

**FRC 同定を目的とした直交ミラー磁場中の衝突合体プラズモイドの内部電流密度計測**  
**Measurement of Internal Current Density in Plasma Generated by Collisional Merging of FRCs in an Orthogonal Mirror Magnetic Field**

○内山誇心<sup>1</sup>, 菊池龍之介<sup>2</sup>, 小林大地<sup>2</sup>, 高橋努<sup>2</sup>, 浅井朋彦<sup>2</sup>

\*Kokoro Uchiyama<sup>1</sup>, Ryunosuke Kikuchi<sup>2</sup>, Daichi Kobayashi<sup>2</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>2</sup>, Tomohiko Asai<sup>2</sup>

Abstract : Experiments on collisional merging of Field-Reversed Configurations (FRC) in an orthogonal mirror magnetic field have been conducted in the FAT-CM device at Nihon University. In this study, to verify whether the plasma generated in the experiment is an FRC plasma, simultaneous measurements using an internal Rogowski probe and an internal magnetic probe were performed. These measurements examined the presence or absence of diamagnetic currents and compared the measured diamagnetic currents with the magnetic field distribution. If FRC plasma can be identified through this method, it would enable direct access to the plasma edge for divertors or direct energy conversion.

1. 研究背景・目的

研究対象である磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は, 主にプラズマ自体に流れる反磁性電流により形成されるポロイダル磁場と外部コイルにより印加される軸方向磁場で磁場配位が形成される. 日本大学理工学部では FAT-CM 装置を用いた FRC プラズマの衝突合体実験が行われている<sup>[1]</sup>. この衝突合体実験では FRC 様プラズモイド衝突直後に FRC の反転磁場構造を乱すほどの擾乱が生じ, 再び反転磁場構造に緩和することが観測されている. この過程で磁束量が増化しているため新たな電流駆動が生じていると考えられるが, その駆動機構は未解明である.

また, 従来は FRC 様プラズモイドの入射軸方向と衝突合体が生じる閉じ込め領域の外部磁場が同軸上であったのに対し, 現在は直交させた状態で衝突合体実験を行っている. 直交ミラー磁場中による衝突合体生成では, 従来の装置構成とは異なり閉じ込め領域の端部が直接エネルギー変換機構やダイバータ等にアクセス可能な状態が維持できるという利点を有する. そして, この直交ミラー磁場中で衝突合体生成されたプラズマに対して内部電流密度測定は行われていないため, 反磁性電流が発生しているか, 直交ミラー磁場中での電流と磁場の関係は明らかになっていない.

本研究では, 直交磁場中で衝突合体を行った際, FRC プラズマが生成されているかを評価するために, 内部ロゴスキープローブを用いてプラズマ内部の電流密度の空間分布を計測し, FRC の磁場配位を形成する反磁性電流の有無を調べると共に, 内部磁気プローブとの同時計測を行うことで反磁性電流によって磁場配位が形成されているかを確認する.

2. 実験装置・条件

本研究で使用する FAT-CM 装置は装置両端にある生成部で重水素を用いて逆磁場シートピンチ法<sup>[2]</sup>により FRC 様プラズモイドを生成し, コイルの作る磁気圧差で中央の閉じ込め部へ移送する. 閉じ込め部ではおよそ 0.05 T のミラー磁場がプラズモイドの入射軸方向と直交して存在しており, この磁場内で衝突合体を起こす. この磁場は, FRC の移送や配位持続時間と比較すると準定常とみなせる. 衝突合体生成されたプラズマが FRC プラズマである場合, FRC と直交ミラー磁場の関係は Fig.1 のようになる.

なお, 本研究では, 直交ミラー磁場を生成するコイルと同心の円筒座標系 ( $r, \theta, z$ ) を用いて考える.

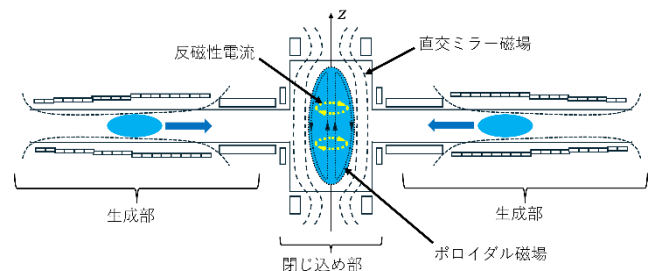


Fig.1 Schematic Diagram of the FAT-CM device

3. 計測手法

3.1. 内部ロゴスキープローブ

内部ロゴスキープローブとは, ロゴスキーコイルを用いてプラズマ内部の局所的な電流密度の時間変化を直接計測できる計測器である.

ロゴスキーコイルは Fig.2 のような形状をしており, 円環内部を通る電流が周囲に作る磁場の時間変化を, トーラス上に巻いたコイルを用いて誘導起電力として

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

計測するものである。単位長さあたりの巻き数  $n$ ，断面積  $S$  のコイルで作られる円環内を通過する電流密度を  $i$  とすると，コイルに生じる誘導起電力  $V$  は以下のようなになる。

$$V = \mu_0 n S \frac{di}{dt} \quad (1)$$

内部ロゴスキープローブは，プラズマ内部に計測器を設置して計測を行うため，プラズマ電流の阻害やプラズマの冷却などの影響が考えられる。

本研究で用いる内部ロゴスキープローブは，ロゴスキーコイルが三つ用いられており，プラズマ内の電流密度を 5.5 cm 間隔の三点で同時に計測できる。窒化ホウ素 (BN) で被覆されており，外径は 2 cm となっている。これらのロゴスキーコイルは非自己積分型であるため，計測を行う際は積分器を使用する。軸対象磁場中での衝突合体実験では Fig.4 のような電流密度が計測された。

内部ロゴスキープローブの校正にはファンクションジェネレーターでパルス電流を流しコイルの時定数を測定し，0.1~2 MHz の正弦波を流して周波数応答を評価する。また，外部磁場が出力に与える影響も評価する。実験で使用する積分器は時定数  $2.2 \times 10^{-5}$  s のものを使用し，ロゴスキープローブは反磁性電流を計測するために  $\theta$  方向で計測を行う。外部磁場成分がノイズとして重畳されることで生じるドリフトは，プラズマが計測位置に存在しないプラズマ生成前後のデータからドリフト成分を推定して減算により補正する。

### 3.2. 内部磁気プローブ

内部磁気プローブは，コイルを用いて局所的な磁場の時間変化を計測できる測定器である。内部ロゴスキープローブと同様に，プラズマ内部に設置される。巻き数  $N$ ，断面積  $S$  のコイルを用いた際に，磁束密度を  $B$  とすると，コイルに生じる誘導起電力  $V$  は以下のようなになる。

$$V = -NS \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

本研究で使用する内部磁気プローブは計測点を六つ持っており， $z$  軸方向の磁場の径方向分布を計測できる。この径方向分布から，軸対称系かつ平衡を仮定し，アンペールの法則を用いることで周方向の電流を以下の式から導出できる。

$$J_\theta = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_z}{\partial r} \quad (3)$$

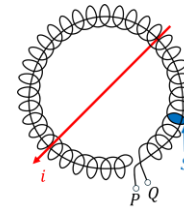


Fig.2 Schematic Diagram of a Rogowski Coil

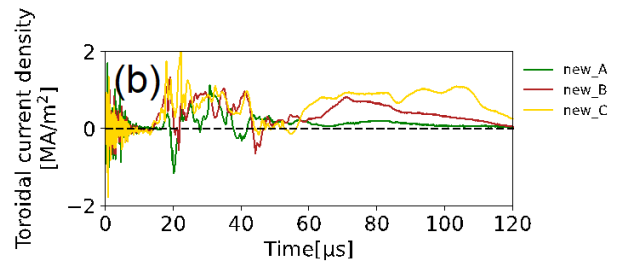


Fig.3 Time evolution of the internal current density in an FRC plasma within an axial magnetic field<sup>[3]</sup>

## 4. 今後の展望

直交ミラー磁場中での衝突合体によって生成されたプラズマに対し，内部ロゴスキープローブと内部磁気プローブでの同時計測を行う。プラズマのシフト等ショット間で起きる変動の影響を避けるために，この二つのプローブはプラズマの中央断面付近で同方向から挿入する。

計測した内部電流密度の分布から反磁性電流の有無を調べる。そして，内部磁場がその反磁性電流から作られているかを内部磁気プローブから再構成した電流密度の大きさや変化を比較する。さらに，各ショット間で反磁性電流の有無や磁場との強度の比較を行うことで，安定して FRC が形成されているか評価を行う。

## 5. 参考文献

- [1] T. Asai et al : “Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment”, Nuclear Fusion Vol.61, 096032, 2021.
- [2] 高橋努, 平野洋一: 「2. FRC の基礎的理解 2.3  $\langle \beta \rangle \sim 1$  をどう作るか?」, J. Plasma Fusion Res, Vol.84, No.8, pp507-510, 2008.
- [3] 小笠原樹利: 「FRC 衝突合体過程におけるプラズマ電流分布計測」, 日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2024.