

## DEVELOPMENT OF A SOFT X-RAY SOURCE BASED ON INVERSE COMPTON SCATTERING AT WASEDA UNIVERSITY\*

Akihiko Masuda<sup>1,A)</sup>, Chiaki Igarashi<sup>A)</sup>, Takashi Kashino<sup>A)</sup>, Tomoko Gowa<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Ryo Moriyama<sup>A)</sup>,  
Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Kiminori Ushida<sup>B)</sup>, Junji Urakawa<sup>C)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>C)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>D)</sup>, Yoshio Kamiya<sup>E)</sup>,  
Ryunosuke Kuroda<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

<sup>B)</sup> RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (ISIR)

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>E)</sup> the University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

<sup>F)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

### Abstract

A table-top size soft X-ray source based on inverse Compton scattering has been developed at Waseda University. We have already succeeded in generating soft X-rays via inverse Compton scattering between 4.6 MeV electron beam generated from a photocathode RF-gun and Nd:YLF 1047 nm laser [1]. The energies of the generated soft X-ray are within the “water window” region which can be applied to the soft X-ray microscope for biological observation. We remodelled the collision chamber and laser amplifier system for further soft X-ray photons and S/N. As a result, the number of the detected soft X-ray photons reached 312/pulse, the total generated photons reached  $3.28 \times 10^4$ /pulse, and the S/N reached 123. Moreover, we succeeded in stable soft X-ray generation for 12 hours and some other application measurements.

## 早稲田大学における逆コンプトン散乱を用いた水の窓領域軟X線源の開発

### 1. はじめに

早稲田大学理工学研究所ではフォトカソードRFガンを用いて生成することのできる高品質電子ビームを用いた応用実験の一つとして、逆コンプトン散乱による水の窓領域軟X線源の開発を行っている[2]。逆コンプトン散乱は、高エネルギーの電子ビームで光子を散乱させることによってより短波長な光（X線）を生成する過程で、実験室系座標からFig. 1のように捉えることができる。

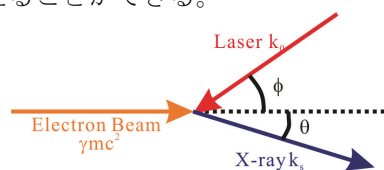


Fig. 1: Inverse Compton scattering.

散乱X線のエネルギー  $k_s$  は

$$k_s = \frac{\gamma^2 k_0 mc^2 (1 + \beta \cos \phi)(1 - \beta \cos \theta)}{mc^2 + (1 - \cos \theta)(1 - \beta \cos \phi) \gamma k_0} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $k_0$  及び  $\gamma mc^2$  は入射光子及び電子ビームのエネルギー、 $\phi$  及び  $\theta$  は衝突角及び散乱角である。逆コンプトン散乱による生成X線の特徴としては、短パルス性、準単色性、エネルギー可変性、装置のコンパクト性が挙げられる。さらに、当研究室の加速器システムで生成できるX線は250-500 eVの軟X線であり、Fig. 2に示す「水の窓領域」と呼ばれるエネルギー領域に属している。この水の窓領域では、炭素及び窒素のK殻吸収端を含む一方で水による吸収の影響を受けにくい[3]た

<sup>1</sup> E-mail: a-masuda@suou.waseda.jp

\*Work supported by MEXT High Tech Research Project HRC707, JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B)(2) 16340079, and JSPS Fellows (19-5789).

め、水分を含む生体を脱水等の処理をすることなく高分解能で観察できる生体軟X線顕微鏡への応用が期待されている。

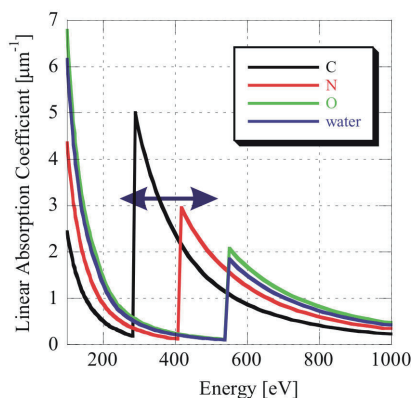


Fig. 2: K-shell Absorption edges of elements constituting biological bodies.

## 2. 軟X線生成システム

早稲田大学の加速器システムをFig. 3に示す。フォトカソードRFガンで生成された電子ビームはソレノイド電磁石、四極電磁石を経て衝突点に収束される。カソード照射に用いるのはPulrise Vで生成されたNd:YLFレーザーの4倍高調波(UV, 262nm)である。逆コンプトン散乱の衝突用レーザーは、同じくPulrise Vで生成された基本波(IR, 1047nm)を外部のフラッシュランプで増幅したもので、タイミング調整用のディレイラインを経て衝突点に集光される。衝突点で生成した軟X線は、ビームライン下流のMCPで検出し、衝突点を通過した電子ビームは直後に偏向電磁石によってビームラインから分離しダンプする。

以上のシステムは2.0m×2.5mのサイズに収まっており、テーブルトップサイズの逆コンプトン散乱軟X線生成システムとして、2005年度までに軟X線の生成に成功している[4]。2006年度は、生成及び検出軟X線量の増大とS/Nの改善を目指し、次の2点の改善を行った上で軟X線生成試験を行った。

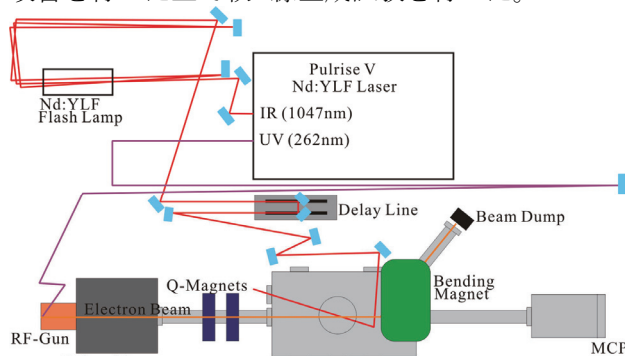


Fig. 3: Soft X-ray generation system of Waseda Univ.

### 2.1 衝突チャンバーの改造

Fig. 4に示すように衝突チャンバーの改造を行った[5]。これによる利点は、

- 偏向電磁石設置用チャンバーを衝突チャンバーと一体化させることで、衝突点を通過した電子ビームが発散する前にビームラインから分離できるようになり、電子ビームの制動放射によるバックグラウンドの低減を図ることができる。また、これにより、衝突点における電子ビームの強収束が可能になり、ルミノシティの増大が見込め、さらにはMCPまでの距離が小さくなり検出光子数の増大が見込まれる。
- 衝突チャンバー内全体を中空にし、ガイドパイプを省くことにより、電子ビーム及びIRレーザーによるバックグラウンドを低減できる。
- 衝突チャンバー内に可動式ミラーを導入することにより、衝突角が約15-20degの範囲で可変となる。

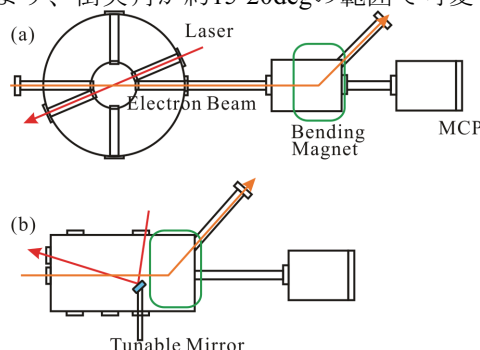


Fig. 4: Schematics of (a)old chamber and (b)new chamber.

### 2.2 レーザーアンプシステムの改善

衝突用IRレーザーは、これまで外部のフラッシュランプアンプシステムを2回通過させる2-passアンプを行っていたが、よりパワーを増強し逆コンプトン散乱のルミノシティの増大を図るため、Fig. 5に示すような3-passアンプシステムを構築した。

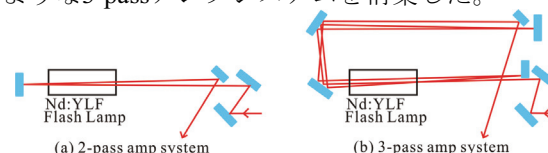


Fig. 5: Flash lamp laser amplifier system.

## 3. 実験結果

### 3.1 軟X線生成試験

2006年度に軟X線生成試験で得られたシグナルをFig. 6に示す。破線は2005年度までに得られていたシグナルである。また、本試験時の電子ビーム及び衝突用レーザーのパラメータをTable 1に示す。そして、このシグナルから求めた軟X線の検出光子数、総発生光子数、S/NをTable 2に示す。種々の改善の結果、検出光子数で約10倍、S/Nで約90倍の軟X線を生成することに成功した。さらに、検出光子数やS/Nが大きく改善したことにより、これまで行えなかった応用実験にも成功したので、以下に報告する。

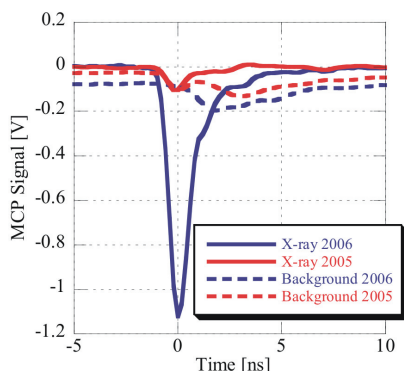


Fig. 6: Soft X-ray signal detected by MCP.

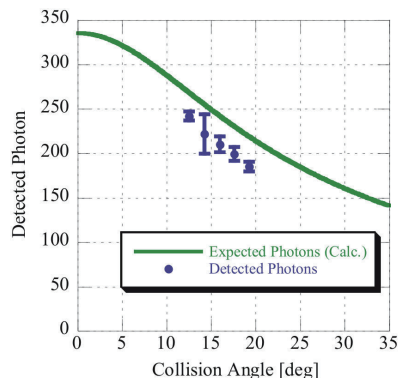


Fig. 8: Collision angle dependence measurement.

Table 1: Parameters of electron beam and laser for soft X-ray generation.

Electron Beam		IR Laser	
Energy	4.6MeV	Wave length	1047nm
Charge	350pC	Power	36mJ
Beam size	251μm	Spot size	42μm
	56μm		42μm
Bunch length	<10ps	Pulse Width	10ps

Table 2: Generated soft X-ray signal.

	2005	2006
Detected photons	30	312
Generated photons	$6.87 \times 10^3$	$3.28 \times 10^4$
S/N	1.4	123

### 3.2 逆コンプトン散乱を用いた電子ビームサイズの測定

衝突チェンバー直前のミラーを操作してレーザーの照射位置を変化させて生成軟X線量を計測することで、衝突点における電子ビームサイズを計測した。その結果をFig. 7に示す。これより、衝突点における電子ビームサイズは250μm (horizontal)、56μm (vertical)と求まった。

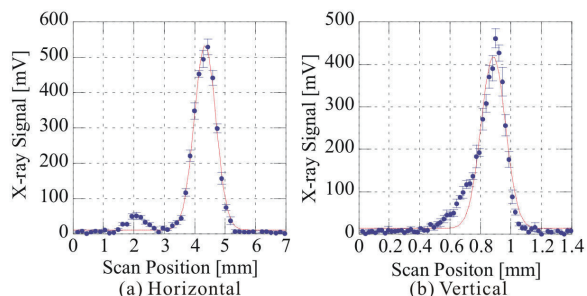


Fig. 7: Beam size measurement via inverse Compton scattering.

### 3.3 ルミノシティの衝突角依存試験

衝突チェンバー内のミラーを操作することにより逆コンプトン散乱の衝突角を操作し、ルミノシティの衝突角依存性を測定した。その結果はFig. 8に示すように、理論曲線に準じる挙動を示した。

### 3.4 長時間の軟X線生成試験

軟X線長時間安定生成実験を行い、Fig. 9に示すように約12時間の安定生成に成功した。軟X線の安定生成は、今後の開発過程や実際の応用において非常に重要である。さらに安定度を高めるためには、フラッシュランプを含めたレーザーシステムのさらなる安定化が必要であると考えられる。

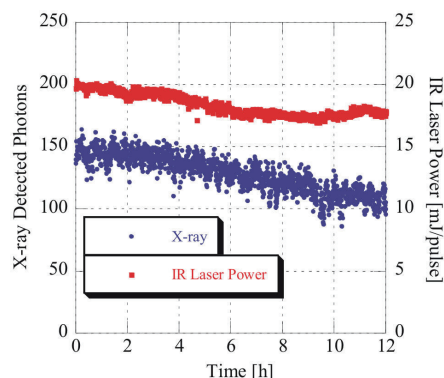


Fig. 9: Stable soft X-ray generation.

## 4. まとめと今後の予定

衝突チェンバーとレーザー増幅システムを改良し、検出光子数で約10倍、S/Nで約90倍の水の窓領域軟X線を得ることに成功した。また、これに伴って可能となった応用実験として、逆コンプトン散乱を用いたビームサイズ測定、ルミノシティの衝突角依存性試験、12時間の軟X線安定生成にも成功した。

今後は、CCDを用いた生成軟X線の2次元分布の取得を試みる。また、単位時間当たりの生成軟X線量をさらに増大するために、逆コンプトン散乱のマルチパルス化について検討する。

## 参考文献

- [1] S. Kashiwagi, et al., J. Appl. Phys., 98, 123302 (2005).
- [2] T. Gowa, et al., Proceedings of this meeting FP15.
- [3] B. L. Henke, et al., Atomic Data and Nuclear Data Table 27 (1982).
- [4] R. Kuroda, et al., Proceedings of EPAC'04, p.2684 (2004).
- [5] R. Moriyama, et al., Proceedings of 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, p.710 (2006).