

局所計測を併用した新しい電子密度分布再構成法の開発

東大新領域 小野・井研究室 修士2年 門脇和丈

レーザ干渉計はプラズマ中を通るレーザ(プローブ光, 透過光)と, プラズマの外を通るレーザ(ローカル光, 参照光)の位相差が, プローブ光のレーザパス上の電子密度の線積分値に比例して変化することを利用して, プラズマの電子密度を計測する方法である. 高い時間分解能と位相差の分解能をもち, 簡易で高精度な電子密度計測法として多くの装置で用いられてきた.

干渉計測は線積分値の計測であり, 物理的に重要な電子密度の局所分布を得るためには, 複数の計測点から得られた線積分値に数学的な処理(分布再構成, 逆変換)を行う必要がある. 再構成に用いられる手法には Abel 変換法や級数展開法があり, 開発が行われてきた.

局所分布を得るために再構成が必要なレーザ干渉計は, レーザパスを十分に密にして多数設けることにより高い空間分解能を達成することができる. しかし, 多数の光学系の設置には高いコストが掛かるため, 大学の講座レベルではそのように大規模な計測系はなかなか実現できない. また, レーザパスの設置位置は装置的な制約が大きく, 任意の位置に取ることができないこともある. これらの理由から, 再構成後の電子密度分布の精度を上げにくいことが, 干渉計(ひいては一般の線積分値計測)の持つ問題点の一つとして挙げられる.

そこで本研究では, より計測の空間分解能や計測位置の自由度の高い局所計測(トムソン散乱計測, 静電プローブ計測など)を併用することで, 干渉計測の空間分解能を高めることが可能な再構成手法を開発した.

この手法は線積分計測から得られた値を, 局所値と同じ次元の中間形式に変換することで, 線積分値と局所値という一般には異なる次元を持つ物理量の組から局所分布を得られるものである. アルゴリズムの実装にあたっては従来の手法を元に線形化を行い, あらかじめ計測系の配置から決まる行列を作成し, 計測データのベクトルにそれに乗じるだけの簡単な行列計算で, 再構成した局所分布のベクトルが出力されるようにした.

実験装置として東京大学 TS-4 装置のパラメータを用いて新しい再構成アルゴリズムを実装し, テスト分布の再構成実験や, エラー入りデータを用いたロバスト性のテストを行い, 再構成手法としての性能を調査した. その結果, 局所計測データを利用し, 再構成の精度が上がり, 従来の TS-4 装置の干渉計測系の構成では原理的に密度分布の再構成が不可能であったテスト分布に対しても, 適切な計測系の配置により再構成が可能になることを確認した.

具体的な既存手法の問題点と, それへの対策として本手法を用いることを念頭に置いた局所計測の配置の例としては, 以下のようなものがある. 既存の手法では, 最も内側の積分計測点よりもさらに内側の領域は無情報であるので, 再構成の誤差も大きくなる. そこで, 局所計測を装置内側壁付近に設置することで, 装置全体での分布再構成ができるようになった. また, 衝撃波やプラズマのエッジ領域など積分計測の空間分解能以下の電子密度構造がある場合, 再構成ではそれを再現できない. 構造の周囲に局所計測を設置して情報が得られれば, 構造の前後での再構成精度を上げることができる.

発表では, 作成したアルゴリズムの詳細について解説し, いくつかのテスト分布に対する各手法の比較結果を紹介する.