

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840049

研究課題名（和文）円環モード光共振器によるレーザーコンプトン散乱の高度化に関する研究

研究課題名（英文）Improvement of laser-Compton scattering process using a hollow-mode optical cavity

研究代表者

坂上 和之 (SAKAUE KAZUYUKI)

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：80546333

研究成果の概要（和文）：円環モードを蓄積可能な共振器を設計・開発し、実際に蓄積できることを確認した。共振器としての性能は球面ミラーを用いた共振器に対して十分なものではなかったが、今後の改善のための指針を示すことができた。レーザーコンプトン散乱の高度化に関しては十分な性能ではないため、効率化するに至っていないが、長波長(10 $\mu$ m程度)のレーザー光に関して応用することによってより高度化が図れるという結論に至った。

研究成果の概要（英文）：We demonstrated an optical cavity that supports a hollow-mode laser beam. The specifications of the cavity was not enough compared with spherical mirror cavity, but the study results showed guide lines for further development. Concerning the improvement of laser-Compton process, it is not effective by the present hollow beam cavity. However, we concluded that this technique has more potential for longer wavelength (~10 $\mu$ m) lasers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010年度	920,000	276,000	1,196,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,010,000	603,000	2,613,000

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

キーワード：レーザーコンプトン散乱・光共振器・ベッセルビーム

## 1. 研究開始当初の背景

放射光に代表されるような高品質なX線は材料科学・医療・生物学など多岐に渡る分野で利用され、多大な成果を上げてきたことは周知の事実である。既存の放射光クラスのX線を研究室レベルの小型装置によって生成することは上記多岐にわたる分野の研究の大幅な効率化が可能であるとともに分野の裾野を広げ、底上げにつながる。このような小型X線源を構築する技術として注目されているのが本研究課題の中心に位置づけている

『レーザーコンプトン散乱』である。レーザーコンプトン散乱では30MeV程度の電子ビームによって10keVを超える高エネルギーX線を得ることができ、研究室レベルの小型X線源が実現可能な技術である。我々はこれまでの研究において蓄積率600倍以上の光共振器を安定に運転することに成功し、開発した共振器を用いて高エネルギー加速器研究機構(KEK)内小型電子加速器においてすでにX線生成に成功しており、実用化への目処を立てた。この光共振器を用いる手法において欠点

として挙げられるのが、共振器内において電子ビームとの相互作用を行うため、電子ビームと共振器を構成するミラーの衝突を避ける目的で最も効率の良い正面衝突ができないことにある。現在用いている 20 度に対して正面衝突にすることによって約 7 倍の X 線強度が得られる。本研究課題ではこの点を解決し、電子ビームや光共振器への要求を少しでも軽減するために中心に穴の開いた円錐ミラーによる円環状レーザー光の蓄積を試みレーザーコンプトン散乱の高度化を図る。

## 2. 研究の目的

レーザーコンプトン散乱はその原理的に高エネルギーの高品質 X 線を比較的低エネルギーの電子ビームによって生成可能な技術であり、研究室レベルでの高品質 X 線利用が期待される。レーザーコンプトン散乱 X 線源としては十分な強度の X 線を持った装置設計がなされているが、実用には至っていないのが現状である。特に我々のグループの設計である光共振器を用いた X 線源は効率良く X 線を生成でき、かつ高輝度が期待される。しかしながら、光共振器を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線源の問題点は衝突角度を最も効率の良い正面衝突が光共振器のミラーが必要であるため、実現不可能であった。本研究課題ではさらなる効率化実現のために中心部に穴の開いた円環モードの光を固有解に持つ光共振器の開発を行い、最終的にどの程度の高度化が可能かを評価することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 円環モード光共振器の設計研究

光学設計ソフトウェアである GLAD を用いた円環モードを固有解に持つ光共振器の設計を行った。まずは簡易的に試験できる円錐プリズムを内包した形の共振器を設計し、その後円錐形ミラーを用いた設計を行った。

(2) CW レーザーを用いた円環モード蓄積試験  
波長 633nm の He-Ne レーザーを用いたプリズム内包型円環共振器の試験を行い、その後実際に使用を予定している波長 1 $\mu$ m の Nd:YAG を用いた試験を行った。YAG レーザーを用いる場合には特殊な円錐球面ミラーを用いて蓄積試験を行った。

### (3) レーザーコンプトン散乱過程の高度化に関する評価

上記評価試験を受け、レーザーコンプトン散乱に用いた場合の計算シミュレーションを行った。実際に得られる蓄積倍率及び正面衝突になることによるレーザーコンプトン散乱の高効率化のバランスが議論の対象となる。

## 4. 研究成果

### (1) 円環モード光共振器の設計研究

光学設計ソフトウェア GLAD を用いて円環モードを固有解に持つ光共振器の設計を行った。円錐プリズムを内包するタイプ(図 1)や円錐ミラーを用いる構造(図 2)など様々なタイプについて設計・評価した。実際に共振器として動作することを確認した。この際、合わせてプリズム位置・角度などに関する共振器の安定性を評価した。円錐形状のオプティクスにはこれまで用いてきた球面ミラーに比べて非常に厳しい設置精度が求められることがわかった。まずは円錐プリズム内包型から試験を開始した。

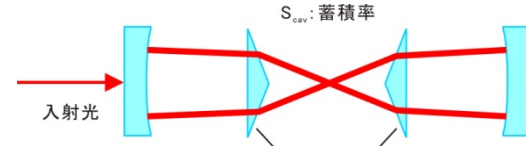


図 1: 円錐プリズム内包型共振器

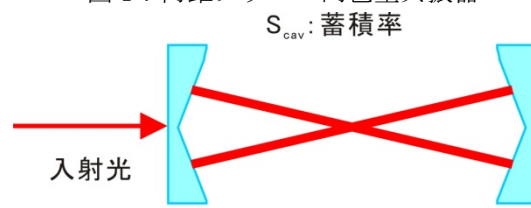


図 2: 円錐球面ミラー共振器

(2) CW レーザーを用いた円環モード蓄積試験  
まずは波長 633nm の単一周波数 He-Ne レーザーを用いてプリズムを内包するタイプの共振器によって円環モードが実現可能であることを確認した。蓄積されたレーザー光は円環モードが最も効率良く蓄積できる形状であったが、円環ではなく中心対称なより高次のモードも同時に蓄積されており、円環モードの入射効率としては 10%程度であった。これらはさらなる最適化設計も必要とするところではあるが、前述の通り円錐形の光学素子のアライメント精度の問題もある。球面より非常に厳しい精度であり、今後設置精度に対する要求を下げるための新たなアイデアが必要であることを確認した。次に円錐球面ミラーを用いた円環モードの蓄積を行った。この試験は 1 $\mu$ m の光を用いて行い、同様に円環モードの蓄積を確認した。これとともに増大率の評価を行った。共振器内における増大率としては特殊光学部品の透過率及び反射率が十分でないために 10 程度と小さな値であった。フィネスとしては約 30 に相当する。さらに入射効率としても 20%程度と小さい値であり、実用に向けてはさらなる改善が必要であることを確認した。特に特殊光学部品に関して改良が必要であるが、改良は当面厳しいようであり、増大率の向上の目処は立っていないのが現状である。実際に試作及び試験を繰り返し、実用に堪えるオプティクスを製作する必要がある。また、当初問題視し

ていた収差などの影響に関しても増大率が小さいため、収差の蓄積がなく、優れた測定はできなかった。これは今後の課題として挙げられる。

(3) レーザーコンプトン散乱過程の高度化に関する評価

以上、本研究課題において試験してきた共振器を用いた場合と従来の球面ミラーによる共振器とで、レーザーコンプトン散乱においてどの程度の効率化が見込めるかをシミュレーションによって比較検討した。共振器の長さなど様々なパラメータの調整が考えられるが、今回は2009年に研究代表者が行った実験との比較を行った。衝突角度を正面にでき、効率が向上する。また、正面衝突ゆえにレーザー・電子それぞれの時間幅を比較的自由に設定できる。これらを合わせて10倍程度効率は上がる。しかしながら、増大率の分を補うには至らない。したがって最低でも増大率100程度、かつ共振器への入射効率を向上させた共振器の開発が必須となる。

(4) 総括と今後の展望

まずは円環モードの光を蓄積可能であることを確認したことで、新たな研究テーマにメスを入れることができたと考えている。また、以降の設計方針として非常に重要な知見(設置精度に関する点・入射効率に関する点)を蓄積できたことも次に繋がる成果として挙げられる。本研究課題では提案・検討は行っていないが、波長 $10\mu\text{m}$ の $\text{CO}_2$ レーザーはレーザーコンプトン散乱に用いるのに非常に効率が良いレーザー光である。散乱による生成光子数は波長に比例して増加する。本研究において得られた成果は特に $\text{CO}_2$ レーザーに効果的に利用できると考えている。 $10\mu\text{m}$ の波長領域では球面ミラーの透過率・反射率が低く、高い増大率が得られにくく相対的に本研究による効果が大きくなる。また円錐形状のオプティクスに関してはレーザー加工において広く用いられているため、より高精度なものが期待できる。 $\text{CO}_2$ レーザーは電子ビームほどの短パルス化は非常に困難であるが円環モード光共振器を用いて正面衝突にすることによってパルス幅に関する制限が緩くなる。以上のように利点ばかりが挙げられ、 $1\mu\text{m}$ に比べて非常に有用な手法となると期待している。今後は $10\mu\text{m}$ への利用を検討していく。

## 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)

- ① Kazuyuki Sakaue, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Tatsuya Suzuki,

Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at the Waseda University, Nuclear Instruments and Methods B, 査読有, in press, accepted.

- ② Akira Endo, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Progress of high average power, short-pulse laser technology for the Compton X-ray source, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 637, Issue 1, 2011, S33-S36.

- ③ Abhay Deshpande, Sakae Araki, Tanuja Dixit, Masafumi Fukuda, R Krishnan, Sanjay Pethe, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, S-band linac-based X-ray source with  $\pi/2$ -mode electron linac, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 637, Issue 1, 2011, S62-S66.

- ④ Masafumi Fukuda, Sakae Araki, Abhay Deshpande, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Kazuyuki Sakaue, Noboru Sasao, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Upgrade of the accelerator for the laser undulator compact X-ray source (LUCX), Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 637, Issue 1, 2011, S67-S71.

- ⑤ Kazuyuki Sakaue, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Noboru Sasao, Hirotaka Shimizu, Takashi Taniguchi, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 637, Issue 1, 2011, S107-S111.

- ⑥ S. Miyoshi, T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, T. Hirose, Y. Honda, M. Kuriki, X. Li, T. Okugi, T. Omori, G. Pei, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, N. Terunuma, J. Urakawa, Y. Ushio, M. Washio, Photon generation by laser-Compton scattering at KEK-ATF, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 623, Issue 1, 2010, 576-578.

- ⑦ N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kammiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki, J. Yang, Improvement of an S-band RF gun with a Cs<sub>2</sub>Te photocathode for the KEK-ATF, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, Vol 613, Issue 1, 2010, 1-8.

- ⑧ Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo

Higashi, Yosuke Honda, Tsunehiko Omori, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol 80, 2009, 123304-1-7.

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 坂上和之、早稲田大学フォトカソード RF 電子銃におけるマルチバンチ電子ビーム生成、第 8 回高輝度・高周波電子銃研究会、2011 年 1 月 11 日、東広島
- ② Kazuyuki Sakaue 他、Cs-Te photo-cathode RF electron gun for applied researches at Waseda University、10<sup>th</sup> European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology、2010 年 9 月 14 日、Athens (Greece)
- ③ 坂上和之他、早稲田大学フォトカソード RF 電子銃における応用研究の現状と今後の展望、第 7 回日本加速器学会年会、2010 年 8 月 4 日、姫路
- ④ Kazuyuki Sakaue 他、Design of High Brightness Light Source Based on Laser-Compton Undulator for EUV Lithography Mask Inspection、International Particle Accelerator Conference 2011、2010 年 5 月 24 日、京都
- ⑤ 坂上和之、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、第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会、2009 年 11 月 26 日、仙台
- ⑥ Kazuyuki Sakaue 他、Femto-second Profile Monitor using Pulsed Laser Storage in an Optical Cavity、Free Electron Laser Conference 2009、2009 年 8 月 25 日、Liverpool (UK)
- ⑦ 坂上和之他、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、第 6 回日本加速器学会、2009 年 8 月 6 日、東海村
- ⑧ Kazuyuki Sakaue 他、3-Demensional Beam Profile Monitor Based on a Pulse Storage in an Optical Cavity for Multi-bunch Electron Beam、Particle Accelerator Conference 2009、2009 年 5 月 6 日、Vancouver (Canada)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂上 和之 (SAKAUE KAZUYUKI)  
早稲田大学・理工学術院・助教  
研究者番号：80546333