

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03501

研究課題名(和文) 中性粒子の流体効果による中性音波とプラズマ波動の結合

研究課題名(英文) Coupling of neutral sound waves and electrostatic plasma waves in partially ionized plasma

研究代表者

寺坂 健一郎 (Terasaka, Kenichiro)

崇城大学・情報学部・准教授

研究者番号：50597127

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)：プラズマ中の中性粒子の運動がプラズマの波動現象に与える影響(中性粒子効果)に焦点をあて、部分電離プラズマ特有の性質が存在することを理論、実験の両面から調べた。静電イオンサイクロトロン(EIC)波を対象に、流体モデルを用いた理論的なアプローチから波動場中の中性粒子効果の重要性を示した。

電離度を実験的に調整できるHYPER-II装置を用いた実験では、波動励起グリッドを用いて磁場に垂直方向に伝播する静電波の検出に成功した。レーザーを用いた時間分解計測では、計画時の目標を達成できなかった部分もあるが、レーザー分光計測技術の発展に貢献する新手法を提案などの成果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

部分電離プラズマは産業応用や地球磁気圏など我々の生活圏において非常に身近なものである。本研究は波動現象を中心とした部分電離プラズマの物理的性質を理解することに焦点を当てているが、本研究で得られた知見は広い分野にとって有益な情報を提供するものであると考えられる。また、本研究の一環として開発した高精度なレーザー分光システムは、プラズマを乱さず高精度に中性粒子やイオンの速度分布関数が計測できるため、産業応用分野への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The effect of the dynamics of neutral particles in a partially ionized plasma on the characteristics of wave propagation was studied. A dispersion relation of electrostatic ion cyclotron (EIC) waves was derived, and the propagation properties were numerically investigated. It was revealed that EIC waves can propagate below the ion cyclotron frequency due to the motion of neutral particles in the wave field. Experiments were conducted using the HYPER-II device to clarify the neutral gas effect on the EIC waves. Electrostatic waves propagating perpendicular to the magnetic field in a weakly ionized plasma were observed. A time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy system was constructed to measure the velocity distribution function of neutral particles. Furthermore, we proposed a new method that will contribute to developing laser spectroscopy techniques.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：部分電離プラズマ 中性粒子 静電イオンサイクロトロン波 レーザー誘起蛍光ドップラー分光法 ECRプラズマ

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

部分電離プラズマは荷電粒子と中性ガスから成るマルチ流体系で、プラズマと中性粒子は衝突を介した運動量輸送を介して影響しあうことによって、部分電離プラズマ特有の現象が生じることが知られている。プラズマ中の波動や不安定性に関する従来の研究では、中性粒子は単純な減衰項として扱われるか、密度の非一様性を通してプラズマ物理量の空間分布に影響を及ぼす間接的な効果として扱われており、プラズマ波動に対して波動場中で運動する中性粒子の影響(中性粒子効果)は殆ど議論されていない。

イオン音波の伝播特性やドリフト型の不安定性の成長率に対する中性粒子の流体的振る舞いの影響が理論的に調べられ、中性粒子密度の増加に伴いイオン音波の減衰率が減少する直感と異なる性質の発現など、プラズマ波動に与える中性粒子効果の重要性が指摘されている。一方、イオン音波と異なる波動モードに対する影響が未調査であることや、実験的に中性粒子効果を調査した例が非常に少ないことなど、波動現象に対する中性粒子効果は十分に理解されていない状況にある。

地球高層大気や産業応用に利用されるプラズマは、殆どすべて部分電離プラズマである。また、これらの身近な部分電離プラズマは非一様であり、波動現象や過渡現象など定常とは程遠い状況にあるのが普通である。部分電離プラズマを理解し活用するためには、部分電離プラズマの構造形成における中性粒子の役割を理解することが不可欠となる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、部分電離プラズマのマルチ流体としての性質に関して、「プラズマと中性粒子流体に存在する固有波動モードは互いに結合するのか」、また、「中性粒子の流体運動がプラズマ波動伝播特性や不安定性の成長にどのような影響をもたらすのか」という未解決課題に対し、光科学を駆使した実験的アプローチを含めて解明することにある。

プラズマ波動 - 中性音波の結合に着目し、プラズマから中性粒子、中性粒子からプラズマの双方に対して波動励起が可能であることを示す。高精度な時間分解レーザー誘起蛍光ドップラー分光(TRLIF)システムを構築し、中性粒子の流速や温度といったパラメーターの時間分解計測によって、波動場中の中性粒子効果の実験的実証を狙う。

## 3. 研究の方法

実周波数がプラズマ密度に依存しないイオン音波と静電イオンサイクロトロン波に対する効果を調べることで、実効的に衝突周波数のみを変化させる詳細な検証実験を目指す。本申請では以下の3点に焦点をあて、部分電離プラズマ中の中性粒子の動的振る舞いがプラズマ波動に及ぼす影響を調べる。(A)これまでに調べられているイオン音波と異なる波動モードについて、特徴的な中性粒子効果が現れるかを理論的に検証する。(B)直線プラズマ装置 HYPER-II (九州大学、2024年に崇城大学に移設)中にイオン音波、静電イオンサイクロトロン波を励起する励起グリッドを挿入し、部分電離プラズマ中の伝播特性から中性粒子効果を実験的に調べる。(C)中性音波のモード変換によって、プラズマの波動モードが励起されることを実証する。

(B),(C)の実験については、HYPER-II装置の電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマを用いて実施する。HYPER-II装置は入射するマイクロ波パワーや導入ガス圧力に対して柔軟な放電が可能であるため、電離度について2桁程度(最大電離度は数%)の範囲を連続的に調べることが出来る。プラズマ - 中性粒子間の運動量輸送量に関する柔軟な調整ノブを持つHYPER-II装置を用い、部分電離プラズマ中の波動伝播特性を調べることで、中性粒子効果を実験的に検証する。また、当該装置には先行研究で開発した高精度なレーザー誘起蛍光ドップラー分光(LIF)システムが実装されている。これまで定常プラズマ計測用に開発してきたLIFシステムを、長時間分解能化しTRLIFシステムを構築する。

## 4. 研究成果

部分電離プラズマ中の静電イオンサイクロトロン(EIC)波に着目し、流体モデルを用いた理論解析を行った。中性粒子のダイナミクスを含むEIC波の分散関係を導出し、電離度に対する減衰率や有限中性粒子温度に関する数値的な評価を行った。中性粒子効果の重要性を与えるパラメーターとして、プラズマと中性粒子の運動量密度の比を考えると、両者が拮抗するようなプラズマでは、EIC波に対するイオン - 中性粒子衝突の影響は、減衰よりも実効的な質量を増加させるように働くことが分かった(図1)。運動量輸送を介したイオンの実効的な質量の増加は、イ

オンと中性粒子の同調した運動を引き起こし、イオンサイクロトロン周波数以下では非伝搬となる完全電離プラズマ中のEIC波の伝播特性が部分電離プラズマ中では修正を受けることを意味している。また、有限な中性粒子ガス温度を考慮しても、中性粒子効果による特徴的な性質は維持される。このことは、中性ガス音波とEIC波がモード結合することで、中性粒子の揺動由来のEIC波が励起される可能性を示している。これらの性質は、本研究で初めて明らかにされたもので、一連の成果は論文として報告済みである。

上述したEIC波やイオン音波(IA波)の特徴的な性質を検出するために、HYPER-II装置中に静電波を励起するための励起グリッドを開発・導入した。本励起グリッドは径方向に可動式となっており、グリッドの有無や励起位置を自由に変更することが出来る。図2に実際に観測された静電波の伝播波形を示す。励起振幅が大きいため、正弦波のような顕著な波形は確認できないが、静電波の波束が磁場に垂直な方向(右図のxに対応)に伝わっていく様子が見て取れる。波束のピーク時刻から評価した伝播速度(群速度)はイオン音波速度程度であり、これはEIC波の特徴と矛盾しない。

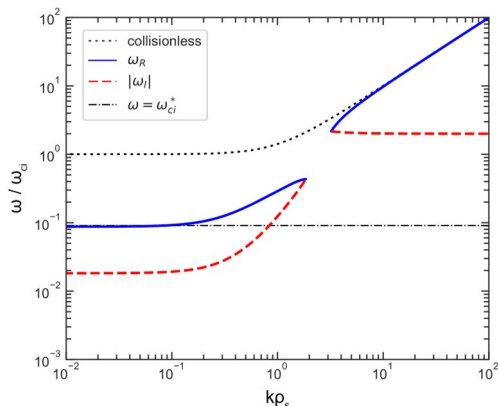


図1. 部分電離プラズマ中を伝播するEIC波の分散関係。イオンサイクロトロン周波数以下の周波数帯で伝播するEIC波の存在を明らかにした。

K. Terasaka, S. Yoshimura, Physics of Plasmas **29**, 022103 (2022) より抜粋。

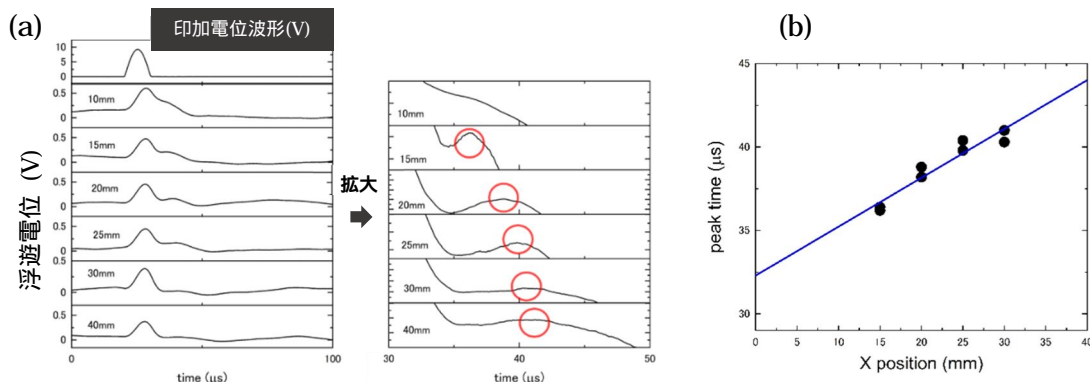


図2. 波動励起グリッドによって励起された静電は揺動の伝播の様子。(a): 観測場所を変えたときの波形。(b): 揺動のピーク時刻の位置依存性。群速度がEIC波の特徴となるイオン音波速度程度であることが確認された。

波動励起実験と並行して進めたTRLIFシステムの開発については、初期実験として放電初期から定常状態に至るまでの比較的ゆっくりとした過渡現象において、中性粒子温度の時間発展を得ることに成功した(図3)。本申請では音響光学変調器(AOM)を用いた高速ロックイン検出システムを用いて、原理的に100 kHz以下の時間変動に対してLIF信号を検出できる光学系を構築することが出来た。システムそのものの時間分解能はEIC波に追従できる性能を有しているものの、図2に示したような励起グリッドへの印加電圧信号に同期させた測定では、信号/ノイズ比の確保が難しく、波動伝播に伴う速度分布関数の時間発展を議論するのに十分なデータを得ることが困難であった。TRLIF計測については、システムの改良を実施している途中で本報告書の最終段落に示す計画の変更が生じたため、原理的なシステム開発までにとどまった。一方、TRLIFシステムは汎用性が高い。更なるシステムの改良を行い、本申請の目標で達成できなかった項目の追実験だけでなく、今後の様々な目的

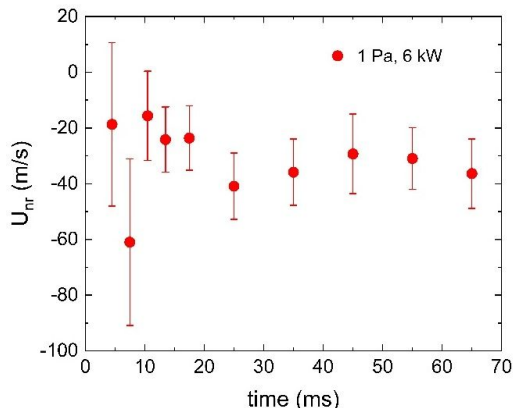


図3. TRLIF計測によって得られた放電初期のプラズマ過渡状態における中性粒子流速(径方向流速)の時間発展。

の研究においても本計測システムを活用していく予定である。

本研究の実施途中で、申請時には計画していなかった LIF システムの改良に関する新しい展開があった。分担者として参加していた光渦ビームを光源とする LIF システムの開発に関する研究 [ 科研費・基盤研究 (B), 21H01058, 代表・吉村信次 (核融合研) および科研費・国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (B), 18K0079, 代表・荒巻光利 (日本大学)) ] の活動の中で、方位角方向にビーム強度の非対称性を持つ非対称光渦ビームが励起グリッド近傍など、従来の平面波を用いた LIF 法では困難な位置での計測に有効であることが分かってきた。そこで本研究の一環として、非対称光渦ビームを用いた LIF 法 (aVLIF 法) を提案し、本実験を含む典型的な実験室プラズマを想定した数値計算から、中性粒子やイオンの流れ計測に対して aVLIF 法が効果的な手法であることを示した (K. Terasaka et al., Scientific Reports **15** 2005 (2024))。TRLIF システムの十分な開発について課題が残ったものの、本申請の特色である光科学の導入による部分電離プラズマ物理現象の理解の観点においては、先端の光技術を取り入れる新手法の提案など一定の成果を残すことが出来、プラズマ科学分野の発展における光計測技術の有用性を示すことが出来たと考えている。

本研究の実施期間内に申請者の所属異動に伴う装置移転が実施され、当初の計画を大きく変更せざるを得ない状況が生じた。この事情により、当初計画していた TRLI 法を用いた波動場中の中性粒子流れの時間発展計測や、中性音波によるプラズマ波動の励起実験については、計画を完遂出来なかった。一方、このような事態を見越して継続した実験ができるよう準備を進めていたため、研究期間終了後も引き続き実験を継続する予定である。部分電離プラズマの波動現象に焦点を当てた研究を通して、プラズマ中の中性粒子の運動によって完全電離プラズマとは全く異なる性質が出現することが明らかとなった。また、レーザー分光計測に関する技術の発展にも一定の成果を残すことが出来た。3 年間の研究によって、物理的・光学的な多くの知見を得ることが出来、大変有意義な研究を実施することが出来たと総括できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Terasaka Kenichiro., Yoshimura Shinji.	4. 巻 29
2. 論文標題 Plasma-neutral coupling allows electrostatic ion cyclotron waves to propagate below ion cyclotron frequency	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022103 ~ 022103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0078192	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 MINAGAWA Hiroki, YOSHIMURA Shinji, TERASAKA Kenichiro, ARAMAKI Mitsutoshi	4. 巻 17
2. 論文標題 Analysis of Azimuthal Doppler Shift of Anisotropically Absorbed Laguerre-Gaussian Beam Propagating in Transverse Flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401099 ~ 1401099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.17.1401099	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 Yoshimura Shinji, Terasaka Kenichiro, Aramaki Mitsutoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Application of optical vortex to laser-induced fluorescence velocimetry of ions in a plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 150 ~ 159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15748/jasse.9.150	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 Yoshimura Shinji, Terasaka Kenichiro, Aramaki Mitsutoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Application of optical vortex to laser-induced fluorescence velocimetry of ions in a plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 150 ~ 159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15748/jasse.9.150	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 Terasaka Kenichiro, Yoshimura Shinji, Minagawa Hiroki, Aramaki Mitsutoshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Three-dimensional flow velocity determination using laser-induced fluorescence method with asymmetric optical vortex beams	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2005-1 ~ 2005-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-024-52179-0	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 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 寺坂健一郎, 吉村信次, 皆川裕貴, 荒巻光利
2. 発表標題 非対称な光渦を用いたレーザー誘起蛍光 ドップラー分光における積分効果
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 寺坂健一郎, 吉村信次, 皆川裕貴, 荒巻光利
2. 発表標題 非対称光渦を用いた中性粒子流のLIF計測
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 寺坂健一郎, 吉村信次
2. 発表標題 部分電離プラズマ中の静電イオンサイクロトロン波の伝播特性に対する中性粒子温度効果
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 寺坂健一郎, 小菅佑輔, 福山隆雄
2. 発表標題 直線プラズマ装置におけるカオス探査と制御
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 寺坂健一郎, 吉村信次
2. 発表標題 静電イオンサイクロトロン波の伝播特性に対する中性粒子効果
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉村信次, 寺坂健一郎
2. 発表標題 ECRプラズマ中の間欠的高温バブル現象
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉村信次, 寺坂健一郎, 荒巻光利
2. 発表標題 負バイアス電極近傍のイオン流の光渦レーザー誘起蛍光計測
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺坂健一郎
2. 発表標題 Laser-induced fluorescence spectroscopy with optical vortex beam in a partially ionized plasma
3. 学会等名 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺坂健一郎
2. 発表標題 レーザー誘起蛍光ドップラー分光法への 光渦の活用とプラズマ流れ計測
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺坂健一郎, 吉村信次, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦LIFの原理実証に向けたビームモード・形状の検討
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳田悟, 河内裕一, 佐々木真, 荒川弘之, 山崎広太郎, 寺坂健一郎, 稲垣滋
2. 発表標題 磁化プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ的モデル選択
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 吉村信次, 寺坂健一郎, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦を用いた境界領域のイオン流計測
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 皆川裕貴, 吉村信次, 寺坂健一郎, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦レーザー吸収分光法における方位角ドップラーシフトの絶対値評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022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
---------	---------