O-19

FRC プラズマにおけるトロイダルフロー再構成法の開発

Development of the toroidal flow reconstructing method in the FRC plasma

○小野直人¹, 関口純一², 高橋努², 浅井朋彦² *Naoto Ono¹, Junichi Sekiguchi², Tsutomu Takahashi², Tomohiko Asai²

Abstract: The field-reversed configuration (FRC) plasmas formed by the field-reversed theta-pinch soon begin to rotate. This rotation which grows the instability of a toroidal mode number n = 2 result in collapse of FRC. Toroidal flow can be measured by Doppler spectroscopy using line-spectrum of impurity carbon (CV). This report focuses on the asymmetry of the wavelength distribution obtained with the Doppler spectroscopy and develops a method of reconstructing the toroidal flow. Also shows the time evolution of the toroidal flow by this reconstructing method.

1. 研究背景·目的

コンパクトトーラスと呼ばれる磁場閉じ込め方式の 中で、磁場反転配位(Field Reversed Configuration: FRC) プラズマを利用したものは、プラズマの閉じ込め効率 が非常に高いことが特徴である。しかし、逆磁場テー タピンチ法で生成される FRC プラズマは生成直後か らトロイダル方向への自発的な回転運動が生じ、この 回転がトロイダルモード数 *n* = 2 の断面変形を成長さ せプラズマの崩壊をもたらす^[1].この回転不安定性は FRC 崩壊の主な原因となっているが、その回転機構は まだ十分に解明されていない.

トロイダルフローはマルチチャンネル分光器を用い て、 プラズマ粒子の運動によって生じる炭素のスペク トル線 (CV) のドップラーシフトを計測することで、 求めることができる. このとき, CV は個々のイオンの 熱運動によってドップラー広がりと呼ばれるガウス分 布に従った波長の広がりを持って観測される. そこか ら、トロイダルフローを再構成する方法として、分光 器で得られた CV の波長分布がガウス分布に従ってい ると仮定し、その分布のドップラーシフトを測る方法 が開発されてきた^[2].しかし、分光器で得られる波長 分布はコリメーターの視線方向の積分量であるため、 径方向に依存するトロイダルフローが存在する場合に はガウス分布に従わない可能性がある. そこで本研究 では測定値がガウス分布に従うという仮定は用いずに、 Able 変換の手法を用いて理論的に計算した波長分布 と, 測定した波長分布を最小二乗法で比較することに よって再構成を行う方法を開発する.また、その結果 を用いて FRC プラズマの回転メカニズムについて検 討を行う.

2. 実験装置



Figure 1. Schematic view of NUCTE-III

本研究は NUCTE-III (Nihon University Compact Torus Experiment-III)を用いて行われた(Fig. 1).NUCTE-IIIは石英製の放電管と、それを取り巻くテータピンチ コイルによって構成される.放電管は全長 2.0 m,直径 256 mm の円筒形であり, z = 0.11 m (中央部)の位置に CV を観測するためのコリメーターと、それを固定す るコリメーターホルダーが設置されている.これによ り, x = -6 - 7 cmの範囲を1 cm間隔で測定することがで きる.シータピンチコイルは幅 50 mm の一巻きコイル が 5 mm の間隔を空け 28 本設置されており、中央部の コイルは直径 34 cm、両端部のミラーコイルは直径 30 cm である.この装置で生成される FRC プラズマは、 生成後 40 µs 程度平衡状態を保つが、その後 n = 2 の回 転不安定により断面の楕円変形が生じ、100 µs 程度で 配位が崩壊する.

3. 測定原理

FRC プラズマが円筒対称であると仮定し Fig. 2 のような微小区間 δA_{mn} に分割する. ここで m は x 軸方向, n は径方向に対応する値である. δA_{mn} 内では, 粒子のトロイダルフロー速度 $v_{\theta n}$ は一様であると, するとそ

1:日大理工・学部・物理 2:日大理工・教員・物理



Figure 2. The partition of Abel transform.

こから放出される CV の波長分布 $G_{mn}(\lambda, v_{\theta n})$ はガウ ス分布になる.分光器で計測される波長分布 $P_m(\lambda)$ は各 $G_{mn}(\lambda, v_{\theta n})$ を視線方向に足し合わせたものであ るので,次の式のようになる.

$$P_m(\lambda) = \sum_{n=m}^N \delta A_{mn} i_n G(\lambda, v_{\theta n})$$
(1)

ここで i_n は放射強度の径方向分布であり、測定された線積分量 I_m から Able 変換を用いて次の式を解くことによって求まる.

$$I_m = \sum_n \delta A_{mn} \, i_n \tag{2}$$

(1)式は*λ*と*v_m*のみの関数になっており,分光器が計 測している波長は既知であるので,測定された波長 分布と比較することにより,トロイダルフローの径 方向分布を求めることができる.

今回の発表では $v_{\theta n}$ の一般項がnの2次式で表せる と仮定し,最小二乗法を用いて係数を決定した結果 を示す.

4.結果

測定結果から求めたトロイダルフローの径方向分 布および,その時間発展を Fig. 3 に示す.この図か らプラズマ生成後 10 - 15 µs 付近で回転方向が外部 磁場に対して常磁性方向から反磁性方向へ反転して いることがわかる.また,速度が中心からの距離に 比例するような剛体回転状の速度分布ではなく,外 側に速度シアを持った分布が観測された.

次に,再構成した速度分布から得られた平均の加 速度の径方向分布と,その時間発展を Fig. 4 に示す. この図より回転の駆動力はセパラトリックスおよび



Figure 3. Time evolution of toroidal flow.



Figure 4. Radial distribution of acceleration.

その外側付近にあり,粘性などにより内側に伝わってきている可能性が考えられる.

一方, 速度・加速度の分布で共に, 15 - 20 µs 付近で 不連続な値の飛びが見られた. これはフィッティン グ関数が2次関数では適当でないことが原因だと考 えられる.

5.まとめ・今後の課題

Able 変換と最小二乗法の手法を使うことによっ て、分光器で得られた波長分布がガウス分布に従っ ているという仮定を用いなくても、トロイダルフロ ーの径方向分布を再構成することができた.しかし、 2 次関数でのフィッティングでは不十分だと考えら れるので、より高次の関数でのフィッティングを試 みる.また、回転メカニズムについても引き続き検 討を進める.

6.参考文献

 M.TUSZEWSKI: "FIELD REVERSED CONFIGURATIONS" NUCLEAR FUSION, Vol.28, No.11, pp2033, (1988)
加藤匡: 「FRC プラズマのトロイダルフロー構造とその時間発展」、日本大学大学院理工学研究科

修士論文,2015