

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03788

研究課題名(和文) X線自由電子レーザーを用いた高強度レーザー照射による固体加熱の超高速診断

研究課題名(英文) Ultra-fast probing of solid target heating by intense-laser irradiation using X-ray free electron lasers

研究代表者

藪内 俊毅 (Yabuuchi, Toshinori)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・主幹研究員

研究者番号：20397772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高強度レーザーと相互作用する固体試料の加熱過程の理解を目的とする。この目的のため、X線自由電子レーザー(プローブ)の照射に伴って発生する特性X線の分光計測法を活用した、高強度レーザー(ポンプ)が照射された固体試料内の温度と電離度の時間発展を診断する新しい手法を開発し、それを利用する。本研究では、この手法に最適な電離度センサーを含有する固体試料を設計開発し、それに対して両レーザーを精密に照射する技術を確立した。これを用いることで、ポンプ・プローブ実験において信号強度を維持しつつノイズを明確に低減させ、本提案手法による試料の電離度診断の実現に目処が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小な時間及び空間領域に高いエネルギーを集中させることができる高強度レーザーは、固体を瞬時にプラズマ化し高いエネルギー密度状態を形成する。この物質状態は空間的に非一様で極めて高速に変化する。このような物質状態の理解は、現在においては主に数値計算に依存しており、実験的には十分に調べられていない。新たな診断手法を開発することで、非平衡な物質状態を超高速高精細に実験的に測定することは、数値計算の確かさを検証し計算の高精度化を支援すると同時に、高エネルギー粒子源、レーザー材料加工などの応用利用の高度化に寄与するものと強く期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the proposed research is to study the solid heating processes in ultra-intense laser-solid interactions. The development of a new method has been proposed in this project to investigate the spatially and temporally resolved information of the ionization degrees of the laser-heated sample. In the method, the ionization degree of the laser-heated matter is diagnosed by the spectroscopy of characteristic X-rays produced by a probe pulse of the X-ray free electron laser. At an early stage of this research, the background noise in the spectroscopy has been realized as a challenge for the realization of the proposed method. Therefore, a new target design has been developed to minimize the background. The newly developed targets have reduced the noise while keeping the signal level successfully.

研究分野：高エネルギー密度科学

キーワード：高エネルギー密度科学 高強度レーザー X線自由電子レーザー プラズマ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

集光強度が  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> を超えるような高強度レーザーを利用した科学・工学研究は、次世代の高エネルギー粒子源や高輝度 X 線源の開発、宇宙物理・地球惑星科学、レーザー核融合科学など幅広い分野に及び、高強度レーザーを利用した研究に共通する基礎現象の 1 つに、試料へのレーザーエネルギーの付与(試料の加熱)とそれに伴う試料の電離がある。固体試料の場合、温度や電離度は、(1) 固体表面、(2) 固体内部、(3) 固体裏面の各領域において、例えば次のような物理現象で重要な役割を果たす。(1a) プリプラズマの発生や、メインパルスとの相互作用によるプリプラズマの追電離現象、(1b) 高効率なエネルギー吸収が期待される表面ナノ構造付き試料の機能発現やその阻害、(2a) 時間・空間共に極めて非平衡な環境下での不安定性を伴う高エネルギー電子の輸送、(2b) 付与されたレーザーエネルギーのうち、固体加熱に使われるエネルギーの分配率、(3a) 熱的作用による裏面界面の急峻な密度勾配の喪失、(3b) 電子放出に伴って生じるシース電場による裏面電離 (= 電場電離) の時間・空間発展。

このような科学的重要性があるにもかかわらず、極めて小さな時間・空間スケールで試料の加熱や電離が起こるため、測定に対する技術的な困難さのために実験的な取り組みの事例は少なく、その理解の多くはシミュレーションから得られている。実験的な取り組みの例としては、レーザーから固体へ付与されたエネルギーがどのように分配されるかについては数多く報告されているが、それらの計測の多くは時間積分されたか、もしくは、十分遅い時刻の平衡状態の診断結果である。

このような状況において、レーザー照射試料の任意領域の温度及び電離度状態を超高速に診断する技術を開発し、高強度レーザーの照射に伴って固体物質がどのように加熱・電離されるのかを理解することは、高強度レーザーを利用した幅広い研究を一層進展させるために共通する重要課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、高強度レーザーと固体の相互作用において、最も基本的な現象の 1 つである「レーザーエネルギー付与に伴う固体の加熱過程」を解明することを目的とする。具体的には、固体内の任意領域における温度及び電離度の時間発展を超高速に診断する。この目的のために、高輝度で超短パルス (< 10 fs) な X 線自由電子レーザー (XFEL) をプローブとした計測手法を新規に開発し、高強度レーザーにより加熱された固体の状態診断に適用する。

### 3. 研究の方法

本研究は、X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA に整備されている大出力の高強度レーザーと XFEL を同時利用できる実験基盤において実施する。この基盤では、出力が 200 TW を超える短パルスレーザーを、20 μm (FWHM) 程度以下まで集光することで、ピーク集光強度としては  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 程度を達成できる。このレーザーを固体平板試料に照射することで、その試料を加熱・電離する。この光学レーザーと併せて、最大 15 keV 程度の光子エネルギーの XFEL を試料に照射できる。その際、XFEL は最小 3 μm (FWHM) 程度まで集光可能である。実験基盤には、この集光点に高強度レーザーの集光点を重ね合わせ、また、時間的に 2 つのレーザーを重ね合わせるための調整機能が備わっている。

本研究で提案している診断手法では、高強度レーザーが照射された試料へ XFEL をプローブとして照射する。この時、XFEL の波長は、試料に含まれている特定元素の K 殻電子を効率的に光電離するように選択する。XFEL 照射に伴う光電離により、オージェ電子及び K 殻特性 X 線が放出される。特性 X 線のスペクトルは光源物質の電離度に依存するため、レーザーによる加熱温度 (電離度) によって変化する。提案手法はこの原理を利用し、XFEL 誘起の特性 X 線スペクトルから、XFEL が照射された時刻および空間における試料 (厳密には試料中の標的元素) の温度を測定するものである。すなわち、標的元素を電離度センサーとして利用する。

この手法の実現のためには、主に以下に示す技術開発や実験条件の最適化が求められると考えている。

- (1) 2 つのレーザーの試料への照射タイミングを精密に制御する技術
- (2) 2 つのレーザーの試料への照射位置を精密に制御して重ね合わせる技術
- (3) 所望する信号を取得するための、高強度レーザー照射に由来するノイズの抑制と XFEL による信号の確保

本研究に取り掛かる時点で、項目 1 については開発を完了していた。2 については単純な固体平板についてはその技術開発を終えていたが、この技術は、固体平板試料の設計やレーザー照射条件によって求められる精度が大きく異なる。後述する通り、本研究に関しては、3 の取り組みの結果、試料設計を当初計画していたものから変更したため、2 についても本研究期間内に追加で取り組むこととなった。項目 2 および 3 に関しては、高強度レーザーおよび XFEL の単体利用をまず行った上で、同時利用の場合のデータ取得を行った。

#### 4. 研究成果

本研究では、SACLA の XFEL の利用可能な波長領域や試料製作の実現性、また、発光分光器の応答性などから、標的要素としては銅を利用する計画を立てた。

当初計画では、多層平板試料をレーザー照射試料とし、任意の深さに標的層を配置することで、その深さ位置における電離度情報を取得する計画であった。そこで、試験的に3種の金属からなる多層平板試料を製作し、これにXFELと高強度レーザーをそれぞれ照射して、特性X線のスペクトルを取得し比較した。その結果、当初の見積もりで推定されていたものに比べ、XFELによる特性X線の発光量が高強度レーザーによるそれと比較して非常に小さいことが明らかとなった。同時に、これらの信号量のショット-ショットの不安定性が想定よりも大きく、本研究の実施にあたっては、高強度レーザーによる特性X線の発光量の抑制がまず必要であるとの判断に至った。すなわち、前述した求められる技術開発・最適化に関して、本研究では項目3に重点的に取り組むべきであると考えた。

ここで、本提案手法における分光計測を阻害するノイズには、検出器そのものに由来する動作ノイズを除いて、大きく区分して2つのものがある。第一には、レーザー照射に伴い発生する標的要素からの特性X線である。第二には、レーザー照射に伴い発生する高速電子や連続X線に由来するノイズである。前者は本手法の信号(XFELにより発生する特性X線)と発生する波長が同一であり、現実的な手段で区別することは非常に困難である。そのため、このノイズを信号に比してあらかじめ十分小さく抑制するか、もしくは、このノイズがバックグラウンドとして測定結果から差し引けるように必要十分な精度と安定性を有するような条件を達成するかのいずれかで対処する必要がある。前述の通り、ショット-ショットの揺らぎが比較的大きいことに加え、高強度レーザーのショットレートに限られることから、現実的な対応策としては、レーザー由来の特性X線の抑制が最適な取り組みであると判断した。一方で、後者は分光計測によるエネルギー弁別が可能であり、エネルギー方向に連続するノイズに対しては、測定結果からバックグラウンドとして差し引くことが可能であると考えられる。

以上の検討により、本研究においては、XFELに由来する標的要素からの特性X線量を顕著に低下させることなく、高強度レーザーに由来する特性X線を重点的に抑制することで対処する方針とした。これを実現するため、試料設計の最適化を進め、XFELの集光スポットと同程度である直径5 $\mu\text{m}$ 程度の微小な面積を持った銅を標的試料として試料薄膜に含有させることとした。新型コロナウイルスの影響もあって、このような精密な細工が施された試料薄膜を製造業者から入手することが困難であったため、本研究期間においては、試験的に直径5 $\mu\text{m}$ の微小銅球を標的試料として平板試料に加えて用いた。その際、高強度レーザーのパルスエネルギーの最適化も併せて行った。この最適化は、XFELにより発生する信号輝度に対して、高強度レーザー由来の特性X線以外のノイズ成分を可能な限り抑制する目的で実施した。

高強度レーザーおよびXFELを、それぞれ単体でこの改良型試料平板に照射した時に取得された発光X線スペクトルを図1に示す。図には、比較のために、平板型の標的層を備えた試料平板の結果も示した。特性X線の信号を比較すると明らかなように、XFELによる信号は、微小銅球を標的試料とした場合でも多層平板試料を用いた場合に比べて半分程度の低下に留まる(図1(a))。一方で、高強度レーザーによる特性X線の信号量は、微小銅球を用いた場合にはノイズレベル程度まで顕著に低下していることが分かる(図1(b))。なお、この実験では、最終的なポンプ・プローブ実験を想定して、高強度レーザーとXFELは3次元空間において一点で交差し、その交差点で所望する集光径となるように調整した。同時に、微小銅球はその交差点に精

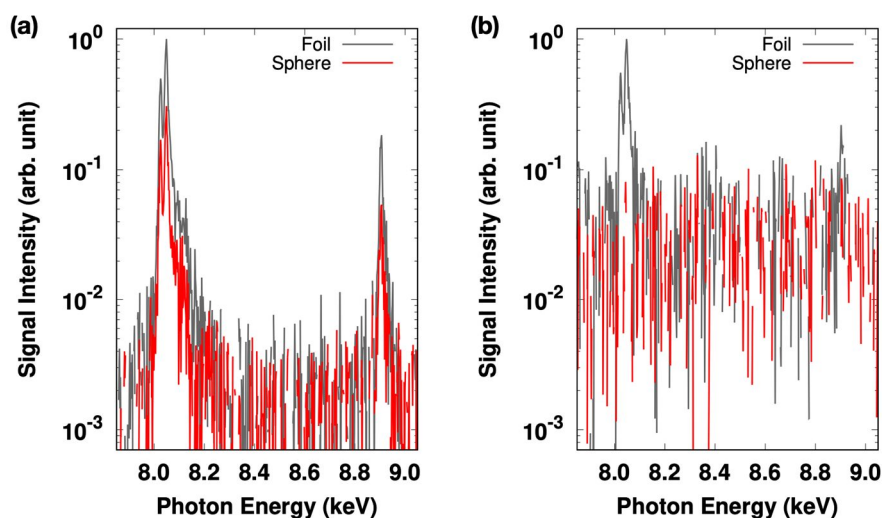


図1. 銅層を含む多層平板試料を用いた場合(灰色線)と微小銅球を伴った基盤層からなる平板試料を用いた場合(赤線)の発光X線スペクトル。(a) XFEL単体照射の場合。(b) 高強度レーザー単体照射の場合。

密に配置している。この様子は、湾曲球面結晶を用いた銅の特性  $K\alpha$  線の単色イメージング測定でも確認できており、前述の技術開発項目 2 の要件を満たしたことになる。

以上の開発を進めた上で、高強度レーザーおよび XFEL の同時照射を、二つのレーザーの相対時刻を変えながら行った。本研究で行ったレーザー照射条件では、特性 X 線のスペクトルに明確な変化は確認できなかった。これは、特に XFEL 励起の  $K\beta$  線に対する信号-ノイズ比が十分得られていないことが原因である可能性が大きい。ここで言うノイズは、分光器に用いている検出器におおよそ一様に分布しているもので、測定している波長域で分光されたものではないことを確認した。これを踏まえて分光器の設計を再検討した。その結果、特に分光結晶の設計変更により XFEL 励起の特性 X 線の収率を高めることで、この課題に対処が可能であるとの見込みを得た。これにより、本研究で提案している診断手法の開発について、その実現可能性に目処をつけることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshinori Yabuuchi
2. 発表標題 Experimental platforms using high-power optical lasers at X-ray free-electron laser facility, SACLA
3. 学会等名 12th Annual OMEGA Laser Users Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------