

# プラズマ回転分光計測を用いた GAMMA 10 プラズマの電場計測

吉川正志、小林貴之、久保田雄介、齋藤将志、沼田直大

## Electric field measurement in a GAMMA 10 plasma using plasma rotation spectroscopy

M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota, M. Saito and N. Numada

A rotation of impurity ion has been measured using UV/Visible spectroscopy in the tandem mirror plasma GAMMA 10 to investigate diamagnetic drift and  $E \times B$  drift. The electric field is estimated with the plasma rotation and  $E \times B$  drift analysis. Since the detected signal is the line integrated emission, the parametric Abel inversion technique has been developed. In the method, a density profile of impurity ion was assumed. Recently, we can obtain the density profile using collisional-radiative model calculation. Then the electric field is obtained independently of that assumption. The radial electric field profile measurement by using UV/Visible spectroscopy and CRM calculation are successfully obtained. in GAMMA 10.

GAMMA 10 では電位の制御による軸方向の閉じ込め改善は本質的な課題であるが、さらに電場の径方向分布と径方向閉じ込め改善の関係も指摘されており、GAMMA 10 各領域における電場分布制御の重要性が高まっている。また、トカマクやヘリカル等のトーラス系プラズマ閉じ込め装置においても径電場分布の変化を伴う大幅な閉じ込め改善が確認されている。従って、これらタンデムミラー及びトーラス系の双方に見られる閉じ込め改善の物理の解明のため、プラズマ中の電場分布の測定は非常に重要である。本研究では、新たな電場分布計測法を確立することを目的とし、紫外・可視分光器を用いた不純物イオンの回転速度の計測、衝突・輻射モデルの計算、数値計算を詳細に行い、GAMMA 10 セントラル部の電場分布を測定した。本計測法は、受動的計測のためプラズマに影響を与えず、典型的電位計測法であるビームプローブ法に比べ磁場による測定位置の制限が無く、小型で、光ファイバーによる遠隔計測可能という多くの独自の特徴を持つ。本研究では、既設装置による電位分布計測結果と比較を行い、本計測法の有効性を示した。

プラズマ中の不純物イオンから放射される線スペクトル(波長 $\lambda_0$ )は、不純物イオンが検出器に対して速度 $v$ で運動しているときドップラーシフトにより検出される波長が $\Delta\lambda$ だけ変化し、 $\Delta\lambda$ は光速を $c$ として(1)式で表される。

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v}{c} \quad (1)$$

そのため、分光測定によりドップラーシフトを測定することで不純物イオンの速度が得られる。

一方、軸対称プラズマ中の不純物イオンの回転は(2)式で表される。

$$v_\alpha(r) = -\frac{1}{B} \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} - \frac{k_B T_\alpha}{Z_\alpha e B} \frac{1}{n_\alpha(r)} \frac{\partial n_\alpha(r)}{\partial r} \quad (2)$$

ここで右辺第1項は $E \times B$ ドリフト、第2項は反磁性ドリフトと呼ばれる。衝突・輻射モデルの計算と分光測定を用いることで反磁性ドリフトを求めることができるため、回転速度から $E \times B$ ドリフトが得られ、磁場 $B$ が既知であるため電場 $E(r)$ の測定が原理的に可能である。実際の測定においては、検出器の視線上の各位置のプラズマからの放射が積分された形で線スペクトルが得られる。そこで局所量を仮定し、数値計算により仮定した局所量から構成される視線積分量と計測される視線積分量の比較を行い、誤差の範囲で一致する値を得る。

プラズマから放射された光は 40 チャンネルの光ファイバーによって空間分解されて分光器に入射する。分光器では 200-700nm の波長領域を分光することができ、分光した光をイメージインテンシファイアで増幅し、CCD カメラで撮影し、パーソナルコンピュータにデジタル化して取り込み、解析を行う。本システムの実効的な波長分散は約 0.016nm、波長分解能は約 0.066nm である。

C<sup>+</sup>イオンの放射光(426.726nm)について、ドップラーシフトを測定した。また、衝突・輻射モデルの計算により反磁性ドリフトを求め、数値計算によりドップラーシフトを計算した。ドップラーシフトの測定値及び計算値を図 1 に、この結果得られた GAMMA 10 セントラル部の電場分布を図 2 に示す。2 つの計算値はそれぞれ誤差の最大・最小を表す。さらに、本計測の有

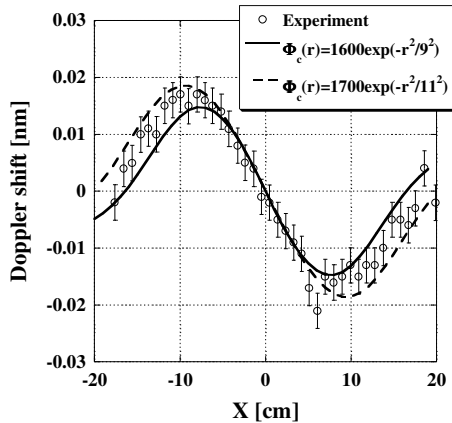


図1.ドップラーシフト

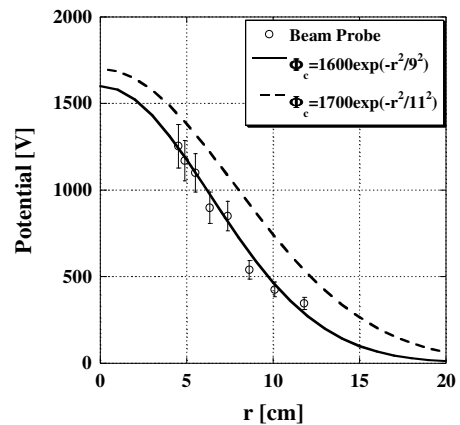


図2.電場分布

効性を確認するため本計測によって得られた電場分布から電位分布を推定し、既設の測定装置であるビームプローブによる電位分布の測定結果と比較を行った。その結果を図 2 に示す。この結果、本計測法とビームプローブの測定結果は誤差の範囲内でよい一致を示した。

本計測の精度を向上させるためには、CCD カメラ以降のシステムの改良、イメージインテンシファイア前でのスペクトルの伸張が有効であり、今後の課題である。さらに、C<sup>+</sup>イオン以外のスペクトルでの測定を可能にするため、衝突・輻射モデルの構築も重要な課題である。

本研究では、紫外・可視分光器を用いたプラズマ回転測定、衝突・輻射モデルの計算、数値計算による局所量の解析によってプラズマ中の電場分布の計測を行い、既設の装置との比較からその測定法の有効性を示し、新たな電場分布測定法として確立した。これによって、GAMMA10プラズマにおける電位によるプラズマ閉じ込めに関する研究に重要な、径方向分布計測がいろいろな場所において可能となり、今後の電位閉じ込めに関する研究の進展が期待される。

