

## 超短光パルス励起プラズマによる広帯域軟 X 線の発生

上 杉 直・中野 秀俊・西川 正・Hyeyoung AHN

近年の超短光パルス発生・増幅技術の著しい進展により、小型のテラワット出力超短光パルスレーザー装置が実現されている。このことにより、テーブルトップ X 線レーザー<sup>1)</sup>、高次高調波発生<sup>2)</sup>等の従来、大型のレーザーシステムでしか実験できなかった高強度物理に関する研究が活発化している。ここでは、高出力超短光パルスを金属に照射して誘起される高密度プラズマからの広帯域軟 X 線発生について筆者らの実験結果<sup>3)</sup>を中心にその特性ならびに、応用の可能性について述べる。

## 1. スペクトルと軟 X 線強度

高強度フェムト秒光パルスを金属に照射することにより、表面近傍（スキン深さ）でレーザー光が吸収され、スケール長の短い高密度金属プラズマが生成される。高密度金属プラズマが真空中に膨張し、冷却する過程において広帯域 X 線を発生する。図 1 に超短光パルス照射により発生した Al プラズマからの軟 X 線スペクトルを示す。超短光パルス光源には、パルス幅が約 130 フェムト秒で、出力が 30 mJ の Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーシステムを用いた。中心波長は 800 nm であり、繰返しは 10 Hz である。主パルス前に発生するサテライトパルスはポッケルスセルを用いて抑制し、主パルスに比べ  $10^{-6}$  以下にしてある。ターゲットは、ガラス基板上に厚さ 0.3 μm の Al を蒸着したものである。レーザー光の入射角は直角である。ターゲットは、真空容器内の回転ステージ上にマウントしてあり、パルスモーターにより、各パルスごとに常に新しい面をレーザー光が照射するように回転している。プラズマより発生した軟 X 線のスペクトルは、レーザー光と 45° の角度に設置したフラットフィールド斜入射分光器（グレーティング本数：1200 本/mm）により測定した。マイクロチャンネル検出器を X 線検出器として用いた。ターゲット上の光強度は  $5.6 \times 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> である。図 1 に示されるように、フェムト秒光パルス誘起金属プラズマからの軟 X 線は、過渡的プラズマからの発光であり、連続スペクトルに重畳して

図中に示すように Al プラズマのイオン化状態に対応した広帯域スペクトルが観測された。なお、斜入射分光器の回折効率が 5 nm で急激に低下しており、短波長領域は観測できていない。図 2 に入射光強度を変化したときの 5 nm から 20 nm の軟 X 線の積分強度の測定結果を示す。入射光強度に対して、軟 X 線積分強度は 2 乗に比例しており、入射光強度依存性が強い。また、上述の測定領域でのスペクトルの形状は、図 2 の入射光強度の範囲ではほとんど変化なく、図 1 と同じであった。次に、同一の実験装置を用い、原子番号の異なる金属ター

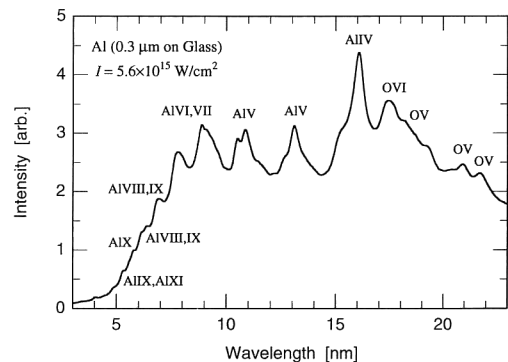


図 1 超短光パルス照射により発生した Al プラズマからの軟 X 線スペクトル。図中にイオン化準位を示す。

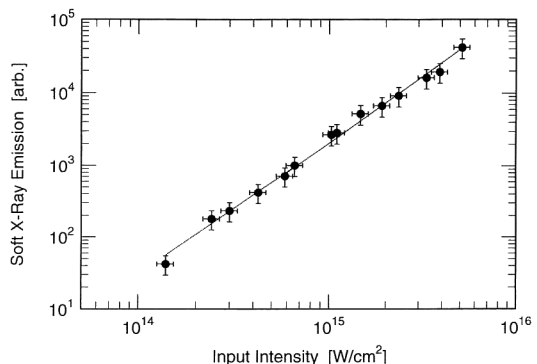


図 2 超短光パルス照射により発生する軟 X 線の入射光強度依存性。破線は傾き 2 の直線。

NTT 基礎研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1)

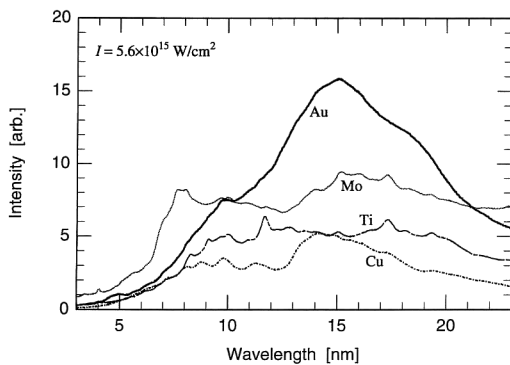


図3 原子番号の異なる金属ターゲットを用いたときの軟X線スペクトル。

ターゲットを用いて、軟X線発生実験を行った。図3にスペクトル測定結果を示す。ターゲットとして、シリコン基板上に蒸着して作製した厚さ1  $\mu\text{m}$  のTi (原子番号22), Cu (同29), Mo (同42), Au (同79) を用いた。入射光強度は、図1のAlの場合と同じである。縦軸は、任意スケールであるが、図面間相互の縦軸は校正されている。原子番号の大きい金属をターゲットに用いたほうが、本測定波長領域において発生効率は高くなっている。また、原子番号の大きい金属においては、軟X線領域におけるイオンからの発光遷移が多数稠密に存在するため、ほとんど連続発光スペクトルになっている。一方、各々の金属プラズマからの発光強度の入射光強度依存性は、本測定領域において、図2と同様の約2乗特性を示した。

## 2. パルス幅特性

超短光パルス誘起高密度プラズマからの軟X線は、プラズマ膨張に伴う急速な冷却過程のため、そのパルス幅がきわめて狭いことが指摘されている<sup>4)</sup>。ここでは、高密度金属プラズマからの軟X線のパルス幅を、CsIを光電面に用いたX線ストリークカメラにより測定した。発生した軟X線をターゲット面から45度の方向に設置してあるトロイダル鏡によりX線ストリークカメラの光電面に集光した。時間分解能は、約6 psである。図4にAlターゲットを用いた場合に発生する軟X線パルス幅の入射光強度依存性を示す。また、ストリークカメラ像を図中に示す。単一超短光パルス照射により発生した軟X線のパルス幅は光強度 $2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ まで、一定で時間分解能以下であり、 $p$ 秒以下のパルス幅も予想される<sup>4)</sup>。

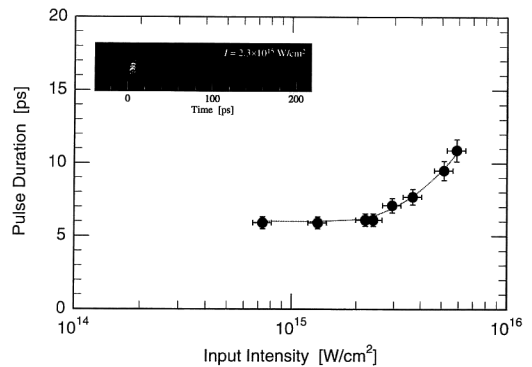


図4 Alプラズマからの軟X線パルス幅の単一光パルス照射時の入射光強度依存性。挿入図面は、ストリークカメラ像。

## 3. 応用の展望

超短光パルス誘起金属プラズマからの軟X線の特徴は、上述のように広帯域性と超短パルス性にある。この特徴を生かして、レーザー誘起プラズマの時間発展の高時間分解測定が可能であろう。また、可視光領域における広帯域超短光パルスを用いた時間分解分光技術は物質の外殻電子状態・緩和機構解明の基本的手法として確立しており、超短パルスX線もX線光学の進展と相俟って、近い将来に表面科学や物質の内殻電子状態の動的過程解明の中心的役割を担うことが期待される。

超短光パルス誘起金属プラズマからの広帯域軟X線発生について述べた。発生する軟X線は従来にない特徴を有しており、これを用いた応用が期待される。しかしながら、高密度金属プラズマの動的挙動については、現在のところ実験的、理論的に十分に解明されておらず、今後の研究が期待される。

## 文 献

- 1) B. Lemoff, G. Yin, C. Gordon III, C. Barty and S. Harris: "Demonstration of a 10 Hz femtosecond-pulse-driven XUV laser at 41.8 nm in Xe IX," *Phys. Rev. Lett.*, **72** (1995) 1574-1577.
- 2) J. Macklin, J. Kmetec and C. Gordon III: "High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 766-769.
- 3) H. Nakano, T. Nishikawa, H. Ahn and N. Uesugi: "Temporal evolution of soft X-ray pulse emitted from aluminum plasma produced by a pair of Ti:sapphire laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 2992-2994.
- 4) M. Murnane, H. Kapteyn, M. Rosen and R. Falcone: "Ultrafast X-ray pulses from laser-produced plasmas," *Science*, **251** (1991) 531-536.

(1996年9月30日受理)