

SACLA 線形加速器における進行波加速管のビーム輸送モデルの修正

MODIFICATION OF THE BEAM TRANSFER MODEL OF TRAVELLING WAVE ACCELERATOR STRUCTURES AT SACLA

田尻泰之 ^{#A)}, 渡川和晃 ^{B)}, 原徹 ^{B)}, 前坂比呂和 ^{B)}, 長谷川太一 ^{A)}, 田中均 ^{B)}
 Yasuyuki Tajiri ^{#A)}, Kazuaki Togawa ^{B)}, Toru Hara ^{B)}, Hirokazu Maesaka ^{B)}, Taichi Hasegawa ^{A)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co.,Ltd.

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In order to perform efficient beam tuning at SACLA, we had developed a beam transfer model to calculate the beam transverse envelope in a linear accelerator using linear symplectic matrices. However the measured beam orbit responses were not consistent with the calculated orbit. In order to investigate the error source, we modify the transfer matrix of an accelerator structure so that the matrix model reproduces the measured orbit response. In this paper, we report detail of the error source and how the beam transfer model of a travelling wave accelerator structure is modified.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、2012年3月より24時間のユーザーへの供用運転を開始した。安定な XFEL 光を長時間維持するには、数多くの加速器パラメータの最適化が必要となる。そこで SACLA では、効率よくビーム調整を行うために線形加速器モデルを開発し、ビーム軌道やエンベロップの制御に利用してきた^[1,2]。

開発した線形加速器モデルは、多粒子軌道計算コード PARMELA の計算結果と比較して良い一致が得られているが、SACLA における実際のビーム応答とは一致しておらず、ビームエンベロップの制御に支障をきたしていた。不一致の要因として、初期電子分布測定や転送行列の精度等が考えられる。今回は、特に実測との差異が大きい加速管の転送行列を修正することにより、加速器モデルの精密化を図った。本稿では、線形加速器モデルの修正方法とその結果について報告する。

2. 線形加速器モデル

線形加速器モデルは、非相対論領域と相対論領域の二つのビームエネルギー領域に分けて計算を行う^[2]。今回修正した空間電荷効果を見捨てる相対論領域では、蓄積リングで確立された線形転送行列をベースに、加速器モデルを構築している。四極電磁石やドリフト空間は、従来既に導出されている転送行列を使用し、偏向電磁石はエッジフォーカスを考慮した転送行列を使用する。進行波加速管については、加速によるビームエネルギー変化に対応するため、エネルギーで規格化した位相空間 (X,X') における symplectic 転送行列 (M_{TWA}) を新たに導出し、エンベロップの転送を行っている^[1,2]。また加速管端部の収束効果についても、薄肉近似で取り扱うことで考慮している ($M_{TWA-in}, M_{TWA-out}$)。

$$M_{TWA-in} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{eE}{2\beta_0^2 \gamma_0 m_e c^2} \cos \theta & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{TWA} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta_1 \gamma_1}{\beta_0 \gamma_0}} & \frac{\sqrt{\beta_0 \gamma_0 \beta_1 \gamma_1}}{\gamma'} \ln \frac{\gamma_1 + \beta_1 \gamma_1}{\gamma_0 + \beta_0 \gamma_0} \\ 0 & \sqrt{\frac{\beta_0 \gamma_0}{\beta_1 \gamma_1}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$M_{TWA-out} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{eE}{2\beta_1^2 \gamma_1 m_e c^2} \cos \theta & 1 \end{pmatrix}$$

$$\bar{\gamma}' = \frac{\bar{\gamma}_1 - \bar{\gamma}_0}{L}$$

ここで $\bar{\beta}$ は光速に対する電子の速度比、 $\bar{\gamma}$ は Lorentz 因子であり、添え字の 0 は加速管入口、1 は加速管出口におけるパラメータを示す。L は加速管長、 $\bar{\gamma}'$ は $\bar{\gamma}$ のビーム進行方向距離に対する微分である。E と θ は進行波加速管 RF 電場の振幅と位相、e は電気素量、 m_e は電子の静止質量、c は真空中の光速である。

SACLA では線形加速器モデルを、加速器全体にわたるビームエンベロップの調整や軌道補正に使用している。

3. 実際の加速器におけるビーム応答との不一致の要因

加速器モデルとビーム応答との不一致の要因は、初期電子分布の不一致、転送行列の不一致等が考えられる。実際のビーム応答に一致させるには、これらの要因を切り分け評価し、加速器モデルを精密化していく必要がある。

3.1 初期電子分布の不一致

実際のビームの振る舞いを模型上で再現するには、

y-tajiri@spring8.or.jp

線形加速器の場合 Q-scan 法などで、Twiss parameter とエミッタンスの初期条件を測定する必要がある。レーザー発振に寄与するのは、電子バンチのコア部分であり、本来バンチコアのスライス初期分布を測定すべきである。SACLA では、高周波空洞ビームディフレクタ(RFDEF)を用いて垂直方向に伸ばした電子バンチを、その下流に設置したスリットで切り出し、バンチコアスライスの Q-scan を行うことを計画していたが、再現性に乏しく測定には至っていない。そのため現状測定しているのは、電子バンチ全体の射影分布である。

SACLA の電子ビームエミッタンスは、規格化エミッタンスで 1 mm-mrad 程度と非常に小さいため、射影分布の測定においても、スクリーンやカメラの十分な空間分解能や、光学系焦点距離の微調整などが必要である。また電子バンチ圧縮後は、スクリーンから強烈なコヒーレント OTR が発生するため、ビームサイズを正確に測定するためには、コヒーレント OTR の完全な除去も重要である。

3.2 転送行列の不一致

加速器模型と実測した転送行列が一致しない要因として、CSR や wake field などの非線形性、4 極電磁石の誤差、偏向電磁石の 6 極成分、RF 加速管端部の収束等が考えられる。4 極電磁石の誤差に関しては、個々の電磁石の磁場測定結果を基に転送行列の校正を行っている。また偏向電磁石にはエンドシムを取り付け、多極磁場成分の補正を行っている。これらの対策により、電子ビーム加速後ビームエネルギーが一定となる挿入光源部においては、ビーム応答と加速器模型の計算結果は比較的よい一致を示している。一方、加速器部においては、進行波加速管部分における転送行列のズレが大きく、原因の究明と模型の修正が必要であった。

4. 線形加速器模型の修正

4.1 進行波加速管転送行列の修正

転送行列の修正は、測定したビーム応答と加速器模型で計算した軌道を比較し行った。ビーム応答測定は、ステアリング電磁石を用いて電子ビーム軌道に角度変位を与え、下流の軌道変動を、加速器全体に設置されている RF 空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM) を用いて計測した。

比較の結果、式 (2) のように加速管上流側端部の転送行列(M_{TWA-in})の (2,1) 成分に係数($coeff(\theta)$)を乗じ、転送行列を修正することで、計算結果と実際のビーム応答がよく一致することが分かった。

$$M_{TWA-in} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{eE}{2\beta_0^2 \gamma_0 m_e c^2} \cos \theta \times coeff(\theta) & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Figure 1 に、実際のビーム応答と転送行列修正前後の模型を用いて計算した軌道の例を示す。Figure 1 a)の修正前模型で計算した軌道は、明らかに測定したビーム応答と異なるのに対し、Figure 1 b)に示

した修正後の模型は、係数を調整することでビーム応答をよく再現することができている。係数は垂直方向と水平方向で異なり、RF 位相に依存することも分かった。

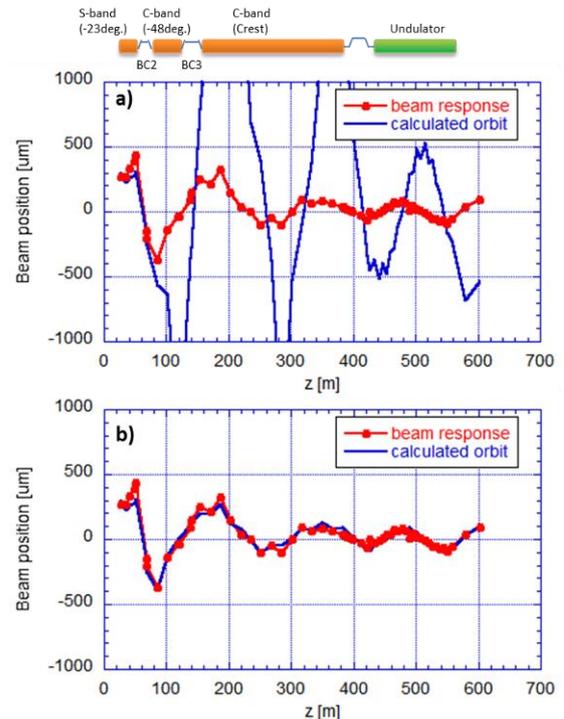


Figure 1 Measured beam response and calculated orbits. a) Orbit was calculated by original matrix, b) orbit was calculated by modified matrix.

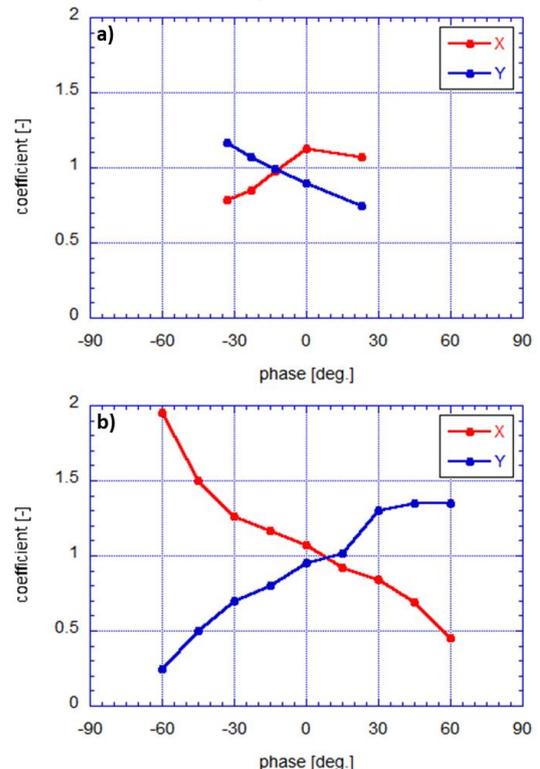


Figure 2 RF phase dependence of the coefficient. a) S-band, b) C-band.

実際のビーム応答を再現する係数を、RF 位相を変えながら測定した結果を Figure 2 に示す。S-band 進行波管と C-band 進行波管では異なる依存性を示しており、垂直と水平の係数の和は RF 位相によらずほぼ一定である。このことから、加速管端部のカプラーセルに 4 極の収束効果があることが分かった。

SACLA の S-band 加速管はシングルフィード型の水平対称構造のカプラー、C-band 加速管は J 型ダブルフィードカプラーを用いている。両者とも、カプラー空洞内電磁場の水平方向、垂直方向対称性は確保されているのでダイポールの影響はないものの、多極成分は残っているものと考えられる^[3]。また、S-Band 進行波管と C-Band 進行波管で極性が反転しているのは、加速管端部カプラーセルにおいて、S-Band が左右から RF を入力しているのに対し、C-Band は上下から入力しているためであると推測される。

4.2 ビームエンベロップの比較

修正した加速管転送行列と模型を用いてビームエンベロップを計算し、実際の測定結果と比較した。測定の模式図を Figure 3 に示す。

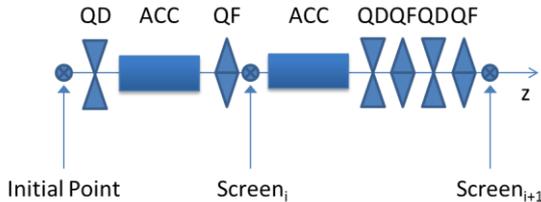


Figure 3 Schematic view of the measurements.

加速器各所に設置した OTR スクリーンのうち、コヒーレント OTR が発生しない最終段のバンチコンプレッサー (BC3) 上流にある 7 カ所のスクリーン、およびコヒーレント OTR を除去するためのマスクを取り付けた YAG スクリーン 2 カ所においてビームサイズ測定を行なった。

Initial Point から $Screen_i$ ($i=1,2,3,\dots$) までの転送行列 M_i ($i=1,2,3,\dots$) は、ドリフトスペースや四極電磁石、進行波加速管などのコンポーネントの掛け合わせで表される。

$$M_i = \dots M_{QD} M_D M_{ACC} M_D M_{QF} \dots = \begin{pmatrix} m_{(i)11} & m_{(i)12} \\ m_{(i)21} & m_{(i)22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Initial Point から i 番目のスクリーンまでの転送行列を M_i とし、測定したビーム径を σ_i とすると

$$\sigma_i = \sqrt{\beta_i \frac{\varepsilon_n}{\beta_i \gamma_i}} = \sqrt{(\gamma_0 m_{(i)12}^2 - 2\alpha_0 m_{(i)11} m_{(i)12} + \beta_0 m_{(i)11}^2) \frac{\varepsilon_n}{\beta_i \gamma_i}} \quad (4)$$

となる。ここで、 β_i は i 番目のスクリーン位置でのベータ関数、 ε_n は規格化エミッタンス、 $\beta_0, \alpha_0, \gamma_0$ は Initial Point の Twiss parameter である。 σ はスクリーンの射影プロファイルをガウスフィットし、その標準偏差から求めた。 ε_n を 1.0 mm-mrad と仮定して、Initial Point の Twiss parameter を最適化パラメータとして最小二乗で求め、下記の式で表される残差の値で評価を行った。

$$\text{残差} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sigma_i - \beta_i \frac{\varepsilon_n}{\beta_i \gamma_i} \right)^2} \quad (5)$$

修正前の模型を用いて計算した残差は、水平方向が 0.11、垂直方向が 0.22 であったのに対し、修正した模型を用いて計算した残差は水平方向が 0.07、垂直方向が 0.04 となり、水平方向で約 30%、垂直方向では約 85% の向上が見られた。Figure 4 に最小二乗で求めた初期 Twiss parameter を、模型によって伝播させたビームエンベロップ (ベータ関数) を示す。Figure 4 a) の修正前模型では、エンベロップが発散しているのに対し、Figure 4 b) の修正後模型を用いて計算したエンベロップは、C-band クレスト部において FODO に近いエンベロップが得られ、エンベロップ計算の精度が向上している。

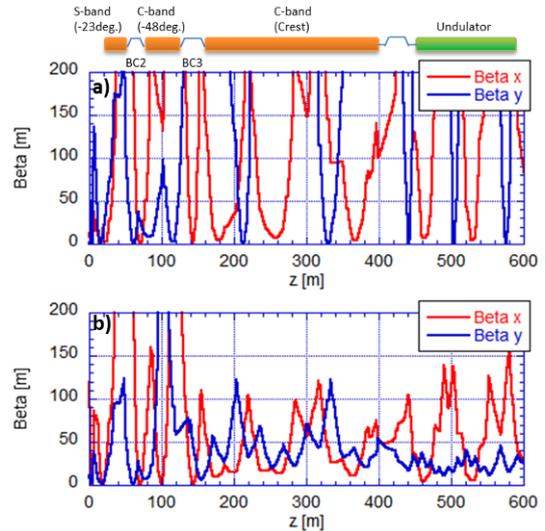


Figure 4 Beam envelope.

a) Original matrix, b) Modified matrix

4.3 RF ユニット切り替え時のエンベロップ調整

SACLA では、BC3 上流の C-band 12 ユニットの内の 1 ユニットの待機号機としており、使用中の 1 ユニットの故障した場合は待機号機と切り替えることで運転を継続する。待機号機との切り替えの際、電子ビーム収束系のパラメータが変化するため、四極電磁石の再調整が必要である。これまでは模型の精度が低かったため、レーザー強度を指標として手動

で経験的に複数の四極電磁石を調整し、ビームエンベロップの再最適化を行っていた。今回モデルの修正により、C-band 12 ユニットの転送行列が同じになる条件を計算で求め四極電磁石を調整することで、短時間でレーザー強度の再現が行えるようになった。

5. まとめ

今回、実測したビーム応答をもとに、進行波加速管の転送行列の修正を試みた。進行波加速管の端部収束力に係数を乗じ調整することで、ビーム応答の測定結果と線形加速器モデルの計算結果をよく一致させることができた。また、その係数は垂直方向と水平方向で異なり、RF 位相に依存することが分かった。水平方向の係数と垂直方向の係数の和が一定であることから、加速管端部のカプラーセルに 4 極収束成分があることがわかった。

現在 SACLA では修正したモデルを用いて、加速器全体にわたるエンベロップの調整や、ビーム軌道補正を行っている。ビーム軌道補正では、補正精度が劇的に向上している^[4]。しかしエンベロップの制御においては、初期電子分布測定誤差が大きいこともあり、まだ完全に制御できているとは言えない。しかし RF ユニット切り替え時に、変更するユニットを含む転送行列を切り替え前後で一致させることで、ビームエンベロップの調整時間を短縮することができた。今後、初期電子分布測定精度の向上、CSR や wake field 等の非線形効果のモデル化により、加速器モデルの更なる高精度化を図っていく予定である。

参考文献

- [1] T.Hara et al., “Transvers Envelope Analysis for Accelerating Relativistic Electron Beams in a Linear Accelerator as a Photon Source” NUCL INSTRUM METH A, vol.624, p.65 (2010).
- [2] Y. Tajiri, et al., “Beam envelope control using linear accelerator model in SACLA at SPring-8”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, p.985(2011).
- [3] H. Maesaka, et al., “Analysis and Measurement of Focusing Effects in a Traveling Wave Linear Accelerator”, in these proceedings.
- [4] T. Hasegawa, et al., “Orbit correction of the electron beam using the linear accelerator model at SACLA”, in these proceedings.