

光周波数コム干渉計による瞬時プラズマ電子密度計測法 A New Method for Instantaneous Plasma Electron Density Measurement Using Optical Frequency Comb Interferometer

荒川弘之¹、河野康則¹、東條寛¹、笹尾一¹、伊丹潔¹

Hiroyuki ARAKAWA¹, Yasunori KAWANO¹, Hiroshi TOJO¹, Hajime SASAO¹, Kiyoshi ITAMI¹

原子力機構¹
JAEA¹

磁場閉じ込め型核融合炉のプラズマ生成制御では、長時間(～数ヶ月)に渡り高精度な電子密度データをリアルタイムにフィードバックすることが必要不可欠である。この為、著者らはエラー処理の手法[1]や瞬時計測によるエラー耐性の高い手法 [2]を開発してきた。この成果を踏まえ、著者らは近年産業界や計測標準分野において開発が進められている、光周波数コムレーザー発振器に着目した。光周波数コムレーザーは、均一間隔(数十MHz～数十GHz)で数百の周波数を同時に発振するレーザー発振器である。光周波数コムレーザーを用いた干渉計を構築することで、一度に数百の干渉位相信号を計測することができる[3]。プラズマ電子密度計測では、これまでに本レーザーが用いられたことはないが、その特性から広い密度上限と高精度を合わせ持つことが期待される。また、光ファイバーを用いた伝送が可能な為、原理的にメンテナンス性に優れる。本研究では、光周波数コムレーザー干渉計が得られた場合の線積分プラズマ電子密度計測法の検討を行った。

式(1)に、線積分電子密度(N_e)と参照光とプローブ光の光路長差(L)、レーザー周波数(ω)に対する干渉位相変動(θ)を示す[4]。

$$\theta = C_1 \frac{N_e}{\omega} + C_2 L \omega \quad (C_1, C_2 \text{ は定数}) \quad (1)$$

検討の為の計算では、光コムレーザー距離計[3]で利用されている中心波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、周波数コム間隔 25GHz で301ラインの $1.52 \sim 1.58 \mu\text{m}$ の発振器を想定した。解析においては、まず、電子密度($10^{18} \sim 10^{23} \text{m}^{-2}$)と光路長差($10^{-2} \sim 1\text{m}$)を与えて式(1)から理想的な干渉位相信号を求めた。干渉位相信号は301ラインすべてに対して得られると仮定した。次に、①レーザー発振器や伝送光学系、光検出器に起因する位相ノイズと、②位相検出器に起因する位相分解能を考慮して、干渉位相信号を実験データに近づけたものから電子密度を求めた。計算の結果、得られた電子

密度値のエラーの大きさは、与えた電子密度の絶対値に依存せず、常に一定のレベルであることが分かった。図1に、位相ノイズの標準偏差 σ_{fringe} に対する、電子密度の理想値との差 σ_{ne} (標準偏差、18回計算)を示す。位相分解能が $10^{-3} \text{rad}/2\pi$ と $10^{-4} \text{rad}/2\pi$ の場合それぞれに対して、1回の位相信号測定に加え、100回の位相信号測定をアンサンブル平均してから求めた電子密度による値も示した。プラズマ線積分電子密度計測で要求される精度が 10^{18}m^{-2} 、時間分解能が 1ms であるとする[5]、位相ノイズ $2 \times 10^{-3} \text{rad}/2\pi$ 以下、位相分解能 $10^{-3} \text{rad}/2\pi$ 以上、時間分解能 100kHz 計測で、アンサンブル平均を100回することにより、本手法が電子密度計測に適用できることが分かった。

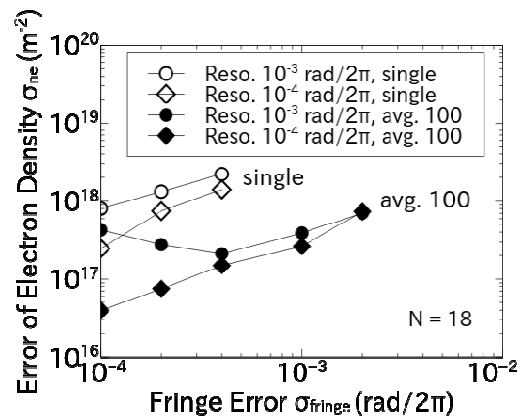


図1:干渉計の位相分解能 σ_{fringe} に対する電子密度のエラー σ_{ne} 中心波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、周波数コム間隔 25GHz 、301ラインの光周波数コムレーザーを仮定し、電子密度を $10^{18} \sim 10^{23} \text{m}^{-2}$ 、光路長差を $10^{-2} \sim 1\text{m}$ 変動させた。

[1]H. Arakawa, et al, Rev. Sci. Instrum. 83, 10E345 (2012)

[2]H. Arakawa, et al, Rev. Sci. Instrum. 83, 063507 (2012)

[3]今井一宏他、計測と制御、第50巻、第2号、2011年

[4]Y. Kawano, et al, J. Plasma Fusion Res. 73, 870 (1997)

[5]A.I.H. Donne, et al, Nucl. Fusion, 47, S337 (2007)