

## 高速度カメラ、蛍光板付きマイクロチャンネルプレート、 及び細い金属線を組み合わせた イオンクラウドの回転の鮮明な撮影

京都工芸繊維大学電気電子工学系 比村治彦教授、同大学院生 中島雄太郎（工芸科学研究科博士後期課程電子システム工学専攻）らは、高速度カメラ、蛍光板付きマイクロチャンネルプレート、及び細い金属線を組み合わせることで、イオンクラウドの回転の鮮明な撮影に世界で初めて成功した。測定した回転角から計算されるイオンクラウドの角速度は、イオンクラウドが剛体回転平衡状態にあるときの理論的な角速度の値に近い値であることが明らかになった。

この研究成果は、学術雑誌「AIP Advances」の2022年4月号に掲載された。

### ポイント

---

- ✓ イオンクラウドの回転の撮影に成功した。
- ✓ 測定には高速度カメラ、蛍光板付きマイクロチャンネルプレート、及び細い金属線を組み合わせた測定系を用いている。
- ✓ 本実験の測定によって得られたイオンクラウドの回転の角速度は、イオンクラウドの剛体回転平衡時の角速度に近い値であることがわかった。

### 研究の背景

---

近年の先進的なプラズマ物理学では、二流体プラズマモデル<sup>1</sup>のように、プラズマに本来存在しているであろう電子プラズマの速度場 $\vec{u}_e(\vec{r}, t)$ や、イオンプラズマの速度場 $\vec{u}_i(\vec{r}, t)$ を取り込むようになってきている。 $\vec{u}_{i,e}$ を測定する技術は、大きく分けると能動的計測法<sup>2</sup>と受動的計測法<sup>3</sup>に分類される。これらの分類においては、本研究の測定方法は、磁場 $\vec{B}$ によって閉じ込められた真空容器中のプラズマから十分離れた位置に、細い金属線（ワイヤー）を設置し測定するというハイブリットな測定技術になる。

プラズマが磁力線に沿って流れ出し、 $\vec{B}$ に垂直なワイヤーを通過するとき、ワイヤーはプラズマを相対的にスキャンすることになる。プラズマが全体として $\vec{B}$ の周りを回転している場合、ワイヤーでスキャンされた断面は、プラズマが回転にしたがって回転を続ける。つまり、この面の回転運動を観測することができれば、 $\vec{u}_{i,e}$ の値を調べられることになる。

これと類似の手法は、長く連続した電子( $e^-$ )ビームが自己電場 $\vec{E}_s$ と $\vec{B}$ によって $\vec{E}_s \times \vec{B}$ ドリフト<sup>4</sup>の方向に剛体回転するような平衡状態の実験的な検証に用いられた。実験では、検出器として蛍光板が使われており、ワイヤーでスキャンされた面が蛍光板上に影として現れ

るため、フィルムカメラによって面の回転を撮影することができる。ワイヤーと蛍光板の距離を徐々に離していくと、それに応じてワイヤーから生じたスクリーン上の影が回転していき、電子ビームの回転を測定ができる。

一方で、このようなハイブリッド測定技術は、これまで低密度で短い純イオンプラズマの  $\vec{u}_i$  の測定に適用されていない。この理由は、純イオンプラズマの場合、ウォールプローブ<sup>5</sup>のような能動的な計測手法を用いて正確に測定できることがその一つである。しかしながら、電氣的に非中性な二流体プラズマのような、イオンと電子の両方の荷電粒子が閉じ込められている系の場合、マルチリング電極 (図1 参照) の対応する内壁に誘起される鏡像電荷は閉じ込められたイオンと電子の電荷の和によって決まるため、ウォールプローブ法は適用できない。

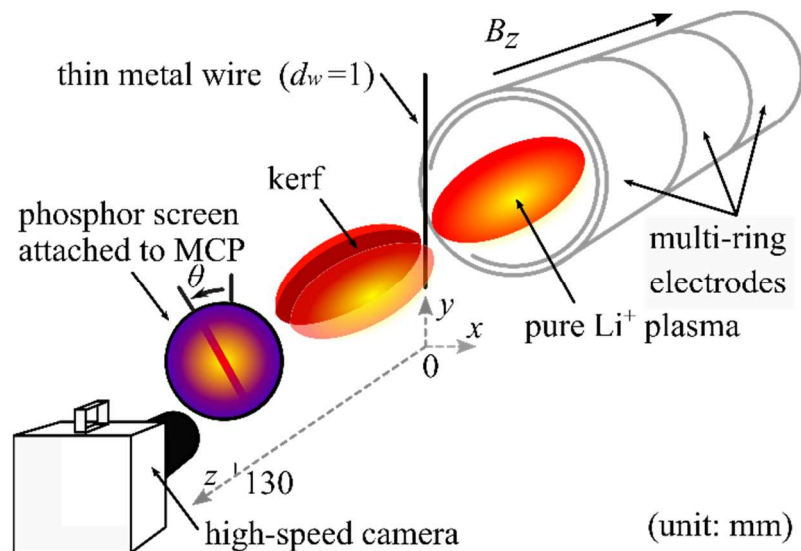


図1 BX-U装置を用いた実験セットアップの模式図

## 研究の内容

本研究では、純イオンプラズマに対して、ワイヤーによってスキャンした面の回転をうまく捉えることに初めて成功した。イオン密度  $n_i$  は約  $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$  であり、イオンデバイ長  $6\lambda_{Di}$  は約  $0.07 \text{ m}$  である。これは BX-U 装置<sup>7</sup> に閉じ込められた純リチウムイオン ( $\text{Li}^+$ ) プラズマの軸長  $L_p$  および直径  $2a$  に相当する長さであり、このイオン粒子の集団はイオンクラウドと呼ばれる範疇に入る。

イオンクラウドの質量は大きいので、磁力線に沿って流れ出るイオンクラウドの速度は電子プラズマより低くなる。本実験では、図1に示すように、BX-U装置内のマルチリング

電極と蛍光板付きマイクロチャンネルプレート<sup>8</sup>との間に、太さ 1 mm のワイヤーを設置し、蛍光板に映るワイヤーの影を高速カメラによって撮影している。図 2 は蛍光板に現れる発光像の典型的なフレームレート(fps)依存性を示したものである。

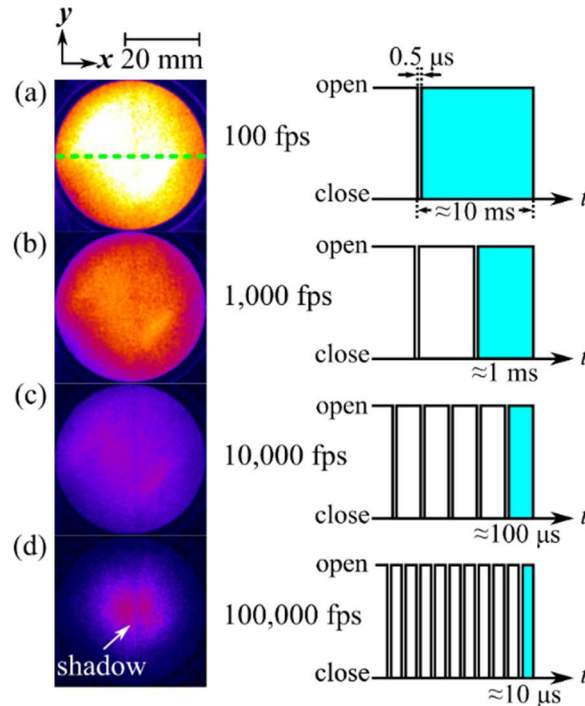


図 2 M60 の高速カメラを用いてイオンクラウドを撮影した画像のフレームレート依存性

図 2 (a) に示すように、100 fps の場合、撮影された画像はハレーションにより完全に曇っていることがわかる。このフレームレートを 100 000 fps に上げると、図 2 (b) ~ (d) のように、ハレーションは徐々に解消され、ワイヤーによる影や $\text{Li}^+$ クラウドの 2 次元的な形状が現れている。実際、100 000 fps で撮影した画像 (図 2 (d)) から、 $\text{Li}^+$ クラウドの回転については、ワイヤーの影が反時計方向に回転していることがわかり、このときの傾き  $\theta_{ex}$  は約 0.087 rad である。

中空型円筒電極内に閉じ込められた純イオンプラズマは、外部印加電場の寄与が  $\vec{E}_s$  と比べて大きい場合、マグネトロン角速度  $\omega_m$  で回転することが知られている。一方で、外部電場の寄与が小さくなる電極外側の領域では、 $\vec{E}_s$  の寄与が大きくなり、 $\vec{E}_s \times \vec{B}$  に近い角速度  $\omega_{ri}$  で剛体回転するとも予測できる。 $\theta_{ex}$  から計算される角速度  $\omega_{ex}$  とこれらの角速度の理論値を比較すると、図 3 のように  $\omega_{ex}$  は  $\omega_{ri}$  とよく一致していることがわかる。

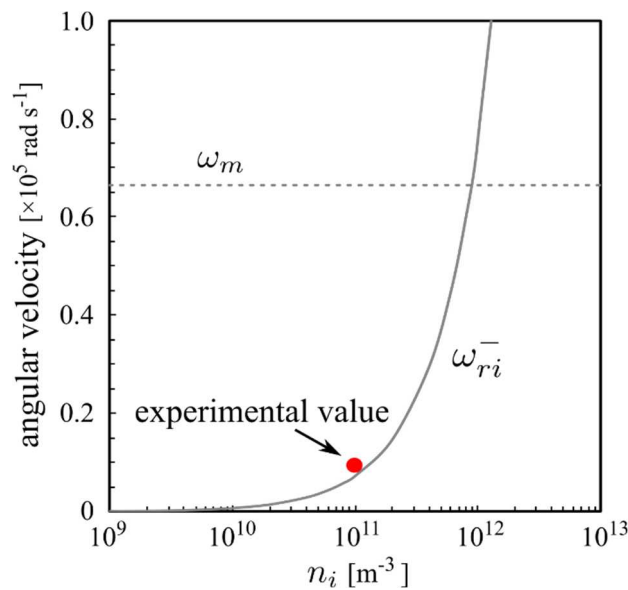


図3  $\omega_{ri}^-$  と  $\omega_m$  の  $n_i$  依存性。赤い点は実験から得られた角速度の値を示している。

## 今後の展開

本方法は、蛍光時間の短い別の蛍光体スクリーンを検出器として用いた場合に、電氣的に非中性の二流体プラズマの  $\vec{u}_i(\vec{r}, t)$  を測定する手段となる可能性がある。今後はこの方法を用いて電氣的に非中性の二流体プラズマの平衡と安定性の研究へ展開させる予定である。

## 用語解説

### 1. 二流体プラズマ

プラズマ中のイオン粒子群と電子群が互いに独立な流体として存在し、それぞれの流体方程式にしたがって運動している状態のプラズマを意味する。プラズマがこのような二流体状態にあるとの前提で理論構築されている電磁流体プラズマモデルのことを二流体プラズマモデルという。

### 2. 能動的計測法

電極やコイルなどの検出器をプラズマ中に挿入して、 $\vec{u}_{i,e}$  を測定し、局所的な  $|\vec{u}_{i,e}|$  の値を直接推定する。しかし、検出器を最小化させたとしても検出器によってプラズマに生じる揺動を完全に排除することができないため、測定の精度は低くなる。

### 3. 受動的計測法

検出器がプラズマから離れたところやプラズマが閉じ込められている真空容器の外部に設置され、能動的計測で生じるような揺動を最小化させることができる計測手法である。さらに、受動的計測法では、プラズマ照射による検出器の損傷を防ぐこともできる。

#### 4. $E \times B$ ドリフト

磁場中をラーマ運動している荷電粒子の案内中心が、 $E$ と $B$ の外積によって計算される $E \times B/B^2$ の速度でドリフト運動する現象。このとき、ドリフトの方向は荷電粒子の電荷の符号によらないという性質がある。また、このドリフトは荷電粒子群によるプラズマでも等しく生じる。

#### 5. ウォールプローブ

プラズマを閉じ込める領域の導体壁に設置するプローブ。荷電粒子が近づくと鏡像電荷が誘起されるため、その時間変化から導体壁付近のプラズマの状態を知ることができる。

#### 6. イオンデバイ長

プラズマ中のイオンが動くことで外部電場が遮蔽される現象（デバイ遮蔽）が有効になる長さ。

#### 7. BX-U 装置

本学電気電子工学系プラズマ基礎工学研究室（比村治彦教授）が所有する実験装置の一つであり直線型となっている。電子ビームと $Li^+$ ビームのソース、円筒型電極、そして、ソレノイドコイル磁場を用いて、二流体プラズマの生成や閉じ込め実験を行うことができる。

#### 8. マイクロチャンネルプレート

マイクロチャンネルプレートとは、入射した荷電粒子（電子やイオン等）の数に応じて大量の2次電子を発生させる装置である。構造は微小な光電子増倍管を束ねた構造になっているので、微弱な紫外線やX線等の光子を大量の2次電子に変換して検出することも可能である。

### 謝辞

---

本研究は、JSPS KAKENHI Grant の No.20KK0063、 No.21H01056、および、No.21K18618 の支援を受けて行った。

### 論文情報

---

- ・ タイトル

“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”

- ・ 著者

Yutaro Nakajima, Haruhiko Himura, and Toshikazu Okada

- ・ 掲載誌

AIP Advances

<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0084236>