

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740324

研究課題名（和文） 磁気流体波による太陽風非平衡プラズマの生成過程

研究課題名（英文） Non-equilibrium plasmas associated with magnetohydrodynamic waves in solar wind plasmas

## 研究代表者

成行 泰裕（NARIYUKI YASUHIRO）

富山大学・人間発達科学部・准教授

研究者番号：50510294

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、太陽風中の非平衡な速度分布が磁気流体波によって生成される過程について、数値計算・理論解析を用いた議論を行った。その結果、(1)磁気流体波が存在する場合に現れる「見かけの」非平衡速度分布が磁気流体系の平衡状態に対応していること、(2)太陽コロナから伝搬する磁気流体波が伝搬過程で生じる急峻化の過程で非平衡な速度分布が生成されること、(3)非平衡な速度分布によって励起される短波長の波動によって低周波の磁気流体波の減衰が促進されること、などが明らかになった。

## 研究成果の概要（英文）：

In the present study, the solar wind non-equilibrium plasmas associated with magnetohydrodynamic (MHD) waves are discussed. The main results are as follows: (1) The “apparent” temperature anisotropy associated with MHD waves corresponds to the magnetohydrodynamic equilibrium state (Alfven-Beltrami field), (2) Ion beams can be formed by the nonlinear steepening of the MHD waves propagating from the solar corona, (3) The low-frequency MHD waves are rapidly dissipated due to the presence of the beam-induced short-wavelength waves.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽風・惑星間空間、宇宙プラズマ、プラズマ波動

## 1. 研究開始当初の背景

熱いお湯の入った茶碗からは、湯気が立ち上り、いろいろな形の渦を作る。さらにお湯自体の中にも、不規則に動く透明な模様が見える。寺田寅彦は随筆「茶わんの湯」の中で茶碗のお湯から竜巻や季節風などの大規

模な自然現象を論じたが、これらの一見異なるように見える現象の背後には「非平衡性」という、物理的な共通点がある。一般に、様々なスケールの自然現象で見られる多様な時空間発展は、非平衡性をその本質として含んでいる場合が多い。

宇宙空間に遍在するプラズマも、様々な励起源を持つ、本質的に非平衡なプラズマである。太陽からは高速のプラズマ流（太陽風）が吹き出しているが、1960年代以降の人工衛星による「その場」観測によって、この太陽風プラズマも熱平衡なマクスウェル速度分布ではない、多様な非平衡性を持つプラズマであることが明らかになった。具体的には、プロトンビーム成分、温度異方性、イオン種間速度差、電子-イオン温度差、電子ストロー分布、などが確認されており、このようなプラズマの非平衡性は現在でも謎の多いMHD波による太陽コロナでのプラズマ加熱過程や太陽風プラズマの加速・加熱過程を反映していると考えられている。2010年代以降には国内外において複数の太陽観測衛星、内部太陽圏探査衛星が計画されており、太陽風非平衡プラズマの詳細な「その場」観測と撮像観測による太陽表面のプラズマダイナミクスの探求が同時期に行われる可能性が高い。これにより、太陽風プラズマの複雑な物理過程の理解が大きく進展する可能性があるが、一方で観測計画をサポートする理論は大きな問題を抱えている。

これまで、波動加熱過程にはイオンとサイクロトロン共鳴をしない低周波MHD波の散逸過程など、未解決の問題があった。近年になり、空間一次元だが太陽光球面から水星軌道近傍(0.3AU)までの領域をカバーする大域的な数値計算（以下、大域的数値計算）が行われ、開いた磁場構造においてはコロナ加熱、太陽風加速が低周波MHD波の非線形不安定性によって自然に再現できることが示された。しかしながら、一連の研究はMHDモデルを用いているため、観測される非平衡プラズマとの整合性が議論されていない。これは、現在の計算機の性能上、大域的数値計算ではプラズマの運動論的取り扱いが困難であることに起因している。このことは、コロナ加熱の大域的数値計算、3次元太陽風MHDモデル全般における問題点でもある。

一方で、理論解析や、コロナや太陽風の局所的な部位についての数値計算（以下、局所的数値計算）を用いた研究からは、新しい素過程が提唱されているが、同様の理由から各論にとどまっておき、コロナ加熱・太陽風加速における重要性は明示されていない。このような大域的モデルと局所的モデルの隔たりを解決するため、近年申請者らによって、運動論効果が特に重要な背景磁場平行方向を運動論モデルで、MHD的な垂直方向はMHDモデルで記述する運動論的MHDモデル（Vlasov-MHDモデル）を用いた数値計算が提案された。このVlasov-MHDモデルは、太陽コロナから0.3AUまでのパラメータにおいては運動論モデルによるプロトンビーム生成過程の解析結果と良く一致し、さらに従

来の運動論モデルよりも計算負荷が小さいため、大域的数値計算への適用が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究は、これまでの申請者らの研究成果を発展させる形で、太陽風中の非平衡プラズマ生成過程の運動論的MHDモデルを用いた大域的・局所的数値計算、理論解析を行い、波動加熱過程との統一的な知見を得ることを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、背景プラズマ・磁場の非一様性を含んだ大域的な数値計算は申請者らが開発した運動論的MHDモデル

（Vlasov-MHDモデル）を用いて行った。

一様場を仮定した運動論シミュレーションは主にイオンハイブリッドコードを用いて行ったが、一部の関連する研究は研究協力者の協力の元Vlasovコード、全粒子コードを用いて行った。また、上記の数値計算と並行して理論モデルの構築も行った。

## 4. 研究成果

平成22年度はまず過去の我々の研究を発展させる形で、局所的数値計算および計算モデルの改良を行った。本年度前半においては、まず簡単な静電波を題材にVlasovシミュレーションを用いた非線形波動の解析を行い、単純なスペクトル解析では確認できない波数モード間の非線形結合を定量化する手法を確立した。平行して、太陽風MHD波動についてのイオンハイブリッドシミュレーション(局所的数値計算)を行い、低周波MHD波動の非線形発展においては背景磁場に対して垂直なイオンのエネルギーがほぼ一定値であることを発見した。この条件により、これまで流体モデルでは正確に取り扱われてこなかった低周波波動によるイオンの非共鳴加熱の効果を大域的数値計算モデルへ取り込むことが可能となる。後半では、我々が開発した運動論的MHDモデルの詳細な解析を行い、モデルが厳密に成立するためには“static approximation”として知られる磁場変動と密度陽動の関係式が成立する必要がある一方で、太陽コロナから0.3AU辺りまで考えられているMHD波動の非線形性の範囲ではイオンハイブリッドシミュレーションと定量的に同様の結果を再現することを確認した。平行して、プロトンビーム起源の運動論アルフェン波と太陽風MHD波動の非線形相互作用について前半期で確立した手法を用いた解析を行った。その結果、波長が1オーダー以上違う場合においても、運動論アルフェン波の非線形性により太陽風MHD波動の効率的な減衰が生じることが明らか

になった。

平成 23 年度は昨年度までに得られた結果に基づいて理論モデルの構築および大域的数値計算コードの開発を進めた。理論面においては、本年度は特にプラズマと共鳴を起こさない低周波の磁気流体波による非平衡プラズマの生成過程の理解において大きな進展があった。公表済みの結果の概要を述べると、(1)磁気流体波の Vlasov 系における厳密解(Sonnerup-Su 解)が低周波極限において非共鳴な磁気流体乱流による加熱の式を与えること、(2) 温度異方性を伴う形に拡張した Sonnerup-Su 解が速度空間上で見られる「見かけの温度」に対応した非対称な構造を再現すること、(3)Sonnerup-Su 解が速度空間上の最大エントロピー分布として与えられ、かつ磁気流体波解自体が磁気流体系の緩和状態として得られること、を明らかにした。これらの結果は、太陽風中の非平衡プラズマの一部は磁気流体波が一種の緩和状態として存在することに付随した一種の「平衡な」状態であるということを示している。このことは、「本当の」非平衡なプラズマの生成過程を解明する上での重要な前提となるものであり、運動論的 MHD モデル (Vlasov-MHD モデル) と運動論モデルの結果を比較する上でも重要な知見である。数値計算コードの開発においては、Vlasov 系をより高精度で解く手法を開発し、結果を論文で公表した。

最終年度である平成 24 年度は太陽風 MHD 波動による非平衡プラズマの生成過程の体系的な理解を目的として、以下のような研究を行った：(1)運動論—磁気流体系のハイブリッドモデル(球座標 Vlasov-MHD モデル)を用いて、大域的な非一様性を持つ太陽コロナ・太陽風プラズマにおける MHD 波伝搬の非定常シミュレーションを、人工的な粘性・抵抗項を含まない形で実行した、(2)(1)において MHD 波の有限な周波数スペクトル幅の効果で平行伝搬波動においても伝播過程において波の急峻化が生じ、それに伴ってイオンビーム成分が生成されることを確認した、(3)多次元 Vlasov-MHD モデルの理論解析を進め、低ベータ・小伝搬角の範囲では定量的に妥当な評価が可能であることを示した、(4)運動論アルヴェン波と非単色 MHD 波の非線形相互作用過程の解析のパラメータ研究を進め、2 桁以上波数が異なる場合も MHD 波の減衰が生じることを確認した。(1)と(2)は球座標・開放系における大振幅 MHD 波の非線形発展を非アドホックな運動論効果を含めて直接数値計算を行った先駆的な業績である。(2)の非線形発展過程においては、背景プラズマ・磁場の非一様性によるアルヴェン速度の非一様性によって太陽近傍では伝搬に伴う波長の収縮が起こり、波の急峻化を促進することを見出した。これは海洋波における

浅水変形と同様の機構である。このような WKB 的な非一様性の効果は太陽風のアルヴェンマッハ数が比較的小さいときに顕著になることから、太陽風の状態と乱流スペクトルとの間の相関に関係している可能性がある。同様に、(3)と(4)も太陽風 MHD 波動の非線形発展過程の解明に寄与する結果である。特に、(3)を通じて過去の理論モデル間の関係が示された意義は大きく、当該分野の物理モデルの成熟への寄与が期待される。また、大規模 MHD 計算データを用いたテスト粒子計算を行い、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  項のみでは Vlasov-MHD モデルで観測された非平衡プラズマの生成が起こらないことが確認された。現在は、MHD 系との差異をより定量的に評価するために、Vlasov-MHD モデルの直接数値計算において現象論的にイオン・電子の緩和効果を導入した場合の非線形発展過程についての議論を進めている。

#### 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 9 件)

[1]成行 泰裕, 太陽風アルヴェン乱流と非平衡プラズマ, プラズマ・核融合学会誌, 88, 575, 2012.

[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2012\\_10/jspf2012\\_10-575.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2012_10/jspf2012_10-575.pdf)

[2]Y. Nariyuki, On apparent temperature in low-frequency Alfvénic turbulence, Phys. Plasmas, 19, 84504, 2012. (refereed)  
DOI:10.1063/1.4747499

[3]Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi, Nonlinear dissipation of circularly polarized Alfvén waves due to the beam-induced obliquely propagating waves, Phys. Plasmas, 19, 82317, 2012. (refereed)  
DOI: 10.1063/1.4748296

[4]T. Umeda, Y. Nariyuki, D. Kariya, A non-oscillatory and conservative semi-Lagrangian scheme with fourth-degree polynomial interpolation for solving the Vlasov equation, Computer Phys. Communications, 183(5), 1094, 2012. (refereed)  
DOI: 10.1016/j.cpc.2012.01.011

[5]Y. Nariyuki, Equilibrium velocity distributions in parallel propagating low-frequency Alfvénic turbulence, 18, 092118, 2011. (refereed)  
DOI: 10.1063/1.3642617

[6]Y. Nariyuki, On entropy-maximized velocity

distributions in circularly-polarized finite amplitude Alfvén waves, Phys. Plasmas, 18, 052112, 2011. (refereed)  
DOI:10.1063/1.3590857

[7]Y. Nariyuki, T.Umeda, T.Kumashiro, T.Hada, A new numerical method for simulating the solar wind Alfvén waves: Development of the Vlasov-MHD model, Planetary and Space Science, 59, 767, 2011. (refereed)  
DOI:10.1016/j.pss.2011.02.017

[8]Y.Nariyuki, T.Umeda, On the nonlinearity of the Langmuir turbulence excited by a weak electron beam-plasma interaction, Phys. Plasmas, 17, 054506, 2010. (refereed)  
DOI:10.1063/1.3425872

[9]Y.Nariyuki, T.Hada, K. Tsubouchi, Heating and acceleration of ions in non-resonant Alfvénic turbulence, Physics of Plasmas, 17, 072301, 2010. (refereed)  
DOI: 10.1063/1.3449592

[学会発表] (計 17 件)

[1]成行 泰裕, 羽田 亨, 坪内 健, 太陽風アルヴェン乱流における多スケール結合, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013.03.26.~2013 年 03.29., 広島大学

[2]Y. Nariyuki, Collisionless Damping and Energy Transfers in Solar Wind Alfvénic Turbulence, Nonlinear Waves and Chaos 9 (招待講演), 2013.03.04.~2013.03.08., La Jolla Beach & Tennis Club

[3]成行 泰裕, 太陽風アルヴェン乱流とイオンビーム不安定, プラズマ・核融合学会 第 29 回年会 (招待講演), 2012.11.27.~2012.11.30., クローバープラザ

[4]成行 泰裕, 齊藤 慎司, 中村 琢磨, 梅田 隆行, 運動論効果を含む太陽風磁気流体乱流モデル, 第 132 回SGEPSS総会および講演会, 2012.10.20.~2012.10.23., 札幌コンベンションセンター

[5]Y. Nariyuki, Heating of ions in nonresonant Alfvénic turbulence, solar wind 13, 2012.06.18.~2012.06.22., Sheraton Keauhou Resort & Spa (Kona-Kailua, Big Island, Hawaii, USA)

[6]成行 泰裕, 太陽風プラズマ中の Alfvén乱流と非平衡プラズマ, プラズマ科学のフロンティア研究会 2011 研究会 (招待講演), 2011.9.8, 核融合科学研究所

[7]Y. Nariyuki, Alfvénic turbulence and non-equilibrium ions in the solar wind, 2011 International Space Plasma Symposium (招待講演), 2011.8.16, 国立成功大学(台湾)

[8]Y. Nariyuki, Entropy-maximized Velocity Distributions in Nonlinear Alfvén Waves, AOGS 2011, 2011.8.11, 台北国際会議中心(台湾)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

[http://evaweb.u-toyama.ac.jp/html/100000192\\_ja.html](http://evaweb.u-toyama.ac.jp/html/100000192_ja.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

成行 泰裕 (YASUHIRO NARIYUKI)  
富山大学・人間発達科学部・准教授  
研究者番号: 22740324

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

梅田 隆行 (UMEDA TAKAYUKI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
研究者番号: 40432215

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

鈴木 建 (SUZUKI TAKERU)  
名古屋大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 80431782

羽田 亨 (HADA TOHRU)  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号: 30218490

成田 康人 (NARITA YASUHIITO)  
Space Research Institute, Austrian Academy  
of Sciences (Austria), Senior Scientist