

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007年度 ～ 2008年度
 課題番号：19740246
 研究課題名 (和文) 超短パルスレーザーを用いた硬X線発生の高効率化と機構の解明
 研究課題名 (英文) Studies on efficient hard x-ray generation
 with intense ultrashort laser pulses
 研究代表者
 岡野 泰彬 (Yasuaki Okano)
 東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
 研究者番号：00393819

研究成果の概要：

超短パルスレーザー誘起X線源の高エネルギー化および高輝度化を目指し、硬X線領域でのX線発生研究を行った。レーザーから特性X線へのエネルギー変換効率は10 keVから20 keV領域にわたって 10^4 に達することができるなど、高エネルギー化および高輝度化へ向けた有用な知見を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 2,500,000 | 0 | 2,500,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 240,000 | 3,540,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：放射線・X線・粒子線、パルスX線、レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

近年の高強度・超短パルスレーザーの普及とともに、集光レーザーによる強レーザー場と物質との相互作用の結果生成される高エネルギーの電子やイオン、更にはX線などの量子線放出に関する研究が精力的に進められている。これら量子線は、その放出特性から強レーザー場にさらされた物質の振る舞いを診断する目的だけでなく、その量子線の短パルス性および高エネルギー性に着目したユニークな光源としての観点からも研究が行われている。特にX線においてはX線回折や吸収分光などの光源として有効であり、主に基礎研究の分野においてピコ秒からナ

ノ秒時間スケールでの物質ダイナミクス研究へと応用されてきた。また、産業や医療応用としての画像診断用光源や、近年では放射線治療用の光源としても着目され研究が行われつつある。しかし、これまではX線強度や検出器の問題から実用的なX線エネルギーは高々10 keV程度であり、診断対象も比較的軽元素のものや低密度のものに限られてきた。

最近になって、超短パルスレーザー誘起X線の高エネルギー化への要望とともに、数10 keVから100 keV域のX線光源とその応用研究が海外のいくつかの研究グループにより始められている。一つは、カナダの国立科学

研究所 (INRS-EMT) のグループによるもので、10 TW クラスのフェムト秒レーザーを用い、Mo $K\alpha$ 線 (17.5 keV) を光源とした昆虫の位相コントラストイメージングに成功している。また、米国ローレンスリバモア研究所のグループでは、レーザー核融合研究における爆縮コアプラズマのような高密度物質の診断を目的とした X 線源の研究が行われている。用いられたレーザーは 100 TW から 1 PW クラスの大型かつ大出力レーザーであるものの、レーザー強度およびターゲット元素依存性など各種パラメーターに対し系統的な実験がなされている。このように、現在医療およびバイオの分野からさらにはエネルギーの分野での応用に向けて、よりエネルギーの高い硬 X 線領域での研究が世界的に開始されている。

実用的な線源開発において、高エネルギー化とともに重要な課題は高輝度化である。高輝度化のためには単に投入レーザーのエネルギーを増加するだけでなく、レーザーから X 線へのエネルギー変換効率の向上が欠かせない。これまで X 線への変換効率向上に関する研究は、プレプラズマによる増強をはじめ、ターゲット表面の微細構造化やターゲット全体の低密度化などレーザー吸収率改善を目指した様々な試みがなされてきた。これらの方法により、軟 X 線領域では発生量が数倍から数十倍程度に改善された報告例もある。しかし、硬 X 線は主に高速電子を介して発生するため、レーザーの吸収率だけでなくターゲット内部へ輸送される電子のエネルギー分布が重要である。特性 X 線発生においてはターゲット原子の K 殻電子を励起する必要があるが、この電子による散乱断面積は一般に K 殻イオン化エネルギーのおよそ 3 倍にピークを持つ。したがって、X 線発生には数 100 keV 以下の高速電子が重要であり、このエネルギー領域の電子分布を制御できれば飛躍的な X 線発生効率の向上が期待できる。

本研究では、発生 X 線の高エネルギー化とともに、X 線発ターゲット表面に構造を持たせることにより、実効的なレーザー吸収率を向上させ、かつ、高速電子の流れを制御して X 線の発生効率を向上させるという着想のもと、超短パルスレーザー誘起硬 X 線の高効率化に関する研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、超短パルスレーザー誘起の X 線源研究において高エネルギー化および高輝度化を目指し、表面構造ターゲットを用いたレーザーの吸収効率改善による硬 X 線領域における変換効率向上の実証研究と、X 線発光量の変化を放出電子スペクトルの観点から解明することを目的とした。

具体的な目的は以下の 3 点に集約される。

- (1) 硬 X 線および電子線計測器の開発・整備
- (2) 硬 X 線領域での基準データの取得
- (3) 表面構造ターゲットによる X 線増強実証

3. 研究の方法

研究目的に照らし合わせ、具体的な方法について以下に述べる。

- (1) 硬 X 線および電子線計測器の開発・整備
中核計測機器である硬 X 線分光器①および小型の電子スペクトロメーター②を開発および整備した。

① 二次元フォトンカウンティング用 X 線 CCD の整備

背面照射型 X 線 CCD カメラを用いたフォトンカウンティング型の X 線分光器を整備した。X 線光量の定量計測のため、密封型の標準放射線源 (Fe-55 および Cd-109) を用いて感度校正を行った (図 1)。硬 X 線に対する実効的な計測可能範囲は Ag $K\beta$ 線 (25 keV) 程度である。

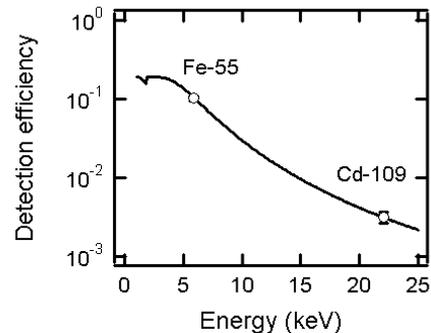


図 1. X 線 CCD カメラの感度校正曲線

② 電子スペクトロメーターの開発

磁場偏向型の小型の電子スペクトロメーターを開発した。本研究で開発した特徴は、数 100 keV 程度の低エネルギー領域も計測可能であり、硬 X 線発生に寄与する電子スペクトルに関する情報が得られる。また、電子検出には蛍光板を用い、その発光強度を冷却 CCD カメラにて計測した。そのため、レーザー照射毎に真空チャンバーをリークする必要なく、より簡便に実験を遂行することができる。

(2) 硬 X 線領域での基準データの取得

硬 X 線発生に関しては、主に $K\alpha$ 線を中心とした特性 X 線に着目した実験を行った。高原子番号 (Z) のターゲット材を選ぶことで発生 X 線エネルギーを選択した。具体的には、従来からの X 線源として代表的な Cu ($K\alpha$ 線 : 8 keV) をはじめ、Mo や Ag ($K\alpha$ 線 : 22 keV)、さらには Ta ($K\alpha$ 線 : 57.5 keV) を用い、およそ 10 keV から 60 keV にわたって硬

X線発生実験を行った。基準データの取得として、平板状のターゲットを選択した。

X線および電子線の評価には(1)にて整備した計測器を用いて硬X線および電子線スペクトルの同時計測を行った。これら計測データより放出電子のエネルギー分布と硬X線との相関関係を調べた。

また、Taターゲットに関してはフォトンカウンティングX線 CCD カメラの計測範囲外であり、高エネルギーの高X線計測に向けて別途整備した透過型のラウエ分光結晶を用いた硬X線分光器により計測を行った。

(3) 表面構造ターゲットによるX線増強実証

表面構造ターゲットには、当初、エレクトロスピンニング法により生成する酸化ナノワイヤー構造ターゲットを使用する予定であった。しかし、最終的には、軟X線領域で実績のある垂直配向カーボンナノチューブ(CNT)アレイコートを採用した(図2)。CNTの長さは10 μm程度であり、レーザー光の吸収により発生した高速電子は電気伝導率の高いCNTに沿って非等方的に基盤の高Z材料に衝突し、K殻特性X線の発生量を実効的に増加させる効果が期待できる。

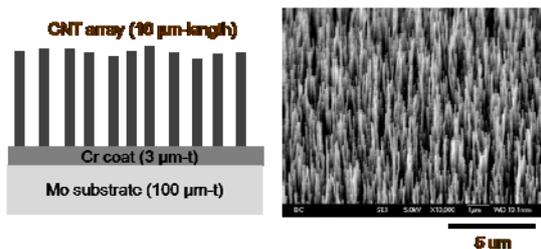


図2. CNTアレイコートターゲットの模式図および走査型電子顕微鏡写真

X線発生実験には以下の二種類のレーザーシステムを利用した。一つは高繰り返しのフェムト秒テラワットレーザーで、京都大学化学研究所阪部研究室所有のT6レーザーを利用した。出力レーザーパルスはパルス幅約150fs、波長790nm、エネルギー140 mJ/pulseで10 Hzで発振する。レーザー光を10 μm以下のスポットに絞り集光照射すれば平均レーザー強度は 10^{18} W/cm²となる。

また、大出力レーザーとして、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの大型ガラスレーザー装置の一つであるGMII(激光モジュールII号)を使用した。本装置は、フェムト秒のチタンサファイアレーザーをオシレーターとして使用しているチャープパルス増幅型のレーザーシステムで、圧縮レーザーパルスのスペックはパルス幅600 fs、レーザーエネルギー20 Jであり、単ショット動作ではあるものの、集光強度にして 10^{19}

W/cm²を超えるレーザー場をつくり出すことが可能である。この計測では、繰り返しレーザーではないため積算測定は出来ないが、高輝度な硬X線が放出されることが期待できる。

4. 研究成果

計測した硬X線スペクトルを図3、4に示す。図3はT6レーザーにて取得したスペクトルでCuおよび、Mo、AgのK α , β 線がはっきりと観測された。

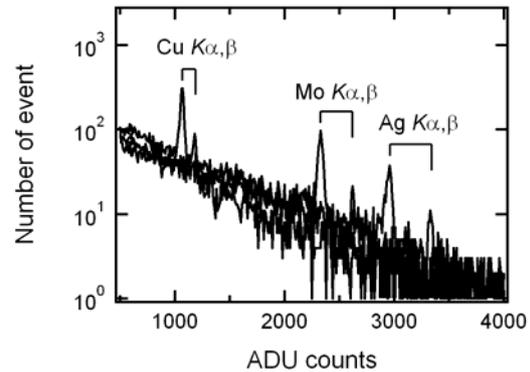


図3. フォトンカウンティングX線CCDで取得した各種ターゲットの特性X線スペクトル

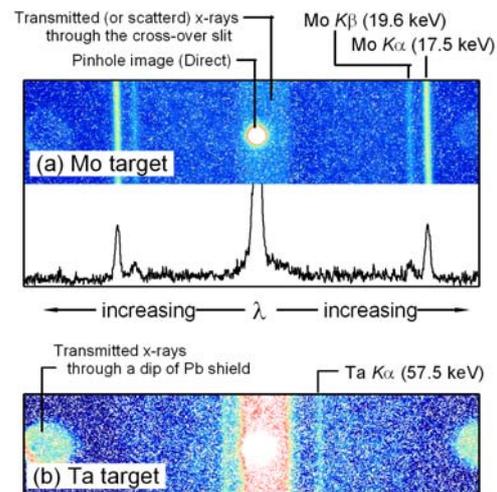


図4. ラウエ型硬X線分光器によるスペクトル。(a) Moターゲット。(b) Taターゲット

また図4はGMIIレーザーにて計測したMoおよびTaのX線スペクトルである。レーザー強度はおおよそ 5×10^{18} W/cm²で照射の時のスペクトルである。中央に見える円形のピンホール(アパーチャー)像を中心としてほぼ対称に二本の線スペクトルが観測された。これは、Mo K α (17.5 keV) 線とK β 線 (19.6 keV) に対応している。また、Taターゲット

においても 57.5 keV の $K\alpha$ 線は強度が弱いながらも観測されており、17~58 keV にわたり硬 X 線発生およびスペクトルの取得に成功した。また、同時にフォトンカウンティング X 線 CCD にて X 線の検出効率を評価した結果、見積もられたレーザーから X 線へのエネルギー変換効率は Mo ターゲットに対し全立体角 ($4\pi\text{sr}$) あたりでおおよそ 10^{-4} であった。

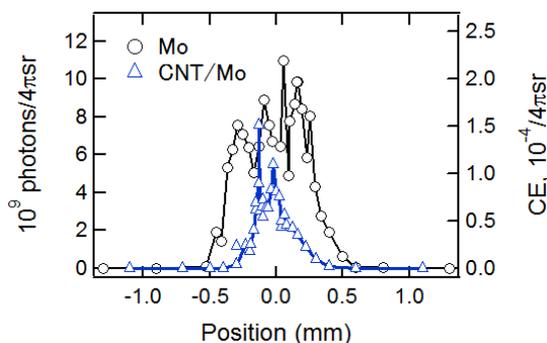


図 5. レーザー焦点深度方向に対する $K\alpha$ 線発生強度依存性

CNT アレイコートターゲットとの比較実験では、レーザーの焦点深度に対するターゲット位置の特性評価が必要と考えられる。そのため、T6 レーザーの繰り返し性とパルスあたりのエネルギー安定性（本実験では 2%程度）を利用して、ターゲットの位置を前後に動かすことでレーザー光の焦点深度方向に対する $K\alpha$ 線発生強度依存性を取得した（図 5）。同時に計測した放出電子のエネルギースペクトルを図 6 に示す。その結果、(a)コートなしターゲットにおいては、レーザー集光点をオフセットし高速電子の放出が抑制される条件下でも効率的に X 線が放出されること、(b)CNT アレイコートによる X 線増強効果は見られないものの、CNT アレイがアブレーション閾値を低下させること、(c)特性 X 線へのエネルギー変換効率は 10 keV から 20 keV 領域にわたって 10^{-4} に達することができるなど、高エネルギー化および高輝度化へ向けた有用な知見を得ることができた。

本研究は、主に大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の西村博明教授、日本原子力機構関西光科学研究所の河内哲哉研究副主幹、錦野将元研究員との共同研究を通じて行われた。また、T6 レーザーでの実験は、京都大学科学研究所阪部周二教授をはじめ阪部研究室の諸氏、GMII 実験ではレーザーオペレーションをはじめレーザーエネルギー学研究中心の多くの方々の協力のもとに行われた。ここ感謝の意を表す。

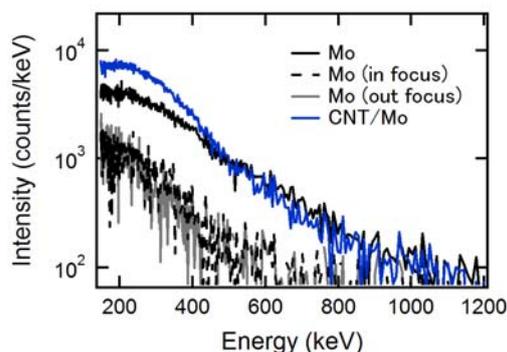


図 6. レーザー焦点深度方向に対する電子エネルギー分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. Okano, Y. Inubushi, H. Nishimura, S. Fujioka, T. Kai, T. Kawamura, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima, X-ray polarization measurement for fast electrons in intense-laser-produced plasma under oblique incidence, *Journal of Physics: Conference Series*, **112**, 022101 (1-4), (2008)、査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Y. Okano, M. Nishikino, S. Nakahara, S. Tokita, S. Masuno, M. Hashida, S. Sakabe, H. Nakano, T. Kawachi, H. Nishimura, and K. Mima, Monoenergetic hard x-ray emission from carbon-nanotube-array coated targets with femtosecond laser pulses, *International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS7)*, 2008 年 11 月 24-28 日, Kyoto Garden Palace, Kyoto, Japan
- ② 岡野泰彬、犬伏雄一、西村博明、甲斐健師、河村徹、藤岡慎介、D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, 中村龍史、城崎知至、長友英夫、三間罔興、X 線偏光分光計測による高強度レーザー生成プラズマ中の非等方高速電子輸送、第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 30 日、日本大学理工学部 船橋キャンパス
- ③ Y. Okano, Y. Inubushi, H. Nishimura (他 16 名)、X-ray polarization spectroscopy for

oblique laser incidence relevant to fast igniter research, 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, American Physical Society, 2007年11月13日、Rosen Centre Hotel, Orlando, Florida, USA

- ④ 岡野泰彬、犬伏雄一、西村博明 (他 16 名)、X線偏光分光計測による超高強度レーザー生成高速電子輸送のレーザー偏光依存性の観測、日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学 札幌キャンパス
- ⑤ Y. Okano、Y. Inubushi、H. Nishimura (他 16 名)、X-ray polarization measurement for fast electrons in intense-laser-produced plasma under oblique incidence、Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA07)、2007 年 9 月 10 日、Kobe International Conference Center, Kobe, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡野 泰彬 (OKANO YASUAKI)
東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
研究者番号：00393819

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし