

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2008～2009

課題番号：20840042

研究課題名(和文) 太陽風 MHD 乱流の解明へ向けたアルフェン波のパラメトリック不安定性の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on parametric instabilities of Alfvén waves: Toward an explication of the solar wind MHD turbulence

研究代表者

成行 泰裕 (YASUHIRO NARIYUKI)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・助教

研究者番号：50510294

研究成果の概要(和文)：

本研究では、太陽風(太陽から噴き出す高速のプラズマ流)中において、アルフェン波という太陽表面で生成されている波動から磁場やプラズマの乱れた状態(MHD乱流)が生成される過程について、理論的側面からの詳細な解析を行った。本研究の進展により、(1)理論研究と観測研究の矛盾の一部(アルフェン性の減少問題、非対称な速度分布の生成問題)を修正した新しいアルフェン乱流の発展過程モデルの構築、(2)ビームプロトンの散乱に伴う非線形段階でのパラメトリック不安定性の変化過程の発見、などの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：

Parametric instabilities of solar wind Alfvén waves are theoretically and numerically studied. The following represent the main results of this study: (i) Important characteristics in the solar wind MHD turbulence are naturally reproduced by nonlinear evolution of Alfvénic turbulence with more realistic power spectrum. (ii) Even if a decay instability is dominant at the linear stage, the parent wave can mainly be dissipated by the modulational instability at the nonlinear stage, due to time evolution of the proton velocity distribution functions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	840,000	252,000	1,092,000
2009年度	770,000	231,000	1,001,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,610,000	483,000	2,093,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：太陽風、惑星間空間、プラズマ波動、アルフェン波、パラメトリック不安定性

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

地球上には太陽からの光が注がれているが、太陽からは光以外にも、高速のプラズマ流（太陽風）が噴き出しており、地球などの太陽系惑星は常にその影響下にある。1960年代以降の人工衛星による太陽風の「その場」観測によって、大振幅の太陽風 MHD 乱流（背景磁場で規格化された振幅が 1 のオーダー）の存在が明らかとなった。この太陽風 MHD 乱流は、地球磁気圏の活動にも大きな影響を及ぼしていることが、これまでの研究で確かめられている。

地球近傍で観測される太陽風 MHD 乱流は、一般に高速太陽風中ではアルフェン波と呼ばれる磁気流体波であり、低速太陽風中では圧力平衡構造が主成分の発達した乱流であることが知られている。この 2 つの乱流の違いは、低速風においても太陽近傍では高速風同様にアルフェン波で構成された乱流であるが、地球近傍に届くまでにアルフェン波の非線形性による不安定性（パラメトリック不安定性）が十分成長することによって発達した乱流状態が生成されているため、と解釈されている。実際に、地球より太陽から遠方の場所で観測される高速太陽風中の MHD 乱流は地球近傍での低速風 MHD 乱流に性質が似かよっていることが確認されている。しかし現在までのところ、この太陽風 MHD 乱流の発展過程に関する実証的な観測研究は成功しておらず、理論研究の予測するところも、不安定性の成長率、励起される波動の種類などの点で観測事実と矛盾していた。

太陽風プラズマは、①ベータ比（プラズマ圧と磁気圧の比）が大きく、②べき型のスペクトルを持つ非単色アルフェン波が存在している。一方で、太陽風アルフェン波のパラメトリック不安定性についての過去の研究では、それらの効果を考慮した議論が盛んに行われてきたが、各論にとどまっておらず、観測結果を説明するには至っていなかった。近年になり、申請者らによって高ベータ比の効果（イオン運動論効果）と非単色スペクトルの効果を包括的に取り扱った理論、シミュレーション研究が行われた。その結果、イオン運動論効果を考慮した場合には単色波の場合と非単色波の場合とで不安定性に大きな違いが生じ、非単色アルフェン波の不安定性は太陽風中の発達した MHD 乱流を生成するのに十分な成長率を持ち、局所構造生成など観測結果と定性的に一致することが明らかとなった。

2. 研究の目的

本研究は、太陽風中の磁気流体乱流（MHD 乱流）の発展過程の解明へ向けた、

太陽風アルフェン（Alfvén）波のパラメトリック不安定性の新しい理論の構築を目的としている。本研究では特に、これまで各論として研究されてきた太陽風プラズマの諸問題と太陽風アルフェン波のパラメトリック不安定性との関連性・独立性の解明に焦点を当て、将来衛星計画による太陽風 MHD 乱流の発展過程の解明へ向けた理論的基盤を構築することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、(1)理論モデルの構築・解析、(2)数値シミュレーションによる解析を相補的に組み合わせ、研究を遂行した。具体的には、イオン運動論・多種イオンなどの効果を含む理論モデルの導出・解析を行い、パラメータ空間における不安定性の特性を明らかにし、数値シミュレーション解析を行った。

4. 研究成果

平成 20 年度は、太陽風中におけるパラメトリック不安定性とプロトンビーム成分との関連性・独立性を精査するため、新しい理論モデルの構築・解析、基礎的な数値シミュレーション（数値計算）による解析を行った。まず、これまでの理論研究を進展させる形で、イオン運動論効果に加えて多種イオンの効果を含む理論モデルの導出・解析を行った。並行して、実際に観測されているアルフェン乱流のスペクトルを模擬した初期条件下における数値計算を行い、バイ・コヒーレンスなどの手法による非線形性の評価から、これまでの理論研究と観測研究の矛盾の一部を修正したアルフェン乱流の発展過程モデルを構築した。次に、イオン運動論・多種イオンの効果を含む数値計算を行い、太陽風アルフェン波の非線形発展が線形的に安定なプロトンビームにも大きく影響を受けること、プロトンビームの一部が大振幅アルフェン波との相互作用によってアルフェン速度の 10 倍程度にまで加速されることを示した。加えて、Vlasov-Hall-MHD コードを用いて、Alfvén 波の非線形発展に伴うプロトンビーム生成の詳細な物理過程について議論を行った。

平成 21 年度は前年度の結果を踏まえ、より詳細な太陽風プラズマの性質と MHD 乱流の発展・減衰過程の関連性・独立性の精査を進め、以下のような知見を得た：(A)パラメトリック不安定性が非常に弱い場合でも、振幅変調による非線形ランダウ減衰によってイオン加熱が生じること、(B)一方で、変調不安定性が生じた場合には波動間の位相相関による急峻な波束が形成され、非線形ラン

ダウ減衰により主に減衰する場合とで磁場の振幅に2倍近くの差ができること、(C)このような波束は相対運動する磁場構造による加速(“ソリトン加速”)などによりイオンの平行方向に加速に大きく寄与すること、(D)有限振幅の電磁波による“非共鳴捕捉”による擬似的な垂直方向の加速がワレンの関係で表される“アルフェンのな”平衡状態を表す位相空間での平衡点周りの非線形捕捉として生じ、その捕捉領域が実際の太陽風中で観測されるイオン分布と同様の平行方向の速度に対して非対称な形をしていること、(E)非共鳴なアルフェン乱流の非線形発展においては“見かけ上の”温度異方性として蓄えられているイオンの垂直方向のエネルギーが局所的な熱エネルギーに対応する“実質的な”温度異方性に変換されていること。これらの結果は太陽風中で観測されるような温度異方性を伴う非対称なイオンの速度分布の形成には、パラメトリック不安定性だけではなく振幅変調に伴う非線形ランダウ減衰や太陽表面の磁束管におけるMHD乱流(磁場擾乱)の振幅増幅過程も深く関わっていることを示唆している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

①Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Heating and acceleration of ions in non-resonant Alfvénic turbulence, in press. (refereed)

②Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Parametric instabilities of circularly polarized Alfvén waves in plasmas with beam protons, *J. Geophys. Res.*, 114, A07102, 2009. (refereed)

③ Y. Nariyuki, Stabilization of electromagnetic ion beam instabilities by finite amplitude Alfvén waves revisited, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, 8, 217, 2009. (refereed)

④T. Kumashiro, T. Hada, Y. Nariyuki, and T. Umeda, Vlasov simulation of finite amplitude magnetohydrodynamic waves in the solar wind: Development of Vlasov-Hall-MHD code, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, 8, 831, 2009. (refereed)

⑤Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi On nonlinear evolution of Alfvénic turbulence in low beta plasmas *Physics of Plasmas*, 15, 114502, 2008.

(refereed)

[学会発表] (計11件)

①[invited]

Y. Nariyuki

Cross-scale coupling in solar wind Alfvénic turbulence
International workshop “ERG, SCOPE and Beyond”, 2009年11月
宇宙科学研究所

②[invited]成行泰裕

太陽風磁気流体波動と太陽風シミュレーションについて
STE シミュレーション研究会・宇宙プラズマ波動研究会, 2009年10月
仙台市戦災復興記念館,

③成行泰裕, 羽田亨, 坪内健

プロトンビームを含むプラズマ中におけるアルフェン波のパラメトリック不安定性
日本地球惑星科学連合 2009年大会
2009年5月
幕張メッセ

④成行泰裕, 羽田亨, 坪内健

低ベータプラズマ中のアルフェン乱流の非線形発展について
日本地球惑星科学連合 2009年大会
2009年5月
幕張メッセ

⑤成行泰裕, 羽田亨, 坪内健

太陽風プラズマの速度分布と Alfvén 波のパラメトリック不安定性
日本物理学会 第64回年次大会, 2009年3月
立教大学

⑥太陽風 Alfvén 乱流: 非熱的プラズマとスケール間結合

成行泰裕, 松清修一, 羽田亨, 神代天, 坪内健, 梅田隆行
STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会, 名古屋大学
2009年1月

⑦ [Invited] On nonlinear evolution of Alfvénic turbulence in the solar wind

Y. Nariyuki

磁気圏電離圏シンポジウム, 宇宙科学研究所
2008年11月

⑧成行泰裕

宇宙プラズマ波動の変調不安定性
応用力学研究所 研究集会「非線形波動の数学と物理」、2008年11月
九州大学

⑨神代 天、羽田 亨、成行 泰裕、梅田 隆行
準平行伝播 Alfvén 波のパラメトリック不安定性の
グラソフシミュレーション：波動の長時間発展と粒子加速、
第124回地球電磁気・地球惑星圏学会、2008年10月
仙台市戦災復興記念館

⑩Y. Nariyuki

Stabilization of electromagnetic ion beam instabilities by finite amplitude Alfvén waves revisited
14th International Congress on Plasma Physics, 2008.9
Fukuoka

⑪Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi
A comprehensive model on parametric instabilities of Alfvén waves in the solar wind
14th International Congress on Plasma Physics, 2008.9
Fukuoka

6. 研究組織

(1) 成行 泰裕 (YASUHIRO NARIYUKI)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・助教
研究者番号：50510294