

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01056

研究課題名(和文) 2流体プラズマ中に現る正準フラックスチューブの可視化検出とそれへの凍結仮説の検証

研究課題名(英文) Investigation of two component plasmas frozen into canonical flux tube using BX-U

研究代表者

比村 治彦 (Himura, Haruhiko)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：30311632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：2流体プラズマはプラズマの正準フラックスチューブへの凍結を予言している。正準フラックスチューブは流れ場を持つプラズマが磁場中に閉じ込められることによって定義される物理量であり、正準角運動量の保存の有無がポイントになる。BX-Uリニアトラップ装置を用いたリチウムイオンプラズマと電子プラズマを用いた実験では、これらプラズマがそれぞれ単独でトラップされる時は保存性は非常によい。一方で、リチウムイオンプラズマと電子プラズマを同時にネストトラップに閉じ込める時、ネストトラップのサイドトラップ領域まで延伸するプラズマの保存性が下がる。これはネストトラップに付随している性質に起因している可能性が高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

正準フラックスチューブとは当該分野でも馴染みの少ない概念である。この考え方は正準角運動量を根底に持つ。正準角運動量には流れ場と磁場が含まれている。したがって、正準フラックスチューブという概念を現在流れ場や乱流が話題になっている最先端プラズマ物理に導入したことが一番の成果である。この正準フラックスチューブへの凍結の度合いは、BX-Uリニアトラップ装置では電子プラズマについては強い。これを実験的に判明させるために、当該装置に様々な工夫を施したことが第二の成果である。観測された電子プラズマの凍結度合いがイオンプラズマの存在によってどのように変化するのかについては更なるエビデンスが必要である。

研究成果の概要(英文)：The two-fluid plasma model predicts the frozen-in of plasma with a flow into a canonical flux tube. A canonical flux tube is defined by the confinement of plasma with a flow field in a magnetic field, and the key point is whether the canonical angular momentum is conserved. Experiments using lithium ion and electron plasmas in a BX-U linear trap apparatus have shown that when these plasmas are trapped independently, the conservation of angular momentum is very good. On the other hand, when lithium ion and electron plasmas are simultaneously trapped in the nest trap, the conservation of angular momentum in the plasma extending to the side trap region of the nest trap is reduced. This is most likely due to the properties associated with the nest trap.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：正準フラックスチューブ 正準角運動量 渦 純イオンプラズマ 純電子プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

様々なプラズマ関連学分野で広く知られているプラズマの流体的取り扱い方法に、1 流体プラズマ(MHD)がある。MHD では、プラズマを電流を流すことができるが、電荷を持たない気体とみなす。この MHD 方程式セットはスケール長  $L$  を含まない。そのため、MHD は、宇宙プラズマのような巨大なプラズマに対しても、マイクロプラズマのような小さいプラズマに対しても、原理的に等しく成り立つ。このために、実際にはどのようなプラズマに対して MHD が成り立つのか、その適用可能性を明らかにするために、多くの研究が行われてきた。それらの結果、現在までに、MHD は  $L$  が長く熱緩和したプラズマ"の巨視的静止平衡や安定性に対して有効と結論づけられている。しかし、この帰納的結論は明らかに不十分であり、プラズマを極端に単純化している MHD がなぜ機能するのか、MHD が適用できる実効的な  $L$  や時間  $t$  はいくらなのか、これら根本的な問いに対して何も答えない。このような曖昧さが MHD に残されたまま、近年、核融合プラズマの中で局所的に形成される境界層のような狭い領域内でのプラズマ挙動、ベータ値が高く急峻な圧力勾配  $\rho$  領域を含むプラズマや、MHD モデルには含まれていないイオン速度場  $\mathbf{u}_i$  が存在するプラズマの平衡・安定性の観測事実、磁場  $\mathbf{B}$  が弱いためにイオンと電子の磁化度合いの差が大きい磁気中性面付近でのイオン異常抵抗や、磁気リコネクションの発生のように、MHD の適用が不相当と判断できる現象}に対しては、プラズマを MHD として捉えるのではなく、 $\mathbf{u}_i$  や電子速度場  $\mathbf{u}_e$  を含む拡張 MHD とみなす取り扱いが用いられている。歴史的には、MHD は、プラズマ中のイオン群と電子群がそれぞれの流体方程式にしたがって流体運動すると考える 2 流体プラズマ方程式セットを起点として導出された。この過程で、様々な近似がプラズマになされてきた。その一例が、プラズマ中の全域で、プラズマは電氣的に中性 ( $\sum n_i = n_e$  が成立。) であり、かつ、 $\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_e = 0$  と近似することである。この MHD モデルが示す重要な帰結の一つが、プラズマの磁束管  $\mathbf{B}$  への凍結である。

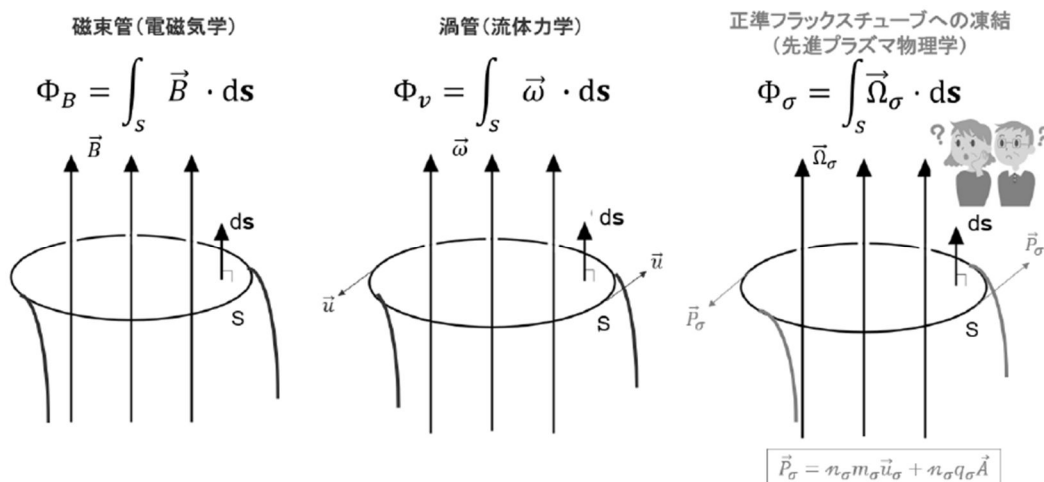


図 1: 磁束管  $\mathbf{B}$ ・渦管  $\mathbf{v}$ ・正準フラックスチューブ の比較 . ここで、下付添字は  $i, e$  を表している .  $\mathbf{B}$  は、 $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{v}$  の両方の概念を含む“ハイブリッドモデル”とも理解できる .

一方、拡張 MHD とは、2 流体プラズマ方程式から MHD 方程式を得る導出過程の途中で、どの近似操作を取り止めるかに依存して得られる様々な non-MHD プラズマモデルの総称である。拡張 MHD では、プラズマはもはや電氣的に中性でなくてもよい。また、プラズマ中に  $\mathbf{u}_i$  と  $\mathbf{u}_e$  が含まれてもよく、図のように、 $\mathbf{u}_i$  と  $\mathbf{u}_e$  の値や空間分布がそれぞれ異なってもよい。実際、2 流体プラズマモデルでは、プラズマをイオン流体 (イオンプラズマ) と電子流体 (電子プラズマ) の 2 つの独立な流体へと完全に分けて考えている。そして、この時、プラズマはもはや  $\mathbf{B}$  に凍結するのではなく、図の右端のように、イオンプラズマと電子プラズマのそれぞれに対応する正準フラックスチューブ に凍結すると予測されている。

### 2. 研究の目的

しかしながら、イオンプラズマと電子プラズマがそれぞれの  $\mathbf{B}$  に凍結していることは未検証の物理事項である。そこで本研究では、イオンプラズマと電子プラズマの  $\mathbf{B}$  をネストトラップ内で可視化するために、ネストトラップ内でそれらプラズマのみの空間・時間発展を正確に観測することを第 1 目的とした。第 2 に、得られた観測結果から、 $\mathbf{B}$  への凍結の真偽を実験的に推定するために、それらプラズマの形状とネストトラップ内での閉じ込め時間の関係に基づいて速度場の空間・時間発展を受動的に測定する手法の実験的探索を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、蛍光盤付 MCP については、従来のものより可視領域が直径 75 mm まで広げられたものに取り換えた。これにより、ネストトラップ内全域でのプラズマダイナミクスを観測できることになる。また、その MCP の入射面電極については、新たにハニカム構造をしたメッシ

メッシュ電極を特注した。これにより開口率が約 90%にまで上がる。さらには、高速度カメラにナックイメージテクノロジー社製の ACS-1 M60 を導入した。これらの組み合わせで、撮影速度は約  $1 \mu\text{s}$  の分解能に向上した。図 2 はその測定システムの概略図を表しており、図 3 は開口がハニカム構造となっている COM mesh の実物写真である。写真では鮮明に見えていないが、中央部 MCP の前面は六角形をした多数の開口（ハニカム構造）がエッチングによりタンガステン製金属盤の上に開けられている。開口の 1 辺は  $0.5 \text{ mm}$  で、開口と開口の間の線径は  $0.03 \text{ mm}$  にまで細くされている。

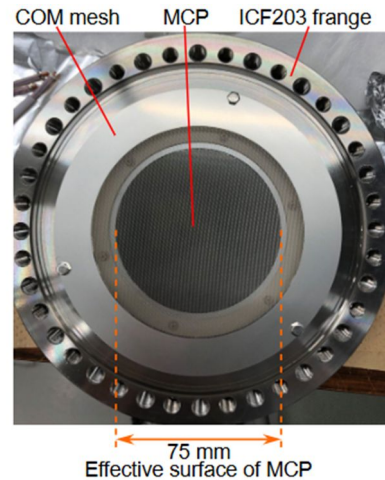
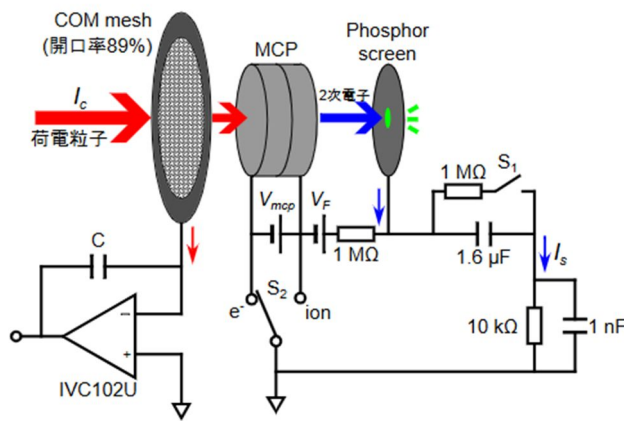


図 2: 本研究での測定システムのセットアップ。

図 3: ハニカム構造をしたメッシュ電極。

#### 4. 研究成果

図 4 は、本研究で導入した設備により撮られた電子プラズマ生成過程の最中に生じている複数の渦構造をした電子プラズマのマーキングの詳細である。これは従来までの測定システムでは決して撮影できなかったものであり、新しく導入した測定システムの優位性を顕著に示している。

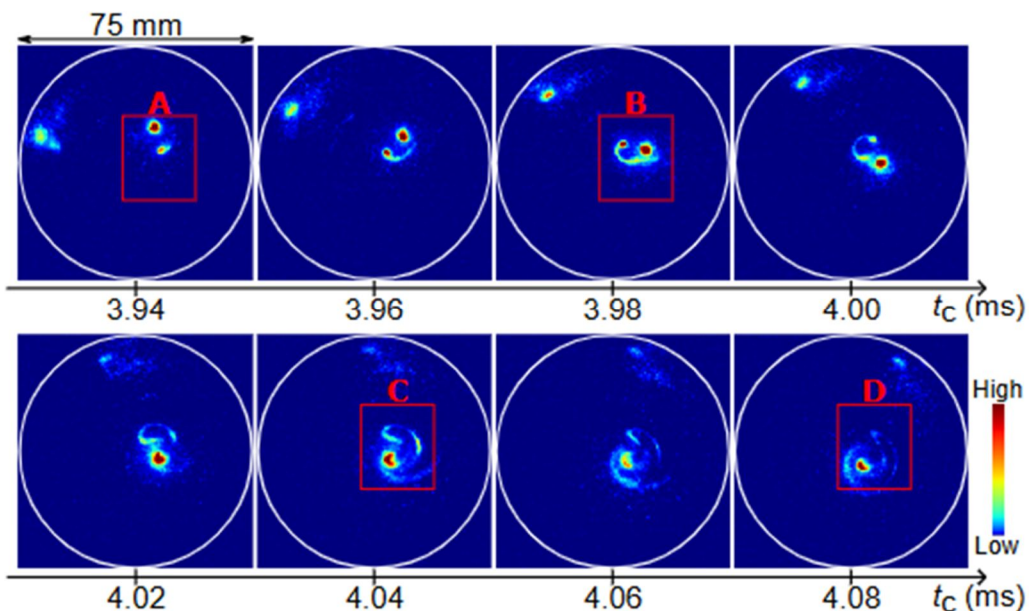


図 4: 本研究で構築された測定システムで撮影された電子渦がマーキングする様子。( T. Okada *et al*, Rev. Sci. Instrum. (2004)より転載. )

次に、ネストトラップ内で本研究を正確に実施するためには、電子およびイオンの数密度の時空間発展を正しく測定する必要があった。これはネストトラップ内に測定対象となる電子及びリチウムイオンが存在しないことが担保されて初めて実現できる。本研究では、この点に対して非常に精緻な実験を繰り返して、その状態が実現できる実験セットアップ条件を確立した。図 5 に示している通り、このネストトラップ装置内部には、装置のバックグラウンド残留ガスに起因する様々な粒子が存在している。本研究に対して主たる不純物となるイオンは水素分子イオンであることを突き止めた。これは本研究テーマの遂行に対して最も重要な事実であった。水素分子イオンはターゲットイオンであるリチウムイオンよりも軽い元素なので、その水素分子イオンが測定画像データに混入してしまう。この混入が本研究前半の最大の課題になったが、これを

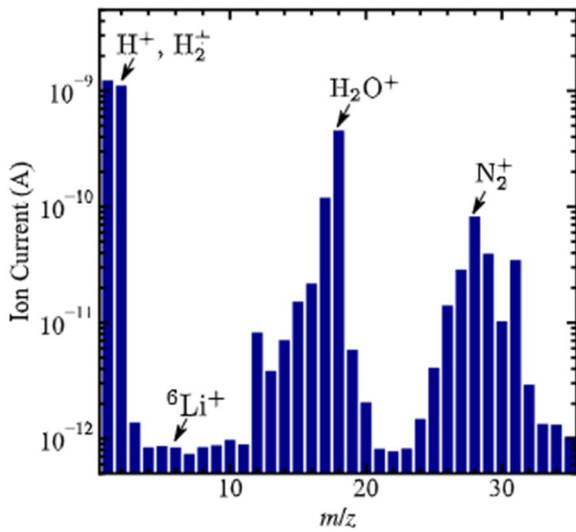


図5: ネストラップ内から得られる典型的なスペクトル信号。

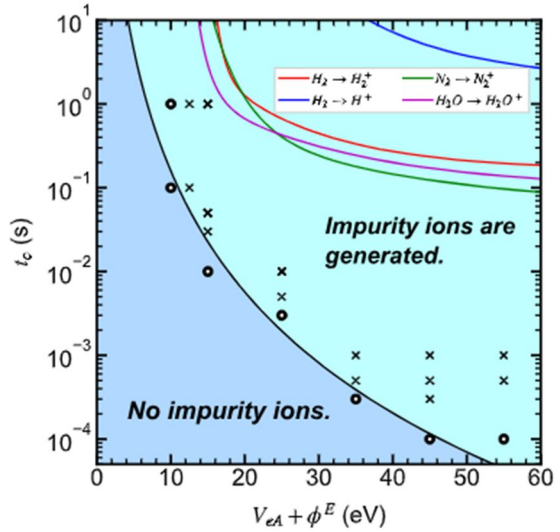


図6: ネストラップ内の残留ガスに起因する不純物イオン発生を回避するパラメーター領域。

回避するために正しい実験セットアップを実験的に確立した。詳しくは投稿論文の紙上にて解説しているが、ネストラップを作ると必然的に両サイドに反対の極性を持つ荷電粒子が加速されるサイドトラップが形成される。今の場合、イオンプラズマのダイナミクスを観測する時に、それら1対のサイドトラップで電子が加速される。ここで電子衝突電離が生じるために、本来観測されるべきイオンはリチウムイオンのみであるにもかかわらず、その他のイオンがネストラップ内に発生する。これらがリチウムイオンプラズマ内に混入するという現象が生じる。図6の左下側の濃青パラメーター領域であれば、それら不純物イオンの生成が回避される。

図7は、図6の濃青のパラメータ領域で、電子プラズマの密度を下げながらリチウムイオンプラズマと重畳させるスキーム(メソッド)例を2つ示している。Method 1のみ説明する。あらかじめ、電子プラズマを負のポテンシャル井戸にトラップすると同時に、左側の正のポテンシャル井戸にリチウムイオンプラズマをトラップする。この状態の後、電子プラズマの一部を右側のポテンシャル障壁を上げることで、右側方向へと吐き出す。これにより電子密度をイオン密度に対して変化させる。その後、電子プラズマがトラップされている負のポテンシャル井戸を包含する形で左からリチウムイオンプラズマを重畳させる。このとき、リチウムイオンプラズマのz軸回りの回転方向と電子プラズマのz軸周りの回転方向が互いに異なるままであれば、リチウムイオンプラズマと電子プラズマはそれぞれの正準フラックスチューブに拘束さ

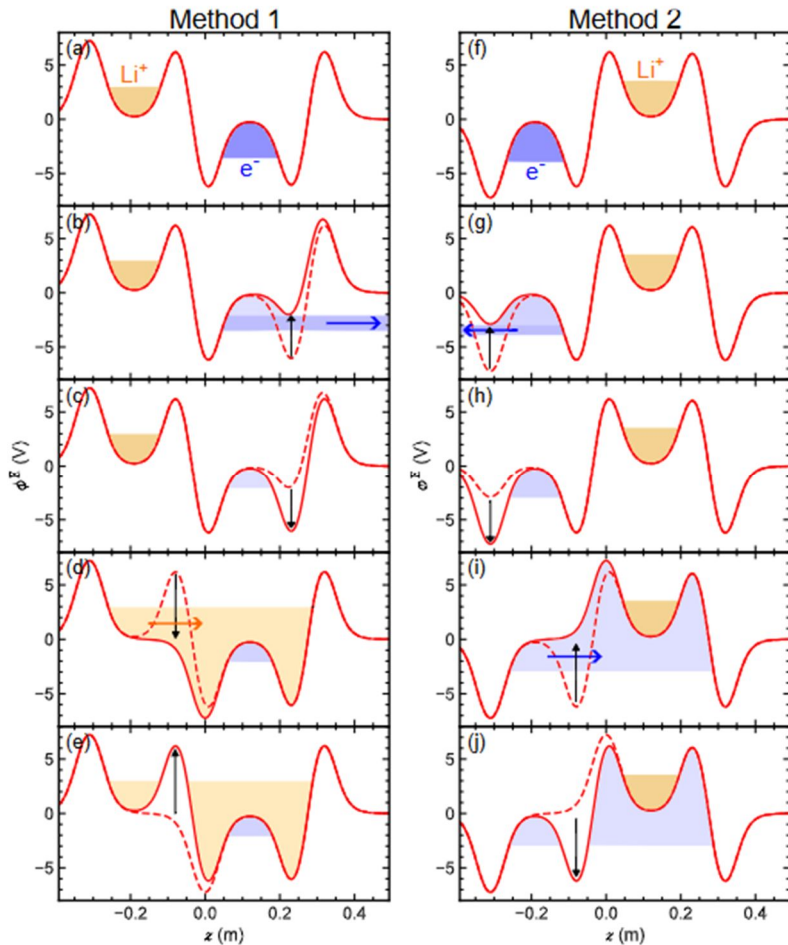


図7: イオンプラズマと電子プラズマに別々の流体運動を持たせておいて、その運動が維持されるかを調べる実験スキームの2例。

れながら同じ空間位置に存在するということになる。このような状態が理論的に存在しうるとは我々のグループの 2 次元反差動剛体回転平衡理論研究で示しているものの、その理論は 2 次元であり図 7 のような 3 次元ではない。ここに理論と実験との差異はある。

図 8 は、リチウムイオンプラズマを Method 1 の方法によって移送させた場合のエンドオン画像の時間変化例を表している。ここで図 8(a)は井戸型ポテンシャル(マルンバークトラップと呼ばれている)の時のリファレンスデータであり、この発光画像と時間変化が同じであれば、ネストトラップ型固有の影響が排除されていることを示すことになる。しかしながら、図 8(a)を図 8(b)と(c)に合わせて見てみると、トラップの型がネストトラップになっている時に発光強度の減衰が明らかに速い。これは、ネストトラップ内でリチウムイオンプラズマが 3 次元回転平衡を取れないことに起因している可能性がある。その上で、現在、リチウムイオンプラズマと電子プラズマとの重畳を行い、電子プラズマの有無による減衰時間の変化分から正準フラックスチューブへの凍結の有無を図ろうとする実験を継続している。ここに差異が現れれば、具体的には発光強度の減衰が図 8 と同程度であれば、リチウムイオンプラズマは正準フラックスチューブに凍結している可能性がある。

図 8 とは逆に、電子プラズマの発光強度の時間変化をしてみると、図 8 ほど有意な時間変化が見られない。この結果は、電子プラズマの方は正準フラックスチューブに凍結している可能性が高いことを強く示唆している。これらを同定するためにさらなる実験データの蓄積と厳密なデータ解析が必要とされる。また、正準フラックスチューブへの凍結研究にネストトラップを適用する妥当性、特にサイドトラップ有無の影響については検討が必要とされる。

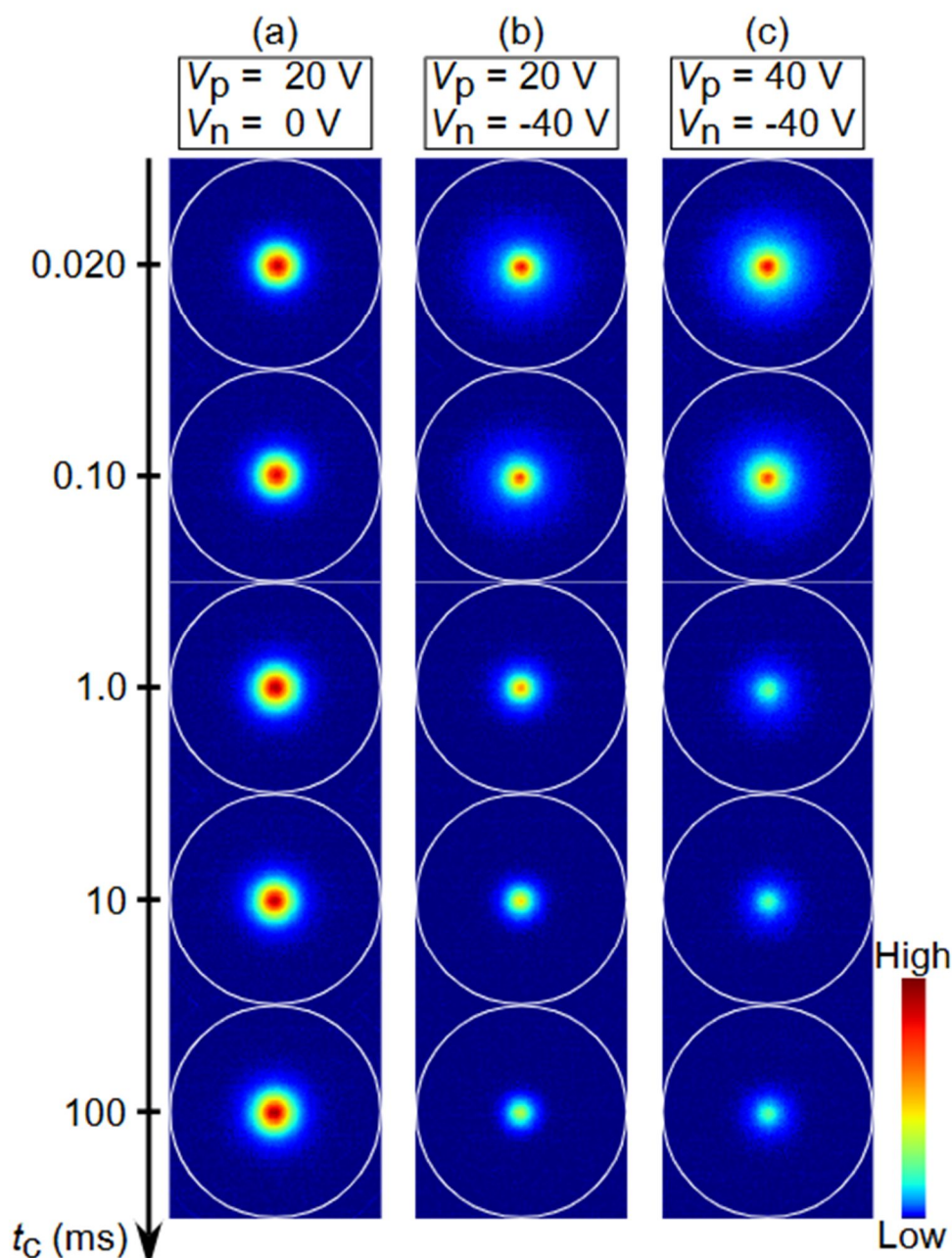


図8: リチウムイオンプラズマを(a)マルンバークトラップ型のトラップに重ねた場合と、(b)と(c)ネストトラップ型のトラップに重ねた場合のエンドオン画像の時間変化の例。

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 2件）

1. 著者名 Okada T., Himura H., Yamada S., Nishio S., Sanpei A.	4. 巻 460
2. 論文標題 Observation of impurity ions during a plasma translation experiment in nested Penning traps	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 128617 ~ 128617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2022.128617	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 Nakajima Yutaro, Himura Haruhiko, Okada Toshikazu	4. 巻 12
2. 論文標題 Clear imaging of ion cloud rotation using a combination of a thin metal wire, a micro-channel plate attached to a phosphor screen, and a high-speed camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 045015 ~ 045015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0084236	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 Nakajima Y., Himura H., Sanpei A.	4. 巻 87
2. 論文標題 Counter differential rigid-rotation equilibrium of electrically non-neutral two-fluid plasma with finite pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 905870415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0022377821000854	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 Okada T., Himura H., Nakajima Y., Sanpei A.	4. 巻 95
2. 論文標題 Single-shot fast cinematic imaging during merging process of multiple electron filaments in electrostatic potential well	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033303 ~ 033303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0181102	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 OKADA Toshikazu, HIMURA Haruhiko, NAKAJIMA Yutaro, SANPEI Akio	4. 巻 18
2. 論文標題 Confinement Experiments of Pure Ion and Electron Plasmas in a Nested Trap	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401072 ~ 2401072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.2401072	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10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 岡田敏和, 比村治彦, 中島雄太郎, 三瓶明希夫
2. 発表標題 電氣的に非中性な2 流体プラズマの回転平衡状態の継続時間の観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島雄太郎, 岡田敏和, 比村治彦, 三瓶明希夫, Meghraj Sengupta
2. 発表標題 PICシミュレーションを用いた電氣的非中性二流体プラズマ 二次元平衡の安定性解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 プラズマ学および関連分野の最新動向
3. 学会等名 日本学術振興会学術システムセンター数物系科学班セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nakajima, H. Himura, M. Sengupta
2. 発表標題 Numerical simulation of counter-differential rigid-rotation equilibrium in electrically non-neutral two-fluid plasmas
3. 学会等名 13th International Workshop on Non-Neutral Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Okada, H. Himura, Y. Nakajima, S. Nishio, A. Sanpei
2. 発表標題 Experiments of co-existing pure ion and electron plasmas with difference in their densities
3. 学会等名 13th International Workshop on Non-Neutral Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島雄太郎、岡田敏和、比村治彦、三瓶明希夫
2. 発表標題 有限の温度を持つ二流体プラズマの反差動剛体回転平衡解の導出とその検証実験
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田敏和、中島雄太郎、比村治彦、三瓶明希夫
2. 発表標題 正負非中性プラズマの重畳によって生成された2流体プラズマ状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 比村治彦、三瓶明希夫、岡田敏和、中島雄太郎 井上孟流、高岡亮太、稲垣泰一郎、小嶋夏葵
2. 発表標題 メタステートでの拡張MHDプラズマの保存量の検証研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島雄太郎, 岡田敏和, 比村治彦, 三瓶明希夫
2. 発表標題 有限の圧力を持つ電氣的に非中性な2流体プラズマの反差動剛体回転平衡解の導出
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okada, Y. Nakajima, H. Himura, A. Sanpei
2. 発表標題 Experimental Study of Two-Fluid Plasma Equilibria Using Nonneutral Plasmas
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都工芸繊維大学・プラズマ基礎工学研究室  <a href="http://nuclear.es.kit.ac.jp/">http://nuclear.es.kit.ac.jp/</a>          イオンクラウドの回転の鮮明な撮影に成功  <a href="https://www.kit.ac.jp/2022/04/news220414/">https://www.kit.ac.jp/2022/04/news220414/</a></p>
--

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	三瓶 明希夫  (Sanpei Akio)  (90379066)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授    (14303)	
研究分担者	廣田 真  (Hirota Makoto)  (40432900)	東北大学・流体科学研究所・准教授    (11301)	
研究分担者	稲垣 滋  (Inagaki Shigeru)  (60300729)	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授    (14301)	

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		
米国	Lawrence Livermore National Laboratory		