

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01064

研究課題名（和文）超高速2次元X線計測によるレーザー核融合加熱伝搬ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Investigation of heating dynamics in laser-driven fusion by ultra-fast two-dimensional x-ray imaging

研究代表者

白神 宏之（Shiraga, Hiroyuki）

大阪大学・レーザー科学研究所・名誉教授

研究者番号：90183839

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高速点火レーザー核融合で最も重要である、超高強度レーザーによる核融合燃料プラズマの加熱プロセスを、超高速かつ超高空間分解能プラズマ計測器を用いて計測し、その物理メカニズムの同定を行うものである。電気光学（EO）特性を持つポリマー（EOポリマ）とチャープパルスレーザー光を用いた、光ファイバーによる伝送方式により、中性子、X線、電子、イオンに感度を有する計測装置を開発し、核融合実験において時間分解能に関して半値全幅5ピコ秒以下を達成し、空間分解能は2.5ミクロンを達成した。最も困難であった計測器の開発が完了したため、今年度から高速点火核融合加熱プロセスの研究を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したプラズマ計測器は、最適化された条件では時間分解能が1ピコ秒、空間分解能が1ミクロンを得ることができる。これは従来の当該分野の最高分解能を、時間分解能で10倍、空間分解能で10倍上回り、総合性能として100倍の性能向上を達成するものである。これまでレーザー核融合研究は、核融合燃焼中のプラズマのダイナミクス（時間変化するプラズマ中の温度空間分布や密度空間分布）を見ることはできなかったものが、この計測装置を用いれば時間が止まったかのように見えるようになった。この計測手法はレーザー核融合のみならず、広い超高速現象を対象とする研究分野で適応できるため、幅広い分野に貢献する成果である。

研究成果の概要（英文）：This project aims to develop an ultrafast time resolution and ultrahigh spatial resolution plasma detector for studying a dynamics of fast heating process in fast ignition laser fusion. We have successfully developed a novel plasma detection system; better than 5-pico second time-resolution and 2.5 micron spatial-resolution detector in single shot, which is sensitive to neutrons, x-rays, electrons and ions. The performance has been demonstrated at laser fusion experiment. The detector system consists of Electro Optic Polymer and chirped pulse laser and optical fibers. By using the detector experiment on studying the heating dynamics will be conducted this year.

研究分野：超高速イメージング計測、レーザー核融合

キーワード：超高速計測 EOサンプリング ファイバーイメージング

1. 研究開始当初の背景

本研究は、高速点火方式レーザー核融合における未解決の最難関課題の一つである、核融合燃料の一部が加熱された際に、熱波がどのような速さでどのような方向にむかって伝播していくかという事を、新しい計測手法を開発して実測し、物理機構を明らかにするというものである。

その物理機構には3つの候補が存在する。従来から検討されてきたのは、加熱用超短パルスレーザーが、爆縮用ロングパルスレーザーにより生成された重水素 三重水素の高密度プラズマ(コアプラズマ)の左端に照射されたとした時に、照射された領域で高速電子を発生し、その高速電子がコアプラズマに衝突することで、コアプラズマを左端から右方向に向かって加熱波が進行する「ドラッグ加熱」と呼ばれるものである。さらにコアプラズマの周辺部の低密度プラズマでは、ドラッグ加熱にともなう電子の不足を補う作用が働き、右から左にプラズマ中の電子が移動しこれにより加熱される「オーム加熱」がある。これは右から左へ外周から内部へ向かって加熱波が進む。

しかしながらドラッグ加熱とオーム加熱は共に効率が低いことが問題であった。高速点火方式では核融合点火は困難であるとさえ考えられてきた。一方で近年、加熱レーザーが照射された瞬間、プラズマに吸収された点、それは燃料左端のコア外側の低密度領域であるが、局所的な熱源が生じ、熱波となってコアプラズマに伝わり加熱するという「熱波加熱」と呼ばれる新たなモデルが提唱された。これは左から右へ、ドラッグ加熱よりはやや長い時間をかけて進行し、熱波の面が見られると考えている。熱波加熱はドラッグ加熱やオーム加熱よりも高効率となり、高速点火核融合における支配的な加熱メカニズムとなる可能性が示唆されている。

すなわちドラッグ加熱、オーム加熱、熱波加熱の何が、どのようなダイナミクスで加熱していくのか、これを測定することが本研究の課題である。

いずれのメカニズムにしても、加熱継続時間は10ピコ秒以下と予測されている。また加熱される領域のサイズは30ミクロン以下である。すなわち加熱のダイナミクスを計測するには、時間分解能数ピコ秒、空間分解能数ミクロンという、計測器にとっては極めて分解能の高い計測が必要となる。これらは従来のプラズマ計測器のいかなる装置でも実現できなかった性能である。

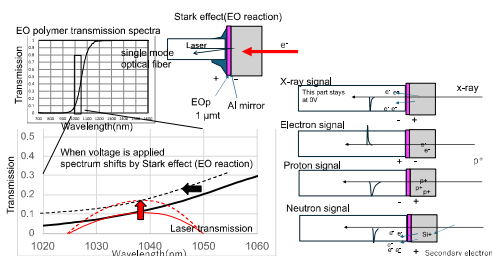


図1. EOポリマーの動作原理説明

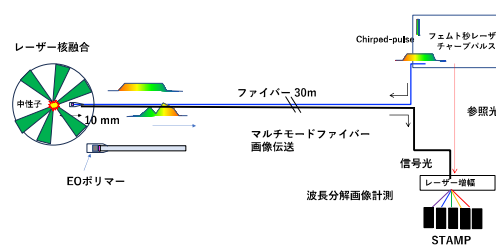


図2. 実験セットアップ図

そこで著者らは、電気光学(Electro Optical, EO)反応性を有するEOポリマーに着目した。EOポリマーにチャープパルスレーザーを透過させて、時間分解計測をする代わりに分光計測をする、波長スキャンによるEOサンプリングをレーザー核融合実験環境で実現させる。EOポリマーとは、電気光学応答を持った分子配向性の高いポリマーである。

荷電粒子がEOポリマーに入射するとEOポリマーの表裏に電位差が生じ、シュタルク効果(EO効果の1種)によりレーザーの吸収スペクトルがシフトする。それに応じてプローブレーザーの透過率が増減することで、電場強度に比例したレーザー強度の変調が得られる。図2にEOポリマーの動作原理を示す。

核融合実験では図2,3に示すように、真空チャンバーの中心部の核融合プラズマにEOポリマーは近接させる必要があるが、電気計測器類は30m程度の距離を離す必要がある。この要求に適應するために、光ファイバーを用いた計測系を構築し、EOポリマーはレーザー核融合炉中心のプラズマから1cm以下の距離に近接させつつ、計測装置は30メートル遠方に遮蔽を設けた上で配置し、光信号は光ファイバーで伝送させている。EOポリマーは荷電粒子一般(中性子、X線、電子、陽子)に感度を持ち、EO効果によりレーザー光の強度に変調を与えるものである。EOポリマーは単体では0.3ピコ秒の超高速応答が実証されているが、レーザー核融合でシングルショットでの計測は世界で初めてである。

本研究では、X線を超高速かつ空間分解して観測する必要がある。X線の空間分解計測のために、EOポリマー前にX線結像用ピンホールをつけ、バンドルファイバーにより画像情報を伴う時間分解信号を計測する。これにより時間分解能5ps以下、画像分解能5ミクロン以下の超高速画像計測をシングルショット計測で実現する。

2. 研究の目的

本研究で最も挑戦的な目的は、超高速かつ超高解像度の X 線計測装置を開発するということである。装置開発要素は、(1)EO ポリマとファイバーを接続したデバイスを開発すること、(2)波長 1040nm 域で波長幅 40nm を有する、最短圧縮パルス幅 150fs のレーザーパルスを 500ps までストレッチしたチャープパルスレーザー装置を開発すること、またレーザー増幅器を備えること、(3)バンドルファイバーイメージング計測装置は非常に高価であるため、大体法としてマルチモードファイバーを用いた新しいイメージング手法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1,2)を開発し、大阪大学レーザー科学研究所に激光 XII 号レーザーによる核融合実験設備に設置した。図 3 に実験の様子を示す。開発要素は全て自己開発で行なった。(3)はマルチモードファイバー 1 本で、あたかもバンドルファイバーのように、画像を伝送するというものである。さらにこの手法では光の回折限界以上の超高空間分解能が得られるという優れた特徴を有する。手法は、そのマルチモードファイバー内を伝搬する点光源による光パターンと位相を測定し、これはすなわち点光源伝搬関数となる。測定対象の視野全ての位置において点光源関数を測定しコンピューターに記憶させる。その後、計測対象となる画像がそのマルチモードファイバーを伝搬してきて得られるパターン信号と位相信号から、コンピューター行列計算で伝達関数を割り算して、最終的に計測対象の画像を復元するという技術である。これはマルチモードファイバーイメージングと呼ばれる新技術である。マルチモードファイバー技術を開発するための実験装置を構築し、EO ポリマーの研究と並行で開発を進めた。技術が確立したら激光 XII 号実験施設に持ち込み、マルチモードファイバーイメージング技術と、EO ポリマーファイバーによる超高速 X 線計測を合体させる。

この開発により世界で初めて 1 ピコ秒・1 ミクロン分解能 X 線計測が実現する。本計測器が実現すれば加熱メカニズムが明らかとなり、レーザー核融合研究が大きく進展する。

4. 研究成果

提案した計測システムの開発に成功した。LFEX レーザー（加熱用レーザーであり、1.5 ピコ秒のパルス幅、1.5 ピコ秒パルス幅の X 線・電子を発生させる）を用いたハイパワーレーザーショットで、インパルス応答が得られた。EO ポリマは、中性子・電子・X 線・イオンで同じ原理で信号を発生させる。図 4 に示すのは本実験で得られた電子によるインパルス応答である。LFEX による発生電子により、半値全幅 4 ピコ秒幅の信号が観測された。これはレーザー核融合実験の歴史の中では最も高速な信号である。さらに、核融合中性子においても信号を捉えることができてい

る。マルチモードファイバーイメージングの開発は、専門家である産業科学研究所の中村友哉准教授を研究協力者に追加し研究を推進した。符号化イメージングを用いた超高解像度画像伝送技術を開発した。画像再生の基礎試験を行い、2.5 ミクロン直径の点光源スポットの信号の再生に成功し、また 2.5 ミクロンの位置変化を捉えることに成功した。マルチモードファイバーの長さを 1m から 30m まで試験したところ、30m の長さでも画像再生ができることを示した。すなわちマルチモードファイバーイメージング技術が本研究に適用可能であるという原理実証データを得た。

計測装置が完成したため、いよいよ高速点火レーザー核融合の実験に進む。高速点火加熱を計測する実験は、令和 6 年度に実施し、加熱物理メカニズムの解明のための実験を行う計画である。

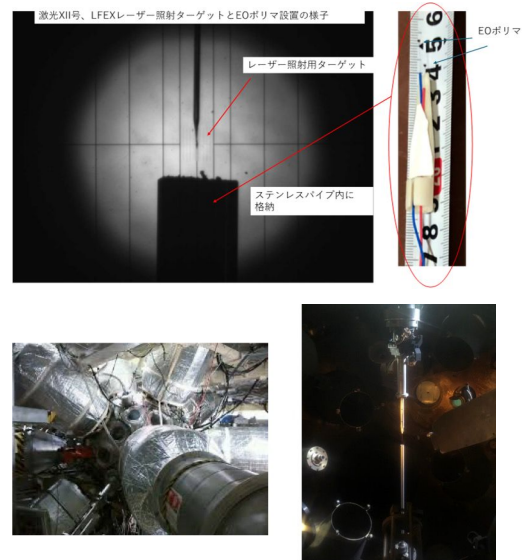


図 3. EO ポリマー付きファイバーをレーザー核融合実験に導入している様子。

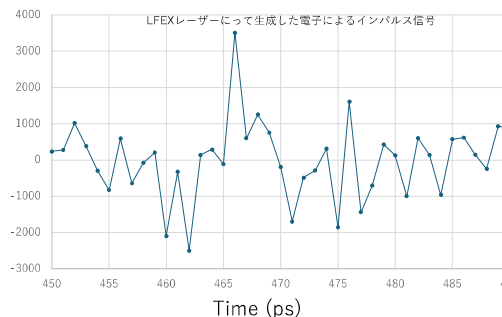


図 4. LFEX レーザーショットで測定されたデータ。466ps を中心に半値全幅 5 ピコ秒以下のパルス信号が捉えられている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Arikawa Yasunobu, Morace Alessio, Nakai Mitsuo,	4. 巻 5
2. 論文標題 Demonstration of efficient relativistic electron acceleration by surface plasmonics with sequential target processing using high repetition lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013062-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.5.013062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Morace A., Abe Y., Honrubia J. J., Iwata N., Arikawa Y., Nakata Y., Johzaki T., Yogo A., Sentoku Y., Mima K., Ma T., Mariscal D., Sakagami H., Norimatsu T., Tsubakimoto K., Kawanaka J., Tokita S., Miyanaga N., Shiraga H., Sakawa Y., Nakai M., Azechi H., Fujioka S., Kodama R.	4. 巻 12
2. 論文標題 Super-strong magnetic field-dominated ion beam dynamics in focusing plasma devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6876-6882
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10829-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mima Kunioki, Yogo Akifumi, Mirfayzi Seyed R., Lan Zechen, Arikawa Yasunobu, Abe Yuki, Nishimura Hiroaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Laser-driven neutron source and nuclear resonance absorption imaging at ILE, Osaka University: review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 2398 ~ 2398
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.444628	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ota Masato, Kan Koichi, Komada Soichiro, Wang Youwei, Agulto Verdad C., Mag-usara Valynn Katrine, Arikawa Yasunobu, Asakawa Makoto R., Sakawa Youichi, Matsui Tatsunosuke, Nakajima Makoto	4. 巻 18
2. 論文標題 Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1436 ~ 1440
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-022-01767-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 有川安信 中井光男、他
2. 発表標題 超高強度繰り返しレーザーを用いたターゲット加工と高効率電子加速
3. 学会等名 レーザー学会2023
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野将唯、有川安信、Morace, Alessio, 中井光男、中嶋誠、白神宏之、
2. 発表標題 レーザー核融合燃焼計測のための超高速中性子計測器の開発
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 浅野将唯、有川安信、中井光男、Morace Alessio, 中嶋誠、白神宏之
2. 発表標題 電気光学ポリマーを用いたチャープパルスレーザーによる超高速シングルショット中性子計測器の開発
3. 学会等名 レーザー学会大42回年会2022年
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中嶋 誠 (Nakajima Makoto) (40361662)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中井 光男 (Nakai Mitsuo) (70201663)	大阪大学・レーザー科学研究所・教授 (14401)	
研究分担者	Morace Alessio (Morace Alessio) (70724326)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	有川 安信 (Arikawa Yasunobu) (90624255)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関