

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19340064

研究課題名（和文） 逆コンプトン X 線による生体イメージの観測

研究課題名（英文） Imaging Technology Development of Living Object by Means of Inverse Compton Scattering

研究代表者

鷲尾 方一（WASHIO MASAKAZU）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70158608

研究成果の概要（和文）：レーザーフォトカソード RF ガンから得られる電子ビームの大出力化のための、レーザーのマルチパルス増幅を実施した。具体的には Nd:YLF レーザーの基本波である 1047nm の 119MHz の IR 光を特別に設計したモジュレータにより自在に切り出す事に成功した。これにより、今回、100 パルスの大強度 IR レーザーを後置の増幅器により生成し、その後非線形結晶により 2 倍高調波及び 4 倍高調波である UV 光へ変換することに成功した。また、衝突用のレーザー光を増幅するためにパルスレーザー蓄積装置を実現し、マルチパルス X 線の発生に成功した。本研究において予備的ではあるが、生体の X 線像を取得した。

研究成果の概要（英文）：Multi-bunch electron beam has been realized using specially developed multi-pulse laser system with Nd:YLF 4th harmonics. The multi-pulse collision laser for the generation of high luminosity X-rays via inverse Compton scattering has been succeeded and the multi-pulse X-ray was achieved. In the study, we have some preliminary results to obtain the X-ray images of organs. .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理(4301)

キーワード：加速器、逆コンプトン散乱、X 線

1. 研究開始当初の背景

逆コンプトン散乱に関する研究は、当時としては、我々早稲田大学のグループのほかには、米国 Brookhaven National Laboratory (BNL)、日本の産業技術総合研究所(AIST)、高エネルギー加速器研究機構(KEK)等の数箇所でのみ実現されていた。特に高輝度の X 線を得る目的でそれぞれの組織で特徴ある

開発が行なわれていた。例えば BNL においては高エネルギー電子と大出力 CO₂ レーザーの衝突による KeV オーダーの、AIST では高エネルギー電子と Ti:Sa レーザーの衝突による数 10KeV の、更には KEK では GeV オーダーの電子と YAG レーザーとの衝突による数 10 MeV の X 線生成等が確かめられていたが、比較的低エネルギーの単色軟 X 線の

生成については早稲田大学でのみ実現されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に、早稲田大学・理工学術院総合研究所（申請当時は理工学総合研究センター）が保有する 5 MeV のピコ秒電子ビーム発生装置に、Cs₂Te カソードシステムを導入しマルチバンチ大出力電子ビーム生成を可能にすること、第二に、ピコ秒 Nd:YLF レーザーの安定増幅とマルチパルス切り出しシステムを用いたレーザーラインを高度に制御すること、第三に、マルチパルスレーザービームとマルチバンチ電子ビームによる逆コンプトン散乱を実現し、それを高度に制御する事である。またこれらの結果を元に、生体イメージを観測するための基礎開発を行ない、予備的な画像取得を目指すものである。

3. 研究の方法

高効率光カソードシステム構築

マルチパルスレーザーを導入し、安定に高量子効率で電子バンチを発生させるための Cs₂Te 光カソードを現有の RF ガンに装荷する。この際、加速器システムのスペースまで考慮したコンパクトなロードロックシステムを用いた簡便で、カソード交換が容易となるシステムを開発する。このため周波数の厳密な調整をカソード装荷後にも可能となるよう、RF ガンのキャビティー自体に周波数の微調整が行えるよう、RF チューナを付加するなどの工夫を加えて実用可能なマルチバンチ電子ビームを実現できるようにする。

レーザーシステム高度化

カソード励起用 UV レーザー光は我々が現有するピコ秒 Nd:YLF レーザー装置 119MHz のレーザーパルスからポッケルスセルを用いて切り出しを行い、後置増幅器により増幅し生成する。具体的にはマルチパルス化した IR レーザーを後置増幅器により数 mJ 程度まで増幅しその一部を非線形結晶に導入し、時間構造が IR レーザー光と全く同じカソード励起用 UV レーザー光を発生させる。カソード自身は量子効率が 1% 程度と非常に効率が良いため、電子発生用 UV レーザー光としては、数 μ J 程度で充分である。

衝突用マルチパルスレーザーの開発

逆コンプトン散乱に用いるマルチパルスレーザーシステムには、パルススーパーキャビティーともいえる特殊なレーザー増幅器を開発し、マルチバンチ電子ビームとの衝突を効率よく実現する。このスーパーキャビティーはそのレーザー光路長を nm のオーダーで制御する必要があるため、極めて高度な制御を行なって始めて実現するものである。

4. 研究成果

4-1. 高効率光カソードシステムの開発

光電子発生について、従来から利用されてきた銅カソードは、寿命は長いものの量子効率の低いという点で問題があり、高電荷量の電子ビームを生成するには高強度なレーザー光が必要であった。そこで、本研究では、従来の銅カソードに代えて、量子効率が 2 桁から 3 桁以上高い半導体カソードである Cs₂Te カソードを導入した。これに伴い従来使用してきた RF 空洞の構造も見直しその改良を行った。その結果新しく導入した Cs₂Te フォトカソード RF 電子銃の性能評価試験と、従来の RF 電子銃との性能比較等を通じた徹底した検討を通じシステムの高度化を達成した。

具体的には、改良型 RF 空洞のパラメータである Q 値、結合定数 β 、R/Q の測定を行った。空洞の質を表わす Q 値、空洞と RF 入射ポートとの結合定数 β はネットワークアナライザを使用した反射法による空洞の共振周波数の測定より、空洞の形状を評価する値 R/Q はビーズ摂動法による空洞内電界分布の測定よりそれぞれ求めた。測定の結果 Q 値は従来のものと比べ約 1.5 倍(12,200)となり、加速効率を決める実効的な Shunt Impedance も従来のものよりも大きい 2.217M を得ることができた。また更に、暗電流測定、電荷量・エネルギー測定を実施した。その結果、従来の RF-Gun と比べ、暗電流が削減され、高い加速電圧が得られたことが確認でき、電荷量がおよそ 4nC、エネルギーが 5.3MeV と共に高い値をとることが確認された。導入した新規の高効率カソードを備えた加速器システムの写真を図 1 に示す。

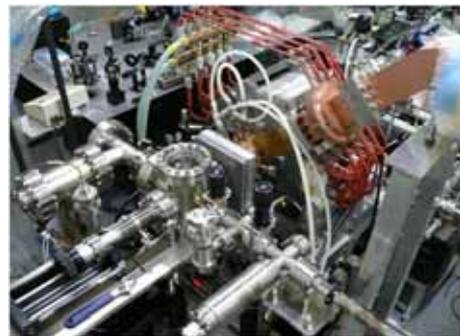


図 1 導入した、新規 Cs₂Te フォトカソード RF 電子銃の外観

4-2. レーザーシステムの高度化

カソード照射用 UV レーザーの開発

電子ビームをマルチバンチ化するためのカソード照射用マルチパルス UV レーザーの生成を行い、1~1000 パルスまで可変なレーザーシステムを構築することに成功し、具体的には、照射用 UV レーザーの種光として、

既存のレーザー装置 Pulrise-V のシードレーザーにより生成された 119MHz の高安定 1047nm を用いた。このシード光は CW 発振であるため、パルスの切り出しが必要となる。そこで目的のパルス数に調整するために、Intensity Modulator で強度変調を行った。この方法を用いることで、ビームのバンチ数を自在に調整することが可能になった。切り出された IR パルスは十分な強度がないため、レーザー外部に設置したパルス駆動増幅器により増幅をおこなった。その後非線形光学結晶を利用して 262nm の UV に変換を行った。

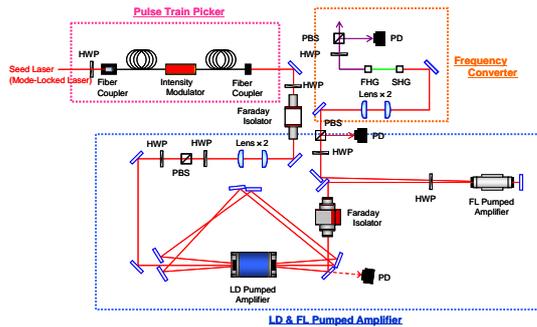


図 2 マルチパルス UV レーザーシステム

このようにして生成したマルチパルス UV を用いて 100bunch/train のマルチ電子ビームを生成した。バンチごとの電荷を測定するため FCT(Fast Current Transformer)がビームラインに導入した。これによりマルチパルス電子の時間構造を直接測定できる。Analyzer Magnet と BPM を使用してマルチバンチ電子ビームのエネルギーの測定も行った。本開発において極めて重要な技術開発であったマルチパルス電子ビームの信号を直接 FCT によって測定したシグナルを図 3 に示す。



図 3 マルチバンチビームの実測データ (100bunch/pulse)

4-3. マルチパルス逆コンプトン X 線生成 衝突用レーザーと衝突実験

本開発において、大出力の逆コンプトン散乱 X 線を生成するためには、高繰り返し率のマルチパルス X 線の生成が最も実現性が高い。そ

のため、我々は、衝突用のレーザーを高輝度マルチパルスとするためにパルスレーザースーパーキャビティとも言えるシステムの開発を実施した。(図 4 参照)

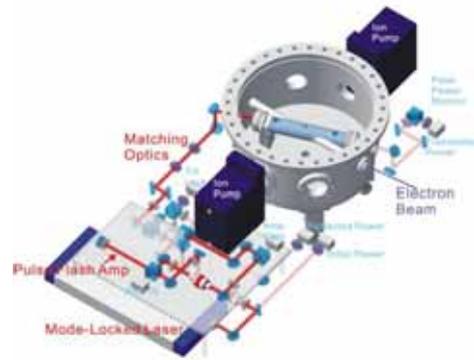


図 4 パルスレーザースーパーキャビティのイメージ図

その結果、ピークで 30kW 以上のレーザー光をビームタイミングと同期して生成できている。このレーザーとマルチパルス電子ビームを衝突させた結果、280ns の間に 100 パルスの逆コンプトン X 線を得ることができた。(図 5 参照)

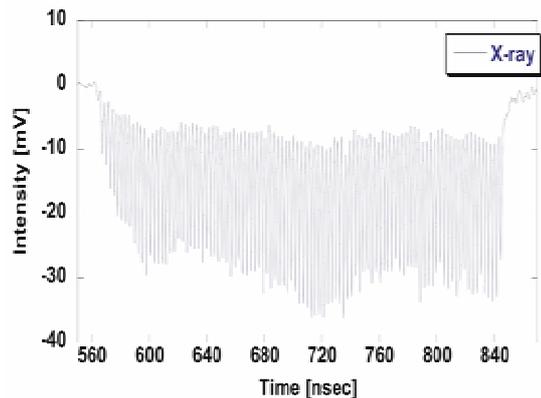


図 5 マルチパルス X 線の実測結果

4-4. イメージング

以上述べてきたように、逆コンプトン散乱 X 線生成を高度に制御することができるようになった。今後さらに X 線のイメージを精度よく得るためには、高解像度のイメージングシステムが必須となる。このため、本研究において、X 線レジストの高感度化を目指した研究を展開してきた。その結果、従来の電子線レジスト及び X 線レジストの感度を一桁以上改善することに成功した。これにより今後非常に高い精度の X 線像を容易に取得し、50nm 以下の分解能での像の議論ができる基礎を確立した。また逆コンプトン散乱によりえられた単色 X 線を用いて桜エビの画像取得に成功(図 6 参照)するなど、大きな成果を挙げることができた。

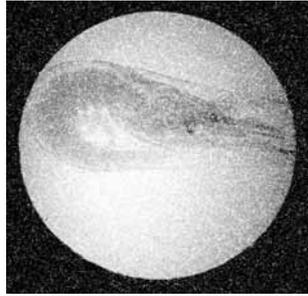


図6 逆コンプトン X 線により得られた生体イメージ

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 10 件、すべて査読あり)

1. Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photocathode for the KEK-ATF” N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki, and J. Yang, Nucl. Instrum. Meth. A613 (2010) 1-8.
2. Development of a Compact X-ray Sources and Super-sensitization of Photo Resists for Soft X-ray Imaging, T. Gowa, N. Fukutake, Y. Hama, K. Hizume, T. Kashino, S. Kashiwagi, R. Kuroda, A. Masuda, A. Oshima, T. Saito, K. Sakaue, K. Shinohara, T. Takahashi, T. Urakawa, K. Ushida and M. Washio, Journal of Photopolymer Science and Technology, 22, 3 (2009) 273-278
3. Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings” K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, T. Omori, T. Taniguchi, N. Terunuma, J. Urakawa, and N. Sasao, Rev. Sci. Instrum., 80(12) (2009) 123304 1-7.
4. Stabilization of a Non-Planar Optical Cavity using its Polarization Property, Y. Honda, H. Shimizu, M. Fukuda, T. Omori, J. Urakawa, K. Sakaue, H. Sakai, and N. Sasao, *Optics Communications* 282, (2009) 3108-3112
5. Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring, H. Shimizu, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, T. Okugi, T. Omori, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Kuriki, S. Miyoshi, T. Takahashi, Y. Ushio, T. Hirose, K. Sakaue, M. Washio, P. Guoxi, and L. Xiao Ping, *Journal of the Physical Society of Japan* Vol.78 No.7. (2009) 074501
6. Design of a mode separated RF photo cathode gun, A. Deshpande, S. Araki, M. Fukuda, K. Sakaue, N. Terunuma, J. Urakawa, N. Sasao, and M. Washio, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.Vol. 600, (2009) .361-366,
7. Development of Compact Coherent EUV Source Based on Laser Compton Scattering, S.

Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, K. Sakaue, A. Masuda, T. Nomoto, T. Gowa, M. Washio, R. Kuroda and J. Urakawa, Radiat. Phys. Chem. 78 (2009) 1112-1115

8. Recent Progress of a Soft X-ray Generation System Based on Inverse Compton Scattering at Waseda University, K. Sakaue, T. Gowa, H. Hayano, Y. Kamiya, S. Kashiwagi, R. Kuroda, A. Masuda, R. Moriyama, J. Urakawa, K. Ushida, X. J. Wang and M. Washio, Radiation Physics and Chemistry, 77, Issue 10-12, (2008) 1136-1141, October-December

9. Polarized Positron Generation Based on Laser Compton Scheme and its Polarization Measurements, K. Sakaue, T. Saito, I. Yamazaki, R. Kuroda, M. Washio T. Hirose, T. Omori, T. Okugi, Y. Kurihara, J. Urakawa, M. Fukuda, M. Nomura, and A. Ohashi, International Journal of Modern Physics B, Vol.21, Nos.3&4, (2007) .519-526

10. Improvements in time resolution and signal-to-noise ratio in a compact pico-second pulse radiolysis system, H. Nagai, M. Kawaguchi, K. Sakaue, K. Komiya, T. Nomoto, Y. Kamiya, Y. Hama, M. Washio, K. Ushida, S. Kashiwagi and R. Kuroda, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: 265, 1, (2007) 82-86

[学会発表](計 13 件)

1. Femto-second Profile Monitor Using Pulsed Laser Storage in an Optical Cavity, K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, T. Taniguchi, T. Terunuma, J. Urakawa, and N. Sasao, Proceedings of Free Electron Laser Conference 2009, TUPC23 (2009)
2. 3-Dimensional Beam Profile Monitor Based on a Pulse Storage in an Optical Cavity for Multi-bunch Electron Beam, K. Sakaue, M. Washio, N. Sasao, S. Araki, M. Fukuda, Y. Honda, Y. Higashi, T. Taniguchi, N. Terunuma, J. Urakawa, Proceedings of Particle Accelerator Conference 2009, WE3GRC04 (2009)
3. Present Status of a Multi-Bunch Electron Beam Linac Based on Cs-Te Photo-Cathode RF-Gun at Waseda University, T. Suzuki, J. Urakawa, S. Kashiwagi, Y. Kato, R. Kuroda, K. Sakaue, T. Takatomi, N. Terunuma, H. Hayano, T. Fujino, A. Masuda, A. Murata, and M. Washio, Proceedings of Particle Accelerator Conference 2009, MO6RFP102 (2009)
4. Development of a Cs-Te Cathode RF Gun at Waseda University, K. Sakaue, T. Suzuki, A. Murata, C. Igarashi, A. Masuda, T. Nomoto, A. Fujita, T. Hirose, Y. Hama, M. Washio, J. Urakawa, T. Takatomi, N. Terunuma, H. Hayano, and S. Kashiwagi, Proceedings of LINAC08 TUP095 (2008)
5. Demonstration of Multi-Pulse X-ray

Generation via Laser-Compton Scattering Using Pulsed-Laser, K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, T. Taniguchi, T. Terunuma, J. Urakawa, Proceedings of LINAC08, TUP065 (2008)

6. Development of Laser System for Compact Laser Compton Scattering X-ray Source, R. Kuroda, H. Toyokawa, M. Koike, K. Yamada, T. Gowa, A. Masuda, K. Sakaue, M. Washio, S. Kashiwagi, T. Nakajyo, and F. Sakai, Proceedings of EPAC08, TUPP158 (2008 Genoa, Italy)

7. Improvement of an S-band RF-gun cavity with a Cs-Te Photo-cathode, A. Murata, Y. Kato, K. Sakaue, T. Suzuki, Y. Hama, T. Hirose, M. Washio, J. Urakawa, T. Takatomi, N. Terunuma, H. Hayano, and S. Kashiwagi, Proceedings of EPAC08, MOPP (2008 Genoa, Italy)

8. Development of a Compact X-ray Source Based on Laser-Compton Scattering with a Pulsed-laser, K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, T. Taniguchi, T. Terunuma, and J. Urakawa, Proceedings of EPAC08, TUPP156 (2008 Genoa, Italy)

9. Compact EUV Source Based on Laser Compton Scattering between Micro-bunched Electron Beam and CO₂ Laser Pulse S. Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, R. Kuroda, J. Urakawa, K. Sakaue, A. Masuda, T. Nomoto, T. Gowa, and M. Washio, Proceedings of EPAC08, TUPP155 (2008 Genoa, Italy)

10. KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型X線源(LUCX)の開発(5), 坂上和之, 鷲尾方一, 荒木栄, 浦川順治, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田洋介, 笹尾登, 横山弘和, 武藤俊哉, 高野幹男

(日本物理学会 第63回年次大会 東大阪 2008年3月)

11. パルスレーザー共振器とマルチバンチ電子ビームを用いたレーザーコンプトン散乱X線生成

坂上和之, 鷲尾方一, 荒木栄, 浦川順治, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田洋介, 武藤俊哉, 笹尾登, (第5回加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会プロシーディングス 広島 2008年8月)

12. Cs-Te フォトカソードSバンドRF-Gunの開発

村田亜希, 加藤雄太, 坂上和之, 鈴木達也, 鷲尾方一, 浦川順治, 高富俊和, 工藤昇, 照沼信浩, 早野仁司, 黒田隆之助, 紀井俊輝, 楊金峰, 神谷好郎, 栗木雅夫, 第5回日本加速器学会, 2008年8月, 広島)

13. 早稲田大学におけるCs-Te フォトカソードRF-Gunの現状, 村田亜希, 五十嵐千明,

榎野多加志, 加藤雄太, 小宮圭太, 五輪智子, 坂上和之, 鈴木達也, 野本知章, 濱義昌, 広瀬立成, 藤田晃宏, 増田明彦, 鷲尾方一, 浦川順治, 栗木雅夫, 高富俊和, 工藤昇, 照沼信浩, 早野仁司, 柏木茂, 神谷好郎, 黒田隆之助, (第63回 物理学会2008年春季大会, 2008, 3月, 近畿大学@大阪)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/washiom/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷲尾方一 Masakazu Washio (全体統括)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：70158608

(2) 研究分担者

広瀬立成 Tachishige Hirose

(X線光学系構築)

早稲田大学・理工学術院・元教授
研究者番号：70087162

濱義昌 Yoshimasa Hama

(衝突チェンバーシステム)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授
研究者番号：40063680

神谷好郎 Yoshio Kamiya

(高効率カソードシステム)

東京大学・理学部・助教

研究者番号：90434323

柏木茂 Shigeru Kashiwagi

(RF位相最適化)

東北大学・電子光理学研究センター・
准教授

研究者番号：60329133

黒田隆之助 Ryunosuke Kuroda

(レーザーシステム高度化)

産業技術総合研究所・研究員

研究者番号：70350428

(3) 連携研究者

坂上和之 Kazuyuki Sakaue

(電子ビームの高度制御)

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：80546333

篠原邦夫 Kunio Shinohara

(X線イメージングシステム)

早稲田大学・理工学術院・客員教授

研究者番号：70158608