

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340186

研究課題名(和文) レーザープラズマ加速電子線を用いたフェムト秒X線パルス生成と時間分解X線回折応用

研究課題名(英文) Production of a femtosecond X-ray pulse using an electron beam driven by laser-plasma acceleration and its applications to time-resolved X-ray diffraction

研究代表者

三浦 永祐 (Miura, Eisuke)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：10358070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープラズマ加速で得られるエネルギーの揃った準単色電子線とフェムト秒レーザーパルスを相互作用させ、レーザーコンプトン散乱X線発生に成功した。ピークエネルギー60 MeV、電荷量70 pCの準単色電子線を用い、発散角が5 mrad程度の指向性の高いX線ビームが得られた。発生光子数は1パルスあたり $2E+7$ 程度と見積もられ、この値は高周波加速器を用いたレーザーコンプトン散乱X線源に匹敵する。測定された準単色電子線の特性に基づくシミュレーションにより、X線光子エネルギーは60 keV にピークを持つことがわかった。また、X線のパルス幅が100 fs程度であることを示唆する結果も得られた。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated X-ray pulse generation via laser Compton scattering (LCS), which is the scattering of a femtosecond laser pulse off a quasi-monoenergetic electron (QME) beam with a narrow energy spread driven by laser-plasma acceleration. A well-collimated X-ray beam with a divergence angle of approximately 5 mrad is produced using a QME beam containing 70 pC electrons with an energy of 60 MeV in the monoenergetic peak. The X-ray photon number is estimated to be $2E+7$ per pulse, which is comparable to that achieved in LCS X-ray sources using rf accelerators. The peak energy of the X-rays is estimated to be 60 keV by a numerical simulation using the measured characteristics of the QME beam. It is also suggested that the X-ray pulse duration is on the order of 100 fs.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：高性能レーザー プラズマ 量子ビーム レーザープラズマ加速 レーザーコンプトン散乱 フェムト秒X線パルス

1. 研究開始当初の背景

シンクロトン放射光や超短パルス高強度レーザー生成プラズマからのX線パルスを用い、物質の構造変化や状態変化の動的過程が観測されてきた。これまで用いられてきたX線のパルス幅はピコ秒程度であり、時間分解能には制限があった。フェムト秒X線パルスを用いれば、時間分解能を高くし、新たな現象解明につながることを期待され、X線のさらなる短パルス化が望まれている。

高周波加速器からの電子線パルスを利用したフェムト秒X線パルス発生が報告されてきた。また、X線自由電子レーザーが本格稼働した際には、高強度のフェムト秒X線パルスが得られる。しかし、フェムト秒X線パルスを得るには、特定の大型加速器施設を使わざるを得ないのが現状であり、その小型化、汎用化が必要とされている。

超短パルス高強度レーザーとプラズマの相互作用を利用した電子加速であるレーザープラズマ加速では、波長が10 μm程度のプラズマ波の電場を用いて電子加速する。この電場の一部に電子を捕捉し加速するので、電子群の長さは数 μm程度になる。つまり、パルス幅がフェムト秒の電子線パルス発生が可能である。また、プラズマ波の作り出す電場は現在の高周波加速器の加速電場の1000倍にも達し、この高い加速電場を利用して、小型電子線加速器の実現が期待されている。これらのレーザープラズマ加速の特徴を生かし、高周波加速器を用いない全光学型の小型フェムト秒X線源の実現が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、レーザープラズマ加速で得られるフェムト秒電子線パルスとフェムト秒レーザーパルスを相互作用させ、レーザーコンプトン散乱(laser Compton scattering, 以下ではLCS)を用いて、フェムト秒X線源を開発することを目的とした。

光子エネルギーが数10 keVの硬X線パルスを発生し、X線収量の増強等、X線源の高度化を図る。X線パルス幅測定法を開発し、フェムト秒X線パルス発生を実証する。時間分解X線回折等、フェムト秒X線パルスの超高速現象観測への応用へと展開する。以上の項目を目標とし、研究を実施した。

3. 研究の方法

実験配置図を図1に示す。電子を加速するレーザーパルス(以下では、メインパルスと呼ぶ)をガスジェットに照射し、プラズマを生成し、高エネルギー電子線を発生する。この電子線とレーザーパルス(以下では、コライディングパルスと呼ぶ)を同期衝突させ、LCSによりX線を発生する。LCSにより発生するX線のパルス幅は、電子線パルスとレーザーパルスの相互作用時間によって決まる。レーザープラズマ加速で得られるフェム

ト秒電子線パルスとフェムト秒レーザーパルスを相互作用させることにより、フェムト秒X線パルス発生が可能となる。

波長800 nm、エネルギー700 mJ、パルス幅40 fsのメインパルスを焦点距離720 mm($f/14$)の軸外し放物面鏡を用いて集光し、ヘリウムガスジェットに照射する。その集光強度は 4.7×10^{18} W/cm²(規格化強度 $a_0=1.4$ に相当)であった。波長800 nm、エネルギー140 mJ、パルス幅100 fsのコライディングパルスを焦点距離300 mm($f/6$)の軸外し放物面鏡を用いて集光し、電子線と同期衝突させた。集光位置はプラズマから電子線が取り出される位置、つまりメインパルスのガスジェットからの出口付近に設定した。メインパルス伝搬方向に対するコライディングパルスの入射角度は20°であった。コライディングパルスの集光強度は 8.8×10^{17} W/cm²(規格化強度 $a_1=0.6$ に相当)であった。プラズマを発生するガスジェットの長さは2 mm程度、生成されるプラズマの電子密度は 1.5×10^{19} cm⁻³であった。

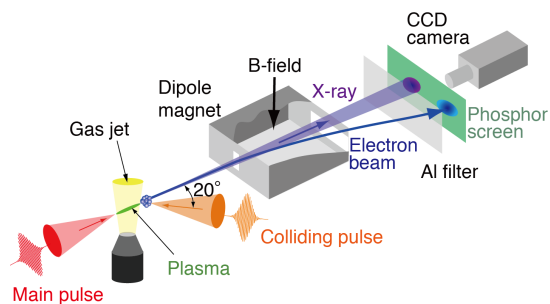


図1 実験配置図

LCS-X線は電子線の放射方向つまりメインパルスの伝搬方向と同軸方向に散乱される。電子線を磁場(強度0.27 T)で曲げX線から空間的に分離すると共に、エネルギー分解する。X線と電子線を厚さ115 μmのアルミニウムフィルターを通して、蛍光板(三菱化学: DRZ-HIGH)に入射し、CCDカメラを用いてX線像とエネルギー分解された電子像を同時にシングルショットで観測した。エネルギー30 MeV以上の電子像を観測でき、計測系の電子に対する感度は較正されているので、電子線の電荷量を見積もることができる。また、計測系は光子エネルギー15~150 keVのX線にも感度を持つ。

4. 研究成果

(1) X線と電子線の同時計測によるレーザーコンプトン散乱X線発生の実証

LCS-X線が発生するには、高い電荷量を持つ電子線が必要である。図1に示した実験配置で、エネルギー分解された電子像とX線像を同時観測し、電子線の特徴を把握しつつ、LCS-X線の発生を調べた。

図2(a)はLCS-X線が発生した際に観測された蛍光像である。この像は1ショットで観

測されている。図中のクロスは、真空中でのメインパルスの伝搬軸位置である。左側に観測されているのが、準単色電子線のエネルギー分解された電子像、メインパルスの伝搬軸位置付近に観測されているスポット状の像が LCS-X 線像である。高い電荷量を持つ準単色電子線が発生した場合でも、コライディングパルスの照射なしでは、メインパルスの伝搬軸位置近傍には、スポット状の像は観測されなかった。このことから、このスポット状の像は LCS-X 線像と考えられる。

図 2 (b) は、X 線像が観測された位置での蛍光像の横方向の強度分布である。電子像の強度は飽和しているが、信号を内挿して、準単色電子線のピークエネルギーは 60 MeV 程度、単色ピーク内の電荷量は 70 pC 程度と見積もられた。

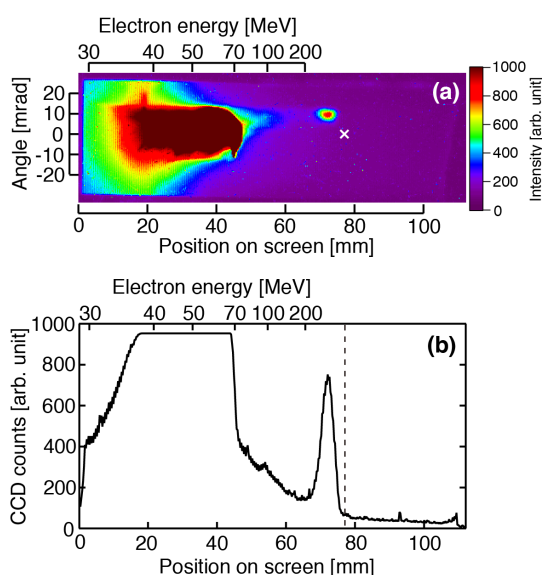


図 2 (a) LCS-X 線が発生した際に観測された蛍光像。左の像がエネルギー分解された電子像、右の像が X 線像。(b) X 線像が観測された位置での蛍光像の横方向の強度分布。X 線像の強度から、X 線光子数は 2×10^7 と見積もられた。

X 線像の大きさから X 線ビームの発散角が見積もられる。発散角は垂直方向、水平方向で各々、4.2 mrad、6.2 mrad であった。この発散角は X 線像強度分布の $1/e^2$ 半径から見積もった。LCS では指向性のある X 線ビームが得られ、その発散角はおおよそ $1/\gamma$ で与えられる。 γ は電子エネルギーのローレンツ因子である。電子線のエネルギーは 60 MeV 程度、つまり $\gamma \sim 120$ であるので、発生する X 線の発散角は 8.3 mrad 程度と予測される。観測された X 線ビームの発散角は 5 mrad 程度と予測値に近く、観測された像が LCS で発生した X 線像であることを裏付けている。図 2 (b) に見られる様に、電子線が 30~70 MeV のエネルギー広がりを持つ場合、5 mrad 内に散乱される X 線のエネルギー範

囲は、おおよそ 30~120 keV と見積もられる。

X 線収量は以下のようにして評価した。蛍光板と CCD カメラを用いた計測系の電子に対する感度は較正されている。実験に用いた DRZ 蛍光板と同タイプの蛍光板では、蛍光層に蓄積されたエネルギーから可視域の蛍光への変換効率は、電子、X 線で同程度であることが報告されている。DRZ 蛍光板での蛍光層における電子、X 線の蓄積エネルギー比がわかれば、計測系の電子線の感度から X 線に対する感度が得られる。電子、X 線等と物質の相互作用を解析するシミュレーションコード EGS5 を用い、蛍光層の蓄積エネルギーを計算した。実験と同様に前面にアルミニウムフィルターがある条件でシミュレーションを行った。図 3 は光子 (実線) 電子 (破線) 1 個あたりの蛍光層への蓄積エネルギーの電子エネルギー、光子エネルギー依存性を示す。図 3 は計測系の感度のエネルギー依存性を意味する。電子線エネルギーから発生が予測される 30~120 keV の光子エネルギーの X 線に対する感度は、60 MeV 近傍の電子の $1/8$ 以下であることがわかった。この様にして評価した X 線に対する感度を用いて、X 線収量は少なくとも 2×10^7 photons/pulse と見積もられた。この 1 パルスあたりの光子数は、これまで報告されている、レーザープラズマ加速準単色電子線を用いた LCS-X 線源の 10,000 倍に相当し、高周波加速器を用いた LCS-X 線源に匹敵する。

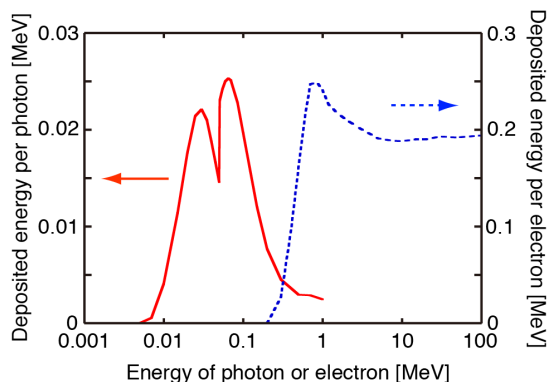


図 3 光子 (実線) 電子 (破線) 1 個あたりの蛍光層への蓄積エネルギーの電子エネルギー、光子エネルギー依存性。計測系の感度のエネルギー依存性を示す。

(2) シミュレーションによる発生 X 線の特性評価

X 線スペクトルを、測定された準単色電子線の特性、実験条件に基づき、電子線、光子、高エネルギーレーザー場の相互作用を解析するシミュレーションコード CAIN を用いて計算した。図 4 は、5 mrad 内に散乱される X 線のエネルギースペクトルである。準単色電子線のピークエネルギー 60 MeV、相対的なエネルギー幅 35% (半値全幅)、電荷量 70 pC、

規格化エミッタンス 0.8 mm mrad、電子線パルス幅 10 fs (半値全幅) を仮定した。ピークエネルギー、エネルギー幅、電荷量は、同じ照射条件で得られた準単色電子線 10 ショットの平均値を用いた。規格化エミッタンスと電子線パルス幅は、2次元粒子シミュレーションの結果を用いた。

X線スペクトルは 60 keV にピークがある準単色構造を持ち、光子数は 1.8×10^7 と見積もられた。光子数は実験結果と良く一致し、実験結果を説明している。X線スペクトルはピークを持つが、その相対的なエネルギー幅は 80% (半値全幅) と広い。これは準単色電子線のエネルギー広がり が 35% と広いためである。LCS-X線の特徴の一つである準単色X線を得るには、電子線のエネルギー幅をさらに狭くすることが必要である。

理論計算では、電子線のエネルギーが 60 MeV の時、本実験条件では X線のピークエネルギーは 86 keV になる。しかし、シミュレーション結果では、X線のピークエネルギーは 60 keV と理論予測よりも低い。相対論的強度に近い照射強度 (8.8×10^{17} W/cm²、 $a_1=0.6$ に相当) を持つコライディングパルスとの相互作用により、電子の有効質量の増大が起こり、散乱光子のエネルギーが低エネルギー側にシフトしたと考えられる。コライディングパルスの強度が相対論的強度に近いと、高次高調波光も発生する。図4のX線スペクトルの高エネルギー側がテールを引いている。これは、非線形散乱によって発生した高次高調波光成分が含まれているためである。シミュレーション結果は非線形散乱の影響を示している。

非線形散乱は物理現象としては興味深いですが、光源性能を悪化させる要因にもなる。非線形散乱の影響を実験的に評価することは今後重要になる。

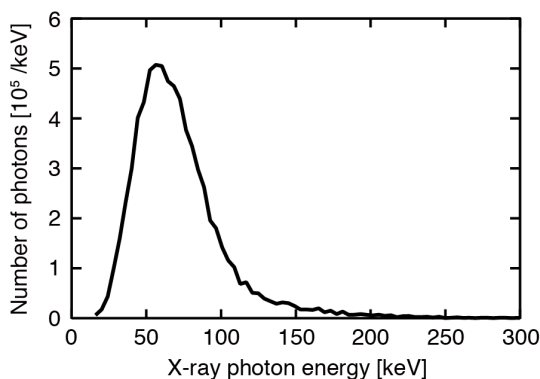


図4 シミュレーションコードCAINを用いて計算された 5 mrad 内に散乱される X線のスペクトル。

(3) フェムト秒 X線パルス発生の実証

電子線パルスとレーザーパルスの相互相関を調べることで、X線のパルス幅を測定することができる。レーザープラズマ加速

の場合、電子を加速するメインパルスと電子線パルスは時間的に同期しているため、X線強度とメインパルスとコライディングパルス間の遅延時間依存性を調べることで相互相関が得られる。しかし、ショット毎の電子線特性のばらつきが大きかったため、X線強度ではなく X線発生頻度の 2パルス間の遅延時間依存性を調べ、擬似的な相互相関から X線パルス幅の測定を試みた。

図5は X線発生頻度のメインパルス、コライディングパルス間の遅延時間依存性を示す。X線発生が検出されるには、高い電荷量を持つ電子線が必要である。1 Hz の繰り返しでデータを取得し、閾値を超える電荷量を持つ準単色電子線が発生した場合のみ、X線が発生したかを判断し、X線発生頻度を評価した。図5に示した各データ点は、同時計測された準単色電子線の電荷量が 10 pC 以上得られた 10 ショット以上から得られている。X線が発生する 2パルス間の遅延時間は、コライディングパルスのパルス幅 100 fs とほぼ等しい。また、2パルス間の遅延時間が 130 fs 以上では、200 ショット以上で X線発生は観測されなかった。このことは、X線のパルス幅が 100 fs 程度あるいはそれよりも短いこと、つまりフェムト秒 X線パルス発生を示唆している。

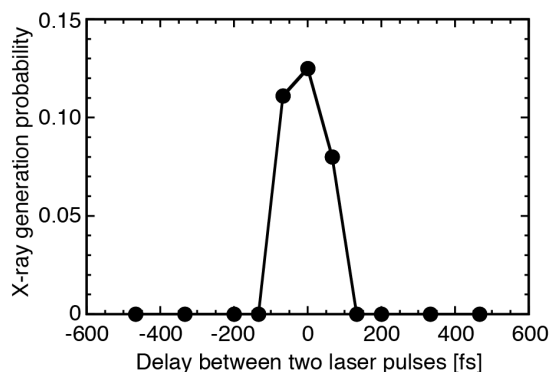


図5 X線発生頻度のメインパルス、コライディングパルス間の遅延時間依存性。フェムト秒 X線パルス発生を示唆。

図5に示した様に、X線発生頻度は高くない。メインおよびコライディングパルスの集光位置のばらつきは、共に 3 μ m 程度であった。低い X線発生頻度は 2パルスの集光位置のばらつきと光路内における空気擾乱がもたらす 2パルス間のタイミングジッターによるものと考えられる。より高精度の同期衝突手法を確立し、安定な X線発生を実現することも今後の課題の一つである。

(4) X線分光器の開発

LCS-X線のスペクトルを計測するには、X線分光器が必要になる。透過型の湾曲結晶を用いたラウエ型 X線結晶分光器を設計し、作製した。図6に実際に作製した X線分光器の

(a)構成と(b)概観を示す。分光用結晶として、厚さ 100 μm 、曲率半径 110mm の α -石英 (10-1-1) ($2d=0.6687\text{ nm}$ 、 d : 結晶格子間隔) を用いている。10 cm \times 10 cm 程度の比較的小型の分光器を作製することができた。長さ 60 mm の検出器を用いることにより 10~90 keV の X 線の検出が可能である。 α -石英の積分反射率は 10^{-5} 程度であることが測定されている。実験結果の様に、1 パルスあたり 10^7 程度の X 線光子数が得られれば、実験で用いた DRZ-HIGH 蛍光板とこれまで用いてきた CCD カメラの 1000 倍程度の感度を有する電子像倍型 CCD (EM-CCD) を用いれば、10 ショット程度の重ね撮りで X 線スペクトルを得ることが期待できる。

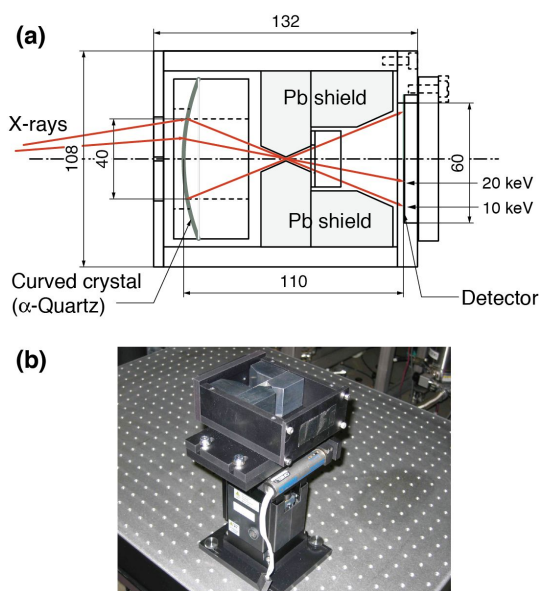


図6 作製したラウエ型 X 線結晶分光器の (a) 構成と (b) 概観。

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 8 件)

Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray pulse generation by laser Compton scattering using a high-charge laser-accelerated, quasi-monoenergetic electron beam", *Applied Physics Express*, 査読有, Vol. 7, 2014, 046701/1-4

DOI: 10.7567/APEX.7.46701

三浦 永祐, 黒田 隆之助, 豊川 弘之, "レーザーと加速器を組み合わせた高エネルギー X 線源開発と応用", *レーザー研究*, 査読有, 42 巻, 2014, 23-31

なし
Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shun Kashiwaya,

Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser-plasma acceleration", *AIP Conference Proceedings, ADVANCED ACCELERATOR CONCEPTS*, 査読無, Vol. 1507, 2012, 304-309

DOI: 10.1063/1.4773712

三浦 永祐, "レーザー加速電子線を用いた超短パルス X 線発生", *レーザー研究*, 査読有, 40 巻, 2012, 850-857

なし
Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray pulse generation via laser Compton scattering using laser-accelerated electron beam", *Proceedings of International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (HEDS 2012)*, 査読無, 2012, HED-7-3/1-4

なし (CD-ROM)

[学会発表](計 10 件)

Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray generation via laser Compton scattering using electron beam driven by laser-plasma acceleration", *Frontiers in Optics 2013 / Laser Science XXIX*, 2013 年 10 月 10 日, Hilton Bonnet Creek (米国フロリダ州オーランド)(招待講演)

三浦 永祐, 黒田 隆之助, 豊川 弘之, "レーザー加速準単色電子線を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線の特性", 第 34 回レーザー学会学術講演会, 2013 年 1 月 28 日, 姫路商工会議所 (兵庫県)

三浦 永祐, 黒田 隆之助, 豊川 弘之, "レーザープラズマ加速準単色電子線を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線発生", 2012 年度レーザー励起 X 線源とその応用研究会 in 宮崎, 2012 年 12 月 7 日, 宮崎市民プラザ (宮崎県)

Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray pulse generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser acceleration", 54th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, *American Physical Society*, 2012 年 10 月 31 日, Rhode Island Convention Center (米国ロードアイランド州プロビデンス)

三浦 永祐, 黒田 隆之助, 豊川 弘之, "レーザー加速準単色電子線によるレ

「レーザーコンプトン散乱 X 線発生」、2012 年秋季第 73 回 応用物理学会学術講演会 2012 年 9 月 13 日、愛媛大学・松山大学（愛媛県）

Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser-plasma acceleration”, The 2012 Advanced Accelerator Concepts Workshop (AAC2012)、2012 年 6 月 12 日、The AT&T Executive Education & Conference Center（米国テキサス州オースチン）
Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray pulse generation via laser Compton scattering using laser-accelerated electron beam”, International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (HEDS 2012)、2012 年 4 月 27 日、パシフィコ横浜（神奈川県）（招待講演）

田中 健治、石井 聡、黒田 隆之助、豊川 弘之、三浦 永祐、“レーザー加速電子線を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線発生”、第 8 回日本加速器学会年会、2011 年 8 月 1 日、つくば国際会議場（茨城県）

〔図書〕（計 1 件）

Eisuke Miura, InTech, “Femtosecond-scale optics”, Chapter 2, “Electron Acceleration using an ultrashort ultraintense laser pulse”, 2011, pp. 23-52

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 永祐 (MIURA EISUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：10358070

(2) 研究分担者

黒田 隆之助 (KURODA RYUNOSUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：70350428

(3) 連携研究者

豊川弘之 (TOYOKAWA HIROYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究グループ長

研究者番号：80357582

(4) 研究協力者

田中 健治 (TANAKA KENJI)

東京理科大学大学院・理工学研究科電気工学専攻・修士課程大学院生

柏屋 駿 (KASHIWAYA SHUN)

東京理科大学・理工学部電気工学科・学生

丸山 昂貴 (MARUYAMA KOHKI)

宇都宮大学大学院・工学研究科電気工学専攻・修士課程大学院生