

# コリメータ形状がウェイク場に及ぼす影響と横方向双極性キックファクターの低減 EFFECTS OF COLLIMATOR GEOMETRY ON WAKEFIELDS AND MITIGATION OF TRANSVERSE DIPOLAR KICK FACTORS

石橋拓弥 <sup>\*,A)</sup>, 周徳民 <sup>A)</sup>,  
Takuya Ishibashi <sup>\*,A)</sup>, Demin Zhou <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK Accelerator Laboratory

## Abstract

Collimators are major sources of transverse impedance in storage rings and can drive beam instabilities such as the Transverse Mode Coupling Instability (TMCI). We investigate how collimator geometry affects wakefields using GdfidL simulations, focusing on exponential tapers, hollowed jaws, and asymmetric layouts. Applying these to the Low Energy Ring (LER) of SuperKEKB, we evaluate their impact with PyHEADTAIL simulations. The results show that a hollowed exponential taper with an asymmetric configuration significantly reduces the dipolar kick factor and raises the TMCI threshold, offering an effective strategy for impedance mitigation.

## 1. はじめに

蓄積リング型コライダーにおいて可動式コリメータは、non-Gaussian tail にある粒子を除去して検出器バックグラウンドを低減するために用いられる。また、コリメータは不安定性などによって制御不能になったビームから加速器機器を保護する目的でも使用され、特に大電流ビームを扱う加速器では必要不可欠な機器である。

一方で、コリメータはビームに対して急峻な形状変化を持つため、蓄積リングにおける主要なインピーダンス源の1つとなり得る。たとえば、コヒーレントなベータトロンチューンの変化は次のように表される。

$$\Delta\nu_y = \frac{I_b T_0}{4\pi(E/e)} \sum_i \beta_{y,i} k_{yd,i}(\sigma_z), \quad (1)$$

ここで、 $I_b$  はバンチ電流、 $E/e$  はビームエネルギー、 $T_0$  は周回時間である。 $\beta_{y,i}$  はインピーダンス源  $i$  における垂直方向ベータ関数、 $k_{yd,i}(\sigma_z)$  は同じく垂直方向の dipolar wakefield に由来した kick factor (バンチ長  $\sigma_z$  の関数) である。総和は垂直方向におけるリング内すべてのインピーダンス源についてとる。

バンチ電流が増加して  $\Delta\nu_y \approx \nu_s$  ( $\nu_s$  はシンクロトロンチューン) となると、モード間の結合により TMCI が発生する。Dipolar 成分がこの不安定性を引き起こす主要因であり、後続粒子が作る quadrupolar 成分は重要でないということに注意が必要である (むしろ抑制的に働くことが知られている [1, 2])。

最近の研究では、インピーダンスとビームビーム相互作用の複合効果がルミノシティ性能を劣化させることも報告されており [3-5]、この観点からもインピーダンスの最小化が求められている。

本研究では電磁場シミュレーションにより、まずは簡略化したモデルについてコリメータの形状がウェイク場に与える影響を評価する。主に GdfidL [6] を用いてシミュレーションを行い、その結果に基づいて dipolar kick factor を (開口を広げずに) 最小化する方法を検討する。

さらに、得られた知見を用いてリング型加速器におけるインピーダンス低減策を提案し、SuperKEKB [7] の主リングの1つである Low Energy Ring (LER) をケーススタディとして、粒子トラッキングコードの PyHEADTAIL [8] によって単バンチ不安定性への影響を定量的に評価する。

## 2. コリメータ形状

シミュレーションに用いた簡略化したコリメータモデルを Fig. 1 に示す。断面形状は全幅  $2b = 90$  mm の矩形で、ビーム軸  $z$  と水平方向  $x$  が作る平面に対して対称なテーパ構造が垂直方向  $y$  に置かれている。ここでは、線形テーパと指数関数形テーパの2種類の形状を比較する。

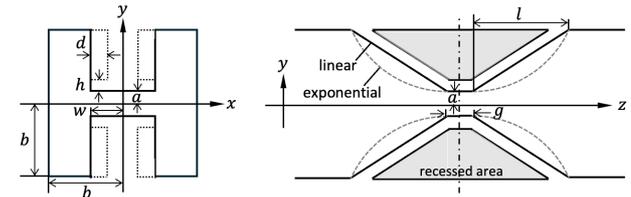


Figure 1: Simplified collimator model with symmetric setting.

指数テーパは、dipolar wake を最小化するために文献 [9] で報告された形状に従っており、その形状は次式で表される。

$$a(z) = a \left( \frac{b}{a} \right)^{z/l} \quad (2)$$

ここで  $a$  は半口径、 $l$  はテーパ長である。本モデルでは  $l = 175$  mm、 $a = 2$  mm としている。Jaw 先端の平坦部は  $g = 10$  mm としている。Figure 1 に示された凹部 (recessed area) は、jaw 側面におけるくぼんだ構造を表している。

### 2.1 凹構造および中空構造

コリメータで励振される高次モード (Higher Order Mode, HOM) の抑制を目的として、jaw 側面の一部を掘

\* takuya.ishibashi@kek.jp

り込み、そこにフェライトブロックをろう付けすることを以前検討していた。興味深いことに、このような凹構造は dipolar kick factor を若干ではあるが低下させることがシミュレーションにより確認された。

Figure 2 に、線形・指数テーパにおける凹みの深さ  $d$  に対する loss factor  $k_z$ 、vertical dipolar kick factor  $k_{yd}$ 、vertical quadrupolar kick factor  $k_{yq}$  の変化を示している。Jaw の半幅は  $w = 7$  mm に固定し ( $w$  が及ぼす影響について、本論文では割愛)、凹部は jaw の外形と同じ形状で、内側に  $h = 5$  mm オフセットしている。したがって、 $d = 7$  mm で凹部は完全に貫通し、jaw は中空構造 (hollowed structure) を持つことになる。なお、シミュレーションにおけるパンチ長は SuperKEKB LER における公称値である  $\sigma_z = 6.0$  mm としている。

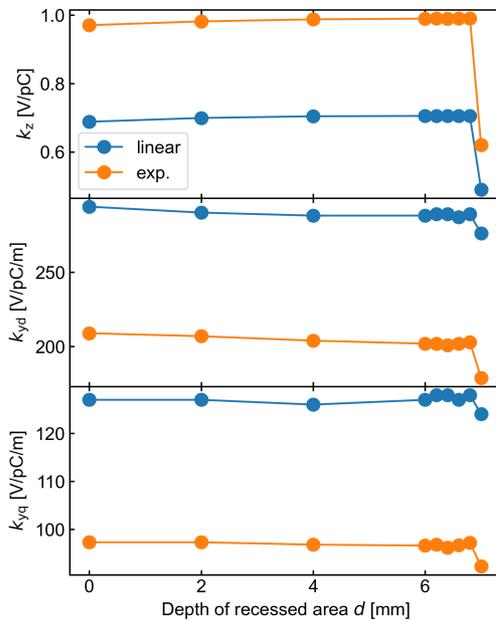


Figure 2: Dependence of loss, vertical dipolar, and quadrupolar kick factors on recessed depth ( $\sigma_z = 6.0$  mm).

Loss factor は凹部の深さとともにわずかに増加するが、 $d = 7$  mm の中空構造になると急激に減少することがわかる。Dipolar kick factor は凹部の深さとともに若干減少し、特に中空構造で大きな低下が見られ、指数テーパの方がより顕著な低下を示すことがわかる。Quadrupolar kick factor は凹部の深さにはほとんど依存しないが、中空構造では顕著に低下する。

紙幅の都合上割愛しているが、凹構造がある場合はバンチが作る磁場がそこへ入り込み、さらに中空構造になると磁場は jaw の中を完全に通り抜け、バンチから遠い場所で表面電流が流れる様子がシミュレーションで見られる。これによりバンチ近傍の jaw 先端部における表面電流が小さくなり、ウェイク場も弱くなると考えられる (詳細なメカニズムは調査中)。

## 2.2 Jaw の片側・両側構成

可動コリメータの jaw はビームに対して片側または両側から接近するように構成できる。例えば、片側 (非対称) 構成のコリメータは KEKB [10] で使用されており、

両側 (対称) 構成は PEP-II および SuperKEKB [11, 12] などで採用されている。両側構成では 1 台のコリメータで  $-a$  および  $+a$  付近の粒子を遮蔽できるが、片側構成でこれと同等のバックグラウンド低減性能を得るためにはベータatron振動の位相差が  $\Delta\phi \sim \pi$  の場所に同向き、もしくは  $\Delta\phi \sim 2\pi$  に反対向きで設置された追加のコリメータが必要となる。

Figure 3 に、KEKB で開発された片側構成コリメータ [10] と同様のシミュレーションモデルを示す。

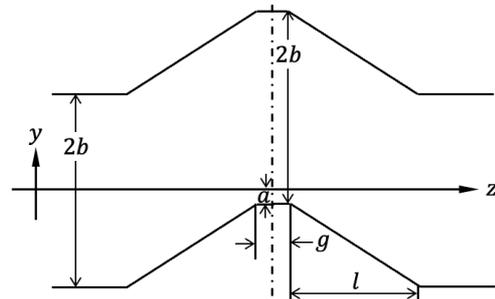


Figure 3: Dimensions of the simple one-side (asymmetric) collimator model with linear taper.

Figure 4 は、片側および両側構成における longitudinal, vertical dipolar, quadrupolar wake potential を比較している。公正な比較のため、片側構成における wake potential については、コリメータを 1 台追加設置することを想定し、2 倍したものを破線でプロットしている。

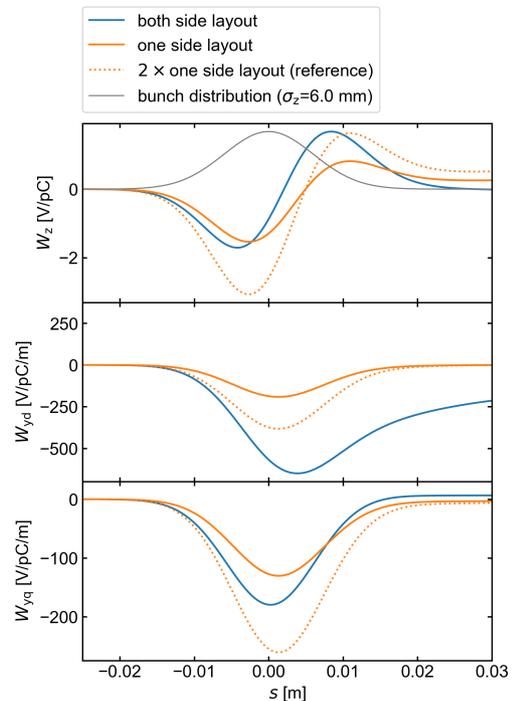


Figure 4: Wake potentials (longitudinal, vertical dipolar, and quadrupolar) for both-side and one-side layouts ( $\sigma_z = 6.0$  mm).

コリメータ単体で比べると、longitudinal wake  $W_z$  は

どちらの構成でも類似であるが、片側構成の方が負のピークがやや小さくなる。Dipolar wake  $W_{yd}$  は、両側構成と比べて片側構成で約 70% 小さくなるため、2 台の片側コリメータを用いた場合でも  $W_{yd}$  は両側構成より小さく、 $W_{yd}$  およびこれに対応する kick factor の観点では片側構成が有利であることが分かる。ただし、Eq. (1) に示されるように、チューンシフトは kick factor だけでなく、コリメータが設置されている位置での  $\beta_y$  にも依存することに注意が必要である。Quadrupolar wake  $W_{yq}$  は片側構成の方がやや小さいものの、2 倍すると両側構成の方が値は小さい。ただし、前述のとおり TMCI においてこのことを懸念する必要はない。

### 3. DIPOLAR KICK FACTOR の低減策

前節までの議論に基づき、 $\sum_i \beta_{y,i} k_{yd,i}$  を低減するための方策を提案し、これらが単バンチ不安定性にどのような影響を及ぼすのかシミュレーションにより評価をする。

Figure 5 に、現在 LER に設置されている垂直方向コリメータのシミュレーションモデルを示す。このモデルでは、 $w = 7$  mm の可動 jaw が、直径 90 mm の円形断面ビームパイプ内に挿入され、上下から蓄積ビームヘアプローチする構成になっている [12]。現状すべての jaw は、 $l = 175$  mm、 $g = 10$  mm の線形テーパが用いられている。

ここでは以下の 3 つの低減策を検討する：

1. 線形テーパの jaw を指数テーパに置き換える、
2. 指数テーパ形状の jaw に中空構造を適用する、
3. これに加えて垂直方向コリメータの数を倍増し、非対称な開口設定を採用する。

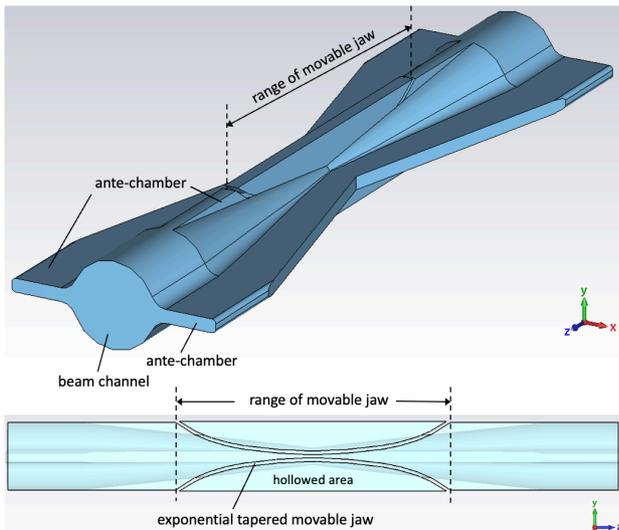


Figure 5: Simulation model of the vertical collimator in the SuperKEKB LER with  $a = 2$  mm.

Figure 6 に、これら低減策を適用した各構造における wake potential を比較している。すべてのモデルで  $a = 2$  mm としている。片側構成では下側の jaw をコリメーションで使用することを想定し、上側の jaw は  $a =$

22 mm まで開いている。Longitudinal wake は全体的に類似した形状を示しているが、指数テーパが最も高いピークを持ち、中空・指数テーパで最も低くなっている。Dipolar wake に対しては、構造の違いによる影響が顕著に現れる。中空構造は振幅を大きく低減させ、特に中空・指数テーパと片側構成の組み合わせが最も小さい。Quadrupolar wake でも同様の傾向が見られ、対称構成における中空・指数テーパで最小の振幅が得られる。

クロスチェックのため、同モデルに対して CST Wakefield Solver [13] を用いた計算も行った。その結果は Fig. 6 中の黒色破線で示しており、GdfidL の結果と良好な一致を示している。

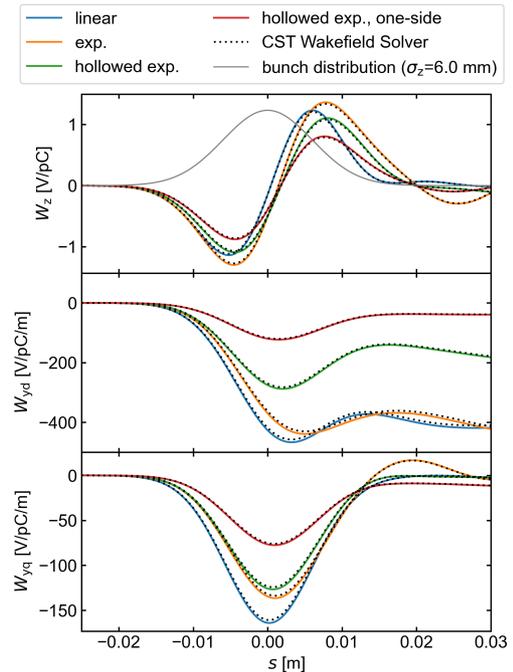


Figure 6: Longitudinal, vertical dipolar, and quadrupolar wake potentials for each geometry in the SuperKEKB LER collimator ( $\sigma_z = 6.0$  mm).

### 4. インピーダンスモデリング

SuperKEKB の主リングにおけるインピーダンスモデリングは過去に行われており、その結果として得られたチューンシフトは実測と良い一致を示している [14, 15]。ここではこれと同様にモデリングを行う。

Table 1 に、衝突点垂直方向ベータ関数  $\beta_y^* = 1.0$  mm のオプティクスにおける 2024 年秋期物理ラン中のコリメータの開口設定例を示す。開口設定値は mm 単位およびビームサイズ  $\sigma_y$  単位で示している。D06V1 は、その小さい開口と大きい  $\beta_y$  により、垂直インピーダンスへの寄与が最も大きい。

D05V1 は、大穂直線部に導入された非線形コリメータ (Non-Linear Collimator, NLC) システムにおける可動コリメータである [16, 17]。このコリメータの機械的構造は他と同様だが、NLC では垂直インピーダンスを低減する目的として強い歪六極マグネットペアを用いた特殊

なオプティクスが組み立てられている。D05V1 における有効開口は、NLC における歪六極マグネットペア (SNAP) の強度と、上流の SNAP から D05V1 までの転送行列の  $R_{34}$  要素に基づいて計算できる [17]。ここでは低減策を D05V1 を除くコリメータに適用している。

最終収束マグネットの QC1RP (内直径 27 mm) は  $\beta_y$  が大きい領域にあり、コリメータを除いて  $\sigma_y$  に対して最も狭い開口になっている [18]。この領域は検出器内に位置するため、バックグラウンドのホットスポットになっている。したがって、コリメータの開口は通常 QC1RP での  $\sigma_y$  より小さい値に設定されている。ここではこの開口設定をもとにインピーダンスをモデリングする。

なお Eq. (2) から、指数テーパは理想的にはコリメータの設定値  $a$  に応じて変化させる必要がある。しかし、実際には jaw の形状を動的に変えることは困難であるため、本モデルでは  $a = 2$  mm で定義された固定の指数形状を持つ jaw を採用し、この構造全体を移動させて開口を変えている。

Table 1: Aperture settings of vertical collimators and the QC1RP beam pipe during the 2024 autumn physics run. Values are given in millimeters and as multiples of  $\sigma_y$ . Kick factors are evaluated for  $\sigma_z = 6.0$  mm.

Name	$\beta_y$ [m]	Aperture [mm]	$\sigma_y$	$\beta_y k_{yd}$ [ $10^{15}$ V/C]
QC1RP	764.0	$\pm 13.5$	69.1	4.66
D02V1	11.9	$\pm 1.2$	49.2	7.41
D06V1	67.4	$\pm 2.2$	37.9	16.17
D06V2	20.6	$\pm 3.0$	93.5	3.18
D05V1	4.05	$-2.5$	34.4	0.76

片側構成・中空指数テーパ採用のシナリオでは、各既存コリメータ (D05V1 を除く) から  $\Delta\phi \sim \pi$  の位置に、同一形状の第 2 コリメータを追加設置すると想定している。追加コリメータの開口はその場所での  $\beta_y$  の平方根に応じてスケールし、wake potential についてもこれに対応する  $\beta_y$  で重み付けしている。

## 5. 単バンチ不安定性シミュレーション

前節までで評価した wake potential の結果を取り込み、PyHEADTAIL を用いてトラッキングシミュレーションを行った。縦方向には Coherent Synchrotron Radiation (CSR) 等を含む monopolar wake、横方向には dipolar および quadrupolar wake の両方を入力している ( $\sigma_z = 0.5$  mm)。

Table 2 に、 $\beta_y^* = 1.0$  mm での主要なマシンパラメータを示す。Chromaticity は測定値に基づき、その他のパラメータは加速器モデルに基づいている。各シミュレーションでは  $10^6$  個のマクロ粒子を 25,000 ターンまで追跡した。横方向の bunch-by-bunch feedback システムも有効にしておき、減衰時間は 100 ターン (1 ms) としている [19]。

Table 2: Main machine parameters used for PyHEADTAIL simulations with  $\beta_y^* = 1.0$  mm optics. Damping times  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ , and  $\tau_z$  correspond to the horizontal, vertical, and longitudinal directions, respectively. The average  $\beta_y$  excludes the high- $\beta_y$  region near the interaction region.

Circumference [m]	3016.3
Beam energy [GeV]	4
RF voltage [MV]	9.12
Energy loss per turn [MV]	1.52
Harmonic number	5120
Bunch length at 0 mA [mm]	4.54
Synchrotron tune	0.0233
Momentum compaction factor	$2.98 \times 10^{-4}$
Energy spread at 0 mA	$7.52 \times 10^{-4}$
Vertical chromaticity	1.53
Average $\beta_y$ [m]	19.1
Damping times $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ [ms]	53.0 / 53.0 / 26.5

### 5.1 縦方向

Figure 7 に、各低減策におけるバンチ長  $\sigma_z$  およびエネルギー拡がり  $\sigma_\delta$  のバンチ電流に対する変化を示す。線形テーパ (図中で 2024c physics run と表示) と比較して、指数テーパは longitudinal wake が大きいため、わずかにバンチ長が大きい。片側構成・中空指数テーパでは、コリメータの設置数が倍増しているためバンチ長の増加が最も大きい。

エネルギー拡がりは、いずれの場合でも約 1.3 mA を超えると急激に増加し、microwave instability の閾値がこの付近にあることを示しているが、各方策による違いはほとんどない。これは文献 [14] でも述べている通り、この不安定性には CSR が支配的なためである。

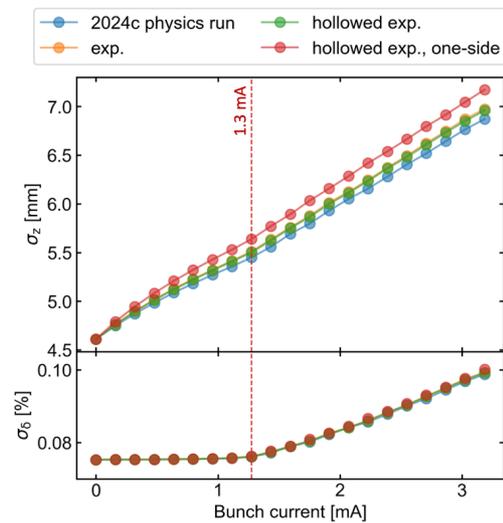


Figure 7: Bunch length  $\sigma_z$  and energy spread  $\sigma_\delta$  as a function of bunch current for each mitigation scenario.

## 5.2 垂直方向

Figure 8 に、バンチ電流に対する垂直方向ベータatron チューンの実部を示す。ここでは代表して (a) 2024 年秋期の物理運転、(b) 片側構成・中空指数テーパ採用シナリオについての結果を示している。TMCI の閾値は (a) 約 1.3 mA、(b) 約 2.2 mA であり、この低減策による不安定性の緩和効果が大いことがわかる。

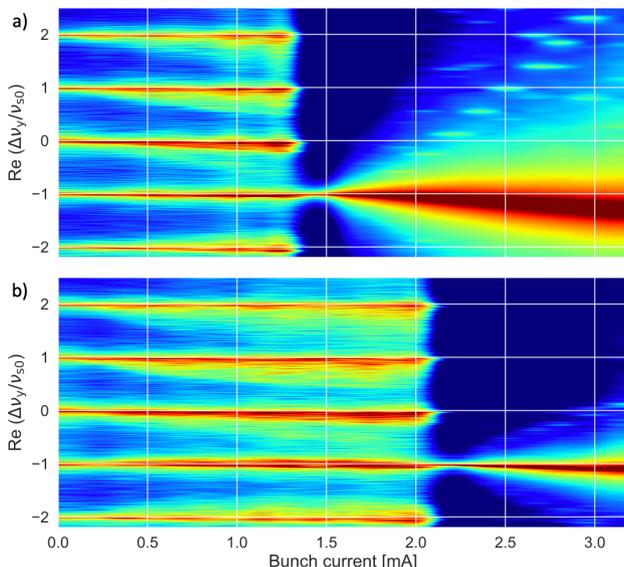


Figure 8: Real part of vertical coherent mode frequency versus bunch current: (a) 2024 physics run, (b) hollowed exponential taper with one-sided layout.

リングにおける、 $\beta_y$  で重み付けした dipolar kick factor ( $\sum_i \beta_{y,i} k_{yd,i}$ ) と、各低減策に対応した TMCI 閾値を Fig. 9 に示す。積み上げ棒グラフは、寄与を垂直方向コリメータ、Interaction Region (IR)、その他の構成要素で分類している。ここで変化があるのは垂直方向コリメータのみのため、IR およびその他の構成要素は不変である。

2024 年秋期物理運転では  $4.57 \times 10^{16}$  V/C 相当であった。これを指数テーパに置き換えると  $4.29 \times 10^{16}$  V/C に、さらに中空構造を適用すると  $3.44 \times 10^{16}$  V/C に減少する。NLC の導入により最大で  $1 \times 10^{16}$  V/C 程度低減可能であるが [15]、中空指数テーパの採用はそれを上回る効果を示している。

中空指数テーパを片側構成で適用するとさらに  $3.06 \times 10^{16}$  V/C まで減少し、TMCI 閾値の向上に有効であることがわかる。

## 6. まとめ

コリメータの幾何構造がウェイク場に与える影響を簡易モデルで評価し、それを元に TMCI 閾値を引き上げるための 3 つの方策を提案し、SuperKEKB LER を事例としてその有効性をシミュレーションにより確認した。

これら方策の中では中空指数テーパ構造、特に片側構成と組み合わせた場合が最も効果的であった。この構成では、NLC を上回る  $\sum_i \beta_{y,i} k_{yd,i}$  の低減効果が得ら

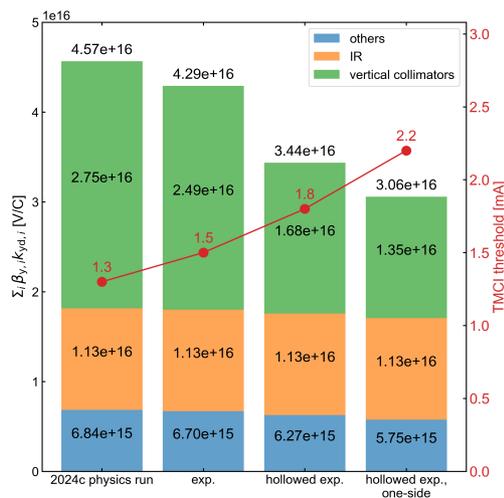


Figure 9: Total  $\beta_y$ -weighted dipolar kick factor at  $\sigma_z = 6.0$  mm and corresponding TMCI threshold obtained by PyHEADTAIL for each mitigation strategy.

れた。

しかし、これらの方策を実際に導入するにはいくつかの実用的な課題を解決する必要があるだろう。中空構造は dipolar kick factor を効果的に低減するが、通常的设计に比べて jaw の機械的強度が低下し、先端部付近の熱変位が増加する可能性がある。さらに熱負荷を取り除くための冷却構造を組み込む必要もある。ここでは中空構造の寸法がウェイク場に与える影響を詳細に検討していないが、実際にはこのような機械的制約により寸法の自由度は限られるだろう。また、中空構造を加えると jaw とチャンバーの間に空間が形成され、この領域で放電などの副次的な現象が起きる可能性もある。

片側構成は緩和効果が大い一方で、設置スペースに関して課題がある。ここでのシナリオはあくまで概念的なものであり、既存リングにこの方策を導入するにはオプティクスや周辺機器の再調整、再配置が必要となるだろう。また、コリメータによる粒子遮蔽がリング内のより広範囲に分散することになるため、検出器バックグラウンドへの影響も評価する必要があるだろう。

ただし、片側構成を採用した場合、未使用の jaw を予備として運用できるため、冗長性の観点でメリットがある。両側構成で設定開口が数 mm と狭い場合、ビームロスにより片側の jaw へビームが突入すると、その材料が対向する jaw へ飛散・溶着してしまう。この場合、どちらの jaw もバックグラウンド低減能力が劣化してしまうことがある [20]。片側構成ではこのようなリスクを回避することができ、特にアンペア級の大電流ビーム蓄積運転においてはより堅牢なコリメーションシステムになり得る。

ここではコリメータ形状がウェイク場に及ぼす影響について主に GdfidL を用いて計算を行ったが、今後は ECHO3D [21] などでも検証を行なっていく予定である。また、現状シミュレーションによる検証が先行しているため、並行して理論面からも検証を試みていく予定である。

## 参考文献

- [1] A. Burov and V. Danilov, "Suppression of Transverse Bunch Instabilities by Asymmetries in the Chamber Geometry", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, p. 2286, 1999. doi:10.1103/PhysRevLett.82.2286
- [2] A. Blednykh, G. Bassi and V. Smaluk, "Impedance modeling and its application to the analysis of the collective effects", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 24, p. 104801, 2021. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.24.104801
- [3] Y. Zhang *et al.*, "Combined phenomenon of transverse impedance and beam-beam interaction with large Piwinski angle", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, p. 064401, 2023. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.26.064401
- [4] D. Zhou *et al.*, "Simulations and experimental results of beam-beam effects in SuperKEKB", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, p. 071001, 2023. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.26.071001
- [5] K. Ohmi and Y. Zhang, "Effects of space charge force on the beam-beam mode coupling instability", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 27, p. 101001, 2024. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.27.101001
- [6] The GdfidL Electromagnetic Field Simulator, <http://www.gdfidl.de/>
- [7] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, p. 03A011, 2013. doi:10.1093/ptep/pts083
- [8] A. Oeftiger, "An overview of PyHEADTAIL", CERN-ACC-NOTE-2019-0013. <http://cds-lb.cern.ch/record/2672381/files/CERN-ACC-NOTE-2019-0013.pdf>
- [9] K. Yokoya, "Impedance of Slowly Tapered Structures", CERN SL/90-88 (AP), 1990. <https://cds.cern.ch/record/210347/files/CM-P00061004.pdf>
- [10] Y. Suetsugu *et al.*, "Latest movable mask system for KEKB", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 513, p. 465, 2003. doi:10.1016/j.nima.2003.06.003
- [11] S. DeBarger *et al.*, "The PEP-II Movable Collimators", SLAC-PUB-11752.
- [12] T. Ishibashi *et al.*, "Movable collimator system for SuperKEKB", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 23, p. 053501, 2020. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.053501
- [13] CST Studio Suite, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [14] T. Ishibashi *et al.*, "Impedance modelling and single-bunch collective instability simulations for the SuperKEKB main rings", *JINST*, vol. 19, p. P02013, 2024. doi:10.1088/1748-0221/19/02/P02013
- [15] T. Ishibashi, "Impedance budget and single-bunch collective effects in the SuperKEKB low energy ring with a new collimation system after the first long-term shutdown", in *Proc. eeFACT2025*, Tsukuba, Japan, Mar. 2025, to be published.
- [16] A. Morita, "NLC (What NLC is.)", The 26th KEKB Accelerator Review Committee, Dec. 13–14, 2022. <https://www-kekb.kek.jp/MAC/2022/>
- [17] S. Terui *et al.*, "Collimator challenges at SuperKEKB and their countermeasures using nonlinear collimator", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 27, p. 081001, 2024. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.27.081001
- [18] N. Ohuchi *et al.*, "SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 1021, p. 165930, 2022. doi:10.1016/j.nima.2021.165930
- [19] M. Tobiyama, J. W. Flanagan and A. Drago, "BUNCH BY BUNCH FEEDBACK SYSTEMS FOR SUPERKEKB RINGS", in *Proc. PASJ2016*, Chiba, Japan, Aug. 2016, p. 144, 2016. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOM/TUOM06.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOM/TUOM06.pdf)
- [20] S. Terui *et al.*, "REPORT ON COLLIMATOR DAMAGED EVENT IN SuperKEKB", in *Proc. IPAC2021*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, p. 3541, 2021. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB359
- [21] ECHO4D, <https://echo4d.de>