

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540541

研究課題名(和文)泡状プラズマの物理に関する研究

研究課題名(英文)Physical Characteristics of Plasmas with Large Density Cavities (or Bubbly Plasmas)

研究代表者

谷川 隆夫 (Tanikawa, Takao)

東海大学・総合科学技術研究所・教授

研究者番号：70207174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマは擾乱に伴い大きな密度変調を生じ易い。例えば、強いラングミュア乱流では、周囲の密度よりかなり低密度のキャビティ(キャビトンとも呼ばれる)が、ブロップ状にプラズマ中に分散する。このような“泡状プラズマ”中の波動伝播特性は、低振幅の“線形”波動であっても通常の波動特性とはかなり異なるものになる。“泡状プラズマ”の特異性を波動現象に注目して調べた。比較的身近に存在すると思われる泡状プラズマの物性理解はプラズマ物理に新たなパラダイムを導入するきっかけになるだろう。

研究成果の概要(英文)：A large density modification can easily be generated in a turbulent plasma. For instance, a number of low density bubbles (or cavitons) can randomly exist in a plasma under the strong Langmuir turbulence. Wave propagation characteristics (even for "linear" waves) of such a bubbly plasma can be quite unusual with respect to those of an ordinary uniform plasma. Anomalous wave properties of bubbly plasmas have been investigated experimentally and computationally. In general, plasmas can be easily disturbed. Therefore, bubbly plasmas can be quite common entities. It is hoped that understanding physical properties of bubbly plasmas can lead to an introduction of a new paradigm to physics of plasmas.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ・核融合 プラズマ物理 プラズマ波動現象 プラズマ乱流 キャビトン 泡状プラズマ プラズマ非線形現象 プラズマ不安定性

1. 研究開始当初の背景

プラズマは擾乱に伴い大きな密度変動を生じ易い。例えば、強いラングミュア乱流では、周囲の密度よりかなり低密度のキャビティ（キャビトンとも呼ばれる）が、ブロップ状にプラズマ中に分散している。このような状態にあるプラズマをここでは“泡状プラズマ”と呼ぶことにする。

本研究代表者は、過去に強いラングミュア乱流（キャビトン乱流とも呼ばれる）の実験研究を高周波（rf）励起、電子ビーム励起を通して、実施してきた [安藤、飽本、谷川、プラズマ・核融合学会誌「解説」**81**, 94 (2005)] 特に、電離層プラズマを利用した実験において [A. Y. Wong, T. Tanikawa, and A. Kuthi, Phys. Rev. Lett. **58**, 1375 (1987); P. Y. Cheung, A. Y. Wong, T. Tanikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **62**, 2676 (1989)] キャビトンが再放射する低振幅プラズマ波動に特異な伝播特性があることに気付いていた。キャビトン乱流特有のプラズマの不均一性に帰因するものであろうと、詳しく研究する機会を待っていた。

大振幅イオン波と電子プラズマ波とのカップリングという見地から電子プラズマ波の禁止周波数帯の存在が理論的に議論されたケースが過去にあった [P. K. Kaw *et al.*, Phys. Fluids **16**, 1967 (1973)] それをレーザー・プラズマ相互作用の低密度領域で生じた不可解な現象の説明に適用した例がある [H. Figueroa and C. Joshi, Phys. Fluids **30**, 2294 (1987)] また、ランダムな密度揺動が存在するプラズマ中における電子プラズマ波の局在化現象が検討された例もある [D. F. Escande and B. Souillard, Phys. Rev. Lett. **52**, 1296 (1984)] 泡状プラズマの見地から言えば、低密度ブロップの集まりが不純物様に見え、固体中に生じるアンダーソン局在のように波動が局在化し、見かけ上波動の減衰が増大したように見えると解釈できるであろう。しかしながら、これらの研究のフォローアップがなされた形跡は無く、重要性の検討がうやむやのままに終わっている。このような事実も本研究のアイデアを後押しするものであった。さらに、マイクロプラズマ・アレイをメタマテリアルとして用い、電磁波伝播の制御をしようという研究 [O. Sakai and K. Tachibana, Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 013001 (2012)] が実施されている。泡状プラズマ自体が、プラズマ・メタマテリアルとして振る舞う可能性を指摘したい。最近活発に研究が進められつつある warm dense matter 関連のプラズマでは、クーロン相互作用の効果が熱エネルギーの効果より大きいなど通常我々が取り扱うプラズマとは根本的に異なる領域に踏み込んでいいるが、プラズマ自体の不均一性（“泡状”性）の問題を理解することが重要な課題となっている。

2. 研究の目的

“泡状プラズマ”は、それ自体非線形媒質として振舞い、様々な興味ある性質を呈するが、泡状プラズマ中の（低振幅）波動伝播特性の解明を特に本研究の具体的主目標とした。“泡状プラズマ”中の波動伝播特性は、低振幅の“線形”波動であっても通常の波動特性とはかなり異なるものになる。例えば、低密度ブロップの集まりが結晶様に見える場合、禁止周波数帯が生じる可能性がある。

3. 研究の方法

実験には主として東海ヘリコン装置 (Tokai Helicon Device: THD) を用いた [谷川隆夫 他, 東海大学紀要 総合科学技術研究所, Vol. 31, 4-11 (2010)] この装置の主真空容器のサイズは、内径 20 cm、長さ 1 m である。真空容器端のクウォーツガラス窓に殆ど接するように大気中に設置された励起アンテナに高周波 (rf) を印加してプラズマを生成する。励起アンテナとしては分割型多ループアンテナを用いている。この装置は元々ヘリコンプラズマ源として製作されたが、条件を選べば背景磁場なしでもプラズマを生成可能であり、非磁化プラズマを用いる基礎実験にも使用可能である。He, Ar 他の希ガスを使用可能であり、マスフローコントローラにより中性ガス圧の精密制御が可能である。

rf 放電（周波数は通常 10 MHz 以下を使用）は放電パルス長 10 ms 程度で 1 Hz から 10 Hz 程度の繰り返し周波数でパルス放電された。実験には通常比較的静かなアフターグロー・プラズマが用いられた。

4. 研究成果

(1) 非一様非磁化プラズマ中の共鳴吸収現象を利用して局在化した電子プラズマ波を共鳴層に励起し、泡状プラズマのもとになるキャビトンを生じた。繰り返しキャビトンを生成することにより大振幅イオン波を、グリッド等の励起電極をプラズマ内に設置することなく、リモートに励起することが出来る。これは泡状プラズマを実験室で準備するために重要な手法である。このあたりの過程を理解するために 1 次元 PIC シミュレーションも実施した。

(2) 連携研究者による局在化したイオンマイクロトロン波の磁力線方向ポンデロモータビリティを利用したプラズマイオン加速のシミュレーションは、泡状プラズマ中の“泡”-“泡”相互作用を検討する上で今後役立つ知見を与えているように考えられる。

(3) 電離層加熱実験の際に観測された大規模キャビティ構造（熱性キャビトン）の実験データを再検討することにより、自然界に生成される大規模泡状プラズマの可能性について検討した。加熱用短波及び加熱用短波の反射層付近に励起される電子プラズマ波

の異常伝搬性を導入しないと解釈不能であるデータがレーダー観測により得られている。

(4) 大振幅イオン波が次々に励起されているようなイオン波乱流状態にある実験室プラズマ中にマイクロ波(3 – 10 GHz)を入射したところ、マイクロ波が異常に吸収されたように見える現象を観測した。しかしながら有限な大きさを持つプラズマであるため境界の影響が無視できず、マイクロ波の異常伝搬について確定的なデータを取得出来ない。今後の課題として実験を続行して行く予定である。

(5) 泡状プラズマの物性を理解する端緒にやっとたどり着いたという感じで、泡状プラズマの物理の全容解明には未だ道半ばである。しかしながら、泡状プラズマの物理は今後プラズマ物理に新たなパラダイムを開く分野に成長することが期待される。電磁波伝搬の制御に泡状プラズマをプラズマ・メタマテリアルとして利用するなど泡状プラズマの応用分野についても今後検討を加えて行くことが肝要であろう。

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) Takao Tanikawa, "Formation of a Double Layer-Like Potential Structure associated with a Langmuir Caviton", Proceedings of Tokai University, Research Institute of Science and Technology, 査読有, Vol. 34, 2015, 14 – 23

(2) S. Shinohara, T. Tanikawa, and T. Motomura, "A Segmented Multi-loop Antenna for Selective Excitation of Azimuthal Mode Number in a Helicon Plasma Source", Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 85, 2014, 093509-1 – 093509-7
DOI: 10.1063/1.4896041

(3) T. Nakamura, H. Nishida, S. Shinohara, I. Funaki, T. Tanikawa, and T. Hada, "Preliminary Investigation of Electromagnetic Thrust Characteristics in Electrodeless Compact Helicon Plasma Thruster", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 12, 2014, Po_1_1 – Po_1_6

(4) S. Shinohara, H. Nishida, T. Tanikawa, T. Hada, I. Funaki, and K. P. Shamrai, "Development of Electrodeless Plasma

Thrusters with High-Density Helicon Plasma Sources", IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 42, 2014, 1245 – 1254

DOI: 10.1109/TPS.2014.2313633

(5) Takao Tanikawa and Sugiya Sato, "Generation of Thermal Cavities in the Ionosphere", Proceedings of Tokai University, Research Institute of Science and Technology, 査読有, Vol. 33, 2014, 10 – 33

(6) F. Otsuka, T. Hada, S. Shinohara, T. Tanikawa, and T. Matsuoka, "Numerical Modeling of Electrodeless Electric Thruster by Ion Cyclotron Resonance/Ponderomotive Acceleration", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8, 2013, 2406067-1 – 2406067-7

DOI: 10.1585/pfr.8.2406067

(7) Takao Tanikawa, "Nonlinear Evolution of a Localized Langmuir Wave in an Inhomogeneous Unmagnetized Plasma", Proceedings of Tokai University, Research Institute of Science and Technology, 査読有, Vol. 32, 2013, 16 – 25

(8) F. Otsuka, T. Hada, S. Shinohara, T. Tanikawa, and T. Matsuoka, "Numerical Studies of Ponderomotive Acceleration and Ion Cyclotron Resonance: Application to Next Generation Electric Thrusters", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8, 2013, 1406012-1 – 1406012-14

DOI: 10.1585/pfr.8.1406012

(9) T. Motomura, S. Shinohara, T. Tanikawa, and K. P. Shamrai, "Characteristics of Low-Aspect Ratio, Large-Diameter, High-Density Helicon Plasmas with Variable Axial Boundary Conditions", 査読有, Vol. 19, 2012, 043504-1 – 043504-12

DOI: 10.1063/1.3701558

[学会発表](計20件)

安藤利得、谷川隆夫 他3名, “極カスプ模擬実験と「粒子の流れ」の研究の意義”, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学早稲田キャンパス(東京都)

谷川隆夫, “大きな密度変調のあるプラズマ中の波動伝搬”, 第17回物質科学研究討論会, 2015年2月25日, 核融合科学研究所(岐阜県土岐市)

安藤利得、谷川隆夫 他4名, “極カスプ模擬実験について”, 平成26年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2015年2月23

日,宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

谷川隆夫,“先進的無電極プラズマラスト実現へ向けての基礎開発研究の動向、趣旨説明、はじめに”, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

S. Isayama, T. Hada, and T. Tanikawa, "Modeling of Helicon Wave Propagation and the Physical Process of Helicon Plasma Production", The 56th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society, 2014年10月29日, New Orleans, Louisiana, U.S.A.

諫山翔伍、羽田亨、谷川隆夫,“ヘリコン波の伝搬とモード変換、プラズマ加熱過程のシミュレーション”, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月30日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

大塚史子、羽田亨、谷川隆夫,“無電極電気推進のための外部電極群による磁化プラズマ内への電磁場励起: 1次元PICシミュレーション”, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年5月1日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

安藤利得、谷川隆夫 他6名,“電子ビームのカスプ磁場への入射とプラズマの生成実験”, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月29日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

諫山翔伍、羽田亨、谷川隆夫,“非一様プラズマ中でのヘリコン波の伝搬”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第134回総会及び講演会, 2013年11月2日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市)

大塚史子、羽田亨、谷川隆夫,“無電極推進のための外部電流による電磁場励起の2次元PICシミュレーション”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第134回総会及び講演会, 2013年11月3日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市)

下山学、谷川隆夫 他4名,“スペースチェンバー内の直接計測によるプラズマ波動・粒子相互作用の室内実験の進捗状況”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第134回総会及び講演会, 2013年11月5日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市)

F. Otsuka, T. Hada, and T. Tanikawa, "Numerical Studies of Ponderomotive Acceleration/Ion Cyclotron Resonance for Electrodeless Electric Thruster" (招待講演), 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2013年9月3日, Taipei, Taiwan

T. Tanikawa, T. Hada, and F. Otsuka, "Plasma Acceleration via Externally Exerted Oscillating Electromagnetic Fields: Basic Physics and Application to Electrodeless Electric Propulsion", The

12th Asia Pacific Physics Conference, 2013年7月17日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

F. Otsuka, T. Hada, and T. Tanikawa, "Ponderomotive Acceleration for Electrodeless Electric Thruster: Effect of Electromagnetic Field Penetration into Magnetized Plasmas", The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013年7月18日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

大塚史子、羽田亨、谷川隆夫,“磁化プラズマ内への外部電磁場浸透の1次元PICシミュレーション: 無電極電気推進の開発に向けて”, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月24日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

諫山翔伍、羽田亨、谷川隆夫,“ヘリコン波の分散関係とその散逸過程”, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月24日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

谷川隆夫,“プラズマ波動のアンダーソン局在”, スペースプラズマ研究会, 2013年2月27日, 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

壬生健太、谷川隆夫 他4名,“電子ビームのカスプ磁場への入射とそれに伴うプラズマの変化の観測”, スペースプラズマ研究会, 2013年2月26日, 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

諫山翔伍、羽田亨、谷川隆夫,“非一様円柱プラズマ中のヘリコン波の分散関係”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第132回総会及び講演会, 2012年10月23日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

大塚史子、羽田亨、谷川隆夫,“ポンデロモティブ加速ノイオンサイクロトロン共鳴における推力モデリング”, 地球電磁気・地球惑星圏学会第132回総会及び講演会, 2012年10月23日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.rist.u-tokai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷川 隆夫 (TANIKAWA, TAKAO)
東海大学・総合科学技術研究所・教授
研究者番号: 70207174

(2) 連携研究者

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

大塚 史子 (OTSUKA, FUMIKO)
九州大学・総合理工学研究院・研究員
研究者番号: 10418808