衝撃波中の電磁場構造、3)斜め衝撃波による捕捉電子の超相対論的加速における多次元電磁揺動の効果など明らかにしてきた。特に3)については、捕捉電子が引き起こす不安定性とその非線形発展によって、衝撃波面付近に大振幅の電磁擾乱が生成されること、この擾乱によって電子の運動が強く影響を受け、空間1次元の場合には見られなかった捕捉電子の解放や追加速が起こることを発見した[Shikii & Toida POP (2010), Toida & Joho JPSJ(2012)]。

2. 研究の目的

これまでの研究成果を発展させ、衝撃波面付近の多次元電磁擾乱がイオンや陽電子の加速に及ぼす影響を明らかにする。また、関連する課題として、非線形波動の電磁場形成についての理論解析や、高エネルギー粒子による不安定性の非線形発展についてのシミュレーションを行う。以下、詳細を記す。

(a) 斜め衝撃波による電子の捕捉とイオンの反射：多次元電磁擾乱を介した相互作用

電子のサイクロトロン周波数 ω_{ce} がプラズマ振動数 ω_{pe} よりも大きいような比較的強い磁場中では、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場合がある。また、捕捉電子が引き起こす不安定性とその非線形発展によって、衝撃波面付近に大振幅の多次元電磁擾乱が生成する。この擾乱が電子の加速に強い影響を与えることはこれまでの研究で示したが、イオンに及ぼす影響は未解明であった。イオンの一部は衝撃波面によって反射され加速されることが知られているが、このイオンの運動が、電子が励起する多次元電磁擾乱によってどのような影響を受けるかを、多次元電磁粒子シミュレーションとテスト粒子計算を併用して明らかにする。

(b) イオン・電子・陽電子プラズマ中の陽電子加速

宇宙では例えばパルサー磁気圏等に陽電子を含むプラズマが存在すると考えられている。また近年、陽電子の加速を示す観測結果も報告されている。一方、空間1次元の粒子シミュレーションによって、イオン・電子・陽電子の3成分プラズマでは、斜め衝撃波が陽電子を強く加速すること、この加速では磁場に平行方向の電場が重要な役割を果たすこと等が示されている。本研究では、この3成分プラズマ中の平行電場についての非線形理論を構築するとともに、陽電子加速を多次元電磁粒子シミュレーションで検証する。

(c) リング状の速度分布を持つ高速イオンによる低域混成波不安定性

衝撃波面によって反射されたイオンはリング状の速度分布を形成する。また、同様の分布

を持つイオンは実験室プラズマでも生成され、衝撃波付近で起きる不安定性と同様に、様々な波動を励起していると考えられる。近年、大型ヘリカル装置(LHD)で観測されている低域混成共鳴周波数付近の電磁放射の励起機構を調べるため、リング状の速度分布を持つ高速イオンによる低域混成波不安定性の非線形発展を電磁粒子シミュレーションで解析する。

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・数値解析も並行して進める。

シミュレーションモデルは、イオンと電子を共に粒子として計算するモデルを用いる。こ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。計算時間を実現可能なものとするため、イオンと電子の質量比は、実際の値より小さいものを用いる。また、多次元の効果を確認するために、1次元的に平均化した電磁場中のテスト粒子の運動を計算する。2次元電磁粒子シミュレーションとテスト粒子計算を比較することで、捕捉電子が励起する多次元電磁擾乱が、イオンや陽電子に及ぼす影響を解明する。リング状の速度分布を持つ高速イオンによる低域混成波不安定性のシミュレーションでは、イオンと電子の質量比などのパラメータは実際の値を用い、空間は1次元とする。

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は、テスト的な小規模シミュレーション、データ解析、不安定性の数値解析等に利用した。

4. 研究成果

本研究課題の主な成果として、以下の4つがあげられる。1) 斜め衝撃波中の捕捉電子が引き起こす不安定性がイオンの運動に及ぼす効果を、多次元電磁粒子シミュレーションと理論解析、ならびにテスト粒子計算を用いて調べ、**捕捉電子が励起する電磁擾乱によって、衝撃波面で反射されて加速されるイオンの数が増大**することを明らかにした。2) イオンと電子と陽電子からなる3成分プラズマ中の衝撃波の伝播と陽電子加速を、電磁粒子シミュレーションとテスト粒子計算を用いて解析し、捕捉電子の効果によって、**陽電子がより高いエネルギーに加速**されることを示すとともに、その**加速機構を明らかにした**。3) 粒子加速において重要な役割を果たす、非線形磁気音波中の**磁場に平行方向の電場**について、3成分プラズマ(2種のイオンと電子からなるプラズマ、ならびに、イオンと電子と陽電子からなるプラズマ)に適用できる**理論を構築**した。4) 衝撃波によって反射されたイオンは**リング状の速度分布**を持つが、そのようなイオンが引き起こす不安定性は、宇宙プラズマだけでなく、実験室プラズマでも起こりうる。その**非線形発展についてシミュレーション**を行い、大型ヘリカル装置(LHD)で観測されている**イオンサイクロトロン周波数から低域混成共鳴周波数帯の電磁放射の発生機構**を調べた。

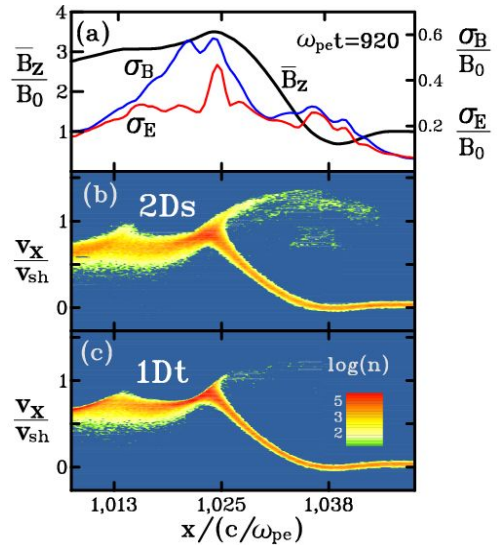
以下、各々の項目に分けて、成果の概要を記す。

1) 衝撃波によるイオン加速における捕捉電子の効果

イオンは衝撃波面での電磁場の急激な立ち上がりにより、一部が反射されて加速される。このイオン反射が、捕捉電子が引き起こす不安定性とその非線形発展によって大振幅となる多次元電磁擾乱によって、どのような影響を受けるのかを解析した[Toida & Inagaki POP (2015)]。

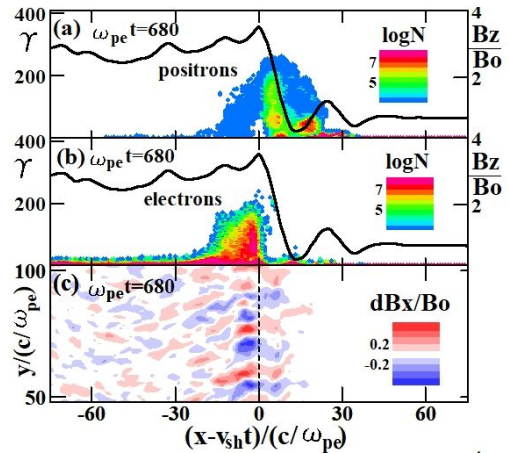
最初に、多次元擾乱が存在する場合の斜め衝撃波中のイオンの運動について物理的考察を行い、イオン反射の条件と反射されるイオンの割合を求めた。これにより、多次元電磁擾乱の振幅が大きくなると、イオンの反射が促進され、反射イオンの数が増えることを予測した。そして、この理論予測を検証するために、空間2次元・速度3次元の電磁粒子コードを用いて、斜め衝撃波についてシミュレーションを行った。シミュレーション面を(x,y)とし、外部磁場は(x,z)面内にあり、衝撃波はx方向に伝播すると仮定すると、衝撃波中の捕捉電子はy方向に有限な波数を持つ電磁擾乱を励起する。これらの電磁擾乱の非線形発展とイオンの運動を解析した。また、1次元的に(y方向に)平均化した電磁場中のテストイオンの軌道を計算した。このテストイオンは、捕捉電子が励起する多次元電磁擾乱を感じていないため、テストイオンの計算結果と電磁粒子シミュレーションのイオン(多次元電磁擾乱を感じている)の計算結果を比較することで、イオンの運動における多次元電磁擾乱の効果を明確に示すことができる。

図に電磁粒子シミュレーションとテストイオン計算の結果を示す。衝撃波の伝播方向と外部磁場とのなす角は54度、衝撃波の伝播速度は $v_{sh}=0.95c \cos$ (c は光速)、電子のサイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比は、 $\omega_{pe}/\omega_{pe}=5.0$ である。上段(a)は電磁場のプロファイルで、黒線がy方向に平均化した磁場 B_z のプロファイル、青線と赤線はそれぞれ多次元の電磁場擾乱の強さを表す。捕捉電子によって、衝撃波の中で多次元電磁擾乱が大振幅になっていることを示している。中段と下段の(b)(c)はイオンの位相空間分布で、(b)は電磁粒子シミュレーションのイオン、(c)はテストイオンで、 $v_x/v_{sh}>1$ のイオンが衝撃波面で反射されたものである。2つのグループのイオンの初期位置と初速度は共通であるが、多次元電磁擾乱を感じているイオン(b)の反射粒子の数は、感じていないテストイオン(c)の反射粒子の数よりも多いことが、はっきりと示されている。これにより、捕捉電子が引き起こす多次元電磁擾乱によって、反射イオンの数が増大するという理論予測を証明できた。



2) 電子・イオン・陽電子プラズマ中の陽電子加速の多次元粒子シミュレーション

電子とイオンに加えて少量の陽電子を含むプラズマ中の衝撃波による陽電子加速を、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調べた。 $\omega_{pe} > \omega_{pe}$ で、 $v_{sh} \approx c \cos$ の場合は、捕捉電子と陽電子はともに超相対論的エネルギーになり得るが、陽電子と電子では加速機構は異なる。右図は、シミュレーション結果で、電子は衝撃波の中で高いエネルギーになっているが(b)、陽電子は主に $x > v_{sh}t$ の衝撃波面とその上流に、高エネルギー粒子が分布している(c)。これは、陽電子は衝撃波と出会うと、まずは衝撃波面の平行電場によって加速されて上流へと反射されるからである。ここで注目しているのは、 $x < v_{sh}t$ の領域にも、少数ではあるが高エネルギーの陽電子が存在していることである。これは、空間1次元のシミュレーションと異なる点で、捕捉電子が励起した多次元電磁擾乱(c)によるものである。時間が経過するとともに、高エネルギー陽電子が存在する領域は広がるとともに、そのエネルギーも増加する。



このような多次元電磁擾乱の効果を更に詳しく調べるため、1次元的に平均化した電磁場中でのテスト陽電子(多次元電磁擾乱を感じていない)と、2次元電磁粒子シミュレーションの陽電子(多次元電磁擾乱を感じている)を比較した。テスト陽電子の大部分は衝撃波と出会うと、波面付近の平行電場で加速されて上流へと反射される。それに対し、2次元擾乱の影響を受けている陽電子の多くは、衝撃波面で加速された後、大きい回旋半径で回旋運動をすることで、衝撃波に出入りしていることが分かった。これらの粒子は、衝撃波中の横電場によって加速され、その結果、テスト陽電子よりも高いエネルギーを獲得している。多くの粒子のエネルギー変化を解析し、平行電場による加速に比べて、横電場による加速の方が強い粒子の数が、多次元擾乱によって増大することを明らかにした [論文投稿中]。

3) 3成分プラズマ中の非線形磁気音波における平行電場についての理論解析

2種類のイオンと電子からなるプラズマ、電子、イオン、陽電子からなるプラズマなどの3成分プラズマ中では、磁気音波は低周波と高周波の2つのモードに分裂する。これらのモードの非線形磁気音波における平行電場について、理論を新たに構築した[Toida POP (2016)]。

2種のイオンと電子からなるプラズマ中の高周波と低周波の2つの磁気音波モードの非線形の振る舞いは、それぞれ Korteweg-de Vries 方程式(KdV方程式)で記述される[Toida & Ohsawa JPSJ (1994), Toida & Kondo POP (2011)]。ただし、それぞれのKdV方程式のソリトン解の幅は大きく異なり、準直角伝播の場合は、低周波はイオンの慣性長 c/ω_{pi} のオーダー、高周波は電子のスキン長 c/ω_{pe} のオーダーである。低周波モードのパルスは振幅が小さいときは安定に伝播するが、振幅が大きくなると、そこから高周波モードのパルスが生成される。この

ため、振幅が大きくなると高周波モードのパルスが重要となる。今回、これら2つのモードの非線形パルス中の磁場に平行方向の電場 E_{\parallel} と、それを磁場に沿って積分した量 $eF = -e \int E_{\parallel} ds$ を導出した。その結果、 F の最大値の振幅 ε に対する依存性が、低周波の場合は $eF \sim \varepsilon^2 m_e v_A^2$ 、高周波の場合は $eF \sim \varepsilon^2 m_i v_A^2$ と表せることが分かった。ここで、 v_A はアルヴェン速度である。この理論式は、低周波の F に比べて高周波の F は、 m_i/m_e 倍大きいことを示す。これは、高周波モードの平行電場が、粒子加速に重要な影響を及ぼす可能性があることを示唆する。

電子、イオン、陽電子の3成分プラズマについても、 $\Omega_i < \omega < (\Omega_i \Omega_e)^{1/2}$ の周波数領域に対応する非線形磁気音波の平行電場を解析し、この領域の F として

$$eF \sim \varepsilon^2 \frac{n_i/n_e}{(1 + n_p/n_e)^2} m_i v_A^2$$

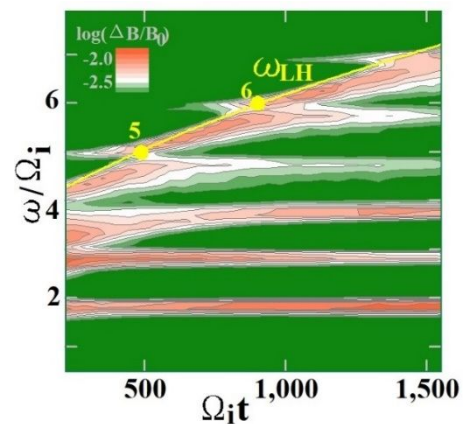
を得た。ここで、 n_i, n_e, n_p は、イオン、電子、陽電子の密度である。得られた F の式は、陽電子の存在量が小さい場合は、大きな F が形成されることを示している。上記2) で陽電子は衝撃波と出会うと、まずは平行電場によって加速されることを述べたが、この理論的根拠を得ることができた。

4) 高速イオンによる低域混成波不安定性のシミュレーション

衝撃波によって加速された高エネルギー粒子は様々な不安定性を引き起こすが、同様の不安定性は実験室プラズマでも重要な役割を果たしている。大型ヘリカル装置(LHD)では、近年、中性粒子入射(NBI)に伴う Radio Frequency (RF) 帯の様々な放射が観測されている [Saito, et al., PFR (2018)] が、この励起機構をシミュレーションで調べた。

垂直 NBI によってつくられる高速イオンは、磁場に垂直方向の速度空間でリング状の分布を形成すると考えられる。衝撃波によって反射されたイオンも同様の速度分布を持つ。そこで、リング状の速度分布を持つ高速イオンによる不安定性を、空間1次元速度3次元の電磁粒子コードを用いて調べた [Toida, et al. PFR (2018)]。高速イオンによって、 $\approx 1 - i$ (i は整数、 i はイオンサイクロトロン周波数) の波に加えて、低域混成共鳴周波数 ω_{LH} 付近の波が同時に励起されることを示した。このような広い周波数帯の波の同時励起は、LHD で垂直 NBI に伴って観測されている RF 放射と同様である。さらに、プラズマ密度を変えてシミュレーションを行ったところ、プラズマ密度が大きくなると、最大振幅となる低域混成波の周波数が増加するという結果を得た。この密度依存性も、LHD 実験の結果と良く一致している。

次に、接線 NBI と電子加熱用の電力入射を同時に行ってプラズマを立ち上げている時に、RF 放射の周波数が階段状に増加するという実験結果に注目した。この放射は、密度が徐々に増加するプラズマ中で、接線 NBI によって持続的に作られる高速イオンが引き起こしていると考えられる。そこで、プラズマ密度を増やし続け、そこに接線 NBI によって作られるような、ピッチ角が小さい高速イオンを注入し続けるシミュレーションを行った。右図は、高速イオンによって励起された磁場揺動の周波数の時間変化を示す。カラーコンターが磁場揺動の振幅を表すが、振幅が大きいことを示す赤色の部分に注目すると、 $\omega > 4 - i$ の領域では階段状に周波数が増加している。また、段差が i であること、黄色の線で示す ω_{LH} が $1 - i$ に等しくなる頃に、 $\approx 1 - i$ の波が成長を始めていることが分かる。これらは LHD 実験の結果と一致しており、本研究によって ω_{LH} の時間変化が、階段状の周波数変化に大きく関与していることを明らかにした [Toida, et al. PFR (2019)]。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki	4. 巻 14
2. 論文標題 Simulation Study of Energetic Ion Driven Instabilities near the Lower Hybrid Resonance Frequency in a Plasma with Increasing Density	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 3401112(7pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3401112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 M. Toida, K. Saito, H. Igami, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki	4. 巻 13
2. 論文標題 Simulation Study of High-frequency Magnetosonic Waves Excited by Energetic Ions in Association with Ion Cyclotron Emission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Fusion. Res.	6. 最初と最後の頁 3403015(5pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3403015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 M. Toida	4. 巻 23
2. 論文標題 A theoretical study for parallel electric field in nonlinear magnetosonic waves in three-component plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072215(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4958312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Toida and J. Inagaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Effects of trapped electrons on ion reflection in an oblique shock wave	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 6235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4922847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Mieko Toida
2. 発表標題 Simulation study of trapped electron effects on positron acceleration by a shock wave in an electron-ion-positron plasma
3. 学会等名 28th International Toki Conference (ITC28)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 斜め衝撃波による陽電子加速における捕捉電子の効果についてのシミュレーション
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 斜め衝撃波による陽電子加速における捕捉電子の効果
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mieko Toida
2. 発表標題 Simulation study of effects of trapped electrons on particle acceleration by a shock wave
3. 学会等名 International Congress on Plasma Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋田美栄子、伊神弘恵、斎藤健二、秋山毅志、神尾修治、關良輔
2. 発表標題 高速イオンによる低域混成波のシミュレーション
3. 学会等名 エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋田美栄子、伊神弘恵、斎藤健二、秋山毅志、神尾修治、關良輔
2. 発表標題 高エネルギーイオンが励起する低域混成波とイオンサイクロトロン波の粒子シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋田美栄子、伊神弘恵、斎藤健二、秋山毅志、神尾修治、關良輔
2. 発表標題 高速イオンによって励起されるイオンサイクロトロン波と低域混成波の粒子シミュレーション
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki
2. 発表標題 Particle simulation of stair-like frequency chirping in lower-hybrid resonance range caused by energetic ions
3. 学会等名 International Toki Conference 27 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 高速イオンが励起するイオンサイクロトロン波と低域混成波の粒子シミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 高速イオンによる磁気音波不安定性とイオンサイクロトロン放射のシミュレーション
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Toida, K. Saito, H. Igami, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki
2. 発表標題 Simulation Study of high-frequency magnetosonic waves in association with ion cyclotron emissions
3. 学会等名 26th International Toki Conference (ITC 26) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 高速イオンによる磁気音波不安定性とイオンサイクロトロン放射
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2018
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Toida
2. 発表標題 Ultrarelativistic particle acceleration by a collisionless shock wave
3. 学会等名 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 斜め衝撃波による陽電子加速における捕捉電子の効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 強磁場中の無衝突衝撃波による粒子加速についてのシミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2016 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Toida
2. 発表標題 Parallel electric fields in nonlinear magnetosonic waves in a multi-ion-species plasma
3. 学会等名 25th International Toki Conference (2015.11.3 ~ 11.6) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 M. Toida and J. Inagaki
2. 発表標題 Effects of trapped electrons on ion reflection in an oblique shock wave
3. 学会等名 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2015.11.16~20) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 M. Toida
2. 発表標題 Parallel electric fields in nonlinear magnetosonic waves in a multi-ion-species plasma
3. 学会等名 第32回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 樋田美栄子
2. 発表標題 斜め衝撃波による電子の捕捉とイオンの反射
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2015
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----