

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 31日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540504

研究課題名（和文）正負2つの非中性プラズマのマーキングによる拡張MHDの検証実験法の開発

研究課題名（英文）Development of new machine for experimentally testing extended MHD models by merging positive nonneutral plasma with negative nonneutral one

研究代表者

比村 治彦 (HIMURA HARUHIKO)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：30311632

研究成果の概要（和文）：

本研究では、拡張MHDプラズマモデルを実験的に検証するための新しい実験装置の開発が行われている。この新装置はペニングトラップをベースにしたものであり、真空容器の内部に正負2つのポテンシャル井戸が作られている。これら2つの井戸の底に、リチウムイオンプラズマと電子プラズマがエレクトロニクス的に完全制御されながら独立生成されるだけでなく、同時に閉じ込めることに成功している。本研究により開発された実験装置により、拡張MHDプラズマ状態を検証する実験準備が整えられたと言える。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a new machine for experimentally testing the extended MHD models is developed. This machine is based on the well-known penning trap. But, in the vacuum chamber of the machine, both positive and negative potential wells are created. At bottoms of those potential wells, both lithium ion and pure electron plasmas are successfully trapped. Noteworthy, those non-neutral plasmas have been not only produced independently but also confined simultaneously. With the developed machine, we are ready for performing the experiment on the extended MHD plasmas.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：プラズマ科学

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：拡張MHD、2流体プラズマ、荷電粒子トラップ、非中性プラズマ閉じ込め、電子渦糸の自己組織化

1. 研究開始当初の背景

プラズマ物理の未解明問題の一つに拡張MHDプラズマ仮説がある。特に、拡張MHDプ

ラズマの一つである2流体プラズマモデルでは、通常の1流体MHDでは現れないスケール長がプラズマの中に現われてくる。このモ

デルの性質を用いて、観測される現象にスケール長が関与していると認められる現象（観測データ）を説明しようとする試みが、理論・シミュレーションの分野で盛んに行われている。しかしながら、このような2流体プラズマモデルの妥当性をクリアーに検証した基礎実験の例はない。

このような2流体プラズマモデルの検証実験が困難になっている理由であるが、このモデルを実験的に検証するためには、何らかの方法で2流体プラズマと呼ばれるプラズマ状態を作り出し、その状態が保たれるのかどうかを実験的に調べるのが一つの方法となるだろう。しかしながら、2流体プラズマとは、プラズマを構成している多数イオン群（イオン流体）と多数電子群（電子流体）が互いに独立に運動している状態を指している。したがって、検証実験としては、互いに独立運動を行っているイオン流体と電子流体を人工的に作り出す必要があるが、これはそう簡単なことではない。なぜならば、通常プラズマは中性気体を放電させることによって作られる。ところがこの生成法では原子・分子の電離に伴ってイオンと電子の数が逐次的に増大していくことになる。そのために、イオンと電子を別々に集めて集団としてのイオン流体と電子流体を形成させて独立運動を持たせるというシナリオは困難さを極めている。

しかしながら、このような困難さは、非中性プラズマと呼ばれるプラズマを生成し、その非中性プラズマをトラップする技術に応用することで回避される。非中性プラズマトラップ装置では、イオン流体や電子流体などの単一荷電粒子群からなるプラズマをそれぞれ独立に生成し、かつ、閉じ込めることができる。この装置を用いれば、以下に述べるような方法で2流体プラズマを作り出すことができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2流体プラズマモデルの検証実験を行うための新しい実験装置の開発である。その新装置は、これまで研究実績のある非中性プラズマトラップ装置、マルンバークペニングトラップ装置を応用する。その装置は、リチウムイオンだけからなるイオン流体と電子のみからなる電子流体を別々に生成し、かつ、長時間安定に閉じ込められるものとする。

上記が本研究の目的であるが、本研究は装置開発を主としているので、本研究後に行う予定の2流体プラズマ生成実験の方法についても簡単に述べておこう（図1参照）。生成されたリチウムイオン流体と電子流体は、プラズマ閉じ込め用の正負ポテンシャル壁を取り除くことで、重畳（マーキング）され

る。これにより、イオン流体と電子流体がそれぞれ独立に運動している2流体状態を初期状態としたプラズマを作り出せることになる。

3. 研究の方法

図1は、本研究で開発する新装置と、その装置で行う検証実験の手順を示している。この新装置の特徴を以下に列挙する。

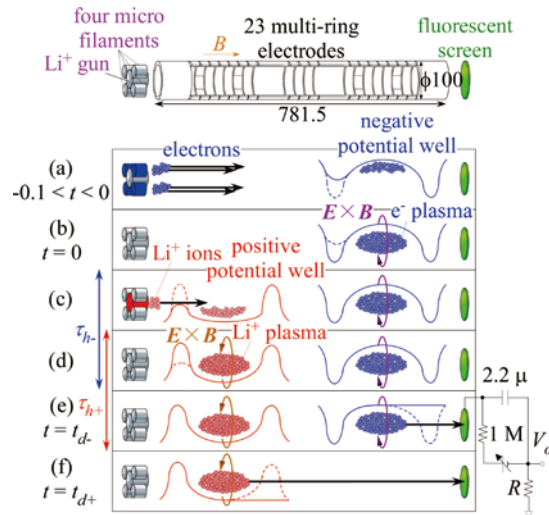


図1 本研究で開発する装置と、その装置で行う検証実験の手順。

(1) この新装置はマルンバークペニングトラップと呼ばれるトラップ装置を基にして作られている。通常のマールンバークペニングトラップでは、正もしくは負のポテンシャル井戸しか作れないが、今回開発した新装置では、正負2つのポテンシャル井戸を同時に作り出す事ができる。

(2) ポテンシャル井戸を単純な井戸型とするのではなく、軸方向に放物的に変化するような型とした方がトラップ時間の伸長に繋がることが知られている。新装置でもこのようなポテンシャル形状を採用しており、それを作り出すために、図2に示しているような23個の中空型円筒電極群を設計・製作している。



図2 中空型円筒電極群の写真。アルミで作られた電極に金メッキを施している。

(3) リチウムイオンからなるイオンプラズマ（イオン流体）は、ベータユークリプタイトを用いて生成されている。一方、電子のみ

からなる電子プラズマ（電子流体）は、4本のフィラメントから出された電子束の自己組織化過程（後述する）を利用して作られている。図1に示しているように、これらの荷電粒子ソースは、実験遂行上の制約より、すべて装置の左端に集約されなければならない。そのために、図3に示すようなホルダーを設計・製作している。

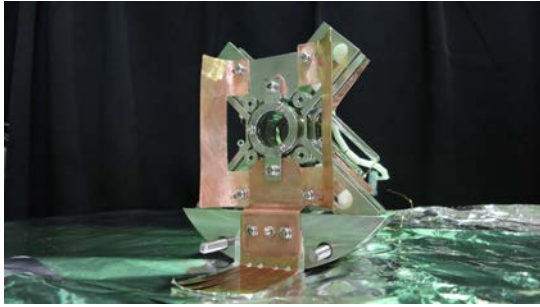


図3 中心軸上に置かれる一つの（ベータクリプタイト）と、中心軸から22ミリ離れた同心円上に四つの電子カソードを同時にマウントできる特注ホルダー。

(4) 図1に示している通り、この新装置においては、リチウムイオン（イオン流体）および電子プラズマ（電子流体）の生成・閉じ込め・重畳・排出計測の全過程が、完全に制御されなければならない。この制御に用いるシーケンス系や画像計測器についても、本研究ですべて設計・製作してきている。これらについては日本物理学会とプラズマ・核融合学会を中心に報告してきているが（末尾の学会発表リストを参照された）、現在これらすべてを含めた新装置（図4参照）の全容に関する論文を準備している。

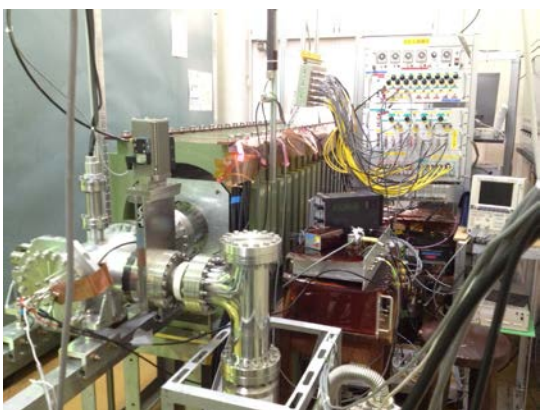


図4 新装置とシーケンス系。

4. 研究成果

第3章で、本研究においては、電子プラズマは4本のフィラメントから出された電子束の自己組織化過程を通じて作られている

ことを述べた。本章では、まず初めに、この電子プラズマ（電子流体）の生成過程から説明する。図5は電子束が装置軸上へと収斂していく様子を装置端部（図1の右端）からエンドオンで見たときのものである。写真内に示している数字は時間経過を表しており、このデータから分かるように、電子束が射出されてから約1ms経過後に、一つの電子プラズマが軸上に生成される。この収斂過程において、電子束に対しては何の外力も作用させていない。したがって、この過程もひとつの自己組織化現象ということができる。

この収斂過程において、電子プラズマ（電子流体）に対して外力を作用させると、収斂時間が短くなる事も実験でわかっており、継続してデータを集めている。

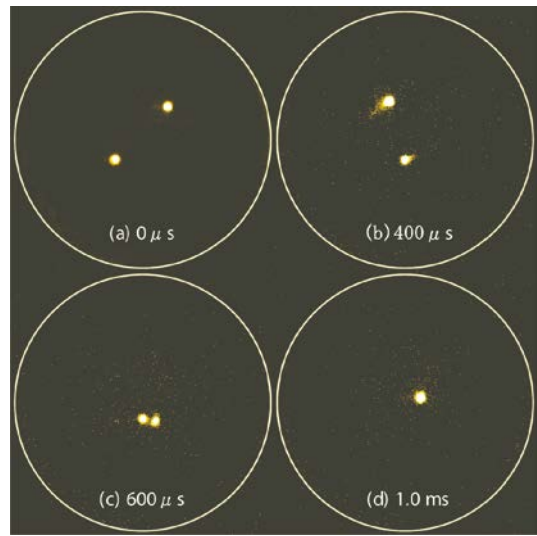


図5 複数の電子束から電子プラズマが形成されていく様子。

つぎに、リチウムイオン（イオン流体）と電子プラズマ（電子流体）の独立生成に成功していることを示しているデータを説明する。イオン流体と電子流体はそれぞれ電荷もっている。したがって、軸方向にイオン流体および電子流体を閉じ込めている静電ポテンシャル壁を取り除くと、それら流体は装置端部（図1の右端）へと流出することになる。図6は、このときの流出電流を装置端部に置かれた電流計測器で測定したときの流出電流の時間変化を表している。グラフに示している通り、流出電流が負の場合、それは電子流体が流出してきていることを表している一方、流出電流が正の場合、イオン流体が流出していることを意味している。データより、電子流体（左側）もイオン流体（右側）も放物型ポテンシャル井戸の底から流出してきており、つまり、本研究で開発した新装置でイオン流体と電子流体の双方を閉じ込めることに成功していることがわかる。

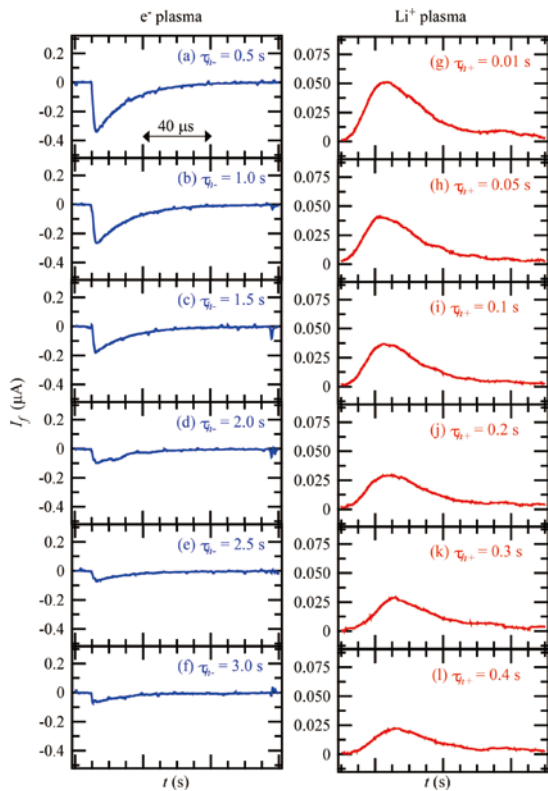


図6 開発した新装置で得られる電子プラズマ（電子流体）とリチウムイオンプラズマ（イオン流体）の閉じ込め信号。

図6のデータは、2つの流体を一つずつ生成し閉じ込めた時のデータであったが、電子流体とイオン流体の2流体を独立に生成しつつも、同時に閉じ込める事ができることを以下で説明しよう。

図1に示しているような配置、つまり、電子流体を図1に向かって右側にある負のポテンシャル井戸底に生成して閉じ込める一方、イオン流体を左側にある正のポテンシャル井戸底に生成する場合、装置右端の電流計測器には、電子流体の流出信号が見られた後に続いて、イオン流体の流出信号が表れることになる。図7は、その事実を表している測定データ例である。グラフより分かるように、まず最初に負のスパイク信号が現れた後、生のスパイク信号が現れている。

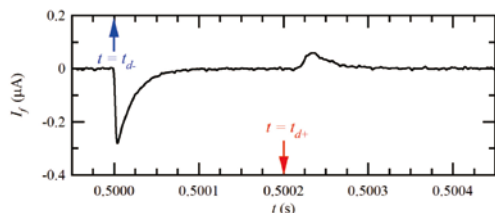


図7 電子流体とイオン流体の同時閉じ込めを表している典型的データ。

データを示すことは控えるが、このような

2流体の同時閉じ込めは、図1に示す装置図に対して向かって右側にイオン流体を、左側に電子流体を生成して閉じ込めた時も実現できている。

以上のように、本研究で開発した実験装置において、リチウムイオンプラズマと電子プラズマが、エレクトロニクス的に完全制御されながら独立生成されるだけでなく同時に閉じ込められることを示した。ここまでの本研究経費で計画され、そして達成された内容である。

今後の研究の展開は以下ようになる。これら2つのイオン流体と電子流体は、互いに逆向きとなる自己電場を有しているため、磁力線の周りについては互いに逆向きとなるE×B回転を行う一方、磁力線に平行方向には高速で動く電子に対して比較的遅いイオンの並進運動が生じている。つまり、互いに異なる流体運動を行っている電子流体とイオン流体が存在していることになる。プラズマ密度については、2流体プラズマの特性長とされるイオン表皮厚が実験装置と同程度となるよう調整されている。本研究の次なる課題は、上記のように全く異なる流体運動を行っているリチウムイオンプラズマと電子プラズマをマーキングさせることである。このとき、2流体と呼ばれるプラズマの中で実際にはどのような現象が現れるのか、実験的に初めて明らかにされる事になる。

最後に、本研究で遂行した実験装置の開発と初期実験は、研究代表者の研究室に所属する大学院生の助力があってこそ成し遂げられた。山田優介君、山崎翔太郎君、平松秀朗君、葉名祐紀君、大西祐太君、中瀬貴文君、太田貴博君、そして、下村遼君、西岡修一君の各氏に御礼申し上げる。

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5件）

- ① H. Himura, H. Shimomura, T. Nakase, A. Sanpei, S. Masamune, Initial results on simultaneous confinement of pure lithium ion and electron plasmas, Plasma and Fusion Research, 査読有、Vol. 8、2013、2401017-1-2401017-5
DOI: 10.1585/pfr.8.2401017
- ② 中瀬貴文、比村治彦、塩野剛司、竹内信行、蛍光体をITO膜付ガラス盤上へ塗布する簡易な方法、プラズマ・核融合学会誌、査読有、Vol. 89、No. 3、2013、180-185
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_03/jspf2013_03-180.pdf

- ③ H. Shimomura, H. Himura, T. Ohta, T. Nakase, S. Nishioka, A. Sanpei, S. Masamune, A. Mohri, Not only independently producing but simultaneously confining lithium and electron plasmas, Plasma and Fusion Research (Rapid Communications), 査読有, Vol. 8, 2013, 1201003-1-1201003-2 DOI: 10.1585/pfr.8.1201003
- ④ 比村治彦, 三瓶明希夫, 核融合プラズマや強結合プラズマでみられる自己組織化、プラズマ・核融合学会誌、査読有, Vol. 87, No. 7, 2011, 449-456
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2011_07/jspf2011_07-449.pdf
- ⑤ 比村治彦, 正負2つの非中性プラズマのマーキングによる拡張 MHD の検証実験法の開発計画、電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 130, No. 10, 2010, 977-982
DOI:<http://dx.doi.org/10.1541/ieejfms.130.977>
- [学会発表] (計22件)
- ① 下村遼, 拡張 MHD 検証実験用正負2流体プラズマの完全制御、日本物理学会第68回年次大会、2013/3/26-29、広島大学
- ② 太田貴博, イメージチャージ計測による正負2つの非中性プラズマの方位角モード測定と回転電場制御、第29回プラズマ・核融合学会年会、2012/11/27-30、福岡県春日市クローバープラザ
- ③ H. Himura, Initial results on simultaneous confinement of pure lithium ion and electron plasmas, International Toki Conference 22, 2012/11/19-11/22, 岐阜県土岐市セラトピア土岐
- ④ 西岡修一, 電流アンプを用いた非中性プラズマのイメージチャージ計測と運動解析、平成24年度核融合科学研究所共同研究「高ベータプラズマにおける自発的フローと三次元構造の形成」、2012/11/12-13、核融合科学研究所
- ⑤ 比村治彦, 拡張 MHD プラズマ実験用イオンプラズマの閉じ込め特性、第67回日本物理学会年次大会、2012/03/24-27、関西学院大学
- ⑥ 比村治彦, 正負2つの非中性プラズマを用いた拡張 MHD プラズマ実験装置の開発、核融合科学研究所共同研究「高ベータプラズマにおける自発的フローと三次元構造の形成」、2011/12/19-21、核融合科学研究所
- ⑦ 比村治彦, 二流体プラズマ状態検証のためのリチウムイオンプラズマ源の開発と閉じ込め実験、PLASMA CONFERENCE 2011 / 第28回プラズマ・核融合学会年会、

- 2011/11/22-25、石川県立音楽堂
- ⑧ 比村治彦, 非中性プラズマを用いた新しい取り組み-2 流体プラズマからクラスターまで、電気学会プラズマパルスパワー合同研究会、2010/12/16-18、東京工業大学
- ⑨ 比村治彦, 正負2つの非中性プラズマのマーキングによる拡張 MHD の検証実験計画、第27回プラズマ・核融合学会、2010/11/30-12/3、北海道大学
- ⑩ 比村治彦, 非中性プラズマの物理と応用" (招待講演)、応用物理学会プラズマエレクトロニクス九州・山口地区分科会、2010/11/6、大分県日田市
- ⑪ 比村治彦, 正負2つの非中性プラズマのマーキングによる拡張 MHD の検証実験法の開発 I、日本物理学会秋季大会、2010/9/23-26、大阪府立大

[その他]

- 研究代表者が主宰する研究室ホームページの URL
<http://nuclear.es.kit.ac.jp/new/>
- 本研究による受賞
下村 遼
物理学会領域2「学生優秀発表賞」、第67回日本物理学会年次大会、2012/03/24-27
関西学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比村 治彦 (HIMURA HARUHIKO)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号：30311632

(2) 研究分担者

政宗 貞男 (MASAMUNE SADA0)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号：00157182

三瓶 明希夫 (SANPEI AKIO)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・助教
研究者番号：90379066

(3) 連携研究者

毛利 明博 (MOHRI AKIHIRO)
京都大学・人間・環境学研究科・名誉教授
研究者番号：10025926