

## FRC プラズマにおけるトロイダル流速分布の再構成

## Reconstruction of toroidal flow profile in a field-reversed configuration

○佐野光<sup>1</sup>, 加藤匡<sup>1</sup>, 高橋努<sup>2</sup>, 浅井朋彦<sup>2</sup>\*Hikaru Sano<sup>1</sup>, Masashi Kato<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>2</sup>, Tomohiko Asai<sup>2</sup>

Abstract: Field-reversed configuration (FRC) plasma formed by the field-reversed theta-pinch method starts to be accelerated in the diamagnetic direction just after the phase. A FRC is terminated due to the deformation of toroidal cross section by a rotational instability with a toroidal mode number  $n = 2$ . To investigate the mechanism of the toroidal spin-up, internal profile of ion flow have been reconstructed from line-integrated ion Doppler spectroscopic measurement. A Hill climbing (HC) method is employed for the reconstruction of radial flow velocity profile and its evolution.

## 1. 背景・目的

磁場反転配位プラズマ (Field-Reversed Configuration :FRC) は生成直後からトロイダル方向に回転することがわかっており、この回転による遠心力で駆動されるトロイダルモード数  $n = 2$  の回転不安定性が FRC の配位維持時間を制限する最も支配的な不安定性であるとされてる。トロイダル断面の楕円変形により、プラズマの圧力と磁気圧の平衡が崩れるか、プラズマが放電管に触れるかをしてプラズマは崩壊へと至るとされている。

このような背景から、FRC プラズマの回転機構の解明のためにトロイダル流速の径方向分布を知る必要があった。そのため、逆磁場シータピンチ型 FRC 実験装置 NUCTE (Nihon University Compact Torus Experiment) -III において、イオンドップラー分光 (Ion Doppler Spectroscopy: IDS) 法を用いてトロイダル流速の計測が行われた<sup>[1]</sup>。その結果から、径方向のトロイダル流速の分布やその時間発展が評価されたが、この測定では得られたスペクトルが視線方向の積分量であることは考慮されておらず、フローの速度シアなどの評価を行うためには、これを評価したより正確な分布が必要であると考えた。そのため Pearce 法によるアーベル変換を採用し再構成を行ったが、その手法では中心付近に大きなエラーが集中し、正確な流速分布を得ることが出来なかった。そこで今回の手法では局所探索法と呼ばれる解析方法の 1 つである”山登り法”を用いて再構成を試みた[参考文献]。

## 2. 実験装置 (NUCTE-III, ドップラー分光器)

本実験で使用した NUCTE-III (Figure 1.) は石英製の透明な放電管を使用している。放電管は円筒形で外径

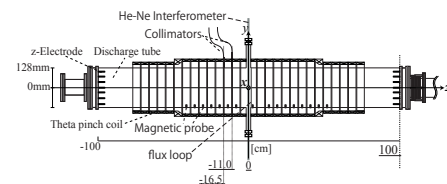


Figure 1. Schematic view of NUCTE-III.

256mm, 長さ 2m, であり、その両端に金属製のフランジが設置されている。放電管を取り囲むように一巻きのソレノイドコイルが長さ 1.5m に渡り 28 個設置されている。装置中央は、内径 340mm の閉じ込め部のコイルが長さ 880mm に渡り設置され、装置両端のミラー部のコイルはそれぞれ内径 300mm, 長さ 275mm である。コイルには 50mm 毎に 5mm のスリットが存在し、各種光学測定器が設置できる。

本実験で用いた IDS システムは、ツェルニ・ターナー型分光器 (Figure 2.) に多チャンネル光電子増倍管を組み合わせることで較正されている。光電子増倍管の

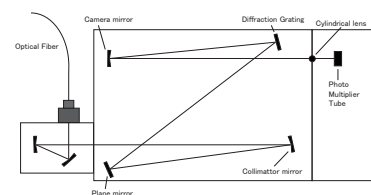


Figure 2. Schematic diagram of Doppler shift spectroscope

チャンネル間の分解能は約 0.011nm に設定し測定を行った。

### 3. 解析結果・結果

今回使用した”山登り法”は実験値と初期値となる流速分布, その近傍値をそれぞれ比較し, 実験値により近い値を近傍解とし, 初期値と入れ替える方法で解を収束させていく手法である. この実験値は実験で得た径方向の流速分布を用い, 初期値は視線方向の流速分布とし, 中心から約 20mm までを剛体回転 (Rigid Rotor: RR) と仮定し, それ以降を実験値と同じ値にした. 近傍値は初期値にランダムな値を付加させたものとした.

本実験では重水素プラズマ中に不純物として含まれる 4 種の炭素 (CV) の線スペクトルを分光器で観測し, シフト量より速度を導出している<sup>[2]</sup>. 速度を  $v$ , 波長のシフト量を  $\Delta\lambda$ , 静止している時の CV の波長を  $\lambda$ , 光速を  $c$  とすると

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c \quad (1)$$

となる.

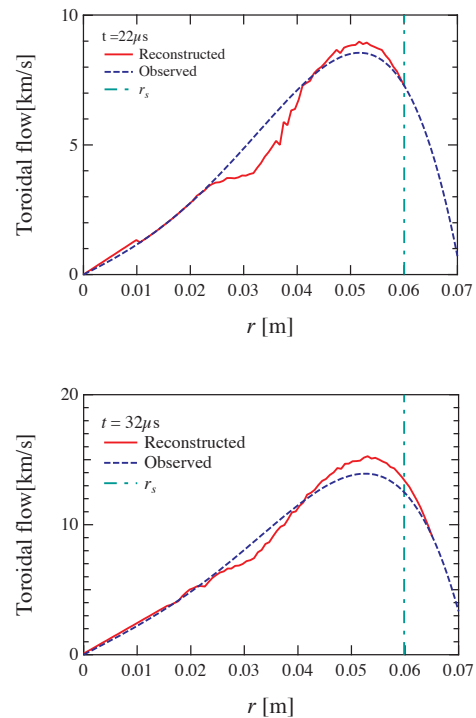
初期値と近傍値を径方向の速度分布にする際, Pearce の方法を重み係数として用いた<sup>[3]</sup>. そして初期値, 近傍値と CV の発光強度分布からそれぞれのガウス分布を作成し, (1)式を用いて径方向の流速分布にした. 作成した径方向の流速分布を実験値と比較し, 近傍解を求め, 初期値と入れ替える, これを繰り返させることによって解を収束させる. 近傍値の値を近傍解としたとき, 近傍値を作成する際に利用したランダムな値の振幅を小さくしていくことで効率よく収束させるようにした.

しかし, この手法でも Pearce の方法を使う際に, 中心付近にエラーが乗ってしまった. そこで測定値に影響の小さい中心から約 10mm までの範囲を解析領域から省き, また, セパトトリックスの外側については, CV の発光強度が 0 になる点を解析領域の境界とし, 解析結果に含まれるエラーを最小限に抑えるようにした. この結果, 速度シアの大きいセパトトリックス付近の流速分布を再構成することができた. Figure 3 が再構成した流速分布と実験値,  $r_s$  の平均の図である.

### 4. まとめ

今回山登り法を採用することで, セパトトリックス

付近の流速分布が確認できた. 一方, 解析に時間がかかってしまうため, 計算効率の向上が今後の課題の一つであると思われる. さらに, 中心付近でのエラーを解消することが難しく, 本解析では解析領域から省くことでしかできなかったため, 今後は, この領域のエラーを解消する方法考える必要がある. また, 流速分布の時間変化を調べ, 回転不安定性のメカニズムの解明に貢献したい.



**Figure 3.** Reconstructed flow profile and directly estimated flow profile from line-integrated CV spectrum for 22 $\mu$ s (top) and 32 $\mu$ s (bottom).

### 5. 参考文献

- [1] 藤川雅透: 「FRC プラズマにおけるトロイダル流速分布の再構成」, 日本大学大学院理工学研究科物理学専攻, 修士論文, 2012.
- [2] 山本学・村山精一: 「プラズマの分光計測」, 学会出版センター, 75p, 1995.
- [3] 矢尾板昭: 「Abel 変換の数値計算法」, 電子技術総合研究調査報告/ 電子技術総研究所編, 172 号, 6p, 1972.