

進行波型電子線型加速器の収束効果の解析と測定

ANALYSIS AND MEASUREMENT OF FOCUSING EFFECTS IN A TRAVELING WAVE LINEAR ACCELERATOR

前坂比呂和[#], 安積隆夫, 恵郷博文, 原徹, 稲垣隆宏, 櫻井辰幸, 渡川和晃, 田中均, 大竹雄次
 Hirokazu Maesaka[#], Takao Asaka, Hiroyasu Ego, Toru Hara, Takahiro Inagaki, Tatsuyuki Sakurai, Kazuaki Togawa,
 Hitoshi Tanaka, Yuji Otake
 RIKEN SPring-8 Center

Abstract

For a recent precise linear accelerator, such as the x-ray free electron laser facility, SACLA, the beam orbit and the beam envelop should be properly calculated from the beam dynamics model of a traveling wave accelerating structure (TWA). Therefore, we compared a predicted beam orbit by a TWA model with a measured orbit by rf cavity beam position monitors. Although the beam orbit in the crest acceleration part was appropriately reproduced, that of the off-crest acceleration part did not agree with the prediction. We found out that the discrepancy came from a quadrupole field in the coupler cell of the TWA. The strength of the quadrupole field was estimated by using 3-dimensional rf simulation and the TWA model was modified by the addition of the quadrupole focusing effect. By using the modified model, the beam orbit was properly reproduced in both the crest acceleration part and the off-crest acceleration part.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA のように、高品質な電子ビームを生成するための線型加速器においては、進行波型加速管の中でのビームの振る舞いが計算によって適切に理解されなければならない。そのため、進行波型加速管の正確な力学モデルが必要となる。

SACLA では、利用実験に合わせてビームのエネルギーを変えたり、不具合の発生した加速ユニットを停止した際に加速ユニットの組み合わせを変えたりすることが多い。その際に加速器やアンジュレータでのビームエンベロップのマッチングを迅速に取るためには、進行波型加速管の力学モデルを使って正確に計算できなければならない。また、加速器部分での軌道の補正やビーム位置モニタの較正などをおこなう際にもこのような力学モデルを使って計算できると有用である。実際、そのような力学モデルとして、加速によるダンピング効果や端部の収束効果を取り入れたものが提案されている^[1]。

そこで、その力学モデルを SACLA で使用されている C バンドチョークモード型加速管^[2]に適用し、ビーム軌道が適切に再現できるかどうかを実験的に確かめた。方法としては、ステアリング電磁石でビームをキックして軌道に摂動を与え、その軌道の振る舞いを RF 空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM)^[3]で測定した。その測定結果とモデルによる計算結果が一致するかどうかを確かめた。

本稿では、まず、通常の進行波型加速管の力学モデルについて簡単にまとめ、RF-BPM で測定した軌道との比較の結果を述べる。その結果、オフ Crest 加速のときに端部に四極の収束効果があることが示唆されたため、その効果を 3次元電磁場シミュ

レーションで計算した。その計算結果をもとに修正した力学モデルを適用して、測定結果を再現できるかを確かめた。これらの一連の解析結果について順に述べる。

2. 進行波型加速管のビームダイナミクス

現在、進行波加速管の力学モデルとしては、以下の2つの効果が考えられている^[1]。

- 加速によるダンピング
- 加速管端部の単極収束・発散

また、100 MeV 以下の低エネルギーでは加速管のセルごとの収束と発散の繰り返しの結果として弱い収束が残ることが示されている^[4]、ここではそのような低エネルギー領域のことは考えないので、無視することとする。以下、上記の2つの効果について簡単にまとめておく。なお、電子の進行方向を z 軸とし、ビーム位置 x の z による微分を x' とする。また、ローレンツファクタを γ と表すこととし、 $\beta = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$ とする。

2.1. 加速によるダンピング

電子ビームが加速されると横方向運動量は変化しないのに対して進行方向運動量が増加するので、 x' が減少する。電子ビームが感じる加速電場が一定のとき、Crest 加速時のローレンツファクタの z 微分を γ' とおくと、転送行列 M_{Acc} は、

$$M_{\text{Acc}} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\beta_0 \gamma_0}{\gamma' \cos \theta} \ln \frac{\gamma_1 + \beta_1 \gamma_1}{\gamma_0 + \beta_0 \gamma_0} \\ 0 & \frac{\beta_0 \gamma_0}{\beta_1 \gamma_1} \end{pmatrix}$$

となる^[1]。ここに、 θ は Crest 位相からのビームの位相差である。また、加速前のローレンツファク

[#]maesaka@spring8.or.jp

タには添字 0 を、加速後には 1 をつけた。そして、 γ' は加速電場の振幅 E_0 を用いて、

$$\gamma' = \frac{eE_0}{m_e c^2}$$

と表すことができる。ここに、 e は素電荷、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。

2.2. 加速管端部の単極収束・発散

加速管の端部では、 z 方向電場が変化するため、電荷がない場合のガウスの法則

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

より、軸対称な加速管の場合、円柱座標 (ρ, ϕ, z) を用いて、

$$\frac{\partial E_\rho}{\partial \rho} + \frac{E_\rho}{\rho} = -\frac{\partial E_z}{\partial z}$$

と表せることがわかる。ここで、 E_ρ は軸付近で ρ に比例することとすると、

$$E_\rho = -\frac{\partial E_z}{\partial z} \cdot \frac{\rho}{2}$$

となる。したがって、水平・垂直とも、加速管の入口では収束、出口では発散が働くことがわかる。これを薄肉レンズ近似した場合、加速管の入口と出口の転送行列 M_{in}, M_{out} はそれぞれ、

$$M_{in} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\gamma' \cos \theta}{2\beta_0^2 \gamma_0} & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{out} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\gamma' \cos \theta}{2\beta_1^2 \gamma_1} & 1 \end{pmatrix}$$

と表すことができる^[1]。

3. データとの比較

前節に示した加速管の力学モデルが正しいかどうかを確認するため、ビーム軌道が正しく計算できるかどうかのデータをとった。方法としては、ステアリング電磁石でビーム軌道に摂動を与え、その後の軌道の歪みを RF-BPM で検出することとした。ステアリング電磁石のキック量はその電流値と積分磁場の関係から算出した。加速管の転送行列は前節に述べた力学モデルに実際の加速勾配などを代入して求めた。また、四極電磁石などについても、あらかじめわかっている電流値と K 値との関係から転送行列を求めた。これらの転送行列をもとにキックに使用したステアリング電磁石より下流の軌道の歪みを計算し、RF-BPM のデータと比較することとした。

まず、クレスト加速部分のステアリング電磁石でビームをキックしたところ、Fig. 1 のようになった。キック後のベータatron振動が振幅・位相ともに適切に計算できており、前節に述べた力学モデルによって軌道が正しく再現されることがわかる。

次に、オフクレスト加速の部分のステアリング電磁石でキックしたところ、Fig. 2 のようになった。オフクレスト加速の部分ではビーム軌道を全く再現できないことがわかる。このことから、オフクレスト加速に関しては前節の加速管の力学モデルが正しくないものと考えられる。実際、オフクレスト加速していた加速管をクレスト位相で運転した場合、前節の力学モデルで適切に軌道が再現できた。また、オフクレスト加速の場合でも、加速管端部の収束力を無理やり補正すればビーム軌道を再現できることがわかった。したがって、オフクレスト加速では加速管の収束力に何か違う成分が存在することが予想された。

この収束力の性質を調べるため、加速管の RF 位相と収束力の補正量の関係を測定したところ、Fig. 3 のようになった。この図の縦軸は、加速管の入口の収束力だけを何倍にすれば軌道を再現できるかを示している。このデータから、位相に対する収束力の補正量の依存性は水平と垂直で傾きの符号が異なっている。これは、加速管端部にて四極の収束成分があることを示唆している。そして、この四極収束成分は、クレスト加速位相では存在せず、オフクレスト加速のときにのみ発生すると考えられる。

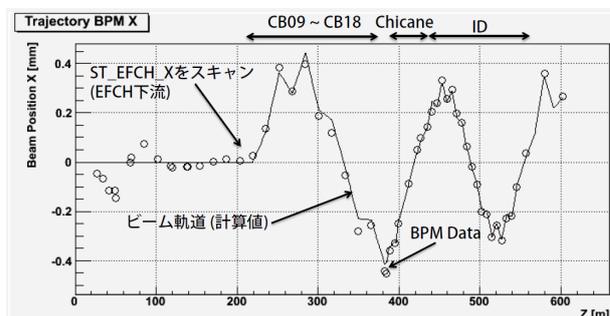


Figure 1: Beam orbit distortion induced by a steering magnet in the crest acceleration part. The open circles are RF-BPM data and the solid line is a calculated orbit.

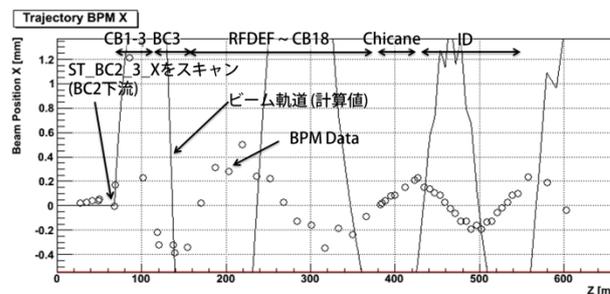


Figure 2: Beam orbit distortion induced by a steering magnet in the off-crest acceleration part. The open circles are RF-BPM data and the solid line is a calculated orbit.

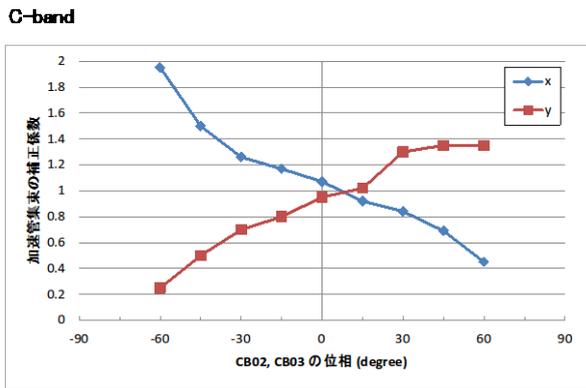


Figure 3: Correction factor for the edge focusing effect at the entrance of the traveling wave accelerating structure as a function of the rf phase. The horizontal axis shows a phase difference from the crest. The blue diamonds are the correction factors for horizontal focusing and the red rectangles are those for vertical focusing.

4. 加速管カプラの四極成分の解析

加速管カプラでの四極成分がどの程度存在するかを確かめるため、Cバンドチョークモード加速管^[2]について3次元RF電磁場シミュレータHFSSを使って解析をおこなった。まず、解析に使用したモデルをFig.4に示す。2つのカプラセルの間にレギュラーセルが4セル入ったものを使ってシミュレーションした。カプラセルの形状は、J型のダブルフィードカプラ^[5]となっており、レギュラーセルの部分はチョーク構造^[2]を持っている。なお、加速管内の電磁場強度は、SACLAでの典型的な加速電界である35MV/mに規格化して議論を進める。

シミュレーションの結果として得られたカプラセルでの電場強度、磁場強度をFig.5に示す。カプラセルには対向する2つの結合孔があるため、電磁場が楕円形に歪んでおり、単極成分に加えて四極成分が存在することが見てとれる。そこで、収束に寄与する横方向電磁場を中心に解析を進める。その一例として、カプラセルの横方向磁場について $B_y(x)$ と $B_x(y)$ をプロットしたものをFig.6に示す。この $B_y(x)$ と $B_x(y)$ を足して2で割ったものが単極成分で、引いて2で割ったものが四極成分となる。

このようにして求めたセルごとに電子ビームが感じる四極収束成分をプロットするとFig.7のようになった。横軸はセル番号に換算してある。また、このプロットではビームがRFのゼロクロス位相で入射された場合のものとしている。カプラセルにて大きな四極収束成分があり、カプラ前後のアイリス部分に比較的小さめの電場収束とセル内での大きい磁場収束があることがわかる。また、入口カプラと出口カプラの収束力の符号が同じであるため、入口と出口で収束力を強め合う関係にあることがわかる。これは、入口と出口で符号が異なる単極収束作用とは対照的である。

次に、クレスト位相で入射した場合の四極収束力をプロットするとFig.8のようになる。カプラセル内で収束と発散が打ち消し合って四極収束力がほぼ無くなるのがわかる。以上の定性的な振る舞いはFig.3に示したデータと合っており、オフクレスト加速のときにはカプラの四極収束力が無視できないものと考えられる。

ゼロクロス位相、45度位相、クレスト位相それぞれの場合での入口と出口のカプラの四極収束力と単極収束力をまとめるとTable1のようになる。この表では、加速勾配が35MV/mのときの四極収束力の積分値をTm/mの単位に換算して示している。この結果から、ゼロクロス位相での四極収束力はクレスト位相での単極収束力の約半分に相当することがわかる。なお、この割合はカプラの形状によって変わる量であることに注意が必要である。また、符号に着目すると、単極収束効果は入口と出口で打ち消しあうが、四極収束効果は強め合うことがわかる。そのため、オフクレスト加速のときにはかなり大きな四極収束を受けることが予想される。

Table 1: Focusing Force in the Coupler Cell

Phase	Coupler	Monopole [Tm/m]	Quadrupole [Tm/m]
Zero-crossing	input	-0.0024	-0.0170
	output	-0.0001	-0.0166
45 deg.	input	-0.0247	-0.0117
	output	0.0220	-0.0122
Crest	input	-0.0326	0.0005
	output	0.0312	-0.0007

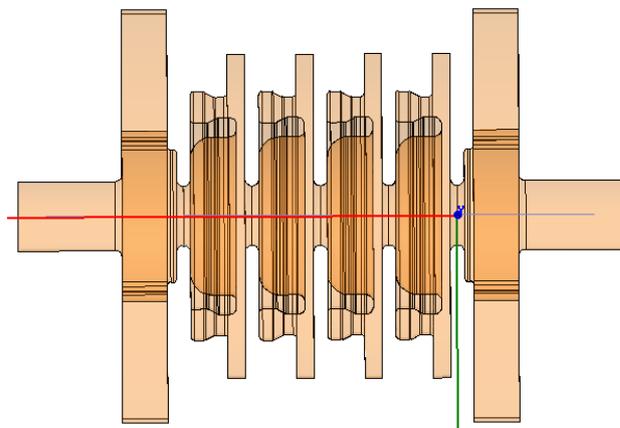


Figure 4: C-band accelerator model for 3-dimensional rf field simulation.

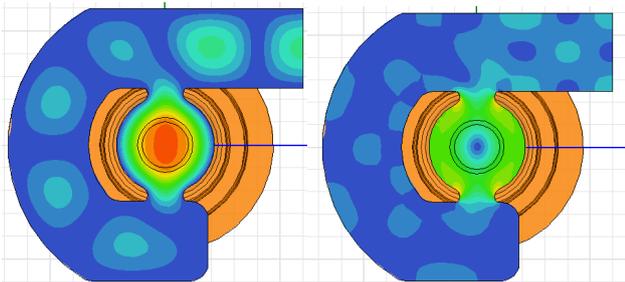


Figure 5: Contour plot of the E-field (left) and B-field (right) in the coupler cell.

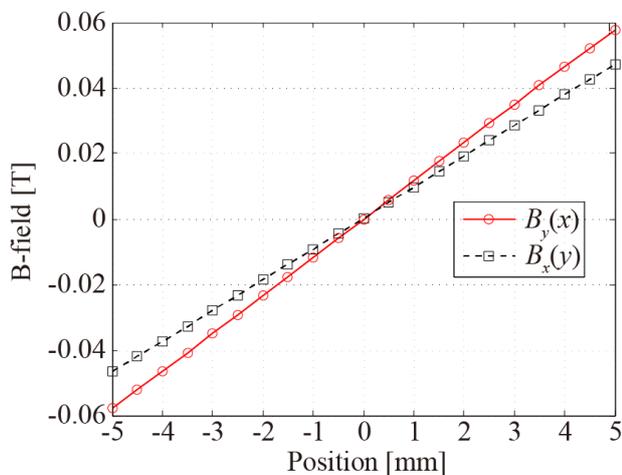


Figure 6: Transverse B-field in the coupler cell.

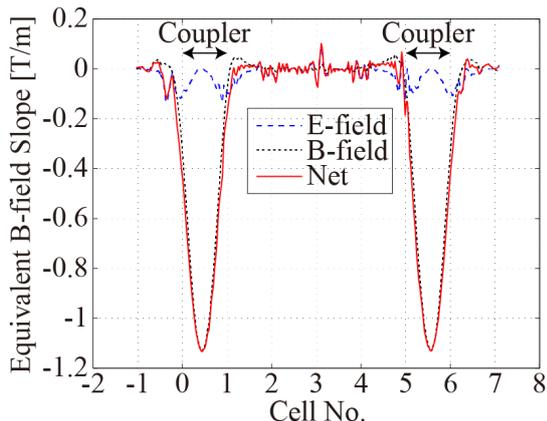


Figure 7: Quadrupole focusing field on the beam at the zero-crossing phase. The E-field strength is converted to the focusing field equivalent to the B-field.

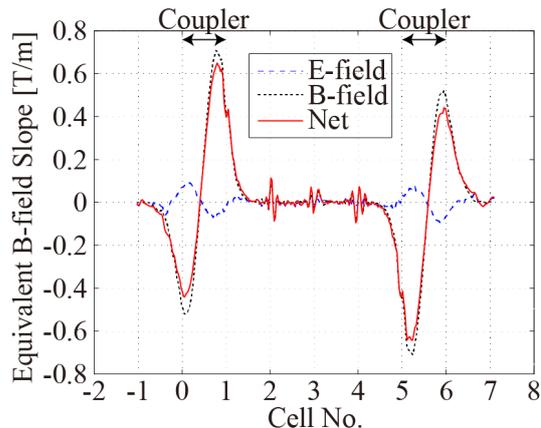


Figure 8: Quadrupole focusing field on the beam at the crest phase.

5. 新しいモデルとデータとの比較

前節のシミュレーション結果を踏まえ、四極収束効果を取り入れた新しいモデルでの端部の収束に関する転送行列を以下のようにした。

$$M_{in} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ [\alpha_{quad} \sin \theta - (1 + \epsilon_{mono}) \cos \theta] \frac{\gamma'}{2\beta_0^2 \gamma_0} & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{out} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (\alpha_{quad} \sin \theta + \cos \theta) \frac{\gamma'}{2\beta_1^2 \gamma_1} & 1 \end{pmatrix}$$

ここに、 α_{quad} は四極収束力の強さを表す係数で、 ϵ_{mono} は入口の単極収束効果の補正量である。この α_{quad} は加速管のカプラの形状によって決まる量である。また、 ϵ_{mono} を入れた理由は、単極収束効果もわずかに補正したほうがデータを再現しやすいためである。

実際に上記の新しいモデルでビーム軌道の歪みを計算し、測定値と比較したものを Fig. 9 に示す。四極収束力 α_{quad} としては、前節のシミュレーション結果から得られる値の約 70% とすると軌道が最もよく再現できることがわかった。また、加速管入口の単極収束力の補正值 ϵ_{mono} を 0.03 とするとビーム軌道が水平・垂直ともデータとよく一致した。このモデルを使用することで、オフcrest加速部分 ($z < 120$ m) もcrest加速部分 ($z > 120$ m) の両方において適切に軌道が再現できている。このように、収束力の絶対値についてはシミュレーション結果と若干数値が異なっているものの、オフcrest加速部分では四極収束力を考慮する必要があることは明確となった。

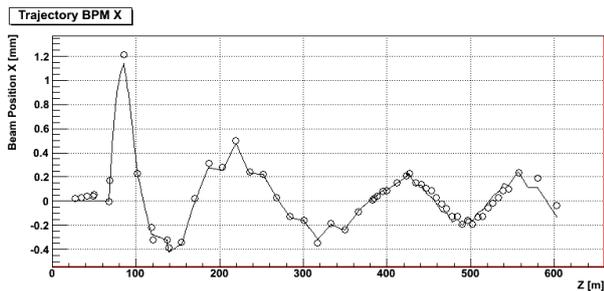


Figure 9: Beam orbit distortion induced by a steering magnet in the off-crest acceleration part. The quadrupole edge focusing effect of the accelerator is implemented in the calculated orbit. The open circles are RF-BPM data and the solid line is the calculated orbit.

6. 結論と今後

これまで信じられてきた進行波型加速管の力学モデルを RF-BPM のデータを使って実験的に検証した。その結果、クレスト加速部分では正しく扱えることがわかったが、オフクレスト加速では正しく扱えないことが判明した。そして、その収束効果は加速管のカプラの非対称性による四極成分の電磁場に起因することを見出した。SACLA の C バンド加速管において 3 次元電磁場シミュレーションをおこなったところ、四極収束効果は単極収束効果の半分程度存在することがわかった。また、単極収束効果は入口と出口で打ち消しあうのに対し、四極収束効果は入口と出口で符号が同じとなって強め合うこともわかった。実際、オフクレスト加速部分・クレスト加速部分両方のビーム軌道について、四極収束力を含めた新しいモデルで解析したところ、水平・垂直とも軌道を適切に再現できることがわかった。収束力の絶対値については電磁場シミュレーションで得られる収束力より若干小さい値となったが、この差の原因究明については今後の課題である。いずれにせよ、進行波型加速管のカプラの非対称性からくる四極収束力は、オフクレスト加速時において十分に考慮しなければならないことが結論づけられた。SACLA では現在このモデルを用いて線型加速器部分でのビームエンベロップの計算^[6]や軌道の補正^[7]を適切におこなうことが可能となっており、SACLA の運転の重要な役割を果たしている。

参考文献

- [1] T. Hara, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **624**, 65 (2010).
- [2] H. Matsumoto, et al., “C-band Choke Mode Accelerator Structure for the Linear Collider”, Proceedings of EPAC’96, 489 (1996).
- [3] H. Maesaka, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **696**, 66 (2012).
- [4] J. Rosenzweig and L. Seraini, Phys. Rev. E **49**, 1599 (1994).
- [5] C. Suzuki, et al., “Input Coupler Design for C-band Accelerating Structure”, Proceedings of PAC’97, 536 (1997).
- [6] Y. Tajiri, et al., “Modification of the Beam Transfer Model of Travelling Wave Accelerator Structures at SACLA”, in these proceedings.
- [7] T. Hasegawa, et al., “Orbit Correction of the Electron Beam Using the Linear Accelerator Model at SACLA”, in these proceedings.