

# cERL 入射器における異常なビームプロファイルの調査

## INVESTIGATION OF AN UNUSUAL BEAM PROFILE IN THE COMPACT ERL INJECTOR AT KEK

田中織雅<sup>#, A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 本田洋介<sup>A)</sup>  
Olga Tanaka<sup>#, A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### Abstract

The compact Energy Recovery Linac (cERL) injector at KEK is designed to deliver high-quality electron beams to the recirculation loop. However, recent beam diagnostics revealed an anomalous "triangle-shaped" beam profile emerging immediately after the first solenoid, significantly impacting beam quality and system performance. Such distortion can degrade focusing and collimation efficiency, introduce measurement inaccuracies, and increase sensitivity to alignment and field errors. This study investigates the underlying causes of the distorted beam shape through simulation and analysis, considering factors such as sextupole field components, magnet misalignments, nonlinearities in air-core steering magnets, and initial beam kicks at the cathode. Potential mitigation strategies are proposed to suppress the distortion and improve injector stability and beam transport efficiency.

### 1. はじめに

KEK のコンパクト ERL (cERL) は、高平均ビーム電流と優れたビーム品質の両立を目的として当初建設されました [1]。加速器システムは、フォトカソード DC 電子銃、エネルギー回収運転に対応した超伝導加速空洞 (主線形加速器)、周回ループ、およびビームダンプで構成されています。電子入射器の目的は、後段の加速および応用過程の要件を満たす高品質な電子ビームを生成することです [2, 3]。

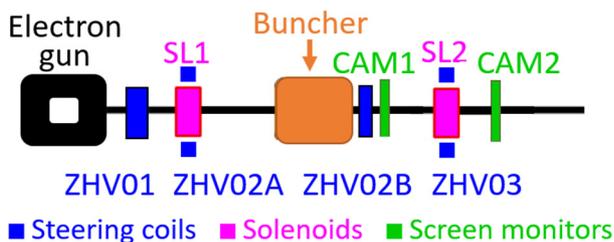


Figure 1: Layout of the injector section near the e-gun.

この目的を達成することは、cERL 入射器において特に困難です。なぜなら、cERL 入射器は低エネルギー (最大 5 MeV、通常は約 3.5 MeV) で動作しながら、高バンチ電荷 (最大 60 pC/バンチ) を扱うためです。低エネルギーの入射器は空間電荷効果の影響が大きいので、下流におけるビーム品質の維持が困難になります [4]。

図 1 に電子銃付近の cERL 入射器領域のレイアウトを示し、表 1 に対応するビームパラメータをまとめています。また、同表では、エネルギー回収を伴う連続波 (CW) 運転モードと、自由電子レーザー (FEL) 用の単パス運転という 2 つの異なる運転モードにおける入射器パラメータの比較も示しています。

2023 年度、ソレノイド SL2 に取り付けられていた BPM ホルダーを取り外した後の最初の立ち上げにおいて、ス

クリーン CAM1 上に理想的なガウス型ビームが観測されることを期待していました。これ以前の調査により、このホルダーの帯電効果がビームを「まくら型」に歪ませていることが判明していました (詳細は文献[5]を参照)。しかし今回は、「おにぎり型」のビームプロファイルが観測されました (図 2 参照)。

Table 1: Injector Design Specifications for cERL

パラメータ	CW モード (エネルギー回収)	シングルパス FEL
DC ガン電圧	450 kV	450 kV
繰返し周波数	1.3 GHz	81.5 MHz
入射エネルギー	2.9 MeV	3.5 MeV
周回エネルギー	17.4 MeV	17.5 MeV
1 バンチあたりの電荷量	0.77 pC	60 pC
レーザー時間分布	3 ps (rms)、単一ガウス	40 ps (FWHM)、単一ガウス
レーザー XY 分布	放射状ガウス + 0.5 mm ピンホール	放射状ガウス + 2.0 mm ピンホール

文献[6, 7]に示されているように、これは多極場効果、特に六極歪みによるものであると考えられます。しかし、

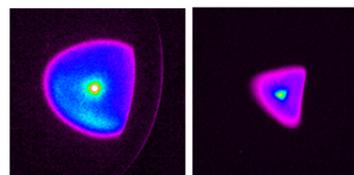


Figure 2: Abnormal beam profiles observed at screens CAM1 (left) and CAM2 (right).

<sup>#</sup> olga@post.kek.jp

我々の入射器には六極磁場を発生させる要素が存在しないため、この結果は意外なものでした。より詳細な解析により、ステアリングコイル (ZHV01、ZHV02A、ZHV03) の磁場が、その幾何学的構造に起因して非線形成分を含んでいることが明らかになりました。

本研究では、この異常なビームプロファイルの原因を特定し、その特性を調査するとともに、ビーム性能を改善するための解決策を提案します。

## 2. ステアリング磁石の磁場

cERL 入射器に設置されているステアリングコイルは、タカノ技研有限会社によって製作され、宮島司氏による元の設計に基づいています [8]。cERL 入射器には複数種類のステアリングコイルが存在します [9]。

本研究の対象となるコイル (ZHV01、ZHV02A、ZHV02B、ZHV03) は、ビームの進行方向に平行に配置された 2 対の長方形ヘルムホルツコイル [10] で構成されています (図 3 参照)。

RADIA [11] を用いた磁場計算に使用されたエアコア (空芯) コイルの寸法は以下の通りです:

- ZHV01 は幅 (W) 0.10 m、長さ (L) 0.07 m、高さ (H) 0.128 m、
- ZHV02A および ZHV03 は幅 (W) 0.061 m、長さ (L) 0.064 m、高さ (H) 0.132 m です。

空間電荷効果を含む入射器のシミュレーションには、General Particle Tracer (GPT) [12] を使用しています。GPT には空芯コイル型の磁石に対応した標準モデルが存在しないため、まずコイルの形状に基づいて RADIA でステアリング磁場をモデル化しました。その出力データを MATLAB [13] で処理し、GPT 用のフィールドマップファイルを作成しました。

その結果、ステアリングコイル (ZHV01、ZHV02A、および ZHV03)。後者 2 つはそれぞれソレノイド SL1 および SL2 に取り付けられている同一仕様のコイル) の磁場が、トラッキング用入力ファイルに組み込まれました。

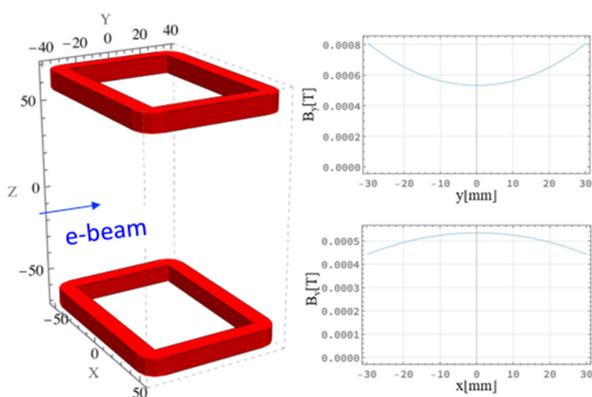


Figure 3: ZHV01 model simulated using RADIA (left: horizontal correction coil only). Magnetic field distribution shown on the right.

## 3. シミュレーションスタディ

ビームが傾きやオフセットを伴って非線形磁場成分を持つ磁石を通過することで、異常なビームプロファイルが

生成されるという仮説を検証するため、まず GPT を用いて簡略化したトラッキングシミュレーションを実施しました。この初期シミュレーションでは、カソードでのバンチ分布、空間電荷効果、その他の運転条件は考慮していません。

### 3.1 簡略化トラッキング

ビームが電子銃から角度を持って出射されると仮定し、ビーム軌道やステアリングの影響によってビームが三角形状になる可能性があるかを検討しました。電子源はエネルギー 400 keV、サイズ 1 mm でモデル化されており、適切に調整された発散角が設定されています。発散角は、ビームサイズがソレノイド SL1 付近のスクリーン CAM1 で直径約 40 mm となるように校正されています (図 4 参照)。シミュレーションでは、ビーム分布は一様であると仮定しました。

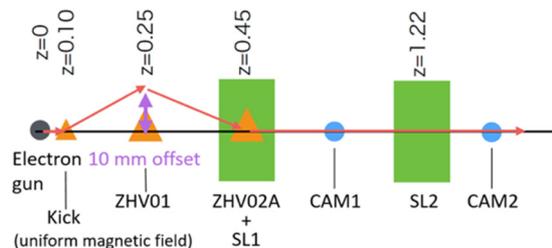


Figure 4: Schematic layout used in the simulation.

電極の位置ずれによるビームのミスアライメント効果を再現するために、ステアリング ZHV01 の位置直後に水平方向のキック磁場を印加し、10 mm のオフセットを与えました。このシミュレーションでは空間電荷効果は考慮しておらず、代わりに発散角によって空間電荷の影響を受けたビームサイズを近似しています。設定は完全に正確ではありませんが、実際の測定を大まかに再現することを目的としています (図 5 参照)。

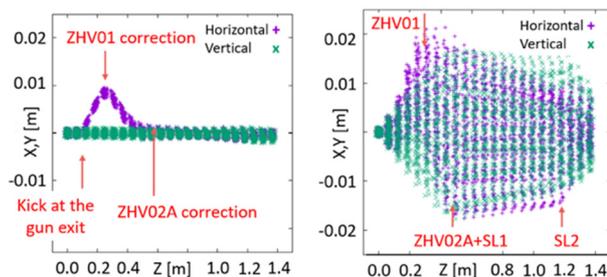


Figure 5: Kick and correction process. Left: no beam divergence during trajectory tuning. Right: beam divergence appears under actual conditions.

磁場の詳細は以下のようにモデル化しました。ソレノイドは GPT のデフォルトである 2 次元円筒対称モデルを用いています。ステアリングコイルについては、理想ケースと物理的近似の 2 つのケースを検討しました。理想ケースでは、水平方向に長さ 1 m の一様な磁場を印加し、その有効長さは 0.01 m としています。物理的近似では、4 本の電流線を定義し、ビオ・サバルの法則 [14] を用いて磁場を生成しました。具体的には、ステアリング ZHV01 の寸法は幅  $W = 0.10$  m、長さ  $L = 0.07$  m、高さ  $H = 0.13$  m、ZHV02A は幅  $W = 0.07$  m、長さ  $L = 0.11$  m、

Table 2: Comparison of Simulated and Measured Beam Profile Parameters at CAM1 and CAM2

		2024-11-24		2024-11-28		2024-11-29		2024-11-30	
		シミュレーション	測定	シミュレーション	測定	シミュレーション	測定	シミュレーション	測定
CAM1	角度(度)	62	79	70	77	55	83	60	85
	歪み	0.42	0.38	0.34	0.34	0.55	0.39	0.50	0.39
CAM2	角度(度)	157	188	164	190	162	179	161	181
	歪み	0.33	0.65	0.30	0.51	0.40	0.58	0.39	0.55

高さ  $H = 0.14 \text{ m}$  であり、いずれも実際の仕様に概ね一致しています。

軌道調整は、ビームに小さな発散角(エミッタンス)を与えることから始まりました。電子銃出口で仮想的な水平方向のキックを印加し、理想的な一様磁場を仮定して、そのキック量は ZHV01 での  $1 \text{ cm}$  の偏位を生じるように設定しました。ZHV01 を用いてビームをソレノイド SL1 の中心に向けて戻す操作を行い、図 4 を参照しながら手動で調整しました。ソレノイドによる像の回転の影響で、垂直方向(V 方向)の調整も必要でした。続いて ZHV02A を使用し、ソレノイド SL2 に向けた軌道を細かく調整しましたが、ここでも手動による修正を行い、ソレノイドの回転を考慮して追加の垂直方向調整を加えました。

上述の準備手順を踏まえ、ミスアライメントの影響およびステアリングコイルの構成がビームプロファイルに与える効果を評価するために、以下のケースについてシミュレーションを行いました。結果の簡単な概要は次の通りです。(1)理想的なステアリング:ミスアライメントがあってもビームは円形のまま維持される。(2)ZHV01 が空芯コイルの場合:ビームはわずかにずれるが円形を維持。(3)ZHV02A が空芯コイルの場合:ビームが三角形形状になる。(4)両方のステアリングコイルが空芯コイルの場合:ビームは三角形形状になる。(4-2)電子銃からのキックを減少させた場合、ビーム偏位は  $0.3 \text{ mm}$  に減少するが、それでもビームは三角形形状になる。

### 3.2 実現的トラッキング

実際のトラッキングシミュレーションに加え、コイル用にカスタマイズされた 3 次元磁場マップ、カソードでのパンチ分布、および空間電荷効果を取り入れました[15]。

レーザー位置はミリメートル単位で表記されていますが、座標  $(x, y) = (0, 0)$  はカソードの中心やビーム軸の始点に対応しているわけではありません。正確な測定なしにこれを特定することは困難です [16]。シミュレーションでは、レーザー位置を自由パラメータとして扱い、ビームがソレノイド SL1 の中心を通過するように調整しました。そのため、シミュレーション内の値は実際と異なる場合が

あります。具体的には、レーザーの  $(x, y)$  位置は、11 月 24 日および 28 日が  $(-0.62, -0.12)$ 、11 月 29 日が  $(-2.57, -1.33)$ 、11 月 30 日が  $(-2.27, 1.57)$  となっています。図 6 には、同一条件下でのスクリーン CAM1 および CAM2 における、シミュレーション(10 万粒子)と実測のビームプロファイルの比較を示しています。

### 3.3 特性評価論

上記の取り扱い、六極磁場がビームプロファイルに与える影響を定性的に記述したものです。これを正確に(定量的に)記述するためには、プロファイルの歪みパラメータの特徴付けが必要です。簡便化のため、異常なビーム形状は「膨らみ」を持つ正三角形に類似していると仮定しました。そこで、歪み(distortion)と回転(rotation)の 2 つのパラメータを導入しました。これらはパラメータ化されたローラー三角形(Reuleaux triangle,  $Rt$ ) 近似法によって決定されます [17]。

この三角形は、以下の引数を持つ区分的に滑らかな関数として定義されます: $h$ (正三角形の外接円半径)、 $a$ (垂直軸の回転角度  $[0..120]$ )、および  $t$ (歪み係数  $[0..1]$ )。ビーム形状のパラメータを推定するために、次の手順を踏みます。まず、ノイズ除去のために粒子をフィルタリングします。次に、重心と基準点を決定して回転角度  $a$ (三角形の向き)を求めます。その後、ビームプロファイルの輪郭  $E$  を抽出し [18]、 $E$  と  $Rt$  の面積差を最小化する最適化問題を解くことで、 $Rt$  の歪み係数  $t$  を推定します [19]。

この手法により、歪みを考慮しつつビームプロファイルの形状を精密に評価できます。全ての測定プロファイルについて詳細な特徴付けを行い、その概要を表 2 にまとめました。今後の研究では、六極磁場の影響を特定・補正し、将来の運転におけるビーム品質の改善を目指します。

## 4. まとめと今後の展望

本論文では、cERL 入射器におけるビームプロファイルの歪みの原因を特定しました。また、歪みのメカニズムを詳細に解析し、インジェクターのモデルに組み込みました。今後の課題としては、歪みの特性評価手法のさらなる改良と補正手法の導入に取り組む予定です。これらの改善により、ビームの調整精度と入射器の全体性能が大幅に向上すると期待されます。

## 謝辞

本研究は JST 経済安全保障重要技術育成プログラム JPMJKP24M2 の支援を受けたものです。

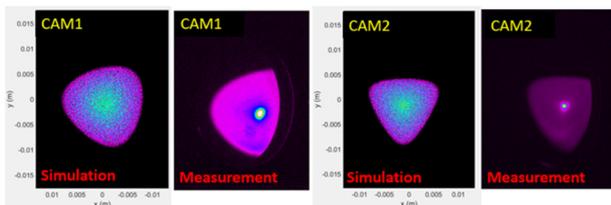


Figure 6: Example of beam profile comparison from November 30, 2023, at screens CAM1 (left) and CAM2 (right).

## 参考文献

- [1] M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, E. Cenni, *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy recovery linac at KEK”, Nucl. Instrum. Meth. A, vol. 877, pp. 197-219, 2018. doi:10.1016/j.nima.2017.08.051
- [2] O. Tanaka *et al.*, “コンパクト ERL 入射器の現状”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, Online (Kyushu University), Japan, 2022, pp. 877-880.
- [3] O. Tanaka *et al.*, “コンパクト ERL における中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, 2021, pp. 206-210.
- [4] Y. Chen *et al.*, “Space-Charge Dominated Photoemission in High Gradient Photocathode RF Guns”, in Proc. LINAC’18, Beijing, China, Sep. 2018, pp. 941-944. doi:10.18429/JACoW-LINAC2018-THPO116
- [5] T. Miyajima, “大バンチ電荷スタディー”, cERL mini-workshop, [https://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cERL\\_miniWorkshop/presentation/2\\_miniWS\\_Miyajima.pdf](https://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cERL_miniWorkshop/presentation/2_miniWS_Miyajima.pdf)
- [6] K. Togawa, “Effect of solenoid lens field on electron beam emittance”. doi:10.48550/arXiv.2407.09081
- [7] H. Jia, T. Li, J. Liu, Z. Liu, *et al.*, “Characterization and correction of multipole field effect on electron beams from a high-brightness continuous-wave photocathode gun”, Phys.Rev. Accel. Beams, vol.28, no. 2, p. 023402, Feb. 2025. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.28.023402
- [8] 株式会社 タカノ技研, <https://www.tomagnet.com/>
- [9] K. Harada, T. Kume, S. Nagahashi, N. Nakamura, S. Sakanaka, and A. Ueda, “The Magnet and Power Supply System for the Compact-ERL”, in Proc. IPAC’15, Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 2899-2901. doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA055
- [10] W. E. Weber, *Electrodynamic Measurements: Especially on the Compensation of Electrodynamic Effects*, Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1901.
- [11] RADIA code, <https://www.esrf.fr/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>
- [12] General Particle Tracer, <https://www.pulsar.nl/gpt/>
- [13] MATLAB, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [14] P. Lorrain and D. Corson, *Electromagnetism: Principles and Applications*, W.H. Freeman and Company, New York, 1990.
- [15] T. Tanikawa *et al.*, “Current Status of Beam Operation at Compact ERL toward Free-Electron Laser with CW Mode”, presented at the IPAC’23, Venice, Italy, May 2023, paper TUPL159, unpublished.
- [16] M. Yamamoto, 私信, 2025年5月.
- [17] N. Someyama, “Bulging Triangles: Generalization of Reuleaux Triangles”. doi:10.48550/arXiv.2108.07725
- [18] Convex Hull Computational Library, <http://www.qhull.org/>
- [19] Dual Annealing Method, [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.dual\\_annealing.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.dual_annealing.html)