

成果報告書

「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」

(X線検出器の開発)

平成22年5月

学校法人早稲田大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、学校法人早稲田大学が実施した平成21年度「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」(X線検出器の開発)の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に飛躍させる軟 X 線から硬 X 線領域の小型高輝度 X 線発生装置 (10m × 6m 程度) を実現する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御技術及び、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。よって、超伝導高周波加速器技術を使った 5 nm~0.025 nm 波長領域の小型高輝度 X 線発生装置の開発とその実用化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的とする。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人広島大学、学校法人早稲田大学、東芝電子管デバイス株式会社及び株式会社日立ハイテクノロジーズと共同で業務を行う。

学校法人早稲田大学では、X線発生総合試験において、次の項目について、高い精度で X 線のエネルギー及び角度分布等の計測を可能とする以下のシステムの開発を実施する。

2. 平成 21 年度 (報告年度) の実施内容

2. 1 実施計画

① X 線検出器の試験装置開発

具体的には、低エネルギー X 線 (軟 X 線) の定量的な発生システムを早稲田大学内に構築し、その計測に最適な X 線検出器を試作する。また検出において重要な意味を持つエネルギー計測及び強度の絶対値計測が可能なシステム構築を試作する。

② X 線検出器の検出試験

特にエネルギー計測について、本年度中にその基本的な性能を確認し、次年度以降に実施する比較的エネルギーの高い X 線計測への適用可能性も検討する。

2. 2 実施内容 (成果)

概 要

超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発のために、X 線検出器開発および利用研究に向けた検討を行っている。レーザーコンプトン散乱によって生成される X 線に特化した特徴としては、散乱角が広いこと大面積の撮像が容易であること、線源サイズがレーザーもしくは電子ビームの大きさに一致するため極限まで小さくすること可能である点である。これらの特徴を評価するために、本年度は位置読み出し型 (撮像型) 検出器の開発・評価及びその試験用線源の構築を行った。次年度は引き続き位置読み出し型の検出器の評価を行っていくとともに常伝導加速器を用いた軟 X 線検出試験を行っていく予定である。

1. はじめに

本プロジェクトにおいて X 線を生成する手法は周知の通りレーザー光を高エネルギーの電子ビームによって散乱する『レーザーコンプトン散乱法』である。レーザーコンプトン X 線の特徴としては、

① 小型な X 線源が構築可能であること

- ② X線の散乱角が広く大面積への照射に適していること
- ③ 線源サイズを極限まで小さくできること
- ④ X線の偏光制御がレーザーの偏光制御によって容易に行えること

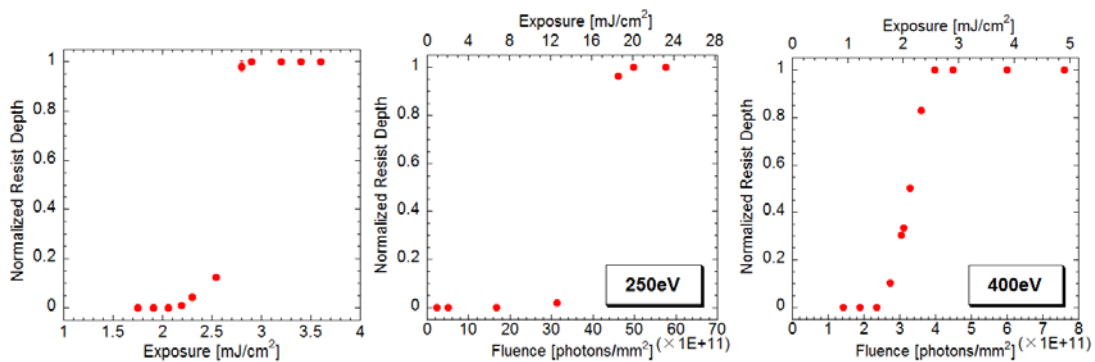
などが挙げられる。昨年度までの検出器開発としてはまずはレーザーコンプトン散乱によるX線を検出することに特化していたが、今年度からは特に上記②③を評価するための検出器開発及び試験用線源の構築を行っている。実際には撮像型の検出器により大面積の照射試験を行うとともに、線源サイズが小さいという利点の検証のために、屈折コントラストイメージングなどを試験する。その際の比較対象及び実機での試験の前段階評価として電子ビームによる制動放射光を用いた準単色X線源の開発を行っている。それぞれについて以下に報告する。

① X線検出器の試験装置開発

密着露光撮像用フォトレジストの開発研究

本プロジェクトでは次年度に常伝導線形加速器とレーザー蓄積装置を用いた軟X線領域の高輝度X線生成を行う予定である。その際に有力な撮像方法としては、密着露光型の撮像が最もシンプルかつ高分解能が期待できる。密着露光型とは試料をフィルムなどに密着させて設置し、X線を照射することによって透過したX線がフィルムを感光するという、X線光学系などの必要ない手法である。このフィルムとしてレジストを用い、読み出しにAFM(原子間力顕微鏡)を用いることによって高分解能な撮像が期待できる。通常このレジスト材としてはPMMA(ポリメタクリル酸メチル樹脂)が用いられるが、PMMAは感光閾値が高く、撮像に多大な時間を要するだけでなく、高分解能な撮像に必要なX線強度も大きくなってしまふ。密着露光型の撮像の分解能は光子の統計雑音によって制限される。PMMAで50nm程度の分解能を得るには約 4×10^{14} photons/cm²のX線強度が必要となる。この必要X線強度を下げるためには検出器の効率、つまり撮像器の感度を向上させる必要がある。我々は化学増幅型Deep-UV用レジストを試験し、さらにその高感度化を行った。

まずは感光閾値の測定及び軟X線による感光の確認をUV光照射は水銀灯(中心波長254nm)、軟X線照射は九州シンクロトロン光研究センターSAGA-LS軟X線分光ラインBL12を用いて行った。その結果を以下の図1に示す。レジストとしては東京応化製Deep-UV用化学増幅型フォトレジストTDUR-P722を用いた。化学増幅型レジストを用い



(A)254nmにおける測定 (B)250eV軟X線における測定 (C)400eVにおける測定

図1: 化学増幅型Deep-UV用レジストの感光閾値測定

ることによって従来の PMMA よりも約 1~2 桁の感度の向上が見られる。

(A)(B)(C)はそれぞれ 254nm の UV 光、250eV の軟 X 線、400eV の軟 X 線による感光閾値測定の結果を示している。それぞれの閾値測定の結果は $2.6\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、 $16\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、 $2.1\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。閾値が異なるのはレジストにおける光の吸収効率が光子エネルギーによって異なるためである。化学増幅型レジストを用いることによって PMMA で必要とされていた $4 \times 10^{14}\text{Photon}/\text{cm}^2$ に比べて約 1 桁の感光閾値の感度の向上が確認された。予想された 2 桁までは届かないが、レジストの感度や解像度は現像プロセスによっても大きく変化する。上記はメーカー推奨の現像液・現像時間等の条件下で行った実験結果であり、今後現像プロセスの最適化を行っていくつもりである。

次にさらに本レジストを高感度化するために UV プレ照射法を開発し、試験した。UV プレ照射法概念図を図 2 に示す。図 2 の右上及び図 1 の測定結果にも示されているようにレジスト材はある閾値以上において反応が開始され、撮像される。そこでより高感度化を図るために閾値付近まで UV 光を用いて前もって照射しておき、その後軟 X 線によって撮像することにより、必要とされる X 線強度を極力抑えることが可能である。そのプロセスは図 2 に示してある通りで、通常は露光を行い、PEB で反応させて、反応部分を溶解させる。それに対してプレ照射法ではまず水銀灯などの UV 光でプレ照射を行い、PEB で一部反応させておき、その後本照射を行い、PEB/現像を行う。プレ照射の UV 光の強度を適当に選ぶことによって、閾値直前からの軟 X 線による本露光が可能となる。250eV/400eV それぞれにおけるプレ照射法試験結果を図 3 に示す。

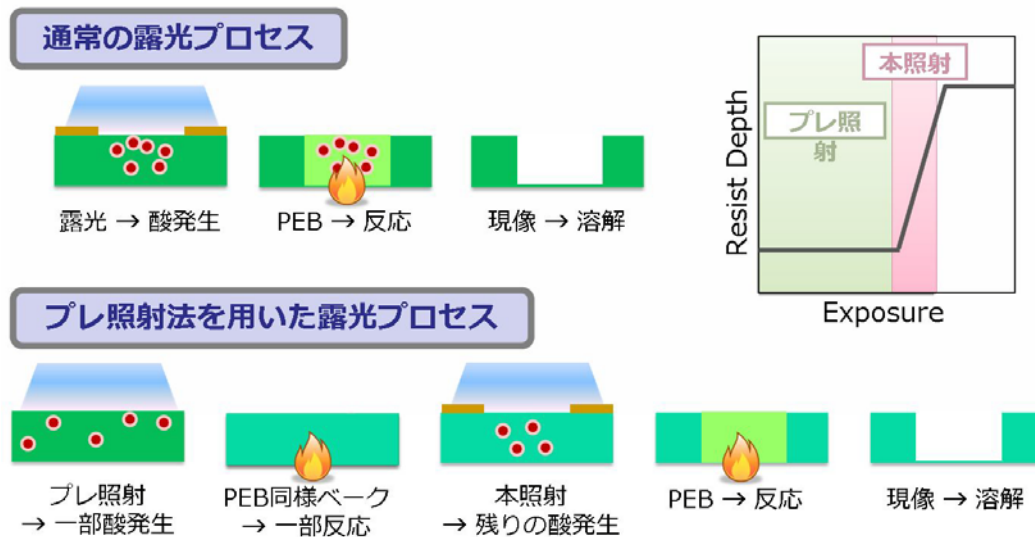


図 2 : UV プレ照射法概念図及びその現像プロセス

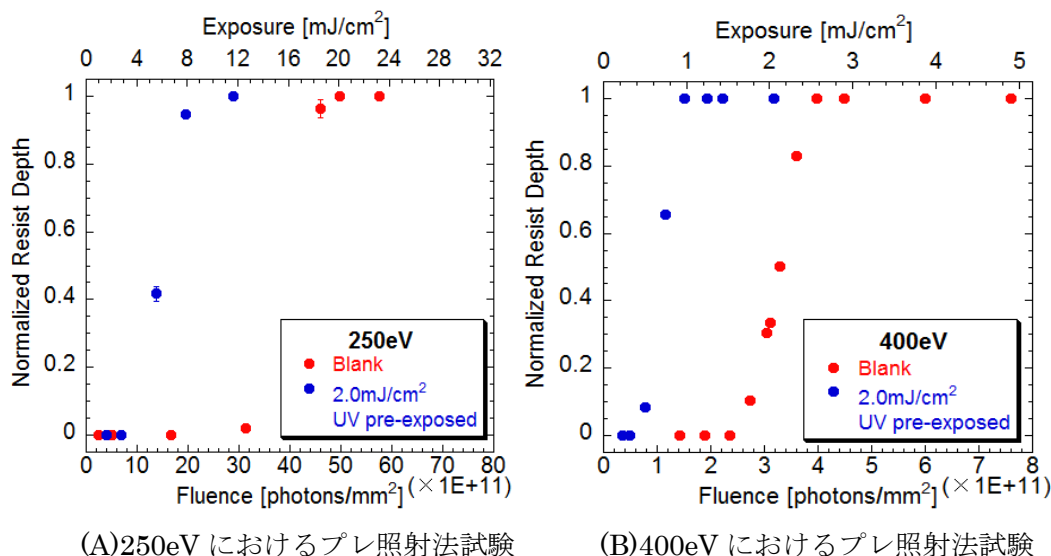


図 3 : UV プレ照射法の実証試験結果

プレ UV 照射を行っていない Blank のレジストに対して大幅に感光閾値が減少し、感度が向上していることがわかる。今回の高感度化では 2 桁は届かないが 1 桁以上の高感度化が確認でき、その感光閾値は 1×10^{13} Photons/cm² 程度(400eV)であった。次年度予定されている軟 X 線強度としては、パルスでの露光では十分でなく、分解能も 50nm を期待するのは厳しいが、まずは X 線の検出後に実証試験として行っていく予定である。

準単色 X 線源開発

レーザーコンプトン散乱 X 線の特徴として前述した③線源サイズが極小化できる点が X 線像を取得する際に有効になる。レーザーコンプトン散乱 X 線の線源サイズはレーザーもしくは電子ビームサイズで決まるため、数 μm のオーダーまで小さくすることができる。線源サイズの小さい X 線ビームを用いることによって、通常 X 線で行われている吸収コントラストによるイメージングに加え、屈折コントラスト(試料による X 線の屈折を利用し境界を強調する手法)によるイメージングが可能となる。

この特徴を実証するため、及び撮像 X 線検出器系の試験を行うために早稲田大学電子加速器を用いた準単色 X 線生成システムを構築した。その構成図を以下の図 4 に示す。加速器によって生成された約 4MeV の電子ビームはチタン窓を通り真空中から取り出され、

Bragg 反射板に入射する。本試験では X 線のエネルギー測定システムでも用いている HOPG を Bragg 反射板として採用している。HOPG に入射した電子ビームは HOPG 内で制動され、制動放射光を生成する。その中で Bragg の条件を満たした X 線が反射され、電子ビームと分けられるといった構成である。実際に検出器に届く X 線は電子ビームと反射

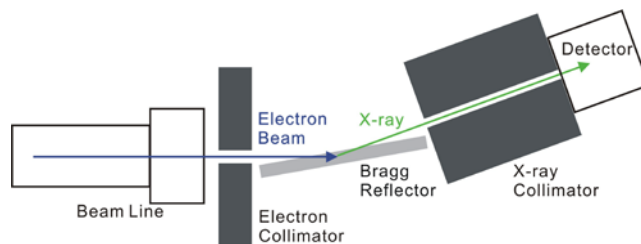


図 4 : 準単色 X 線生成システムの構成図

X線コリメータの成す角度で決まるが、4MeVの電子から生成される制動放射光は広がり角が大きいため、10%程度のエネルギー幅を持ったX線が検出器まで到達していると思われる。以下の図5にHOPGの角度に対するX線強度の測定結果を示す。

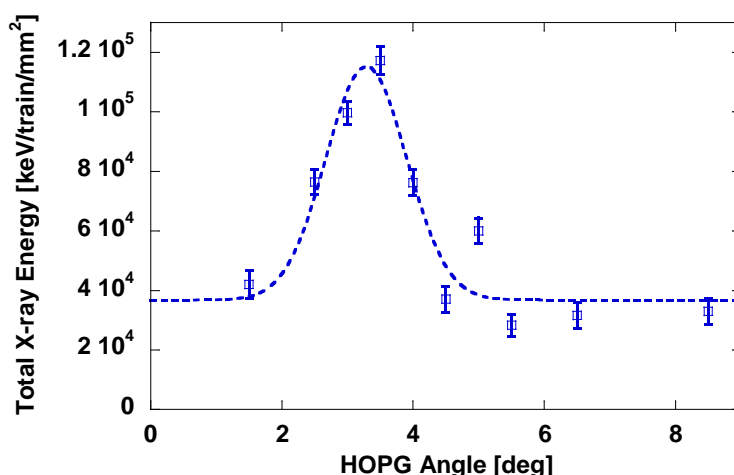


図5：検出X線強度のHOPG角度依存

この測定は反射角度7度($E_x \sim 30\text{keV}$)でのセットアップで取得した結果である。実際にHOPGの角度3.5度付近にピークが見られ、反射が行われており、かつ十分な強度が得られていることがわかる。しかしながら、いまだにベースバックグラウンドの寄与も大きく、さらなる改善が必要であるとともに、実際にBragg条件で選ばれたX線のエネルギーが検出されていることを確認する必要がある。このX線源の線源サイズは電子ビームのサイズで決まり、チタン窓直下に設置した電子ビームコリメータの径を変えることによって自由に選択することが出来る。実際にこのX線を用いてX線検出器を試験するとともに屈折コントラストイメージング像を取得することによって、線源サイズによる屈折コントラストの強弱の確認及び実機での像との比較対象として用いることができると考えている。

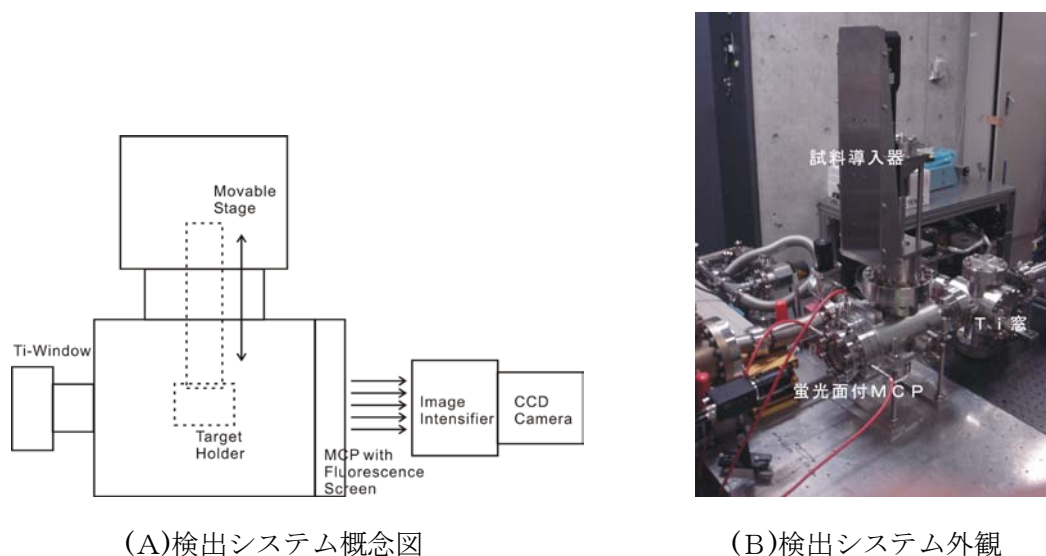
② X線検出器の検出試験

高速ゲートイメージング

本プロジェクトの最終目標として挙げられているX線のエネルギーは数keV～数10keV程度と前節のレジストがターゲットとしている1keV以下の軟X線領域とは異なっている。最終的には分解能も求める上でX線レジストなどを検討する必要があるが、前述のような高感度化の点で手軽に使用できるUV光が利用できないことなど課題は残っている。

そこで昨年度の検出器の試験結果も踏まえ、位置読み出しの可能な蛍光面付MCP(Micro-Channel Plate)と高速ゲート切り出しを行うイメージインテンシファイヤを組み合わせたイメージング装置を立ち上げた。MCPは2次電子発生効率の高い材質に多数の小さな穴を施した構造となっており、 $200\mu\text{m}$ 程度の位置分解能が期待できる。また、昨年度の試験により加速器室環境下において最高のS/Nが期待でき、かつ高速応答特性も持ち合わせている。以上のような特徴から、実証試験に使用する検出器として最適と判断し、

検出システムの構築を進めている。検出器の構成を以下の図 6 に示す。



(A)検出システム概念図

(B)検出システム外観

図 6：実証試験用 X 線検出器システム

生成された X 線はチタン窓を通り検出器システムに導入される。軟 X 線にも対応できるよう、真空を切ることなくビームラインに直接接続することも可能になっている。蛍光面付き MCP としては F2225-31、イメージンシファイヤは C9016-23(ともに浜松フォトニクス社製)を採用している。蛍光面の有効径は 40mm φ であり、広い領域のイメージングが行えるように十分な広さを確保している。蛍光面の蛍光寿命は 200~400ns(FWHM)であり、電子ビーム列の時間幅~1ms(実機)~20 μs(LUCX)に対して十分小さい。すでに早稲田大学における電子加速器を用いて生成した制動放射光を用いて動作試験は終了しており、現時点でも実機に設置して計測可能であるが、前節で述べた構築中の準単色線源を用いてさらに試験を行っていく予定である。

X 線のエネルギー計測に関しては、2 種類の手法に関して検討した。1 つは前年度に引き続き、Bragg 結晶を用いる手法、もう 1 つは検出器に入る光子数を 1X 線パルスあたり 1 個未満にし、その全エネルギーを測定する手法である。どちらの検出方式に対してもすでに特性 X 線源(Mo Kα)及びチェックソースを用いたローカルテストを行っている。Bragg 結晶を用いたスペクトロメータに関しては放射光に比べて X 線の発散角が広いいため、システムの最適化を行い、HOGP(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を用いた十分な積分強度が実現可能なシステムを構築した。1 光子検出に関しては暗電流によるエネルギー分解能の劣化を極力減らすため、素子の冷却機構を備えた CdTe 検出器を用いて、1%以下の精度で測定できることを確認した。この相補的な両手法を用いた加速器室内での X 線エネルギー測定への準備は整った状況である。

総括

昨年度研究開発を開始し、現在までに『X 線の強度(時間方向強度分布)』『X 線のエネルギー』『X 線の強度分布(撮像)』が可能な X 線検出装置を構築・開発した。X 線の強度はシンチレーション検出器・Si-PIN などの半導体検出器を昨年度開発し、時間方向強度分布は MCP を用いて検出できることを示した。X 線のエネルギーは X 線スペクトロ

メーターとして HOPG(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を用いることで測定できる。X線の撮像システムとしては蛍光面付 MCP を用いた大面積撮像システムを立ち上げた。また、本量子ビームプログラムでは前段試験として、軟 X 線領域の光子ビームの生成も来年度予定されているため、軟 X 線用の検出器としてレジスト材を用いた撮像の研究開発も平行して進めている。

来年度は今年度開発を行った準単色 X 線源において、線源サイズの比較的大きな X 線での像を取得し、実機での模擬とするとともに夏ごろから KEK-LUCX 加速器において予定されている軟 X 線生成試験に参加し、検出部を担当する予定である。また、昨年度末ごろより本プログラム内で開発(レーザー蓄積装置グループ)されたレーザー円偏光の高速切換え手法によって、X線の偏光計測の必要性が増している。上記研究項目と合わせ、偏光計測系に関して検討を行っていく予定である。

参考文献 (2009年度中の発表および掲載論文)

- [1]“Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings” Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Tsunehiko Omori, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Rev. Sci. Instrum., 80(12) (2009) 123304 1-7.
- [2]“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, J. Yang, Nucl. Instrum. Meth. A613 (2010) 1-8.
- [3] “Development of a Compact X-ray Source 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, J. Photopolym Sci. Technol. 22(5) (2009) 691-696.
- [4]“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.
- [5] “Stabilization of a Non-Planar Optical Cavity using its Polarization Property” Yosuke Honda, Hirotaka Shimizu, Masafumi Fukuda, Tsunehiko Omori, Junji Urakawa, Kazuyuki Sakaue, Hiroshi Sakai, Noboru Sasao, Optics Communications, Vol. 282, (2009) 3108-3112.
- [6] “Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring” Hirotaka Shimizu, Sakae Araki, Yoshisato Funahashi, Yosuke Honda, Toshiyuki Okugi, Tsunehiko Omori, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masao Kuriki, Shuhei Miyoshi, Tohru Takahashi, Yasuaki Ushio, Tachishige, Hirose, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Pei Guoxi, Li XiaoPing, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.78 No.7. (2009) 074501.

- [7] “Design of a mode separated RF photo cathode gun” Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Masakazu Washio, Nucl. Instrum. Meth., A600, (2009) 361-366.
- [8] “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, N. Sasao, Proceedings of Free Electron Laser Conference 2009, TUPC23 (2009)
- [9] “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)
- [10] “Present Status of a Multi-Bunch Electron Beam Linac Based on Cs-Te Photo-Cathode RF-Gun at Waseda University” Tatsuya Suzuki, Junji Urakawa, Shigeru Kashiwagi, Yuta Kato, Ryunosuke Kuroda, Kazuyuki Sakaue, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Hitoshi Hayano, Tatsuki Fujino, Akihiko Masuda, Aki Murata, Masakazu Washio, Particle Accelerator Conference 2009, MO6RFP102 (2009)
- [11] “Improvement of Compact Pico-Second and Nano-second Pulse radiolysis system at Waseda University” A. Fujita, Y. Hama, Y. Hosaka, T. Nomoto, K. Sakaue, M. Washio, S. Kashiwagi, R. Kuroda, K. Ushida, Particle Accelerator Conference 2009, TU6PFP027, (2009)
- [12] “Development of laser pulse storage in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering” Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Hirotaka Shimizu, Takashi Taniguchi, Junji Urakawa, Noboru Sasao, International Conference on Ultra-short Electron and Photon Beams, (2009)
- [13] 「早稲田大学フォトカソード RF 電子銃におけるビーム物理研究」鈴木達也, 浦川順治, 柏木茂, 加藤雄太, 黒田隆之助, 坂上和之, 高富俊和, 照沼信浩, 早野仁司, 藤野達樹, 村田亜希, 鷺尾方一, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月
- [14] 「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 (7)」坂上和之, 荒木栄, 浦川順治, 笹尾登, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田洋介, 武藤俊哉, 鷺尾方一, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月
- [15] 「早稲田大学 RF 電子銃加速器システムの現状と今後の展望」坂上和之, 青木達朗, 鈴木達也, 藤田晃宏, 別當良介, 保坂勇志, 横瀬潤一郎, 横山悠久, 鷺尾, 方一, 浦川順治, 照沼信浩, 早野仁司, 柏木茂, 黒田隆之助, 第 6 回加速器学会年会 2009 年 8 月
- [16] 「レーザー蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線生成試験及び今後の展望」坂上和之, 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, 鷺尾方一, 第 6 回加速器学会年会 2009 年 8 月
- [17] 「早稲田大学 Cs-Te フォトカソード RF 電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成システムの開発」鈴木達也, 浦川順治, 柏木茂, 黒田隆之助, 坂上和之, 高富俊和, 照沼信

浩、早野仁司、横瀬潤一郎、横山悠久、鷺尾方一，第 6 回日本加速器学会年会，2009 年 8 月

[18]「早稲田大学フォトカソード RF 電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成システムの開発」鈴木達也，浦川順治，柏木茂，黒田隆之助，坂上和之，高富俊和，照沼信浩，早野仁司，増田明彦，横瀬潤一郎，横山悠久，鷺尾方一，第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会，2009 年 11 月

[19]「KEK 小型電子加速器における RF 電子銃開発及びその利用研究」坂上和之，Abhay Deshpande，荒木栄，Alexander Aryshev，浦川順治，笹尾登，清水洋孝，高富俊和，照沼信浩，福田将史，本田洋介，鷺尾方一，第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会，2009 年 11 月

2. 3 成果の外部への発表

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
FEMTO-SECOND PROFILE MONITOR USING PULSED LASER STORAGE IN AN OPTICAL CAVITY	K. Sakaue	Free Electron Laser Conference 2009	2009 8 月	国外
3-Dimensional Beam Profile Monitor Based on a Pulse Storage in an Optical Cavity for Multi-bunch Electron Beam	K. Sakaue	Particle Accelerator Conference 2009	2009 5 月	国外
Present Status of a Multi-Bunch Electron Beam Linac Based on Cs-Te Photo-Cathode RF-Gun at Waseda University	T. Suzuki	Particle Accelerator Conference 2010	2009 6 月	国外
Development of laser pulse storage in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering	K. Sakaue	International Conference on Ultra-short Electron and Photon Beams	2009 9 月	国外
早稲田大学 RF 電子銃加速器システムの現状と今後の展望	坂上和之	第 6 回加速器学会年会	2009 8 月	国内
早稲田大学フォトカソード RF 電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成システムの開発	鈴木達也	第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会	2009 11 月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌 等名）	発表した 時期	国内・ 外の別
Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings	Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Tsunehiko Omori, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao	Rev. Sci. Instrum	2009	国外
Improvement of an S-band RF gun with a Cs ₂ Te 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, J. Yang	Nucl. Instrum. Meth, A	2010	国外
Development of a Compact X-ray Source 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	J. Photopolym Sci. Technol	2009	国内
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	2009	国外
Stabilization of a Non-Planar Optical Cavity using its Polarization Property	Yosuke Honda, Hiroataka Shimizu, Masafumi Fukuda, Tsunehiko Omori, Junji Urakawa, Kazuyuki Sakaue, Hiroshi Sakai, Noboru	Optics Communications	2009	国外

	Sasao			
Design of a mode separated RF photo cathode gun” Abhay Deshpande	Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Masakazu Washio	Nucl. Instrum. Meth., A	2009	国外

2. 4 活動

特になし。

2. 5 実施体制

別表1の通り。

別表1 平成21年度に於ける実施体制

業務項目	担当機関等	研究担当者
① X線検出器の試験装置開発	早稲田大学 理工学術院 教授 早稲田大学 理工学術院 准教授 早稲田大学 理工学術院 客員教授 早稲田大学 理工学術院 客員講師	◎○ 鷺尾 方一 片岡 淳 篠原 邦夫 坂上 和之
② X線検出器の検出試験	早稲田大学 理工学術院 教授 早稲田大学 理工学術院 准教授 早稲田大学 理工学術院 客員教授 早稲田大学 理工学術院 客員講師	◎○ 鷺尾 方一 片岡 淳 篠原 邦夫 坂上 和之

注1. ◎:業務主任者、○:実施責任者（業務計画書のⅡ.2章の2.業務項目別実施区分の業務項目と担当責任者に対応）

注2. 本業務に携わっている方(参加者リストに記載されている方)を、全て記入。