

レーザーコンプトン散乱による小型高輝度 X 線源開発 DEVELOPMENT OF A COMPACT HIGH BRIGHTNESS X-RAY SOURCE VIA LASER-COMPTON SCATTERING

赤木智哉^{*A)}、小菅淳^{A)}、本田洋介^{A)}、荒木榮^{A)}、照沼信浩^{A)}、浦川順治^{A)}、
永井良治^{B)}、羽島良一^{B)}、静間俊行^{B)}、森道昭^{B)}

Tomoya Akagi^{*A)}, Atsushi Kosuge^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Junji Urakawa^{A)},
Ryoji Nagai^{B)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Toshiyuki Shizuma^{B)}, Michiaki Mori^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Organization (KEK), ^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

A compact high brightness X-ray source based on laser-Compton scattering (LCS) is under development at Compact ERL (cERL) in KEK. For the LCS experiment, optical cavities which can achieve high finesse and small waist size were installed at the cERL. In this paper, we will show the results of the LCS X-ray generation and phase contrast imaging using the LCS photon.

1. はじめに

小型加速器による小型高輝度 X 線源の開発を行っている。レーザーコンプトン散乱 (LCS) を利用することで従来の放射光施設と比較して、低いエネルギーの電子ビームで X 線やガンマ線を生成することが可能なため小型高輝度 X 線源の開発において LCS は有用である。また、LCS を利用した光源は準単色、エネルギー可変、微小光源そして偏光の切り替えが容易であるという特徴をもつため、これらを生かした X 線イメージングが期待される。

現在、KEK のコンパクト ERL (cERL) において電子ビームと光共振器に蓄積したレーザー光を用いた LCS 実験を進めている。cERL は超伝導エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac) の試験加速器である。cERL の低エミッタンスかつ大電流の電子ビームは LCS 光源に最適である。この実験のため、2 台の垂直平面 4 枚鏡共振器を重ねあわせた光共振器を開発し、cERL のビームラインに組み込んで実際に LCS 実験を行った。ここでは cERL における LCS 実験の結果について報告する。

2. レーザー光共振器

LCS を利用して高強度 X 線を生成するためには、大電流の電子ビームとともに高強度のレーザーシステムが不可欠である。そのため本実験では、加速器のビームラインにレーザー光共振器を設置して、その中にモードロックレーザーパルスを蓄積することでレーザー光強度を増大し電子ビームと衝突させる。

光共振器は高いフィネスと小さなウエストサイズを同時に達成する必要があるが、2 枚鏡の Fabry-Perot 型共振器はウエストサイズを小さく絞る設計にしていくと共振器として不安定になってしまうため、2 枚の平面鏡と 2 枚の凹面鏡から成る 4 枚鏡共振器の構成とした。この共振器は 2 枚鏡共振器と比べて鏡の横方向のずれに対して安定であるという利点を持つ^[1]。

共振器を構成している鏡は REO 社 (Research Electro-Optics, Inc.) と LMA 社 (Laboratoire des Matériaux

Avances) から購入した。レーザーを入射する平面鏡 (M1) の反射率は 99.9% でその他の鏡は平面 (M2)、凹面 (M3, M4) の順にそれぞれ 99.99%、99.999%、99.999% である。鏡の反射率から計算される共振器のフィネスは 5600 となり、入射鏡の透過率を 0.07% とすると増大率としては 2200 倍が見込まれる。ここで増大率とは入射レーザー強度と蓄積強度の割合である。ただし、この増大率を達成するためには、共鳴ピーク幅 (FWHM) 190 pm より充分狭い範囲で共振器長を制御する必要がある。現状では蓄積強度 10.4 kW (増大率 430 倍) である。現在フィードバック制御の改善を行っており、レーザー蓄積強度の向上を目指している。

共振器の周長は 1845 mm で繰り返し周波数 162.5 MHz に相当する。レーザーパルスと電子バンチを衝突させるため、光共振器の繰り返し周波数と cERL の RF 周波数は整数倍の関係になる必要がある。Fig. 1 は cERL での LCS 実験用に開発した 4 枚鏡光共振器の写真である。この共振器は 2 台の平面 4 枚鏡共振器を 1 つに組み合わせた共振器として設計した。

レーザーは Time-Bandwidth 社製のモードロック半導体励起固体レーザー (ARGOS) を使用した。主な性能は、最大平均出力 45 W、波長 1064 nm、繰り返し周波数 162.5 MHz、パルス長 (FWHM) 13.3 ps である。

この 4 枚鏡平面共振器は実験により直線偏光のみが共鳴可能であることが分かっている。そこで共振器の共鳴状態維持の制御にこの偏光特性を利用している。この方法は Hansch-Couillaud 法の一つであり、光共振器で共鳴できる直線偏光成分と鏡で単に反射される直交方向の直線偏光成分を含む反射光の偏光の変化から共鳴による位相変化を検出する^[2]。反射光を $\lambda/4$ 板と偏光ビームスプリッターを使って円偏光に分け、2 つの検出器の信号の差をとるとエラー信号を取得できる。オリジナルの方法では共振器内部に直線偏光依存するものをいれておく必要があるが、この 4 枚鏡共振器では、縦偏光と横偏光で自然と共鳴条件が分離するため何も入れる必要がない点が有利である。Fig. 2 は共振器長をピエゾで変化させた時の透過光強度とエラー信号である。また、Fig. 3 はフィードバック制御の概要図である。

この光共振器は真空チェンバーの中に入れてモード

* akagit@post.kek.jp

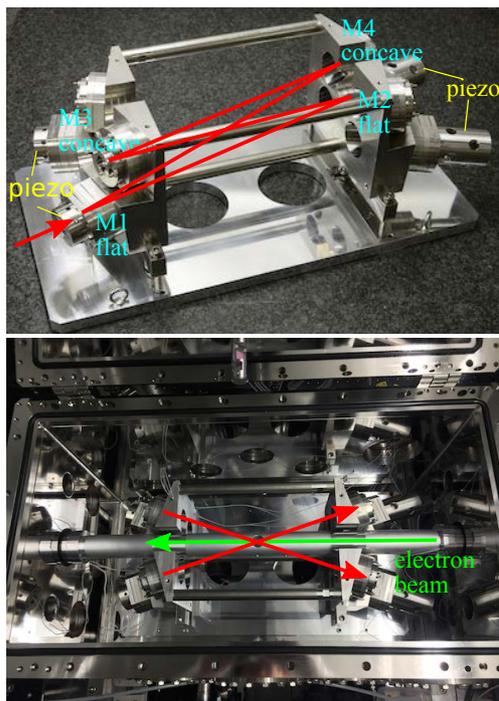


Figure 1: The 4-mirror cavities for LCS experiment.

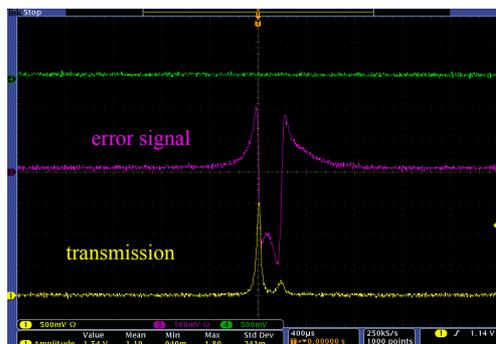


Figure 2: The transmission and the error signal.

ロックレーザー発振器や光学系とともにムーバー架台の上に設置している。このムーバー架台で真空チェンバごと光共振器の位置を動かしてレーザー光と電子ビームの位置を $1\mu\text{m}$ の精度で調整することが可能である。

3. LCS 実験

cEERL での LCS 実験におけるレーザーと電子ビームのパラメータを Table 1 に示す。Fig. 4 は LCS ビームラインのレイアウトである。LCS 光はビームラインを通過して実験ハッチへと導かれる。ビームラインは真空に排気されており、2 枚のベリリウム窓がそれぞれ LCS 衝突点から 7.7 m と 16.6 m 下流の位置に設置されている。

本実験では波長 1064 nm のレーザー光と 20 MeV の電子ビームが 18 度の角度をもって衝突するため、LCS 光のエネルギーは約 7 keV となる。この光はシリコンドリフト検出器 (XR-100SDD, AMPTEK) を用いて実験ハッチで観測される。

LCS 実験においてはまず、レーザーと電子ビームの

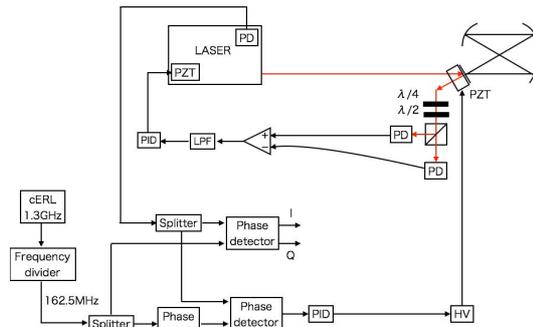


Figure 3: The scheme of the feedback system for LCS.

衝突点における位置合わせをスクリーンモニターで行う。それから、LCS の信号が最大となるようにムーバー架台で共振器ごとレーザー位置を調整する。このとき、レーザーと加速器の位相同期は行わずに、ある特定の位相にだけ信号が発生していることを確認する。そして位相を同期させた状態でレーザー位相のスキャンを行い、LCS X 線の信号が最大となるように衝突のタイミングを決定した。レーザーの位置スキャンと位相スキャンの測定例を Fig. 5 に示す。

SDD での測定結果は、中心エネルギー 6.91 keV、エネルギー広がり (FWHM) 173 eV で 1200 cps であった。なお、SDD の検出有効径は $\phi 4.66\text{ mm}$ である。また、LCS 光のエネルギー広がり SDD のエネルギー分解能が 153 eV @ 5.9 keV であるので 81 eV と見積もることができる。

この測定結果より、発生点における LCS の全光子数は $4.3 \times 10^7\text{ photons/sec}$ と見積もられる [3]。

Table 1: Parameters of the electron and laser beams

Laser beam	
Wavelength	1064 nm
Pulse energy	64 μJ
Pulse duration (rms)	5.65 ps
Repetition rate	162.5 MHz
Collision angle	18 degree
Spot size	30 μm
Electron beam	
Energy	20 MeV
Bunch charge	0.36 pC
Bunch length (rms)	2 ps
Spot size (rms)	30 μm
Emittance	0.4 mm-mrad
Repetition Rate	162.5 MHz

4. X線イメージング

LCS 光は微小光源という特性により、位相コントラスト法イメージングに適していると考えられる [4]。被写体と検出器の距離を離すことでエッジが強調された画像を得ることができることを確認するため、被写体と検出

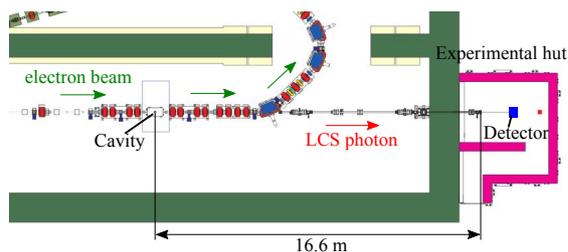


Figure 4: Schematic drawing of the LCS beamline.

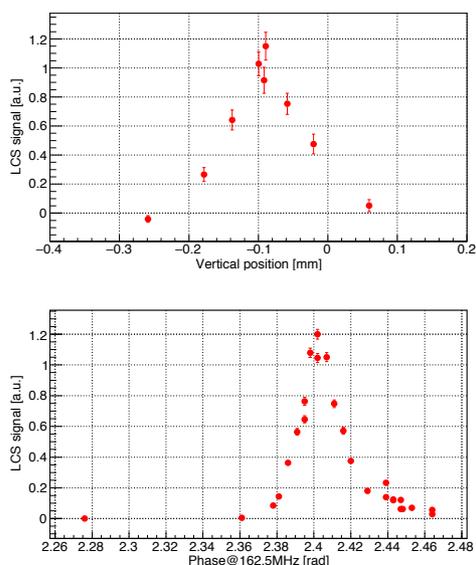


Figure 5: LCS photon intensity as a function of the vertical position of the laser beam (a) and timing of the laser pulse.

器を 2.5 m 離してイメージングを行った。今回は被写体としてスズメバチを用いた。また、7 keV の X 線は空気中で減衰してしまうため被写体と検出器の間の空間は He パスを設置した。ガス濃度計で測定したところ実験中は He 濃度がおよそ 70% であった。このとき X 線の透過率は約 27% となる。Fig. 6 は X 線イメージングのセットアップである。検出器はリガク社製の HyPix-3000 を使用した。この検出器のピクセルサイズ、有効検出面積はそれぞれ $100 \times 100 \mu\text{m}$ 、 $77.5 \times 38.5 \text{mm}$ である。Fig. 7 (a) は被写体と検出器を密着させた場合、Fig. 7 (b) は距離を離れた場合の画像である。(b) の画像では羽や足の部分がより鮮明になっていることが確認できる。このように、LCS 光の特徴である微小光源性が位相コントラストイメージングで利用可能であることを実証できた。

5. まとめ

cERL において LCS による X 線の生成実験を行った。SDD を用いて測定された X 線のエネルギーは 6.92 keV で、発生点における X 線数は 4.3×10^7 photons/sec と見積もられる。また、LCS X 線によるスズメバチの位相コントラストイメージングの試験を行いエッジ強調の効果を確認した。現在の光量ではイメージングにかかる時間

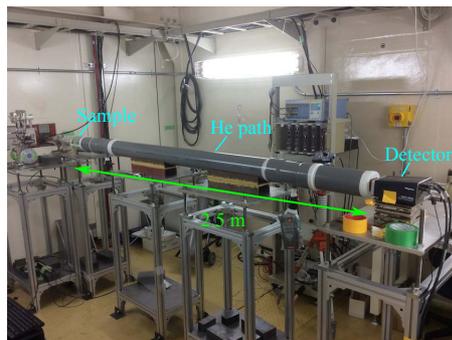


Figure 6: Setup of LCS X-ray imaging.

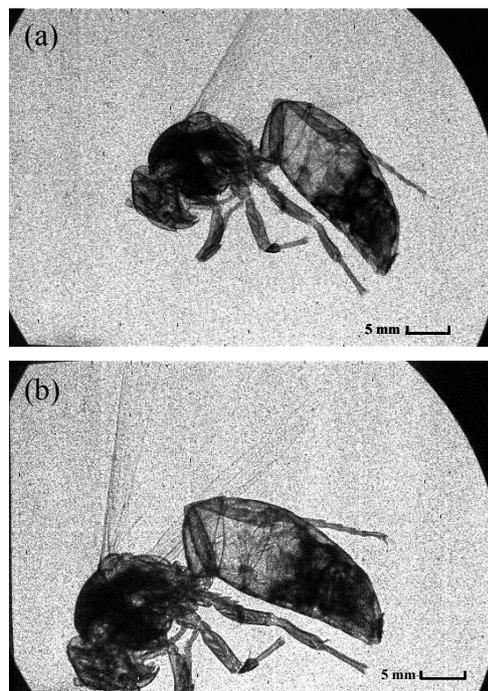


Figure 7: LCS X-ray imaging of a hornet.(a): The detector is placed just behind the sample.(b): The distance from the sample to the detector is 2.5 m.

は 10 分程度であるが、今後さらにレーザーと電子ビームの強度向上を計画しており、短時間での画像取得が期待される。それから、LCS 光源のエネルギーが可変であり、偏光の切り替えが容易にできるという特徴を生かした偏光イメージング等への利用も今後計画している。

なお、本研究は文部科学省委託事業 光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤研究開発」及び、「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」によるものである。

参考文献

- [1] T. Akagi et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 724, pp. 63–71 (2013).
- [2] T. W. Hansch and B. Coulliard, Opt. Commun. 35, p. 441 (1985).
- [3] R. Nagai et al., Proc. IPAC'15, TUPJE002 (2015).
- [4] S. W. Wilkins et al., Nature 384, pp. 335–338 (1996).