

移送過程における磁場反転配位プラズマの巨視的運動の観測

Macroscopic plasma motion of Field-Reversed Configuration plasma on the translation process

○蜂須賀拳¹, 松井圭祐¹, 関口純一², 浅井朋彦², 高橋努²*Ken Hachisuka¹, Keisuke Matsui¹, Junichi Sekiguchi², Tomohiko Asai², Tsutomu Takahashi²

Abstract: Macroscopic plasma motion of a Field-Reversed Configuration (FRC) plasma on the translation process has been observed by a axial and azimuth Mirnov coil array and 2D-optical diagnosis system. In FRC plasma, shift and tilt motion around a device axis of theta pinch coil and elliptical deformation of the plasma cross section are growth as Macroscopic plasma motion. These motion are observed by the arrays and mode analysis of the azimuthal and axial direction are performed. The motions are dissolved and the amplitude of each motion is estimated. The relation between the plasma formation conditions and the excitation of the macroscopic motion is explained

1. はじめに

磁場反転配位(Field-Reversed Configuration : FRC)は、開いた磁力線領域とポロイダル磁場のみで閉じた磁力線領域を合わせ持つ。プラズマ内の磁気中性点(磁気軸)があり、その外側と内側で磁場の向きが反転している。プラズマトラスは閉じ込めコイルと鎖交していないため、単連結構造となり装置軸に沿って移送(移動)が可能となる。これらの特徴を利用した新しいFRCの生成法(2つのコンパクトトロイドを超音速移送し衝突合体させ、FRCを生成する)が米国トライアルファエナジー社(Tri Alpha Energy:TAE)のC-2, C-2/U装置において実現され、1[ms]を超える寿命をもつ閉じ込め特性の伸長したFRCが可能となった[1]

日本大学においても、Fig.1 に示すような2つの逆磁場テータピンチ(Field-Reversed Theta Pinch : F RTP)を持つ衝突合体装置 FAT-CM(FRC Amplification via Translation-Collision Merging)でプラズマの移送・衝突実験を開始した。

2つのFRC様プラズモイドを装置軸に沿って移送し衝突合体させる場合、プラズモイドのプラズマの巨視的な運動の挙動を理解することが必要となる。FRC様プラズモイドの巨視的な運動には、装置軸回りのシフト運動やテイルト運動($n=1$ モード運動)や回転運動を伴うプラズマ断面の楕円変形($n=2$ モード変形)などである。これらの運動や変形に伴って開いた磁力線が変形して元々存在しない方位角方向および軸方向依存性を計測することによって巨視的な運動や変形を同定できる。

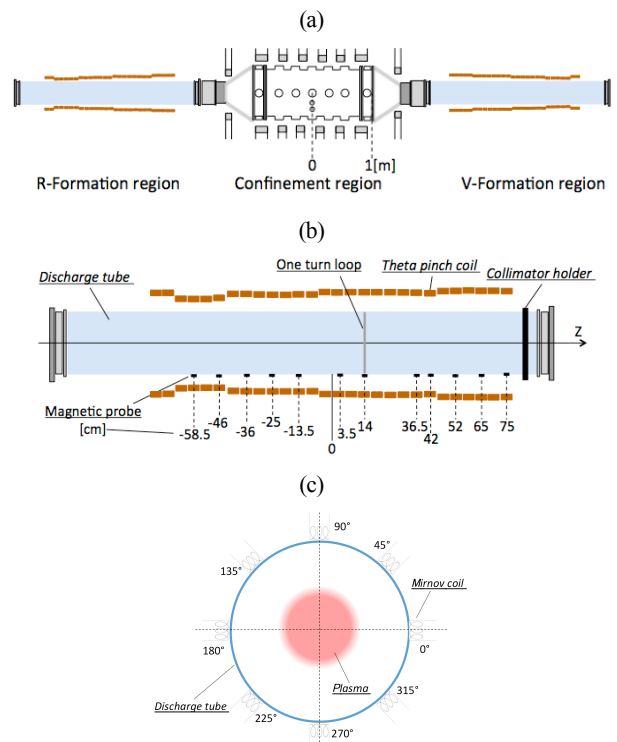


Figure 1. Schematic view of (a)FAT-CM, (b)R-Formation, (c) B_{θ} of azimuthal Array

2. 巨視的運動と B_{θ} 磁場の関係

Fig.2 に示す θ ピンチコイル内のFRCプラズマ(プラズマ半径 r_s , プラズマ長 l_s , 回転楕円体形状)が中心でシフト(シフト量 d)した場合の B_{θ} 磁場を推定する。この場合、FRCプラズマを完全導体と考えると S_1 を通過する磁場 $\langle B_z(z_1) \rangle_{av}$, S_2 を通過する磁場 $\langle B_z(z_2) \rangle_{av}$, S_3 を通過する磁場 $\langle B_{\theta}(z_1) \rangle_{av}$ の間には、磁場に関するガウ

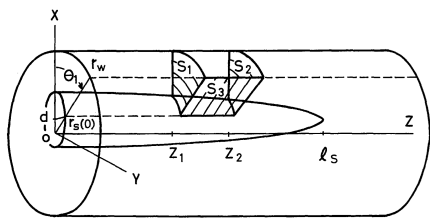


Figure 2 A volume element for a calculation of a B_θ magnetic field [2]

スの法則が成り立つ. この関係式から,

$$-S_1 \langle B_z(z_1) \rangle_{av} + S_2 \langle B_z(z_2) \rangle_{av} + S_3 \langle B_\theta(z_1) \rangle_{av} = 0 \quad (1)$$

が得られる. 以下の S_1, S_2, S_3 の近似式を代入すると

$$\begin{aligned} S_{1,2} &= \theta/2 (r_w - r_s(z_{1,2}))^2 - r_s(z_{1,2}) d \sin \theta \\ S_3 &= (r_w - r_s(z_1) - d \cos \theta) dz \\ r_s(z_2) &= r_s(z_1) \left(1 - r_s(0)^2 z_1 dz / r_s(z_1)^2 \ell_s^2 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \langle B_{\theta(\text{shift})} \rangle_{av} &= \\ &= \frac{r_s(0)^2 (r_w^2 - r_s(0)^2) \left(\frac{r_w^2}{r_s(z)} + r_s(z) \right)}{\ell_s^2 (r_w^2 - r_s(z)^2)^2 (r_w - r_s(z) - d \cos \theta)} z \langle B_z(0) \rangle_{av} d \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる. ここで, $B_z(z)$ は外部磁場強度, $r_s(z)$ は排除磁束半径, r_w はコイル半径, d はシフト量である. ティルト (傾斜) 運動の場合, 断面の楕円変形の場合についても同様な方法で求めることができ, 以下の式が得られる.

$$\langle B_{\theta(\text{tilt})} \rangle_{av} = \frac{r_s(z) (r_w^2 - r_s(0)^2) \left[(r_w^2 - r_s(z)^2) \ell_s^2 - 2z^2 r_w^2 \right]}{(r_w^2 - r_s(z)^2)^2 (\ell_s^2 - z^2) (r_w - r_s(z) - z \psi \cos \theta)} \langle B_z(0) \rangle_{av} \psi \sin \theta \quad (4)$$

$$\langle B_{\theta(\text{rot})} \rangle_{av} = \frac{r_s(0)^2 r_w^2 \ell_s^2 (r_w^2 - r_s(0)^2) (F(\theta) - \varepsilon \theta)}{\varepsilon (r_w^2 \ell_s^2 - r_s(0)^2 (\ell_s^2 - z^2))^2 \left(r_w - r_s(0) \sqrt{\frac{\varepsilon (1 - z^2 / \ell_s^2)}{\varepsilon^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} \right)} z \langle B_z(0) \rangle_{av} \quad (5)$$

$$r(0)^2 = a(0)b(0) \quad (6)$$

ここで, ε は楕円度, a は長径, b は短径を表す. これらの式から各々の巨視的運動から発生する B_θ 磁場の特徴をまとめたものが Table1 となる.

3. 実験装置および測定装置

Fig.1(b)に FAT-CM の R-Formation 生成部の概略図を

Table 1 Characteristics of the B_θ field by Macroscopic motion of FRC plasma

Macroscopic motion and deformation	Azimuthal mode	Axial mode	
Shift motion	n=1	Odd	Rotational (wobble)
Tilt motion	n=1	Even	
Elliptical deformation	n=2	Odd	Rotational

示す. 生成部は内径の異なるコイル素子(15[cm]~18[cm])を並べ, 平均傾き角およそ 1 度の円錐銅製の一卷き θ ピンチコイルと長さ 1.5[m], 外径 256[mm]の透明石英製真空管, 放電管を支持する金属フランジから構成されている生成領域に取り付けられた B_z 磁気プローブと磁束ループによって, 移送中のプラズモイドの排除磁束半径 (プラズマ形状) の分布を計測する.

巨視的運動の観測は生成部出口付近に配置する方位角方向に等間隔に並べた B_θ 磁気探針アレイ, 同じ方位角で z 軸方向に 8 個並べた B_θ 磁気探針アレイおよび 2 次元に配列した光学計測アレイ[3]を用いて行う. また, Fig.1 (c)には方位角方向の B_θ アレイの配置図を示す. これらの信号を方位角方向についてフーリエ解析することによってモード解析 (振幅, 位相角の時間変化) することにより方位角方向のモードを同定する. また, その振幅からおおよそのシフト量や傾斜角, 変形の度合いの見積りを(3), (4), (5)式から行う. また, 軸方向分布対称性および排除磁束半径の分布から軸方向の対称性を観測する. 2次元放射光分布の計測は B_θ 計測に含まれるシフトおよびティルト運動の分析に用いる.

4. まとめ

現在, ここで示した B_θ 磁場の式から予想される磁場強度を見積り, 磁気探針アレイを作製している. これらのアレイを FAT-CM の両生成部に設置し移送過程の FRC プラズマの巨視的運動を観測する予定である. 講演ではこれらの詳細な実験結果について詳しく報告する.

5. 参考文献

[1] H.Gota, Plasma Fusion Res.93,(2017)24

[2] S.Kumashiro *et al.*, J.Phys. Soc. Jpn. 62,(1993) 1539

[3] 松井圭祐 他, 第 61 回日本大学理工学部学術講演会予稿集