

高輝度ビーム実現に向けた cERL 入射器空洞のカプラーキックの評価 EVALUATION OF COUPLER KICK OF CERL INJECTOR CAVITY FOR HIGH BRIGHTNESS BEAM REALIZATION

布袋貴大^{*A)}、宮島司^{B)}、加藤龍好^{B)}

Takahiro Hotei^{*A)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Ryuko Kato^{B)}

^{A)}The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Three 2-cell superconducting cavities are installed in cERL injector at KEK. 2-cell cavity has two input couplers and five HOM couplers. These couplers make the RF field distribution in cavity asymmetric. We numerically and experimentally analyzed the effect of coupler on RF field in 2-cell cavity. As a result, it was shown that the HOM coupler mainly generates the asymmetry of the RF field.

1. はじめに

超伝導空洞は高電界で大電流のビームを加速できる特徴を持つ。しかし大電流ビームが流れるために、加速に不要な空洞の高調波モードが励起されてしまい、次に通過するビームへ悪影響を及ぼすことが知られている。ビームが励起する高調波を減衰するための方法として、空洞にアンテナを設置して空洞外に逃がす・セラミックなどの吸収体を取り付ける等の方法がある。アンテナ型の高調波結合器 (HOM カプラー) を用いると、吸収体を取り付ける場合と比べ小型化することが可能である反面、空洞の円筒対称性が崩れてしまう。空洞の対称性が崩れることにより、加速モードの電磁場分布も円筒対称な分布から変化する。この電磁場分布の非対称性が与えるビームへの影響はカプラーキックとして知られている。

これまでのカプラーキックの研究は [1] のように 9cell 空洞のものも多く、エネルギーも 10 MeV を超えた入射粒子に対しての研究がほとんどであった。一方で KEK にある cERL の入射超伝導空洞 [2] は個別に電圧を変えられる・位相の調整ができるなどの利点から Fig. 1 に示す 2cell 空洞を 3 台並べている。2cell などセル数の少ない空洞程カプラーが影響する割合が大きいため、カプラーキックの影響は 9cell 空洞よりも顕著になると考えられる。ERL 入射空洞はエネルギー回収がないため、大電力を投入し続ける

必要がある。電力投入用の入力カプラーを 2 本、それぞれのカプラーキックの影響を打ち消すように上下対称にインストールされる。また短い輸送距離でビームを加速できるように小型化を意識して高調波の減衰には HOM カプラーを使用している。3 本の HOM カプラーがあるビーム入射面には空洞内のパワーをモニターする用の pick up ポートも設置されている。これらの存在により空洞の対称性は崩れている。

cERL ではフォトカソード電子銃を用いており、励起用レーザーはピンホールで切り出しているため、レーザー並びに出射される電子ビームは円形のプロファイルをしている。しかし入射器空洞通過後のビームプロファイルが Fig. 2 のように垂直方向に伸びた楕円になることが知られている。円筒対称な電磁場分布が空洞内に存在していれば、ビームの受ける収束力は水平・垂直方向で対称になっている。そのためプロファイルが縦長になる原因として、空洞内の電磁場分布の非対称性が疑われる。

我々は以下の目的で本研究を実施した。

- 入射超伝導空洞によるカプラーキックがビームプロファイルを楕円にする原因であることを証明する。
- 実験結果を再現するモデルを作成し、空洞内の電磁場分布を明らかにする。
- 個別のカプラーからの寄与を定量評価し、カプラーキックの主要因を同定する。

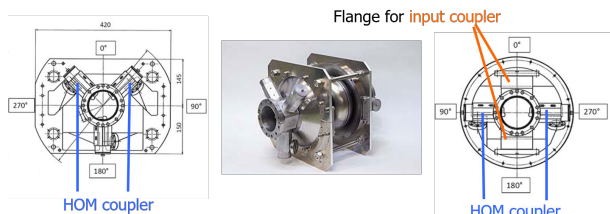


Figure 1: 2cell superconducting cavity using in cERL injector.

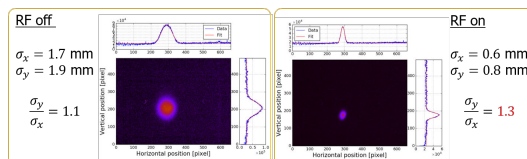


Figure 2: Beam profile at downstream of cavity (left: RF off, right: RF on). The resolution of the camera is 57.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

* hotei@post.kek.jp

2. 空洞内電磁場解析と収束力評価

実際の空洞は Fig. 1 に示されているようにカプラーの存在によって円筒対称性が失われている。それに伴い内部の電磁場分布も変化しているはずである。カプラーによる電磁場分布の変化を調べるため、CST [3] を用いて空洞内の加速モードの分布を計算した。それぞれ、カプラーなしの2セルだけがあるモデル、pick up ポートだけを取り付けたモデル、入力カプラー2本だけのモデル、HOMカプラーのみのモデル、入力・HOMカプラー全てを含めた実機モデルの4種類である。計算された中心軸上での電場分布を Fig. 3 に示す。 π モードの定在波型空洞であり、周波数は1.3 GHzである。 $z=0$ がセル間の中心であり、マイナス側からプラス側へビームは移動していく。Figure 3より全部のカプラーを含めた場合、中心軸上にも横方向の電場が生じており、電磁場分布が歪められていることがわかる。また入力カプラーのみ、HOMカプラーのみ、pick up ポートのみが存在する場合の結果も一緒に表示している。HOMカプラーのみを残して計算した結果は全てのカプラー付きのモデルとよく一致している。また入力カプラーによる影響は対称性から中心軸上ではちょうど打ち消されていることがわかる。

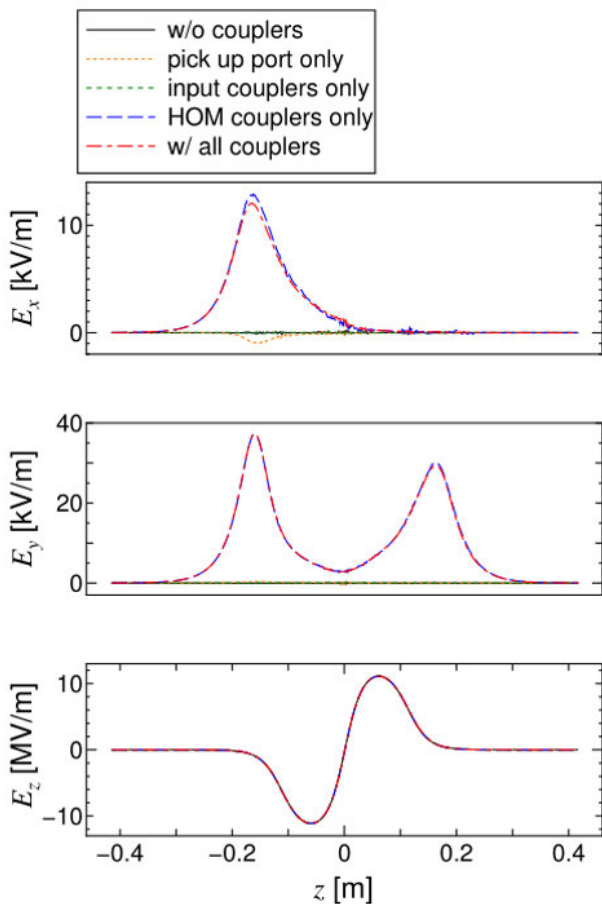


Figure 3: Electric field distribution on z -axis.

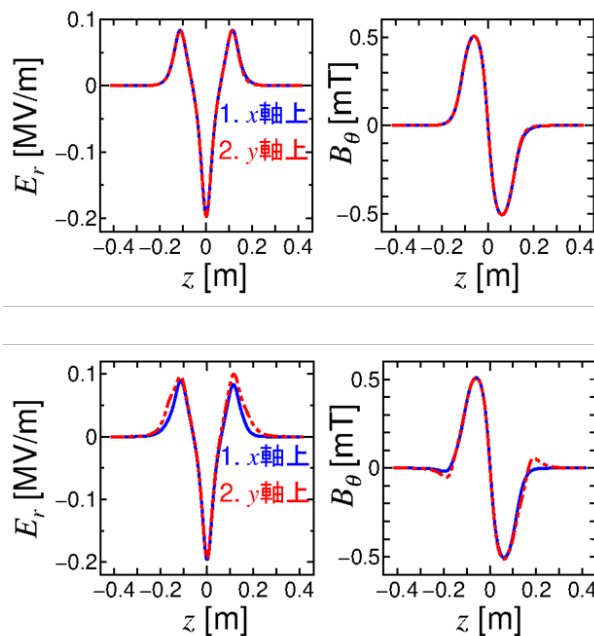


Figure 4: Plot for transverse electric field and magnetic field at $(r, \theta) = (1 \text{ mm}, 0^\circ), (1 \text{ mm}, 90^\circ)$ (Top: Input coupler only model, bottom: HOM coupler only model).

次に電磁場分布の非対称性を調べるため、 $(r, \theta) = (1 \text{ mm}, 0^\circ), (1 \text{ mm}, 90^\circ)$ における横方向電場 E_r と磁場 B_θ を比較した。これらはそれぞれ x 軸上の点、 y 軸上の点に対応する。比較した結果を Fig. 4 に示す。上段は入力カプラーのみのモデルを使用した結果である。 $r = 1 \text{ mm}$ のところでは水平・垂直方向の電磁場に大きな違いは見られない。下段はHOMカプラーのみを使用した計算結果であり、電磁場は水平・垂直方向で差が生じている。これから電磁場分布が水平・垂直方向で非対称になっていることがわかる。

3. シングルキック応答解析

具体的に電磁場から受ける収束力を評価するために、CSTによって計算された電磁場分布を粒子トラッキングコード GPT [4] へ取り込み、シングルキック応答から実際の粒子に対する影響を評価する。

まず粒子の応答から収束力を求める原理を説明する。上流から順に粒子に角度を与える偏向磁石、収束

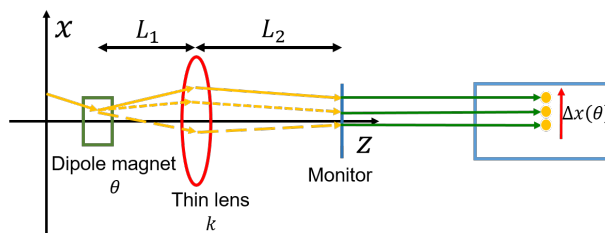


Figure 5: Layout of tracking or experiment for single kick response measurement.

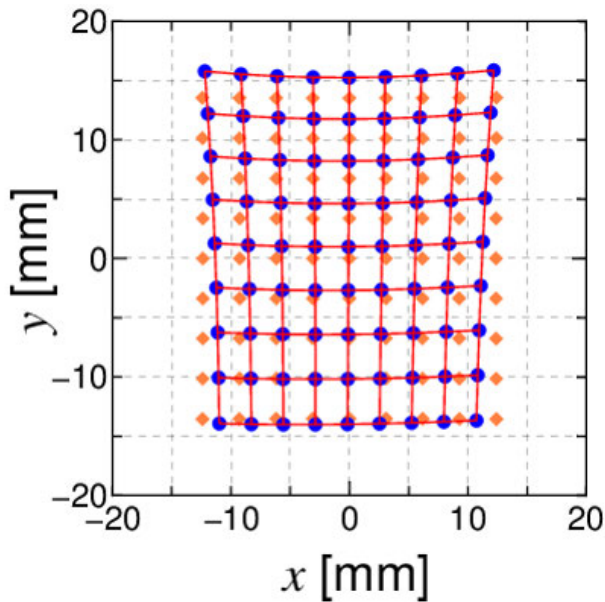


Figure 6: Mapping of beam position at monitor (red: Input coupler x2 + HOM coupler x5, orange: Input coupler x2 only, blue: HOM coupler x5 only).

力を測りたい収束レンズ、ビーム位置を測定するモニターからなる Fig. 5 のようなレイアウトを考える。各機器はそれぞれ L_1, L_2 だけ離れている。偏向磁石は小さく粒子の角度だけが変化すると考えると、初期条件 (x_0, x'_0) はモニター位置まで次のように転送される。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

偏向磁石によるキック量を変えた時のビーム位置の差分を求めると

$$\frac{\Delta x}{\Delta \theta} = L_1 + L_2 - L_1 L_2 k \quad (2)$$

であり、ビーム位置の変化量からレンズの収束力を求めることができる。

トラッキングは実験と比較するために cERL 入射器のレイアウトで実施した。この場合、粒子に角度を与える偏向磁石は、水平・垂直の軌道補正用ステアリングである。運動エネルギー 500 keV の粒子に対するステアリングの蹴り角は磁場計算より 11 mrad/A と得られた。レンズは入射超伝導空洞であり、下流のスクリーンモニターで粒子位置を測定することになる。各機器の間隔は $L_1 = 0.702$ m, $L_2 = 2.308$ m である。

入力カプラー・HOM カプラー全てのアンテナを含めたモデル、HOM カプラーなしで 2 本の入力カプラーのみ、入力カプラーなしで 5 本の HOM カプラーのみの 3 通りのモデルを用いてトラッキングを行った。キック量を変えた時の最終的なビームの横方向位置をプロットしたものを Fig. 6 に示す。入射

Table 1: Variation in Beam Position

Model	Δx [m/rad]	Δy [m/rad]
All couplers	1.02	1.32
Input couplers only	1.12	1.22
HOM couplers only	1.05	1.29
Without couplers	1.16	1.16

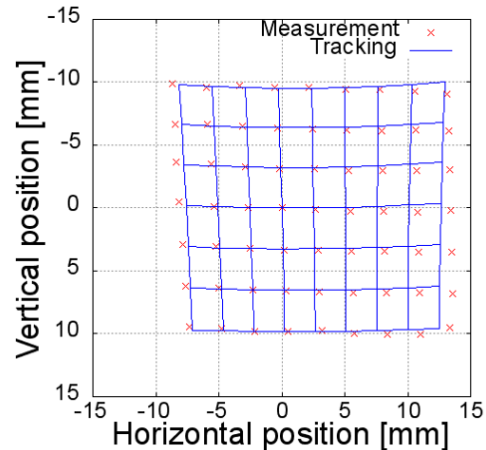


Figure 7: Mapping of beam position (red: measurement, blue: tracking).

時のビームエネルギーは 1 MeV で、空洞通過後のエネルギーは 2.2 MeV 粒子の空洞に乗る位相は空洞通過後の粒子のエネルギーが最大になるところで全て固定している。Figure 6 の赤線で結ばれた格子が縦長になっていることがわかる。これは水平・垂直方向のビーム移動量、つまり各方向への収束力が異なっていることを示している。また入力・HOM カプラーを全て含めた場合（赤）と HOM カプラーだけを残した場合（青）の結果が非常によく一致していることがわかる。これより cERL 超伝導空洞のカプラーキックの主要因は HOM カプラーであることがわかる。

さらに収束力を定量評価するため、得られたマッピング結果から中心で十字に交わる 2 本の水平・垂直の結果に対して線形フィットを行い各方向へのステアリングのキック量に対するビーム位置変化量を求めた。結果は Table 1 にまとめられており、参考にカプラーのない円筒対称なモデルの結果も表示している。ビーム位置変化量が小さいということはそれだけ大きな収束力が働いているということになる。円筒対称モデルとの比較により、カプラーキックは水平方向の収束力が強め、垂直方向の収束力が弱めることがわかる。またこの結果からも非対称な収束力を生じさせている主要因は HOM カプラーであることがわかる。

Figure 7 に示しているのは、測定と全カプラー付きモデルを用いたトラッキングとの比較である。ビーム位置の校正は空洞の中心に入射した場合を原点 $(0,0)$ としてプロットしている。トラッキングにお

いては空洞前のステアリングを用いず、中心にまっすぐ角度をつけずに入射した場合、測定では空洞下流のスクリーンモニターでビーム位置を測定しながら電磁場の位相を振って、ビーム位置の変動が最も小さいときの輸送条件に相当する。またこのときトラッキングに用いたステアリングのキック量は、実験で空洞内の RF を off にし、ドリフト空間としてシングルキック応答から校正した値を使用している。Figure 7 より、特に中心付近では、かなりの精度で一致していることがわかる。これよりモデルの電磁場は実際の分布をよく再現していると言える。

4. 考察

本研究では 2cell 超伝導空洞におけるカプラーキックの影響を数値的・実験的に解析を行った。まず cERL の 2cell 空洞通過後にプロファイルが垂直方向に長い楕円になるという問題があった。このときのビームサイズ比は垂直方向の RMS サイズが水平方向に対して約 1.3 倍だけ大きい。これに関して、カプラー付きの空洞モデルを使用した場合の単粒子トラッキングにおける水平・垂直方向のビーム移動量比を計算すると約 1.3 であり、ビームサイズ比とよく一致している。また実際にビーム軌道を測定した結果とモデル計算がよく一致していることから、計算に用いた電磁場分布は実際の空洞内の分布を再現していることがわかる。したがってビームプロファイルを縦長にする原因はカプラーキックが原因であると言える。

トラッキング結果を見ると入力カプラーを取り除き、HOM カプラーだけを残した結果がすべてのカプラーを含めた計算結果と非常によく一致していることがわかる。 z 軸上の電場分布をみても、入力カプラーだけの場合にはそれぞれのカプラーの影響が打ち消され、中心軸上での横電場が 0 V/m になっているのに対し、HOM カプラーだけを残した場合には全てのカプラー付きの結果とほとんど一致した。これよりカプラーキックの主要因は HOM カプラーであると言える。

5. 結論

cERL の 2cell 超伝導空洞を例にして、カプラーキックの影響を数値的・実験的に解析した。計算された電磁場分布を用いたモデル計算の結果と実際に測定したビーム軌道応答の結果がよく一致したことから、モデルは実際の空洞内電磁場分布を反映していることがわかった。また実験とモデル計算から cERL で以前から観測されていた空洞通過後のプロファイルの変形は空洞内の電磁場分布が非円筒対称に歪み、水平方向の収束力が強まり、垂直方向の収束力が弱まったためであると言える。モデル別の解析結果から空洞内電磁場分布の歪みはカプラー、特に HOM カプラーによる影響であることがわかった。

さらに軌道応答測定やトラッキング計算からカプラーキックにより非線形な影響が存在することが示された。本研究ではそこまで論じられていない。RF 場において本質的に重要な位相依存性を含め、分布

を持った場合の影響を評価していくこと、非対称性の緩和・補償方法の確立などが今後の課題である。

謝辞

KEK の許斐太郎氏には基本となる 2cell 超伝導空洞の CST におけるモデルを作成していただいた。また、個別のカプラーからの寄与を計算する際に、モデルの修正において多大なご協力をいただいた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- [1] A. Halavanau *et al.*, “Analysis and measurement of the transfer matrix of a 9-cell, 1.3 GHz superconducting cavity”, PRAB 20, 040120 (2017).
- [2] K. Watanabe *et al.*, “Development of the superconducting rf 2-cell cavity for cERL injector at KEK”, NIM A 714 (2013) 67-82.
- [3] Computer Simulation Technology; http://www.setjapan.com/software/CST_Overview.php
- [4] Pulsar Physics; <http://www.pulsar.nl/got/index.html>