



プラズマ分光トモグラフィ

杉本 敏 司*

Spectroscopic plasma tomography

Key Words : tomography, plasma measurement, FRC plasma, two-dimensional measurement, bremsstrahlung

1. はじめに

コンピュータトモグラフィ (CT) の実用化は、医療診断用の CT スキャナーに始まり、物体内部の空間分布を非接触かつ効率良く得るための測定法として、種々の分野に広がってきている。このトモグラフィ (以下、コンピュータは略す) は、種々の物理量の 2 次元的空间分解測定法であると言えるが、運動物体に対してさらに時間分解を行うもの、あるいは波長 (エネルギー) 分解を行うものも試みられている。本稿では、このように空間・時間・波長分解を同時に行う計測法として、高速に変化するプラズマや発光気体を対象としたプラズマ分光トモグラフィ¹⁾について述べる。

2. 測定原理

プラズマ分光トモグラフィの原理図を図 1 に示す。この測定では、まず、物体 $f(r, \theta)$ からの放射光を狭い視野を持つ集光器アレイで受光する。図 1 には、その中の 1 個の集光器のみを示している。この場合、光の屈折・吸収が無視できるとすれば、集光器の視線 (直線 L) に沿った発光強度値を線積分することになる。次に、光学フィルター、あるいはモノクロメータ等を用いて必要波長成分のみを取り出す。この操

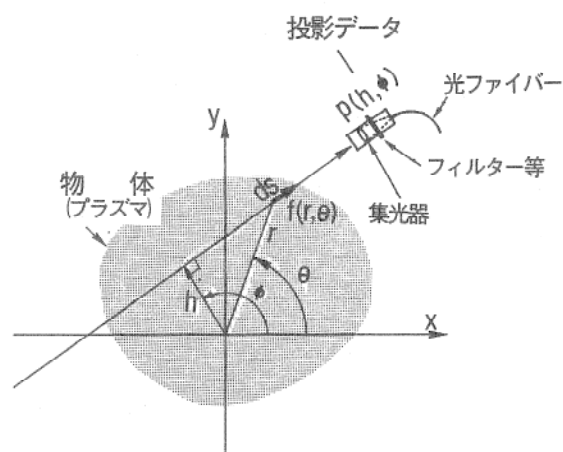


図 1 プラズマ分光トモグラフィの原理

作を行うところが、“分光”トモグラフィと呼ぶ所以であり、得られた投影データ $p(h, \phi)$ に対して再構成処理を行うことにより、特定の波長光の発光分布が得られることになる。上記の過程を式で示すと、

$$p(h, \phi) = \int_L f(r, \theta) ds. \quad (1)$$

次に、この積分方程式を解いて分布値 f を求めることになるが、大抵の場合、解析的に解くのは難しい。そこで、これまでに種々の解法が提案されてきた。たとえば、式 (1) を離散化し、図 2 に示す記号を用いて行列表現にすると、

$$\vec{p} = H\vec{a} \quad (2)$$

ここで、 \vec{p} および \vec{a} は、それぞれ投影データ、および分布値を 1 次元的に並び換えたベクトル、 H は、線積分操作を表す行列である。したがって、再構成処理は、1 次元連立方程式を解く問題となり、同時に、投影データの収集法が直感的に推察できる。すなわち、要求される空間分

*Satoshi SUGIMOTO

1959年2月6日生

大阪大学大学院工学研究科、博士
後期課程応用物理学専攻、昭和61
年修了

現在、大阪大学工学部附属超高温
理工学研究施設、助手、工学博士、
プラズマ計測、画像計測
TEL 06-877-5111(内線 4176)



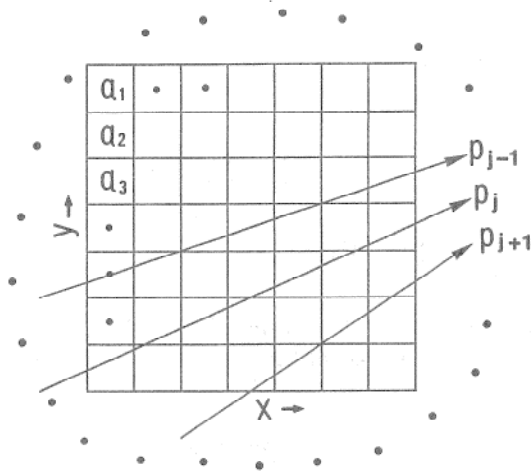


図2 再構成空間および測定データの離散表現

解能(未知ベクトル \vec{a} の要素数)以上の個数の投影データを必要とすること, かつ個々の投影データは独立でなければならないことである。後者については, 可能な限り多くの方向から観測すべきであることを意味する。

真空容器などの構造により, 観測方向が制限されるとこのHは, 悪条件になりやすく, 直接逆行列を求める方法では, 誤差が非常に大きくなる場合がある。そこで, 物体の形状(プロファイル)に対して, 非負値・対称性などの仮定を置きながら, 最小自乗法を導入した反復法により解を求めるのが一般的である²⁾。

3. FRC プラズマ

本研究における測定対象である反転磁場配位(Field Reversed Configuration; FRC)プラズマ^{3),4)}の概略を説明する。図3にFRCプラズマおよび生成・保持装置の断面図を示す。このプラズマは, バイアス磁場中の初期プラズマ(重水素など)に逆方向の立上りの速い B_z 磁場を印加し, 加熱・圧縮を行うことによって生成

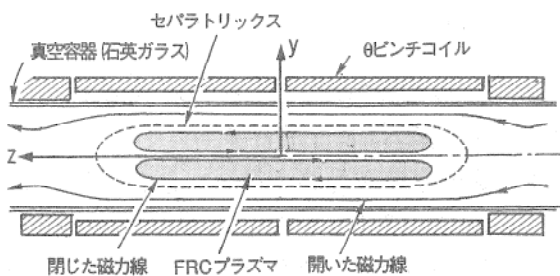


図3 FRC プラズマの断面構造

される。その典型的な特性値として電子温度(T_e) $\sim 200\text{eV}$, 電子密度(n_e) $\sim 5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, 寿命 $\sim 50\mu\text{sec}$ が得られている。

このプラズマの研究は, 制御核融合の基礎研究として行われており, その主な課題は, 閉じ込め特性の改善(長寿命化)である。特に, プラズマの構造の形成, 動的変化などは, 2次元(3次元)プロファイルと密接に関係していると考えられている。このような研究において, トモグラフィーは, たとえばシミュレーションによる2次元結果との比較などに欠かせないものとなってきている。

このFRCプラズマの安定期における可視域での放射は, 制動放射および不純物からのライン放射に大別できる⁵⁾。この中で, 制動放射の放射エネルギーは, ほぼ密度の自乗に比例し温度の平方根に反比例する。FRCプラズマの温度は, これまでの測定からほぼ一定であると考えられているので, 放射光の強度分布から密度分布に変換可能である。

4. 測定 シ ス テ ム

開発したトモグラフィー計測システムのブロック図を図4に示す。プラズマの投影データは, 周回方向の5ヶ所に配置した受光アレイによって同時に得ている。1つの受光アレイは, ピンホールおよびファンビーム状にならべた10本の光ファイバーからなる。時間分解能($1\mu\text{sec}$)の制約から, 多数の検出器を用意して, 各方向に配置している。各々の光ファイバーは, 視線方向積分量に対応する放射光を受光し, マルチチャンネルモノクロメータに送る。ここでは,

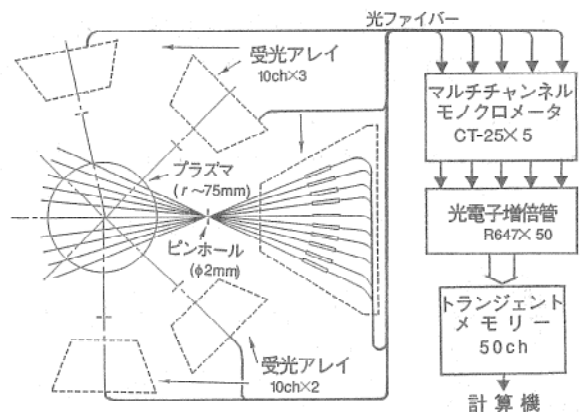


図4 プラズマ分光トモグラフィー測定システム

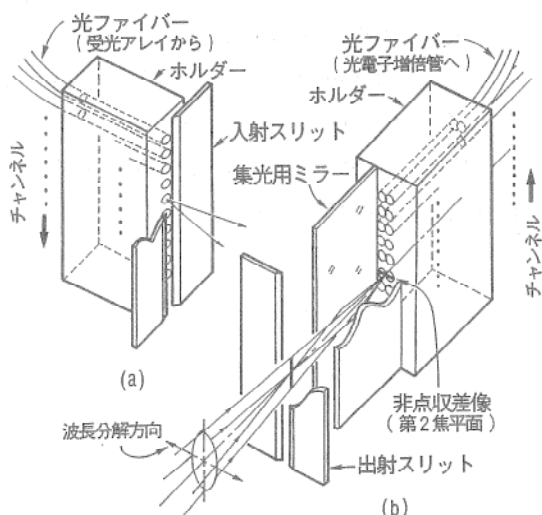


図5 モノクロメータのマルチチャンネル化
(a) 入射スリット部
(b) 出射スリット部

モノクロメータを選択波長および波長幅が可変の狭帯域フィルターとして使っている。ただし、図5に示すようにツェルニター型モノクロメータの入射および出射スリット上の長さ方向に各々10本の光ファイバーをならべて、1台あたり同時に10チャンネル分の分光が可能なように用いている。必要な波長成分のみとなった光信号は、光電子増倍管で電気信号に変換し、トランジェントメモリーおよび計算機を用いてデジタル化および再構成処理を行う。

既に述べた様に、プロファイルに対して仮定を置かない場合、分解能は、投影データ(検出器)の個数で決まる。一方、配置可能な検出器の個数、および観測方向は、観測窓の大きさ、設置スペースにより制限される。さらに、分光機能を持つ検出器は高価であり、コスト面からの制限も加わる。以上の理由から、本計測の場合では、2次元データとしては最小限の空間分解能 7×7 ($\cong 50$)点の確保が可能な検出器数とした。しかし、モノクロメータ($f=25\text{cm}$)5台、光電子増倍管50本、トランジェントメモリー50チャンネルというようになりかなり大がかりな測定系となった。

5. 測定結果

開発したシステムを用いてFRCプラズマの測定実験を行った。モノクロメータは、497.6

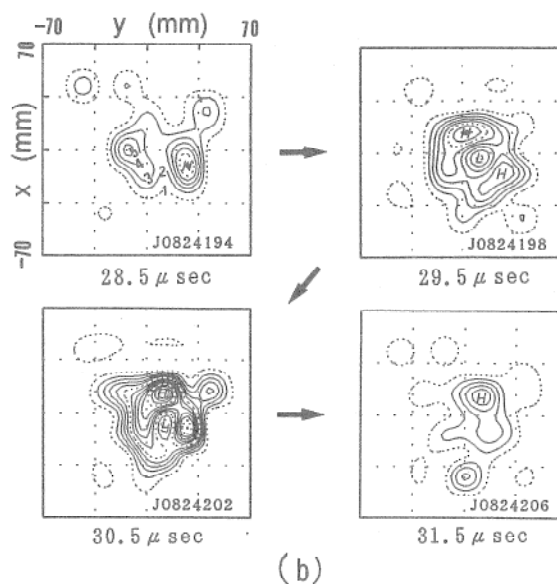
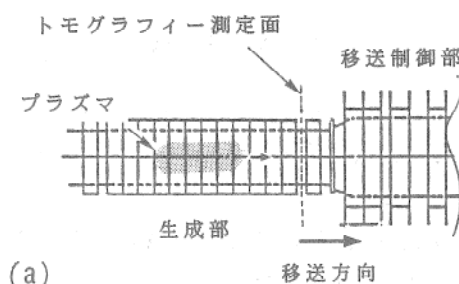


図6 プラズマ断面の2次元測定結果例
(a) 測定位置(FIX装置)
(b) 制動放射強度分布の等高線表示

nm(全半値幅1.0nm)にセットし、制動放射のみを取り出した。また、光電子増倍管からの出力は、8ビット、4MHzで記録した。

測定は、図6(a)に示す断面において、高速に別の容器に移送されるプラズマの測定を行った。プラズマ断面を実際に再構成し、放射強度分布の等高線表示を行った結果を図6(b)に示す。この結果から、FRCプラズマ(長さ約60cm、半径約4cm)の各断面プロファイル、および約 $3 \mu\text{sec}$ の間に測定面を通過していることなどが観測できる。

6. おわりに

開発したプラズマ分光トモグラフィーについて説明した。現在、本測定システムをFRCプラズマの測定に用いるとともに、新たな測定対象を探している。例えば、反応性プラズマの分布測定、燃焼気体の温度伝播測定などに応用可能であると考えている。

参 考 文 献

- 1) S. Sugimoto, et al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 62, No. 9, pp.2138-2141, 1991.
- 2) 長山好夫, 核融合研究, Vol.62, No.6, pp.427-445, 1989.
- 3) Y.Ito, et al., Jpn. J. appl. phys., Vol.30, No.7, pp.1475-1481, 1991.
- 4) M. G. Tsuzewski, Nucl. Fusion, Vol.28, pp.2033-2092 (1988).
- 5) 宮本健郎: “核融合のためのプラズマ物理”, pp.427 (岩波書店, 1987).

