

# 収束電子ビームを用いた高強度レーザーの直接プロファイル計測法の開発 DIRECT HIGH POWER LASER DIAGNOSTIC TECHNIQUE BASED ON FOCUSED ELECTRON BUNCH

佐藤令<sup>\*A)</sup>、野々村洸<sup>A)</sup>、五十嵐大祐<sup>A)</sup>、坂上和之<sup>A)</sup>、遠藤彰<sup>A)</sup>、鷲尾方一<sup>A)</sup>

Ryo Sato<sup>\*A)</sup>, Ko Nonomura<sup>A)</sup>, Daisuke Igarashi<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Akira Endo<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup>Waseda University

## Abstract

We have been developing laser profiler based on laser Compton scattering in Waseda university. Laser profile can be measured by scanning focused electron beam while measuring Compton scattering signal. This method is suitable for a high intensity laser, but very small spot size of electron beam is required. To achieve small spot size, we use S-band photocathode rf gun and specially designed solenoid lens. The beam size was simulated by General particle tracer (GPT) and directly measured by Gafchromic film HD-810. We have succeeded in observing minimum beam size of about 20  $\mu\text{m}$  rms. We are preparing beam scanning system, pulse CO<sub>2</sub> laser and a detector for Compton signal. In this conference, we will report the results of focused electron beam measurement and future prospect.

## 1. はじめに

近年、超高強度レーザーの生成が可能となり、様々な分野で利用されている。原子核・原子力分野の研究ではペタワットといった強度のレーザーも利用されており、今後これらの利用がより活発になると考えられる。しかし、このようなレーザーのプロファイルを直接スポットで計測する手法は未確立である。収束点での診断法を確立することはレーザー利用において非常に重要な知見を提供する。

我々は電子ビームを用いた高強度レーザーの直接プロファイル計測法の開発を行っている。収束した電子ビームをレーザーと垂直に衝突させ、レーザーを電子ビームでスキャンする。このときに生じるレーザーコンプトン散乱光の強度を計測することでレーザーのプロファイルを得ることができる。電子ビームとレーザーの強度分布をガウシアン分布と仮定し、それぞれのビームサイズを $\sigma_e, \sigma_l$ とする。電子ビームの位置に対するレーザーコンプトン散乱光の分布 $\sigma_{meas}$ は次のように表せる。

$$\sigma_{meas} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_l^2} \quad (1)$$

この関係から電子ビームのスポットサイズをレーザー径よりも十分小さくすることでレーザーのプロファイルを得られることがわかる。この方法であればレーザーの強度が高くても直接そのプロファイルを計測することができる。また各方向からのスキャン結果をCT(Computed Tomography)によって再構成することで、2次元の強度分布を得ることも可能であり、最終的にはそのような実装を目標としている。

まずはCO<sub>2</sub>レーザーをターゲットとする。ハイパワーなCO<sub>2</sub>レーザーは様々な分野で利用されており、近年は次世代の半導体露光技術であるEUVL(Extreme Ultraviolet Lithography)においてはプラズマ源として活発に研究されている<sup>[1]</sup>。EUVLでは100kHz, 200mJといった高強度のCO<sub>2</sub>レーザーが必要となり、この収束点での計測を可能とすることでEUV生成効率の向上、強度の安定化に貢献できる。

このプロファイラーの実現のためには数MeV程度の電子ビームをレーザー径よりも小さく絞る必要がある。我々は早稲田大学のフォトカソードrf電子銃システムとソレノイド電磁石を用いてこの電子源の開発を行っている。rf電子銃で生成した5MeVの電子ビームをソレノイド電磁石で数10 $\mu\text{m}$ まで収束する。本発表では収束電子源システムと収束電子ビームの計測、走査試験の結果について報告する。

## 2. 早稲田大学加速器システム

早稲田大学ではフォトカソードrf電子銃を用いたビーム基礎研究、様々な応用研究を行っている。フォトカソードrf電子銃は、フォトカソードで生成した電子ビームをrf空洞内の加速電界ですぐさま加速することによって、低エミッタンス、短パンチな5MeV程度の電子ビームを生成することができる。このrf電子銃システムを改良するとともに、レーザーコンプトン散乱<sup>[2]</sup>やパルスラジオリシス<sup>[3]</sup>といった応用研究を行っている。

加速空洞はBNL-TypeIVのデザインを基としており、高Q値と暗電流削減のため空洞を最適化したものを使用している<sup>[4]</sup>。rf周波数は2856MHz(S-band)を用いている。カソードにはMoプラグにCs-Teを蒸着したものを使用している。量子効率0.1%程度であり、1nC/bunchの電子ビームを生成できる。

シードレーザーはNd:YLFモードロックレーザーを用いており、その繰り返し周波数は119MHzである。LN変調器によってパルス切り出しを行っており、1から100バンチまでの運転が可能である。切り出されたレーザーパルスは、Ybファイバーアンプ、LDアンプを用いて増幅される。増幅後、LBO(SHG)とBBO(FHG)によって波長変換されカソードに照射される。

図1に早稲田のビームラインの概要図を示す。rf電子銃、UVレーザーシステムと各種の電磁石が含まれている。我々の加速器システムは全長で3m程度と非常にコンパクトな構成となっている。ソレノイドは3つ使用している。Solenoid1は電子銃直下に配置され、エミッタンス補正に用いられる。Solenoid2, Solenoid3はそれぞれレーザー衝突点への電子ビーム収束、収束後発散を抑えるために用いられる。偏向電磁石はビームのエネルギ-

\* wase-nishicab61@akane.waseda.jp

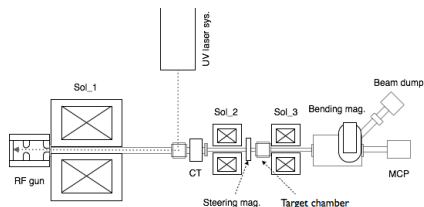


Figure 1: Schematic design of Waseda beam line.

計測、コンプトン散乱光と電子ビームの分離に用いる。3つのアルミナ蛍光板 (Demarquest Co.) とステアリング電磁石を用いてビームをコントロールしている。レーザーコンプトン散乱光の検出には MCP (Micro-Channel Plate) を用いる。衝突点から約 81cm 下流に設置されており、検出有効散乱角は 37mrad である。

### 3. 収束電子ビーム生成

#### 3.1 GPT Simulation

本研究ではレーザー径よりも小さな電子ビームサイズを得る必要があり、そのためにシミュレーションによってソレノイドの最適化を行った。ソレノイドの磁場分布を POISSON コードを用いて計算し、GPT でのビームトラッキングの結果を踏まえ形状を決定した。5MeV の電子ビームを収束するため、最大磁場強度 0.6T のソレノイドを2つ製作した。

General Particle Tracer (GPT)<sup>[5]</sup> を用いて 3次元の空間電荷効果を加味したビームトラッキングを行った。rf 空洞とソレノイドの電磁場分布は SUPERFISH, POISSON を用いて作成し GPT に取り込んだ。Fig.2 にカソードから生成された電子ビームのビームサイズの変化、Table.1 にそのパラメータを示す。Solenoid2 によって収束された電子ビームは 1.274m の位置で 15 $\mu$ m に収束される。その後ビームは発散するが、Solenoid3 によって発散が抑制される。この再収束はビームロスを防ぎ、レーザーコンプトン散乱のバックグラウンドの低減につながる。

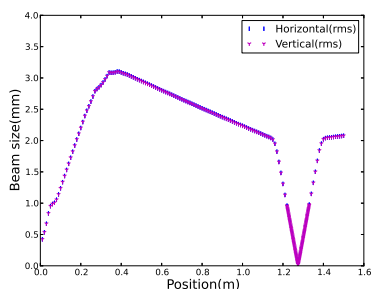


Figure 2: Beam size as a function of distance from the cathode.

#### 3.2 ビームサイズ計測

収束電子ビームの計測には Gafchromic radiochromic film を用いた<sup>[6]</sup>。我々の使用する電子ビームはエネルギー、チャージともに低く、OTR のような一般的な方法ではビームサイズの計測が困難であった。このフィルムは放射線が当たると青く呈色する。我々は高エネ

Table 1: Parameters of GPT Simulation

Number of particles	1000
Space Charge	3D
Bunch Shape	Gaussian
Charge	50pC
Electric field at cathode	100MV/m
Initial laser spot size	0.3 mm
Solenoid 1 strength	0.13 T
Solenoid 2 strength	0.5 T
Solenoid 3 strength	0.5 T

ルギー光子のドーズ換算に用いられる HD-810 という種類のフィルムを選択した。HD-810 は呈色面が 6.5 $\mu$ m と薄い。モンテカルロコードである EGS5 を用いてこの HD-810 内での電子散乱を計算すると、呈色面ではビームはほとんど広がらない。このことから 10 $\mu$ m の電子ビームの計測に適していると考えられる。ビームの測定法としては、まず冷却 CCD カメラを用いて Optical density (OD 値) を読み取る。そして照射時間を変えて呈色させた HD-810 からドーズ換算を行い、この換算曲線を用いてビームを評価した<sup>[7]</sup>。

HD-810 で計測した電子ビームのプロファイルを図 3 に示す。この画像の強度分布にガウス近似をかけてビームサイズを算出した。Fig.4 に Solenoid2 の強度ビームサイズの関係を示す。このときの照射条件は、電子ビームが 3.5MeV, 50pC で照射時間が 1 秒である。焦点においては 20 $\mu$ m のビームが生成されており、本研究の利用に足る電子ビームを生成できていることがわかる。

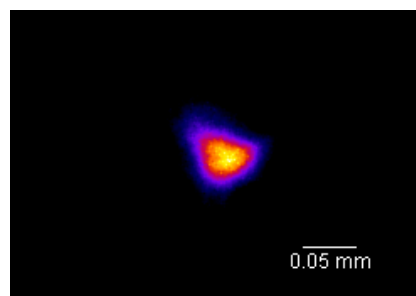


Figure 3: Electron beam profile measured by HD-810.

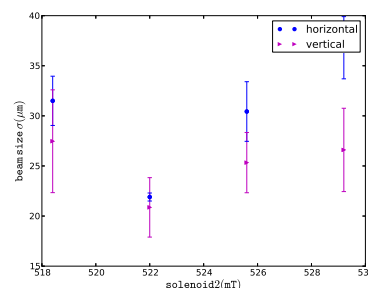


Figure 4: Beam size as a function of Solenoid2 strength.

## 4. 走査システム

レーザーコンプトン散乱を用いたレーザー計測の予備実験として、金属ワイヤーのスキャンを行った。電子ビームとワイヤーの衝突によって生じる制動放射光の分布はそれぞれの分布の畳み込みとなる。電子ビームの走査に用いるステアリング電磁石は  $117\mu\text{m}/\text{A}$  のものを使用した。金属ワイヤーの材質は Al である。このワイヤーは  $1\text{mm}$  の円形のものから  $1/4$  の部分を切り出した非対称な形をしている。我々は走査電子源を用いてこの非対称なワイヤーの形状を制動放射光から再現することを試みた。ワイヤーは回転させることで異なる深度分布をもつので、2方向から (wireA と wireB) の照射を行った。この2種類の深度分布を Fig.5 に示す。

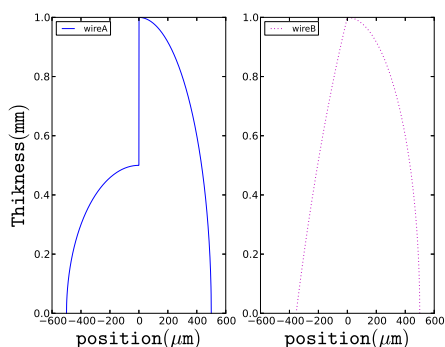


Figure 5: Thickness distribution of metal wires.

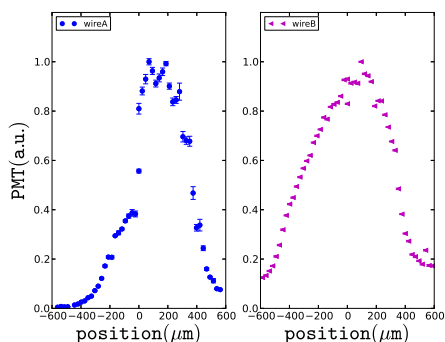


Figure 6: PMT signal distribution of metal wires.

制動放射光の測定には LYSO シンチレーターと光電子増倍管 (PMT) を用いた。Fig.6 に電子ビームの位置に対する制動放射光の分布を示す。Fig.5 と Fig.6 を比較すると、ワイヤー形状を電子ビームのスキャンによって再現できていることがわかる。しかし、ワイヤー深度が深い部分に関しては完全に計算と一致していないことがわかる。これは電子ビームのエネルギーが  $1\text{mm}$  の Al ワイヤーに対して透過能が小さいことが原因である。この問題は金属ワイヤーによる試験特有のものであり、レーザーコンプトン散乱のときは考慮する必要がない。我々は今後より細いワイヤーでの試験を行うとともに、磁性流体シールを用いた精密な回転治具でワイヤーを

回転させながらスキャンすることで CT による画像の再構成を行う予定である。

## 5. まとめと今後

早稲田大学では、レーザーコンプトン散乱を用いた高強度レーザーの直接計測法の開発を行っている。これは収束した電子ビームを用いてレーザーをスキャンし、そのとき生じるレーザーコンプトン散乱光からレーザー強度分布を再現するものである。フォトカソード rf 電子銃によって生成した低エミッタンスな電子ビームをソレノイドによって収束する。  $20\mu\text{m}$  の電子ビームを生成できており、本研究に足る電子源を完成することができた。非対称な金属ワイヤーをスキャンすることで、走査収束系の評価試験を行った。制動放射光分布から  $1\text{mm}$  径の非対称な金属ワイヤーの形状を再現することができた。よって我々の電子源は高強度レーザーの計測への利用が可能な状況にある。

我々は PMT を用いたバックグラウンドの評価、その低減を進めている。ターゲットとする  $\text{CO}_2$  レーザーはすでに準備しており、これを  $\sigma = 200\mu\text{m}$  以下に収束できることも確認した。今後はこのレーザーとのコンプトン試験を行い、レーザー計測の実証を行う。

## 参考文献

- [1] A. Endo, InTech (2012) DOI: 10.5772/38716.
- [2] K. Sakaue et al., Radiat. Phys. Chem. 77 (2008) 1136-1141.
- [3] Y. Hosaka et al., Radiat. Phys. Chem. 84 (2013) 10-13.
- [4] K. Sakaue et al., Nucl. Instr. and Meth.B 269 (2011) 2928-2931.
- [5] General Particle Tracer: <http://www.pulsar.nl/gpt/>.
- [6] Gafchromic film: <http://www.gafchromic.com/>.
- [7] Y. Yoshida et al., Proceeding of IPAC2012, THPPR049 (2012).