

## プラズマ衝突実験における移送時のプラズマ挙動解析

### Behavior Analysis of Plasma during Transport in the Collisional Merging experiment

○松井圭祐<sup>1</sup>, 関口純一<sup>2</sup> 浅井朋彦<sup>2</sup>, 高橋努<sup>2</sup>

\* Keisuke Matsui<sup>1</sup>, Jyunichi Sekiguchi<sup>2</sup>, Tomohiko Asai<sup>2</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>2</sup>

The optical diagnostics system has been developed for the observation of macroscopic motion on the supersonic translation. The obtained 2-D line-integrated visible light intensity profile has been reconstructed by Maximum Likelihood Expectation Maximization method (ML-EM). The reconstructed image has analyzed by Fourier analysis. Azimuthal mode of the image has been decomposed. The relation between the mode analysis and the macroscopic motion will be discussed and the analysis will be applied to the coming translation and collisional merging experiment.

#### 1. はじめに

プラズマを磁場で閉じ込める方式の一つに磁場反転配位(Field Reversed Configuration : FRC)と呼ばれる方法がある。FRC プラズマは単連結構造をしており、錯交するコイルを持たないため、外部の磁場に勾配をつけることで移送が可能と成っている。<sup>[1][2]</sup> 近年、この特徴を活かした衝突実験や移送実験が行なわれている。この研究では、移送中のプラズマの挙動をプラズマから放射される制動放射光の 2 次元分布を計測することから調べる。

この研究では FAT-CM 装置の両生成部 (透明石英放電管) の出口と閉じ込め部 (ステンレス製金属チェンバー) の入り口に光学計測系装置を x 軸,y 軸に平行な方向に設置することにより、生成過程、移送過程での内部構造やプラズマの巨視的な運動を評価することを目的とする。

#### 2. 実験装置および光計測装置の配置

本実験で扱う FRC 生成・衝突装置 FAT-CM は実験装置の両端には生成部がある。Fig. 1 に示すように生成部は外径 256mm,長さ 2m の透明石英真空放電管と一巻きのシータピンチコイル、金属フランジで構成されている。両生成部の閉じ込め領域側出口(Fig.1 中矢印の位置)で光学計測を行う。x 軸と y 軸に平行なようそれぞれ±7.8cm の間に 1.2cm 間隔で 14 本のコリメーターが配置され 550±5nm の制動放射光が計測される。光学計測系は、光ファイバー、光学フィルター、光電子増倍管(R374,Hamamatsu photonics)から構成される。

#### 3. 光学計測の画像処理(線積分分布計測の再構成法)

本研究では、再構成領域(Fig.1 に示す)を正方形メッシュ(画素)に切り、最尤推定-期待値最大化(Maximum

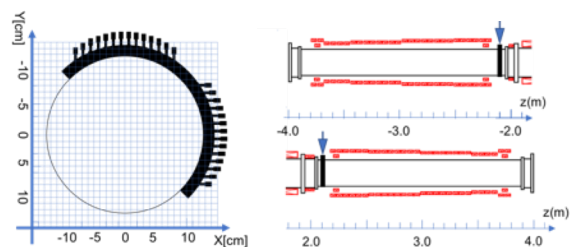


Fig.1. 2D-Optical diagnosis and R-,V-Formation section of FAT-CM

Likelihood – Expectation Maximization : ML-EM)法を用いて各画素の放射係数を求める。今回は、実験値(計測器の値)を  $i(=5120)$ 、画素を  $j(=2560 \times 2560)$ とした。

ML-EM 法は、全画素の放射係数を初期値( $k$  回)としてあらかじめ任意与えておく。次に、計測経路に沿って線積分したものを同じ経路で計測した実験値と比較し、その差を基にした修正項を事後確率(MAP : Maximum a posteriori)推定で求め、 $k+1$  回目の放射係数とする。これらの過程を繰り返し収束値としての放射係数を求める。具体的な修正法は以下の通りである。計測器  $i$  の計測結果  $y_i$  と前段階で決められた画素  $j$  の放射係数  $\lambda_j$  から実際に計測できない次の画素の放射強度  $x_{ij}$  を決定するために、事後確率推定として次のような式の方法で推定する。

$$x_{ij} = \frac{y_i}{\sum_{j=1}^m C_{ij} \lambda_j} C_{ij} \lambda_j$$

$C_{ij}$  は、計測器が画素を計測している割合(重み係数)を示し、 $0 \leq C_{ij} \leq 1$  の範囲を取り、

$$x_{ij} = C_{ij} \lambda_j$$

$x_{ij}$  は計測器  $i$  に画素  $j$  が寄与する放射量を示す。これは分子(計測した線積分量  $y_i$ )と分母(推定の画素の足しあわせ)で比をとり、前段階の放射量の寄与  $C_{ij} \lambda_j$  に修正を加えていることになる。以上から計測してい

る画素の放射量の  $k+1$  回の修正値となる。次に画素の放射係数  $\lambda_j^k$  から求めた修正量を組み込み、次回の画素の放射係数  $\lambda_j^{k+1}$  を出す。

$$\lambda_j^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i C_{ij} \lambda_j^k}{\sum_{j=1}^m C_{ij} \lambda_j^k}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}}$$

以上の仮定を画素毎に計算することで全画素の放射係数を導出できる。今回の解析では計測した値を補間し、0.01cm のメッシュ幅とした計測数に対して未知数となる画素数が多くなるが、ここで示した逐次近似式を用いることで最尤値の導出が行える。

次にここで示した再構成法の特性を調べるために数値ファントムを用いて再構成した FRC プラズマの放射光分布を剛体回転モデルで決まる電子密度 2 乗分布すると仮定して、放射係数の 2 次元分布を作り、実験で用いる測定器の経路に従って放射係数の線積分値を求め、これを上式の  $y_i$  として再構成する。

数値ファントム(放射光分布)としての 2 次元分布およびその線積分値の  $y_i$  のデータの  $x$  分布および  $y$  分布を Fig.2 に示す。Fig.3 は、EL-MI 法で再構成し 2 次元の放射係数の分布およびそのデータから求めた  $y_i$  の  $x, y$  分布を示す。Fig. 2 と 3 の比較をすると、 $y_i$  の  $x, y$  分布は両者非常によく似ているのに対して、2 次元の放射係数分布には  $n=2$  モードのエイリアスが発生していることがわかる。これは、観測方向を方位角方向に対して  $0, 90$  度となっていることによる。そこで、エイリアスの割合を見積もるためにフーリエ解析(画像のモード解析)を試みた。結果を Table1 にまとめる。

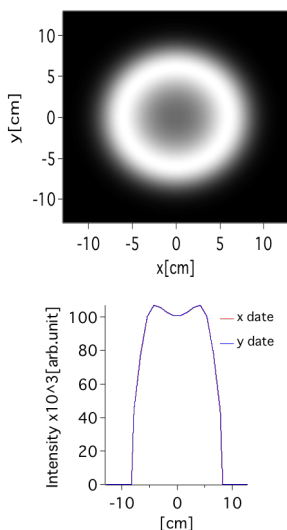


Fig.2 2D-test phantom Data and x-, y-line integrated intensity profile

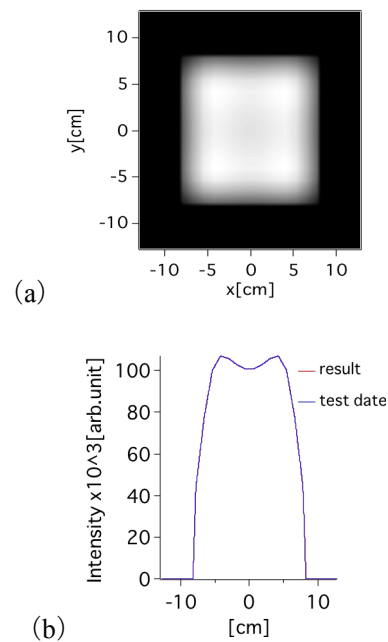


Fig.3. Contour plot of reconstructed emission (a) profile and line integrated intensity(b)

4. まとめ

Table 1 Results of Fourier Analysis

プラズマ中心	(x,y)=(0,0) [cm]		(x,y)=(-1,0) [cm]	
	強度	位相角	強度	位相角
n=0	11.42	0.44	11.42	0.44
n=1	7.91	0.44	8.53	0.44
n=2	3.80	0.44	4.17	0.44
n=3	2.13	0.44	2.39	0.44

$x-y$  配列の線積分強度分布から ML-EM 法を用いて 2 次元放射係数の再構成を数値ファントムを用いて行った。計測器の配列から  $n=2$  モードのエイリアスが発生することがわかった。中心からのシフトは、 $n=1$  モードの変形と捉えることができることがわかった。

5. 参考文献

[1] 高橋 努, 平野 洋一:「極限的ベータプラズマ閉じ込め:FRC 研究の新展開:2.FRC の基礎的理解  $2.3 <\beta> \sim 1$  をどう作るか?」, J. Plasma Fusion Res., Vol.84, No.8, 2008.  
 [2] 浅井 朋彦, 井通 暁:「極限的ベータプラズマ閉じ込め:FRC 研究の新展開:3.FRC 研究の現状 3.1 移送技術と実験の展開」, J. Plasma Fusion Res., Vol.84, No.8, 2008.