

平成21年5月29日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2006 ～ 2008  
 課題番号：18684033  
 研究課題名 (和文) イオン系導入によるペアプラズマ研究の新展開  
 研究課題名 (英文) New developments of pair-plasma research due to introduction of ionic system  
 研究代表者  
 大原 渡 (OOHARA WATARU)  
 山口大学・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号：80312601

## 研究成果の概要：

等質量の正負イオンのみから構成されるイオン系ペアプラズマの生成と物性解明を行った。フラレン  $C_{60}$  ペアイオンプラズマ中の静電波動伝搬特性において、通常の電子-正イオンプラズマにおいて観測されない独特の特徴を明らかにした。質量が最も小さく高周波応答が可能な、水素原子正負イオンから成る水素ペアイオンプラズマの生成を試みた。効率の良い水素負イオン生成が必要であるが、従来にはない多孔体触媒を利用した触媒イオン化法によって、正負イオンを同時に生成することが可能となった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2007年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
総計	22,900,000	6,870,000	29,770,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード： プラズマ基礎, ペアプラズマ, イオン化, 触媒

## 1. 研究開始当初の背景

通常、プラズマは電子と正イオンから構成されており、その質量の大きな違いがプラズマ集団現象に対して顕著な時空間非対称性をもたらす。これが荷電粒子運動に関連したミクロスケールにおける時空間的階層構造を生み出し、非線形性・多様性が豊富に現れる所以である。また、高エネルギー物理・宇宙分野における反物質物性研究の一環として、CPT 対称性 (物質・反物質間の完璧な対称性) の真偽に関して電子・陽子の反物質である陽電子・反陽子が注目

され、これらが混合したプラズマ物性についても研究がなされた。その中で、等質量の正負荷電粒子から成るプラズマ (ペアプラズマ) は時空間対称性が保たれるために、集団現象の縮退等のペアプラズマ独特の物性発現が理論的に予測されてきた。その実験的検証のために電子-陽電子ペアプラズマの室内実験が行われてきたが、プラズマ安定生成・計測等の困難さ故にプラズマ集団現象の能動的実験をするには至っていない。

## 2. 研究の目的

ペアプラズマを構成する荷電粒子がイオンであるならば、大規模な実験施設を要することなく、ペアプラズマを取り扱うことができる。フラーレン(C<sub>60</sub>)、水素をイオン種として、正負に帯電したイオンのみから成るペアプラズマ(ペアイオンプラズマ)を生成して、そのプラズマ中での荷電粒子集団現象について、理論的予測の実験的検証及び未知現象の探索を目的としている。

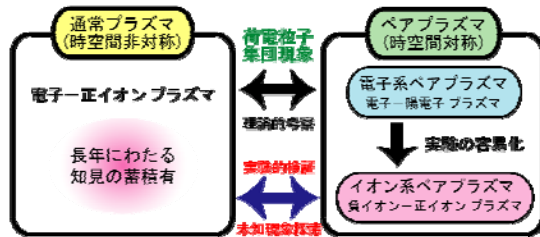


図1: 通常プラズマとペアプラズマ。

## 3. 研究の方法

直線一様磁場を印加できる室内実験装置により、イオン系ペアプラズマの生成及び物性解明を行った。環状電子ビームによりC<sub>60</sub>の正負イオンを体積生成して、磁気フィルター効果による電子-正負イオン分離によりC<sub>60</sub>ペアイオンプラズマの生成に成功した。正弦波電圧を波動励起電極に印加することにより、静電波の励起と伝搬特性を明らかにした。

高質量のC<sub>60</sub>では時間的な応答速度が非常に遅く、取り扱える集団現象として低周波数で線形静電的現象に限定されている。電磁波を含む高周波数領域やパルス・ショック波・ホール等の非線形波動の取り扱いを可能にするため、イオンとして最も質量数の小さい水素正負イオンから成るペアイオンプラズマの実現をめざして、イオン源の開発を始めた。

## 4. 研究成果

(1) 外部励起した静電波の伝搬特性を測定したところ、ペアプラズマに関する理論において従来から予測されている、イオン音波(IAW)とイオンプラズマ波(IPW)が存在することを確認できた。また、これらモード間は理論で予想されるカットオフではなく、後進波の分散特性を持つ中間周波数モード(IFW)が存在することを明らかにした。更に、IAWの周波数帯域にイオンサイクロトロン周波数があり、この周波数近傍においてIAWが2つのブランチに分離して、その間をつなぐような後進波が存在することを明らかにした。

正負イオン密度揺動の位相差を測定したところ、位相差には強い周波数依存性があると分かった。正負イオン密度揺動位相差と分散関係を図2に示している。IAWは周波数によって大きく位相差が変化したが、IFWとIPWの位相差は周波数に依らず反転している。これは動的に荷電分離していることを意味しており、通常のプラズマではまず発現しないペアプラズマ独特の現象である。

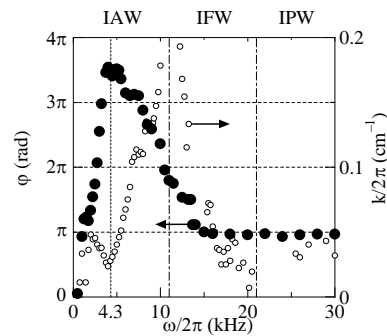


図2: 正負イオン密度揺動位相差と分散関係。

(2) 水素正負イオンのみから成る水素ペアイオンプラズマ源の開発を行った。第一段階として、正イオンを効率良く生成するために、熱陰極直流放電の一種であるPIG放電部を作製した。沿磁力線方向に対向する2枚の陰極間に高エネルギー電子を静電的に閉じ込めて、効率良くイオンを生成する放電法である。高エネルギー電子を除去するために、磁力線垂直方向にプラズマを一度拡散させる。拡散プラズマの密度は $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度は10 eV程度であることが分かった。次に、イオンサイクロトロン共鳴質量分析法(オメガトロン)によって、生成された正イオンのイオン種を分析した。オメガトロン質量スペクトルを図3に示している。オメガトロンはエンドプレートの後方に設置しており、イオン

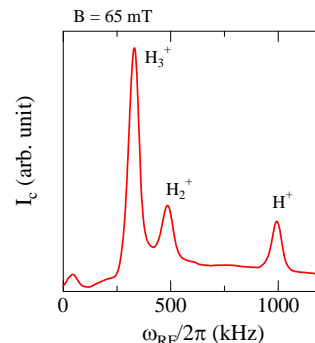


図3: オメガトロン質量スペクトル。

ン源から50 cm程度離れている。H<sub>3</sub><sup>+</sup>が多く観測され、H<sub>2</sub><sup>+</sup>は少数しか存在していないこと

が分かった。H<sub>3</sub><sup>+</sup>はH<sub>2</sub><sup>+</sup>から生成されることが既に知られており、生成されたH<sub>2</sub><sup>+</sup>の多くはH<sub>3</sub><sup>+</sup>に変換されていることが明らかになった。

(3) 第二段階として、水素負イオンの効率良い生成法について検討した。上記の拡散プラズマ中にフィラメントを設置して、フィラメント表面に低仕事関数を持つBaO, LaB<sub>6</sub>を塗布して水素負イオン生成を試みた。BaOを用いた場合に、生成されたイオンの質量スペクトルを図4に示している。負イオンが生成されることは明らかになったが、BaO, LaB<sub>6</sub>は水素イオンによって還元されて酸素やモノボランなどの不純物イオンが発生するために、これらを使用できないことが明らかになった。円環状にPIG放電させて、中心部の円筒グリッド電極内部にプラズマ拡散させる過程において、負イオンを表面生成させるという構造のプラズマ源を新たに構築した。ここで、BaO, LaB<sub>6</sub>やセシウムを使用しないで、負イオンの表面生成を促進させる物質の探索過程で、仕事関数は大きいPtやNiなどの水素に対して触媒活性な物質を利用すれば、効率良く負イオンを表面生成できることを見出した。これは当初予想していなかった新たな発見である。結果的に、触媒グリッドを用いつつ磁気フィルター効果によって電子-正負イオン分離を行うと、80%程度の電子を負イオンに置き換えることはできるが、完全に電子除去することはできなかった。

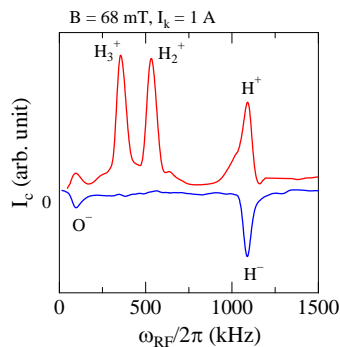


図4：BaOを使用した場合の質量スペクトル。

(4) 第三段階として、水素正負イオンを生成しつつ、電子を除去する手法の開発を行った。水素に対して触媒作用を持つ遷移金属多孔体(Niベース)を使用して、水素ペアイオンの生成を試みた。PIG放電により水素プラズマを生成して、このプラズマを多孔体触媒に照射すると、照射裏面よりイオン性プラズマが生成されることを明らかにした。ここで照射した水素プラズマの電子と正イオンは全て一度多孔体触媒で終端するようにしてい

る。多孔体を適切な厚さ(>2 mm)にすると、電子は多孔体を透過できずに、多孔体に吸収される。電子が少量でも存在するとラングミュアプローブの正負飽和電流比(L/L<sub>+</sub>)が明確にL/L<sub>+</sub>>2となる。正負飽和電流比の半径方向分布の典型例を図5に示している。ここで、I<sub>a</sub>はPIG放電電流を示しており、I<sub>a</sub>が大きいほど多孔体触媒への照射プラズマ密度が高いことを示している。プラズマの半径方向分布において、中心部はL/L<sub>+</sub>~1となりペアイオンプラズマが実現されたといえる。しかし、中心部以外ではL/L<sub>+</sub><1となる正イオンリッチ状態であり、均一なペアイオンプラズマとはなっていない。ここで、正負イオンの生成量は、触媒の温度と上流の水素プラズマ密度に依存していることを明らかにした。触媒表面で正負イオンが生成されるメカニズムは、触媒表面における水素分子・イオンの解離吸着、吸着水素原子の裏面への表面移動、触媒金属-水素原子間に電子授受を伴う表面脱離、この3つの過程によって水素ペアイオンが生成されたものと考えている。これは過去に報告されていない新たなイオン化手法であるといえる。

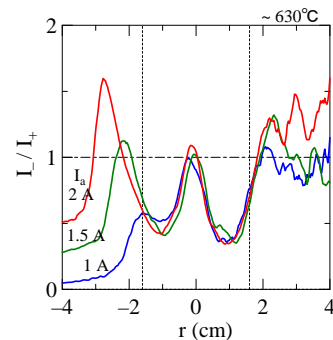


図5：プローブ正負飽和電流比の半径方向分布。

以上の成果をまとめると、以下の通りである。C<sub>60</sub>ペアイオンプラズマ中の静電波動伝搬特性において、後進波や正負イオン密度揺動位相差の周波数依存性など、通常の電子-正イオンプラズマにおいて観測されない独特の特徴を明らかにした。高周波応答を狙いにした水素原子正負イオンから成る水素ペアイオンプラズマの生成を試みた。様々な試みの結果として、従来にはない多孔体触媒を利用して、原子状水素正負イオンの生成に成功した。この正負イオン生成メカニズムは、触媒イオン化法として新規提案しているところである。

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 11 件)

- ① T. Nakano, Y. Tauchi, W. Oohara, and O. Fukumasa, Proceedings of Plasma Science Symposium 2009 and the 26th Symposium on Plasma Processing, 330–331, 2009, 査読無
- ② W. Oohara, K. Tokuhiko, and O. Fukumasa, Catalytic ionization on Porous Metal, Proceedings of Plasma Science Symposium 2009 and the 26th Symposium on Plasma Processing, 328–329, 2009, 査読無
- ③ W. Oohara and O. Fukumasa, Surface Production of Hydrogen Negative Ions using Catalyst, Proceedings of the 35th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 32, P-5.147–1–4, 2008, 査読無
- ④ W. Oohara, R. Hatakeyama, and O. Fukumasa, Surface Materials for Surface Production of Hydrogen Negative Ions, Proceedings of the 25th Symposium on Plasma Processing, 151–152, 2008, 査読無
- ⑤ W. Oohara, Y. Kuwabara, and R. Hatakeyama, Collective Mode Properties in a Paired Fullerene-Ion Plasma, Physical Review E, Vol. 75, 056403–1–9, 2007, 査読有
- ⑥ W. Oohara and R. Hatakeyama, Basic Studies of the Generation and Collective Motion of Pair-Ion Plasmas, Physics of Plasmas, Vol. 14, 055704–1–7, 2007, 査読有
- ⑦ W. Oohara, H. Iwata, and R. Hatakeyama, Fullerene Dimers Produced by Acceleration and Collision of C<sub>60</sub> Negative Ions, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, 5446–5450, 2007, 査読有
- ⑧ R. Hatakeyama, T. Kaneko, and W. Oohara, New Aspects on Plasma Wave and Instability Phenomena –Flow Shear, Polarization Reversal, and Pair Ions–, Proceedings of 13<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, E010–1–4, 2006, 査読無
- ⑨ W. Oohara and R. Hatakeyama, Collective Modes in Pair Fullerene-Ion Plasma, Proceedings of 13<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, A170p–1–4, 2006, 査読無
- ⑩ W. Oohara, M. Nakahata, and R. Hatakeyama, Alkali-Halogen Plasma Generation using Alkali Salt, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, 8075–8079, 2006, 査読有
- ⑪ W. Oohara, M. Nakahata, and R. Hatakeyama, Alkali-Halogen Plasma Generation by dc Magnetron Discharge, Applied Physics Letters, Vol. 88, 191501–1–3, 2006, 査読有

[学会発表] (計 25 件)

- ① T. Nakano, Y. Tauchi, W. Oohara, and O. Fukumasa, Efficient Production of D<sup>-</sup> Negative Ions in Pure Deuterium Plasmas, Plasma Science Symposium 2009 and the 26th Symposium on Plasma Processing, 2009年2月3日, 名古屋
- ② W. Oohara, K. Tokuhiko, and O. Fukumasa, Catalytic ionization on Porous Metal, Plasma Science Symposium 2009 and the 26th Symposium on Plasma Processing, 2009年2月3日, 名古屋
- ③ 岡田 純一, 福政 修, 田内 康, 大原 渡, 津守 克嘉, 竹入 康彦, グリッドバイアス法を用いたRF負イオン源の特性 (II), プラズマ・核融合学会 第25回年会, 2008年12月4日, 宇都宮
- ④ 大原 渡, 福政 修, プラズマ支援触媒イオン化による水素イオン性プラズマ生成, プラズマ・核融合学会 第25回年会, 2008年12月3日, 宇都宮
- ⑤ 岡田 純一, 福政 修, 田内 康, 大原 渡, グリッドバイアス法によるRF負イオン源の高効率化(II), 平成20年度電気・情報関連学会 中国支部第59回連合大会, 2008年10月25日, 鳥取
- ⑥ 中野 貴裕, 田内 康, 大原 渡, 福政 修, 体積生成型DC負イオン源における引き出し領域のプラズマ状態と引き出し負イオン電流の関係, 平成20年度電気・情報関連学会 中国支部第59回連合大会, 2008年10月25日, 鳥取
- ⑦ O. Fukumasa, J. Okada, Y. Tauchi, and W. Oohara, K. Tsumori, and Y. Takeiri, Characteristics of the RF Negative Ion Source Using a Mesh Grid Bias Method, 1st International Conference on Negative Ions Beams and Source 2008, 2008年9月10日, France
- ⑧ O. Fukumasa, T. Nakano, S. Mori, and W. Oohara, K. Tsumori, and Y. Takeiri, Enhancement of D<sup>-</sup> Negative Ion Volume Production in Pure Deuterium Plasmas, 1st International Conference on Negative Ions Beams and Source 2008, 2008年9月10日, France
- ⑨ W. Oohara and O. Fukumasa, Catalytic Effect on Ionization of Hydrogen, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月9日, 博多
- ⑩ T. Nakano, Y. Tauchi, W. Oohara, and O. Fukumasa, Relationship between D<sup>-</sup>/H<sup>-</sup>

- Negative Ion Production and Extraction of Negative Ions in a Volume Negative Ions Source, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月8日, 博多
- ⑪ T. Yoshioka, Y. Tauchi, O. Fukumasa, W. Oohara, and M. Murata, Production and Control of VHF Excited Plasmas by Superposing Two Standing Waves, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月8日, 博多
- ⑫ 大原 渡, プラズマ支援触媒イオン化作用による水素負イオン生成の試み, 平成20年度核融合科学研究所共同研究研究会「負イオン生成および負イオンビーム加速とその応用」, 2008年7月23日, 土岐
- ⑬ W. Oohara and O. Fukumasa, Surface Production of Hydrogen Negative Ions using Catalyst, the 35th EPS Conference on Plasma Physics, 2008年6月13日, Greece
- ⑭ W. Oohara, R. Hatakeyama, and O. Fukumasa, Surface Materials for Surface Production of Hydrogen Negative Ions, the 25th Symposium on Plasma Processing, 2008年1月23日, 山口
- ⑮ T. Shimizu, W. Oohara, and R. Hatakeyama, 平成19年度電気関係学会東北支部連合大会, 2007年8月23日, 弘前
- ⑯ 大原 渡, ペアイオンプラズマの生成, 平成19年度核融合科学研究所共同研究研究会「負イオン生成および負イオンビーム加速とその応用」, 2007年7月25日, 土岐
- ⑰ G. Yokokura, W. Oohara, and R. Hatakeyama, Development of a Hydrogen Pair-Ion Plasma Source, 2007 Taiwan-Japan Workshop on the Students' Experience Exchanges of Nano and Plasma Technologies, 2007年5月29日, Taiwan
- ⑱ T. Shimizu, W. Oohara, and R. Hatakeyama, High-Efficiency Generation of Calcium Plasma, 2007 Taiwan-Japan Workshop on the Students' Experience Exchanges of Nano and Plasma Technologies, 2007年5月28日, Taiwan
- ⑲ 畠山 力三, 大原 渡, ペアイオン系構築—ナノ構造形成関連のプラズマ現象, 「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究」および「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会, 2006年11月21日, 名古屋
- ⑳ 大原 渡, 畠山 力三, イオン性プラズマの生成と応用, 「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究」および「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会, 2006年11月21日, 名古屋

- ㉑ R. Hatakeyama and W. Oohara, Electrostatic Collective Modes in a Pair Fullerene-Ion Plasma, 48<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2006年11月1日, USA
- ㉒ W. Oohara, J. Shishido, M. Nakahata, and R. Hatakeyama, Generation of Ionic Plasma without Electrons using Alkali Salt, 48<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2006年11月2日, USA
- ㉓ 大原 渡, 宍戸 淳, 中畑 雅裕, 畠山 力三, 磁気フィルター付直流マグネロン方式による純アルカリハロゲンプラズマ生成, 第6回核融合エネルギー連合講演会, 2006年6月14日, 富山
- ㉔ 畠山 力三, 大原 渡, フラレーンを用いたペアイオンプラズマの生成と物性, 日本地球惑星科学連合会2006年大会, 2006年5月17日, 千葉
- ㉕ 大原 渡, 畠山 力三, アルカリ塩をイオン源とした純アルカリハロゲンプラズマ生成, 日本地球惑星科学連合会2006年大会, 2006年5月16日, 千葉

〔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 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大原 渡 (OOHARA WATARU)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80312601

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

### (4) 研究協力者

福政 修 (FUKUMASA OSAMU)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20026321

畠山 力三 (HATAKEYAMA RIKIZO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00108474