

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

第15回 日本加速器学会年会 (THOM09)

○布袋 貴大 (総合研究大学院大学)

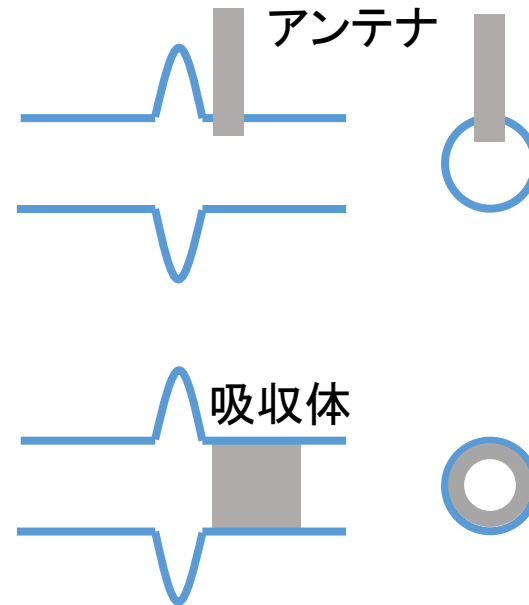
宮島 司, 加藤龍好 (KEK)

背景

- 超伝導空洞は高電界で高平均電流ビームの加速が可能
- ビームが空洞に誘起する高調波(HOM)が問題

HOMの対策方法

- HOMカップラー
 - 空洞と同じくニオブを使用できる
 - 小型にできる
 - **空洞の円筒対称性が崩れる**
- HOMダンパー
 - ダンパー自体が円筒対称
 - ◆ 空洞の円筒対称性を保てる
 - 運転温度が空洞と異なる
 - サイズが大きくなる

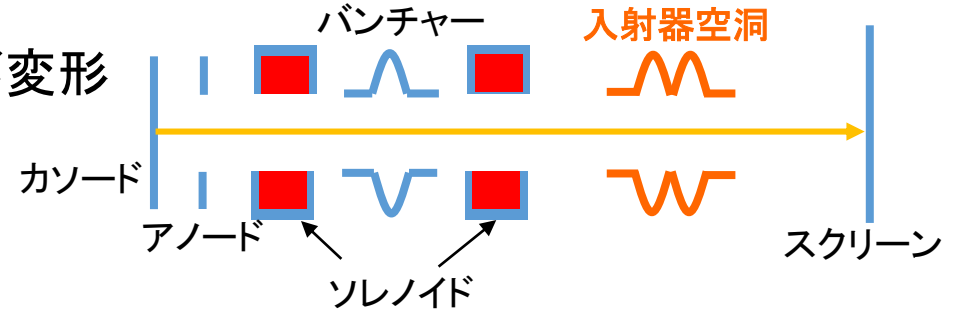


HOMカップラー、入力カップラーによる電磁場の円筒対称分布からのズレが、軌道変動や非対称な収束力などビームへ悪影響を及ぼす(カップラーキック)

cERL入射器空洞での課題

課題

- 入射器空洞通過後、プロファイルが変形

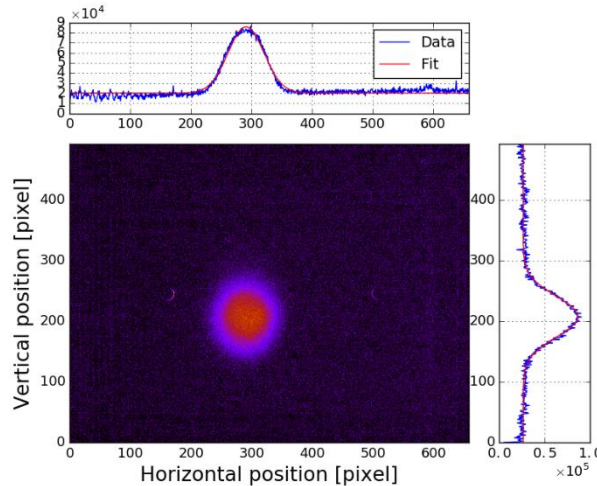


RF off
⇒ 円形

$$\sigma_x = 1.7 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = 1.9 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 1.1$$

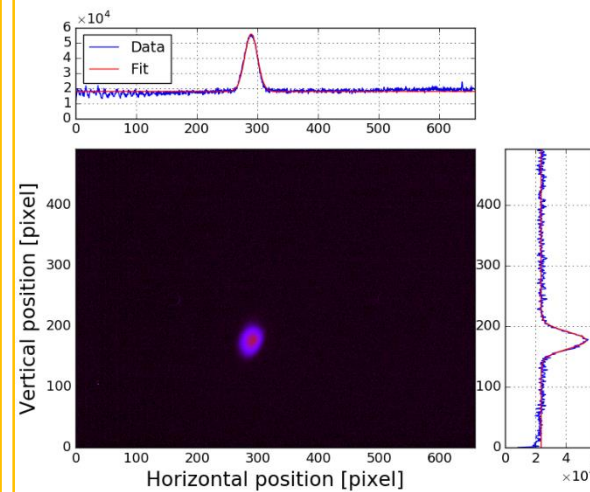


RF on
⇒ 楕円形

$$\sigma_x = 0.6 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = 0.8 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 1.3$$



推論

空洞に非対称な収束力を及ぼす原因があるのではないか？

cERL入射器超伝導空洞

- cERL入射器超伝導空洞: HOMカプラーを使用
 - 低エネルギーでの輸送距離を短くするため
- HOMカプラー: ビーム入射側 -> Y字に3本 出口側 -> 水平に2本
 - 空洞の円筒対称性は崩れている
- 入力カプラー: 上下に2本配置 -> 対称性あり



非対称な収束力はカプラーによる電磁場分布の非対称性が原因ではないか？

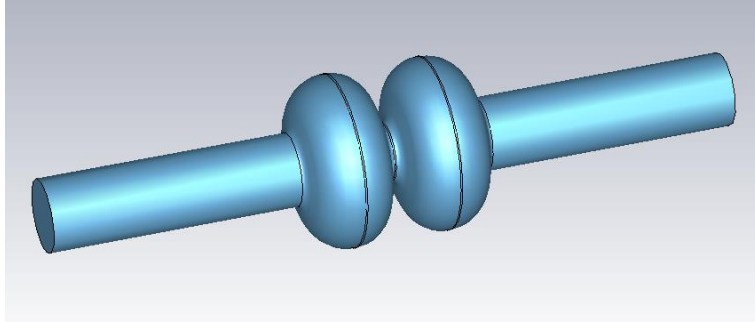
研究目的

1. ビームプロファイルを楕円にする原因がカプラーキックであることを示す
2. カプラーを含めたモデルを作成し、空洞内の電磁場分布を明らかにする
3. 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

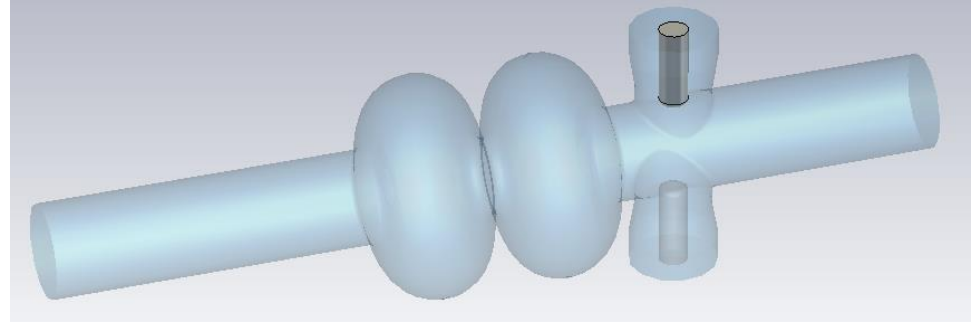
CSTを用いた電磁場解析

- 空洞内の電磁場分布を計算: CST固有モードソルバー

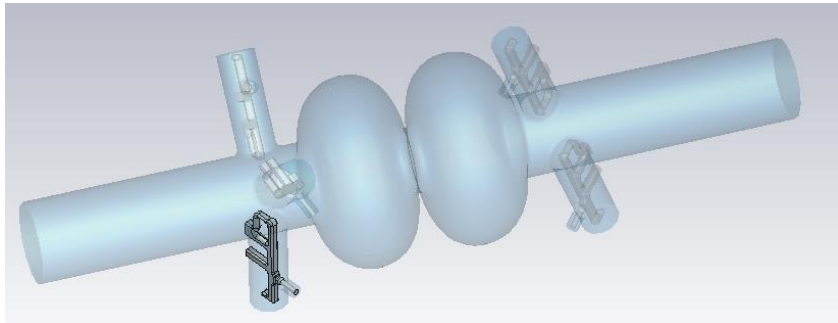
1. カプラーなし



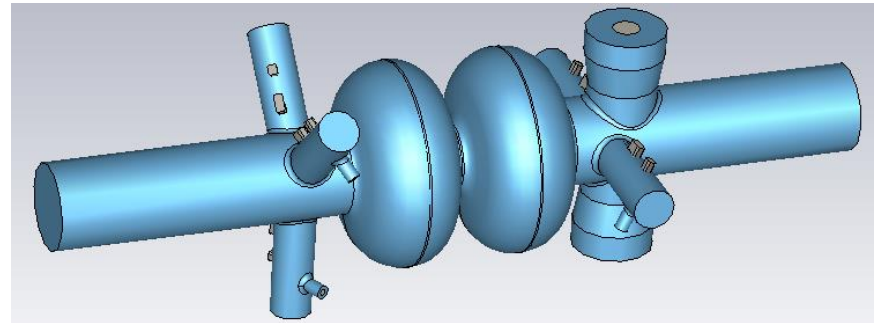
2. 入力カプラーのみ



3. HOMカプラーのみ



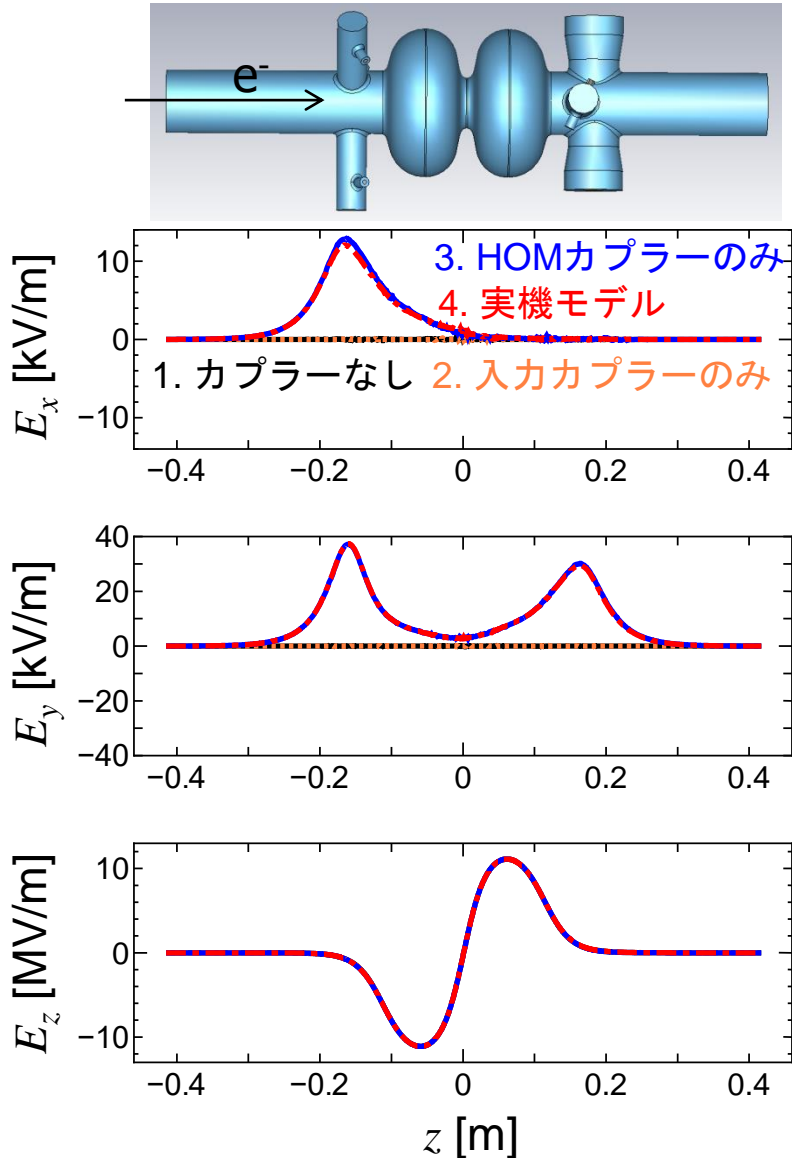
4. 実機モデル(全カプラー付き)



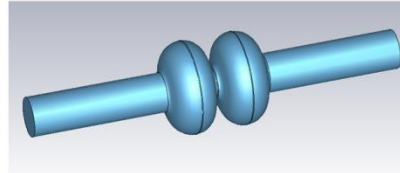
- 4つのモデルを使用して解析を実施

1. 中心軸上の分布比較(カプラーの電磁場への影響検証)
2. 軸外での分布比較(対称性の検証)

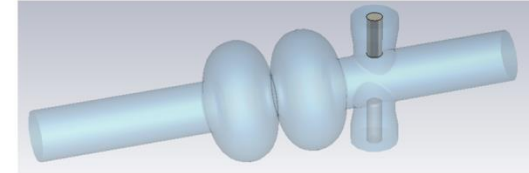
1. 中心軸上の分布比較



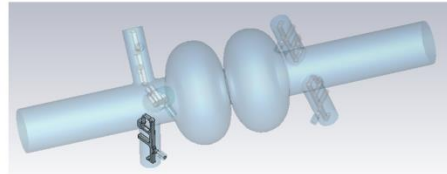
1. カプラーなし



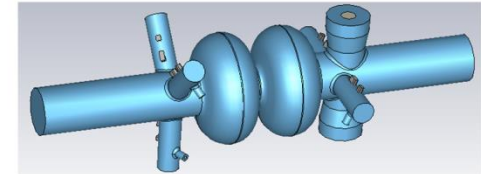
2. 入力カプラーのみ



3. HOMカプラーのみ



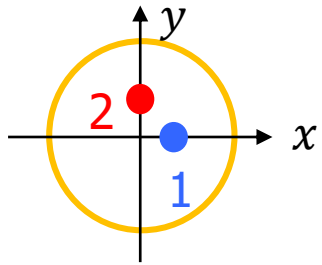
4. 実機モデル(全カプラー付き)



- 1. カプラーなし(円筒対称)
 - z 軸上に横方向の電場なし
- 2. 入力カプラーのみ
 - z 軸上に横方向電場なし
 - ◆ 上下の寄与が打ち消されている
- 3. HOMカプラーのみ
 - 横電場発生
 - 4. 実機モデルの分布に近い

HOMカプラーが中心軸上の電場を歪めている

2. 軸外での分布比較

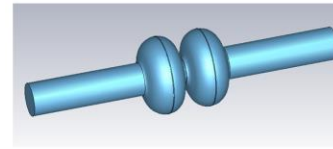


電磁場分布比較位置

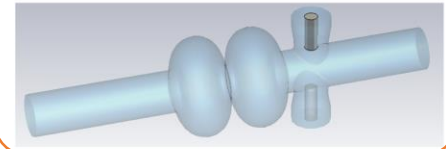
1. $(x, y) = (1\text{mm}, 0\text{mm})$
2. $(x, y) = (0\text{mm}, 1\text{mm})$

• 水平・垂直方向の電磁場分布を比較

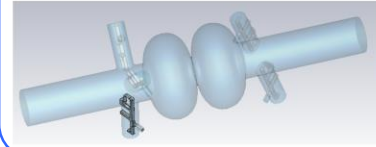
1. カプラーなし



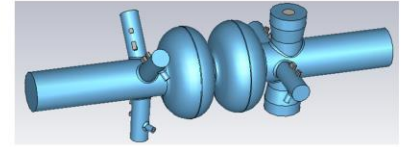
2. 入力カプラーのみ



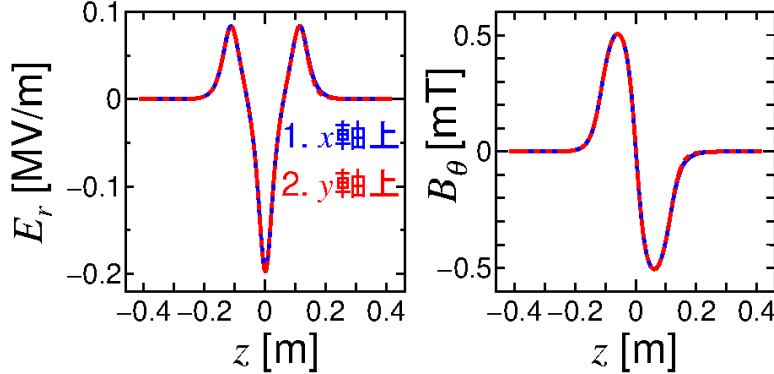
3. HOMカプラーのみ



4. 実機モデル(全カプラー付き)



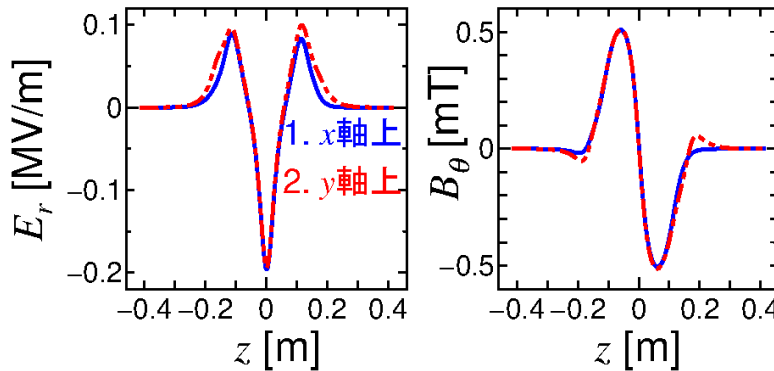
2. 入力カプラーのみ



水平・垂直で対称

入力カプラーはほとんど
収束力の非対称性を生まない

3. HOMカプラーのみ



x 軸と y 軸で E_r が非対称である

HOMカプラーによる電磁場分布の
非対称性が収束力の非対称性の
原因になり得る

次に、電磁場分布を基に、トラッキングで収束力を定量的に評価

シングルキック応答による収束力解析

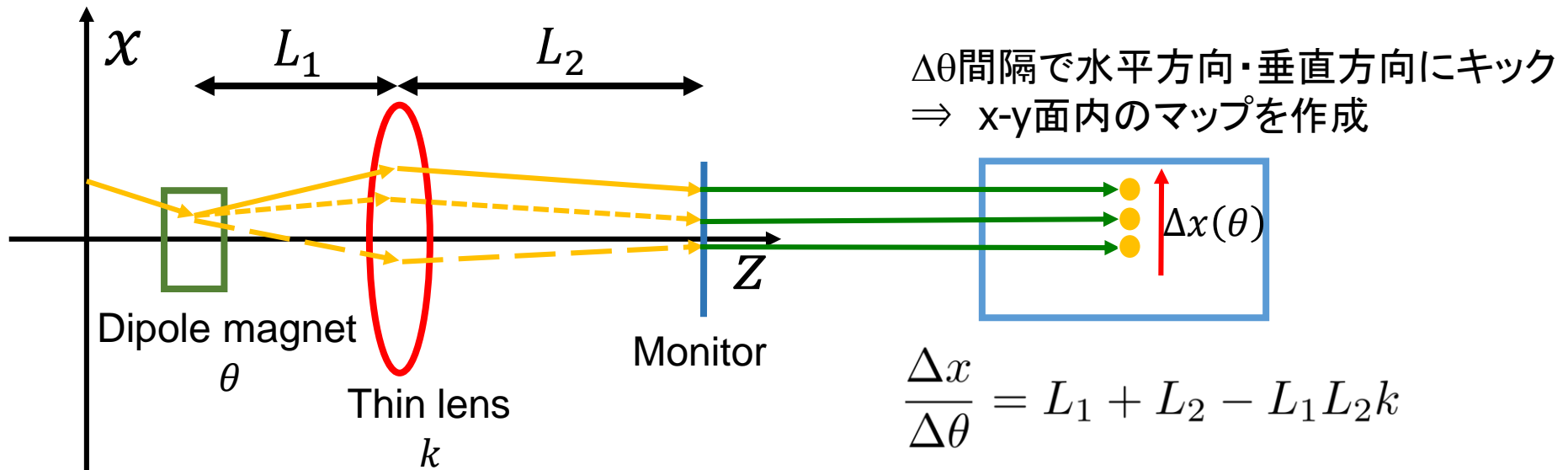
- トラッキング・実験で入射超伝導空洞による収束力を評価

解析・測定条件

- ◆ 入射ビームのエネルギー: $T = 500 \text{ keV}$ ($E = 1.1 \text{ MeV}$)
- ◆ 空洞通過後のエネルギー: $E = 2.2 \text{ MeV}$ (入射空洞1台のみで加速)
- ◆ 加速位相: 最大加速位相

原理

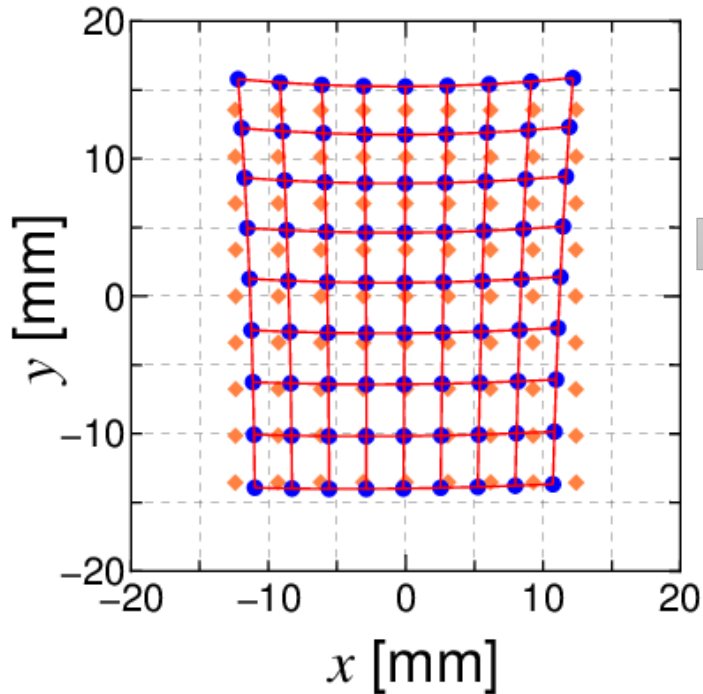
- 初期粒子をキック(軌道が変わる)
 - 最終位置のキック量応答から収束力が分かる



数值的・実験的に k を求める

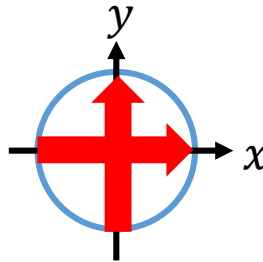
トラッキングによる収束力の計算結果

一定の蹴り角 $\Delta\theta$ 毎のビーム位置変化



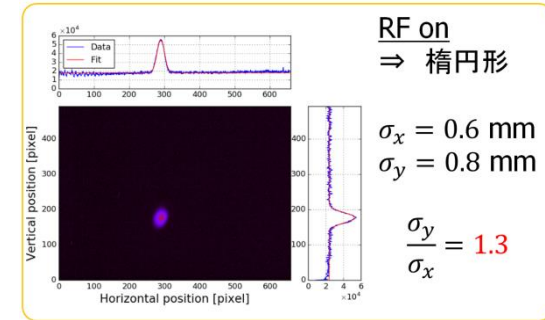
x方向・y方向の移動量の違い(収束力の違い)

Model	Δx [m/rad]	Δy [m/rad]	$\Delta y/\Delta x$
カップラーなし	1.16	1.16	1.00
入力カップラーのみ	1.12	1.22	1.09
HOMカップラーのみ	1.05	1.29	1.23
実機モデル	1.02	1.32	1.29



測定されたビームサイズ比 1.3 と一致

- 格子が縦長 -> 収束力が非対称
 - 収束力の強さ: 水平 > 垂直
- HOMカップラーのみでも、全部のカップラーを考慮した結果に近い
 - 入力カップラーのみによる影響は小さい
- **ビームプロファイルを歪める原因はカップラーキック**
- **cERL 2cell 空洞のカップラーキックの主要因はHOMカップラー**

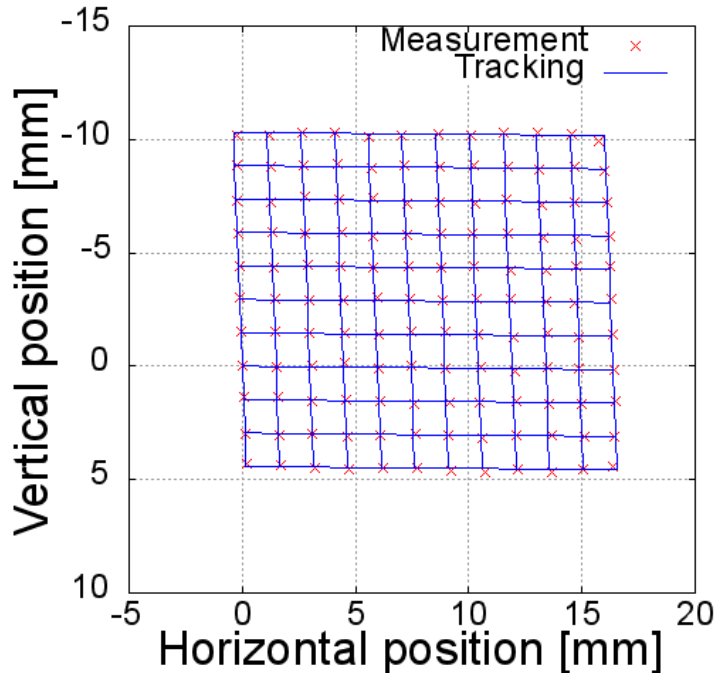


実験による収束力測定結果

実験は2段階で実施

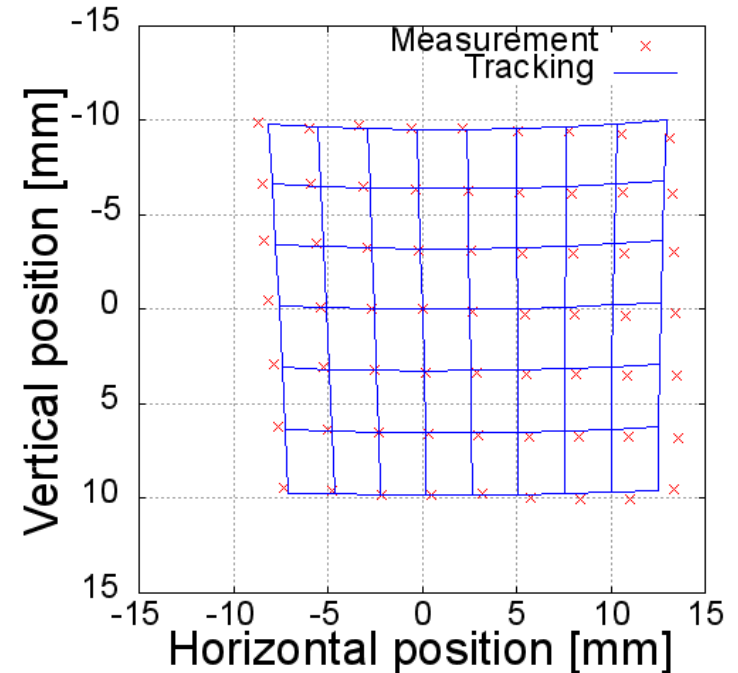
1. RF off の結果からキック量を校正 (空洞内はドリフトスペースとなる)
2. 空洞1台で加速する条件で測定

1. RF off



⇒ 非対称性なし
(ステアリング磁場の傾きが見えた)

2. RF on (空洞1台で加速)



⇒ 格子が縦長
トラッキング結果とも一致

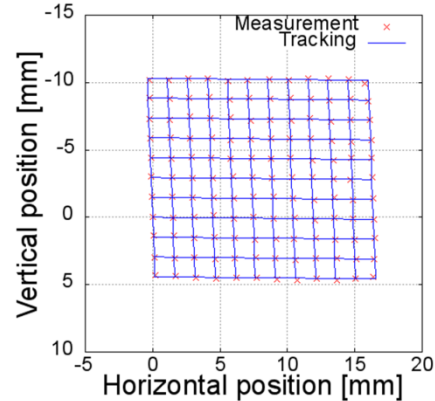
- モデルは実際の電磁場分布をよく再現している
- 実際に空洞内の電磁場から非対称な収束力を受けている

考察

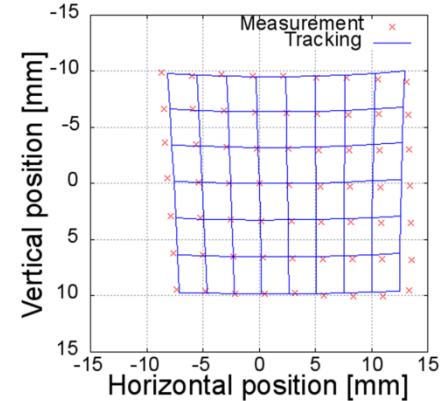
実験結果

- RF off: 対称
- RF on: 非対称
 - (水平収束力 > 垂直収束力)
 - 実際に空洞内電磁場から、非対称な収束力を受けている
 - モデル計算と一致 -> モデルによる電磁場解析は妥当である

1. RF off



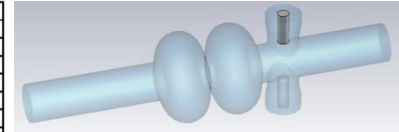
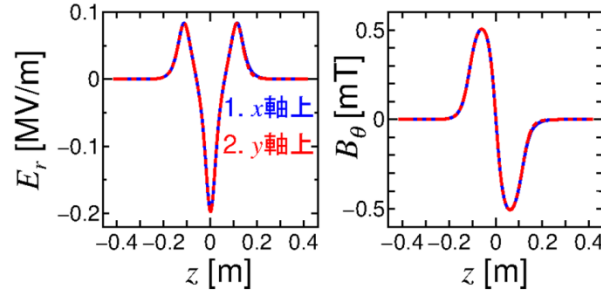
2. RF on (空洞1台で加速)



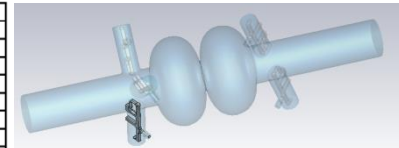
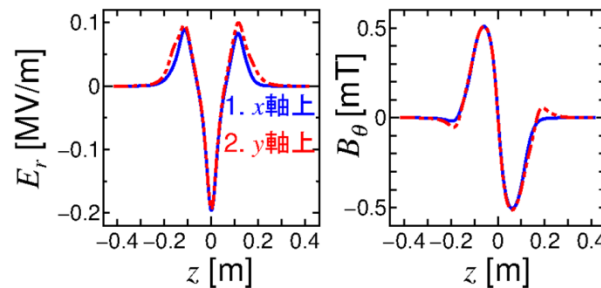
モデルによる解析結果

- 入力カップラーのみによる電磁場分布の非対称性への影響は小さい
- 主にHOMカップラーが電磁場分布の非対称性を引き起こしている
 - 非対称な収束力を与える原因
- ビーム移動量比とビームサイズ比が一致
 - プロファイル歪みの原因は空洞からの非対称な収束力

2. 入力カップラーのみ



3. HOMカップラーのみ



結論

- CSTによって空洞内電磁場分布を再現し、数值的・実験的にcERL 2cell 超伝導空洞のカプラーキックの影響を定量評価した
- cERLで観測されていたビームプロファイルの歪みは、空洞内電磁場分布の非対称性が原因である
 - 電磁場分布の歪みはカプラーの存在に起因している
- cERL 2cell空洞のカプラー配置では、円筒対称モデルと比べ水平方向の収束力が強まり、垂直方向の収束力は弱まる
- 電磁場分布の非対称性を引き起こしている主要因はHOMカプラーである

今後の課題

- カプラー1本ごとの影響を個別に解析
- 位相依存性の解析(有限バンチ長のビームへの影響)
- 横方向の非線形な影響の解析
- 3次元空洞モデルを使用した低エミッタンス輸送設計、ビーム制御