

コンパクト ERL におけるビームハローの定量的評価の手法開発 DEVELOPMENT OF THE METHODS TO EVALUATE BEAM HALOS QUANTITATIVELY IN COMPACT ENERGY-RECOVERY LINAC

瀧藤航一^{*,A)}, 市川温子^{A)}, 山本将博^{B)}, 島田美帆^{B)}, 倉田正和^{B)}, 田中織雅^{B)}, 中村典雄^{B)}
Kouichi Takifuji^{*,A)}, Atsuko Ichikawa^{A)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Miho Shimada^{B)}, Masakazu Kurata^{B)},
Olga Tanaka^{B)}, Norio Nakamura^{B)}
^{A)} Tohoku University
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Compact Energy-Recovery Linac (cERL), constructed in High Energy Accelerator Research Organization (KEK), succeeded in 1 mA continuous wave (CW) mode operation of energy recovery, and we are challenging to operate in 10 mA CW mode. In terms of protection of accelerator's instruments and radiation safety, we must operate safely that beam loss is reduced. Beam halo, is the one of the source of beam loss, was researched qualitatively in other facilities, but there is little quantitative studies in cERL. I tried a new quantitative analysis of beam core and halo using stacked multiple exposure that were generated by setting minimum exposure time of a CCD camera under adjusted gain conditions.

1. はじめに

1.1 コンパクト ERL とビームハロー

エネルギー回収型リニアック (ERL) は、加速・周回し終えた後のビームを同じ空洞で、高周波電場の位相が π ずれたタイミングで周回したビームが戻ってくることで、減速させエネルギー回収し、次の新しいビームの加速に使うことのできる線形加速器である。ビーム加速でのエネルギー消費を抑えつつ、高輝度電子銃からの低エミッタンスかつ大強度のビームを加速することが可能である点を利用し、大強度のテラヘルツ光源や自由電子レーザー (FEL) としての産業利用等が検討されている。高エネルギー加速研究機構 (KEK) では ERL 実証器としてコンパクト ERL (cERL) が建設され [1]、コミッション運転が行われている。cERL の外観とビームパラメーターを Fig. 1 に示す。これまでに 1 mA 相当の CW ビーム運転・エネルギー回収に成功しており、次の段階として本来の設計値である 10 mA CW 運転を目指している。

加速器機器保護及び放射線安全の観点から 10 mA CW 運転を行うには、ビームエネルギーの高い周回部でのビームロスを極めて低く抑える必要がある。ビームロスの原因の一つとしてビームハローやテールがある。これらはビームの主要部分であるビームコアから離れた場所に生成される希薄なビーム成分であり、発生の原因としては空間電荷効果、非線形な磁場成分、電子銃レーザーのプロファイルによるものなどが挙げられる。現在低いエネルギーで輸送する入射部ではコリメーターを用いて有害になり得るビームハローを削ることでビームロスを防いでいるが、コリメーター通過後の輸送にミスマッチがあれば位相空間上で再生成され、完全なビームロスの抑止になり得ないとの指摘もある [2]。そのため 10 mA の CW 運転実現のためにも cERL 内でのビームハローの発生機構を理解し、それがどれほどの量が生成されるか

という定性的および定量的な調査が求められる。過去には定性的な研究はされたものの [3]、定量的な研究は現在までには cERL では行われていなかった。

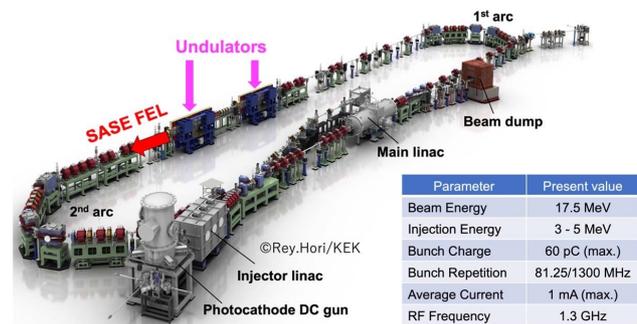


Figure 1: Compact Energy-Recovery Linac. [4]

1.2 ビームの測定機器に関して

ビームのプロファイル測定には現在 Ce:YAG スクリーンを用いて、ビーム衝突時に生じた光を CCD カメラ (Allied Vision Technologies, Prosilica GC650) に取り込み測定している。一部のカメラには ND フィルターも併設されている。測定システムの模式図は Fig. 2、計測機器等のスペックは Table 1 に示した。ビームハローの定

Table 1: Specification of Diagnostic Instruments [5]

Ce:YAG スクリーン	円形 (直径 26 - 50 mm)
CCD カメラ (Prosilica GC650)	ゲイン: 0 - 19 dB 露光時間: 8 μ s - 116.8 s (1 μ s 刻み) A/D 分解能: 12 bit
ND フィルター	4, 8, 20, 100, 1000

量的な解析のためには、十分に大きいダイナミックレンジの測定が欠かせない。以前はハロー・テールを観測す

* takifuji@epx.phys.tohoku.ac.jp

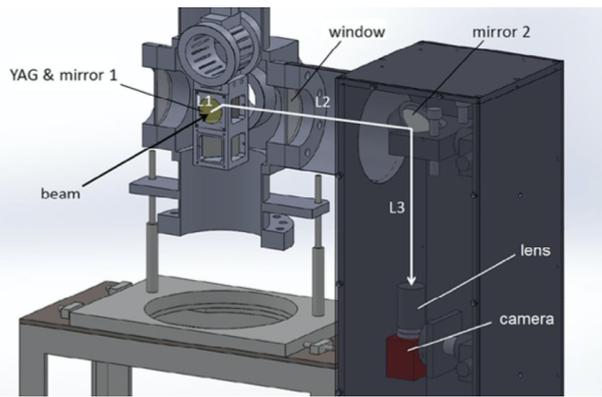


Figure 2: Schematic of the screen monitor system. [3]

るために、カメラの露光時間やゲインを増やして測定していたが、コアの部分に対するハロー部分の強度が数桁小さいことから、A/D 分解能 12 bit にコア部分のカウント値が収まりきれず、カウント数のサチレーションが Fig. 3 のように発生しており、定量的解析ができないという状況にあった。そこで、PyEpics [6] を用いてサチレーションしていない状態で十分な枚数のプロファイル測定した。また、スクリーンモニタの各画素のカウント数が電荷量を反映していることをクロスチェックする必要がある。そこで電荷量を測定しているファラデーカップとの相関を調べた。ファラデーカップは入射空洞手前 (GunFC)、ビームダンプ (DumpFC) に設置されているものを使用した。次の章では

- 従来の計測方法との比較
- 露光時間とビーム像強度の関係
- ファラデーカップを用いた定量的解析を述べる。

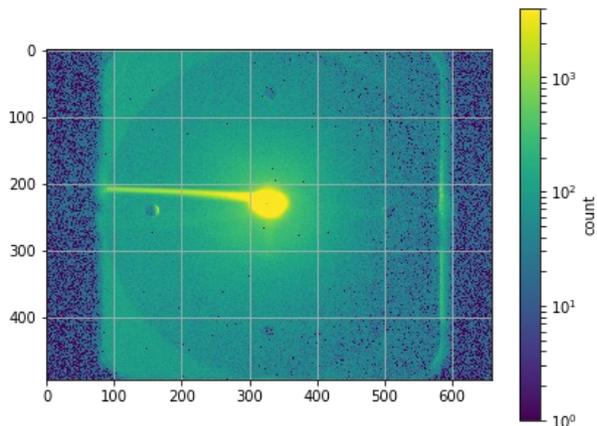


Figure 3: Saturation of counts of beam core.

2. 従来の計測方法との比較

2.1 計測手法とその比較

Figure 4 のようにビームチューニング等で用いられるバーストモードは、5 Hz の繰り返しに設定されている。今回 10 s 分のプロファイル (バーストパルス 50 個分) を

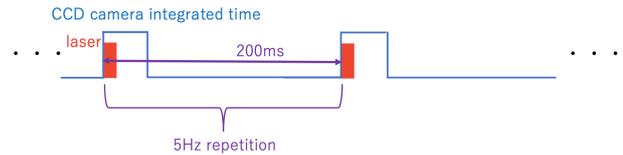


Figure 4: Schematic of the pulse of beams.

を 2 通りの方法で比較した。第 1 の方法は、カメラの露光時間をメインのバーストパルスが含まれる最小ゲート幅の $10 \mu\text{s}$ に設定し、同条件のプロファイルを 50 枚取得して重ね合わせる「短時間多重露光の重ね撮り」である。なお CCD カメラの分解能 12 bit に収まるように、カメラのゲインや ND フィルターを調整した。これをレーザーを遮蔽した状態 (バックグラウンド; BG)、遮蔽していない状態 (バーストパルス) の 2 種類作成し、BG 処理としてバーストパルスのカウント数から BG のカウント数を差し引いた。

そして第 2 の方法は、従来方法である露光時間を 10 s に設定する「長時間連続露光撮影」である。この場合も、ゲインと ND フィルターを上と同じ条件にした状態で、バーストパルスと BG の 2 種類作成した。BG 処理の手法は上と同様である。今回の測定では Fig. 5 のように、主空洞をオフにしてビームダンプへ直接ビームが輸送される状況下での測定を行った。

2.2 結果

長時間連続露光撮影で取得したものが Fig. 6a、短時間多重露光の重ね撮りで取得したものが Fig. 6b である。なおビームの電荷量は 7.1 pC 、CCD カメラは Fig. 5 に示した CAM8 で、ゲインは 22、ND フィルターは ND 4 で設定し、DC 光陰極電子銃で使用するレーザーの周波数は 1.3 GHz で、バーストパルス長が $1 \mu\text{s}$ のものを使用した。Ce:YAG スクリーンの直径は 28 mm である。

長時間連続露光撮影で取得したものと比べると、スクリーンの反射と思われる四角と円の形の箇所が低く抑えられており、コア部分に関してはサチレーションが起こっておらず、内部の電荷分布の詳細が明らかになっている。またコアの周辺 (特に下部分) には形状が若干異なるものの、ハローのような薄い粒子分布が見取れる。ただ左右端のスクリーン外の、測定装置のミラー部分の反射と思われる箇所は、短時間多重露光の重ね撮りのほうがカウント数の平均値が低いものの、ばらつきに関してはこちらの方が大きかった。

2.3 考察

「短時間多重露光の重ね撮り」の場合と「長時間連続露光撮影」の場合でスクリーン外の箇所でのカウント数の範囲と平均値を Table 2 に示す。ミラーの反射やカメラノイズに相当すると思われる箇所でのように値が異なっているのは、カメラノイズが長時間連続露光撮影の場合では一定に収まっているのに対し、短時間多重露光の重ね撮りではゼロ点ノイズを含む多数の画像を重ね合わせる処理をとっていることでカメラノイズが一方向的に蓄積してしまっていることが原因であると考えられる。

またビームハロー等の形状が若干違うのは重ね撮り

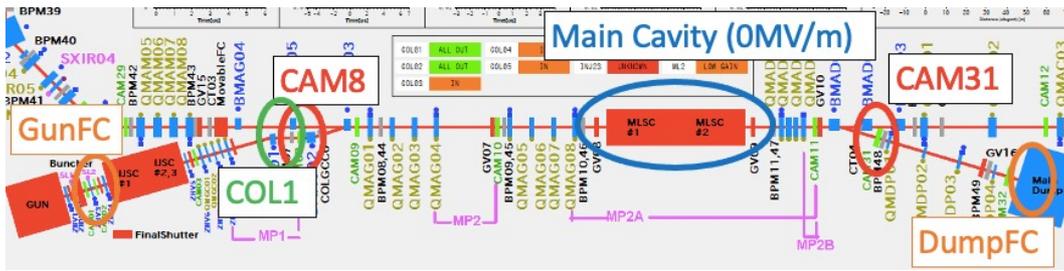
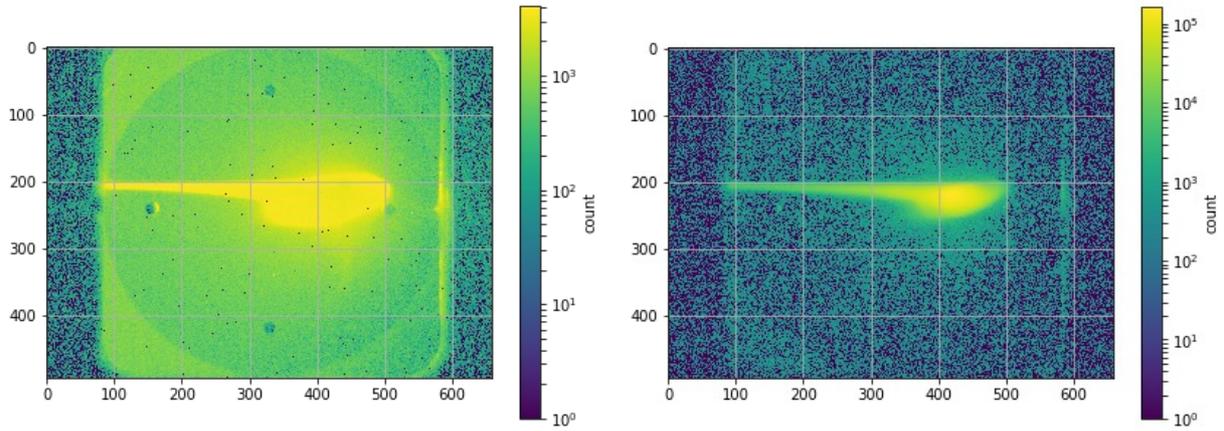


Figure 5: Schematic view of the observation point.



(a) Beam profile of integrated time 10 s

(b) Beam Profile of combined 50 profiles of integrated time 10 μ s

Figure 6: Comparison of two types of beam profiles.

の露光範囲外でもビームが存在している可能性が考えられる。その原因としてはレーザーのパルス幅を調整するポッケルスセルに原因があると思われる。次の章では、露光時間とビーム像強度の関係について述べる。

ラのゲイン、ND フィルターの値を一定にして前章の方法で取得し、全ピクセルでのカウント数を比較した。測定は合流部出口付近の CAM 8 で行った。

Table 2: Comparison of Counts Outer the Ce:YAG Screen

取得方法	左端	右端
長時間連続露光撮影	-1054 - 3610 平均 97.64	-405 - 3977 平均 268.4
短時間多重露光の重ね撮り	-2230 - 3655 平均 49.32	-1917 - 4751 平均 134.6

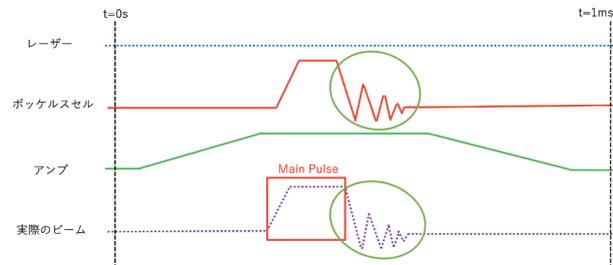


Figure 7: Schematic of the pulse of beams.

3. 露光時間とビーム像強度の関係

3.1 計測手法

電子銃に用いるレーザーの繰り返しやパルス長はポッケルスセルを用いて制御されている。ポッケルスセルの立ち上げから立ち下げまでのバーストパルスをメインパルスと呼ぶ。しかしポッケルスセルの立ち上がり、立ち下がりには有限の時間構造があり、Fig. 7 のようにメインパルスは完全な矩形型の時間構造にはならず、図中の緑丸で囲ったいわゆるポッケルスセルからの漏れ光が生じている。そこで露光時間を Fig. 8 のように 10 μ s、100 μ s、1 ms、10 ms、100 ms に設定したものを、カメ

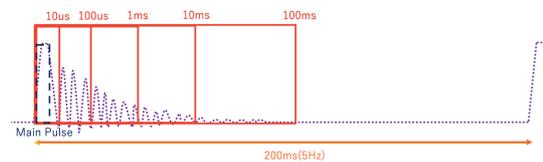


Figure 8: Schematic of “The leak” from the Pockels cell and integrated time of CCD camera.

3.2 結果

Figure 9 のように露光時間を増やすと 10 μs のカウント数と比べて、3 割以上の増加が観測された。空洞からの電界放出による DC 暗電流は BG 処理でその影響をなくしているため、これはポッケルスセルからの漏れ光と見て良いだろう。なおカメラのゲインは 10、ND フィルターは ND 4、バンチ電荷は 7.2 pC である。

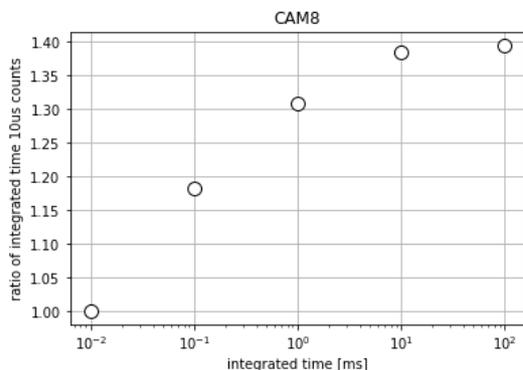


Figure 9: Ratio between the counts of integrated time 10 μs and others.

3.3 考察

ポッケルスセルからの漏れ光により発生しているビームが、メインパルスと比べると無視できない量を持っており、厳密な定量的な解析には邪魔な存在である。そして、特に空間電荷が無視できないバンチ電荷量の場合は、長時間露光で得られる画像には先述の無視できない漏れによる低電荷ビーム像が含まれる問題もある。これらの影響を小さくするために、露光時間をこのカメラで最小のゲート幅となる 10 μs に設定した短時間多重露光の重ね撮りが有効と言える。

4. ファラデーカップを用いた定量的解析

4.1 計測手法

ビームダンプにはファラデーカップが設置されており、廃棄されるビームの電荷量を測定できる。CAM 8 手前には Fig. 10a のようなコリメーター (COL 1) が設置されており、挿入量に応じてビームを削ることができる。今回 COL 1 の上部分 (TOP) を動かし、その時のファラデーカップでの計測値を Fig. 10b に示す。測定はビームダンプへの輸送ライン入口の CAM 31 で測定を行い、ビームパイプ中央から TOP のコリメータの距離 (Fig. 10a のオレンジの矢印) が 0.89, 1.86, 2.84, 3.81, 4.81, 5.81, 6.79, 7.79 mm のときのビームプロファイル測定した。CCD カメラのゲインは 15 に設定した。CAM 31 の Ce:YAG スクリーンの直径は 50 mm である。

4.2 結果

TOP の位置が 7.79 mm のときのプロファイルを図 11a に挙げる。コアの部分とテール・ハロー部分に分けるために、垂直方向、水平方向にそれぞれ射影し

たプロットをガウス分布、または 2 つの結合したガウス分布を使用してフィッティングし、それぞれのガウス分布の中央から 3σ までの距離で区切った。これをコア部分とし、テール・ハロー部分はプロファイルから推定して長方形のエリアで区切った。Figure 11a の左端のオレンジの箇所のカウント数の平均値を、カメラノイズで構成されたベDESTAL 値として、全ピクセルで差し引いた。このときのコア部分、テール・ハロー部分のカウント数の合計値を導出したところ、それぞれ 1.105×10^8 、 6.540×10^6 となり、コア部に対する、テール・ハロー部分の強度の割合は約 5.92 % となった。

Figure 11b は他の TOP の位置に関して先述と同様の解析を行い、コア部分とテール・ハロー部分のカウント数の合計値とファラデーカップで計測した電荷量をプロットし、一次関数でフィッティングしたものを表している。カウント数の合計値と電荷量には正の相関があり、フィッティングで得られた傾きの値から、CAM 31 では露光時間 10 μs、カメラのゲイン 15 の設定では、1 カウントにつき、

$$\frac{(5.95 \pm 0.14) \times 10^{-8} \times 10^{-12} [\text{C}] \times 50}{1.60 \times 10^{-19} [\text{C}]} \quad (1)$$

$$\simeq 18.6 \pm 4.38 [\text{個}]$$

の電子が来ているということになる。

4.3 考察

電荷量とカウント数のフィッティングで正の y 切片が出てきているのは、テール・ハロー成分の場所を決めるときにプロファイルから推定していることが災いし、一部の希薄なハロー成分を取り逃がしてしまっているか、あるいはベDESTAL 値の取り方が不適切であり、余分にハロー部分を削ってしまったかの 2 種類の原因が考えられる。

またテール・ハロー部分の範囲を決めている箇所に関しては人の判断に委ねており、加えて複雑な形のビームでのコア部分を長方形のエリアで区別することで、余分にテール・ハロー部分らしき部分を含めてしまっている。スクリーンの反射やハローの区別もまだできていない。今後は強度によって範囲を区別する方が適切かもしれない。

5. 総括と今後について

ビームのコア部分、テール・ハロー部分でのカウント数の割合の導出方法と、カウント数と電荷量の関係性を示す手法を考案した。しかしテール・ハロー部分の範囲の決定の精度がまだ甘い状態で改善が必要である。

またハローを観測するのに先行研究を元に露光時間 10 s 相当のプロファイルを作成しているが、実際ハロー全てを観測するのに 50 枚以上必要か、不必要かはまだ調べられていない。枚数に関して今後何かしらの調査が必要であろう。

謝辞

本研究につきましては、KEK の cERL 関係者の皆様にご指導いただき、感謝申し上げます。

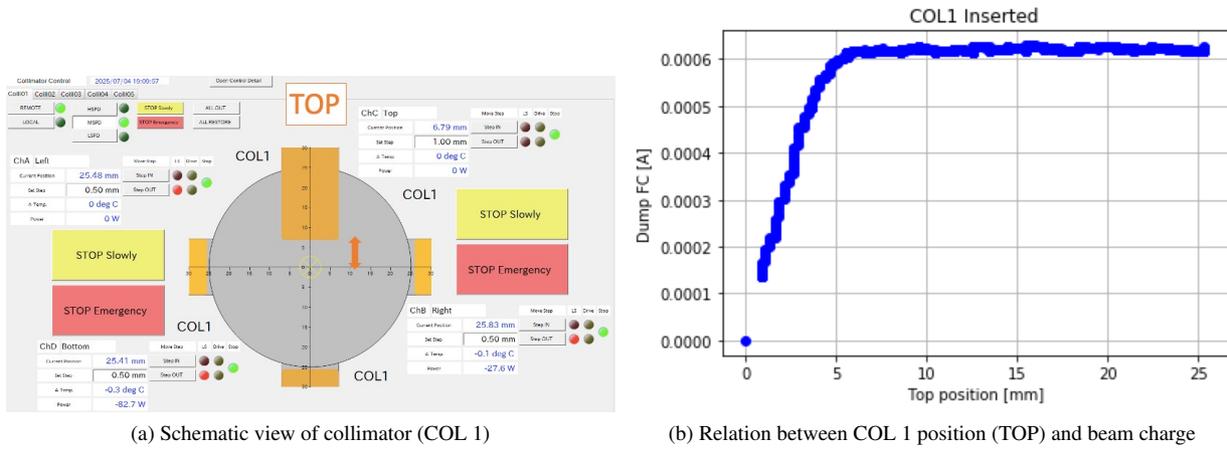


Figure 10: The condition of beam optics.

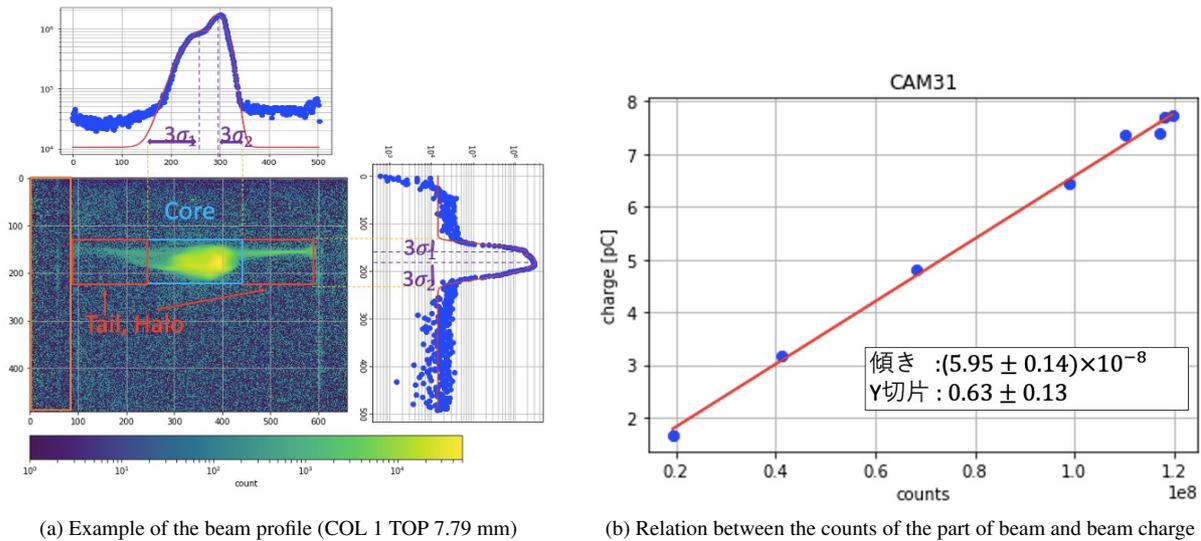


Figure 11: Quantitative evaluation of beam profiles.

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, *Nucl. Instrum. methods Phys. Res., A* 877 (2018) 197-219. doi:10.1016/j.nima.2017.08.051
- [2] Y. Batygin *et al.*, Proton and Ion Linear Accelerators (USPAS 2024). <https://uspas.fnal.gov/materials/24RohnertPark/24RohnertPark-PILA.shtml>
- [3] O. Tanaka *et al.*, “New halo formation mechanism at the KEK compact energy recovery linac”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 21.024202. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.024202
- [4] N. Nakamura *et al.*, “High-power EUV free-electron laser for future lithography”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 62 SG0809, 2023. doi:10.35848/1347-4065/acc18c
- [5] Allied Vision Prosilica GC Technical Manual, https://www.ads-img.co.jp/ad_products/prosilica-gc650_gigecamera/
- [6] PyEpics:Epics Channel Access for Python, <https://pyepics.github.io/pyepics/>