

早稲田大学における逆コンプトン散乱による軟 X 線生成

長澤章雄¹⁾、石川裕記、柏木茂、川合啓、黒田隆之助、濱義昌、前田健一、鷲尾方一

早稲田大学理工学総合研究センター

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

概要

早稲田大学理工学総合研究センターでは、現在レーザーフォトカソード RF-gun システムを用いたテーブルトップサイズの高輝度 X 線発生装置の開発を行っている。この装置は、生体観測用 X 線顕微鏡への応用を目指すものであり、波長 1047nm、パルス幅約 10ps (FWHM) の IR レーザーとエネルギー約 4 MeV、パンチ長約 10ps (FWHM) の電子ビームを逆コンプトン散乱させることで、約 200~450eV の軟 X 線を生成することができる。これにより得られる X 線は約 10ps (FWHM) と非常に短パルスであり、また逆コンプトン散乱による X 線発生方式は衝突角を変化させることにより生成 X 線の波長を変えられるという特徴もある。今回は衝突のタイミング調整、検出器のバックグラウンド測定などを行い、その後、衝突予備実験を行った。本研究では、それらの結果について報告する。

1. はじめに

現在、高輝度短パルス X 線は物理、化学のみならず医療、産業等様々な分野で求められている。また、その発生方法についても多くの研究が行われており、中でも逆コンプトン散乱による X 線発生方式は、高輝度・短パルス・エネルギー可変性などの有用な特徴を兼ね備えたものとして大変注目されている[1-4]。これまで、逆コンプトン散乱による X 線発生は、非常に困難であったが、近年の電子ビームの高品質化、レーザー制御技術の発展により、十分可能なものとなってきた。現在早稲田大学では、レーザーフォトカソード RF-gun システムを用いたテーブルトップサイズの高輝度 X 線発生装置の構築と、生体観測用 X 線顕微鏡への応用を目指して研究を進めている。

2. 逆コンプトン散乱

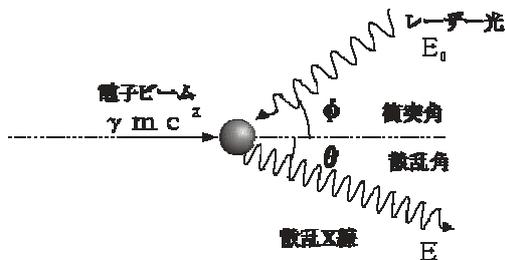


図 1. 逆コンプトン散乱概念図

通常のコンプトン散乱は静止している電子に高エネルギーの光子が衝突して電子を弾き飛ばすもので

あり、光子のエネルギーの一部が電子の運動エネルギーとなる。一方、高エネルギーの電子と IR 光のような低エネルギーの光子とを衝突させると、光子が電子のエネルギーの一部を受け取るために衝突前に比べてエネルギーが増加し X 線となって散乱される。これが逆コンプトン散乱であり、電子の静止系で見ればレーザー光の後方へのコンプトン散乱である。このときの散乱される X 線のエネルギーは、図 1 の角度などを用いて次式で表すことができる。

$$E = \frac{\gamma^2 mc^2 (1 + \beta \cos \phi) (1 - \beta^2) E_0}{mc^2 (1 - \beta \cos \theta) + (1 - \beta)(1 + \cos \theta)(1 + \beta \cos \phi)} E_0$$

ここで、 β はそれぞれ電子ビームの速度と光速の比、ローレンツ因子である。上式から分かるように衝突角 ϕ 、電子ビームエネルギー γmc^2 、レーザー光子のエネルギー E_0 を変えることで散乱 X 線のエネルギー E を変化させることができる。また、散乱される X 線はエネルギーによって散乱角が異なるため、小さな角度だけを切りだせば非常に単色性の良い X 線が得られる。図 2、3 に、電子ビームのエネルギー：5MeV、レーザー波長：1047nm の場合の生成される X 線のエネルギー、角度依存性等の計算結果を示す。

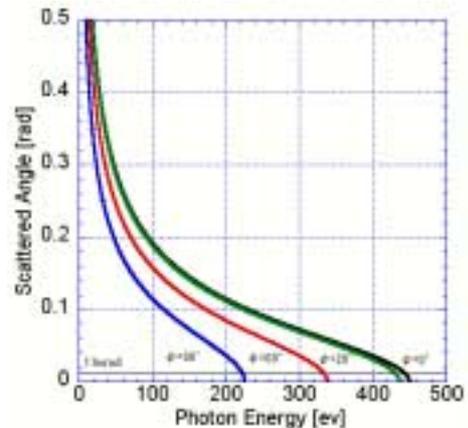


図 2. X 線のエネルギーと散乱角

今回の早稲田大学における衝突実験では、電子ビームのエネルギーは約 4MeV、IR レーザー光の波長は 1047nm であり、上式を用いて生成 X 線の最大エネルギーを計算すると正面衝突の場合に約 430eV と計算できる。この付近のエネルギーは水にはほとんど吸収されない「水の窓」と呼ばれるエネルギー領域である。また、この波長領域には生体内に多く含まれる窒素、炭素、酸素などの K 吸収端が存在し、この領域の X 線を生体に照射し、吸収率の差によるコントラストをとれば、試料を脱水することなく細胞が生きた状態で窒素、炭素、酸素などの分布を観

¹⁾ E-mail: fumio230@toki.waseda.jp

察できる。これらのことは、光学・電子顕微鏡にはない軟 X 線顕微鏡の特徴である。

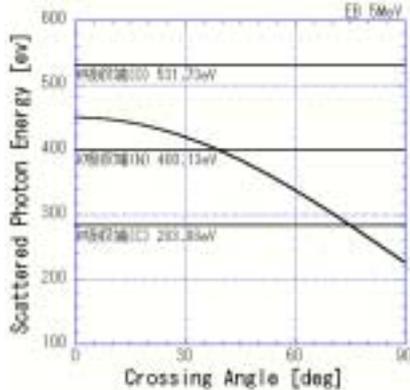


図 3. 衝突角 と X 線のエネルギー及び C, N, O の K 吸収端

また、生成 X 線の全光子数はクライン 仁科の公式から求めた実験室系での全微分断面積 と、ビームの形状などで決まるルミノシティ L から次式のように求められる。

$$N = L$$

この式から分かるように高輝度の X 線を得るためにはルミノシティを大きくする必要があり、それには電子ビームとレーザーを絞り込む必要がある。本 X 線発生システムで生成される光子数を上式より見積もると、電子ビーム：4 MeV、1 nC、IR レーザー光：1047nm、1.5mJ で両者を約 100 ミクロンのサイズまで絞り込み、20 度の角度で衝突させた場合、予想される生成光子数は おおよそ 10^4 個のオーダーである。

3 . 実験セットアップ

図 4 に、我々が早稲田大学理工総研喜久井町キャンパス内第 2 研究棟地下 2 階実験室に構築している、X 線発生装置の概略図を示す。ビームラインは、RF-gun、エミッタ補正用のソレノイド電磁石、電子ビーム集束用の 4 極電磁石、エネルギー測定及び散乱 X 線 - 電子ビーム分離用の偏向電磁石、ビーム診断装置(ビームポジションモニタ、ビームプロファイルモニタ、ファラデーカップ)などで構成されている。また、レーザーシステムを同加速器室に、高周波源のクライストロンを別室に設置した。

本加速器システムは、まず主発振器からの基準信号 2856MHz をもとに、クライストロン励振用 RF (2856MHz)、レーザー用基準信号 (119MHz)、ビーム繰り返し信号 (Max:25Hz) などが作り出され、クライストロンなどの RF 系やレーザー系へと分配される (図 5 参照)。RF 電子銃については、クライストロンで発生される最大 10MW のピークを持つ高周波が RF-gun 空洞に送られ、それが空洞内に蓄積され高電界を誘起する。一方、レーザー系からは基準 RF に同期したピコ秒 UV 光を RF-gun 内部のカソード面に照射し、光電効果によりパルス的に電子を発

生させる。カソードから発生した電子は、RF 空洞内に誘起した高電界により高エネルギーに加速され、ソレノイド電磁石によりエミッタ補正を受けながら電子ビームとして取り出される [5]。

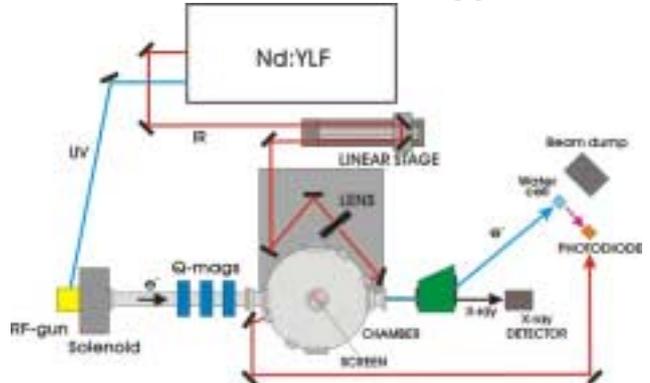


図 4. 早稲田大学 X 線発生システム

本研究のレーザーシステムは、全固体ピコ秒 Nd:YLF レーザーシステム(住友重機械製 PULRISE V)を採用している。このレーザーシステムは Seed 発振器部、再生増幅部、高調波発生部から構成されている。発振器部では、波長 1047nm のレーザーを、2856Hz の基準信号に同期した 119MHz で受動モードロック発振させる。これを再生増幅部で増幅し、ポッケルスセルにより最大 25Hz で切り出すことができる。高調波発生部において、非線形結晶 (BBO) を 2 段用いることにより、4 倍高調波 (262nm) を発生させ、カソード照射用 UV 光とする。一方基本波 (1047nm) は、プリズムを用いて衝突実験用の IR 光として取り出している。このように、UV 光と IR 光は 1 つの Seed パルスから作られているため、電子ビームと IR 光は高い精度で同期を取ることができる。

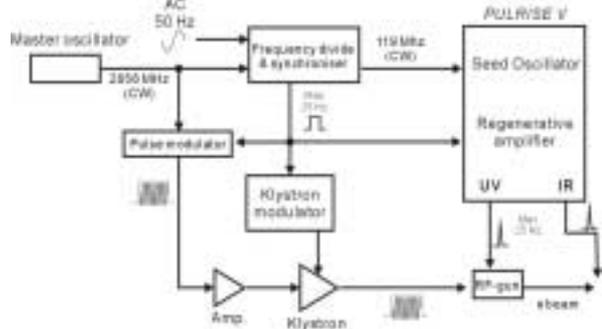


図 5. タイミング系

表 1. レーザーと電子ビームのパラメータ

IR レーザー	波長	1047nm
	強度	2mJ
	パルス幅(FWHM)	10ps
電子ビーム	ビームサイズ(rms)	80 μm
	エネルギー	4.0MeV
	電荷量	1.5nC
	パンチ長(FWHM)	10ps
	ビームサイズ(rms)	300 μm

また今回のビーム実験を行うために、衝突用の真空円形チェンバーを製作した。これには3つのレーザー入射ポートが設けられており、20°、60°、90°の角度での衝突実験が行えるようになっている。X線の検出器としてはEM管(電子管)を用い、偏向電磁石の下流、衝突点から0.6mの位置に設置した。この電子管の有効面積から、検出有効散乱角は11mrad程度であり、約1%の単色なX線を検出することができる。

4. 衝突予備実験

衝突予備実験として、3つの衝突角の中ではルミノシティが最も高い20°に衝突角を固定して行った。まずIR光を20°の角度からコンプトンチェンバー内に入射し、チェンバー内の衝突点に光学レンズを用いて集光させ、さらに電子ビームをIR光と衝突するように位置合わせ及び集束を行った。このときの衝突点でのビームサイズは電子ビームが約300μm、IR光が約80μmであった。図6は、衝突点に設置した蛍光スクリーン上での、電子ビームとIRレーザー光のプロファイルであり、これを見ながら位置調節を行った。

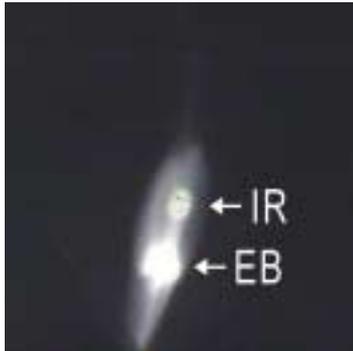


図 6. IR と電子ビームのプロファイル

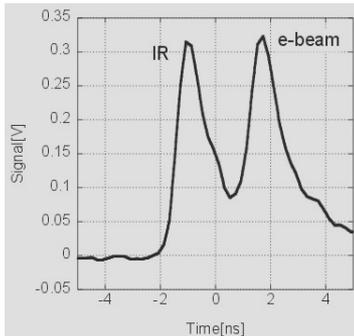


図 7. IR と電子ビームのタイミング

電子ビームとIR光のタイミング調整については、図4に示すように、まず電子ビームを偏向電磁石で45度曲げた下流でTiホイルにより大気に取り出し、水のセルに照射しチェレンコフ光に変換した。そしてこのチェレンコフ光をフォトダイオードを用いてIR光とのタイミングを観測しながら光学ディレイを操作した。このように同一の検出器を用いることにより、時間応答性を考慮せずに幾何学的な距離のみ

によってタイミング調整が出来るようにした。その際のフォトダイオードの信号を図7に示す。

次に、EM管検出器のバックグラウンド測定の結果を図8に示す。バックグラウンドの原因は主に電子ビームのつくる制動放射や空洞内の暗電流等起因するノイズ、UV光のカソード上での散乱などによるものが考えられる。EM管の時間応答は2.5nsと速いため、時間構造の違いから暗電流とその他のノイズを区別することができる。

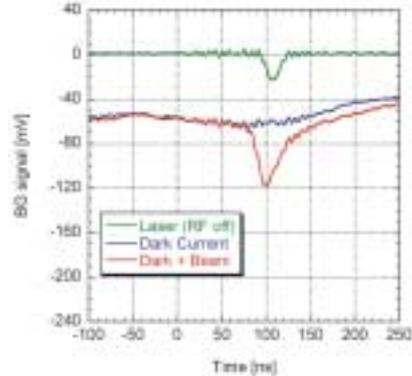


図 8. EM 管のバックグラウンド測定結果

5. 今後の課題

今回の予備実験だけでは、X線信号を検出することはできなかった。これは、電子ビームの集束が十分でなかったと考えられる。今後は4極電磁石を最適化し、十分な電子ビームの絞込みを行うことで生成光子数を増やす予定である。表2に、電子ビームのビームサイズを水平、垂直方向にそれぞれ絞ったときの、生成光子数の計算結果を示す。またIRレーザーについても、フラッシュランプ励起によるNd:YLFレーザー増幅器を設置し、エネルギーの増強を計画している。これらの改善により、S/N比の向上が見込まれ、信号検出を実現することができると考えている。

表 2. ビームサイズを変化させたときの発生光子数

$\sigma_h \backslash \sigma_v$	100	200	300
100	1.8×10^4	1.6×10^4	1.3×10^4
200	9.8×10^3	8.7×10^3	7.5×10^3
300	6.7×10^3	5.9×10^3	5.2×10^3

6. 参考文献

- [1] W. Leemans et al., Proceeding of the 1995 Particle Accelerator Conference, 1995, p.174
- [2] S. Kashiwagi et al., Nuclear Instrument and Methods A 455, p. 36-40 (2000).
- [3] I. V. Pogorelsky, et al., Phys. Rev. ST-AB, Vol.3: 090702, (1999)
- [4] M. Yorozu et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001) pp.4228-4232 Part 1, N0.6A, June 2001
- [5] D. T. Palmer et al Proceeding of the 1997 Particle Accelerator Conference, 1997, p. 2843