

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287119

研究課題名(和文) 運動論的乱流形成とその散逸に伴うプラズマ加熱・粒子加速機構

研究課題名(英文) Plasma heating/acceleration in kinetic plasma turbulence and its turbulence evolution

研究代表者

齊藤 慎司 (Saito, Shinji)

名古屋大学・理学研究科・特任准教授

研究者番号：60528165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、プラズマ中の個々の荷電粒子の運動の性質が重要になる運動論的プラズマ乱流の複雑な発展過程について研究を行った。運動論的乱流の散逸によって生じるプラズマの加熱や加速機構について注目し、どのようにして運動論的乱流からプラズマ粒子にエネルギーを輸送するのかについて研究を進めた。本研究ではホイッスラー波動と呼ばれるプラズマ波動によって構成される波動乱流に注目し、プラズマ粒子、特にイオンの散乱過程について新しい知見を得た。これまでこの波動乱流では加熱や加速が起こりにくいと考えられてきたイオンが、乱流中に生じる不安定性や非線形発展に伴う局所的な性質によって、加速や加熱を受けることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではホイッスラー波動と呼ばれるプラズマ波動によって構成される波動乱流に注目し、イオンに対する散乱過程について新しい知見を得た。これまでホイッスラー波動乱流によってイオンは強く散乱されないと考えられてきたが、イオン・電子の運動をすべて解き進めながらプラズマ乱流の発展を調べることが出来る粒子シミュレーションを用いて調べた結果、この中でイオンが強く加速や加熱を受けることが見いだされた。太陽風中衝撃波の観測でホイッスラー波動とイオン加速との関係性が見いだされており、その物理機構について不明であったが、本研究結果によって無衝突衝撃波中でのイオンへのエネルギー輸送過程について新たな知見を示した。

研究成果の概要(英文)：We study kinetic plasma turbulence, where kinetic effect of charged particles are important in its dynamics, by using fully kinetic particle-in-cell simulations. We focus on heating/acceleration processes associated with dissipation of the kinetic turbulence. In this study we investigate nonlinear dynamics of whistler mode turbulence. In linear theory, whistler mode does not resonate with ions. However, the fully kinetic particle-in-cell simulations demonstrate that ions can be accelerated and/or heated by whistler mode turbulence through its nonlinear developments that include plasma instability and nonlinear intermittent nature of the kinetic turbulence.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流 波動粒子相互作用 粒子シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽から放出される太陽風プラズマは地球近傍において乱流状態となっている。1AU 付近での太陽風観測衛星によって、mHz 以下から数 Hz 程度までの磁場摂動の周波数スペクトルが観測されている [Bruno and Carbone Living Rev.in Solar Phys. 2005]。低周波側ではそのスペクトルの特徴 (power-law index) が流体乱流のそれとよく似ており、このスペクトル域をプラズマ乱流の「慣性域」と呼んでいる。また、高周波側ではスペクトルの傾きが急峻になる傾向にあり、これも中性流体乱流の性質とよく似ている。中性流体の場合は、流体粘性により乱流から熱へのエネルギー変換が起こることでスペクトルの急峻が実現されていることから、この領域を「散逸域」と呼んでいる。スペクトル計上の相似性より、太陽風プラズマ乱流中のこの領域も散逸域と呼ばれてきたが、太陽風のような無衝突プラズマ中では流体乱流と同様の散逸機構は起こらない。この領域に存在する波の波長は、磁気流体では近似すべきではない空間スケールを持つことが知られており、この領域を運動論的乱流域と呼ぶ。地球近傍の太陽風中において数 Hz 程度で観測される波は、イオンの運動に関わるような空間スケールを持っている。さらに高い周波数 (小さい波長の波) を持った波が存在することが観測的に示唆されており、電子の運動が重要な役割を担うような領域も存在することが示されている。

このような磁気流体近似では表現出来ないようなプラズマ中では、さまざまな運動論的な波動がプラズマ乱流を形成していると考えられている。これらの波動はプラズマ中のイオンや電子と相互作用することで、波動の散逸、粒子の加速や加熱を引き起こすと考えられる。しかしながら、どのような波動がどのようにしてプラズマ粒子を散乱したり加速したりするのかについてはよく理解されておらず、プラズマ乱流を専門とする多くの研究者の注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究では運動論的乱流の励起と散逸、またそれに伴うプラズマ加速・加熱機構について理解することを目的とする。小スケールな運動論的乱流は、スケールの大きい磁気流体乱流からエネルギーを供給され、それと同時にエネルギーを散逸することでプラズマ加熱や粒子加速に寄与すると考えられている。しかし、磁気流体乱流からどのようにして運動論的乱流を励起するのかは議論が分かれており、さまざまな観測や理論研究から複数のモデルが提案されている。本研究ではプラズマ粒子の運動論を含めた大規模粒子シミュレーションを行うことにより、磁気流体的波動を源にした運動論的乱流形成プロセスを再現し、運動論的乱流の励起・散逸過程の総合的理解を目指す。

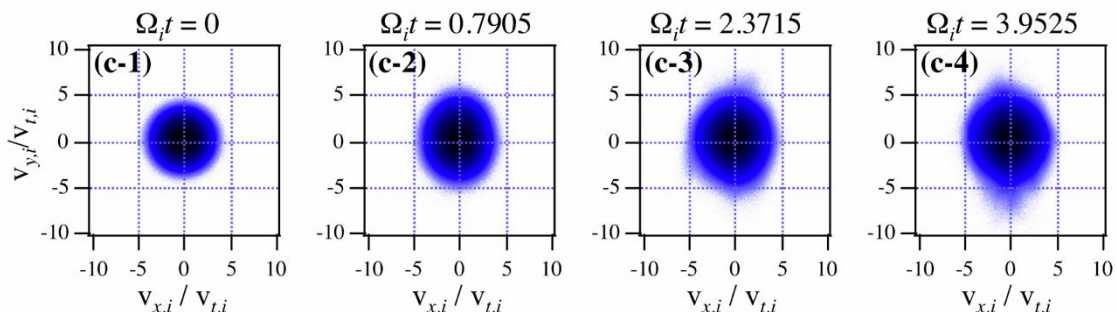
3. 研究の方法

本研究ではプラズマ中の個々の運動が重要となってくるような運動論的乱流に注目しているため、プラズマを構成する電子とイオンすべての運動を解き進めプラズマ全体の時間発展を追跡する粒子シミュレーションコードを用いて研究を行う。イオンと電子の物理の間には非常に大きな時間と空間スケールの差があり、電子の運動を解像しつつイオンの運動を解き進めるためには、大規模な計算リソースが必要となる。このため本研究では名古屋大学のスーパーコンピュータ FX100 を用いて、数千個の計算コアを用いた大規模並列計算を実施する。スーパーコンピュータ上で並列演算を可能とするようなプラズマ粒子シミュレーションコードを開発し、これにより電子スケールの物理を計算しつつ、イオンの物理的空間および時間スケールを再現する。

4. 研究成果

(1) ホイッスラー波動乱流中のイオン垂直加速

運動論的プラズマ乱流の1つとして考えられているホイッスラー波動乱流中において、一部のイオンが背景磁場に対して垂直方向に加速されることを発見した。



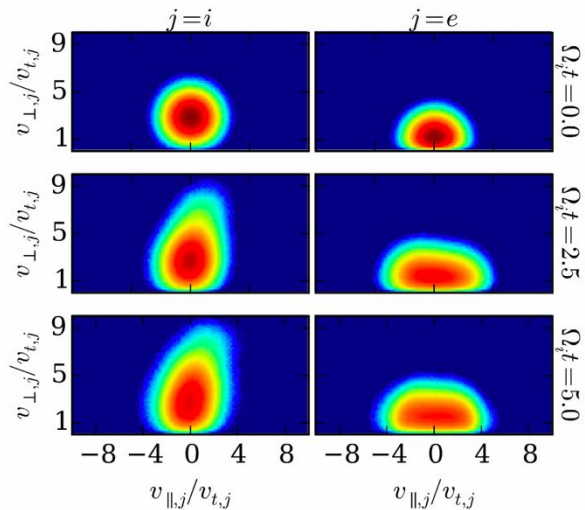
上図は4つの時刻でのイオンの速度分布を表したものである。横軸が背景磁場に対して平行方向の速度、縦軸が垂直方向の速度を表している。速度はイオンの熱速度 (初期設定温度より定義) で規格化している。また、時間はイオンのサイクロトロン角周波数で規格化している。色は対応する速度を持つイオンの数をログスケールで表している。これより、時間が進むにつれて、垂直方向速度を持つイオンが増え始め、一部は熱速度の10倍程度まで加速されているのがわかる。これはホイッスラー波動乱流の非線形的な発展に伴い、局所的に準垂直伝搬する周波

数の低いホイッスラー波動が励起されたことが原因となっている。背景場の中を比較的ゆっくりラーモア運動するイオンと局所的に増幅された準垂直伝搬ホイッスラー波動がランダウ共鳴を起こすことで、イオンへのエネルギー輸送が実現されている。ホイッスラー波動は電子の物理に支配される波動であり、この成果は電子の運動を解きながらイオンの運動に関わる時間と空間スケールでの物理を再現したことによって初めて得られた。これまでホイッスラー波動はイオンの運動に影響を及ぼさないと考えていたが、本成果によってこの重要性が認識され、イオン運動論スケールでのホイッスラー波動乱流の役割についてこれ以降注目している。

(2) 有限振幅ホイッスラー波動による非線形散逸に伴うイオンと電子の散乱

イオンの空間スケール程度の波長を持つホイッスラー波動が、プラズマ不安定性のもとで非線形的に散逸されることで、イオンが背景磁場に対して垂直方向に加熱、また、電子が平行方向に加熱されるといふ、異なる加熱プロセスが同時に起こることを発見した。

左の図は3つの時刻(縦方向)でのイオン(左側)と電子(右側)の速度分布を表している。横軸が背景磁場に対して平行方向の速度、縦軸が垂直方向の速度(背景場に垂直な速度2成分の自乗和の平方根)を表している。速度はそれぞれの初期の熱速度で規格化している。色は対応するそれぞれの粒子の数をログスケールで表している。初期のイオン速度分布の中心が垂直方向にシフトされているのは有限振幅ホイッスラー波動を持つ粒子運動の摂動分に対応する。これは線形理論から導き出される。これらの時間発展を見ると、電子は平行方向に分布が広がるのに対し、イオンは垂直方向にその分布を伸ばしていることがわかる。これは有限振幅のホイッスラー波動

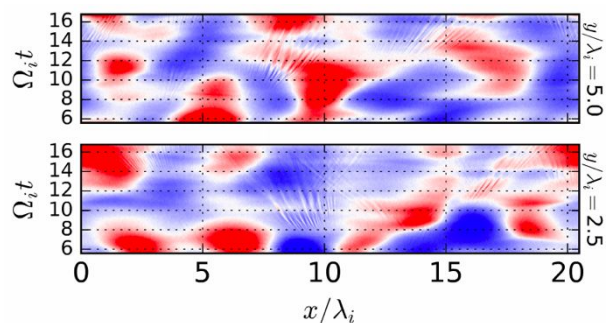


が自身の粒子摂動で Modified Two Stream Instability (MTSI) という不安定性を引き起こし、これによって励起された準垂直方向伝搬のホイッスラー波動が、イオンに対して垂直方向に、電子に対して平行方向にランダウ共鳴条件を満たし、それぞれを異なる方向に散乱したのが原因となる。本研究の成果は、プラズマ乱流中で有限振幅を持つ波動があると、それが不安定性を介して自己崩壊し、その過程でプラズマ中のイオンと電子を同時かつ非方向的に加熱することを示唆している。これまでイオンとホイッスラー波動はあまり関連が無いと思われていたが、(1)の成果と同様、イオンに対するホイッスラー波動の役割は無視出来無いと言える。この成果は2017年にアメリカの学術誌(Journal of Geophysical Research)で出版された Tsurutani らのレビュー論文で紹介されている。

(3) ホイッスラー波動乱流中での局所的イオン音波の励起

ホイッスラー乱流の非線形発展に伴い、局所的かつ突発的にイオン音波が励起されることを発見した。

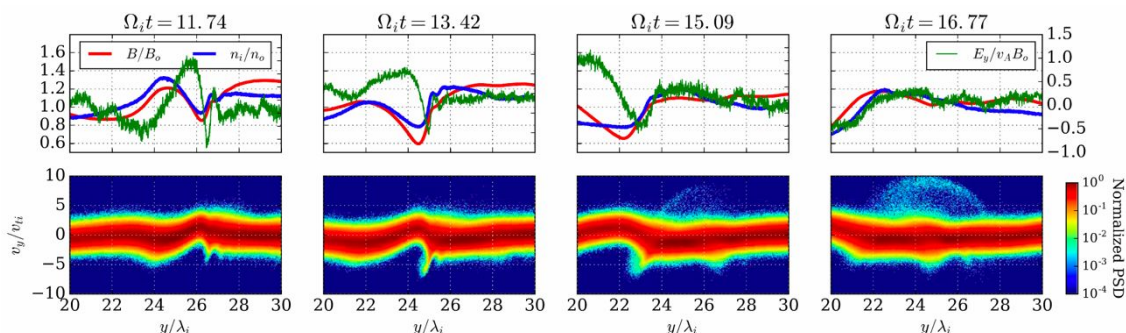
左の図は背景磁場に平行な異なる2つの線上でのイオン密度の時間発展を可視化したものである。横軸が平行方向の位置、縦軸が時間を示している。横軸はイオン慣性長、縦軸はイオンサイクロトロン角周波数でそれぞれ規格化されている。イオン密度の大きな構造の中に細かい筋状の構造が現れてくるのが見える。これらがホイッスラー乱流中で励起されたイオン音波に相当する。筋の傾きから波が伝搬していることがわかり、イオンサイクロトロン周期($\Omega_i t = 2$)以内で励起と散逸が起きていることがわかる。このようにホイッスラー乱流中ではイオン音波が局所的かつ突発的に、さまざまな場所で生じることがわかった。この励起原因は、圧縮性を持つ斜め伝搬のホイッスラー乱流の成分がイオンを押し動かす、その一部が背景のイオンと相対速度を持つことによって生じる2流体不安定性である。このイオン同士の相互作用が乱流中のいたるところで発生することで、イオン音波が局所的に励起される。このようにホイッスラー波動乱流においては、乱流カスケードに伴う散逸だけでなく、内部の非線形性で発生するプラズマ不安定性も重要な役割を担うことが示唆される。



(4) 磁気音波/ホイッスラー波動乱流におけるイオン物理への影響

イオンの運動に関わるような空間スケールより十分大きな磁気音波乱流中において、摂動の確

率分布関数の4次モーメント (Intermittency) が発展し、これに関係する摂動がイオンの局所加速の原因になっていることを発見した。



上図はイオンが局所的に加速されている現場を示している。左のパネルから右のパネルへは時間発展を表しており、上4枚のパネルは注目している領域における磁場強度 (赤線)、イオン密度 (青線)、また、背景磁場に対して垂直方向 (y 方向) の電場 (緑線) の値を表している。横軸は y 方向の空間を表している。下4枚のパネルは上パネルらと同じ場所と時間におけるイオンの位相空間密度を表している。横軸を空間位置、縦軸が垂直方向 (y 方向) の速度を表している。これを見ると、 $t=11.74$ 、 y/λ_i が 26.5 付近のところにおいて、磁場とイオン密度の空間的な急峻が現れる。それに伴い y 方向の電場が発生している。同じ場所のイオンの位相空間密度を見てみると、マイナス y 方向に分布の「角」が現れているのがわかる。この「角」は時間的に発展しており、これはイオンがこの場所でマイナス y 方向に加速されていることを示している。その後、磁場とイオン密度の急峻な勾配が緩和されると加速が止まり、後半の時間では加速されたイオンがプラス y 方向に現れている。これは背景磁場に対するラーモア運動の効果で加速されたイオンが速度ベクトルの向きを変えたことによるものである。このようなイオン加速は空間的に急峻な変化によってもたらされるものであり、これは磁場摂動の確率分布関数の4次モーメントに関係する。磁気音波/ホイッスラー波動乱流は非線形発展の過程で小スケールの急峻な構造を発達させることが本研究において明らかになっており、このような急峻な構造によって、イオンを強く加速する性質があるということが明らかになった。この加速機構は、磁気音波衝撃波における機構と類似しており、(1)と(2)で発見したイオン加速機構とは異なる。また、この機構はイオン慣性長より十分大きな構造が関わる加速機構であり、これまでのイオン慣性長の5, 6倍程度の空間スケールのシミュレーションでは確認されていない。このためイオン慣性長よりずっと大きな空間スケールからの非線形発展がイオンの局所加速に関わると考えられる。

本研究では運動論的乱流の非線形発展がプラズマ粒子の加速・加熱をどのようにして実現しているのかについて、名古屋大学のスーパーコンピュータを用いて大規模並列粒子シミュレーションコードを開発し、数値実験を行った。研究開始の初期の段階でホイッスラー波動乱流がイオンと電子両方へのエネルギー輸送に非常に重要な役割を担っているという知見が得られ、以降、これまであまり認識されてこなかったホイッスラー波動乱流によるイオンの加速・加熱機構の研究に注力するようにした。今後、研究成果(4)で得られた知見をもとに、磁気流体近似が可能になるような空間スケールでの波動乱流の研究を進める。これにより、磁気流体の近似可能なプラズマ乱流からどのようにして運動論的な乱流が生成されるのかについて明らかにする。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7件)

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2018) Magnetosonic/whistler mode turbulence influences on ion dynamics, Phys. Plasmas Vol.25, 122301, DOI:10.1063/1.5053760. (査読有)

梅田 隆行, 齊藤 慎司, 成行 泰裕 (2018) Decay of nonlinear whistler mode waves: 1D versus 2D, Phys. Plasmas, Vol.25, 072118, DOI:10.1063/1.5031483. (査読有)

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2017), Generation of Intermittent Ion Acoustic Waves in Whistler Turbulence, Phys. Plasmas Vol.24, 072304, DOI:10.1063/1.4990443. (査読有)

梅田 隆行, 齊藤 慎司, 成行 泰裕 (2017), Rapid decay of nonlinear whistler waves in two dimensions: Full particle simulation, Phys. Plasmas Vol.24, 054503, DOI:10.1063/1.4982609. (査読有)

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2015) Nonlinear damping of a finite amplitude whistler wave due to modified two stream instability, Physics of Plasmas, Vol.22, 072105, DOI:10.1063/1.4926523. (査読有)

梅田 隆行, 齊藤 慎司, 成行 泰裕 (2014) Electron Acceleration During the Decay of Nonlinear Whistler Waves in Low-Beta Electron-Ion Plasma, Astrophysical Journal,

Vol.794, 63, DOI:10.1088/0004-637X/794/1/63. (査読有)

齊藤 慎司, 成行 泰裕 (2014) Perpendicular ion acceleration in whistler turbulence, Physics of Plasmas, Vol.21, 042303, DOI:10.1063/1.4870757. (査読有)

[学会発表](計 16 件)

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2018) Shear Alfvén wave turbulence: Particle-In-Cell simulation, 地球磁気圏・地球惑星圏学会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2018) The influence of magnetosonic/whistler mode turbulence in ion dynamics, 8th Asia-Pacific School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2018) Particle scattering in decaying magnetosonic-whistler mode turbulence, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2017) Cascade of Whistler-mode Turbulence from Ion to Electron Kinetic Scales: Particle-In-Cell Simulation, AGU Fall Meeting 2017

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2017) Generation of Intermittent Ion Acoustic Waves in Whistler Turbulence, International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2017) Generation of Intermittent Ion Acoustic Waves in Whistler Turbulence: Particle-In-Cell Simulation, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2016) Generation of Ion Acoustic Waves in Whistler Turbulence, AGU Fall Meeting 2016

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2016) Generation of Small Scale Electrostatic Fluctuations in Decaying Whistler Turbulence: Particle-In-Cell Simulation, Asia Oceania Geosciences Society Annual 2016

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2016) Enhancement of kinetic-scale electrostatic fluctuation in whistler turbulence: Particle-In-Cell simulation, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2015) Decaying Whistler Turbulence at Ion Scales: Particle-In-Cell simulation, AGU Fall Meeting 2015

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2015) Decaying Whistler Turbulence at Ion Scales: Particle-In-Cell simulation, 地球電磁気・地球惑星圏学会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2015) Forward Cascade of Whistler Turbulence at Ion Scales, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2014) Perpendicular Ion Heating by Nonlinear Development of Finite Amplitude Whistler Wave, AGU Fall Meeting 2014

齊藤 慎司, 成行 泰裕 (2014) Perpendicular Ion Acceleration in Anisotropic Whistler Turbulence, Plasma Conference 2014

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2014) Plasma Heating by Nonlinear Development of a Finite Amplitude Whistler Wave, Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting

齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行 (2014) 有限振幅 whistler 波動非線形発展に伴うプラズマ加熱, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会

[その他]

齊藤 慎司 (2017) Particle Scattering and Wave Generation in Whistler Turbulence, Mini-workshop on plasma turbulence in heliospheric, astrophysical, and experimental plasmas

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 成行 泰裕

ローマ字氏名: (NARIYUKI, yasuihiro)

所属研究機関名: 富山大学

部局名: 人間発達科学部

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 50510294

(2)研究協力者

研究協力者氏名：梅田 隆行

ローマ字氏名：(UMEDA, takayuki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。