

低エネルギー電子ビームにより9セル超伝導加速空洞内に誘起された TE111-6 の電気的中心の新解析手法

NEW ANALYSIS METHOD FOR ESTIMATING ELECTRICAL CENTRE OF TE111-6 EXCITED IN THE 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY BY LOW ENERGY ELECTRON BEAM

服部綾佳^{#, A)}, 早野仁司^{B)}

Ayaka Hattori^{#, A)}, Hitoshi Hayano^{B)}

^{A)} National Institute of Technology, Ibaraki College

^{B)} KEK

Abstract

The position of electrical centre can be estimated under a condition that beam offsets are constant during passing through the cavity. However, when the beam passing orbit is bending in 9-cell superconducting cavities in case of the STF accelerator, two problems occur when beam offsets are not constant. First, we need to consider a longitudinal position where beam excite HOM. And we need to know a transverse position where beam pass at that longitudinal position. We considered these problems by using CST and GPT and estimated that electrical centre of TE111-6 in the superconducting cavity located at $(x, y) = (-4.30 \pm 2.22$ [mm], 2.76 ± 1.76 [mm]) with respect to reference line connecting a center of BPM3 and BPM4 at STF Accelerator.

1. はじめに

ビーム誘起高調波モードの電気的中心を求めることでクライオモジュール内の9セル超伝導空洞のアライメントを評価できる。これまで電気的中心算出の際には「空洞モードの長手方向中心を空洞の長手方向中心とする」、「空洞内ではビーム軌道は直線であらわせる」、「空洞内でのビーム通過角は小さく平行に通過しているとみなせる」という3点を仮定し、解析を行ってきた[1]。ビーム軌道を詳細に解析すると、実際にはSTF加速器[2]で行った測定では入射ビームのエネルギーが低いことより、9セル超伝導空洞の入射部にてビームの急速な曲がりが生じており、ビームがまっすぐには空洞内を通過していないことが分かってきた。さらに、空洞モードは空洞長手方向にも分布を持っているため、長手方向でのビーム通過位置を考慮した励起を考えなければならない。今回はこれらの仮定が成り立たない場合について TE111-6 に焦点を当て、ビーム通過位置を考慮した新しい解析方法の議論を行う。

2. 低エネルギー電子ビームの振る舞い

まず、STF加速器のビームラインを Figure 1 に示す。



Figure 1: Beam line layout.

ビームラインの上流から順に電子銃[3]、シケイン、クライオモジュールがあり、その間にはステアリングマグネット (ST) や ICT、ビーム位置モニター (BPM)、四極マグネット (QI, QF)、ソレノイド (SOL) が適宜設置された。クライオモジュールには2台の9セル超伝導空洞[4]が内蔵され、ビーム誘起高調波モードの測定時にはそれぞれ 16

MV/m、24 MV/m の加速電場で運転された。クライオモジュール内上流側の空洞の加速電場 16 MV/m に対し、入射ビームエネルギーが 4.3 MeV 程度と低いため、9セル超伝導空洞の入射部にてビームが急速に曲がるのが GPT 計算から分かった。エネルギー 4.3 MeV のビームがオフセットのみを持ち、9セル超伝導空洞に平行に入射されたとしても、Figure 2 が示す軌道を通る。

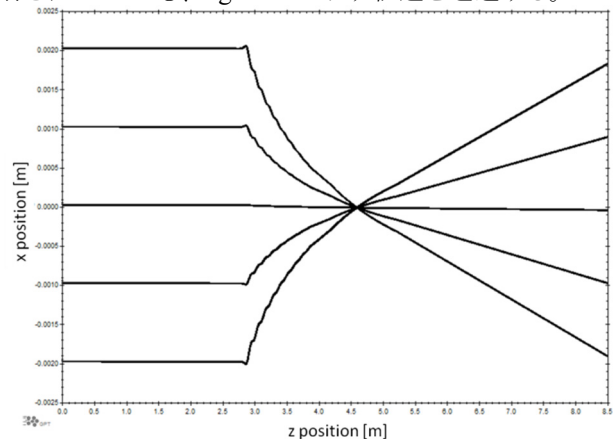


Figure 2: Five beam orbits when beam (4.3 MeV) is injected into superconducting cavities (16 MV/m, 24 MV/m) with 2 mm, 1 mm, 0 mm, -1 mm and -2 mm offset in x direction.

今回のように電子銃の直下にあるクライオモジュール内のビーム軌道を線形近似で表現するためには、空洞の加速電場を大幅に減少させなければならない。例えば、x 方向にのみ 1 mm のオフセットを持って平行に入射されたビームの場合には、加速電場を 50 % 減らすことで上流の空洞を通過する間に x 方向に移動する量を 37 % 減らすことができ、10 % 相当の 1.6 MV/m では 83 % 減少し、変位量が 0.13 mm となる。

一方、ビーム軌道が線形近似できない場合にはビー

[#] hattori@ecc.ibaraki-ct.ac.jp

ム軌道を推定するための計算が必要となる。その計算を GPT[5]にて実施した。

3. GPT 計算によるビーム軌道の推定

3.1 計算方法

電気的中心を推定するためには、ビームが空洞内のどの位置を通過したときに高調波モードを誘起したかを知る必要がある。TE111-6 の振幅と同期して取得したデータは Figure 1 中のビーム位置モニター BPM3 と BPM4 でのビーム位置である。それらのデータから空洞内でのビーム通過位置を推定するために、GPTを用いて軌道計算を行った。

計算時間の短縮のため、計算範囲は Figure 1 中のスケインより下流部とし、BPM3 と BPM4 で測定したビーム位置を再現する軌道を入射ビームのエネルギー、オフセット量、傾きをパラメータとし計算した。計算に必要な QI、SOL の磁場強度は実測および検査成績書から推定し、ST-2 の電流値は実測値を使用し固定した。超伝導空洞の設置位置はアライメント時のデータとワイヤーモニターでの測定値[6]から推定される値を用いた。

計算したビーム軌道の評価は次に示すカイ二乗 (BPM3 および BPM4 での実測したビーム位置と計算したビーム位置の差の二乗和) を指標として行った。

$$\chi^2 = \sum \{ (x_{3m} - x_{3c})^2 + (y_{3m} - y_{3c})^2 + (x_{4m} - x_{4c})^2 + (y_{4m} - y_{4c})^2 \}$$

ここで、x は x 座標、y は y 座標を示し、添え字の数字は BPM の番号を示し、m と c はそれぞれ実測値と計算値とを意味する。このカイ二乗が $1.1E-4$ を下回るビーム軌道を求めた。 $1.1E-4$ はアライメント誤差の見積りとデータ数から算出した値である。アライメント誤差はローテティングレーザーから 5 m 離れた地点にて 10 回ターゲットを設置したときの標準偏差 σ から求めた。正規分布に従うとすると、標準偏差の2倍に入る確率は全体の 95 % であり、その範囲を今回の計算と実測とのズレの許容値とした。

3.2 計算結果

カイ二乗が $1.1E-4$ を下回ったときのビーム軌道の例を Figure 3 に示す。Figure 3 の上段はステアリングマグネット ST-2 にてビーム位置を x 方向に変位させたときの x 座標であり、下段は y 座標である。クライオモジュール内には2台の超伝導加速空洞があり、今回解析した空洞は上流側の青色の部分に位置する空洞である。この空洞内でビームは大きく曲げられており、その最大変位は空洞の入口部分で 25 mm 程度であることが分かる。また、変位をさせていない y 方向には軌道が変わっていないことも分かり、x-y カップリングが生じていないことから、解析は1平面内で独立して行える事が分かる。なお、Figure 3 中において BPM3 の位置は z-position=0.685 m であり、BPM4 の位置は z-position=8.5 m の位置である。

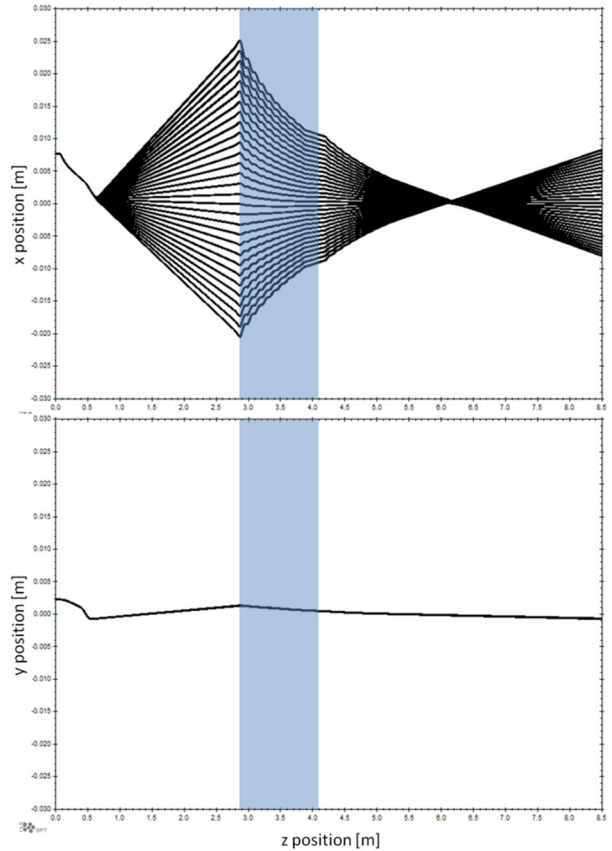


Figure 3: The optimized beam orbits.

4. TE111-6

4.1 トランジットタイムを考慮した電気的中心

アライメントを推定するには基準を電気的中心から機械的中心へと変換する必要がある。そこで、TE111-6 の機械的中心と電気的中心との差をシミュレーションより見積ることとした。TE111-6 は長手方向に分布を持っているため、通過ビームが各長手方向位置でモードを誘起するタイミングが異なっている。そこで、CST[7]で計算した電場強度を基にトランジットタイムを考慮し、電気的中心を見積った。CST で計算したモデルは Figure 4 に示した通り、RF パワーを入力するカップラー付きのモデルである。ビームの向きは、空洞の左側から入射し、右側へ加速されていく方向である。このモデルには空洞に装着されている HOM カップラー、ビームパイプテーパ構造、ビームパイプベローズなどを正確に反映させてある。

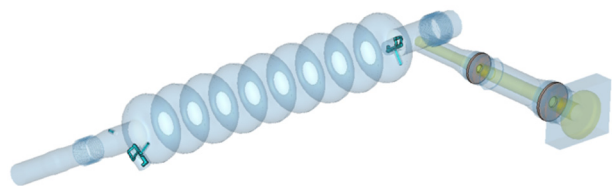


Figure 4: The simulated model for TE111-6.

ビームは長手方向に進行するので、CST で求めた電場の長手方向成分 E_z について考える。まず、次式で $M_{r,\theta}$ を定義し、 $f_\theta(r) = M_\theta(r)^2$ を導入する。

$$M_{r,\theta} = \left| \int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz \right|$$

$$r = 0, 1, \dots, 5$$

$$\theta = (40 \cdot n)^\circ, n = 0, 1, \dots, 8$$

θ が一定の直線上でビームと電場との結合が最も弱くなる点は放物線 $f_\theta(r)$ の頂点であるので、二次関数でフィットし求めることができる。すべての θ について、求めた頂点の座標を xy 座標系に変換し、Figure 5 に示した。黒で示した点も青で示した点もどちらも TE111-6 モードであるが、偏極方向が異なっており、共振周波数がわずかにずれている。それぞれの頂点はモードの偏極軸に相当し、交点が電気的中心となる。今回、TE111-6 の電気的中心は

$$(x, y) = (0.59 \pm 0.42 \text{ [mm]}, -0.30 \pm 0.33 \text{ [mm]})$$

と求められた。この計算では機械的中心を原点としているため、この値は電気的中心と機械的中心との差に等しい。

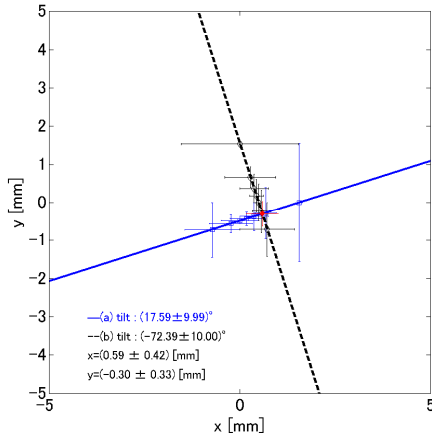


Figure 5: The simulated electrical centre of TE111-6.

4.2 長手方向位置に対する TE111-6 の感度の評価

空洞内のどの位置でビームが誘起した TE111-6 の振幅がそのビームのオフセット量に対して線形応答するかを知るために、オフセット量に対する感度を評価した。その評価のために $f_{\theta,z}(r) = E_z(r, \theta, z)^2$ を導入した。この放物線 $f_{\theta,z}(r)$ を二次関数でフィットしたときの r^2 の係数を a とすると、 a は放物線の勾配具合を表しており、言い換えると、ビームのオフセット量が一定である場合には a が大きい部分で誘起される TE111-6 の振幅が大きくなることになる。よって、 a を TE111-6 のビームオフセット量に対する感度として評価することができる。

空洞の長手方向に広く分布しているモードである TE111-6 に関してビームオフセットの感度を z 軸に沿って評価したところ、Figure 6 に示した通り、感度をもつ部分が空洞全体に広がっていることが分かった。TE111-6

の電場強度分布は Figure 7 に示す通りであるが、この分布と感度の分布とは異なっている。TE111-6 の誘起の過程では、まず感度の大きいところにあるビームオフセットが TE111-6 の誘起に大きく寄与するが、さらにトランジットタイムを考慮した合成波となり空洞内に TE111-6 を残すことになる。したがって、ビームによる高調波モードの誘起は電場強度分布に従った誘起ではないことに注意するべきである。

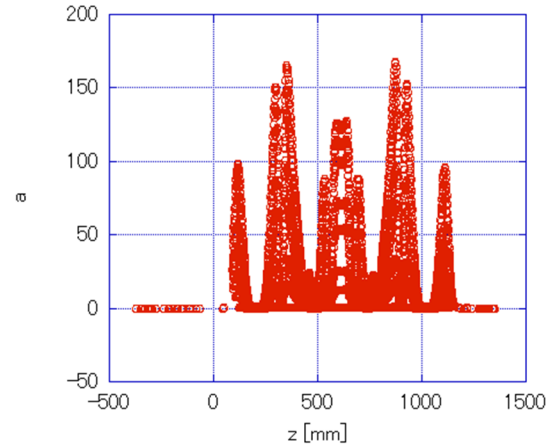


Figure 6: Sensitivity of TE111-6 with respect to beam offset along z axis.

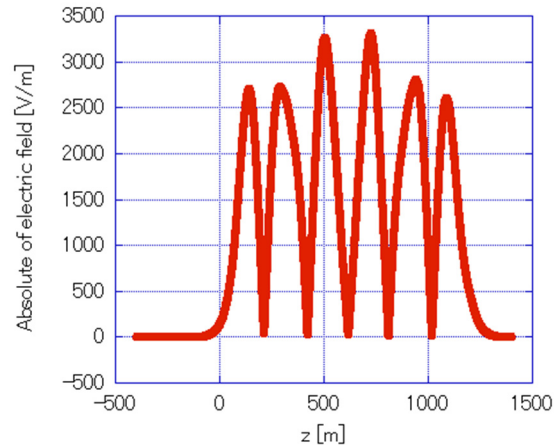


Figure 7: Magnitude of electric field of TE111-6.

5. 電気的中心の見積り

TE111-6 を誘起する感度を空洞軸に沿って調べたところ、空洞内に広く分布していることが分かった。ビームが誘起する TE111-6 高調波モードは空洞のどこか1点で代表させることは出来ないが、広く分布するその範囲内で電気的中心を評価したところ、

$$(x, y) = (-4.30 \pm 2.22 \text{ [mm]}, 2.76 \pm 1.76 \text{ [mm]})$$

となった。電気的中心の導出はクライオモジュール直前のステアリングマグネット ST-2 にてビームを x 方向、y 方向にそれぞれ振った時の TE111-6 の振幅の二乗を、ビームを振ったときのオフセット量に対してプロットし、CST 計算から電気的中心を求めた時と同様にして、二次関数でフィットしたときの頂点を集め、電気的中心を求めた。CST 計算のときとの相違点は TE111-6 の振幅にはノイズが乗っておりオフセットがあるため、そのオフセットを見積り、除く工程が含まれたことである。

一方、CST 計算より求めた電気的中心と機械的中心との差を減算して上記の測定値を機械的中心に変換すると、

$$(x, y) = (-4.90 \pm 2.26 [\text{mm}], 3.06 \pm 1.79 [\text{mm}])$$

となった。これと実際の空洞の、BPM3 と BPM4 を結ぶ基準線からのズレ、すなわちアライメント情報からの機械的中心のズレとを比較するべきであるがモジュールへの空洞組み込み時のアライメント維持が本当にされていたかどうか不明瞭であるので、直接比較は難しい。GPT を用いたビーム軌道計算時には空洞の位置をアライメント情報からの推定値に固定したが、空洞の位置を今後パラメータに加えることも検討していく。

6. 考察・結論

空洞の長手方向に広く分布しているモード TE111-6 に関してビームオフセットの感度を z 軸に沿って評価したところ、感度をもつ部分が空洞全体に広がっていることが分かった。また、入射した電子ビームのエネルギーが低いときには、斜め入射されたビームは超伝導加速空洞内でビーム軌道を曲げられながら加速されていくことも分かった。それらの効果をビーム誘起された TE111-6 の振幅と組み合わせると、その広がった範囲における電気的中心を見積ることができ、そこから機械的中心を求めることが出来た。現時点では空洞組み込み時のアライメント推移が正確には抑えられていないため、実測値と比較は難しい。

空洞内でビームオフセットが一定でない場合においても今回の新解析手法によりビーム軌道変位と誘起高調波モードの信号から電気的中心を推定できる。

参考文献

- [1] A. Kuramoto et al., "Analysis of HOM for Alignment Detection of 9-cell Superconducting Cavities in STF Accelerator," Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 3-5, 2013.
- [2] H. Shimizu et al., "X-ray generation by inverse Compton scattering at the superconducting RF test facility," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 772, pp. 26-33, 2015.
- [3] M. Kuriki et al., "1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photocathode Radio Frequency Gun and Superconducting Accelerator," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52, no. 056401, 2013.
- [4] Y. Yamamoto et al., Nucl. Instrum. Meth. A, vol. 729, pp. 589-595, 2013.
- [5] http://www.aetjapan.com/english/software.php?Accelerators_Design=GPT

- [6] K. Tsuchiya et al., "Capture cavity cryomodule for quantum beam experiment at KEK superconducting RF test facility," in AIP Conf. Proc., Anchorage, Alaska, USA, 2013.
- [7] <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>