

金属表面のアブレーション加工における 初期過程のリアルタイム計測

横浜国立大学大学院 工学研究院

研究教員 南 康夫

(平成 24 年度奨励研究助成 AF-2012216)

キーワード: レーザーアブレーション、金属表面、超高速イメージング

1. 研究の目的と背景

金属表面の改質、加工を目的として、超短パルスレーザー照射によるアブレーションや自己組織化を利用する手法が確立されている。しかし、特にその初期過程は完全には解明されていない。その理由のひとつとして、アブレーションや自己組織化は非繰り返し現象であり、したがって、それらの観察には、繰り返し現象の観察によく用いられている超高速分光法、繰り返しポンププローブ分光法を適用することができないことが挙げられる。これまでにわれわれは、アブレーションの初期過程を明らかにすべく、日本原子力研究開発機構関西光科学研究所において高精度で再現可能な非繰り返し現象観察系を構築し、すでいくつかの研究成果を挙げている[1-3]。

金属表面アブレーション初期過程の精密計測において重要なのは、繰り返し現象の再現性のみならず、観察に用いる光の空間分解能、時間分解能、アブレーションによって発生するプラズマに対する適度な透過性、また、金属表面における適度な反射率である。これらの条件をすべて満たす光源は、日本国内外で日本原子力研究開発機構関西光科学研究所が開発した軟 X 線レーザー光源とそれを組み込んだ実験装置のみであり、したがって、本研究は日本原子力研究開発機構関西光科学研究所において行うのが最適である[4]。

2. 実験方法

実験の方法について、使用した光源、光学系、測定原理を中心に説明する。

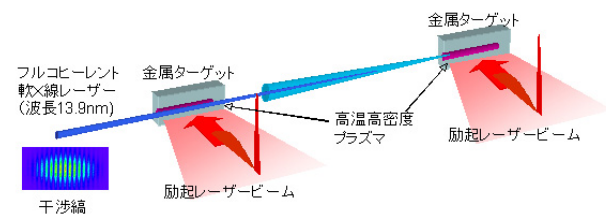


図1 ダブルターゲット方式によるフルコヒーレント軟 X 線レーザーの発生方法と、それによる干渉縞の例 (左下)。[4]より転載。

表 1 軟 X 線光源のスペック。

波長	13.9 nm (89.2 eV)
パルス時間幅	7 ps
エネルギー	1.3 uJ/pulse
繰り返し周波数	0.1 Hz

2.1 実験に用いる軟 X 線光源

本研究で用いた光源を実験装置を図 1 に示す。また、そのスペックを表 1 に示す。図 1 に示したとおり、金属ターゲットに波面の傾斜した高強度レーザーパルスを照射し、プラズマを励起させる。するとそのプラズマから軟 X 線が発生する。プラズマ励起レーザーの照射領域の形状、波面の傾斜によりシングルターゲットでもある程度の指向性、強度が確保できていたようである。本研究で用いる光源は、金属ターゲットを 2 つにし、さらにそれらを同期させることで、発生する軟 X 線の高強度化、指向性向上、コヒーレンシー向上を達成したものである。このダブルターゲッ

ト方式の採用により、試料のアブレーション部分を高い S/N で安定して観察することが可能となった。繰り返し周波数は 0.1 Hz であり、効率良く軟 X 線の光学系を設定することが可能である。パルス時間幅は 7 ps と短い、本研究で観察対象としている表面形状の干渉縞を形成するのに十分なコヒーレンシーを有し、干渉縞のイメージングにより試料の深さ方向 1 nm、面内方向 1.5 μm の空間分解を達成するとともに、時間分解能 7 ps を達成している [1,2]。また、後述するとおり、この 13.9 nm (89.2 eV) という波長がアブレーションプロセスの観察には適している。というのは、可視光に比べてアブレーションプラズマによる吸収の影響を大きく受けることなくアブレーションクレーター底部の反射率計測が可能であると同時に、若干の吸収によりアブレーションにより飛翔するプラズマ殻の外形の観察が可能となり、かつ、可視光に比べ空間分解能が高いためである。また、硬 X 線と異なり金属内部に侵入しないため、金属表面の情報を得るのに適しているためである。

2.2 実験に用いる光学系の概要

実験装置の概略図を図 2 (上) に示す。ただし、本研究では図中「ダブルロイズ鏡」を用いることなく、試料表面の様子を直接 CCD カメラで観察した。ダブルロイズ鏡は干渉縞による試料深さ方向の精密測定時に使用できるように配置されている。また、本研究での試料観察配置の特徴として、軟 X 線を測定試料に斜入射している点が挙げられる。結果的にこの配置により、2次元の平面的なイメージだけではなく、試料表面法線方向の情報も得ることが可能となった。

金属試料アブレーション用のポンプ光として Ti:Sapphire 再生増幅フェムト秒レーザー (中心波長: 795 nm、パルス時間幅: 80 fs、繰り返し周波数: 10 Hz) を用い、ポンプ光照射後にアブレーション領域に軟 X 線を照射し、その反射光を CCD カメラで 2次元イメージとして観察した。ポンプ光によるアブレーション開始から軟 X 線レーザー照射までに遅延時間を設け、さまざまな遅延時間でアブレーション過程のイメージを観察した。上述のとおり、アブレーションは不可逆過程の非繰り返し現象であるため、1ショットのアブレーションを観察しては、試料

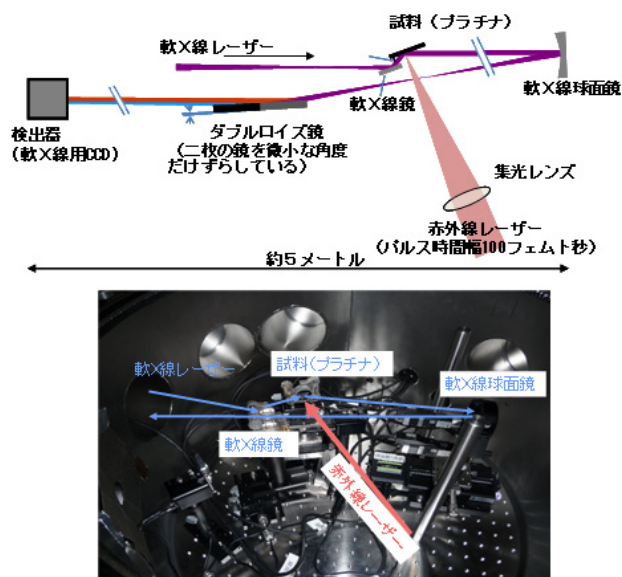


図 2 実験装置の概略図 (上) と試料付近の写真 (下)。
[4]より転載。

のアブレーション位置を変えて同様の観察を行うという方法を繰り返し行った。軟 X 線レーザーと Ti:Sapphire 再生増幅フェムト秒レーザーは同期されており、ストリークカメラでそれらのジッターを考慮に入れた遅延時間を設定・測定できるようになっている。

軟 X 線レーザー光源からイメージ測定用の CCD カメラまでの全てを図 2 (下) のような真空チャンバーやそれらを結ぶ真空配管内に納め、全ての実験を圧力約 10^{-6} Torr、室温で行った。

本研究では、入手のしやすさや物性の安定性、物性値のよく調べられているプラチナを測定試料として用いた。

3. 実験結果と考察

ここでは、上述の方法で得られた結果を示すとともに、それらの物理的解釈について論ずる。

3.1 測定結果

図 3 にポンプ光-軟 X 線プローブ光の遅延時間ごとのプラチナ表面アブレーションによる反射率のイメージを示す [5]。各図左上の数字はポンプ光照射からの遅延時間を

表している。軟 X 線の反射率は金属表面の平坦度に大きく左右され、アブレーションにより平坦でなくなった部分の反射率は低下し、黒色の部分はアブレーションによりプラチナ表面が吹き飛んだものと考えられる。

3・2 考察

図 3 をそれぞれ見ていく。0 ps では大きな変化は見られない。ポンプ光照射後 10 ps ではアブレーションが起こり、広範囲の反射率が低下していることが分かる。40 ps、60 ps と遅延時間が長くなるにつれ反射率の低下している部分が大きくなっている。したがって、アブレーションによりプラチナ表面が吹き飛ばされた部分が大きくなったことがわかる。また、60 ps、80 ps、160 ps のプラチナ表面の反射率低下部の面積はほぼ変わらないことから、60 ps 程度でアブレーションによってプラチナ表面が吹き飛ば段階は済んでいると言える。また、10 ps と 40 ps の図中矢印で示した部分に反射率の低い円環がある。60 ps、80 ps、160 ps の図を注意深く見ると、最終的なアブレーション領域のサイズは 10 ps、40 ps の図に見られる円環のサイズと同じであることがわかる。この円環は spallation（機械的破砕）と呼ばれる、衝撃波による表面の吹き飛びによるものである[6,7]。spallation によって吹き飛ばされた領域の表面は滑らかなものではないため、反射率が低くなり黒い円環として観察されたと考えられる。この spallation はちょうどアブレーション閾値近傍で発生するため、10 ps のアブレーション初期段階で見られたの円環のサイズは、最終的にアブレーション領域のサイズと等しくなると考えられる。

4. 結論

光照射によるアブレーション初期過程の観察を行った。アブレーション開始からピコ秒からサブナノ秒までの時間変化を追うことに成功した。アブレーション試料の種類やポンプ光のフルエンス、ビームプロファイルにより時間変化が異なることが予想されるが、これまでにない高精度な観察を行えたことはレーザープロセッシングメカニズムの解明に繋がると考えられる。今後は遅延時間をさらに延ばし、アブレーションの全貌を明らかにしたい。

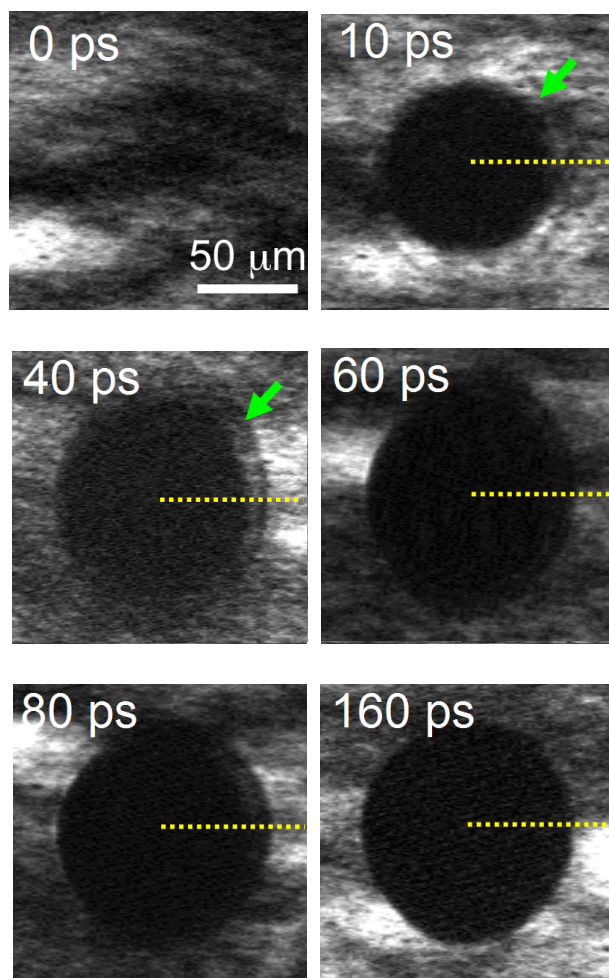


図 3 プラチナ表面のアブレーションによる反射率変化。
各図左上の数字はポンプ光照射からの時間を表す[5]。
10 ps、40 ps 図内の矢印で示した円環は spallation による反射率低下が原因である[6,7]。

謝辞

本研究は日本原子力研究開発機構関西光科学研究所 X 線レーザー応用研究グループにて、東京大学物性研究所末元徹グループ、徳島大学富田卓朗グループとの協力の下で行われたものである。この場を借りてお礼申し上げる。

本研究の一部は公益財団法人天田財団の奨励研究助成金によって遂行されたものである。この場を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- [1] T. Tomita *et al.*, Opt. Express **20**, 29329 (2012). /hosoku.html
- [2] T. Suemoto *et al.*, Opt. Express **18**, 14114 (2010).
- [3] Y. Ochi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 016601 (2012).
- [4] 日本原子力研究開発機構関西光科学研究所ウェブページ <http://www.jaea.go.jp/02/press2010/p10061701>
- [5] 富田ほか、第 59 回応用物理学会関係連合講演会、16p-E6-7.
- [6] P. Lorazo *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 134108 (2006).
- [7] D. Perez *et al.*, Phys. Rev. B **67**, 184102 (2003).