

SuperKEKB 陽電子リング用コリメータの設計

DESIGN OF COLLIMATOR FOR SUPERKEKB POSITRON RING

石橋拓弥^{#, A)}, 末次祐介^{A)}, 照井真司^{A)}

Takuya Ishibashi^{#, A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Shinji Terui^{A)}

^{A)} KEK Accelerator Laboratory

Abstract

SuperKEKB, which is an upgrade project of KEKB, is an electron-positron collider with extremely high luminosity. Collimators (movable masks) for Low Energy Ring (LER) of SuperKEKB have been designed to fit an antechamber scheme of the vacuum system and will be operated to improve backgrounds in the particle detector named Belle II. We're developing two types of collimators; a horizontal and vertical collimator. The collimator has a pair of horizontally or vertically opposed movable jaws with RF fingers. Each jaw travels independently through 5-25 mm horizontally or 2-12 mm vertically in a distance between the beam axis and the tip of the jaw. The LER will operate with high currents of short positron bunches, therefore it's important to estimate the impedance of the collimators. In this paper, the latest design and the results of the impedance calculations are presented.

1. はじめに

KEKB は電子リング(HER: High Energy Ring, エネルギー: 8 GeV)と陽電子リング(LER: Low Energy Ring, エネルギー: 3.5 GeV)のダブルリングコライダーである。蓄積電流は 1.19 A(HER), 1.64 A(LER)、衝突点における垂直方向ベータ関数は両リングともに 5.9 mm、ピークルミノシティの最高記録は $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。ルミノシティのさらなる増強のため、2010 年 6 月 30 日から KEKB は運転が停止している。

この KEKB のアップグレード計画は SuperKEKB と呼ばれており、目標ピークルミノシティは KEKB の約 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。この目標値を達成するため SuperKEKB では蓄積電流を 2.6 A(HER)、3.6 A(LER)、衝突点における垂直方向ベータ関数を 0.30 mm(HER)、0.27 mm(LER)にすることを目標している。またビームエネルギーはそれぞれ 7 GeV(HER)と 4 GeV(LER)に変更される。このアップグレードに対応するため、ビームパイプの基本デザインにはアンテチェンバースキームが採られており、真空システムは現在も大規模な改造作業が行われている。SuperKEKB のコミッショニングは 2014 年秋頃から開始される予定である。

コリメータ(可動マスク)はビーム軌道近くのハローを削る装置で、素粒子検出器(Belle II)のバックグラウンドを低減するために使用される。また各加速器コンポーネントを周回ビームから防護する目的でも使用される。コリメータには周回ビームに垂直または水平方向からアプローチするものを用意する。

SuperKEKB のコミッショニング開始時(Phase I)におけるコリメータのロケーションを図 1 に示す。Phase I の段階ではコリメータはリングのアーチ部のみ設置する。HER では KEKB で使用していた合計 16 台(うち水平方向 8 台、垂直方向 8 台)のコリメータを再利用する[1]。LER ではアンテチェンバースキームに対応した新型のコリメータを開発しており、コミッショニング開始までに水平方向のコリ

メータを 2 台インストールする予定である。また最終収束系(QCS)と Belle II(VXD なし)がインストールされる Phase II までに、LER には水平方向 10 台、垂直方向 3 台、合計 13 台のコリメータをインストールする予定である。本年会では SuperKEKB 用コリメータの構造、インピーダンス計算の結果等について報告する。

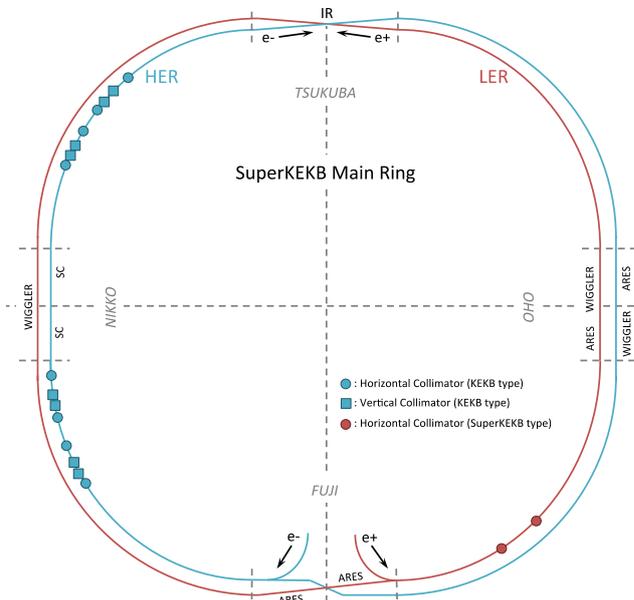
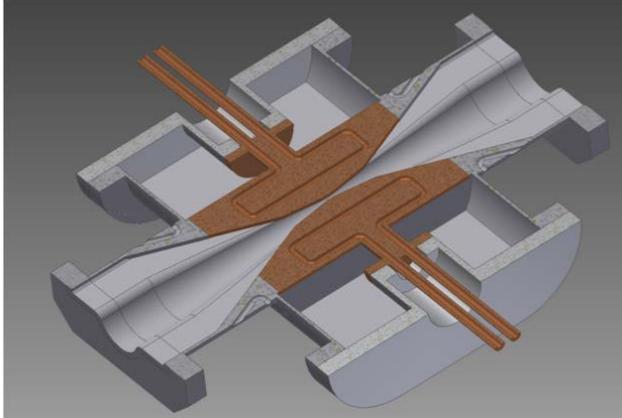


Figure 1: Collimator Locations in Phase I

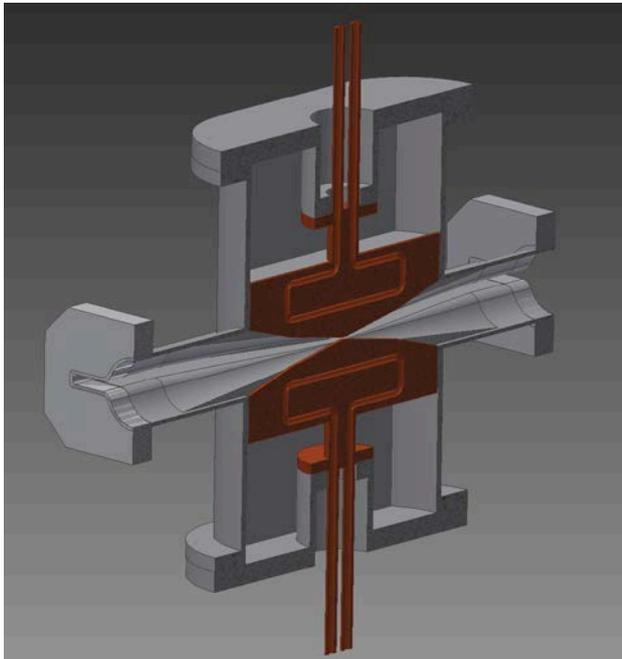
2. 構造

SuperKEKB 用コリメータの概略を図 2 に示す。可視性のため図中で可動ヘッド部分を茶色、チェンバー部分を灰色で描画している。コリメータチェンバーの断面形状は SuperKEKB の標準的なアンテチェンバー付きビームパイプと同一にしている。チェンバーとヘッドの材質は主に銅で、ビームパイ

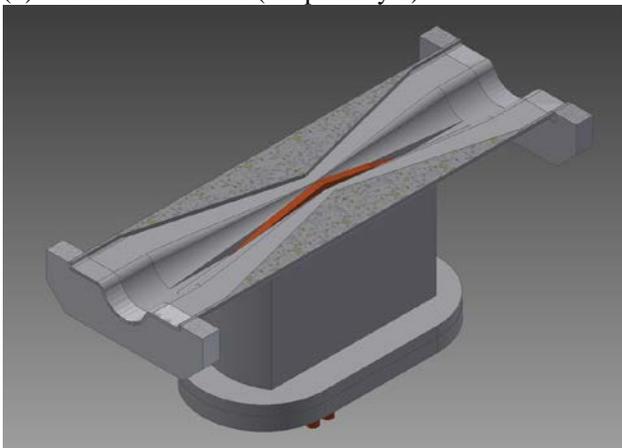
ブ部フランジ(MO フランジ)はクロム銅、ヘッド部フランジはステンレスで製作されている。真空シール材にヘリコフレックスを使用する。



(a) Horizontal Collimator (cut plane: z-x)



(b) Vertical Collimator (cut plane: y-z).



(c) Vertical Collimator (cut plane: z-x)

Figure 2: Schematic drawings of SuperKEKB type collimator The x-, y- and z-axis refer to horizontal, vertical and beam axis, respectively.

コリメータには水平方向もしくは垂直方向両サイドから可動ヘッドがビームへアプローチする 2 種類のものを用意する。ビームパイプ中心軸とヘッド先端間の距離は水平方向で 5-25 mm、垂直方向で 2-12 mm 程度の範囲で使用することを想定している。ヘッドの寸法は長さ 360 mm、厚さ 12 mm で、ヘッドが損傷した場合にはこれを新しいものに交換できる構造になっている。ビームによるヘッドの損傷を避けるため、ヘッドの先端部には融点の高いタングステンを使用する。タングステンは高い電気・熱伝導性を有しており、銅との接合性が良く、入手も容易である。タングステンは Hot Isostatic Press(HIP)処理により銅製ヘッドと接合する。また重金属であるタングステンの放射長(Radiation Length)は約 3.5 cm と短く、これによる遮蔽効果が期待できる。なおヘッド先端のビーム軸方向の長さは放射長の 2 倍以上である 10 mm 採っている。

リングにインストールされている各種コンポーネントの中でコリメータは主要なインピーダンスソースの一つである。インピーダンスを低減するためには一般的に壁がビームにアプローチするスロープを緩やかな角度にするが[2]、これによりコリメータの全長も長くなってしまふ。この問題に対処するため SuperKEKB タイプのコリメータはスロープの一部をアンテチェンバー内に納めることにより、コリメータ全長が約 1 m とコンパクトながらも低いインピーダンスを実現している。また周回ビームは放射光を生成するが、このスロープは放射光のパワー密度を低減する役割もある。例えばコリメータのロケーションに垂直壁があると仮定すると、そこに照射される放射光のパワー密度は 19.3 kW/m となる。本コリメータはスロープの角度が約 23° としており、これによりパワー密度は 7.5 kW/m にまで下がる。これは銅チェンバーで冷却水を使用すれば問題にならない値である。

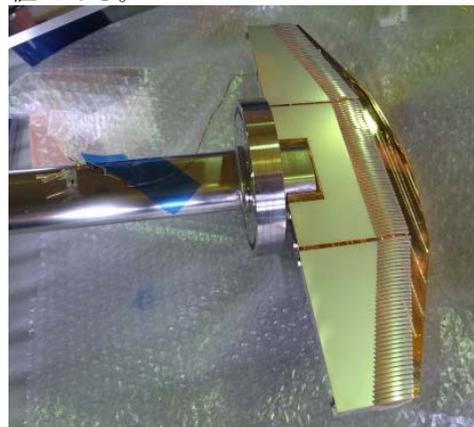


Figure 3: Movable head with RF fingers

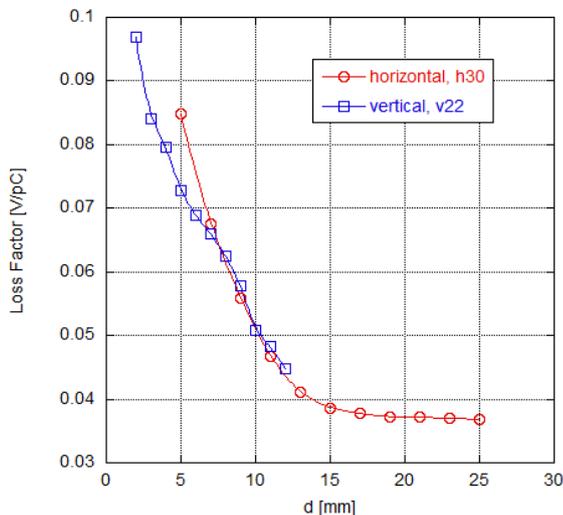
ビームはヘッド近くを通過するため、Higher Order Mode(HOM)が励振される。特に補足モードの励振を避けるため、ビームパイプはテーパ構造にしている。さらに垂直方向のコリメータでは補足モードの励振を避けるため、図 2(c)に示すように水平方向両サイドのアンテチェンバー内もテーパ構造にして

いる。またヘッドの周辺に RF フィンガーを取り付けることにより、ヘッド背後にある空洞構造への HOM の侵入を防ぐ(図 3)。RF フィンガーにはインコネルに銀メッキしたものを使用する予定で、耐久試験のため厚さ 0.1, 0.15, 0.2 mm のものを用意している。

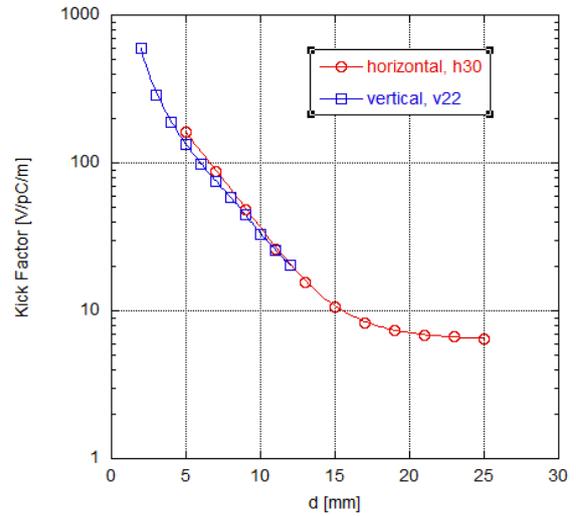
3. インピーダンス評価

コリメータのインピーダンスを評価するため、高周波電磁場シミュレータの GdfidL を使用した[3]。SuperKEKB, LER の設計値であるバンチ長 6 mm でのロスファクターおよびキックファクターを図 4 に示す。横軸 d [mm] はビームパイプ中心軸とヘッド先端間の距離を示している。この計算においてメッシュサイズはビーム進行方向を軸とした長さ 1 m, 半径 d [mm] の範囲を 0.1 mm, それ以外の領域を 0.5 mm にしている。キックファクターを算出するため、通過バンチを中心軸からヘッド方向のへ 1 mm オフセットさせている。ロス・キックファクターとヘッド挿入量の依存性が、特にビームとヘッドが近い領域で非常に大きいことが分かる。ロスファクターに関してはコリメータ 1 台あたり 0.1 V/pC 以下と KEKB タイプの代表的な値、約 0.2 V/pC[4] と比べても小さい。仮に全コリメータのヘッドを想定している最大量まで挿入しても(H: 5 mm, V: 2 mm)合計のロスファクターは約 1.14 V/pC であり、これは RF システムの観点からも問題のない値である[5, 6]。しかし垂直方向はビームに 2 mm まで近づけるため、後述にある通りこの非常に高いキックファクターは Transverse Mode Coupling Instability(TMCI)を誘起する可能性がある。

水平・垂直方向コリメータの縦および横方向インピーダンスを図 5、6 にそれぞれ示す。垂直方向コリメータではアンテナチャンバー内のテーパの高さを 30 mm にしている。ヘッドの挿入量に関わらず、補足モードが励振されていないことが分かる。

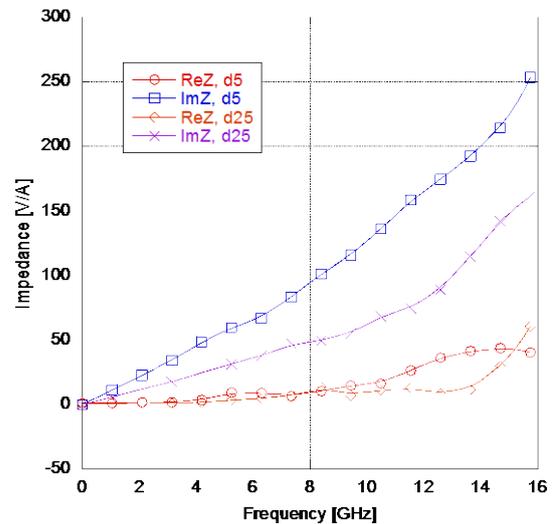


(a) Loss factor

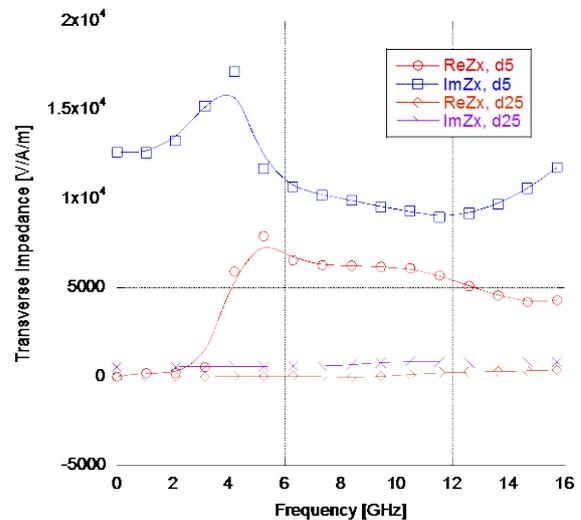


(b) Kick Factor

Figure 4: Loss and kick factors for SuperKEKB type horizontal and vertical collimator

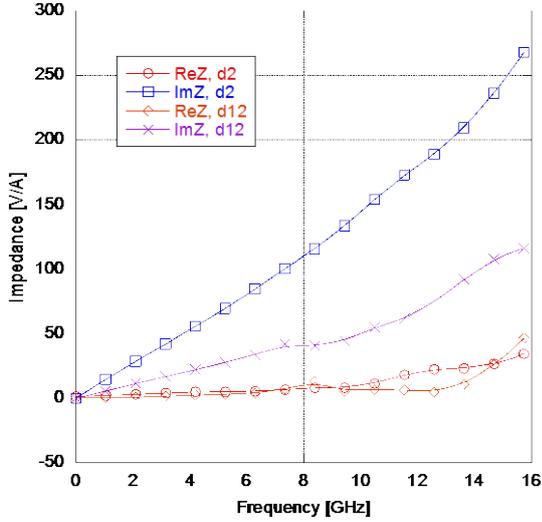


(a) Longitudinal

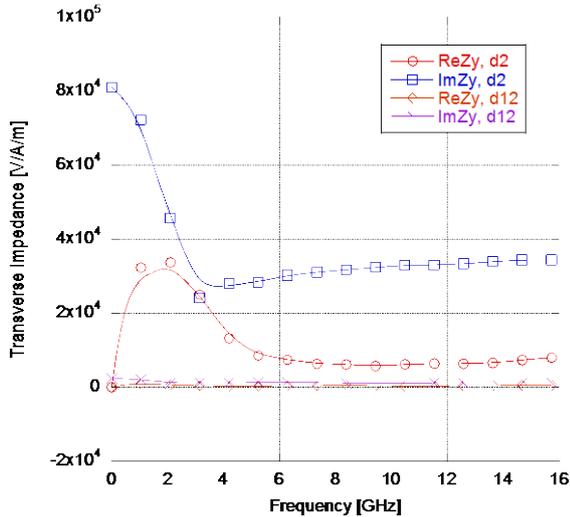


(b) Transverse (x-direction)

Figure 5: Impedance for SuperKEKB type horizontal collimator



(a) Longitudinal



(b) Transverse (y-direction)

Figure 6: Impedance for SuperKEKB type vertical collimator

4. Collective Effects

4.1 Potential Well Distortion

ビーム電流値がゼロにおけるバンチ長はラティスによって決定されるが、ビーム電流値が有限になるとバンチの形状はバンチ自身の井戸型ポテンシャルによって決まる。インピーダンスはこの井戸型ポテンシャルを歪めるため、ビームと真空コンポーネントのカップリングによりバンチ長が変化する (potential well distortion)。Potential well distortion によるバンチ長の変化は次式から得られる[7]。

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}}\right)^3 - \frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} - \frac{\alpha I_b \text{Im}(Z_{\parallel}/n)_{eff}}{\sqrt{2\pi}(E/e)\nu_{s0}^2} \left(\frac{R}{\sigma_{z0}}\right)^3 = 0 \quad (1)$$

ここで σ_{z0} , σ_z : potential well effect 前後のバンチ長、 α : モーメントムコンパクションファクター、 I_b : ビームカレント、 $\text{Im}(Z_{\parallel}/n)_{eff}$: 有効縦方向インピーダンス、 E : ビームエネルギー、 ν_{s0} : シンクロトロンチューン、 R : リングの平均半径である。インピーダンスがインダクティブの場合、 $\text{Im}(Z_{\parallel}/n)_{eff}$ は正になり、バンチ長は長くなる (bunch lengthening)。キャパシティブな場合では逆が起こる (bunch shortening)。コリメータはインダクティブなインピーダンスソースであり、LER では合計 16.3 nH (水平方向コリメータあたり 1.09 nH, 垂直方向コリメータあたり 1.8 nH) である。これより $\sigma_{z0} = 6$ mm のとき、 $\sigma_z = 6.96$ mm が得られる。Potential well effect の詳細を見るため、ビームトラッキングシミュレーションを使った評価を始めている。

4.2 Transverse Mode Coupling Instability

TMCI はバンチ電流を制限する要因の一つで、この不安定性が現れるしきいバンチ電流値は次式で与えられる[8]。

$$I_{thresh} = \frac{C_1 f_s E/e}{\sum_i \beta_i \kappa_{\perp i}(\sigma_z)} \quad (2)$$

ここで f_s : シンクロトロン周波数、 β_i : 各コリメータ位置でのベータ関数、 $\kappa_{\perp i}$: 各コリメータのキックファクター (バンチ長の関数) である。GdfidL により算出した SuperKEKB タイプコリメータのキックファクターを図 7 に示す。バンチ長 6 mm において全てのコリメータを最小アパチャまで閉めると (H: 5 mm, V: 2 mm)、TMC しきい電流値は水平方向: 1.41 mA/bunch, 垂直方向: 0.96 mA/bunch となり、SuperKEKB のバンチ電流値 1.44 mA/bunch を両方向共に超えてしまう。これを実際のコミッショニングで想定しているアパチャにすると、しきい電流値は水平方向: 13.15 mA/bunch, 垂直方向: 1.25 mA/bunch となり、水平方向はクリアするが、垂直方向で制限がかかる状況になる。垂直方向コリメータ 3 台のうちアーク部に 2 台、衝突点前の直線部に 1 台をインストール予定だが、キックファクターは前者が 1 台あたり 44.5 V/pC/m (d: 9 mm), 後者は 591.3 V/pC/m (d: 2 mm) で約 13 倍も大きい値となっている。そのため、衝突点前のコリメータ 1 台がバンチ電流を制限しているとも言える。TMCI についても詳細を見るため、ビームトラッキングシミュレーションによる評価を始めている。

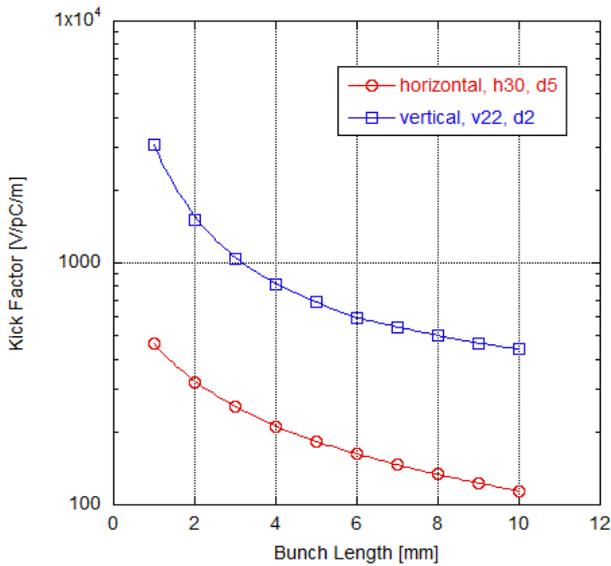


Figure 7: Kick factors with different bunch lengths in minimum apertures of the horizontal and vertical collimator

5. 今後の予定

水平方向コリメータの試作機および駆動機構を製作しており、本年7月に完成した。これまでにリーク試験および真空引きした状態でのヘッドの駆動試験をパスしている。今秋までに長期間駆動試験を実施し、RF フィンガーおよびチェンバーの耐久試験を行う予定である。また S パラメータ等 RF 特性の測定を行う。

謝辞

コリメータを開発する上でご相談等にものっていただいた金澤健一氏、影山達也氏、森田欣之氏、飛山真理氏、福間均氏、竹内保直氏、佐波俊哉氏、大西幸喜氏、中山浩幸氏に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, et al., "Latest movable mask system for KEKB", NIM A, 513 (2003) 465
- [2] I. Zagorodnov, et al., "Wakefield Calculations for 3D collimators", EUROTeV-Report-2006-074
- [3] The GdfidL Electromagnetic Field Simulator, <http://www.gdfidL.de>
- [4] K. Shibata, "ESTIMATION OF IMPEDANCE AND LOSS FACTOR OF SUPER-KEKB POSITRON RING", Proceedings of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010) 442.
- [5] K. Shibata, "Estimation of Impedances & Loss Factors of SuperKEKB LER", The 15th KEKB Accelerator Review Committee (2010).
- [6] K. Akai, "RF Overview", The 15th KEKB Accelerator Review Committee (2010).
- [7] B. Zotter, CERN Report SPS/81-14 (1981).
- [8] "Transverse mode coupling instability(TMCI)", Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd Printing (2009)