

ESTIMATION OF IMPEDANCE AND LOSS FACTOR OF SUPER-KEKB POSITRON RING

Kyo Shibata^{#,A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The loss factor and impedance of various components for SuperKEKB Low Energy Ring (LER) were calculated by GdfidL. The calculated components were bellows, pumping port, connection flange, synchrotron radiation mask (SR mask), movable mask (collimator), groove surface, beam position monitor (BPM) and beam ducts for interaction point (IP ducts), which were newly designed for SuperKEKB. Total loss factor of SuperKEKB LER was about 18 V/pC, and the power loss corresponding to the design beam currents of SuperKEKB LER was about 900 kW. From the results of the impedance calculations, it was found that there was no anxious trapped mode longitudinally. On the other hand, it was also found that the vertical deviation of the beam from the center of the duct can excite TE modes trapped at the crotch of the IP ducts.

SuperKEKB 陽電子リングのインピーダンスとロスファクター評価

1. はじめに

KEKB B ファクトリー加速器 (KEKB) は、電子ビーム (8 GeV) と陽電子ビーム (3.5 GeV) の 2 リング衝突加速器であり、これまで B 中間子崩壊における CP 対称性の破れの検証に大きく貢献してきた。そのピークルミノシティの最高値は $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、積分ルミノシティでは目標値である 1000 fb^{-1} を 2009 年 11 月 29 日に突破した。しかし、新しい物理が重いフレーバーの崩壊にもたらす影響を高い精度で調べるためには、その性能を飛躍的に向上させる必要がある。このルミノシティ増強のための高度化作業を行うために、本年 (2010 年) 6 月 30 日に KEBK の運転は停止された。

KEKB のアップグレード計画は SuperKEKB 計画と呼ばれ、目標とされるルミノシティは KEBK の約 40 倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) である。この高いルミノシティを実現させるために、SuperKEKB 加速器 (SuperKEKB) では蓄積電流を KEBK の約 2 倍、衝突点垂直ベータ関数を約 1/20 にすることを目標としている。蓄積電流の増加に伴い放射光のパワーが大きくなるため、特に陽電子リング (Low Energy Ring, LER) では、アンテチェンバー付きビームダクト^[1]を用いてダクト壁面に当たる放射光のパワー密度を低減させる必要がある。アンテチェンバーには、電子雲不安定性を抑制する、真空コンポーネントのインピーダンスを低減する等の効果も期待されている。

図 1 に KEBK と SuperKEKB のビームダクトの断面形状を示す。両ビームダクトは大きく異なるため、SuperKEKB と KEBK では放射光マスクや排気ポートのデザインも大きく異なる。また、ベローズや接続フランジは、大電流蓄積に耐え得る新型が採用さ

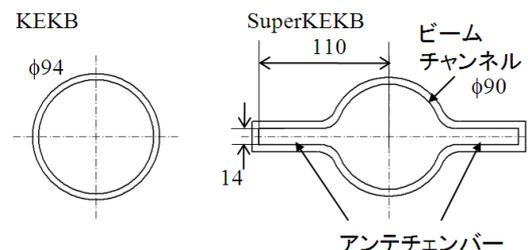


図 1: KEBK と SuperKEKB の陽電子リング用ビームダクトの断面形状

れる予定である。更に、衝突点周辺 (Interaction Region, IR) の設計も変更されるため、IR のビームダクトも新しいものになる。これら新しく採用されるコンポーネントに対して、インピーダンスとロスファクターの計算を行った。以下に各コンポーネントに対する計算結果を紹介する。

2. 計算条件

ロスファクターとインピーダンスの評価は 3 次元電磁場解析コード GdfidL^[2]を用いて行った。3 次元モデル化された各コンポーネントのビームチャンネルの中心にパンチ (ガウス分布、電荷量 1 [C]) を走らせて wake potential を計算し、その結果からロスファクターおよび進行方向インピーダンスを求める。パンチ長は 3~10 mm であり、wake potential は 0.1 m (ロスファクター計算) 又は 5.0 m (インピーダンス計算) まで計算した。典型的な空間メッシュサイズは 0.2 mm であるが、構造上より細かなメッシュが必要な所では最小 0.05 mm まで小さくしている。

[#] kyo.shibata@kek.jp

3. ロスファクターとインピーダンス

3.1 ベロース

SuperKEKB では、大電流蓄積に備えて楕歯型 RF シールド付きベロース^[3] (楕歯型ベロース) が使用される。図 2 に SuperKEKB 用の楕歯型ベロース (右) と KEKB 用の従来型ベロース (左) の GdfidL モデルと写真を示す。従来型ベロースでは、フィンガー型 RF シールドをスライドさせる機構を設けるために、ダクト内側に約 1 mm の段差が必要である。一方、楕歯型ベロースではダクト内面に段差がないため、ロスファクターは小さくなると期待される。

図 3(a)にロスファクターを示す。バンチ長が SuperKEKB の設計値である 6 mm のとき、楕歯型ベロースのロスファクターは 2.2×10^{-3} V/pC であった。LER には約 1000 個のベロースが設置されるため、リング 1 周あたりのロスファクターは約 2.2 V/pC である。図 3(b)に進行方向インピーダンスを示す。従来のベロースでは目立った捕捉モードはなかったが、楕歯型ベロースでは 7.5 GHz および 25 GHz に捕捉モードがあることが分かった。しかし、ベロースの長さによって捕捉モードの共振周波数がずれること、捕捉モードのインピーダンスが比較的小さいこと等を考えると、これらの捕捉モードのビームに対する影響はあまりないと考えられる。

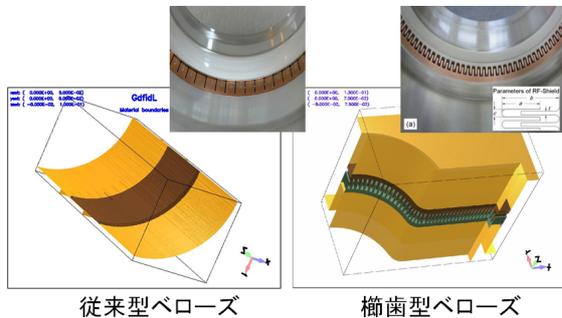


図 2: ベロースチャンバーの GdfidL モデルと写真

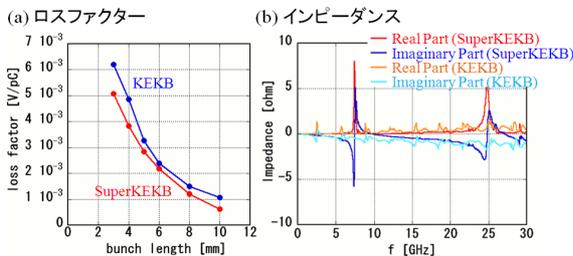


図 3: ベロースのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

3.2 放射光マスク

SuperKEKB では、放射光マスクはアンテナチャンバーの側壁に設けられる。マスクの構造は KEKB のものとほぼ等しいが、SuperKEKB では放射光マ

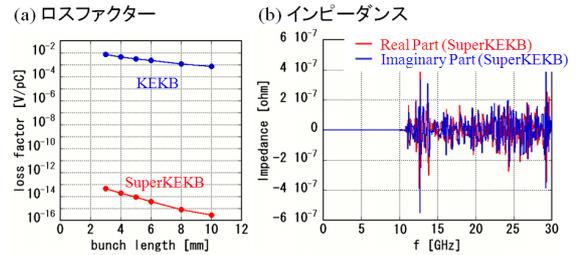


図 4: 放射光マスクのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

スクとビームとの距離が大きくなるため、放射光マスクがビームに及ぼす影響は小さくなる。

図 4 は放射光マスクのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)である。SuperKEKB のロスファクターは KEKB と比べて非常に小さくなっており、バンチ長が 6 mm のとき 1.8×10^{-15} V/pC であった。放射光マスクは 1 リングに約 1000 個配置されるため、リング一周分のロスファクターは約 1.8×10^{-12} V/pC である。これは他のコンポーネントと比較して無視できるほど小さい値である。同様にインピーダンスも非常に小さく、ビームに対する影響はほとんどないと考えられる。

3.3 排気ポート

図 5 に SuperKEKB の排気ポートの GdfidL モデルと写真を示す。SuperKEKB では主ポンプとして非蒸発性ゲッターポンプ (Non-evaporable getter pump, NEG) が使用される。NEG ストリップは放射光の当たらない側のアンテナチャンバー内に置かれ、ビームチャンネルとアンテナチャンバーはスクリーンで隔てられる^[1]。スクリーンには直径 4 mm の穴が多数開けられており、RF シールドの役割も果たしている。スクリーンはアンテナチャンバー内部にあるため、ビームへの影響は小さくなる。今回は全長 0.247 m のモデルを用いて計算を行い、その結果よりリング一周当たりのロスファクターを見積もった。

図 6 にロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)を示す。KEKB と比較するとロスファクターは非常に小さくなっており、バンチ長 6 mm のときリング一周で 4.5×10^{-7} V/pC であった。インピーダンスも非常に小さく、ビームに対する影響はほとんどないと考えられる。

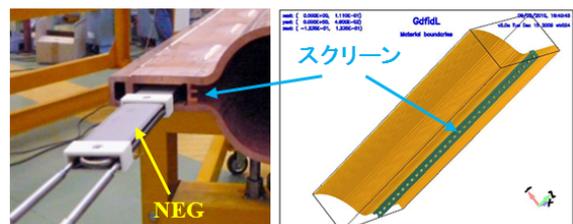


図 5: SuperKEKB の排気ポートの GdfidL モデルと写真

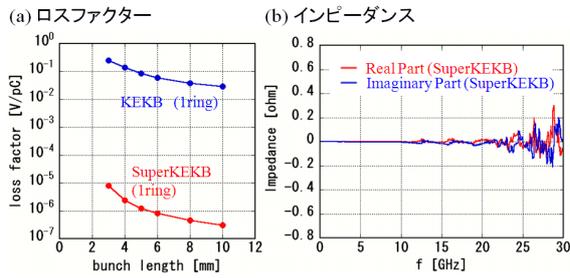


図 6：排気ポートのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

3.4 接続フランジ

KEKB の接続フランジではヘリコフレックスを使用していたが、SuperKEKB では MO フランジ^[4]を使用する。図 7 に MO フランジ接合部の GdfidL モデルと写真、接合部の概略図を示す。MO フランジではダクト内面に 0.2 mm 程度の段差が生じるが、従来の接合フランジよりも段差は小さいため、ビームへの影響の低減が期待される。今回は段差を 0.5 mm として計算を行った。

図 8 にロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)を示す。バンチ長が 6 mm のとき、ロスファクターは 1.4×10^{-5} V/pC であった。リング一周で接続部は約 2000 ヶ所あるため、合計のロスファクターは約 0.03 V/pC となる。インピーダンスも KEKB より小さく、フランジ接続部には捕捉されるモードもないため、ビームに対する影響は小さく抑えられると考えられる。

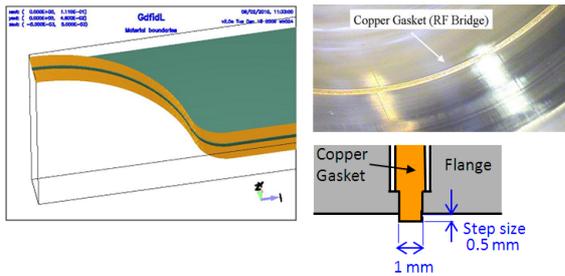


図 7：SuperKEKB 用の MO フランジの GdfidL モデルと接合部内面写真および接合部概略図

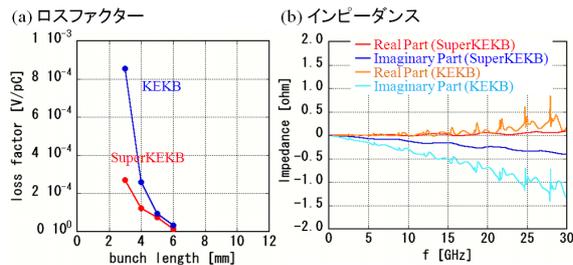


図 8：接合フランジのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

3.5 可動マスク (コリメーター)

SuperKEKB の可動マスクは、少なくとも運転開始当初は、KEKB とほぼ同じデザイン^[5]のものを使用する予定である。図 9 に可動マスクの GdfidL モデルを示す。可動マスク部のビームダクトの断面形状は円形 ($\phi 90$ mm) であるため、可動マスクと通常のビームダクトの変換部には、アンテナチャンバーを徐々に小さくするテーパ部が設けられる。今回の計算では、マスクヘッドとビーム間の距離を KEKB での典型的な値である 10 mm とした。

図 10 は可動マスクのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)である。ロスファクターは KEKB の方が若干大きくなっているが、これは KEKB のビームダクトが直径 94 mm と少しだけ大きいためであると考えられる。バンチ長が 6 mm のときのロスファクターは 2.3×10^{-1} V/pC であり、他のコンポーネントと比較すると非常に大きな値になった。リング一周には 16 台の可動マスクが設置されるため、合計のロスファクターは 3.7 V/pC となる。

一方、インピーダンスの結果より可動マスク部には捕捉されるモードはないことは確認されたが、ビームに対する影響の評価はこれから行われる予定

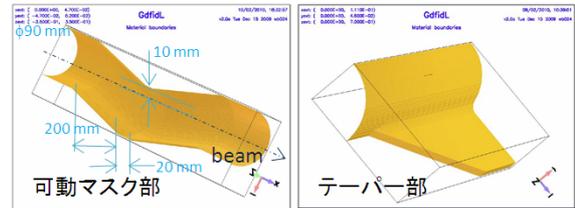


図 9：可動マスクの GdfidL モデル

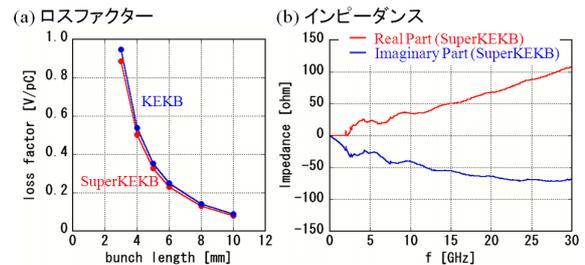


図 10：可動マスクのロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

である。

3.6 抵抗壁 (resistive wall)

SuperKEKB の抵抗壁のロスファクターとインピーダンスの評価は、円形ダクトに対する解析解^[6]

$$\frac{Z''}{L} = \frac{4}{2bc\sqrt{2\pi\sigma/|\omega|} \{1 + \text{sgn}(\omega)\} - ib^2\omega/2}$$

$$W^*(z < 0) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty d\omega \text{Re } Z''(\omega) \cos(\omega z/c)$$

を用いて行った。ここで、 Z'' は進行方向インピーダンス、 L はダクト長、 b はダクト半径、 c は光速、 σ

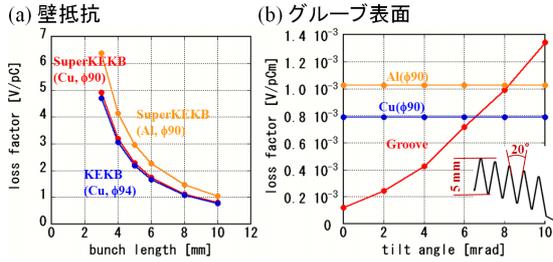


図 11：抵抗壁のロスファクター(a)とグループ表面のロスファクター(b)

はダクト材質の導電率、 ω は角周波数、 W はウェイク関数である。ビームダクトは円形を仮定しており、アンテナチャンバーは考慮されていない。SuperKEKBの場合、ビームダクトの材質はアルミ ($\sigma = 3.2 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$) または銅 ($\sigma = 5.4 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$) である。

図 11(a)にロスファクターの計算結果を示す。パンチ長が 6 mm のとき、リング 1 周あたりのロスファクターはアルミで 2.3 V/pC、銅で 1.7 V/pC であった。

3.7 電子雲低減用グループ表面

SuperKEKB では偏向電磁石内のビームチェンバーには、電子雲低減用グループ表面^[7]が採用される。グループはビームチャンネルの上下面にビーム進行方向に沿って形成されており、深さ、頂角、幅はそれぞれ 5 mm、20°、40 mm である。パンチ長 6 mm のビームがグループ付きダクトに対して傾いて通過したときのロスファクターを図 11(b)に示す。偏向電磁石内でのビームのグループに対する傾きは高々 4~6 mrad と考えられ、その場合のグループ表面のロスファクターは抵抗壁より若干小さい程度であることが分かった。なお、インピーダンス計算やキックファクターの評価は現在進行中である。

3.8 ビーム位置モニタ (BPM)

KEKB では 12 mm あった BPM のボタン電極直径は、SuperKEKB 用の新型 BPM^[8]では 6 mm に縮められる。電極を小さくし、捕捉モードの周波数を上げ、インピーダンスを下げることで、進行方向不安定性を抑制することができる。同様の電極はパンチ毎フィードバックシステム用 BPM (B×B FB BPM) にも使用される。図 12 に BPM の GdfidL モデルを示す。

図 13 にロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)を示す。パンチ長が 6 mm のときの 1 セット (4 電極) あたりのロスファクターは、 $2.3 \times 10^{-4} \text{ V/pC}$ (BPM) と $5.9 \times 10^{-4} \text{ V/pC}$ (B×B FB BPM) であった。SuperKEKB LER にはそれぞれ 440 セット (BPM) と 10 セット (B×B FB BPM) 設置されるため、リング 1 周分のロスファクターは $7.2 \times 10^{-2} \text{ V/pC}$ (BPM) と $5.9 \times 10^{-3} \text{ V/pC}$ (B×B FB BPM) となる。インピーダンスのグラフにはいくつかの捕捉モードが見られるが、この結果を用いて評価した進行方向不安定性の成長時間は放射減衰時間よりも十分長く、特に問題にはならないと考えられる^[8]。

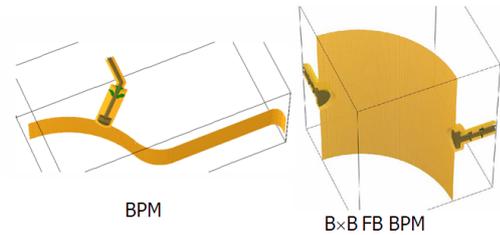


図 12：SuperKEKB 用 BPM の GdfidL モデル

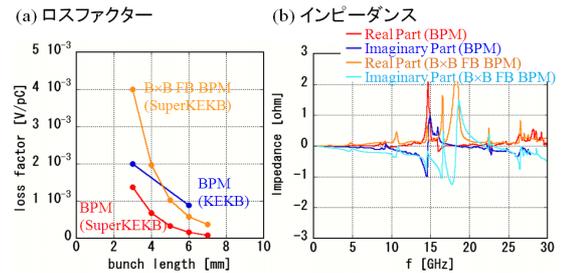


図 13：BPM のロスファクター(a)と進行方向インピーダンス(b)

3.6 衝突点用ビームダクト

衝突点用のビームダクト (IP ダクト) の設計は現在進行中であり、これまでにいくつかのデザインが提案されてきた。ここでは、4 種類の IP ダクトについてのロスファクターとインピーダンスの計算結果を示す。図 14 に 4 種類の IP ダクトを示す。SuperKEKB では、ビームの交差角は 83 mrad であり、ビームはベリリウム製の円形ダクト (衝突部) 内で衝突する。衝突部の両端には Y 字型の二股ダクトが接続されており、この二股部によって IP ダクトは陽電子リングと電子リングに分離される。

Type A は最も単純な構造をしており、衝突部も二股部も $\phi 20 \text{ mm}$ の円形ダクトで構成されている。Type B は、Type A の衝突部ダクト径を $\phi 30 \text{ mm}$ にしてベリリウム部の強化を図ったものである。しかし、これらの構造だと放射光がベリリウムダクトに直撃するため、検出器に悪影響を及ぼしてしまう。そこ

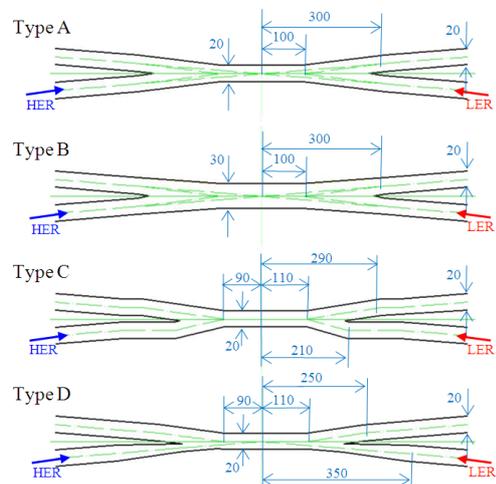


図 14：SuperKEKB 用の IP ダクト

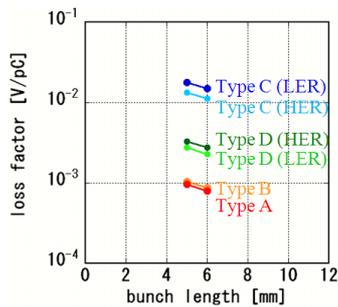


図 15 : SuperKEKB 用の IP ダクトのロスファクター

で、放射光を防ぐために上流側のダクトに角度を付けたものが Type C と Type D である。Type C ではダクト径はφ20 mm のままだが、Type D ではテーパ部を設けて二股部のダクト径を一部で小さくしている。なお、Type C と Type D では電子ビーム (HER) と陽電子ビーム (LER) では wake potential が異なるため、それぞれ別に計算をする必要がある。

図 15 に各 IP ダクトのロスファクターを示す。Type A、Type B と比べると、Type C、Type D ではロスファクターが大きくなっているが、これはダクトの折れ曲がりの影響だと考えられる。また、Type C のロスファクターは Type D よりも大きくなっているが、これは Type D ではダクト交差部で入射側のダクト径が小さくなっているため、発生するウェイク場が抑えられるためだと考えられる。

図 16 に Type A と Type B のインピーダンスを示す。IP ダクトに対しては、進行方向インピーダンス (a) の他に横方向インピーダンス (b) の計算も行った。進行方向インピーダンスでは目立った捕捉モードは確認されなかったが、ビームを垂直方向に 1~2 mm ずらして計算した垂直方向インピーダンスでは、いくつかの捕捉モードが存在していることが分かった。これらのモードがどこに捕捉されているのかを調べるために、GdfidL で IP ダクトの固有モード計算を行った。その結果、二股部に図 16(b) の各ピークに対応する固有モード (TE モード) が存在していることが分かった。一方、ビームを水平方向にずらして得た水平方向インピーダンスのグラフには、目立ったピークは確認されなかった。

図 17 に Type C と Type D のインピーダンスを示す。ビームは LER にのみ走らせている。こちらでも進行方向には目立った捕捉モードは確認されなかった。しかし、垂直方向インピーダンスでは、特に Type C でいくつかのモードが捕捉されているのが確認された。これらのモードがダクトのどの部分に捕捉されているかは、これから確認する予定である。なお、こちらの場合も水平方向インピーダンスのグラフには、目立ったピークは存在していなかった。これら垂直方向の捕捉モードがビームに及ぼす影響については、これから検討を進めていく予定である。

4. まとめ

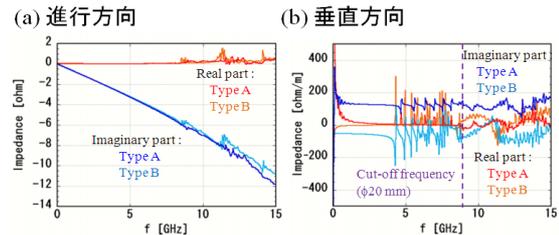


図 16 : IP ダクト (Type A と Type B) の進行方向インピーダンス (a) と垂直方向インピーダンス (b)

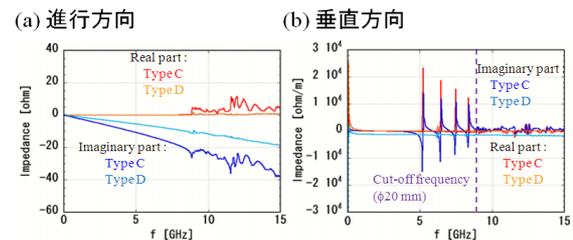


図 17 : IP ダクト (Type C と Type D) の進行方向インピーダンス (a) と垂直方向インピーダンス (b)

今回計算した各種コンポーネントのロスファクターに、KEKB と同じものを使用する予定のフィードバックキッカー (1 台、0.5 V/pC) や加速空洞 (ARES 空洞、18 台、7.83 V/pC) を加えると、全ロスファクターは約 18 V/pC となる。ビーム電流が 3.6 A、パンチ数が 2503、パンチ間隔が 4 ns (それぞれ SuperKEKB の設計値) のとき、損失パワーの合計は約 900 kW である。パワー損失の主な原因は加速空洞であるが、抵抗壁やベローズ、可動マスクがそれに次ぐパワーの損失源である。進行方向インピーダンスの計算結果からは、ビームに大きな影響を及ぼすようなモードはどのコンポーネントにも捕捉されないことが分かった。一方、IP ダクトの二股部には、垂直方向の捕捉モードが存在する恐れがあることも分かった。

今後は、入射部や IR の特殊なダクトや電子雲除去電極等のロスファクターとインピーダンス計算を行う予定である。また、各コンポーネントの横方向インピーダンス計算も行い、横方向のビームのずれによる影響についても検討も行う。

参考文献

- [1] Y.Suetsugu, et al. Vacuum, **84**, 694 (2010)
- [2] GdfidL <http://www.gdfidl.de/>
- [3] Y.Suetsugu, et al. NIN-PR-A, **531**, 367 (2004)
- [4] Y.Suetsugu, et al. J. Vac. Sci. Technol., **A23**, 1721 (2005)
- [5] K.Shibata, et al. Proceedings of PAC'03, Portland, Oregon USA, May 12-16, 800 (2003)
- [6] A.Chao, *Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1993
- [7] Y.Suetsugu, et al. NIM-PR-A, **604**, 449 (2009)
- [8] M.Tobiyama, et al. Proceedings of BIW10, Santa Fe, New Mexico USA, May 2-6, to be published.