

cERL 周回部のオプティクス測定

OPTICS MEASUREMENT OF CERL RECIRCULATION LOOP

島田美帆[#], 中村典雄, 高井良太, 上田明, 宮島司, 本田洋介, 帯名崇, 原田健太郎

Miho Shimada[#], Norio Nakamura, Ryota Takai, Akira Ueda, Tsukasa Miyajima,

Yosuke Honda, Takashi Obina, Kentaro Harada

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Compact ERL is expected as a X-ray and gamma-ray source of the laser Compton scattering and Terahertz light source from short electron bunch as well as a test facility of GeV-class ERL project. It is important to match the beam optics with its optimized design in order to increase the performance of light source. At first, the beam response of 20 MeV circulation beam was found to follow the magnetic measurement of the bending and quadrupole magnets. Furthermore, the twiss parameters were measured by the quadrupole scan (Q scan) method to estimate the downstream rms beam size. The estimation were corresponding to the measurement results of screen monitor. In addition, optics matching is demonstrated based on the Q scan results.

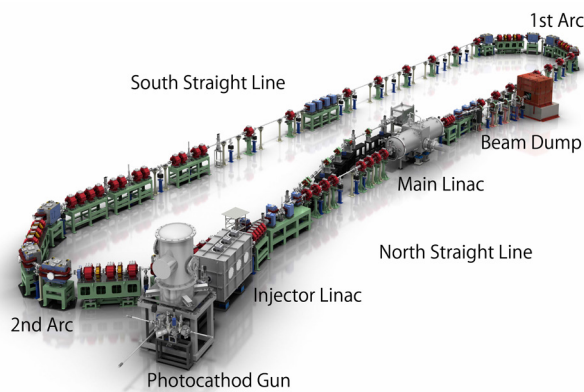
1. はじめに

2013 年より段階的に Compact Energy Recovery Linac (cERL) のコミッションが行われている^[1-2]。その目的は将来計画に向けた実証実験のためだけではなく、レーザーコンプトン散乱による X 線・γ 線源やテラヘルツの光源利用も検討されており、そのパフォーマンスを上げるには、ベータ関数や分散関数を設計通りに合わせる事が望ましい。そこで、ビームオプティクスの測定値をデザインと比較することは重要である。また、利用実験に十分な時間を確保するため、オプティクスマッチングの時間を短縮することが必要とされる。

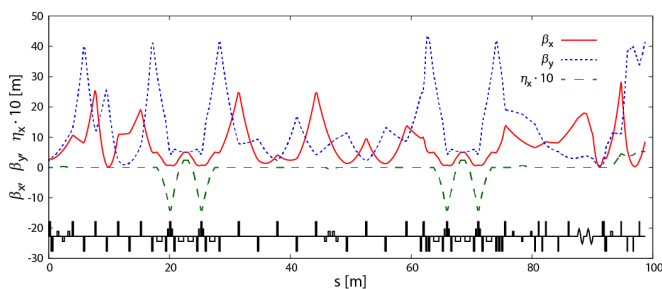
Figure 1 に cERL 全体の模式図および線形オプティクスを示す。3-5 MeV で入射部から周回部に合流したビームは、入射部主加速空洞で 20 MeV まで加速される。レーザーコンプトン散乱などの光源利用の実験は南側で行う予定である。周回ループは 2 つのアーク部および北側・南側直線部に分けてオプティクスの設計を行っている。アクロマーットの条件を満たしながら転送行列の R_{56} の成分を調整するために、アーク部内部の四極電磁石は主に分散関数の調整のために最適化する。その後、各アークの中心で $\beta_x = \beta_y = 5\text{m}$, $\alpha_x = \alpha_y = 0$ となるように、北側・南側直線部でベータ関数のマッチングを行う。デザイン上では、入射部のオプティクスや主加速空洞による収束力に変化があったときは北側直線部のみ、レーザーコンプトン散乱のオプティクスの調整は南側直線部のみで行う。

本論では、空間電荷効果が顕著に表れない範囲に限定し、ビームオプティクスの計算は elegant を用いて行った。バンチあたりの電荷量はおよそ 0.5 pC とし、主加速空洞で 20 MeV まで加速した後から、レーザーコンプトン散乱の手前を対象とした。この範囲の電磁石やモニタのレイアウトを Fig. 2 に載せ

る。いくつかの四極電磁石には、コイルの配線を調整し、ビーム軌道を調整するステアリングの機能も追加している。



a) Schematic figure of Compact ERL.



b) Design of linear optics of recirculation loop in normal operation.

Figure 1: Schematic and optics of Compact ERL.

[#] miho.shimada@kek.jp

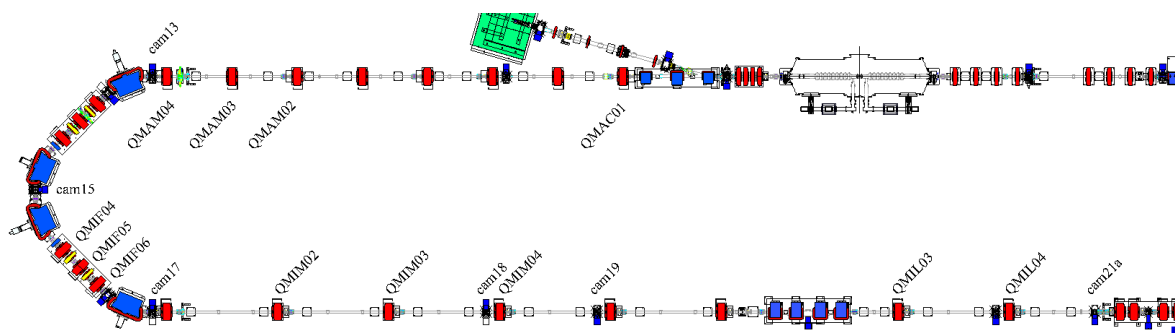


Figure 2: Lattice layout from main-superconducting cavity to south straight line.

2. 電磁石の磁場測定の評価

将来の周回エネルギーのアップグレードに備えて、すべての周回部の電磁石が 125 MeV に対応するように設計・準備を進めてきた。そのため、現在の 20 MeV 運転では、四極電磁石の残留磁場が設定磁場の 10% 近くになることがあり、ビーム光学の計算値と測定値に誤差が生じる原因となっていた。そこで、残留磁場がゼロになる励磁電流のオフセット I_0 を測定して計算に反映させる試みを行った。磁場測定はハンディガウスメータで行い、磁極の積層基準面で行った。標準化もしくは消磁を実施することでヒステリシスカーブの再現性が高いことを確認している。その時の I_0 の模式図を Fig. 3 に示す。標準化は ± 5 A のループを数回だけ周回し、電流の設定は +5 A から下げる方向で行う。消磁前後の磁場測定は 2015 年 1 月、標準化のヒステリシスカーブの測定は 2015 年 4-5 月のシャットダウン中に実施したため、2015 年 1-4 月のビームスタディでは、消磁で残留磁場のキャンセルを行い、再現性を確保した。

アーク部を構成する 45 度セクタ型の偏向電磁石の転送行列を調べるために、QMIF04 のステアリングでキックしたビームの応答を第 1 アーク出口の cam17 で測定した。その結果を Fig.4 に示す。この傾きは、水平方向は R_{12} 、垂直方向は R_{34} の転送行列の成分に相当する。計算結果はステアリングや偏向電磁石の磁場測定の結果から推定したものである。間にある QMIF05 と QMIF06 は残留磁場がゼロになるように電流を設定した。測定値は計算値に比べて 3~4% だけ小さかったものの、概ね合っていることがわかる。垂直方向で傾きが負であるのは定義によるものである。

次に四極電磁石の収束力の測定を実施し、磁場測定の結果と比較した。標準化を導入してから初めての測定である。Table 1 に示すような 3 通りの組み合わせで、それぞれ水平・垂直方向で測定を行った。Case1 は北側直線部、case2 と case3 はアーク部で実施し、45 度の偏向電磁石を挟んでいる。四極電磁石の中心を通ってなかったため、簡単なデータ処理を行った。Case3 の測定結果と計算結果を Fig.5 に載せる。水平方向はスクリーンの測定誤差以下の精度で一致しており、1%以上の精度であると考えられる。一方で、垂直方向は全ての組み合わせで 2%の計算

結果よりも弱まっていることがわかった。何らかの原因で磁場が吸収されていることも考えられるが、概ね合っていると考えられる。

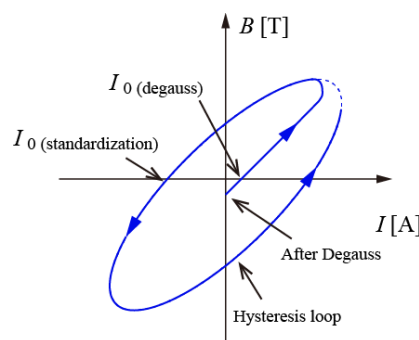


Figure 3: Schematic of hysteresis curve of quadrupole magnets.

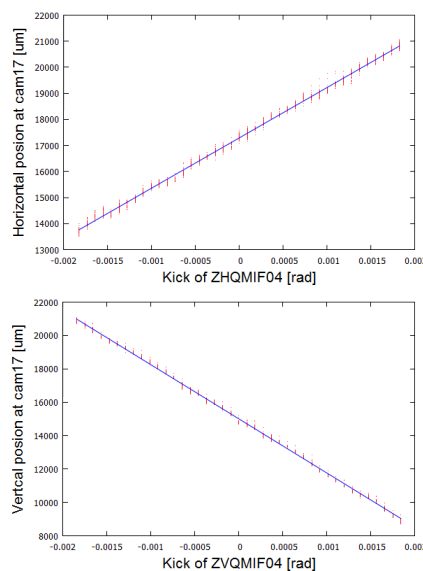


Figure 4: Horizontal and vertical center position at screen monitor just after a sector magnet with bending angle of 45 degree. Red dot: measurement results of beam profile fitted by Gaussian function, Blue line: simulation results based on magnetic measurement.

Table 1: Setting of Measurements of Quadrupole Focus Strength

case	Steering	Q magnet	Screen
1	QMAM02	QMAM03	Cam13
2	QMIF04	QMIF05	Cam17
3	QMIF04	QMIF06	Cam17

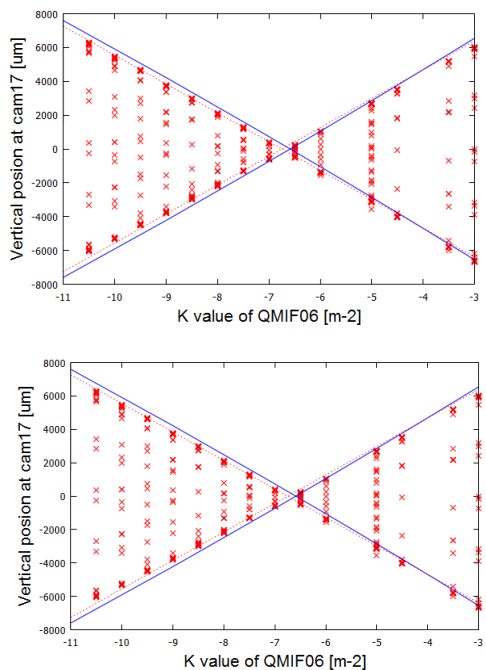


Figure 5: Examples of measurement results of focus strength of quadrupole magnet. Core length is 20 cm. Red cross: measurement results of beam profile fitted by Gaussian function, Red dash line: line fitted to measurements results, Blue solid line: simulation results based on magnetic field measurements.

3. ビームオプティクス調整

ある点の twiss parameter の測定結果から下流の rms ビームサイズを推定することができれば、ビームマッチングを迅速かつ正確に行うことが可能になる。そこで、そのデモンストレーションを試みた。まず、南側直線部で rms ビームサイズを Q scan から推定することができることを示し、北側直線部でマッチングを試みた。

3.1 Twiss parameter および rms ビームサイズの測定

南側直線部の 3ヶ所で Quadrupole scan (Q scan) を実施し、エミッタンスおよびベータ関数を求めた。ここで、スクリーンのカメラが飽和しないように ND フィルターを調整し、四極電磁石の厚みおよび残留磁場を考慮に入れている。また、これまでの測

定と同じように、Q scan に使用したスクリーンまでの間にある四極電磁石は残留磁場をキャンセルするように励磁した。Table 2 にエミッタンスの測定結果を示すが、若干のばらつきが見られる。これは、Q scan でビームが最小となる点でビームサイズがスクリーンの分解能以下になり、実際より大きめに見積もられた値が含まれている。

次に、Q scan を行った場所のベータ関数・エミッタンスの測定値を用いて、下流の rms ビームサイズを電磁石の設定値から推定した。QMIM02, QMIM03 および QMIL03 の結果を Fig.6 で比較する。QMIM02 と QMIM03 は、エミッタンスの測定結果にばらつきがあったものの、rms ビームサイズを外挿した結果はよく一致していることがわかる。一方で、周長補正シケインの下流では特に水平方向で不一致が見られる。ビームプロファイルはビーム軌道によって変わってしまうことがわかっており、周長補正シケイン付近は十分な数のステアリングがないために、設計通りのオプティクスになっていない可能性がある。Figure 6 でスクリーンモニタの測定結果と比較しているが、周長補正シケイン手前では非常によく一致していることがわかる。

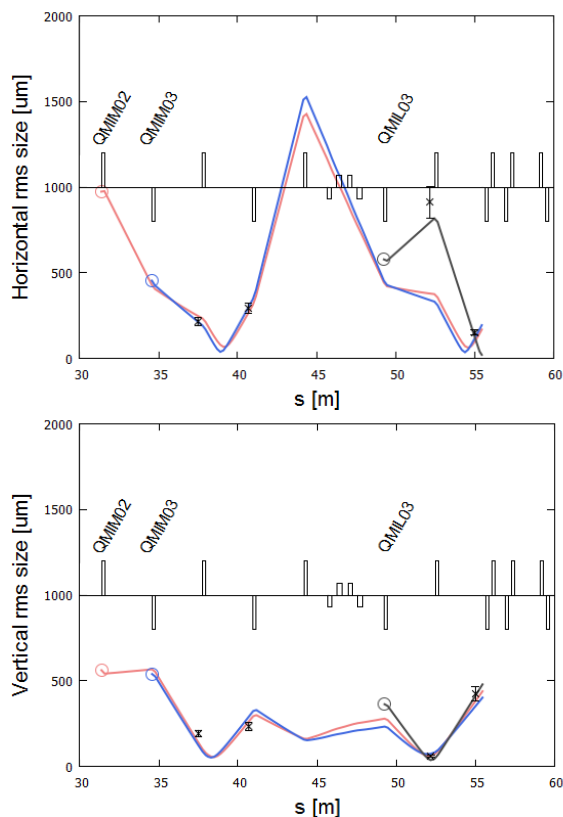


Figure 6: Comparison of rms beam size between screen monitor (black cross with errorbar) and results extrapolated from Q scan measurements (solid line). Q scan is performed at QMIM02, QMIM03 and QMIL03 (circle). Measurement error of screen monitor is assumed to be 10%.

Table 2: Results of Transverse Emittance

Q magnet	Screen	Horizontal	Vertical
		[$\mu\text{m rad}$]	[$\mu\text{m rad}$]
QMIM02	Cam18	0.42	0.25
QMIM03	Can19	0.24	0.25
QMIL03	Cam21a	0.21	0.19

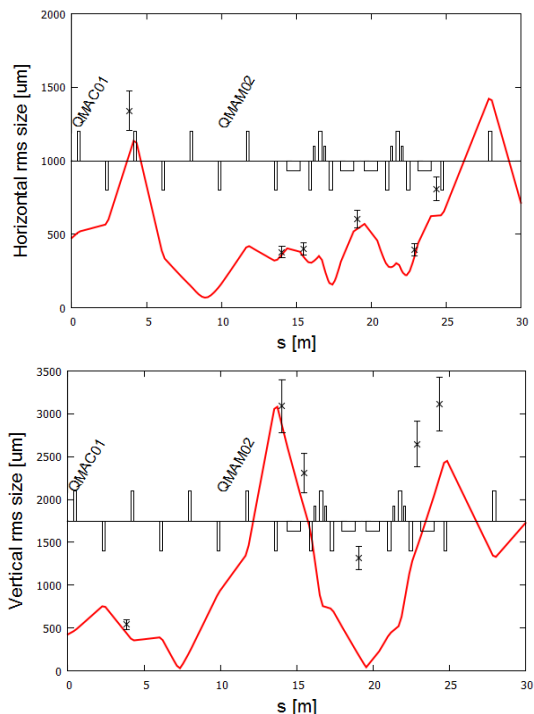


Figure 7: Comparison of rms beam size between screen monitor (black cross and errorbar) and back trace matching results (solid line). Measurement error of screen monitor is assumed to be 10%.

3.2 Back Trace によるオプティクスマッチング

北側直線部ではオプティクスマッチングを試みた。まず、第1アークの手前の QMAM02 と cam13 の組み合わせで Q scan を行い、エミッタンスおよびベータ関数を測定した。この際、QMAM03-04 は残留磁場を打ち消すように励磁している。アクロマトや R_{56} の条件を変えないために、アーク内部の四極電磁石は固定している。ベータ関数のマッチング場所は cam15 付近のアーク中央であるので、QMAM02 を起点としてマッチングを行うには、変数となる四極電磁石が 3 台しかなく不十分である。そこで、QMAC01 上流の twiss parameter を電磁石の設定値からバックトレースして推定し、QMAC01-04, QMAM01-04 の 8 台を変数としてアーク中心でマッチングを行うことができる。ビームスタディの時間に制限があったため、オプティクスを最適化することができなかったが、Fig. 7 にその一例を載せる。QMAC01 の 190 mm 上流を起点とし、エネルギー広がりには $2e-4$ と仮定した。南側直線部の時と同様に、

スクリーンで測定した rms ビームサイズと比較している。水平方向は概ね一致しているが、垂直方向はアークに入った後から大きな不一致が生じる。これは、3 mm 以上の大きなビームサイズによって、非線形な効果があったことも考えられる。このときの南側直線部では、ビームプロファイルが角ばった歪な形状になっており、エミッタンスがアーク手前に比べて 2-3 倍に増加するなど、普段とは異なる現象が見られていた。

4. 分散関数の測定とその評価

主加速空洞で周回エネルギーを 1% だけ下げたときのビームの水平軌道から分散関数の影響を調べた。デザイン値と測定値の軌道のずれを Fig.8 で比較する。その差は 1 mm 程度であり、標準化を行うことにより、デザイン値に近い分散関数になっていることを確認した。

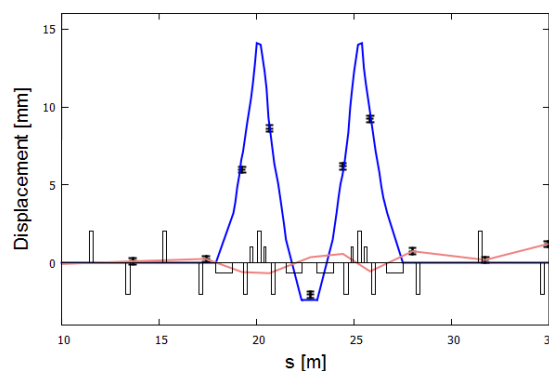


Figure 8: Deviation of horizontal beam position in the first arc at 1% energy deviation. Simulation results based on magnetic field measurement (blue solid line), BPM response (black cross with errorbar) and discrepancy (pink solid line).

5. まとめ

20 MeV 周回ビームのオプティクスマッチングに向けた基礎的なスタディを実施した。四極電磁石の消磁および標準化によって再現性を改善し、残留磁場を打ち消すオフセット電流を調べた。その結果、ビームの応答が磁場測定と 2% 以下の誤差で一致することを確認した。Q scan によるエミッタンスおよびベータ関数の測定を行い、下流の rms ビームサイズを計算で推定できることがわかった。また、バックトレースによって、ビームマッチングに応用できる可能性を示した。

参考文献

- [1] 島田美帆他., “コンパクト ERL コミッショニングの進捗状況”, *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol.11, No.2, pp.1-10, 2014.
- [2] 高井良太他., “コンパクト ERL のコミッショニング状況とビーム利用に向けた取り組み”, FROM03, in these proceedings.