

SuperKEKB LER におけるインピーダンスモデリング IMPEDANCE MODELING IN SuperKEKB LER

石橋 拓弥^{#, A), B)}, 周 徳民^{A), B)}, ミリョラーティ マウロ^{C)}, 柴田 恭^{A), B)}, 阿部 哲郎^{A), B)},
飛山 真理^{A), B)}, 照井 真司^{A)}
Takuya Ishibashi^{#, A), B)}, Demin Zhou^{A), B)}, Mauro Migliorati^{C)}, Kyo Shibata^{A), B)}, Tetsuo Abe^{A), B)},
Makoto Tobiyama^{A), B)}, Shinji Terui^{A)}
^{A)} KEK Accelerator Laboratory
^{B)} The Graduate University for Advanced Studies
^{C)} Sapienza University of Rome

Abstract

In the low energy ring (LER) for positrons in SuperKEKB, an unexpected vertical beam-size blow-ups have been observed at approximately 1.0 mA/bunch even though with very small number of bunches, which is 31-bunch in the ring, for instance. This bunch current threshold depends on apertures of vertical collimators, thus this single bunch instability can be caused by the impedance in the vertical direction. The threshold of this instability in the actual machine is smaller than that of an ordinary transverse mode coupling instability (TMCI) obtained by calculations by approximately 30% or more. Therefore, we have reconstructed the impedance model and simulated the single bunch dynamics with the wake potential. This paper summarizes the updates of the impedance model and results of the beam dynamics simulations using PyHEADTAIL.

1. はじめに

SuperKEKB LER (Low Energy Ring, ビームエネルギー4 GeV の陽電子蓄積リング) の単独ビーム (非衝突) 運転において、バンチ電流約 1.0 mA/bunch で垂直方向のビームサイズ増大が観測されている [1]。このビームサイズ増大は、例えば蓄積バンチ数 31 の極少数バンチ運転でも観測されているため、何らかの単バンチ不安定性が起きていると考えられる。また、このバンチ電流閾値は設計値 1.44 mA/bunch (蓄積ビーム電流: 3.6 A, バンチ数: 2500) を下回っており、将来、大バンチ電流で衝突実験を行う際にはこの不安定性によるビームサイズ増大がルミノシティを劣化させてしまう可能性がある。

このバンチ電流閾値は垂直方向可動コリメータ [2] の口径に依存しており、これを開くと閾値が上昇することから、垂直方向のインピーダンスがこの不安定性に関与していることがわかっている [3]。

しかし、通常の物理ランで適用されているコリメータの口径に対し、垂直方向における標準的な横方向モード結合不安定性 (transverse mode coupling instability, TMCI [4]) を計算すると、その閾値は 1.5 mA/bunch 以上と算出され [2]、観測されている垂直方向ビームサイズ増大の閾値はこれより 30% 以上低い値である。

SuperKEKB メインリングのインピーダンスモデリングと collective effect の評価は、建設期にすでに行われているが [5]、現在観測されている約 1.0 mA/bunch で起きる垂直方向ビームサイズ増大は確認されていない。そこで LER におけるインピーダンスモデルを再構築し、collective effect を再評価した。

[#] takuya.ishibashi@kek.jp

このモデルにおける主な改良点は 1) 計算エラーの低減、2) これまでのモデルに入っていなかったインピーダンス源の追加、である。これにより得られたウェイクポテンシャルを使い、PyHEADTAIL [6] によってチューンシフト、TMCI 閾値、バンチ長等のシミュレーションを行った。

2. インピーダンス評価

2.1 計算コード

Pseudo-Green wake function を取得するため、駆動ビームとして $\sigma_z = 0.5$ mm の Gaussian バンチを選択した。これは LER の設計バンチ長 6 mm の 1/12 である。

ビームパイプにおける抵抗壁インピーダンスは主に ImpedanceWake2D [7] または CST Studio Suite を使用して計算した。前者は多層のフラット、円、および楕円形状のビームパイプに対して抵抗壁インピーダンスを計算するコードのため、LER で標準的に使用しているアンテチェンバー付きビームパイプについては後者を用いて計算した。

幾何学的インピーダンスは主に GdfidL [8] と ECHO3D [9] を用いて計算した。それぞれのコードを使い、バンチ長 $\sigma_z = 0.5$ mm における垂直方向コリメータでのウェイクポテンシャルを計算、比較した結果を Fig. 1 に示す。GdfidL ではメッシュサイズを $\sigma_z/20 = 25$ μm まで細かくして漸く計算結果が収束するのに対し、ECHO3D では $\sigma_z/5 = 0.1$ mm でも十分収束している。一方、ECHO3D では幾何学のおよび抵抗壁インピーダンスを同時に計算することが現時点の最新バージョンではできない。そこで、リングのコンポーネントの中でも特に幾何学的インピーダンスの寄与が大きく、計算エラーが発生しやすい

コリメータにはECHO3Dを、すでに計算モデルが構築されている、または抵抗壁インピーダンスの寄与が無視できないと思われる小口径のテーパ付きビームパイプ等のコンポーネントについてはGdfidLをすることにした。

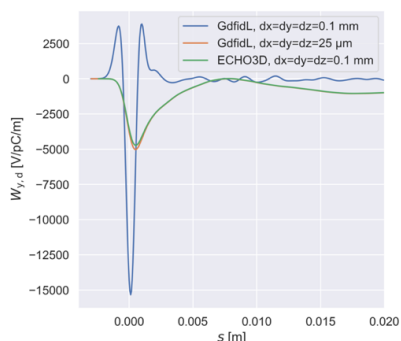


Figure 1: Vertical dipole wake potential in a vertical collimator with a half aperture of 1 mm obtained by GdfidL or ECHO3D. The dx, dy, and dz refer to the mesh size in the horizontal, vertical, and longitudinal direction, respectively. A window-wake scheme was adopted in the calculations with GdfidL. The used versions are 210701 in GdfidL and 1.3.070620 in ECHO3D.

2.2 追加したインピーダンス源

ここでは新たに追加した代表的なインピーダンス源について紹介する。

QCS ビームパイプ

超伝導最終集束電磁石群(QCS [10])のクライオスタットの中には、テーパ付きビームパイプが収められている(以下、QCS ビームパイプ)。例としてQCSR クライオスタットの断面を Fig. 2 に示す。この中には衝突点に近い方からそれぞれ QC1、QC2 と名付けられた 2 台の四重極電磁石が収められている。QCS ビームパイプは全長約 2 m で、直径が 80 mm から 20 mm まで衝突点に向かって段階的に口径が絞られていく構造を持っている。

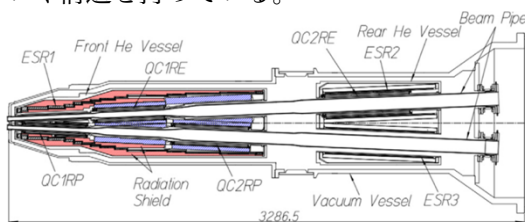


Figure 2: Cross-sectional view of QCSR cryostat. QCSR refers to a final focusing magnet system located upstream from the interaction point for the positron beam.

Figure 3 には QCSR における QCS ビームパイプの半口径と、垂直方向 β 関数 (β_y) を衝突点における各垂直方向 β 関数 (β_y^*) についてプロットしている。衝突点を挟んで QCSR と反対側にある QCSL も、衝突点に関してこれとほぼ対称の構造になっている。QCS における β_y は β_y^* を絞り込むほど大きくなる。2022 年現在は主に $\beta_y^* = 1$ mm で衝突実験をしているが、この

ときの QCSR における β_y の平均値は約 403 m である。将来的に設計値の $\beta_y^* = 0.27$ mm まで絞り込むと、その平均値は 1600 m にもなる。

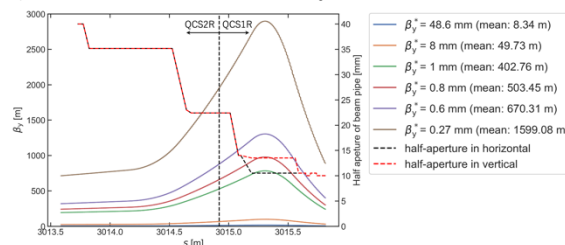


Figure 3: Half aperture of a QCS beam-pipe and vertical beta-function with each vertical beta-function at the interaction point as a function of the longitudinal location. The positron beam travels from left to right in this plot (horizontally reversed with respect to Fig. 2).

ビームとインピーダンスとの相互作用による垂直方向のダイポールキックは次式で与えられる。

$$\Delta y' = \frac{q}{E/e} k_y y \quad (1)$$

ここで q : 電荷量[C]、 E/e : ビームエネルギー[V]、 k_y : 垂直方向のキックファクター[V/C/m]、 y : 垂直方向のビームオフセット[m]である。そのため、バンチ電流に対する垂直方向のコヒーレントチューンシフト Δv_y は次式で与えられる。

$$\Delta v_y = \frac{I_b T_0}{4(E/e)} \sum_i \beta_{y,i} k_{y,i} \quad (2)$$

ここで I_b : バンチ電流[A]、 T_0 : ビームの周回時間[s]である。なお、 Σ は垂直方向におけるリングの各インピーダンス源と、そこにおける β 関数を掛け、それらをリング全周に渡って足し合わせることを意味している。したがって、シンクロトロンチューンを v_s とすると TMCI のバンチ電流閾値 $I_{b,thresh}$ は、

$$I_{b,thresh} = \frac{4\pi(E/e)v_s}{T_0 \sum_i \beta_{y,i} k_{y,i}} \quad (3)$$

で与えられる。

そのため、コリメータに比べて QCS ビームパイプ自身が持つキックファクターは小さくとも、そこでの β 関数が大きいため、QCS ビームパイプにおけるインピーダンスは TMCI の閾値を下げることに大きく寄与する可能性がある。

溶接溝

各ビームパイプ等には外側溶接でフランジや BPM ブロックが接合されており(Fig. 4)、これらのビームパイプの内側には小さなギャップ(溶接溝)がある。ギャップ幅を g とすると、このようなギャップは $\sigma_z > g$ で inductive、 $\sigma_z < g$ で resistive なインピーダンス源になる [11]。

このようなギャップ 1 つのインピーダンスは小さくとも、リングの中には膨大な数のギャップがあるため、それらを加え合わせると inductive なインピーダンスがバンチ長の伸長に大きく寄与する可能性がある。

溶接溝はビームパイプの実機、数台について隙間ゲージを挿し入れて測定した。Cu 製ビームパイプと

Cu 製および Al 合金製ベローズチェンバーは $g \sim 0.06$ mm、ギャップの深さ $d \sim 1.5$ mm。Al 合金製ビームパイプは $g \sim 0.15-0.20$ mm、 $d \sim 2.5$ mm であった。これらの値を用いて溶接溝をモデリングし、インピーダンスを計算した。

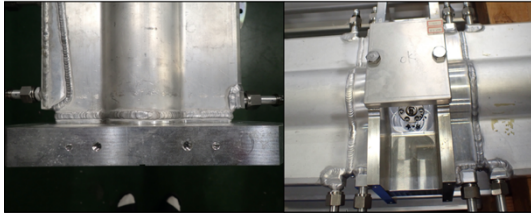


Figure 4: Welding part at a flange (left) and a BPM-block (right) in an aluminum alloy beam-pipe with antechambers.

3. インピーダンスモデル

LER に設置されているコリメータ、加速空洞 (ARES 空洞 [12])、テーパ付きチェンバー、フランジ、溶接溝、RF シールド、放射光マスク、排気ポート、BPM、縦および横方向フィードバックキッカー [13]、入射キッカー部のチタンコーティングされたセラミック製チェンバー、その他特殊ビームパイプ、resistive wall 等、全 55 種類のコンポーネントについてインピーダンスを計算した。得られたウェイクポテンシャルは各コンポーネントの数量 (resistive wall (RW) の場合はビームパイプの長さ) で重み付けしている。コリメータの口径については、2021 秋期運転における物理ランでの値を参照した。

バンチ長 6 mm における進行方向のウェイクポテンシャルを Fig. 5 に示す。ここではロスファクターの大きいコンポーネントについてピックアップしている。 $\sigma_z = 6$ mm におけるウェイクポテンシャル $W(s_l, \sigma_z)$ は、 $\sigma_{z0} = 0.5$ mm でのウェイクポテンシャル $W(s, \sigma_{z0})$ を使って、次式の畳み込みによって計算した (実際には離散畳み込みで計算している)。ここで s はウェイク場を駆動する誘導ビームと試験粒子の相対距離である。

$$W(s, \sigma_z) = \int ds' W(s - s', \sigma_{z0}) \frac{e^{-\frac{s'^2}{2\sigma_z^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \quad (4)$$

Coherent synchrotron radiation (CSR) と coherent wiggler radiation (CWR) については文献[5]と同じ、CSRZ [14] で計算したウェイクポテンシャルを使用している。

$\sigma_z = 6$ mm におけるロスファクターについては大きい方から、ARES 空洞、TiN コーティングした Al 合金製アンテチェンバー付きビームパイプ [15] における RW、加速空洞が設置されている区間 (RF 区間) で使用している口径 94 mm から 150 mm のテーパ管、同じく RF 区間で使用している HELICOFLEX タイプのフランジ、SuperKEKB で新たに導入された櫛歯型 RF シールド付きベローズおよびゲートバルブ [16]、の順になっている。ただし、テーパ管についてはこれと対になって、口径が 150 mm から 94 mm に狭まるテーパ管もあり、ここでのロスファク

ターは負 (ビームは加速される方向) であることから、テーパ管のロスファクターは多少相殺される。なお、文献[5]でも報告されている通り、 $\sigma_z = 0.5$ mm では CSR と CWR の寄与が支配的であるが、長いバンチに対してはこれらの寄与は非常に小さい。

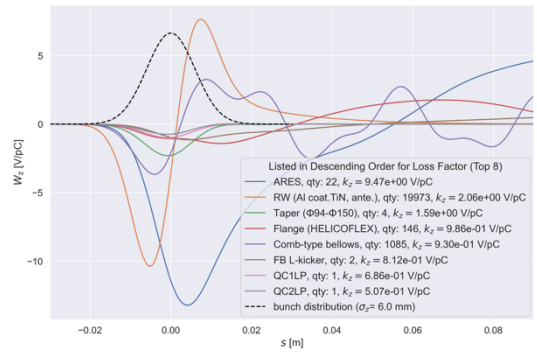


Figure 5: Longitudinal wake potential for main components contributing to the loss factor and the bunch distribution of $\sigma_z = 6.0$ mm.

Table 1 にはバンチ長 6 mm における縦方向の主要なインピーダンス源をまとめている。ここでは文献 [5] と同様に、resistance (R) と inductance (L) は文献 [17] に倣ってウェイクポテンシャルを次式で回帰分析して粗く見積もった。ここで c は光速度である。

$$W_z = -Rc\lambda(s) - Lc^2\lambda'(s) \quad (5)$$

$$\lambda(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (6)$$

LER で主要な inductive インピーダンス源は RW、コリメータ、MO フランジ [18]、櫛歯型ベローズ、テーパ付きビームパイプ (QCS ビームパイプ含)、

Table 1: Summary of Longitudinal Impedance in LER for $\sigma_z = 6.0$ mm. k_z , R , and L refer to the loss factor, resistance, and inductance, respectively.

Component	k_z [V/pC]	R [Ω]	L [nH]
ARES cavities [12]	9.5	671.9	-8.4
Resistive wall	3.0	212.4	21.6
Flanges (HELICOFLEX)	1.0	70.0	-0.7
MO-flanges [18]	0.02	1.4	5.2
Welding-gaps	0.0	0.26	1.4
Comb-type bellows [16]	0.9	66.3	5.3
Long. feedback kicker [13]	0.8	57.6	-0.8
Clearing electrodes [20]	0.02	1.7	2.4
Vertical collimators [2]	0.1	8.2	5.9
Horizontal collimators [2]	0.3	17.6	5.6
Tapered beam-pipes	0.9	62.3	1.2
QCS beam-pipes [10]	0.07	5.1	0.6
Others	1.59	115.84	1.79
Total	18.2	1290.6	42.49

溶接溝である。MO フランジについて、ガスケット部はビーム側へ0.15 mm、全幅1 mmの突起とし、またこの突起の上下流側それぞれに溶接溝をモデリングしている。

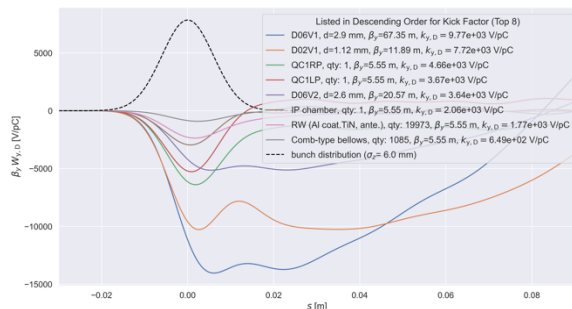


Figure 6: β_y weighted vertical dipole wake potential for main components contributing to the kick factor in $\beta_y^* = 1$ mm and the bunch distribution. In the legend, D06V1, D02V1, D06V2, and D03V1 are vertical movable collimators. D02H3 is a horizontal movable collimator. d refers to a half-aperture of each collimator. IP chamber is a X-shaped beam pipe at the interaction point.

バンチ長6 mm、 $\beta_y^* = 1$ mmにおける、各コンポーネントでの β_y で重み付けした垂直方向ダイポールウェイクポテンシャルを Fig. 6 に示す。ここではキックファクターが大きいコンポーネントをピックアップしている。最も寄与が大きいのはD06V1と呼ばれる垂直方向コリメータで、これはLERの入射点直後にある入射バックグラウンドを低減するために使われているコリメータである。このコリメータは半口径2.8 mmで、ここでは $\beta_y = 67.35$ mで他のコリメータより大きい値になっている。次に寄与が大きいD02V1コリメータは衝突点に最も近いコリメータで、半口径1.1 mm程度で運用している。QCS ビームパイプは縦方向に対して β_y が大きく変化することから、QC1とQC2に区切ってそれぞれに対してインピーダンスを計算し、また各区間における β_y の平均値でそれぞれ重み付けしている。衝突点領域(interaction region, IR)にある機器(衝突点チャンバー[19]とQCS ビームパイプ)の寄与も大きいことがわかる。

Figure 7 にはバンチ長6 mm に対する各 β_y^* での $\sum_i \beta_{y,i} k_{y,i}$ と(3)式を用いて計算したTMCIのバンチ電流閾値を示している。Belle II 検出器におけるbackground levelが $\sqrt{\beta_y^*}$ に逆比例することが予測されるため、ここでは $\beta_y^* = 1$ mmでのコリメータの設定値を基準として口径を $\sqrt{\beta_y^*}$ でスケールして閉めている。また、 β_y^* によってコリメータにおける β_y も変化することから、各コリメータにおける $\sqrt{\beta_y}$ でもその口径をスケールしている。 β_y^* を絞り込むにつれて垂直方向コリメータの $\sum_i \beta_{y,i} k_{y,i}$ が大きくなるのは、それにつれて口径を閉めていることと、特にD02V1コリメータにおける β_y が11.89 m ($\beta_y^* = 1$ mm)から57.7 m ($\beta_y^* = 0.27$ mm)まで増加することが主な要因である。 β_y^* が小さくなるにつれてIRの寄与が大きくなるのは、前述の通りこの領域の β_y が大きくなることに起因し

ている。

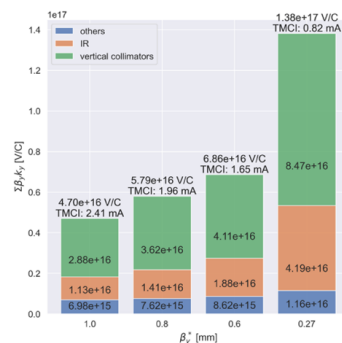


Figure 7: Total β_y weighted vertical kick factor for each β_y^* with $\sigma_z = 6$ mm.

4. PyHEADTAIL シミュレーション

得られたバンチ長0.5 mmにおけるウェイク場(縦方向のmonopole、横方向のdipoleおよびquadrupole wake)を使い、PyHEADTAILにより粒子追跡シミュレーションを行った。主なパラメータをTable 2に列記している。ここではマクロ粒子数 10^6 について25000ターンまで追跡した。

Table 2: Main Machine Parameters for the Simulation

Circumference [m]	3016.3
Beam energy [GeV]	4
RF voltage [MV]	9.12
Harmonic number	5120
Bunch length at 0 mA [mm]	4.61
Synchrotron tune	0.0233
Momentum compaction factor	2.98×10^{-4}
Energy spread	7.52×10^{-4}
Vertical chromaticity	1.5344
Averaged β_y in the ring	19.05
Longitudinal damping time [ms]	22.8
Vertical damping time [ms]	45.7
Normalized vertical emittance [nm]	273.97

Figure 8 にはバンチ電流に対するバンチ長とエネルギー幅を示す。CSRとCWRがバンチ長に及ぼす影響は小さいが、エネルギー幅に対する影響は大きく、microwave instability (MWI [4])の閾値は約1.3 mAとなる。

次に垂直方向について、2021秋期運転時に行ったチューンシフト測定とシミュレーションの結果を Fig. 9 に示す。このインピーダンスモデルを使って計算したチューンシフトは、測定と非常によく合っていることがわかる。

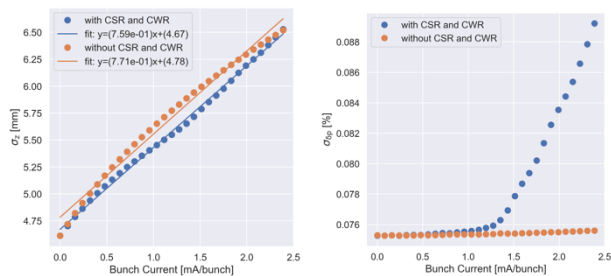


Figure 8: RMS bunch length (left) and energy spread (right) as a function of bunch current with or without CSR and CWR.

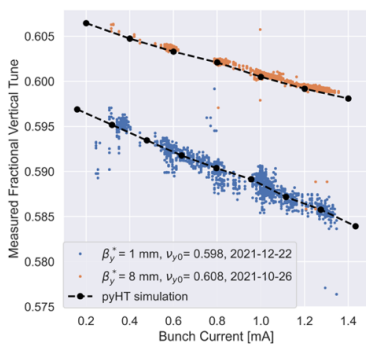


Figure 9: Comparison of vertical tune shift between measurements and simulations.

バンチ電流に対する垂直方向における各モードのチューン (実部) を Fig. 10 に示す。0モード(ν_y)と-1モード($\nu_y - \nu_s$)の結合が起きるのは約 1.75 mA で、(3)式から得られた値 2.41 mA より、(3)式の係数 4π を8 [21]にして得られる値 1.53 mA に近い。しかし、本シミュレーションでは実際の加速器で観測されている ~ 1 mA/bunch で起きる垂直方向ビームサイズの増大を再現することができなかった。

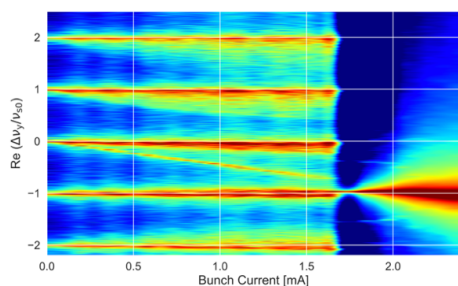


Figure 10: Real part of normalized vertical mode-frequency shift obtained by summing the first ten modes.

5. まとめ

垂直方向におけるチューンシフトは測定とシミュレーションで非常によく合っているが、 ~ 1.0 mA/bunch で観測されている垂直方向ビームサイズ増大は再現できなかった。なお、今回のシミュレーションではフィードバックを考慮していなかったが、ハイゲイン・マルチタップのフィードバックを考慮するとこの現象を再現できるという報告もある[22]。

再構築したインピーダンスモデルは、 β_y^* の絞り込みとともに IR におけるインピーダンスの寄与も大きくなることを示唆している。各 β_y^* においてインピーダンスを測定し、これを確認する予定である。

また、LER ではストリークカメラを使用したバンチ長測定も行われている[23]。測定されたバンチ電流に対するバンチ長の伸びは、シミュレーションで得られた値 (Fig. 8 左図の線形フィットで得られた傾き) より 2 倍程度大きく、縦方向のインピーダンス源にはまだ抜けがある可能性があるため、今後はこれについても精査する予定である。

謝辞

ここでの研究は SuperKEKB International Task Force、TMCI sub-group のメンバーと議論を重ね、また助言を頂きながら進めてきました。メンバーの方々、特に大見和史名誉教授、Dr. Igor Zagorodnov、Dr. Warner Bruns には多大なサポートをいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] S. Terui *et al.*, Proceedings of IPAC2022, Bangkok, Thailand (2022) 2169.
- [2] T. Ishibashi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **23** (2020) 053501.
- [3] T. Ishibashi, 25th KEKB Accelerator Review Committee; <https://www-kekb.kek.jp/MAC/2021/>
- [4] A. W. Chao, Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators, Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology (1993).
- [5] D. Zhou *et al.*, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany (2013) 1600.
- [6] A. Oeftiger, CERN-ACC-NOTE-2019-0013 (2019).
- [7] ImpedanceWake2D; <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/ABPCComputing/ImpedanceWake2D>
- [8] GdfidL; <http://www.gdfidl.de/>
- [9] ECHO3D; <https://echo4d.de/download/echo3d/>
- [10] N. Ohuchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **1021** (2022) 165930.
- [11] T. NAKAMURA, Spring-8 Annual Report (1995) 155.
- [12] T. Kageyama *et al.*, Proceedings of PASJ2011, Tsukuba, Japan (2011) 1245.
- [13] M. Tobiyama and J. W. Flanagan, Proceedings of PASJ2016, Chiba, Japan (2016) 144.
- [14] D. Zhou *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 016401.
- [15] Y. Suetsugu *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A, **30** (2012) 031602.
- [16] Y. Suetsugu *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **78** (2007) 043302.
- [17] K. Bane *et al.*, SLAC-PUB-13999 (2010).
- [18] Y. Suetsugu, M. Shirai, and M. Ohtsuka, J. Vac. Soc. Jpn., **58** (2015) 150.
- [19] K. Kanazawa, 22th KEKB Accelerator Review Committee; <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2018/>
- [20] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **598** (2009) 372.
- [21] Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd Printing (2009) 136.
- [22] K. Ohmi *et al.*, "Impedance and instability studies at SuperKEKB", Proceedings of eeFACT2022, Frascati, Italy, Sep. 12-16, 2022, to be published.
- [23] H. Ikeda, T. Mitsuhashi, and G. Mitsuka, private communication.