

# 次世代光源における過渡的電圧補償のための広帯域空洞コールドモデルの性能評価

## PERFORMANCE EVALUATION OF THE WIDE-BAND CAVITY COLD-MODEL TO COMPENSATE THE TRANSIENT BEAM LOADING IN THE NEXT GENERATION LIGHT SOURCES

内藤大地 <sup>\*,A)</sup>, 山本尚人 <sup>A)</sup>, 高橋毅 <sup>A)</sup>, 山口孝明 <sup>B)</sup>, 坂中 章悟 <sup>A)</sup>

Daichi Naito <sup>\*, A)</sup>, Naoto Yamamoto <sup>A)</sup>, Takeshi Takahashi <sup>A)</sup>, Takaaki Yamaguchi <sup>B)</sup>, Shogo Sakanaka <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK

<sup>B)</sup> SOKENDAI

### Abstract

Ultra-low-emittance is an important characteristic in the fourth generation light sources. To achieve such a low emittance, scatterings of electrons within the same bunch should be reduced by the bunch lengthening using the combination of fundamental and harmonic cavities. The performance of this bunch lengthening technique could be affected by the changes in the cavity voltages. To compensate cavity voltages, we proposed a compensation scheme using a wide-band kicker cavity. We designed and manufactured a cold model of the kicker cavity to confirm its compensation performance. In this paper, we introduced the mechanical design of the kicker cavity and reported its fundamental performance.

### 1. はじめに

第4世代リング型光源では回折限界に迫る極低エミッタンスの達成を目指している。これらの光源の中でもエネルギーが3 GeVクラスの蓄積リングでは、電子ビームのバンチ内散乱(IFS)によるエミッタンスの増大が懸念されている[1]。IFSを減らす対策として主空洞と高調波空洞を組み合わせたダブルRFシステムによるバンチ伸長がある[2]。このバンチ伸長手法ではバンチ中心での主空洞と高調波空洞の合成RF電圧の勾配が平坦でなければならず、主空洞及び高調波空洞の空洞内電圧が変化して平坦性が崩れるとバンチ伸長の効果が弱まる。とりわけバンチのフィルパターン中に連続した多数の空バケットがある場合、空洞内では通過するビーム電荷量が時間的に変動している事と等しく、ビームにより空洞内に発生する電圧が時間毎に大きく変動する。この現象は過渡的ビームローディング(TBL)と呼ばれ、第4世代光源で必須なバンチ伸長を阻害している。

TBLによるバンチ伸長効果の抑制を改善するため、我々のグループではTBLの小さい3倍高調波空洞を用いた常伝導のダブルRFシステムと、広帯域のキッカー空洞によってTBL電圧を補償する手法を提唱した[3]。さらにKEK-Light Source[4]を例としてTBL電圧を補償するために必要なキッカー空洞のパラメータの最適化と、具体的なキッカー空洞のデザインについて提唱した[5]。本論文では具体的なデザインを元に制作したキッカー空洞コールドモデルの機械設計とTBL電圧補正に使うTM<sub>010</sub>モードのRF測定について報告する。またTM<sub>010</sub>モード以外の減衰に使用するRF吸収体の再検討についても報告する。

### 2. 補償用キッカー空洞のデザイン

補償用キッカー空洞のデザインを検討するに際して仮定したKEK-Light SourceのビームパラメータをTable 1、空洞パラメータをTable 2に示す。我々のグループでは上記のパラメータを仮定して各空洞に発生するTBL電圧のパターンとバンチ伸長率と、電圧変動を補償するためにキッカー空洞が満たすべき空洞電圧と出力RFのバンド幅を見積もった[3]。このバンド幅は空洞の共鳴周波数を $f_a$ 、負荷 $Q$ 値を $Q_L$ とおくと

$$\Delta f = \frac{f_a}{Q_L} \quad (1)$$

で定義され、5 MHzもの広帯域が必要だと判明した。さらにキッカー空洞自身に発生するTBL電圧、入力RF電力、RF供給窓や高次寄生モード減衰用のRF吸収体での発熱、キッカー空洞が誘起するビーム不安定性を考慮してパラメータの最適化と具体的デザインを行った[5]。また最適化の結果、平均バンチ長が40.9 psまで改善できると見積もった。この値はTBL電圧が無い場合に我々が提唱したダブルRFシステムでのバンチ長である42.5 psに迫る値であり、キッカー空洞による補償が有効であることが確認できた。

最適化後のキッカー空洞のパラメータをTable 3に、具体的な空洞のデザインをFig. 1に示す。キッカー空洞は空洞本体、周回ビームパイプと接続するためのテーパ型ビームダクト、RF入力のための2本のWR-650型導波管、高次寄生モードを吸収するためのRF吸収体から構成される。この空洞の特徴はsingle mode cavity(SMC)[6]形状を採用している点である。SMCは空洞本体と比較して大きなビームホールを持っているため $R/Q$ が低く、Table 3に示した $R/Q$ の要求を満たすのに適している。さらに高次寄生モードをビームダクト側へ逃がして減衰

\* daichi.naito@kek.jp

Table 1: Parameters of the KEK-LS Used in This Study [4]

Parameter	Symbol	Value
Beam energy	$E_0$	3 GeV
Momentum compaction factor	$\alpha_c$	$2.1893 \times 10^{-4}$
Average beam current	$I_{av}$	0.5 A
Beam current per bunch	$q_b$	1 nC
Bunch interval	$T_b$	2 ns
RF frequency (fundamental)	$f_{rf}$	500.07 MHz
Harmonic number	$h$	952
Number of bunch gaps		2
Number of buckets in a gap	$N_g$	30
Revolution frequency	$f_{rev}$	525 kHz
Synchrotron frequency	$f_s$	2.65 kHz
Horizontal betatron tune	$\nu_x$	48.58
Vertical betatron tune	$\nu_y$	17.62
Longitudinal damping time	$\tau_s$	22.63 ms
Horizontal damping time	$\tau_x$	29.25 ms
Vertical damping time	$\tau_y$	38.28 ms

Table 2: Parameters of the Double RF System [3]

Parameter	Main RF	Harmonic RF
RF Voltage	2.5 MV	777 kV
Synchronous phase	1.178 rad	-1.708 rad
Tuning angle	-0.962 rad	1.433 rad
Total $R/Q$	875 $\Omega$	386 $\Omega$
Total shunt impedance	35 M $\Omega$	14.48 M $\Omega$
Cavity coupling coefficient	3.5	0.27
Total reflected power	0.4 kW	11.4 kW

Table 3: Parameters of the Designed Kicker Cavity [5]

Parameter	Value
Cavity voltage	53 kV
Resonant frequency	1.50003 GHz
Resonance mode	TM010
$R/Q$	59.54 $\Omega$
$Q$	16814
$Q_L$	291
Power loss in cavity	2.81 kW
Max power density	25.7 W/cm <sup>2</sup>
Absorber loss	7 %

させる事ができ、空洞表面に減衰機構が必要無いという特徴を持つ。その結果空洞本体をコンパクトにできる、大きな負荷Q値を達成するために必要な大口径のRF導入口を確保しやすいという利点がある。またRF吸収体についてはフェライト (IB-004) の使用を想定した。

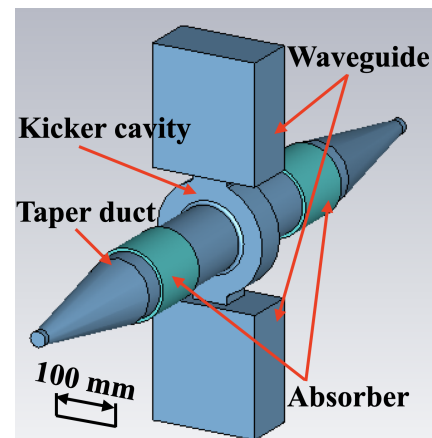


Figure 1: 3D view of the 1.5 GHz kicker cavity [5].

### 3. キッカー空洞コールドモデルのデザイン

前節で紹介したキッカー空洞のデザインをもとに、アルミ (A5056) でコールドモデルを制作した。Figure 2 に完成したコールドモデルの写真を示す。空洞本体は中心で2分割されており、2本の位置決めピンをガイドに分割された空洞を4本のボルトで締結している (Fig. 3)。

空洞表面及び結合面の粗さは  $R_a 1.6$  として制作した。空洞の内面形状は制作後に実測した。空洞半径は設計値が  $\phi 170.58$  mm に対して  $\phi 170.567 \pm 0.007$  mm であった。Waveguide に関しては同軸変換付きの WR-650 型導波管をボルトで空洞に締結している。RF 吸収体部については納期的に調達が不可能であったため、 $\phi 100$  mm の円筒ダクトを代わりに接続している。テーパダクト部は傾斜角を 10 度にして製造した。最後に空洞の近くに2本の長さ 50 mm、 $\phi 1$  mm のアンテナプローブを設置し、導波管と結合しない空洞の励起モードも測定できるようにした。

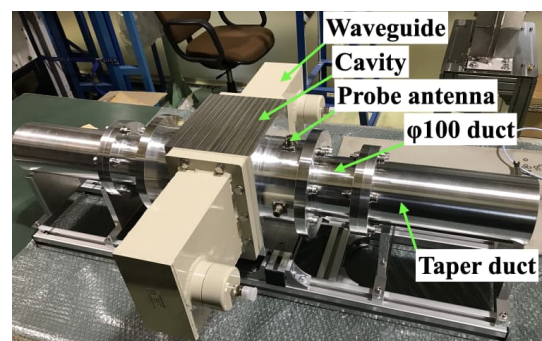


Figure 2: Photo of the cold model.

### 4. コールドモデルのRF測定

前章で記述したとおり今回はRF吸収体が調達できなかったため、TBL補正に使うTM010モードに絞って特性の評価を行うことにした。測定のセッ

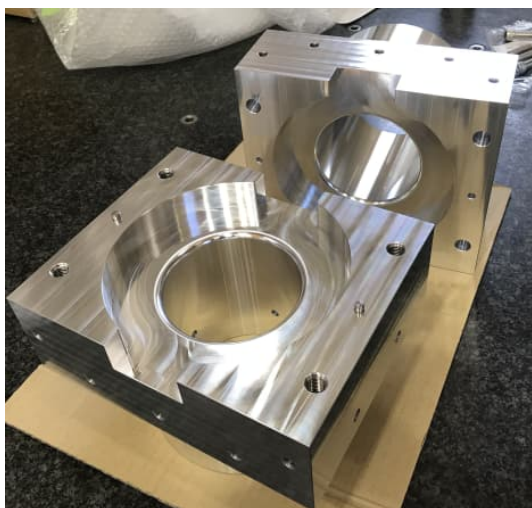


Figure 3: Photo of the cavity part.

トアップを Fig. 4 に示す。ネットワークアナライザ (E5080A) の 2 ポートを空洞に接続された導波管に接続し、S11, S22, S12, S21 を測定した。Figure 5 に測定結果を示す。黒線が実測値、赤が電磁場シミュレーションコードである CST MW Studio [7] を用いて計算した予測スペクトラムを示す。この時、ピークからパワーが半分になる 2 点の周波数差が Eq. 1 の  $\Delta f$  に相当し、ピーク値の周波数と  $\Delta f$  から負荷 Q 値を計算できる。各スペクトラムから計算された負荷 Q 値を Table 4 を示す。各 S パラメータから計算した負荷 Q 値は良く一致していることがわかる。よってピークからパワーが半分になる 2 点の周波数差が Eq. 1 の  $\Delta f$  に相当するという仮定がよく成り立っており、負荷 Q 値が正しく計算できていることがわかる。

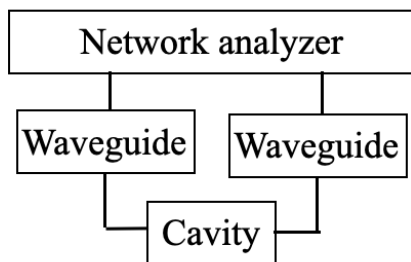


Figure 4: Set up of the RF measurement.

Table 4: Comparison of the Loaded Q between Measurement and Simulation

	Simulation	Measurement
S11	290	280
S21	290	282
S22	290	279

次に S11 と S22 のピーク値の周波数と振幅、負荷 Q 値から RF 結合定数定数、無負荷 Q 値、外部 Q 値

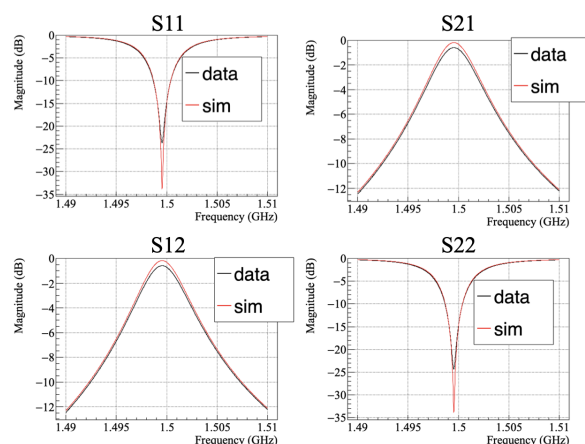


Figure 5: Spectrum of the S-parameters.

を計算した。Table 5 に計算結果をまとめる。外部 Q 値はシミュレーションと実測値で非常に良く合っていることが分かった。この結果より我々のデザインで十分大きな負荷 Q 値を達成できる事を実証できた。一方で無負荷 Q 値は大きく異なっており、その結果 RF 結合度もシミュレーションと実測で 3 倍程度の違いが見える。この違いの原因の候補としては電気伝導率の違いと 2 分割した空洞の接合度が挙げられる。電気伝導率は実測しておらず、理想的なアルミの電気伝導率を仮定しているため、実際とは異なる可能性がある。また接合面については電氣的接触が不十分である可能性がある。

Table 5: Comparison of the Parameters between Measurement and Simulation

	Simulation	Measurement
Resonant frequency (GHz)	1.49954	1.49955
Loaded Q	290	280
Coupling beta	47.9	15.6
Unloaded Q	14205	4639
External Q	297	297

## 5. RF 吸収体を用いた RF 測定の準備状況

RF 吸収体についてはこれまでフェライト (IB-004) を用いる予定だったが入手性が悪化したため、RF 吸収体の再検討を行なった。代替となるフェライトも探したが RF 吸収特性と入手性の両方が良い素材の調達が難しかったため、SiC(CERASIC-B [8]) の使用を検討した。検討では CST の wake field solver を用いて RF 吸収体の違いによる結合インピーダンスの評価を行なった。Figure 6 にビーム進行方向、Fig. 7 に横方向のシミュレーション結果を示す。横軸が周波数、縦軸が CST の wake field solver で計算した結合インピーダンスを示す。左図がビーム進行方向、右図が横方向の結合インピーダンスを示す。黒線が吸収体が無い場合、赤が IB-004 を用いた場合、青が

CERASIC-Bの結果を示す。また緑線はビーム不安定性が起きる結合インピーダンスの閾値で、Table 1のパラメータを用いて計算した値である [5]。この結果から CERASIC-B でも IB004 を使った場合と同程度かつ十分な減衰特性が得られることが分かった。

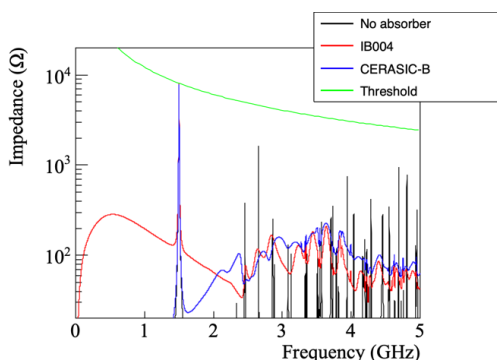


Figure 6: Comparison of the longitudinal coupling impedance with various absorbers.

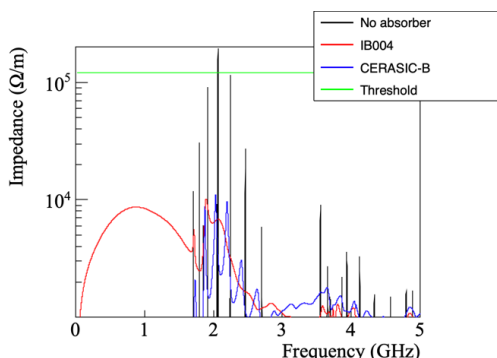


Figure 7: Comparison of the transverse coupling impedance with various absorbers.

次に高次モードが減衰されていることを証明するため、横方向の結合インピーダンスのうち閾値付近にいる3つのピークがコールドモデルで観測可能かを CST を用いて検証した。Eigenmode solver を用いて励起モードの同定を行なったところ、3つのモード全てが空洞内に励起された TM110 モードとダクト内に励起されている別のモードが結合したモードだと分かった。このため導波管やアンテナポートから挿入したロッドアンテナでは測定することが難しいと判明した。そこで CST の time domain solver を使ってループアンテナの設計を行なった。Figure 8 に実際に制作したループアンテナを示す。今後は RF 吸収体が納品され次第、このループアンテナを用いて高次モードの減衰効果について評価を行う予定である。

## 6. まとめと今後

第4世代リング型光源での極低エミッタンス達成の妨げになる、ダブル RF システムでの TBL を補償するために提唱した広帯域キッカー空洞のコールド

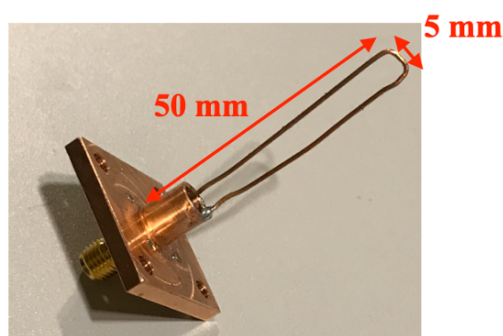


Figure 8: Photo of the loop antenna.

モデルを製作した。そして補償に用いる TM010 モードの RF 特性を測定し、キッカー空洞に必要な 5 MHz の高帯域が十分達成可能であることを実証できた。

RF 吸収体については素材の見直しを行い、フェライトから SiC に変更することにした。CST での見積もりでは SiC でも十分な高次モードの減衰効果を得られることが確認できた。また CST を用いてループアンテナの設計/制作も行なった。今後は吸収体が納品され次第、コールドモデルで高次モードを測定し、想定通り吸収体で高次モードが減衰できていることを実証する。

## 謝辞

キッカー空洞コールドモデルの機械設計及び組み立てを行なっていただいた KEK 機械工作センター 岡田尚起氏、高富俊和氏に謝辞を述べます。本研究は JSPS 科研費 JP20H04459, 21K17997 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] S. Leemann, “Interplay of Touschek Scattering, Intrabeam Scattering, and RF Cavities in Ultralow-emittance Storage Rings”, in the Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, 2014, TUPRI025.
- [2] A. Hofmann, S. Myers, “Beam dynamics in a double RF system”, CERN-ISR-TH-RF-80-26.
- [3] N. Yamamoto *et al.*, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, *Physical Review Accelerators and Beams* 21 (1) (2018) 012001.
- [4] KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.1 (2017).
- [5] D. Naito *et al.*, “Design consideration of a longitudinal kicker cavity for compensating transient beam loading effect in synchrotron light sources”, in the Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference, 2021, MOPAB331.
- [6] T. Weiland, “Single mode cavities a possibility for fighting collective beam instabilities”, DESY 83-073.
- [7] <https://www.3ds.com>
- [8] <https://www.coorstek.co.jp/jpn/products/semicon/cerasic.html>