

「レーザー核融合燃焼プラズマの観察に向けた 超解像コンピューテーショナルファイバイメージング」

有川安信（レーザー科学研究所），八木 康史（産業科学研究所），
中村友哉（産業科学研究所），中川桂一（東京大学 工学系研究科）

1. 研究の背景

レーザー核融合研究において、核融合反応燃焼の空間分布の2次元計測が求められている。要求される空間分解能が極めて高く、さらに計測器センサー部分を核融合プラズマごく近傍に設置しなければならないという要求から、光ファイバーの先端部に計測センサーを取り付け、センサー先端は核融合プラズマ5mm から、数十メートル離れた計測装置まで伝搬させて測定する必要がある。

この計測の中に、マルチモード光ファイバーを用いた光情報処理技術の適応が求められている。レーザー核融合燃焼領域の中性子の発生空間分布（ミクロンスケールの空間構造を有する。本研究においては被写体）が、Electro Optic ポリマーを通して、計測用のプローブレザー光の強度変調に変換される。そのレーザー光が長距離(30m 以上)マルチモードファイバーを伝搬してから、プローブレザーの参照用平面波レーザーと干渉させてCCD カメラで計測される。スペックルパターンの干渉縞模様からホログラフィック法により複素振幅画像を取得する。多数の点からの点光源による伝達関数マトリックスを作成しておいてから、被写体画像に伝達関数逆関数を掛け算することで被写体画像の再生が実現する。一連の技術は Choi⁽¹⁾らによって実証された方法と同様の操作をしている。

この手法をレーザー核融合研究に適応することは、中性子源（被写体）に対して、EO ポリマとマルチモードファイバーの部分が、レンズのような結像素子の役目を果たすことから、中性子のような結像が困難な対象でも

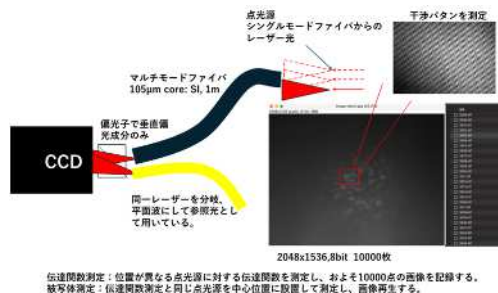
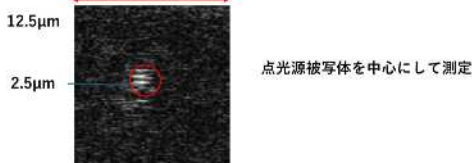


図1 実験セットアップと伝達関数の生信号の一例

実験結果

(1)点光源とファイバーの距離が~0mmの時。
伝達関数測定サンプリング間隔 = 12.5µm/100画像 = 0.125 µm/data



(2)ファイバーから点光源の位置8mm。
伝達関数測定サンプリング間隔 = 125µm/100画像 = 1.25 µm/data

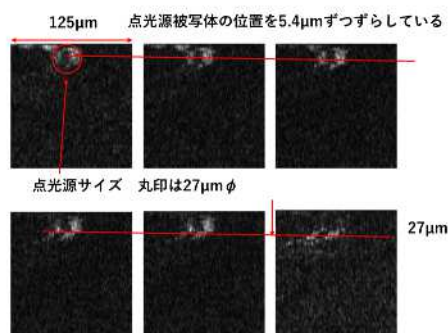


図2 実験で得られた、レーザー光による点光源を被写体として、マルチモードファイバーを伝搬させてから画像再構成をして得られた画像。点に近い画像が得られ、またその位置の動きが観測された。

画像にすることができること、さらにその信号をマルチモードファイバー数十メートルの信号伝達が可能であるという魅力がある。

核融合レーザーショットの直前に、マルチモードファイバーの点光源伝達関数を取得し

てにおいて、撮影対象の実験データに演算処理を施すことによって画像を再生する。ここで問題となるのが、CCDの熱電子ノイズや、電子数統計ゆらぎノイズ、マルチモードファイバーの微小な振動や伸び縮みに起因するファイバー伝達関数の変化により、画像再構成の鮮明さが失われることである。画像取得の際のコントラスト条件（信号光と参照光の強度比、干渉縞の間隔など）並びに、再構成計算アルゴリズムの中でも問題を克服するアプローチを見出すことが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、核融合中性子計測でマルチモードファイバーイメージングを用いることを前提に、いかにして鮮明な画像を安定的に得るかということに関して実験と計算アルゴリズムの開発を行う。

3. 研究の方法

有川がレーザー科学研究所において、マルチモードファイバーイメージング試験装置を構築した。中性子の代わりに、模擬としてレーザー光源を用いて点光源や特定のパターンを被写体として設定し、マルチモードファイバーによる撮像実験を行った。一方で、中村が再構成計算プログラムの開発を行った。そのプログラムが有川に渡されて、有川が実験結果から再構成を行った。

図1に実験セットアップおよび、伝達関数として得られた画像の一例を示している。

波長 1064nm の DPSS レーザーの光をシングルモードファイバーに通して、出口端面から出射させることでシングルモード点光源を作った。その点光源をマルチモードファイバー（105 μ m コア、NA0.22、長さ 1m）に、入射させて伝搬させた。その光を同じ波長の平面波参照光と干渉させてカバーガラス無し CCD カメラで測定した。

シングルモードファイバーからの点光源をそのまま、マルチモードファイバーの入り口端面から 8mm の位置に設置して直接マルチモードファイバーに入射させた(実験結果の 2)。またはシングルモードファイバー点光源を、レンズを用いてマルチモードファイバーの入り口端面 0mm の位置に結像してから入射させた(実験結果の 1)。点光源による伝達関数を測定した。点光源の位置を $x,y=100\times 100$ 箇所移動させ、それぞれのデータを保存した。伝達関数と同じ点光源の条件を、中心位置 ($x,y=50,50$) に設置して被写体とした。それらのデータを中村によるプログラムにインプットして得られたデータが図 2 である。実験結果 1 は接写実験であり、より高解像度のデータが得られた。実験結果 2 は低解像度だが、被写体が動く様子が観測できた。

現状、まだ信号・ノイズ比が悪く、点光源以外の画像（例えば少しぼかした丸い光源）は鮮明さが足りず観測は困難であった。これらは CCD のノイズに起因する、計算アルゴリズムの問題であることがわかっている。今後も引き続き、実験の条件を探索することと、計算アルゴリズムの改善を行う。

4. 研究成果

レーザー核融合中性子計測に用いるための、マルチモードファイバー画像計測手法の原理実証ができつつある。あと少しの改善で実用に耐えられる画質の計測が実現する。この研究成果は国内学会（レーザー学会 2025 年）で報告を行った。また核融合燃焼をマルチモードファイバーイメージングで計測するという内容で科研費基盤 B が採択された。これからは同科研費プロジェクトとして研究を発展させていく計画である。

引用文献

[1] Youngwoon Choi, et al., “Scanner-Free and Wide-Field Endoscopic Imaging by Using a Single Multimode Optical Fiber”, Physical Review Letters, 109, 203901, (2012)

発表論文等

〔雑誌論文〕

なし

〔学会発表〕

有川安信、中村友哉、他、” マルチモードファイバーイメージングによるミクロン空間分解画像計測器”, レーザー学会 2025、2025 年 1 月 21 日、広島国際会議場

〔著書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔外部資金〕

- ① 2025-2027, 科学研究費助成金 基盤 B, 「超高解像度中性子計測器によるレーザー核融合プラズマの爆轟的核燃焼の研究」, 25K00983, (代表)有川安信, (分担)中村友哉

〔その他〕 (※受賞, 基調講演など)

なし