レーザー生成プラズマX線を用いた遠隔透視

森 芳孝¹, 栗原 一², 石井 勝弘¹, 花山 良平¹, 川嶋 利幸³, 北川 米喜¹¹光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町1955番1)²(株) IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地)³浜松ホトニクス(株) 産業開発研究所 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町1820)

Stand-Off Detection of Hidden Objects by Laser Plasma Induced X-Rays

Yoshitaka MORI,¹ Hajime KUWABARA,² Katsuhiko ISHII,¹ Ryohei HANAYAMA,¹Toshiyuki KAWASHIMA,³ and Yoneyoshi KITAGAWA¹¹The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, 1955-1 Kurematsu-cho, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202²IHI Corporation, 1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa 235-8501³Hamamatsu Photonics K.K., 1820 Kurematsu-cho, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

(Received August 22, 2012)

We proposed the stand-off inspection of unknown or hidden objects by a laser-produced X-ray that has a great potential for security applications or disaster relief. To demonstrate its principle, ultra-intense laser-produced sub-ps X-ray pulses detected backscattered signals from objects hidden in a container with the coincident technique. Coincident measurement with primary X-rays enabled differentiation inside an aluminum container among the following object materials: acrylic, copper, and lead blocks. The spectrum of these backscattered signals can distinguish the atomic number of the materials. To realize a collimated X-ray source to scan these objects, we proposed X-ray generation by inverse Compton scattering of laser-plasma accelerated electrons. We also presented the present status of this X-ray generation.

Key Words: Laser plasma, TW-laser, X-rays, Back scatter, Inverse Compton scattering

1. はじめに

透過力の高いX線は対象物の透視像を見るのに適しており、X線を用いた透視撮像技術は、医療分野、科学分析分野、産業分野などで幅広く利用されている。しかし、これまで実用化されているX線透視装置の大半は透過型X線強度計測器であり、その適用範囲には制限があった。これらの装置では測定対象に近接する必要性があり、遠隔物及び大型構造物を対象とできる透視技術開発は進んでいないのが現状である。

一方、国内外において輸送・物流や大型集客施設における安全保障に対する認識が高まっており、不審物を非接触で遠隔から透視する技術への要望が高まっている。この遠隔透視技術は、セキュリティ分野のみならず橋梁及び橋脚など大型構造物の非破壊検査の分野でも応用の可能性を持つ技術である。我々は、レーザー加速電子線を用いたレーザー逆コンプトン散乱X線を利用して、遠隔から対象物を検知する遠隔透視の研究を進めており、非接触不審物検査や人の接近が困難な場所の非破壊検査等への適用を想定している¹⁻³⁾。本稿では、レーザー生成プラズマからの短パルスX線を用い、被検査体からの後方散乱X線を観測することによって、原子番号

の異なる材質を区別して検知した遠隔透視の原理実証の結果、及びレーザー逆コンプトン散乱過程によるペンシルビームX線源開発の状況を報告する。

2. レーザー生成X線の特長と遠隔透視技術との整合性

X線応用でまず思いつくのはレントゲン写真であろう。筆者も、2007年の秋頃、レーザープラズマからのX線発生を確認した際にレントゲン写真撮影を試みた。Fig. 1に示すのは、レーザープラズマX線源で撮像した稲穂のレントゲン像である。イメージングプレートの前に稲穂をセットし、レーザーをアルミ板表面に集光することで、制動放射線を発生した。10 Hzで1分連続照射したものである。レーザー生成X線を透過画像として用いる研究は精力的にすすめられており、点光源であること

Fig. 1 Radiography of an ear of rice inaho taken by laser plasma induced X-ray.

を利用した屈折率位相差イメージング^{4,5)}、及び小型装置であることを利用した狭部診断用X線イメージングシステム⁶⁾が提案されている。

一方、レーザー生成X線の特徴は、短パルス性と高輝度にあり、レーザーの繰り返しを1~1000 Hzとすると、平均光子数はX線管と同程度であるもののピーク光子数は放射光線源に匹敵する。Fig. 2は種々のX線源の特徴を比較したものであり、レーザー生成X線源について最近の報告をプロットした。X線で遠隔透視を実現するためには、この短パルス高輝度性を活用する。X線を用いて対象物を透視する手法として、透過X線を検出する方法と後方散乱X線を検出する方法がある。前者はレントゲン写真として一般的であるが、線源と検出器の間に対象物を設置するため、検出器を対象物に近づける必要があり遠隔からの適用は難しい。そこで、後者の後方散乱X線について考えてみる。近年の光計測技術の進展により、X線領域での単一光子計測が可能であり、大面積X線検出器を用いれば遠隔物からの微弱後方散乱X線を検出することは不可能ではない。しかし、一般の環境では自然放射線が存在し、後方散乱X線信号に対するノイズとなって遠隔透視の実現を困難としていた。短パルス高輝度X線を用い、X線検出器をX線パルス幅の間のみ同期計測すれば、後方散乱X線信号と自然放射線信号の比は大幅に改善される。

以上の考察をもとに、Fig. 3に示すようなレーザー生成X線による遠隔透視システムを考案した。装置はトレーラーに搭載してあり、対象物から約10 mの距離まで移動する。そこで、レーザープラズマ生成パルスX線をレーザー光線のように遠隔の物体へスキャン照射し、その内部構造をX線の散乱(いわゆる後方散乱)で検出し、2次元画像として再構築する。X線光量の定量評価によれば、対象物体を厚み30 cmの水とした場合、光量 10^6 photons/pulseのX線を照射したとき、約400 photons/pulseが後方散乱信号として直径2 mのX線検出器にかかる。

Fig. 2 Characteristics of X-ray sources: average photon number v.s. peak photon number. Open-circles are deduced data from experiments of laser plasma X-ray reported from JAEA,⁴⁾ Brown U.,⁵⁾ CRIEPI,⁶⁾ and CLF.⁷⁾ Close-circles represents inverse Compton source by laser plasma electron from AIST,⁸⁾ and LOA.⁹⁾

これは自然放射線からのバックグラウンドノイズを十分識別できる値である。遠隔透視装置はトレーラーに搭載できる程度まで小型化される必要がある。直径2 mの検出器を採用すると、装置の大きさはX線発生装置で決定され、これはX線発生部が小さい為レーザー本体の大きさとなる。出力ジュールクラスの超短パルスレーザーはレーザーコンポーネントの積層化などにより装置の小型化が十分に期待でき、実際、トラック可搬型のエネルギーsub-JクラスのTWレーザー装置が仏国Amplitude社より市販されている。X線発生部もふくめたモバイル化が実現すれば、遠隔透視を必要とする不審物検査、大型構造物非破壊検査、及び災害の現場へ赴くことが可能となる。

3. 後方散乱X線を用いた遠隔透視の原理実証実験

後方散乱X線を用いた遠隔透視の実現性検討のため、Fig. 4に示すような実験レイアウトを構築した。超短パ

Mobile inspection

Fig. 3 Stand-off mobile inspection system to reveal a dubious object. A laser-produced pencil beam x-ray scans the object then the backscatter signals from it are decomposed to provide an image.

Fig. 4 Experiments setup for backscatter inspection of hidden-object by using laser-produced X-rays. A laser (left) is focused on an aluminum target, generating picosecond pulse X-rays, which travel through a movable lead collimator (center) to scan the objects in an aluminum container (right). Backscattered X-rays reach the scintillation detector (center-bottom).

ルスX線源として、超短パルスレーザーを固体平板に照射する方式を用いた。レーザーは光パラメトリックチャープパルス増幅(Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification: OPCPA)を前段増幅器に有するチタンサファイアレーザーBEAT^{10,11)}であり、エネルギー62 mJ/pulse、パルス幅(FWHM)200 fs、集光強度 1.9×10^{17} W/cm²、繰り返し10 Hzである。ターゲットは厚み500 μ mのアルミ平板である。ターゲット面に対しレーザーはP偏光、レーザー入射角度30°で照射した。ターゲットを50 μ m/sで連続的に移動させながらレーザー照射を行い、レーザー照射面の状態を各ショットで常に一定としてX線発生を行った。X線は、レーザー軸上に設置した厚み5 mmのBK7窓から取り出した。これを一次X線とする。レーザーターゲットからほぼ全立体角に放出される一次X線を、鉛ブロック2個を間隔5 mm空けて並べた鉛コリメータで、幅5 mmの短冊X線源とした。鉛コリメータを移動することで一次X線のスキャンを実現した。

散乱体には、アクリル、鉛及び銅の角ブロックを用いた。後方散乱X線測定では、X線発生点から散乱体までの距離を1325 mmに固定し、散乱体と後方散乱X線検出器間距離を150 mmで測定した。検出器はプラスチックシンチレータ(Saint-Gobain Crystals社製、材質BC-404)、光電子増倍管(浜松ホトニクス、型番H8443)を組み合わせたもので、受光サイズ ϕ 90 mmである。信号のカウントはレーザー照射後の前後-15~185 nsの200 nsの間にX線検出信号が入った条件でのみカウント及び波形取り込みを行った。

まず、後方散乱の特性評価のため、散乱体の材質(アクリルと鉛)及び厚みに対する散乱X線の強度依存を実測した結果をFig. 5に示す。鉛コリメータは固定している。図中に示したバックグラウンドは、散乱体を取り除いた状態で一次X線を照射した場合の計測値である。この結果は、極めて微弱な後方散乱X線でも、極短パルスX線を用いたパルス同時計測により、散乱体物質、厚さに依存した後方散乱X線を有意な差をもって計測可能であることを示している。図中の曲線は理論モデル計算値で、散乱体中でのX線減衰とX線-電子衝突による単発

Fig. 5 Backscatter X-ray counts as a function of object thicknesses for Acryl (closed-circles) and Pb (open-squares).

のコンプトン散乱を考慮しており、一次X線強度をパラメータとして実験結果とフィッティングした。材質の違いによる定量性評価には課題が残るが、同一材質における厚さ依存性を良く説明できている。

Fig. 6は、1次X線スペクトルと散乱光スペクトルを規格化したものである。一次X線のエネルギースペクトル測定には、Amptek, Inc.のCdTe半導体検出器:XR100に開口径1 mmのコリメータを装着し、1 photon/pulse以下の計測条件で多パルスの積算計測をおこなった。X線取り出し窓により、エネルギー20 keV以下のX線はカットされている。散乱スペクトルは、散乱体の材質に依存して、入射スペクトルからの変形をうけ、例えば、鉛が散乱体のときは1次X線の低エネルギー成分の吸収が生じている。この結果は、後方散乱X線のスペクトル測定により、遠隔透視と同時に物質判定ができる可能性を示している。

以上の後方散乱X線の特性を踏まえ、鉛コリメータでX線をスキャンし遠隔透視を試みた。対象物として、厚み1 mmのアルミニウムケースの中に封じた銅(厚み5 mm)、鉛(厚み1 mm)、アクリル(厚み30 mm)を採用した。Fig. 7 (a)に対象物の写真を、Fig. 7 (b)及び(c)に後方散乱強度分布計測結果を示す。各点のカウント数は、1000ショット(100秒)連続計測の積算である。Fig. 5と比べると、アルミケースが吸収体となって散乱信号のカウント数は低減しているが、アルミニウムコンテナ内に隠れていて肉眼では確認できない物体の存在を、後方散乱計測により推測できることを実証している。後方散乱では、散乱体を構成する元素の原子番号が小さくて厚い物体の方が信号をよく散乱するため、金属等の検知を得意とする透過型計測と異なる情報がえられる。今回の計

Fig. 6 Backscattered spectrum shifts from the primary X-ray. Solid line: Primary X-ray. Circle: Acrylic of 30 mm thickness. Square: Lead of 20 mm thickness.

測でも、銅及び鉛よりもアクリルからの散乱信号強度が高いことがこの特徴をよく表している。

4. レーザー加速電子のレーザー逆コンプトン散乱過程によるペンシルビームX線源の開発

レーザーを金属固体へ照射し制動放射により発生させるX線は、発散角がレーザー集光角度以上に広く、遠方での強度は距離の二乗で減衰してしまう。一次X線の指向性を向上するため、超高強度レーザー加速電子によるレーザー光自身の逆コンプトン散乱X線の開発をおこなっている。散乱される入射レーザー光の光子エネルギー ε_L と正面衝突で散乱させる電子ビームのエネルギー $\gamma m_e c^2$ に対して、逆コンプトン散乱光のエネルギーは $E_\gamma \sim 4\gamma^2 \varepsilon_L$ 、発散角は $\theta \approx 1/\gamma$ となるので¹²⁾、電子ビームのエネルギー γ が大きければ大きいほど、散乱角は小さくペンシルビームのように絞り込むことが出来る。これが応用上、逆コンプトン散乱光の最大の利点といえる。

レーザー加速電子による逆コンプトン散乱の実証例として、我々の結果を紹介する¹³⁾。出力4 TWのBEATレーザー(エネルギー500 mJ, パルス半値全幅150 fs, 波長815 nm)を、超音速スリットノズルから吹き出したガス密度 $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のヘリウムガスに照射した。Fig. 8中のビームスプリッターで460 mJの反射ビーム(1次ビーム)と30 mJの透過ビーム(2次ビーム)に分け、反射ビームで航跡場を励起し、電子ビームを加速する。反射ビームは焦点距離108 mm (f/2.2)、口径51 mmの軸外し放物面鏡で、ガスジェット的一方の端にノズルの下方2 mmの位置で集光する。ジェットノズルスリットは長さ4 mm、幅1.2 mmの長方形の開口を持ち、長手方向をレーザー軸と平行とする。集光強度は $1.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ である。透過ビームは焦点距離150 mm (f/3.8)、口径50 mmの凸レン

Fig. 7 (a) Sample aluminum container in which the objects are hidden. The container size is 150 mm $\times$ 100 mm $\times$ 50 mm. Inside the container, 30-mm-thick acrylic resin (left) and a 5-mm-thick copper or 1-mm-thick lead block (right) are present. (b, c) Backscattered X-ray profiles showing the inside of the container. The backscattered signals are different for (b) acrylic resin CH (left) and copper (Cu, right) and (c) acrylic (left) and lead (Pb, right).

ズで他端に集光する。集光強度は $9.2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ である。規格化ベクトルポテンシャル $a_0 = eE/m_e \omega_L c$ は、それぞれ0.84と0.064となる。但し E はレーザー電場強度、 ω_L はレーザーの角周波数である。2次ビームのスポットサイズは32 μm であるが、全エネルギー36 mJの13%がこの中に含まれる。上記ビームのパルス圧縮器内での漏れ光を2倍高調波(407 nm)に波長変換し、1次ビームと直交する方向からヘリウムガスに照射し、シェアリング干渉計でプラズマ密度分布を計測した。

航跡場によって加速された電子ビームのエネルギースペクトルを計測するために電子分光器(Electron Spectrometer: ESM)を反射ビームの下流に設置した。ダイポール磁場でエネルギー分解した電子スペクトルをイメージングプレート(IP)に記録するもので、検出立体角は、 $3.1 \times 10^{-4} \text{ sr}$ で、最大29 MeVまで検出可能である。ガスジェットを発生するパルスバルブへのヘリウムガス充填圧力が80 atmの時のIPの生データと解析したスペクトルをFig. 8 (inbox)に示す。100ショット重ねどりのものである。解析スペクトルより14 MeVと23 MeVに単色の電子のピークが見える。23.3 MeVでの電荷量は100ショット重ね取りで合計74 fC、発散角は2 mradと算出される。充填圧力が65 atmではこのようなピークは見られず、レーザー強度が足りないためと思われる。

逆コンプトン散乱X線を検出するため、フォトンカウンティングモードで動作するX線検出器(Si-PIN photodiode, XR-100 CR, FWHM: 149 eV, Be窓厚0.5 mm, Si厚さ0.5 mm)をレーザー光軸上、2次ビームの上流に設置した。Fig. 8にあるようにターゲットから散乱されるX線は、先ず集光レンズの中心に開かれた直径8 mmの穴を通り、長さ5 cm、内径2 mmの鉛コリメーターを通して検出器に到達する。検出器のエネルギー分解能は1チャンネルあたり35 eVである。逆コンプトン散乱光量は平均ショットあたり0.1光子と予想され、1000ショットの重ねどりで結果をえた。散乱光のほとんどは電子ビームが周辺機器に衝突して発生する直接の制動放射X

Fig. 8 Setup for the inverse Compton scattering experiment and electron spectra.

線であり、そのうち逆コンプトン散乱光は1%程度である。そのため、2次ビームの有り無しのデータをまず取得し(Fig. 9 (inbox)), その差を逆コンプトン散乱光とし Fig. 9にプロットした。生データは、11チャンネル毎(0.385 keV)に平均して赤点でプロットした。その際の標準偏差をエラーバーとした。ショット毎のバラつきは、ターゲットから1.2 mの位置のプラスチックシンチレータで得られるガンマ線強度をモニターして補正した。図中の青線は、Fig. 8 (inbox)から求めた電子ビームスペクトルをもとに下記の式(1)

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = \frac{\alpha_f}{8\epsilon_L} a_0^2 m_e \gamma c^2 N_0 \frac{dN_e}{dE_e} d\Omega \quad (1)$$

を使って求めたものである。この式で α_f は微細構造定数、 N_0 は2次ビームのレーザーの振動子数、 N_e は衝突電子数を意味する。加速電子のエネルギースペクトルは、 $\gamma m_e c^2 dN_e / dE_e$ とした。集光角 $d\Omega$ は50 μ srだった。図の青線の5, 13 keVピークは、電子ビームの準単色ピーク14, 23 MeVに対応する逆コンプトン散乱光の計算値である。赤線の検出されたX線ピークの6と11 keVがこれらに対応する実際の逆コンプトン光と考えられる。27と34 keVのピークも逆コンプトン光のようであるが、これに対応する電子のエネルギーは34と38 MeVでありESMの計測限界を超えていたため、これらのエネルギーにピークが存在したかは不明である。2 keV以下のX線は、検出器の前面の窓で遮断されるので、3 keVに見えるピークは逆コンプトン散乱に起因するものではない。Fig. 9のY軸左側に実験で得られたフォトン数(赤線)、Y軸右側に計算で得られるフォトン数(青線)をプロットしている。実験値と計算値を比較すると、計算予測値が実験結果の5倍ほど高い値を示しているが、これは実験において2次ビームのプラズマ中での減衰及び衝突タイミングを含めたアライメント精度が影響し、電子ビームと衝突する2次ビームの強度が低下していたためと推定される。定性的なスペクトル分布がほぼ一致している事か

Fig. 9 Scattered photon spectrum: Red points indicate experiment data and the blue line indicates data calculated from the electron beam spectrum. (inbox) Row data.

ら、実験的に得られた散乱光は逆コンプトン散乱光である可能性が高いと結論される。

5. 実証機にむけた検討

レーザー生成X線による後方散乱遠隔透視技術を、Fig. 3に示したような実証機にまで成熟させるために、主な技術課題及び仕様を整理し、Table 1に示した。第一課題は、現在進めている超高強度レーザー加速電子によるレーザー光自身の逆コンプトン散乱X線のペンシルビーム化である。ペンシルビームX線源が開発されれば、検出原理として採用している後方散乱の物理は単純であるため、後は技術成熟度が決め手となり、課題として装置の可搬性、一次X線源のスキャン精度及び再現性が挙げられる。散乱X線検出器に時間分解機能が追加されれば、断層の計測が可能となるため、非破壊検査等への適用が期待される。具体的な数値目標として、X線エネルギー160 keV以上、拡がり角6 mrad以下を実現し1 m遠方の模擬物体の遠隔断層情報取得を掲げている。

6. まとめ

レーザー生成X線で、後方散乱による遠隔透視が原理的に可能であることを示した。自然放射線レベル以下の微弱な散乱光を入射X線との同期計測で、その材質、形状の推測ができることを示した。レーザー生成X線の指向性向上のため、超高強度レーザー加速電子によるレーザー光自身の逆コンプトン散乱X線発生を試み、エネルギー23 MeV準単色電子による10 keVのX線発生を確認した。今後は、X線エネルギー160 keV以上、拡がり角6 mrad以下を実現し1 m遠方の模擬物体の遠隔断層情報取得を目指す。

Table 1 Technical issues and their specifications to realize a stand-off detection system by laser plasma induced X-ray.

Technical issue	Specifications
1. High-intense pencil beam X-ray	Energy > 160 keV Divergence < 6 mrad Repetition > 0.5 Hz
2 Stand-off detection of a dummy object	Stand-off distance > 1 m Time resolution < 200 ps Space resolution < 3 cm Shield thickness > 1 cm
3. Scanning of the pencil beam X-ray	Horizontal scan range > $\pm 20^\circ$ Vertical scan range > $0 - 20^\circ$ Resolution < 0.2°
4. Acquisition of 2-dimensional perspective image	Stand-off distance: 1 m Shield: earth and sand 1 cm Dummy: plastics 20 cm

謝 辞

本レーザー装置は、平成13～17年度放射線医学総合研究所文部科学省委託「先進小型加速器の要素技術の普及技術」及び光産業創成大学院大学産業創成研究費によって整備され、本研究の一部は、光産業創成大学院大学学内プロジェクト、IHI－光産業創成大学院大学共同研究、平成20～22年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金、日本学術振興会科学研究費補助金基盤A(21244088)及び大阪大学レーザーエネルギー学研究センター共同研究による。

参考文献

- 1) 榎原 一, 森 芳孝: 放射線と産業 **116** (2007) 44.
- 2) H. Kuwabara, Y. Mori, and Y. Kitagawa: J. Plasma Fusion Res. **3** (2008) 003.
- 3) 榎原 一: 博士学位論文, 光産業創成大学院大学, 浜松 2008.
- 4) L. M. Chen, M. Kando, J. Ma, H. Kotaki, Y. Fukuda, Y. Hayashi, I. Daito, T. Homma, K. Ogura, M. Mori, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 211501.
- 5) C. M. Laperle, P. Wintermeyer, J. R. Wands, D. Shi, M. A. Anastasio, X. Li, B. Ahr, G. J. Diebold, and C. Rose-Petrucka: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 173901.
- 6) Y. Oishi, T. Nayuki, C. Nakajima, T. Fujii, A. Zhidkov, and K. Nemoto: Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 046602.
- 7) S. Cipiccia, M. R. Islam, B. Ersfeld, R. P. Shanks, E. Brunetti, G. Vieux, X. Yang, R. C. Issac, S. M. Wiggins, G. H. Welsh, *et al.*: Nature Phys. **7** (2011) 867.
- 8) K. Tanaka, S. Ishii, R. Kuroda, H. Toyokawa, E. Miura: *Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan* (Tsukuba, Japan, 2011) MOPS120.
- 9) K. Ta Phuoc, S. Corde, C. Thauray, V. Malka, A. Tafzi, J. P. Goddet, R. C. Shah, S. Sebban, and A. Rousse: Nature Photon. **6** (2012) 308.
- 10) Y. Mori, S. Fukumochi, Y. Hama, K. Kondo, Y. Sentoku, and Y. Kitagawa: Int. J. Mod. Phys. B **21** (2007) 572.
- 11) Y. Mori and Y. Kitagawa: Phys. Plasmas **19** (2012) 053106.
- 12) H. Schwoerer, B. Liesfeld, H.-P. Schlenvoigt, K.-U. Amthor, and R. Sauerbrey: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 014802.
- 13) Y. Mori, H. Kuwabara, K. Ishii, R. Hanayama, T. Kawashima, and Y. Kitagawa: Appl. Phys. Express **5** (2012) 056401.