

# TS-4装置におけるコンパクトトラスプラズマの 二流体平衡再構成

47 - 46204 加戸孝允  
(指導教員 小野靖 教授)

Key Words : two-fluid plasma, equilibrium reconstruction, FRC, ion velocity, current density

## 1. 序論

### 1-1 プラズマの二流体性

プラズマの物理が単一MHD理論のみでは説明できない運動論的な領域では、プラズマの二流体性が顕著になり、電子とイオンが互いに異なる運動をすることになる。これを二流体効果（ホール効果）と呼ぶ。二流体効果の指標として、プラズマ特性長に対するイオンスキン長  $l_i$  の比であるサイズパラメータ  $S$  が頻繁に使われる。一般化されたオームの法則において  $S$  が小さくなると二流体効果を表す項（ホール項）が無視できなくなってくる。

### 1-2 研究の目的

本研究室TS-4装置では水素(H)、ヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)といったガス種を用いることによってイオンスキン長の値を変化させており、サイズパラメータ  $S$  はおよそ1~8といった小さい値を取るようになる。よってTS-4装置においてプラズマの平衡・安定性を考える際に二流体的取り扱いが必要不可欠である。本研究では、A.Ishida・L.C.Steinhauserらの二流体平衡理論に基づき、TS-4装置で生成されるプラズマ（特にFRC）を対象とする平衡再構成コードを構築する。この理論は表面量の任意関数を多く含むが、計測可能なマクロな物理量から任意関数の自由度を減らし、なるべく一意に平衡解が得られるようなコードを構築することが一つの目的である。また、再構成のために必要な計測を行うことももう一つの目的である。具体的には可視光ドップラー法によるイオン流速計測、その他電子密度・電流密度計測を行ない、平衡の再構成に用いる。最後に、実際の実験で得られる平衡の再構成を試み、精度の検討を行う。

## 2. 可視光ドップラー計測システムを用いたイオン流速計測

プラズマの発光スペクトルに関するドップラー幅を計測し、ベクトルトモグラフィーの原理によってイオン流速分布を計測できる。計測システムは、光

ファイバーアレイ、分光器、ICCDカメラから成る。図1に、イオン温度・流速分布計測システムの概略を示す。TS-4装置の  $r$  方向にわたって8本の光ファイバーが並んでいる。

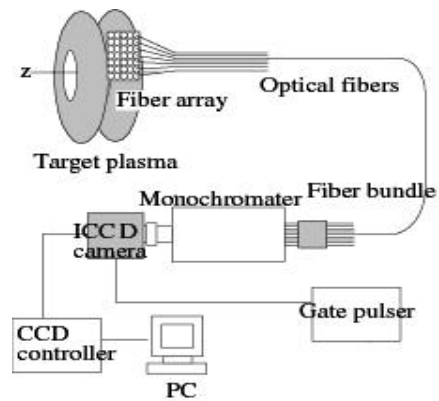


図1 イオン温度・流速計測システム

## 3. 二流体平衡再構成コードの構築

### 3-1 平衡理論と計算方法

単一MHD理論においてプラズマの巨視的な平衡における力のつりあいは、

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \nabla p$$

という式で表され、圧力とポロイダル電流はポロイダル磁気面  $\Psi$  の表面関数となっている。A.Ishidaらによる理論では、密度一定、イオンと電子の温度比が一定、イオンがトロイダル流のみを持つという仮定の上での二流体平衡を表す Grad-Shafranov 方程式は、

$$\Delta^* \Psi_e + S^2 y_e dy_e / d\Psi_e + r^2 (dH_e / d\Psi_e + dH_i / d\Psi_i) = 0$$

であり、ベルヌーイ関数  $H_a$  と電子のポロイダル粒子束  $y_e$  が、ポロイダル磁気面を表す  $\Psi_e$  の表面関数となっている。上の式を解くために、今回についてはFRCの場合のみを考え、 $y_e(\bar{\Psi}_e) = 0$  を仮定、ベルヌーイ関数を二次式で仮定する。

$$H_i(\Psi_i) = A_{Hi}(C_{Hi0}\Psi_i + \frac{1}{2}C_{Hi1}\Psi_i^2) + C_{Hi00}.$$

$$H_e(\bar{\Psi}_e) = A_{He}(C_{He0}\bar{\Psi}_e + \frac{1}{2}C_{He1}\bar{\Psi}_e^2) + C_{He00}.$$

これをGS方程式に代入して計算領域内で解き、 $\Psi_e, \Psi_i$ 及び各種パラメータの二次元分布を求める。 $A_{Hi}, A_{He}$ はそれぞれイオン電流量・全プラズマ電流量を調整するパラメータである。

### 3-2 入力

外部コイル電流値・総プラズマ電流量・イオン電流量・プラズマ密度をTS-4装置で計測できるとし、制約量として与える。ミッドプレーン上での電流分布、イオントロイダル流速分布が計測により与えられた場合、ベルヌーイ関数の分布を各定数で調整し、結果として出てくる電流分布・流速分布を可能な限り制御する。

## 4. スフェロマック異極性合体によるFRC生成実験の再構成

図2はスフェロマック異極性合体によるFRC生成実験の、ポロイダル磁束等高線及びトロイダル磁場強度(色)とミッドプレーンにおける電子密度分布、イオン流速分布、電流密度分布である。電子密度分布はCO<sub>2</sub>レーザー干渉計により求めた。測定時間はt=440[us]で、プラズマのガスはNeを用いている。

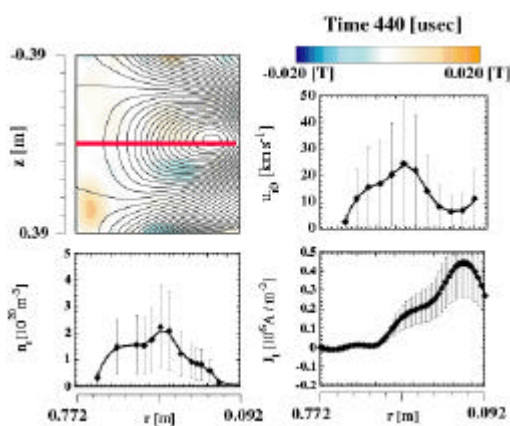


図2 Neプラズマのポロイダル磁束等高線及びトロイダル磁場(左上)、電子密度分布(左下)、イオン流速分布(右上)、電流密度分布(右下)(t=440[us])

イオン速度分布のエラーは、波長較正に関するエラー、マルチショット計測によるばらつき、データ局所化の際のエラー、波長方向のフィッティングのエラー、の4つから見積もっており、単純に足すと95%程度の誤差となってしまう。次に測定したパラメータから算出したイオン電流及び電子電流・全電流密度の分布を図3に示す。電流密度分布

のエラーは電子密度分布の誤差とイオン流速の誤差、磁気プローブのS/N比より算出している。

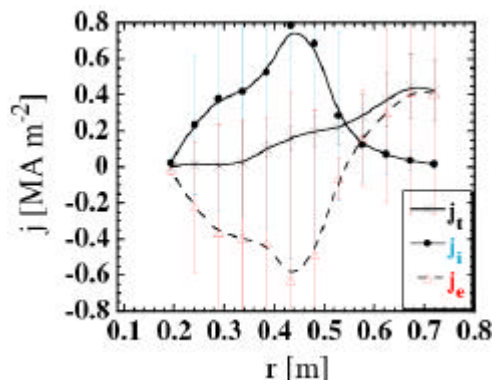


図3 Neプラズマのイオン電流・電子電流・全電流密度の分布(t=440[us])

次に再構成結果を図4に示す。イオン電流量は前節の結果におけるミッドプレーンでの全プラズマ電流との比から求めた。また、プラズマ密度は電子密度分布を計測した際の平均的な値を取っている。

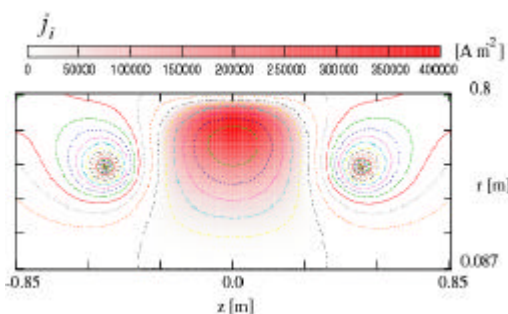


図4 NeプラズマのFRC再構成結果(色はイオン電流密度)

磁気プローブを用いて計測した実際の磁気面・磁気軸等と比較した結果、磁気軸の位置に8.7%、セパトリクス位置に6.5%、磁気軸上の磁束に15%の誤差があることが分かった。

## 5. まとめ

- 1) TS-4装置のFRCに適用できる、二流体平衡再構成コードを構築した。
- 2) 平衡再構成のために、可視光ドップラー法によりイオントロイダル流速の計測を行い、それを用いて平衡を再構成し、誤差を検討した。計測に関する誤差は大きく、今後は較正法の改善と共に、誤差を考慮できるルーチンを開発する必要がある。
- 3) OHコイルによるFRCの電流駆動実験において平衡を再構成した。(ここには記述していない)