

## FRC プラズマ境界領域におけるトロイダルフロー計測

## Toroidal Flow Measurements on Boundary Region of FRC plasma

○平山泰行<sup>1</sup>, 藤川雅透<sup>1</sup>, 小森谷勇樹<sup>1</sup>, 赤川駿介<sup>1</sup>, 松永宏幸<sup>1</sup>, 戸室啓明<sup>1</sup>, 山口荘輔<sup>1</sup>, 高橋努<sup>2</sup>, 浅井朋彦<sup>2</sup>  
 \*Yasuyuki Hirayama<sup>1</sup>, Yasuyuki Fujikawa<sup>1</sup>, Yuuki Komoriya<sup>1</sup>, Shunsuke Akagawa<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsunaga<sup>1</sup>,  
 Hiroaki Tomuro<sup>1</sup>, Sosuke Yamaguchi<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>2</sup>, Tomohiko Asai<sup>2</sup>

Abstract: A spatial distribution of toroidal flow has been measured by an ion Doppler spectroscopy (IDS) system with a line-spectrum of impurity carbon (CV: 227.02nm) and mach probe. A field-reversed configuration (FRC) plasma is destroyed by a rotational instability with a toroidal mode number  $n = 2$ . However, the growth of other mode number has not been observed. To investigate this limited mode numbers to be grown, the structure of toroidal flow in the boundary region of FRC has been measured by a Mach probe. The effect of measured flow structure and velocity shear on the global stability of FRC has been discussed

## 1. 背景、目的

コンパクトトーラスの一種である磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) プラズマは、逆磁場テーパピンチ法で生成される場合、主圧縮磁場印加後反磁性方向に加速され、そのトロイダル回転は、アルヴェン速度近くに達することが実験的にわかっている。また、トロイダルモード数  $n=2$  の変形が回転の遠心力により駆動され、配位に対する破壊的な不安定生となっている一方で、より高次のトロイダルモードの成長は観測されていない。

ドップラー分光器で計測したセパトリックス内部のトロイダル流は、主圧縮磁場印加後約  $15\mu\text{s}$  で回転方向の反転を生じ、最終的に亜音速程度まで加速されることがわかっている。また、この回転の径方向分布は、完全には剛体的ではなく、セパトリックスに近づくにつれトロイダル流速が遅れ、速度シアを形成している。この速度シアの構造を詳細に観測するため、セパトリックス外部の領域のトロイダルフローについてマッハプローブを用い計測をおこない、さらにそのプラズマ内部やセパトリックス形状に対する影響について検証する。

## 2. 実験装置、計測器

本実験を実施した実験装置 NUCTE (Nihon University Compact Torus Experiment) -IIIは全長 2m の石英製放電管を取り囲むように 25 本のコイル素子からなる一巻きのシータピンチコイルが設置されている。放電管の直径は 256mm、センターコイルの内径は 340mm、ミラーコイルの内径は 320mm であり、放電管壁には磁気プローブ、ワンターンループが直接放電管壁に設置されている。 $z=-0.22\text{m}$  の位置にはコーリメータ用のホルダーを設置することで制動放射、4 価の炭素スペクトルの空間分布およびその時間変化を得ている。また  $z=-0.33\text{m}$  に設置された枝管の上方にはトリプルプローブを、下方にはマッハプローブを設置し流速を計測すると同時に電子温度、電子密度を計測することが可能である。

生成される FRC プラズマは、ポロイダル磁場のみで構成され、中心軸付近に閉じた磁力線配位、外側に開いた磁力線領域を持つ軸対称トロイダルプラズマであ

る。閉じた磁力線と開いた磁力線の境界面をセパトリックスと呼ぶ。FRC のその他のおもな特徴として、平均ベータ値がほぼ 1 であり、生成時の主圧縮磁場印加後、FRC にトロイダル方向の反磁性電流が生じ、この電流によるポロイダル磁場で自ら閉じ込め配位を形成することがあげられる。また、外部からトロイダル磁場を形成する必要がないため、閉じ込めコイルと FRC が鎖交せず、プラズマの移送が容易におこなえる。

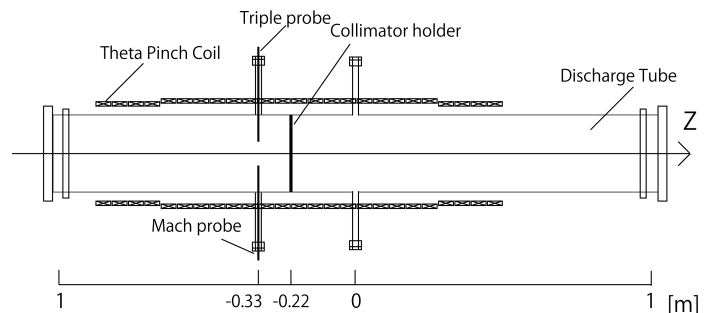


Figure 1. Schematic view of NUCTE-III

### 3. マッハプローブの計測原理<sup>1-4</sup>

図 2 に本実験で使用したマッハプローブの概略図を示す。ボロンナイトライド (BN) 製の四つ穴のロッドに電極となるタングステン棒を挿入し、ロッドの 4 方向にあけられた小窓へ流入してくるイオン粒子を捕集する。電源回路は一般的なトリプルプローブと同様のものを作製し、対称的に置かれた電極に同じ電位差が印加されるような構造になっている。対称に置かれた電極の方向にプラズマの流れがある場合、上流側で得られるイオン飽和電流値と下流側で得られるイオン飽和

電流値に差が生じ、その比をとることでマッハ数が導出され流速を求めることができる。今回の実験では、マッハプローブの挿入長をセパトリックスから 10mm 間隔で移動し周辺プラズマのトロイダル流の空間分布を得た。

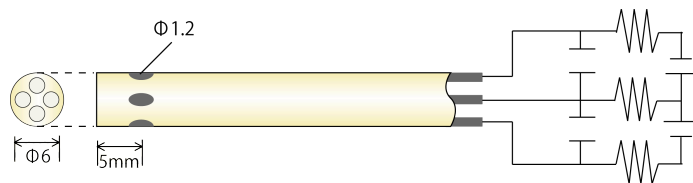


Figure 2. Schematic view of Mach probe

### 4. 流速及びマッハプローブの出力波形

セパトリックス内部はトロイダル流計測にマルチチャンネル型分光器を用いた。これは一度に複数の波長が検出可能な構造になっており、16ch の光電子増倍管に中心波長を基準として 0.011nm/ch の波長の出力を得ることができる。また、ドップラー効果による波長のずれ (ドップラーシフト) からトロイダル流の時間発展を得ることができる。観測されたトロイダル流の x 分布から、剛体回転ではなく、セパトリックス周辺に速度シアが形成されている傾向が観測された。

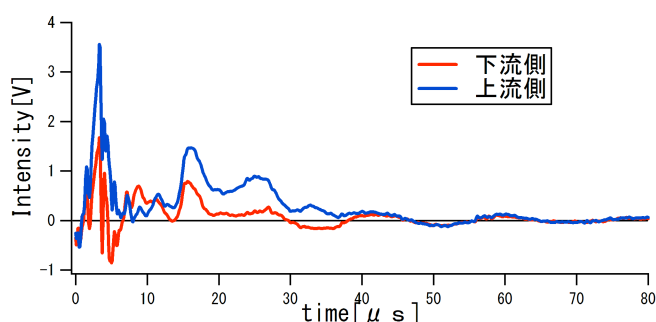


Figure 4. Time evolution of ion saturation current on the Mach probe

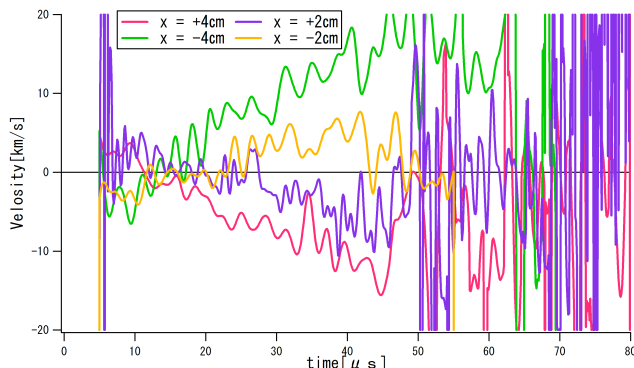


Figure 3. Time evolution of toroidal flow

図 4 はマッハプローブによる  $x=4$  cm でのイオン飽和電流の時間発展のグラフである。上流方向を主圧縮磁場に対する反磁性方向と同様の向きとしている。主圧縮磁場印加直後は回転方向が安定しないが、約  $10\mu\text{s}$  で常磁性方向の回転となり、約  $15\mu\text{s}$  以降は上流側の出力が下流側に比べ大きく、反磁性方向にプラズマが回転していることがわかる。

### 5. まとめ、今後の課題

FRC プラズマ境界領域におけるトロイダル流の空間分布について分光法及びマッハプローブを用いることで得ることができた。しかしイオン粒子の流れをプローブで直接的に計測したため、FRC に少なからず擾乱を与えており、また、速度の絶対値を得るには至っていない。そこでセパトリックス周辺領域でも得られる光の波長を調査し、分光によるトロイダル流速の観測についても、引き続き検討を進める。

### 6. 参考文献

- [1] 安藤 晃 : J.Plasma Fusion Res.Vol.83,No.2, 169-175 (2007)
- [2] P.C. Stangeby, Phys. Fluids, 27, 2699 (1984)
- [3] I.H. Hutchinson, Phys. Fluids 30, 3777 (1987)
- [4] K-S. Chung and I. H. Hutchinson, Phys. Rev.A38, 4721 (1988)