

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03781

研究課題名(和文) 磁気流体近似プラズマ乱流から生成される運動論的プラズマ乱流の性質

研究課題名(英文) Properties of kinetic-scale turbulence cascaded from magnetohydrodynamics plasma turbulence

研究代表者

齊藤 慎司 (Saito, Shinji)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波伝搬研究センター・研究員

研究者番号：60528165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁気流体プラズマ中の波動として代表的なAlfven波動の重ね合わせで形成されるプラズマ乱流の非線形発展を、運動論的效果を含めたプラズマ粒子シミュレーションを用いて計算を行った。本研究成果により、Alfven波動乱流の非線形相互作用が運動論的乱流領域で運動論的Alfven波動、magnetosonic/whistler波動、イオン音波、イオンサイクロトロン波動といった、太陽風で多く観測されている運動論的波動が生成出来ることを実証した。また、その中で、本研究で想定した条件下において、特にmagnetosonic/whistler波動が最も支配的になりうるということがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は未だ謎が多い太陽風の加速や加熱機構の解明につながる糸口となることが期待される。太陽風を形成するプラズマ乱流の基礎的な性質を荷電粒子1つ1つの動きの影響を含め理解することで、太陽風がどのように加速されるのか、また吹き出された後にどのような発展を遂げプラズマ乱流としての性質を変えうるのか、ということの詳細に理解するための1つのピースとなっている。太陽風の加速機構やその性質を理解することは、地球周辺の宇宙環境や地上の電力網に影響を与える「宇宙天気」の予報精度向上につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on nonlinear development of Alfven mode wave turbulence using fully kinetic particle-in-cell simulation. The study shows that Alfven mode wave turbulence at magnetohydrodynamics scales cascades to several kinds of kinetic fluctuations, such as kinetic Alfven mode waves, magnetosonic/whistler mode waves, ion cyclotron mode waves, and ion acoustic mode waves. These fluctuations are frequently observed in the solar wind at 1AU. The study also suggests that magnetosonic/whistler mode waves can be dominant at ion kinetic scales under the condition where Alfven mode waves counter-propagate at large scales.

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 プラズマ加熱 プラズマ運動論

1. 研究開始当初の背景

太陽風は太陽から噴き出るプラズマ（主に陽子と電子といった電気を帯びた粒子の集合体）の流れであり、水の流れのような流体に見られる乱流状態となっている。乱流中では異なるスケールサイズの構造が相互作用し、新たに異なるスケールサイズの構造を形成するカスケードという現象を起こすことで、乱流はさまざまなスケールを持った構造を持つ。こういったスケール間相互作用によって、特徴的な波数スペクトル（各スケールのエネルギーが波数の $-5/3$ 乗に比例する）を形成することが知られている。太陽風を代表するプラズマ乱流中においても同様なスペクトルが観測されている。

一方で、スケールが小さくなると双方の特徴は異なる。中性流体では乱流中の粒子間衝突を原因として粘性効果が生まれ、小さいスケールへの乱流発展を阻害する。これにより小さいスケールでの乱流ではスペクトルの勾配は急峻となる。このようなスケールの波数領域を「散逸域」と呼ぶ。プラズマ乱流においても小さいスケールで波数スペクトルが急峻になることが知られているが、太陽風プラズマ乱流においては粒子間衝突が非常に少なく、「散乱域」での物理機構は粘性を持つ流体と明らかに異なる。

このような無衝突のプラズマ乱流中で、衝突系流体乱流の散逸を思わせるようなスペクトルの急峻が現れるのはなぜか。磁気流体力学で記述されるプラズマではこのような散逸機構は再現できず、プラズマ中の荷電粒子の振る舞いを考慮に入れたプラズマ運動論をもとにした理解が必要となる。このようなプラズマ乱流を運動論的プラズマ乱流と呼ぶ。この運動論的プラズマ乱流が、磁気流体乱流からどのようにして生成されるのかを知ることで、太陽風に代表されるような無衝突プラズマ乱流の散逸機構の理解を深めることが出来る。

2. 研究の目的

本研究では、磁気流体プラズマ乱流がどのようにして運動論的プラズマ乱流を生成するのかについて理解を深めることを目的としている。特に太陽風中で頻りに観測されている運動論的 Alfvén 波動や magnetosonic/whistler 波動といった運動論的な特徴のもとで現れる波動に注目している。

ここでは、磁気流体プラズマ波動の代表であり太陽風中で支配的に存在している Alfvén 波動からどのようにして運動論的プラズマ波動が生成され、それらがどのような性質を持つ波動なのかについて焦点を当て、研究成果を示す。

3. 研究の方法

本研究では、磁気流体プラズマ中の波動として代表的な Alfvén 波動の重ね合わせで形成されるプラズマ乱流の発展を、運動論的効果を含めたプラズマ粒子シミュレーションを用いて再現することでこの性質を明らかにする。ここで用いる粒子シミュレーションは TRISTAN¹ と呼ばれるコードが基礎としている。2次元平面に超粒子（電子、イオンを代表する荷電粒子）を約 1.7×10^{10} 個用いることで、磁気流体的に近似可能な空間スケールサイズを含めた運動論的プラズマの振る舞いを再現している。シミュレーション空間のスケールはイオン慣性長の約 40 倍である。磁気流体的なプラズマの振る舞いと運動論的なプラズマの振る舞いを分けるスケールサイズはイオン慣性長の 2π 倍程度であることを考えると、運動論的スケールより十分大きな空間領域を確保出来ていると考えられる。プラズマ圧力と磁気圧との比に相当するプラズマ β は 0.1 を想定し、太陽風プラズマのパラメータ範囲内としている。初期に背景磁場を与え、この上にさまざまな伝搬角を持った Alfvén 波動をセットする。波長はシミュレーション空間中に 3 波長以下となるようにセットし、長波長の Alfvén 波動同士の相互作用のみを想定した。波動振幅は各モードで同じとして、与えた波動の磁場エネルギーは背景磁場エネルギーの約 7%程度としている。

この粒子シミュレーションは大規模な計算リソースを必要とするため、名古屋大学のスーパーコンピュータ「不老」を用いて計算を行った。MPI によるノード間並列と OpenMP によるノード内並列を併用したハイブリッド演算で実行している。

4. 研究成果

本研究により得られた主な研究成果は以下となっている。

1. Alfvén 波動乱流の非線形相互作用により、線形理論では再現出来ない波動減衰が確認された。
2. 短波長側へ波動エネルギーの輸送が起こり、運動論的乱流領域で運動論的 Alfvén 波動、magnetosonic/whistler 波動、イオン音波、イオンサイクロトロン波動といった、太陽風で多く観測されている波動が生成された。
3. 運動論的乱流域では magnetosonic/whistler 波動の生成が最も支配的となった。

(1) Alfvén 波動乱流の短時間での減衰について

図 1 は初期に与えた Alfvén 波動の磁場摂動のエネルギーとイオンの流れの運動エネルギーの時

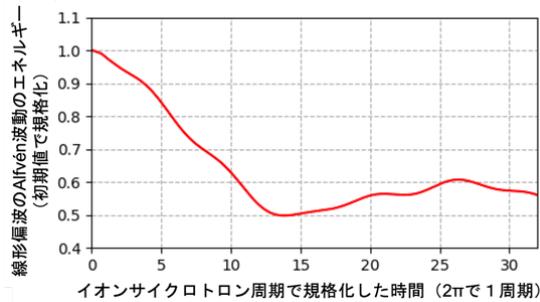


図 1 初期に与えた Alfvén 波動乱流のエネルギーの変化。

間変化を示している。これより、初期に与えた波動のエネルギーは、シミュレーション開始直後から減衰を初め、エネルギーが半分程度になって以降、減衰が飽和した。線形理論では、イオン慣性長より十分大きなスケールを持った波動はほぼ減衰しないはずであるが、運動論効果と非線形効果を含んだ本シミュレーションにおいて、線形理論とは顕著な違いが確認された。これは、有限振幅を持った Alfvén 波動の相互作用により、非線形的なカスケード（短波長側へのエネルギー輸送）や異なる特徴を持った波動へのモード変換が駆動されたと考えられる。本研究ではこの両方を示唆する結果が得られている。

(2) 短波長側へ波動エネルギーの輸送と運動論的波動の生成

図 2 は磁場摂動の波数-周波数スペクトルを示している。左図は背景磁場に対してほぼ並行方向に伝播している波の磁場摂動、右図はほぼ垂直方向に伝播している磁場摂動を示している。破線はそれぞれ線形理論から導き出されている運動論的波動の分散関係である。ここで、ICW はイオンサイクロトロン波動、MSWs は magnetosonic/whistler 波動、KAWs は運動論的 Alfvén 波動の分散関係を示している。シミュレーションから得られている波の特徴はこれらの波の特徴とよく一致することが確かめられ、このことより、初期に与えた Alfvén 波動は短波長側へカスケードする際にそれぞれの波動モードへ変化していると考えられる。ここで初期に与えた Alfvén 波動はイオン慣性長で規格化された波数で 0.5 以下である。

図 3 の左図は背景磁場に並行方向の電場摂動に対する波数-周波数スペクトル、右図はイオン密度の摂動に対する波数-周波数のスペクトルを示している。それぞれ背景磁場にほぼ並行方向に伝播する波のスペクトルを示している。左図を見ると、赤破線で示されるイオン音波 (IAWs) の分散関係に乗った静電場が現れているのがわかる。右図のイオン密度摂動にも IAWs の特徴を捉えたスペクトルが現れている。また、それぞれのスペクトルには MSWs の分散に乗る成分も見られ、わずかな斜め伝播成分の摂動 (圧縮成分) が含まれていることがわかる。ここで左図の長波長側 (波数が小さい側) で周波数が MSWs より幾分周波数が高い静電場成分が現れている。これは IAWs と MSWs による 3 波共鳴の条件を満たしており、線形的な波動分散に乗らないものの、非線形結合を介して強制的に励起されたものと考えられるが、現在その詳細なメカニズムと役割はわかっていない。

図 2 および図 3 で示される結果より、最も優位に高波数側へカスケードしている成分は、背景磁場に対して準垂直方向へ伝播する MSWs であることがわかる。これは初期に与えた Alfvén 波動とは異なる波動モードであり、Alfvén 波動からのカスケードが直接的な原因とは言えない。

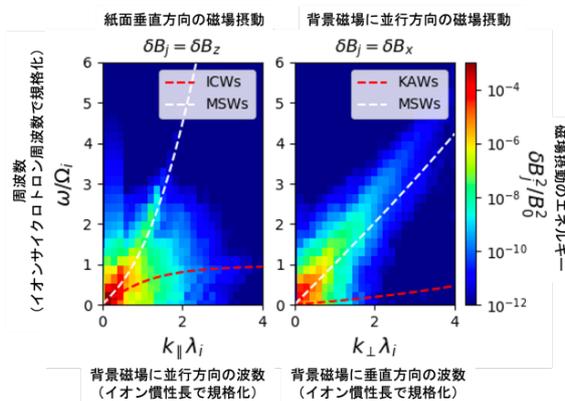


図 2 磁場摂動の波数-周波数スペクトル。(左) 背景磁場にほぼ並行方向に伝播する波のスペクトル。白破線は magnetosonic/whistler 波動の分散関係。赤破線はイオンサイクロトロン波動の分散関係。(右) 背景磁場にほぼ垂直方向に伝播する波のスペクトル。白破線は magnetosonic/whistler 波動の分散関係。赤破線は運動論的 Alfvén 波動の分散関係。

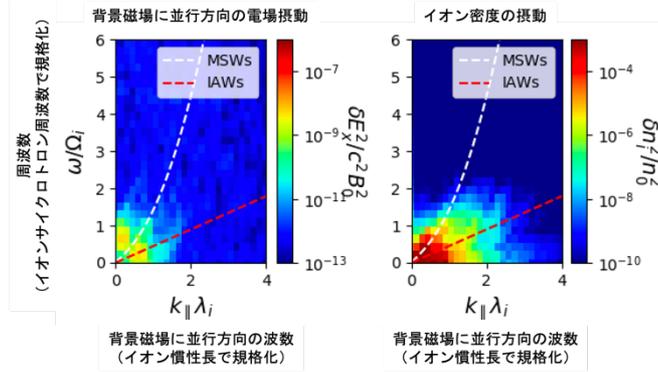


図 3 背景磁場にほぼ平行方向伝播する波の波数-周波数スペクトル。(左) 静電場摂動のスペクトル。白破線は magnetosonic/whistler 波動の分散関係。赤破線はイオン音波の分散関係。(右) イオン密度摂動のスペクトル。白破線、赤破線ともに左図と同様。

これについては (3) において言及する。一方、KAWs と ICWs は、低周波側で Alfvén 波動と分散関係上関わりの強いモードであり、長波長側からのカスケードに伴って励起されたと考えられる。また、IAWs の励起については、これまで多くの研究がなされてきた有限振幅 Alfvén 波動の decay 不安定性や、Ponderomotive 力が原因として挙げられる。今回実施した大規模粒子シミュレーションにより、長波長の Alfvén 波動の相互作用により、運動論的なさまざまな波動が励起され、その中で準垂直伝搬の MSWs が支配的となりえることがわかった。

(3) 運動論的乱流域での magnetosonic/whistler 波動 (MSWs) の生成要因

図 4 は磁場摂動の圧縮成分 (背景磁場に対して平行方向の摂動成分) とイオン密度との相互相関係数の時間変化を示している。この値が正 (負) の場合はこれらが正 (負) の相関を持つことを意味している。この値が 0 の場合は、相関が無い、もしくは非圧縮を意味する。初期に与えている Alfvén 波動は非圧縮であるため、初めは 0 付近を推移している。その後、正の方へ発展し、0.5 付近を維持していることがわかる。値が飽和する時間スケールは、初期に与えた波動のエネルギー減衰が飽和する時間帯に一致する (図 1)。それぞれの摂動のエネルギーは長波長側が支配的であることから、この相互相関係数は長波長側の性質を反映していると考えられる。このような正の相関は、磁気流体近似下における fast モードに相当し、今回実施したシミュレーションは Alfvén 波動の相互作用によって fast モードが励起されていることを意味している。Chandran による理論研究²により、Alfvén 波動同士の相互作用によって fast モードが生成されることが指摘されている。ここで提案されているプロセスが fast モードの励起を引き起こしていると考えられる。長波長側で励起された fast モードは、MSWs と密接に関係しており、fast モードのカスケードによって MSWs が励起されたと考えられる。さらに、齊藤らのこれまでの研究³により、MSWs による運動論的プラズマ乱流は、背景磁場に対して準垂直方向に優位なカスケードを引き起こすことがわかっており、これまでの結果と矛盾しない。このことより、Alfvén 波動の相互作用によって非線形的に励起された fast モードがカスケードを起こすことによって、MSWs がさらに高波数までエネルギーを輸送していることがわかった。

これまでの 1 AU 付近での太陽風観測によると、KAWs が運動論プラズマ乱流領域で多く観測されており、MSWs の観測は比較的低い頻度で観測されている。太陽風中では多くの Alfvén 波動が太陽から遠ざかる方向へ伝搬しているということが Marsch&Tu⁴ による観測によってわかっており、このような条件下では Alfvén 波動のカスケードが支配的となり運動論的 Alfvén 波動が優位に励起されると予想される。一方で、太陽質量放出や高速太陽風の相互作用領域において太陽風擾乱が激しい場合は、状況が変わると考えられる。さまざまな方向に Alfvén 波動が伝搬出来

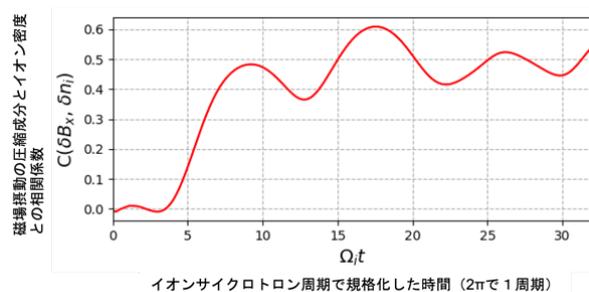


図 4 磁場摂動の圧縮成分とイオン密度摂動の空間的な相関関係の時間変化。

るようになると、これらの相互作用により fast モードが励起されやすくなると考えられる。このような状況下において、運動論的プラズマ乱流として MSWs が支配的になる場合がありえることを本研究の結論とする。

参考文献

1. O. Buneman, “Simulation techniques and software,” (1993).
2. B. D. G. Chandran, “Weak Compressible Magnetohydrodynamic Turbulence in the Solar Corona,” *Phys. Rev. Lett* 95 (2005), 10.1103/PhysRevLett.95.265004.
3. S. Saito, S. P. Gary, and Y. Narita, “Wavenumber spectrum of whistler turbulence: Particle-in-cell simulation,” *Phys. Plasmas* 17 (2010), 10.1063/1.3526602.
4. E. Marsch and C. Y. Tu, “On the radial evolution of MHD turbulence in the inner heliosphere,” *J. Geophys. Res.* 95 (1990), 10.1029/ja095ia06p08211.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 齊藤慎司
2. 発表標題 Development of Shear Alfvén Mode Turbulence: Particle-In-Cell Simulations
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S.Saito, Y. Nariyuki, and T. Umeda
2. 発表標題 Particle acceleration and heating in magnetosonic/whistler mode turbulence
3. 学会等名 28th International Toki conference on Plasma and Fusion research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Saito, Y. Nariyuki, and T. Umeda
2. 発表標題 Cascade of shear Alfvén mode turbulence to electron kinetic scales: Particle-In-Cell simulation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤慎司
2. 発表標題 アルフェン乱流カスケードに伴う運動論的波動乱流の生成
3. 学会等名 STEシミュレーション研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤慎司
2. 発表標題 Waves in Kinetic-scale turbulence generated from decaying Alfven mode turbulence: Fully kinetic particle-in-cell simulation
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------