

Kicker電磁石によるLER入射バンプ軌道の蹴り残し

Residue orbit for LER injection bump caused by magnetic field difference between kickers

小玉恒太, 三増俊広

高エネルギー加速器研究機構



要旨

- SuperKEKB加速器ではMain Ringへのビーム入射のために蓄積ビームに対して2組のKicker電磁石で水平位相が 180° の閉じた入射バンプ軌道を形成するように設計されている.
- しかしLow Energy Ring(LER)では入射バンプ軌道の蹴り残しが観測されている.
- 蹴り残しの原因を2組のKicker電磁石間のセラミックダクト内部の磁場波形の違いから説明する.

背景

SuperKEKB入射部

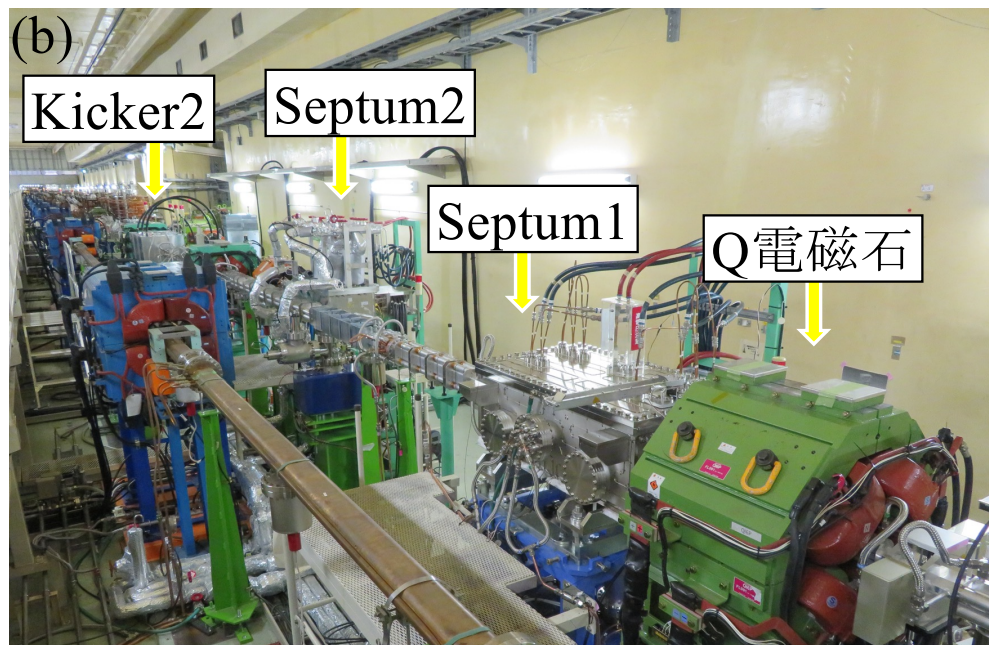
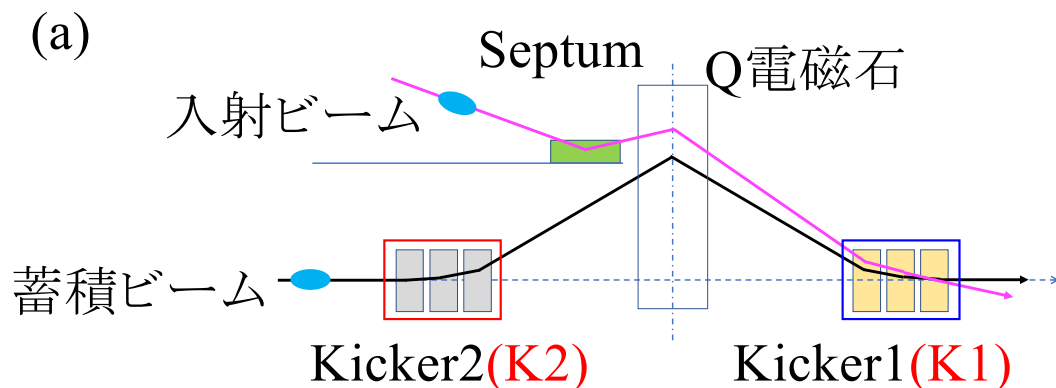


図1 (a) SuperKEKBビーム入射概略図と, (b) LER入射点付近.

- 入射ビームをMain Ring(MR)に入射では異なる2組のKicker電磁石(K1:3台, K2:3台)で水平位相が 180° になるよう蓄積ビームにバンプ軌道を作る.
- Kicker電磁石によるパルス磁場は2 usec, Ring(周長3 km)に最大2500 bunchの蓄積ビームが存在できるので, 通常複数の蓄積ビームがバンプ軌道を通る.
- K1とK2電磁石の磁場波形が相似形ならば, バンプ軌道が閉じ蓄積ビームは振動は生じない.

SuperKEKB運転中の状況

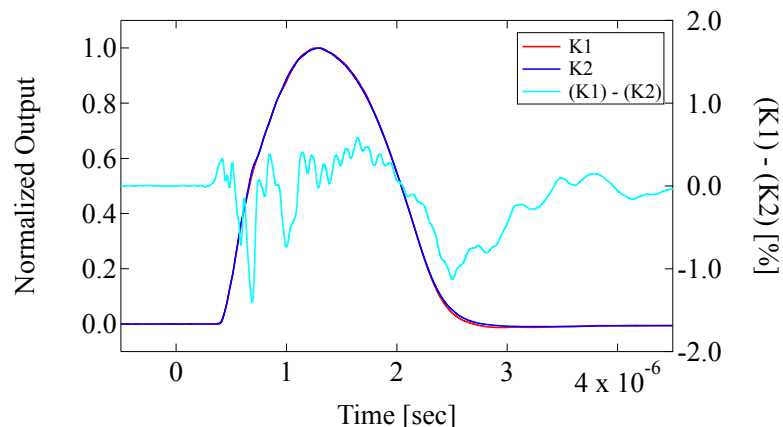


図2 K1とK2の出力電流を規格化した波形(左軸)とその差(右軸).

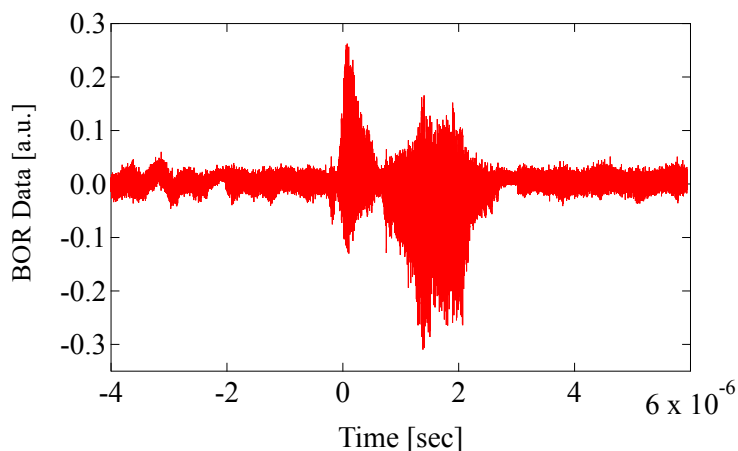


図3 SuperKEKB運転中におけるBORの例.

- K1とK2電磁石間の出力電流波形は差が1%以内になるよう調整されている.
 - SuperKEKB運転中, Kicker電磁石が原因と考えられる蹴り残しが, 水平方向のビーム振動として Bunch Oscillation Recorder(BOR)*で確認されている(図3). *BOR:ビーム軌道×バンチ電荷に比例する値を出力.
 - SuperKEKB運転が始まって以来, 入射時における蓄積ビームの蹴り残しの原因が明らかではなかった.
- ↓
- 磁場波形に影響を与えうるK1とK2電磁石のセラミックダクト形状の違いに注目した.

セラミックダクト

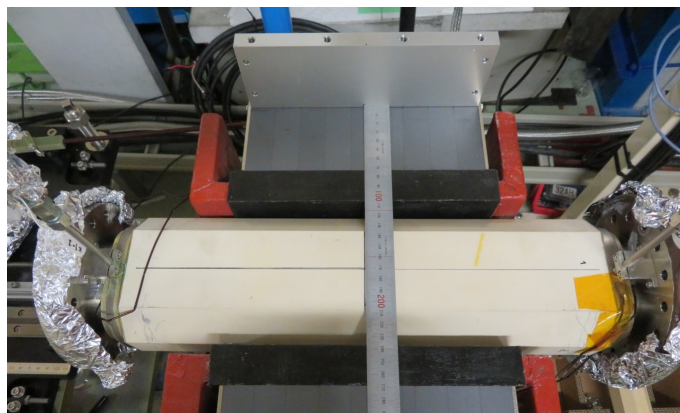


図4 K1セラミックダクト.

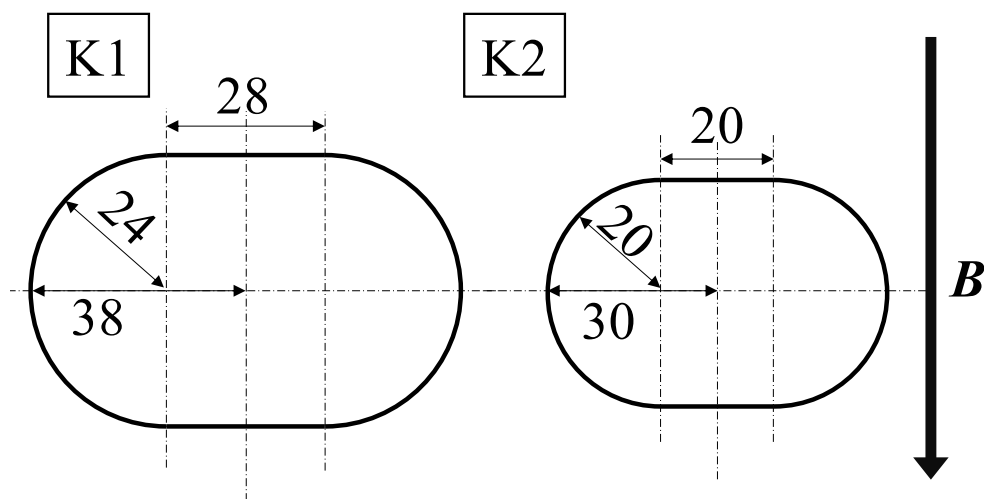


図5 K1とK2セラミックダクト内部断面図と磁場方向.

- Kicker電磁石で使われるダクトの特徴
 1. 早い立ち上がりの磁場が遮蔽されないようセラミックダクトを使用.
 2. ビーム電流による鏡像電流を阻害しないよう内壁にTiコーティングがされている (設計膜厚: $< 6 \text{ um}$).

- KEKB→SuperKEKB改造時にK2ダクトのサイズが変更されたため、K1とK2ではダクト形状が異なる.
- K1とK2ダクトは製作時期、製作者が異なる.

評価方法

評価方法

- 磁場評価(シミュレーション): Opea2D *運転中のため実機の磁場測定は不可.
*Dassault Systèmes, Network House, Langford Locks, Kidlington, Oxfordshire, OX5 1LH, UK
- 膜厚測定: 渦電流式膜厚計(電測, DMC-211) -点での測定
4端子電気抵抗測定(Keithley, 2401 Source Meter)
(HIOKI, 3522-50 LCRハイテスタ) } ダクト全体の平均
- 磁場測定: ピックアップコイル *運転終了後.

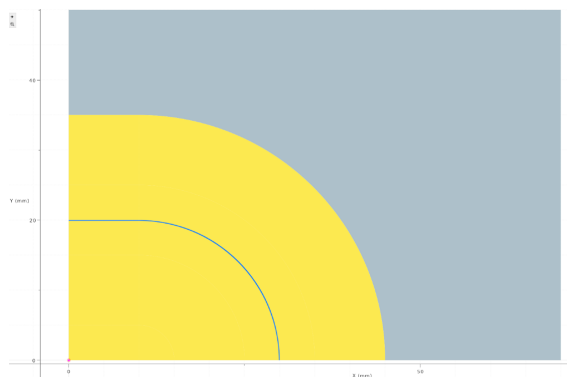


図6 Opear2Dモデル.



図7 渦電流式膜厚計.



図8 四端子電気抵抗測定.

評価結果

ダクトによる内部磁場への影響: Opera2Dでの計算

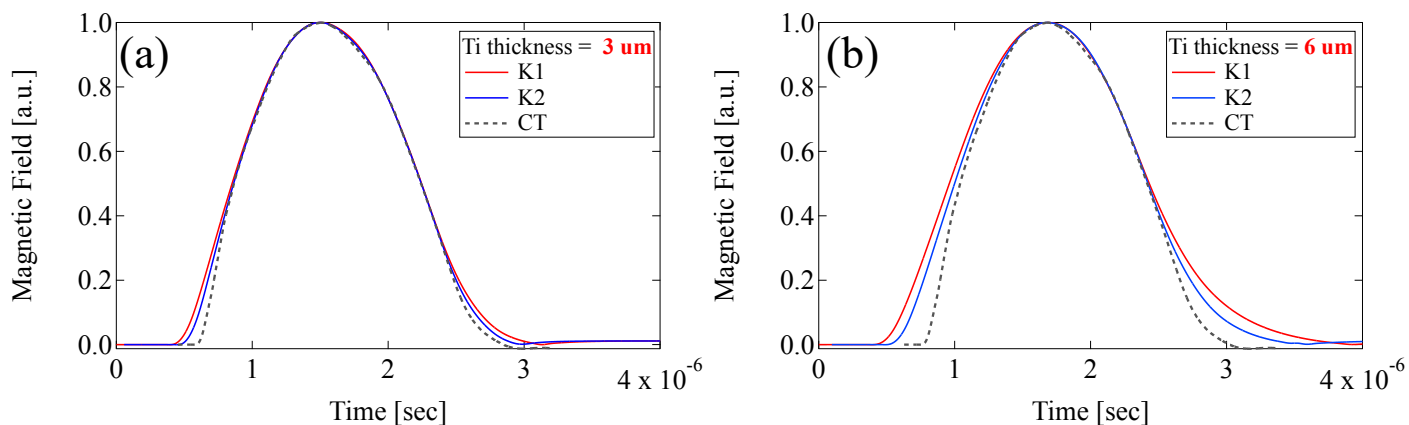


図9 (a) Ti膜厚3 μm, (b) 6 μmのダクト形状による磁場の時間応答効果.

- 磁束が貫く面積が広いので、ダクトが大きいK1の方が磁場の広がり大きい。

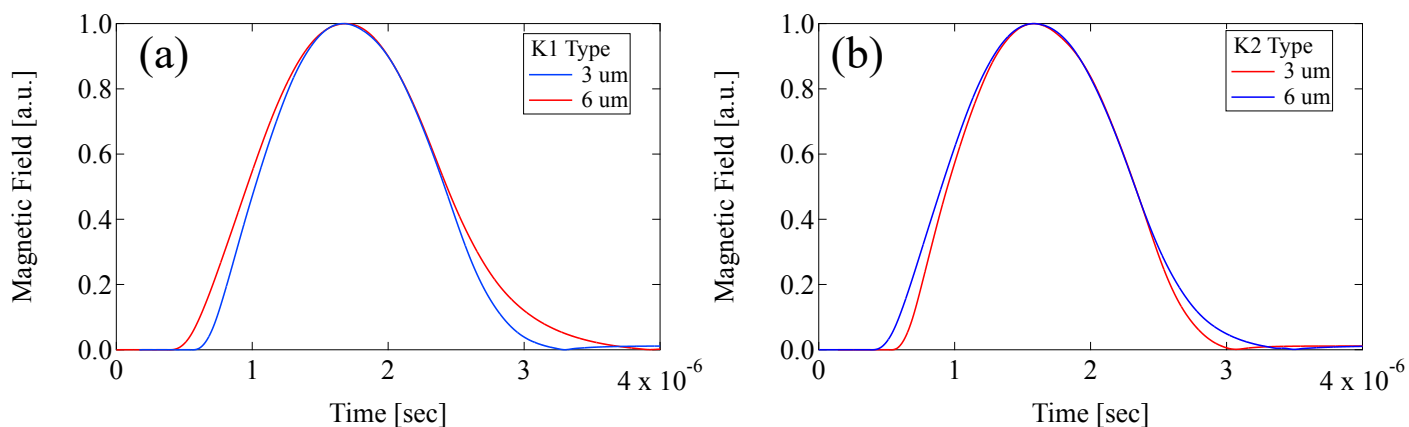


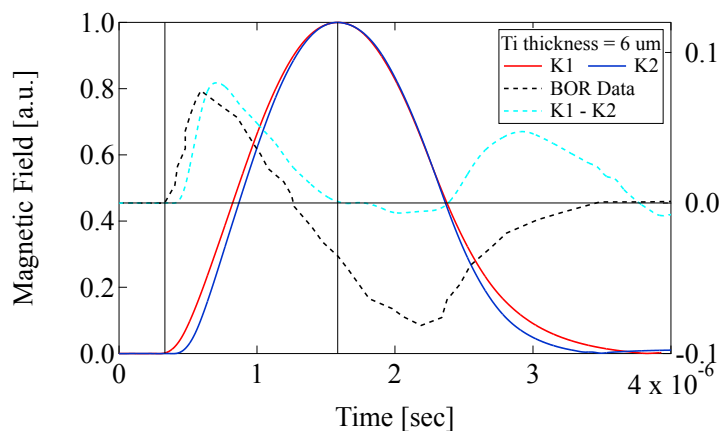
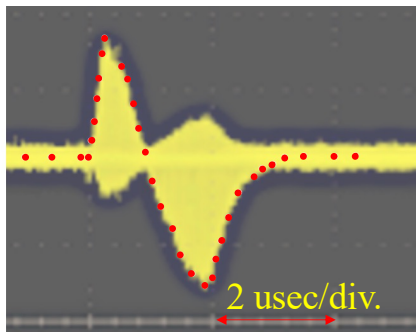
図10 (a) K1, (b) K2タイプの膜厚差による磁場の時間応答効果.

- 電気抵抗が低くなりEddy Currentが大きいので、Ti膜厚が厚い方が磁場の広がりが大きい。

Opera2Dの計算結果からBORは再現するか: Ti膜厚6 μm を仮定した場合

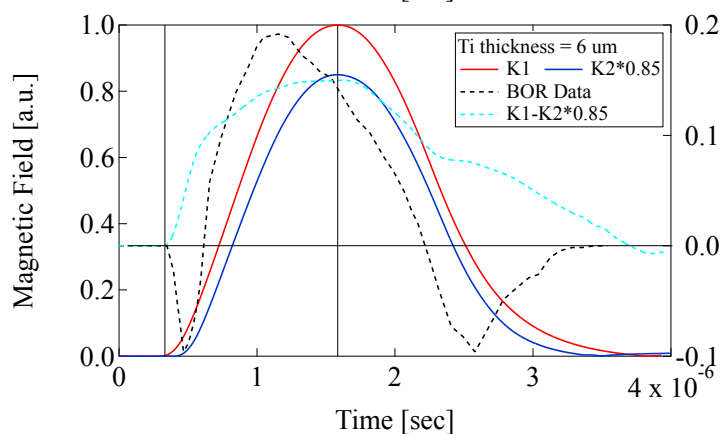
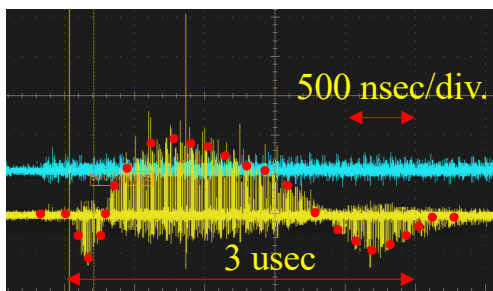
Bunch Oscillation Recorder

(a)



- K1とK2の磁場波形の差を取ると、BOR波形は再現されない。
- K2のタイミングをプラスマイナスどちらに振ってもBOR波形は再現されない。

(b)



- これらの結果からK1とK2はTi膜厚が異なることが可能性。

図11 SuperKEKB運転中に取得したBORとK1-K2の比較.
K1:K2出力比(a) 1:1, (b) 1:0.85.

膜厚測定

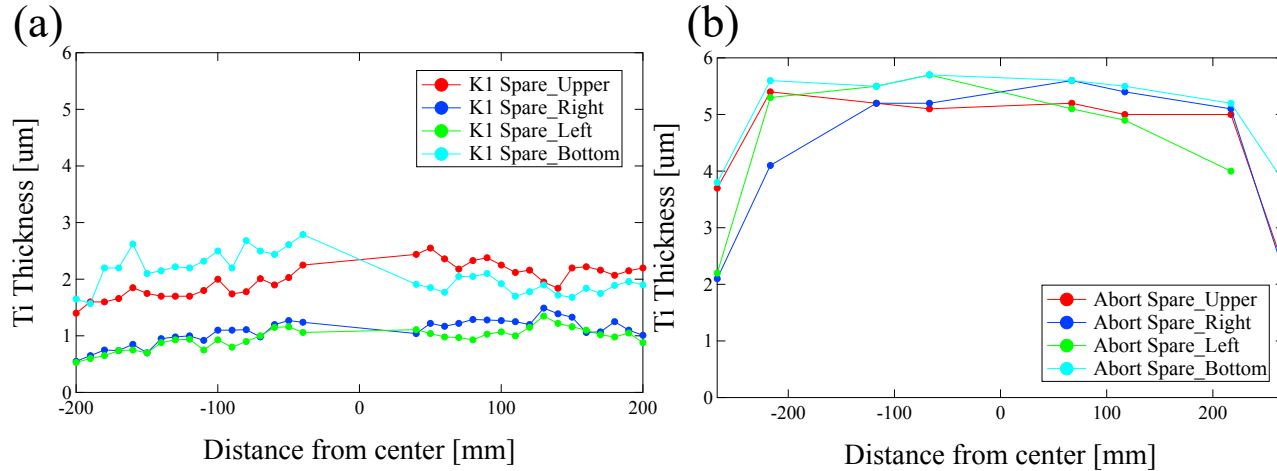


図12 渦電流式膜厚計で測定された(a) K1, (b) K2ダクトのTi膜厚分布.

- K1は予備ダクト, K2は同じ時期に製作しダクト長が異なるAbort Kicker用のダクトのTi膜厚を測定.
- 設計ではTi膜厚は6 umだが渦電流式膜厚測定では K1≒1 um, K2≒5 umを示す.

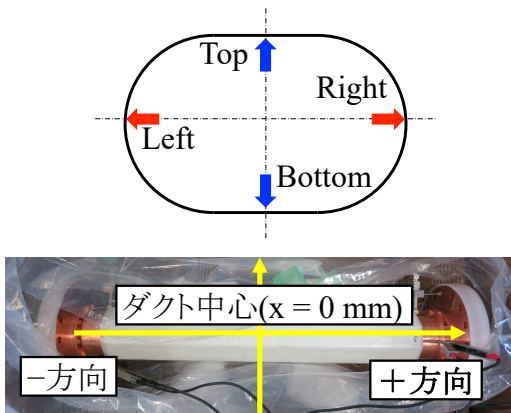


図13 測定点の定義.

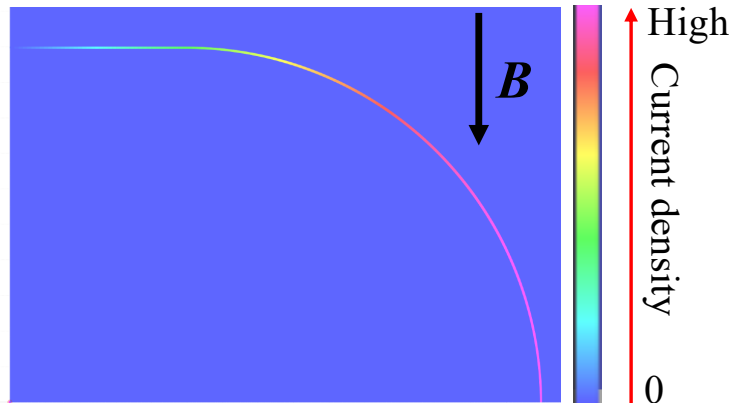
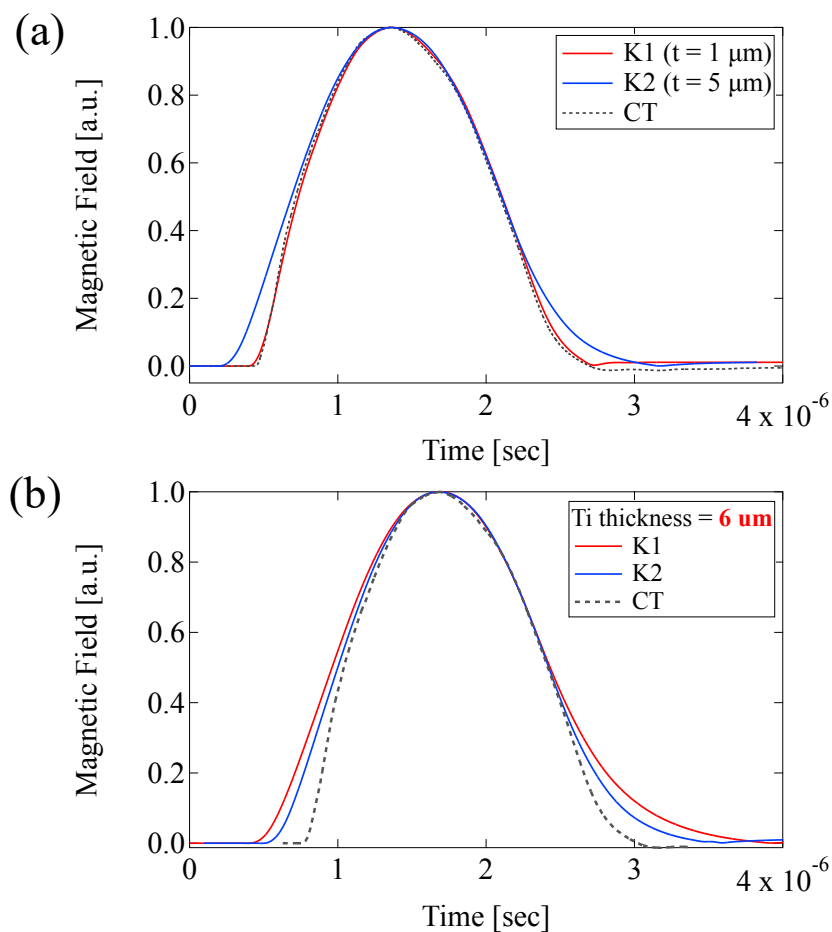


図14 Opera2Dで計算した磁場印加時のTi膜の電流分布.

- 4端子電気抵抗測定から得られたダクト全体のTi膜厚平均は K1≒1.2 um, K2≒3.6 um. (Tiの電気抵抗率は $4.27e-7 \Omega \cdot m$ を使用)

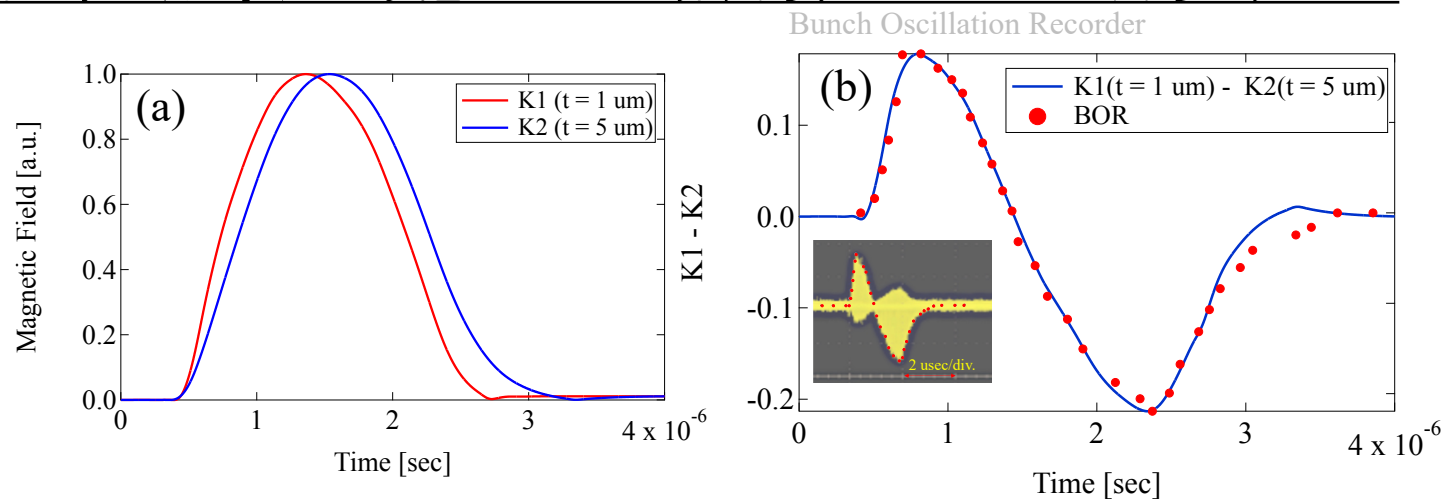
膜厚と形状を考慮した磁場計算: Opera2Dでの計算



- ダクト形状効果によりK1の方がK2よりも磁場の広がり大きいと考えていたが、Ti膜厚の効果により実際はK2の磁場波形の広がり大きい。

図15 (a) K1($t = 1 \mu\text{m}$), K2($t = 5 \mu\text{m}$),
(b) K1($t = 6 \mu\text{m}$), K2($t = 6 \mu\text{m}$)でのダクト内部磁場の時間応答.

膜厚と形状を考慮した磁場計算でBORを再現するか



- 実際に測定されたTi膜厚を用いてK1とK2の磁場波形差を計算するとBOR波形が再現される。

図16 (a)Opera2Dによるダクト内部磁場の時間応答. BOR波形を再現するK1とK2のタイミングでのプロット. (b)BOR波形とK1-K2比較.

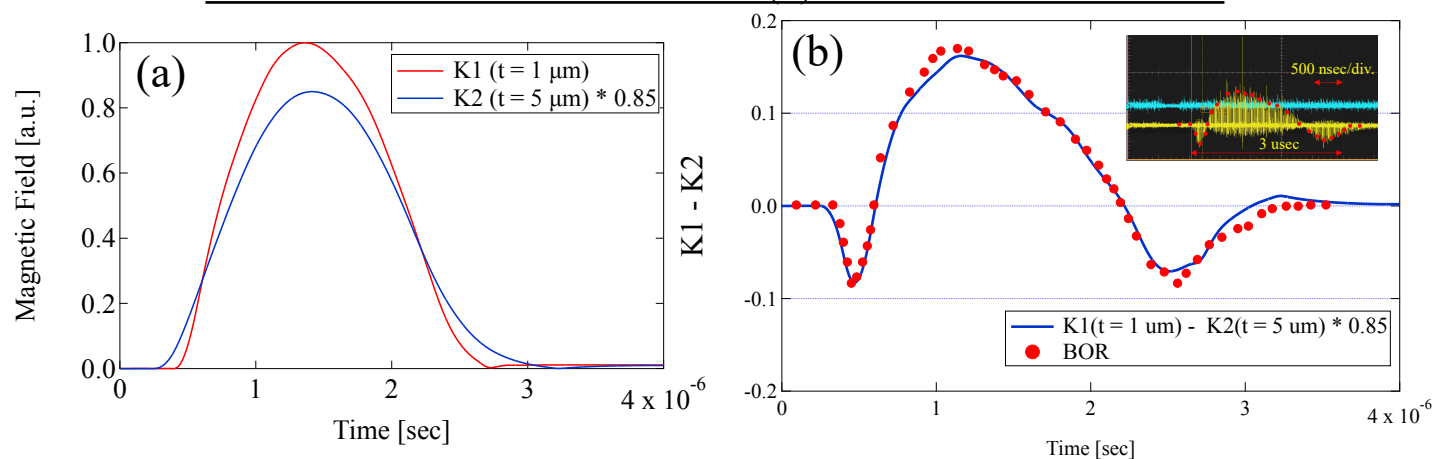


図17 (a)Opera2Dによるダクト内部磁場の時間応答. K2 × 0.85でプロット. (b)BOR波形とK1-K2比較.

ダクト内の磁場測定

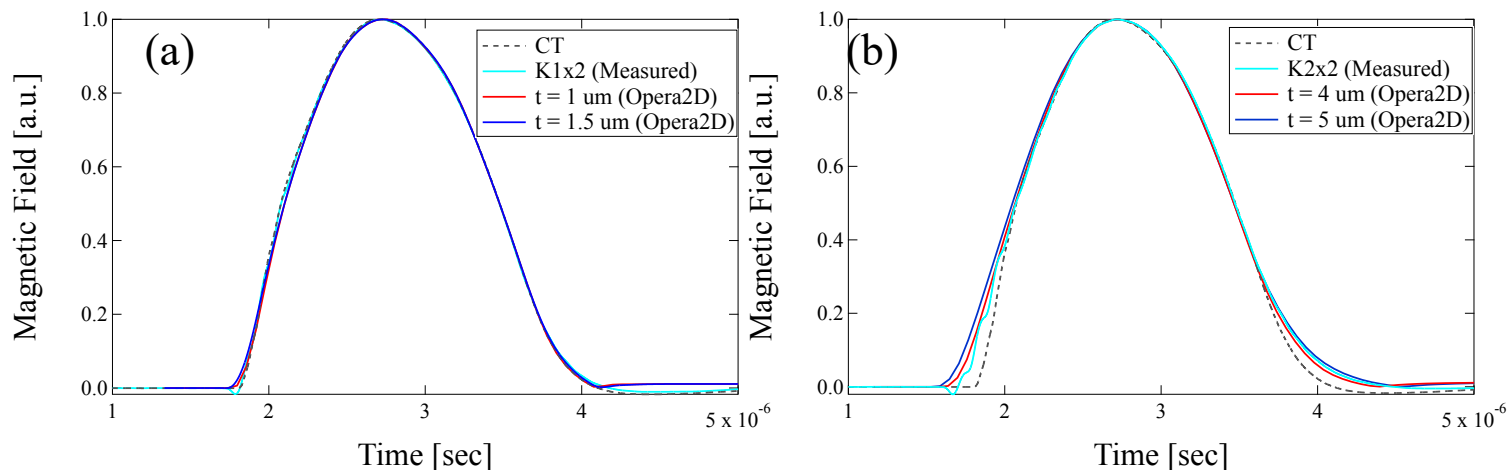


図18 実機を用いたダクト内の磁場測定結果とOpera2Dでの磁場解析結果の比較.

(a)K1, (b)K2.

		抵抗 Ω/m	t1 μm
K2 Type	Abort (Opera2D解析 で使用)	0.70	3.6
	K2-1	0.65	3.9
	K2-2	0.64	3.9
	K2-3	0.71	3.6

表1 K2タイプの実機ダクトの膜厚.
膜厚換算は $\rho_{Ti} = 4.27e-7 \Omega \cdot m$ を使用.

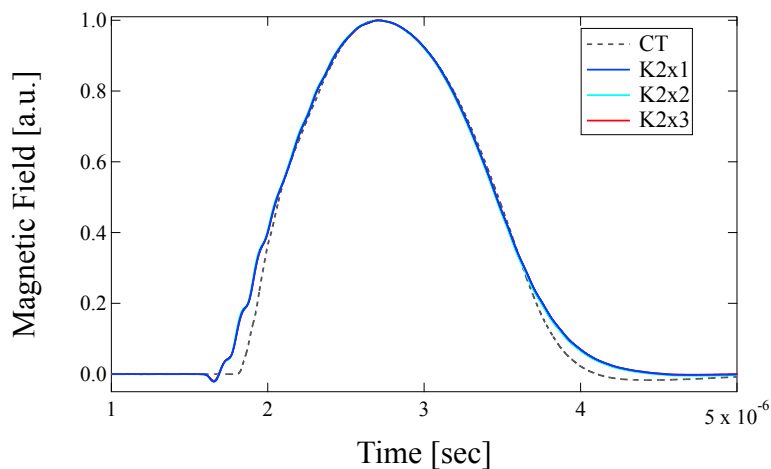


図19 K2ダクト3本の磁場測定結果.

- 実際の磁場測定結果とOpera2Dの解析結果は良い一致を示す.

- 4端子電気抵抗測定の結果, 3本のK2ダクトのTi膜厚のばらつきは<10%である.
- この程度では磁場波形に大きく影響しない.

まとめ

- SuperKEKB加速器, LERで観測される入射バンプ軌道の蹴り残しの原因について考察した.
- 蹴り残しは2組のKicker電磁石, K1とK2電磁石で使用されているセラミックダクトの
 - ✓ ダクト形状
 - ✓ 内壁にコーティングされているTi膜厚の違いによりダクト内部の磁場の時間応答が異なることに起因することを明らかにした.
- 2024年度にK2タイプのセラミックダクトを新規製作, K1タイプと交換する予定.
これによりLER入射における蓄積ビームの蹴り残しを大きく改善することが期待される.
- Ti膜厚の管理については電気抵抗値による仕様設定とすることを検討している.