

BEAM ENVELOPE CONTROL USING LINEAR ACCELERATOR MODEL IN SACLA AT SPring-8

Yasuyuki Tajiri ^{#A)}, Kazuaki Togawa ^{B)}, Toru Hara ^{B)}, Shinichiro Tanaka ^{A)}, Taichi Hasegawa ^{A)}, Takuya Morinaga ^{A)},
Yutaka Kano ^{A)}, Ryo Yamamoto ^{A)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}

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

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo 679-5165

^{B)} RIKEN SPring-8 Center/XFEL Research and Development Division

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

Abstract

In order to perform efficient beam tuning at SACLA, we have developed a calculation code of the beam transverse envelope in a linear accelerator using symplectic matrixes. In this paper, we report detail of our code and the preliminary results of the envelope matching in the SACLA accelerator.

SACLA における線形加速器模型に基づくビームエンベロープ制御

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA では、2011 年 3 月に 8GeV 加速を達成、2011 年 4 月から XFEL 発振に向けた本格的なビーム調整が開始し、2011 年 6 月 7 日に XFEL の初観測に成功した。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。SACLA では、効率よくビーム調整を行うために、電子銃からビームダンプまでのビームエンベロープやピーク電流を、運転中にリアルタイムで予測できる線形加速器模型の開発と計算コードの整備を行ってきた。

エンベロープ計算は、二つの領域に分けて計算を行う。空間電荷効果の無視できる超相対論領域では、これまで蓄積リングにおいて確立されてきた電子ビームの線形転送行列を、エネルギーが変化する線形加速器にも適用できるように拡張し用いている。一方、空間電荷効果が無視できない低エネルギー領域では、低エミッタンス電子銃からのビームを円柱均一ビームと近似し、一次元シミュレータで独立に計算したピーク電流から求めた横方向空間電荷効果を用いて、速度変調圧縮過程でのビームエンベロープ計算を行っている。上記手法により、多数の粒子を飛ばす多粒子軌道計算コードに比べ計算時間が圧倒的に短く、加速器全体にわたるビームエンベロープやピーク電流の予測がほぼリアルタイムで可能になる。

本稿では開発した線形加速器模型の詳細と、SACLA における模型を用いたビームエンベロープ制御の結果について報告する。

2. 線形加速器模型

計算に用いた模型は、電子ビームの縦方向と横方向の運動が独立であると仮定し、縦方向は一次元シミュレータでビーム電流とエネルギーの計算

を行い、横方向については線形転送行列を用いて低エネルギー領域と超相対論領域の領域に分けてエンベロープ計算を行っている。

2.1 一次元シミュレータ^[1]

ピーク電流とビームエネルギーを評価する一次元シミュレータでは、空間電荷効果は今回取り入れていない。各 RF 空洞の電磁場は SUPERFISH で計算した軸対称分布を使用し、薄肉近似で誤差が無視できる程度に空洞を分割して縦方向の電子パンチ形状を計算した。磁気パンチ圧縮シケイン (BC) のエネルギーと飛程の関係は Taylor 展開しない厳密な関係式を使用している。また、加速管ウェーク場やシケインの CSR によるパンチ内電子のエネルギー変化についても、一次元近似で計算に取り込んでいる。シミュレータ計算結果は、多粒子軌道計算コードの PARMELA 及び ELEGANT の結果と比較し、良い一致を得ている。

図 1 に、一次元シミュレータと ELEGANT で計算した時間-エネルギー空間の電子パンチ分布を示

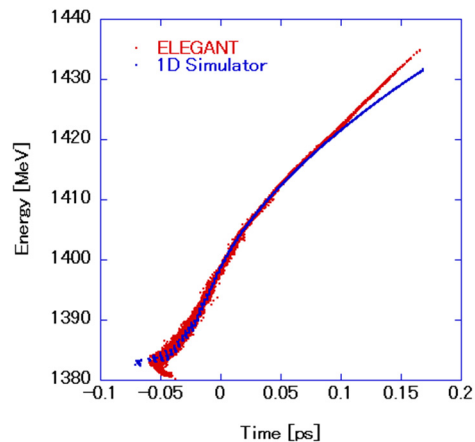


図 1: 一次元シミュレータと ELEGANT の比較 (BC3 出口での時間-エネルギー空間の電子パンチ分布)

[#] y-tajiri@spring8.or.jp

2.2 低エネルギー領域のエンベロープ計算^[2]

SACLA 熱電子銃から発生した低エミッタンスビームは、スリットスキャンの測定から均一な円柱ビームに近い状態になっていることが確認されており、入射部の低エネルギー領域では空間電荷力の線形性がほぼ保たれ、スライスエミッタンスの悪化を防いでいる^[3]。エンベロープ計算においても横方向空間電荷力は線形であると近似し、空間電荷による発散力を線形の外場に置き換え、symplectic 行列(M_{sc})によりベータ関数を計算した。

$$M_{sc} = \begin{pmatrix} \cosh(\Delta z \sqrt{K(z)}) & \frac{1}{\sqrt{K(z)}} \sinh(\Delta z \sqrt{K(z)}) \\ \sqrt{K(z)} \sinh(\Delta z \sqrt{K(z)}) & \cosh(\Delta z \sqrt{K(z)}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$K(z) = \frac{2I}{(\beta\gamma)^3 I_A r_m^2}$$

ここで I はビーム電流、 I_A は Alfvén 電流(17kA)、 β は光速に対する電子の速度、 γ は Lorentz 因子である。

SACLA 入射部の速度変調パンチ圧縮過程では、ビームエネルギーとピーク電流の変化を一次元シミュレータで計算し、(1)式より横方向の空間電荷力を求めてビームエンベロープを計算した。但し電子ビームのエネルギーが約 30MeV に達する C-band 補正空洞より下流では、計算時間短縮のため横方向空間電荷効果は無視している。磁気レンズについては、薄肉近似で求めた symplectic 行列を用いた。

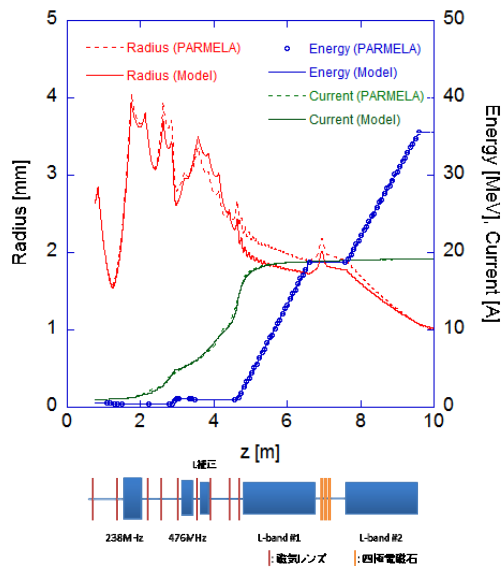


図 2: SACLA 入射器部での模型と PAEMELA との比較

定在波空洞については、まず、加速電場が一定とみなせる程度まで縦方向に空洞を分割する。分

割区間毎の symplectic 行列は、ref.[4]の変数変換を施すことによって求められ、これをベータ関数の転送行列として使用した。

上記の模型の評価のため、SACLA 入射器部において複数の条件で、多粒子軌道計算 PARMELA と比較を行い、良い一致が得られた(図 2)。

2.3 超相対論領域の線形転送行列^[4]

四極電磁石やドリフト空間は、従来の転送行列を使用した。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した。アンジュレータについては、垂直方向の natural focusing をピーク磁場から求め、計算に取り入れている。

進行波管については、加速管端部の収束効果を薄肉近似で考慮($M_{TWA-in}, M_{TWA-out}$)、加速によるビームエネルギー変化については、定在波空洞と同様の変数変換を用いて symplectic 行列(M_{TWA})を求め計算に用いた。

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

$$M_{TWA} = \begin{pmatrix} \frac{\beta_1 \gamma_1}{\beta_0 \gamma_0} & \frac{\sqrt{\beta_0 \gamma_0 \beta_1 \gamma_1}}{\gamma} \ln \frac{\gamma_1 + \beta_1 \gamma_1}{\gamma_0 + \beta_0 \gamma_0} \\ 0 & \sqrt{\frac{\beta_0 \gamma_0}{\beta_1 \gamma_1}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

上記の模型を組み合わせることで、電子銃から電子ビームダンプまでの加速器全体のビームエンベロープを計算することができ、各種パラメータ変更に対するエンベロープの変化をほぼリアルタイムで予測することが可能である。SACLA 加速器のエンベロープ調整は、この模型を用いてエンベロープを計算、予測する GUI を用いている(図 3)。



図 3: SACLA 加速器のビームエンベロープ計算用 GUI (図のベータ関数は設計パラメータ)

3. 模型を用いたビームエンベロープ制御

実際のビームの振る舞いを模型上で再現するには、Q-scan 法などで Twiss parameter を測定する必要がある。SACLA では、ステンレス薄膜を用いた OTR スクリーンを加速器各所に配置していたが、ビームのバンチ圧縮を強めると C-OTR (Coherent Optical Transition Radiation) が発生し、横方向ビームプロファイルが測定できないという問題に直面した。この問題を回避するため、急遽マスク付き YAG スクリーンを BC3 下流とアンジュレータ入り口の 2カ所に設置し、プロファイルの測定を行った。

3.1 主加速部のエンベロープマッチング

測定誤差を小さくするためには、複数のスクリーンで Q-scan を行う必要があるが、C-OTR の問題により、BC3 より下流で使用できるスクリーンは現状 2カ所しかない。そこで、加速器の随所にある四極電磁石の収束力を変化させた時のビームサイズを 1つのスクリーンで測定し、得られた複数の Q-scan の結果を最小 2 乗で fit することで、Twiss parameter を求めた。

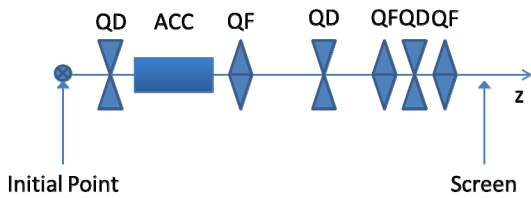


図 4: 測定の模式図

測定の模式図を図 4 に示す。Initial Point から Screen 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 と Screen の間にある任意の四極電磁石の収束力を変化させ、その時のスクリーンにおけるビーム径の変化を測定する。 i 回目の条件の転送行列を M_i とし、測定したビーム径を σ_i とすると

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sqrt{\beta_i \frac{\varepsilon_n}{\beta\gamma}} \\ &= \sqrt{(\gamma_0 m_{(i)12}^2 - 2\alpha_0 m_{(i)11} m_{(i)12} + \beta_0 m_{(i)11}^2) \frac{\varepsilon_n}{\beta\gamma}} \end{aligned} \quad (4)$$

とかける。ここで、 β_i は i 回目の測定におけるスクリーン位置でのベータ関数、 ε_n は規格化エミッタ

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。 σ_i の測定誤差を小さくするため、今回は収束系の条件が異なる 20 個の測定結果から最小 2 乗法で ε_n 及び Initial Point の Twiss parameter を求めた。この測定した Initial Point の Twiss parameter を、模型と現状の加速器パラメータを用いて上下流に伝搬させ、現状のエンベロープを求める。このエンベロープを設計値に戻すよう、模型を使って最適な四極電磁石の収束力計算しエンベロープを調整する。

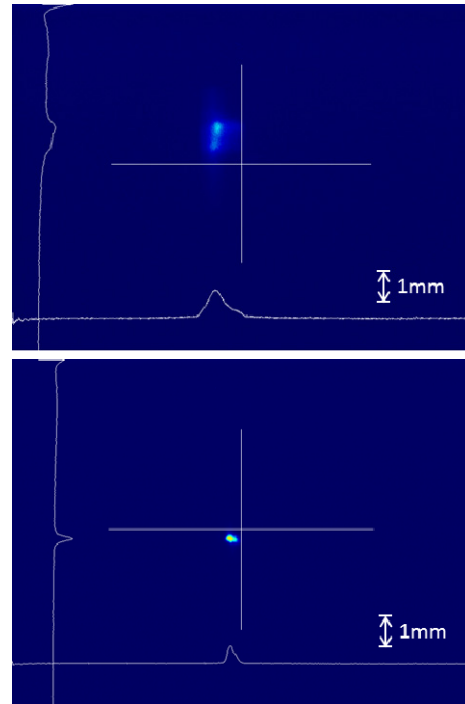


図 5: 加速器下流のビームプロファイル (上) エンベロープ調整前、(下) 調整後

図 5 は、C-band 主加速部上流にある BC3 付近の四極電磁石 8 台を使用して、主加速部のビームエンベロープを設計値に戻した時の、エンベロープ調整前後でのアンジュレータ入り口のビームプロファイルである。主加速部の収束系は FODO であるが、調整前はエンベロープのマッチングがうまくとれておらず、加速によるエミッタスタンピングによるビームサイズの減少があまり見られなかった。調整後は、ほぼ設計値に近いビームサイズを得ることができた。

3.2 アンジュレータ内のビームエンベロープマッチング

アンジュレータ部に設置された OTR スクリーンが C-OTR により使用できないため、アンジュレータ部のビームエンベロープは、分光したアンジュレータ光の角度発散から求めた。これは四極電磁石の収束力を変化させた時のビーム形状の変化を、スクリーン上のビームプロファイルではなく、分光後

のアンジュレータ光のビームサイズで評価する方法である。電子ビームのエネルギーブレッドなどが大きいと精度が落ちるものの、従来の Q-scan 法と同様の測定ができる。アンジュレータ部入り口の投影エミッタンスと Twiss parameter をまず測定し、アンジュレータ部 FODO のエンベロープを計算、その後アンジュレータ入り口のマッチングをとるよう収束系を調整した。

SACLA のアンジュレータ部には 18 台のアンジュレータが設置されているが、エンベロープ調整後、各アンジュレータからの自発光のビームサイズ測定を行った結果を図 6 に示す。ビームサイズはガウスフィットして得られた標準偏差で評価した。発散角は自発光ビームサイズを、光源と検出器間の距離で除算することにより求めた。下流のアンジュレータのビームサイズが小さくなるのは、光源と検出器間の距離が近くなるためである。分光した自発光プロファイルは歪もなく円形であることから、アンジュレータ部の電子ビーム発散角はほぼ揃っており、エンベロープマッチングは概ね取れていると思われる。

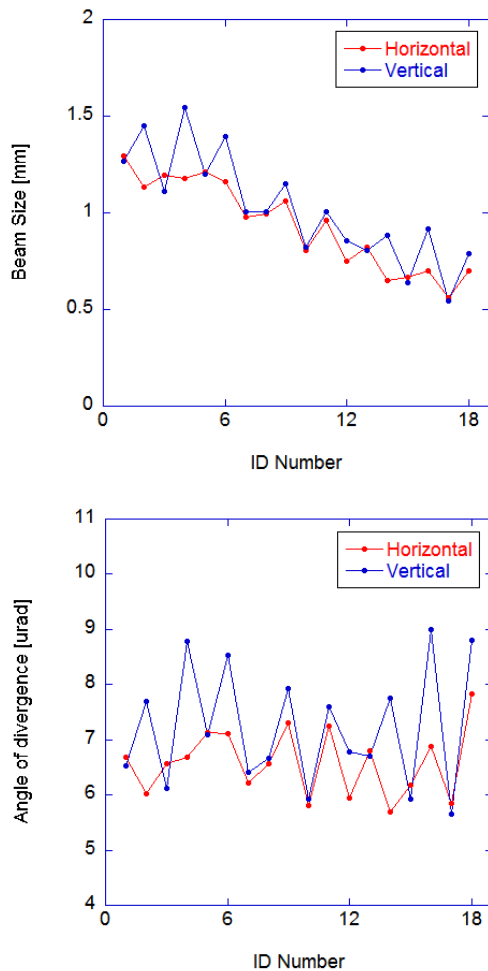


図 6: 分光したアンジュレータ放射光のビームサイズ (上) と角度発散 (下)

4. まとめ

電子銃から電子ビームダンプまでの電子ビームエンベロープを、リアルタイムで計算、予測する線形加速器模型および計算コードの開発を行った。加速器模型および計算コードの結果は、PARMELA および ELEGANT の結果と比較し、良い一致が得られている。

開発した模型を用いて SACLA 加速器のビームエンベロープ制御を行い、電子ビームのプロファイルや、アンジュレータ放射光のプロファイルから、エンベロープマッチングは比較的うまくいっていると思われる。今後ビームの応答関数の測定等を行い、模型に反映させることで、実機と模型をより近づけていく予定である。

参考文献

- [1] H.Tanaka et al., “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3,2007,Wako Japan)p.613
- [2] K.Togawa et al., “低エミッタンス空間電荷ビームのエンベロープ計算模型”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (in Japanese), Himeji, p.434 (2010).
- [3] K.Togawa et al., “CeB6 electron gun for low-emittance injector.” Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 020703 (2007).
- [4] 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).