

### FRC 衝突合体実験におけるレーザー干渉計の3点同時計測

#### Simultaneous 3-point density measurements in FRC collision/merging experiments by heterodyne laser interferometer

○齋藤友里<sup>1</sup>, 染谷紘希<sup>2</sup>, 小林大地<sup>3</sup>, 高橋努<sup>3</sup>, 浅井朋彦<sup>3</sup>

\*Yuri Saito<sup>1</sup>, Hiroki Someya<sup>2</sup>, Daichi Kobayashi<sup>3</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>3</sup>, Tomohiko Asai<sup>3</sup>

Abstract: Line-integrated electron density of a field-reversed configuration (FRC) during dynamic processes such as supersonic/Alfvénic translation and collisional merging was measured by the heterodyne interferometer using an infrared He-Ne laser. The collisional merging experiments of FRCs at super-sonic/Alfvénic speed have been conducted on the FAT-CM device. The electron density and volume of FRC rapidly and drastically changed over a factor of 10 that in the formation phase. In order to observe a rapid and drastic change in electron density during such processes, simultaneous three-point measurement of line-integrated electron density will be performed using axially arranged three interferometers on the FAT-CM device.

#### 1. 背景・目的

本実験で使用した FAT-CM 装置では逆磁場シートピンチ (FRTP) 法を用いて FRC (磁場反転配位) プラズマを装置両端で生成し磁気圧勾配により装置中央へ移送, 衝突・合体させる. FRC プラズマとは磁場閉じ込め方式の一つであり, プラズマ中を流れるトロイダル方向の電流が閉じ込め磁場を形成しトーラス状のプラズマを作成する. この閉じ込め方式では閉じ込め効率の指標である  $\beta$  値が極限的に高いことが特徴として挙げられる.

本研究では, Alfvén 速度を超える移送過程や衝突・合体過程といった, 数マイクロ秒の間にプラズマの体積や密度が1桁以上も変化する FRC プラズマの動的過程について, その挙動を捉えるため干渉法による多点同時密度計測を行う.

#### 2. 干渉計の原理

本研究では波長 (3.39 $\mu$ m) の He-Ne レーザーを用いたヘテロダイン方式の干渉計を採用する. (Fig.1 にこの干渉計の概略図を示す.)ヘテロダイン方式は光の強度を大きくすることで, 微弱な信号の検出が可能になるため高精度, 高感度の測定が可能であることが特徴である. 音響光学素子 (AOM)を用いてレーザーを信号光 (0 次光) と周波数のわずかに異なる参照光 (1 次光) に分ける. それぞれ周波数を  $f_p, f_r$  とする. これらを干渉させることによってうなりが生じる. また, 信号光をプラズマ中に通すことによって位相が電子密度に依存して変化する. それぞれの位相を  $\phi_p, \phi_r$  とすると電場は

$$E_p = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi_p) \quad (1)$$

$$E_r = A_r \cos(2\pi f_r t + \phi_r) \quad (2)$$

となる. この信号光と参照光を干渉させることで得られる信号  $S$  は

$$S = \int_t^{t+\tau} (E_p + E_r)^2 dt \quad (3)$$

と書ける. このとき周波数  $f_p, f_r$  に対して検出器の応答速度  $1/\tau$  が十分遅く, AOM の駆動周波数  $|f_p - f_r|$  より十分速い時

$$S \sim \frac{A_p^2}{2} + \frac{A_r^2}{2} + 2A_p A_r \cos\left(2\pi(|f_p - f_r|)t + (\phi_p - \phi_r)\right) \quad (4)$$

と書き換えられる. 位相検出器を用いることで位相差  $\Delta\phi = \phi_p - \phi_r$  が求まる. ここで磁場に垂直方向のプラズマ屈折率  $N$

$$N = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}} \sim 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} = 1 - \frac{e^2 n_e}{2\epsilon_0 m_e \omega^2} \quad (5)$$

と位相差  $\Delta\phi$  の関係

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_L (1 - N) dr \quad (6)$$

より線積分電子密度について整理すると

$$\int_L n_e dr = \frac{4\pi c^2 \epsilon_0 m_e}{e^2 \lambda} \Delta\phi \quad (7)$$

となる.  $\epsilon_0$  は真空の誘電率,  $m_e$  は電子の質量,  $e$  は電荷,  $n_e$  は電子密度である.

このように干渉計を用いることによってプラズマの

密度測定が可能となる。

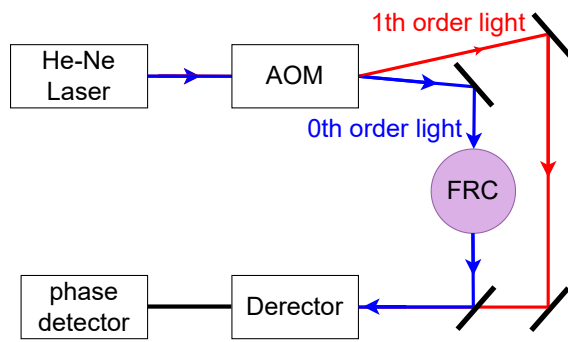


Fig. 1 Schematic diagram of a laser interferometer.

### 3. 実験装置と現状

FAT-CM 装置は両端の生成領域と中央の閉じ込め領域からなる (Fig. 2). 装置右側の生成部を V 生成部, 左側を R 生成部, 中央を閉じ込め部と言う. 各生成部で FRC を生成, 磁場勾配を利用することで装置中央に向かって加速し, その後閉じ込め部へ移送, 衝突・合体させる.

電子密度計測を行う干渉計は V 生成部に 1 箇所 ( $z = 2.1 \text{ m}$ ), 閉じ込め部に 2 箇所 ( $z = -0.6 \text{ m}, z = 0 \text{ m}$ ) の計 3 点で測定を行なっている. 各過程におけるプラズマと干渉計の位置関係は Fig. 2 の通りである.

現段階において各 3 点における典型的な線積分電子密度の時間変化は Fig.3 のようになる. 初期の FRC の生成時刻基準とした. この時  $z = 2.1$  では  $20 \mu\text{s}$ ,  $z = -0.6 \text{ m}$  では  $30 \mu\text{s}$ ,  $z = 0$  では  $35 \mu\text{s}$  でピークが観測される.  $z = -0.6 \text{ m}$ ,  $z = 2.1 \text{ m}$  でのピークは FRC がレーザーの光路を通過したことを示し,  $z = 0$  では衝突した瞬間を示す. これより両側から生成された FRC が中央に向かって移送されていく様子が見られる.

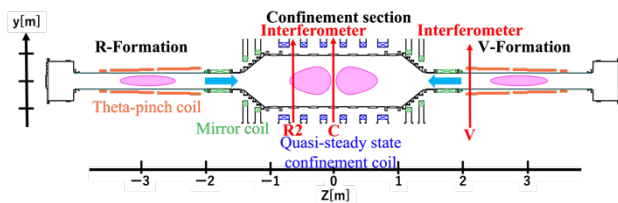


Fig. 2 Positions of FAT-CM and interferometer.

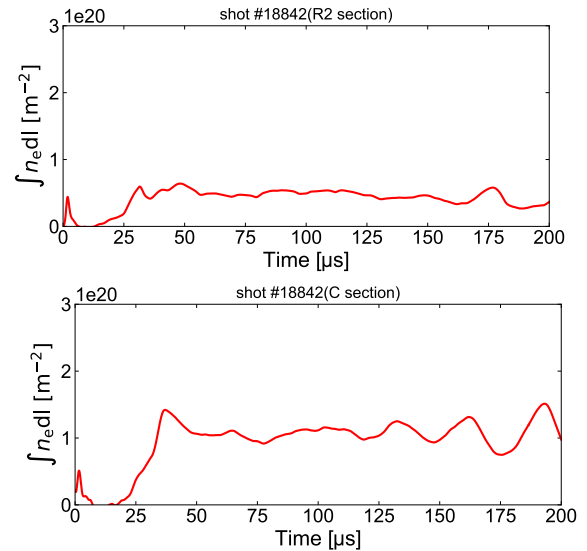
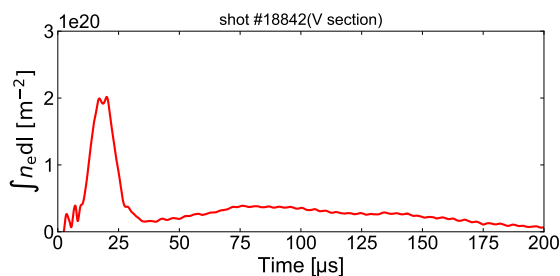


Fig. 3 Time variation of line-integrated electron density.

### 4. レーザー干渉計の3点同時計測

生成部から閉じ込め部まで 3 点同時に電子密度を計測することでこの範囲における一連の FRC の動的過程を観測可能とする. ここで中央断面に対し対称であると仮定し V 側へ 3 台の干渉計を寄せることで, 両端で生成された FRC が中央へ移送され衝突する過程を観測する (Fig.4).

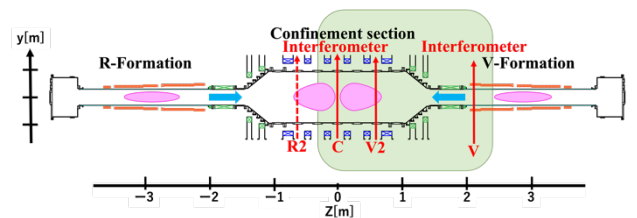


Fig.4 Placement of interferometer after moving.

### 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, No.9, 096032, 2021.  
 [2] 間瀬淳, 川端一男: 「講座 電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線 2.電磁波を用いたプラズマ計測の基礎」, Journal of Plasma Fusion Research, Vol.87, No.5, pp.315-325, 2011.  
 [3] 中野武雄: 「プラズマの基礎」, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol. 59, No. 7, pp.161-170, 2016.