

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03500

研究課題名（和文）ホイッスラー波の特性を生かした新奇なイオン加熱機構の解明とその応用展開

研究課題名（英文）Elucidation of a Novel Ion Heating Mechanism Utilizing the Characteristics of Whistler Waves and Its Application Development

研究代表者

佐野 孝好（Sano, Takayoshi）

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：80362606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電磁波によるプラズマの加速や加熱は、地上のレーザー実験だけでなく、様々な天体現象で重要なプロセスとなっている。本研究では、ホイッスラー波の作る定在波が、相対論的な電子加速や、核融合イオンプラズマの生成などをもたらす非常に貴重な物理過程になりうることを数値シミュレーションおよび理論解析を用いて明らかにした。非常に単純ではあるが、従来見過ごされていた効果に着目することで、様々な応用展開が広がったと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験室プラズマとしては、従来困難であったレーザーによるイオン加熱を、電子に邪魔されることなく実現でき、到達温度が数10電子ボルトの核融合プラズマを直接生成することを示した。これは、全く新しいレーザー核融合方式になりうるものである。また、天体応用としては、近年話題の高速電波バーストとよばれるパルス的な発光現象の起源の絞り込みに寄与できる。伝播特性を明らかにすることで、未知の天体現象の解明に今後さらに迫っていけると期待している。

研究成果の概要（英文）：Acceleration and heating of plasmas by electromagnetic waves are essential processes in laboratory laser experiments and various astronomical phenomena. In this study, we show through numerical simulations and theoretical analysis that standing waves created by whistler waves can be a precious physical process that can lead to relativistic electron acceleration and the generation of fusion plasmas. Although very simple, focusing on this conventionally overlooked effect has opened up many applications.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：ホイッスラー波 レーザープラズマ 磁気圏プラズマ プラズマ粒子加速

## 1. 研究開始当初の背景

通常、プラズマ中を伝播するレーザー光には臨界密度が存在し、固体密度を越えるような高密度プラズマに入っていくことはできない。しかし、非常に強い磁場が存在すると、この状況は一変する。もし、電子サイクロトロン振動数がレーザー光の振動数よりも大きくなると、磁力線方向に伝播する低振動数のホイッスラー波が、プラズマ中を伝播できるようになる。その場合、臨界密度という制限は存在せず、ホイッスラー波はどのような密度のプラズマに対しても侵入できる。そうなると、電磁波であるホイッスラー波と高密度プラズマが直接相互作用できるようになり、従来考えられていなかった新しい物理機構によって、効率的なエネルギー変換や粒子加速現象が期待される(Sano et al., Phys. Rev. E, 2017; 2019; 2020)。

高強度ガラスレーザーなどで用いられる波長 1 ミクロン程度のレーザー光の場合、この臨界磁場強度は、およそ 10 キロテスラ(1 テスラは 1 万ガウス) に相当する。すなわち、この 10 キロテスラがレーザー・プラズマ相互作用に質的な違いをもたらす必要条件となる。近年、大阪大学の激光レーザーなど世界中の大型レーザー実験によって、1 キロテスラ程度の強磁場の生成が数多く確認されている(例えば、Fujioka et al., Sci. Rep., 2013)。さらに、その 100 倍である 100 キロテスラの発生も、数値シミュレーションによって既に予言されており、その実証実験が計画されている。つまり、10 キロテスラを越える極限磁場の実験室利用が目前に迫っており、「高強度レーザーと超臨界高密度プラズマの直接相互作用」の現実味が急速に高まっている。

このような背景を鑑み、本研究ではプラズマ粒子コード(PIC) を用いた第一原理シミュレーションによって、高密度プラズマ中の大振幅ホイッスラー波の伝播過程を理論的に明らかにする。研究方針の特色としては、簡潔な系を用いて現象の本質を抽出することで、複雑なプラズマ基礎過程を一つ一つ丁寧に理解していく。高密度プラズマと電磁波との直接相互作用をサーベイ的に調べ上げることで、効率的なエネルギー吸収過程や粒子加速機構の最適化を達成させたい。

## 2. 研究の目的

ホイッスラー波は右回り円偏光電磁波であり、電子とサイクロトロン共鳴を起こすことが知られている。レーザー強度が高い場合には、レーザー電場によって電子は相対論的速度にまで容易に加速されるため、サイクロトロン共鳴にも相対論効果を考慮する必要がある。実際、相対論効果で電子質量が実効的に重くなることで、磁場強度に関する共鳴条件範囲が拡大し、電子が加速されやすくなる(Sano et al., 2017)。つまり、電子は大振幅ホイッスラー波の恩恵を受けて、直接的かつ効率的に電磁波のエネルギーを吸収できる。

その一方で、ホイッスラー波とイオンの直接相互作用に着目した研究は、過去に遡ってもほとんど見当たらない。核融合研究では、最終的にイオンを高温に加熱する必要がある。したがって、ホイッスラー波との直接相互作用の恩恵を、イオンのみが享受できる状況が理想的である。そこで本申請では、超臨界密度プラズマ中のイオンとホイッスラー波の相互作用に注力する。すなわち、「電磁波(レーザー光)で高密度イオンを直接的かつ効率的に加熱することは可能か?」が、本研究の核心をなす問いである。

高効率なイオン加熱の実現のためには、「定在ホイッスラー波の崩壊によるイオン音波の励起」「プラズマ不安定によるイオン音波の散逸」が十分に短い時間で完了しなければならない。これらの時間スケールは、ホイッスラー波の振幅に強く依存するのはもちろんのこと、その他のプラズマパラメータによっても変化する。また、イオンの熱化を担うプラズマ過程としては、イオン二流体不安定や無衝突衝撃波などが考えられるが、具体的な機構や効率は未だ未解明である。本研究では、この定在ホイッスラー波によるイオン加熱に関する一連の物理過程を、多次元プラズマ粒子シミュレーションを用いて完全に理解することを目的とする。それと同時に、その先に見出される様々な応用展開についても検討を進める。

## 3. 研究の方法

### (1) 「磁場閉じ込めレーザー核融合」という新展開

ホイッスラー波を活用することで、磁場閉じ込めとレーザー加熱を複合した、新しい「磁場閉じ込めレーザー核融合」という新展開が期待できる。密度を固体密度以上に上げるために円柱形状のレーザー爆縮をすることで、同時に外部印加磁場も増幅させる。この時、磁気圧はガス圧よりも高くなっているため、磁場閉じ込めプラズマの状態に近い。その場面で、定在ホイッスラー波加熱を起こすことができれば、全く新しいデザインの核融合点火方式となりうる。ターゲットとしては水素・ホウ素反応を期待したアンモニアボラン(H6BN) を使うことを考えている。このような多種イオンを含むターゲットでイオン加熱がどのように進行するのか、エネルギー利得

が1を超える実験デザインは果たして可能か、などの疑問について詳しく調べていく。

#### (2) ホイッスラー波とホイッスラー波の相互作用による太陽風プラズマの加熱現象

地球近傍の惑星間空間でホイッスラー波が観測されている。太陽から遠方の領域で太陽風プラズマを高温に維持する機構は未解明であるが、このホイッスラー波同士が相互作用することで、プラズマ加熱に寄与できるかもしれない。レーザー駆動のホイッスラー波と異なり、自然界ではそれぞれのホイッスラー波の振動数は必ずしも同じにはならない。異なる振動数のホイッスラー波が対向ですれ違う際に、定在ホイッスラー波加熱と類似の現象を起こせるかどうかは自明ではない。そこで、太陽風プラズマを模擬したシミュレーションを行い、ペアとなるホイッスラー波の振動数の違いが、エネルギー輸送過程にどのような影響を及ぼすのかを明らかにしていく。この例だけに留まらず、トカマクプラズマなどの実験室プラズマや、パルサーなどのコンパクト天体周辺でも類似の現象が起こると考えており、ホイッスラー波をキーワードに学際的な研究展開を推進していきたい。

### 4. 研究成果

電磁波によるプラズマの加速や加熱は、地上のレーザー実験だけでなく、様々な天体現象で重要なプロセスとなっている。本研究では、ホイッスラー波の作る定在波が、相対論的な電子加速や、核融合イオンプラズマの生成などをもたらす非常に貴重な物理過程になりうることを数値シミュレーションおよび理論解析を用いて明らかにした。非常に単純ではあるが、従来見過ごされていた効果に着目することで、様々な応用展開が広がったと考えている。

実験室プラズマとしては、従来困難であったレーザーによるイオン加熱を、電子に邪魔されることなく実現でき、到達温度が数10電子ボルトの核融合プラズマを直接生成することを示した。これは、全く新しいレーザー核融合方式になりうるものである。また、天体応用としては、近年話題の高速電波バーストとよばれるパルス的な発光現象の起源の絞り込みに寄与できる。伝播特性を明らかにすることで、未知の天体現象の解明に今後さらに迫っていけると期待している。

#### (1) 定在ホイッスラー波による電子加速

相対論的強度の定在ホイッスラー波によって、電子が相対論的エネルギーまで効率的に加速できることが明らかになった。この機構の最大の特徴はすべての非相対論的エネルギーの電子が相対論的速度にまで根こそぎ加速される点である。定在波中の電子の軌道解析によって、この加速が実現する物理条件が詳細に導出でき、数値シミュレーションで検証することにも成功した。この機構は主に天体現象への応用が期待されている。

#### (2) 定在ホイッスラー波によるイオン加熱

定在ホイッスラー波は物理条件によっては電子ではなくイオンのみを加熱することもできる。これはレーザー核融合プラズマで直面していたイオン加熱の困難さを解決する新しい手段となる。従来の水素同位体を用いた核融合では、利得が1を超える実験デザインの構築も可能であった。また、中性子を発生しない水素・ホウ素反応に対しても十分な温度までの加熱も実現できる見込みを得られた。

#### (3) 大振幅ホイッスラー波の伝播特性

ホイッスラー波は臨界密度が存在せず、原理的にはどんな高密度プラズマにも侵入し、相互作用を起こすことができると考えられている。しかし、実際には様々なプラズマ不安定がその妨げとなることを数値シミュレーションで明らかにした。最も重要な過程は、イオン音波を励起する減衰不安定の存在で、電磁波の強度が強い場合、十分な侵入長が得られないことが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Isayama S., Takahashi K., Matsukiyo S., Sano T.	4. 巻 946
2. 論文標題 Acceleration of Relativistic Particles in Counterpropagating Circularly Polarized Alfvén Waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acbb6d	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 Ly Minh Nhat, Sano Takayoshi, Sakawa Youichi, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 108
2. 論文標題 Conditions of structural transition for collisionless electrostatic shock	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 25208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.108.025208	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 該当する
1. 著者名 Hata Masayasu, Sano Takayoshi, Iwata Natsumi, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 108
2. 論文標題 Optimum design of double-layer target for proton acceleration by ultrahigh intense femtosecond lasers considering relativistic rising edge	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 35205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.108.035205	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 佐野孝好	4. 巻 97
2. 論文標題 定在ホイッスラー波による高速イオン加熱と核融合科学への応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 427-432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Sano Takayoshi	4. 巻 920
2. 論文標題 Alfvén Number for the Richtmyer-Meshkov Instability in Magnetized Plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac141e	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27件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 MHD simulation and laser experiment
3. 学会等名 Athena++ Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Mitigation of shock-driven interfacial instability
3. 学会等名 6th International Conference on Matter and Radiation at Extremes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Relativistic wave-particle interaction under a strong magnetic field
3. 学会等名 Torino International Conference on Fundamental Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Laser astrophysics experiment on the amplification of magnetic fields by shock-induced interfacial instabilities
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sano, S. Isayama, K. Takahashi, and S. Matsukiyo
2. 発表標題 Relativistic two-wave resonant acceleration of electrons at large-amplitude standing whistler waves during laserplasma interaction
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Sciences (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Richtmyer-Meshkov instability in magnetized plasmas
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sano, S. Isayama, K. Takahashi, and S. Matsukiyo
2. 発表標題 Relativistic two-wave resonant acceleration of electrons at large-amplitude standing whistler waves during laser-plasma interaction
3. 学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Sano, S. Isayama, S. Matsukiyo, K. Sugimoto, and Y. Sentoku
2 . 発表標題 Acceleration of relativistic particles and gamma-ray emission in standing Alfvén waves
3 . 学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 M. N. Ly, T. Sano, Y. Sakawa, and Y. Sentoku
2 . 発表標題 The impacts of downstream heating on ion reflection for collisionless electrostatic shock
3 . 学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 M. N. Ly, T. Sano, Y. Sakawa, and Y. Sentoku
2 . 発表標題 Conditions of structural transition from collisionless electrostatic shock to double-layer structure
3 . 学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Sano, M. Hata, S. Fujioka, M. Murakami, Y. Sentoku, and R. Kodama
2 . 発表標題 A novel scheme of laser-driven proton-boron fusion under an ultra-strong magnetic field
3 . 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Richtmyer-Meshkov instability in magnetized plasmas
3. 学会等名 International school and workshop on Matter in Extreme Conditions for Magnetized PLAsmas (MECMATPLA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 強磁場中でのレーザープラズマ相互作用とその応用
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好, 諫山翔伍, 松清修一
2. 発表標題 実験室および天体プラズマにおける大振幅ホイッスラー波の伝播特性
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 大振幅ホイッスラー波の伝播特性に対するイオン質量の依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年第78回年次大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Minh Nhat Ly, T. Sano, Y. Sakawa, and Y. Sentoku
2. 発表標題 The impact of downstream heating on ion acceleration for collisionless electrostatic shock
3. 学会等名 日本物理学会2023年第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 強磁場中の相対論的波動粒子相互作用
3. 学会等名 ISEE研究会「宇宙プラズマとレーザー生成プラズマにおける粒子加速・加熱」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 強磁場中における相対論的波動粒子相互作用
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 強磁場下における特異な波動粒子相互作用
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Relativistic two-wave resonant acceleration of electrons due to collisions of large-amplitude whistler waves
3. 学会等名 Plasma Explosions in the Universe (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi Sano
2. 発表標題 Relativistic two-wave resonant acceleration of electrons by colliding large-amplitude Alfvén waves
3. 学会等名 The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野孝好, 諫山翔伍, 高橋健太, 松清修一, 杉本馨, 千徳靖彦
2. 発表標題 大振幅アルフベン波衝突によるプラズマ加速と輻射過程
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野孝好, 畑昌育, 千徳靖彦
2. 発表標題 相対論的強度のホイッスラー波の伝播特性について
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野孝好、諫山翔伍、高橋健太、松清修一
2. 発表標題 定在ホイッスラー波による相対論的電子の生成とレーザーイオン加速への応用
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野孝好
2. 発表標題 ホイッスラー波特性を利用した新奇イオン加熱機構
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sano, Y. Tatsumi, M. Hata, Y. Sentoku
2. 発表標題 Plasma heating via the interaction of whistler waves
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Science 2021 (HEDS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sano, S. Fujioka, Y. Mori, K. Mima, Y. Sentoku, R. Kodama
2. 発表標題 An Alternative Fast Ignition Scheme by Standing Whistler-Wave Heating
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙線加速の新たな理論モデルを構築 波のエネルギーを宇宙線エネルギーに変換  
[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230304\\_2](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230304_2)

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
研究分担者	千徳 靖彦  (Sentoku Yasuhiko)  (10322653)	大阪大学・レーザー科学研究所・教授    (14401)	

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			
フランス	ソルボンヌ大学			