

SuperKEKB メインリングのコリメータヘッドの開発

DEVELOPMENT OF COLLIMATOR JAW FOR SUPERKEKB MAIN RING

照井 真司[#], 石橋 拓弥, 末次 祐介, 渡邊 謙

Shinji Terui[#], Takuya Ishibashi, Yusuke Suetsugu, Ken Watanabe

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki,

Abstract

Low-impedance beam collimators for SuperKEKB were designed to fit an antechamber scheme in the vacuum system. They were installed to suppress background noise in the particle detector named Belle II and also to protect various components from the damage due to the hitting of steered beam. Following two horizontal collimators for test in the phase-1 commissioning, four horizontal and two vertical collimators were installed in the phase-2 commissioning. They contributed the steady operations during the commissioning. We report the design process of the collimator jaw to reduce the impedance and at the same time to withstand the high heat load, and also some problems found in the commissioning.

1. 初めに

SuperKEKBはKEKB Bファクトリー(KEKB)の後継機である高ルミノシティ電子・陽電子衝突加速器である。SuperKEKB プロジェクトの目的は、ルミノシティを KEKB 達成値の約 40 倍($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)に増強し、標準理論を越えた新しい物理を探索することである。メインリングは 7 GeV の電子リング(High Energy Ring, HER)と 4 GeV の陽電子リング(Low Energy Ring LER)からなる。設計ビーム電流は、それぞれ 2.6 A、3.6 A で、バンチ長は 6 mm である。2016 年 2 月~6 月には加速器調整を重点とした Phase-1 運転、そして 2018 年 3 月~7 月には衝突調整を重点とした Phase-2 運転が行われた。

コリメータ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。また各種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。ここで使用されるコリメータの特徴は、大電流に耐えられること、低インピーダンスであること、等である。Figure 1(a)に SuperKEKB タイプの水平方向コリメータの断面、(b)に水平方向コリメータ全体、(c)にポートから挿入されたコリメータヘッド、(d)にコリメータ内部を示す。SuperKEKB タイプのコリメータは SLAC の PEP-II を参考に設計された [1]。このコリメータ構造の優れた点の一つは、コリメータヘッドが交換可能なことである。ビームの衝突などが原因で、コリメータヘッドが損傷を受けた場合でも、コリメータ全体を作り直す必要がない。このコリメータの Phase-2 運転時の設置台数は水平方向 6 台、垂直方向 2 台である。このコリメータは、Phase-2 運転時(蓄積最大電流約 860 mA (LER))において、安定なビーム運転に貢献した [2]。一方、いくつかの問題もみつけた。ここでは、コリメータヘッドの設計・製作、Phase-2 運転時の状況、発生した問題について報告する。

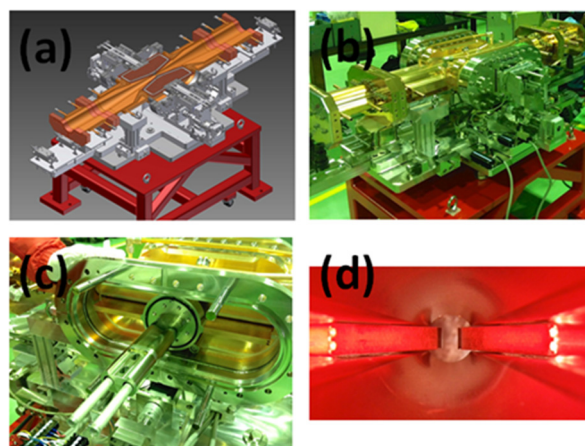


Figure 1: (a) Schematic drawing (cross-sectional view), (b) outside appearance, (c) installed collimator jaw, and (d) inside view of a horizontal-type collimator.

2. コリメータヘッドの材料と構造

SuperKEKB タイプのコリメータヘッドの材料と構造に求められる項目とその理由を以下に記す。

(1) コリメータヘッドのテーパ部には熱伝導が良い材料、コリメータヘッドの先端部分には高い融点を持つ材料が必要である。これは、高いビーム電流からの放射光が水平方向コリメータヘッドのテーパ部に当たるためと、ビームが衝突した際にコリメータヘッドの先端部分ができるだけ融けないようにするためである。放射光からコリメータヘッドが受ける熱量の除去については、4 章で詳細に述べる。

(2) コリメータヘッドの全長はできるだけ短くする。これはコリメータヘッドのみを現地で取り換え可能な大きさにするためである。取り換え時に使用するフランジの関係から約 400 mm 以下とする必要がある。高周波電磁場シミュレータ(GdfidL, Particle studio)を用いてインピーダンスの評価を行い、コリメータヘッドの構造を Fig. 2(a) の

[#]sterui@mail.kek.jp

ように設計した。コリメータヘッドの厚さは、12 mm としている。これは、インピーダンスを減らすことを目的に、コリメータヘッドを幅 14 mm のアンテナチェンバー内に収納できるようにしたためである。

(3) ビームハローを確実に削るために、ビームハローが当たるコリメータヘッドの先端部分は放射長の 2 倍以上の長さを持つ必要がある。(2)の短い構造という条件も満たすためには、放射長の短い材料が候補となる。

以上の項目を満足するために、コリメータヘッドの先端部には、銅に比べ放射長が短く、融点が高く硬いタングステンを採用し、テーパ部には熱伝導が良い銅を採用することにした。タングステンと銅の接合は HIP で行った。接合試験に用いたヘッドを Fig. 2(b) に示す。

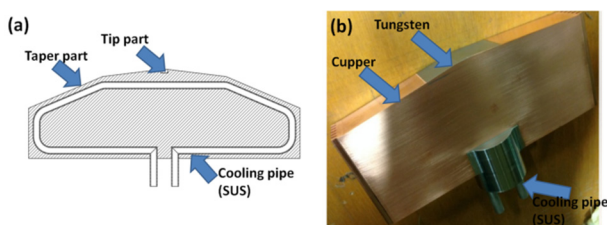


Figure 2: (a) Schematic drawing of horizontal-type collimator jaw (cross-sectional view), and (b) the test model.

3. RFコンタクト

コリメータヘッドを滑らかに出し入れし、また取り換え可能とするためには、コリメータ本体のチェンバーとコリメータヘッドとの間には隙間が必要である。さらに、この隙間での放電や、隙間からの High Order Mode (HOM) の侵入による発熱を防ぐためには、RF コンタクト(フィンガー)が必須となる。ヘッドの位置は、素粒子検出器のバックグラウンドやビームの状況を見ながら頻りに調整されるため、RF フィンガーには高い耐久性、そして摺動時にダストが出ないように高い耐摩耗性が要求される。これは、特に垂直方向コリメータにおいて、発生したダストがビームに当たり、ビームロスを引き起こす可能性があるためである。

ヘッド上下面の RF コンタクトはフィンガーで、材料は KEKB でのベローズでも使用されている銀メッキしたインコネルとした。一方フィンガーが接触する側(接触プレート)の材料は、耐久、耐摩耗性テストを行い決定した。テスト時の動作条件は 100 時間連続運転、ストローク幅 12 mm、速さ 2 mm/sec である。銅、ステンレス等をテストした結果、ダストの発生が最も少なかった、ステンレスにロジウムメッキを行った接触プレートを最終的に採用した。銅と SUS を使ったテスト後のダストの様子を Fig. 3 に示す。

RF フィンガーのコリメータヘッドへの固定は、当初 Fig. 4(a)のようにヘッドの底部で行ったが、RF フィンガーが浮き上がってしまう部分が多く、取り付け時に壊れるという問題が生じた。そのため、Fig. 4(b)のように、ヘッドの一部をざぐった場所に RF フィンガーを取り付け、その上からプレートで押さえることで、RF フィンガーが浮き上がりを防ぐように変更した。

側面の RF コンタクトについては、様々なフィンガー構造を試してみたが、どうしても Fig. 5(a)のようにテスト後に破損してしまった。そこで、フィンガーの代わりに、コリメータヘッド側部とコリメータ本体のチェンバーを加工して、Fig. 5(b)のように楕歯型のコンタクトを採用することにした。

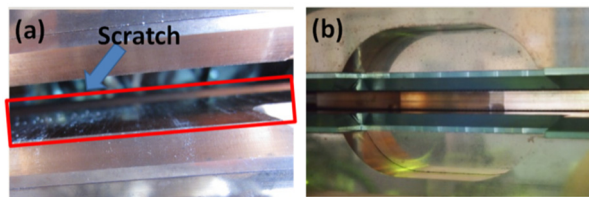


Figure 3: Results of endurance tests for the cases of (a) copper and (b) SUS surfaces.

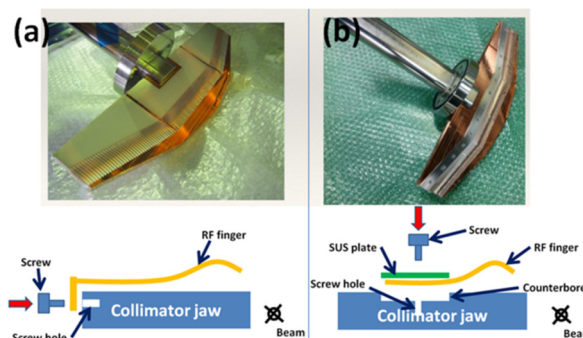


Figure 4: (a) The first and (b) improved fixing methods of RF fingers to the jaw.

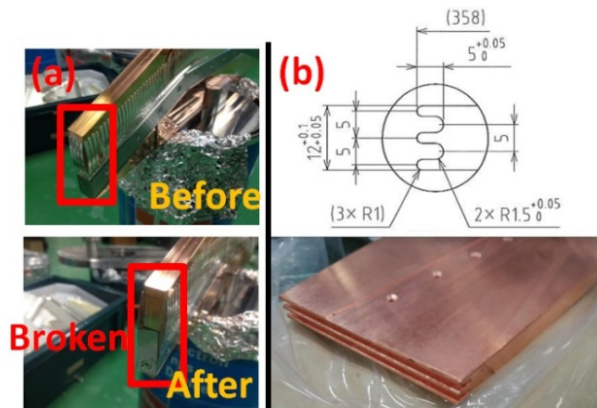


Figure 5: (a) RF fingers for test at the side part of the jaw before and after the endurance test, and (b) the comb-type RF contact adopted instead of RF fingers.

楕歯型では接触部がないのでダストが出ることがなく、破損することもない。

Phase-1 運転終了時に RF フィンガーの健全性を確かめたが、破損はなく、ダストもほとんど見えなかった。Phase-2 運転終了後の確認は残留放射線が少なくなっているから確認する予定である。

4. 放射光の除熱特性と温度計測

水平方向コリメータヘッドのテーパー部分には、放射光が当たってしまうため、冷却水を流して除熱をしなくてはならない。冷却水路は、放射光に当たる面にできるだけ近くした方が冷却効率は上がるので、製作可能な範囲内でヘッドテーパー面に近づけることにした。最大 $23.4\text{W}/\text{mm}^2$ (HER で設計値 2.4 A の時) の入熱がある場合の熱伝導解析を Solid works を用いて行った。解析条件は、物体温度を $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、幅 0.88 mm ・長さ 178 mm にわたり $23.4\text{W}/\text{mm}^2$ の入熱をテーパー部に設定、入側冷却水の温度を $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、入側冷却水の圧力を 0.4 MPa とした解析の結果と熱分布を Table 1 と Fig. 6 に示す。最大温度は $7.5\text{ l}/\text{min}$ の場合でも $200\text{ }^\circ\text{C}$ を超える。コリメータヘッド自体は $300\text{ }^\circ\text{C}$ でも耐えられると予測されているので、 $2.5\text{ l}/\text{min}$ でも問題ない。しかし、出口側の冷却水の温度が $50\text{ }^\circ\text{C}$ を超えるため、同じ冷却水を用いる隣接のビームパイプが温まってしまうという問題がある。また、 $7.5\text{ l}/\text{min}$ 流すと圧力損失が大きく、冷却水が流れなくなってしまう危険性もある。ビーム電流が増えた際には、コリメータヘッド専用のチラー等が必要になるであろう。

運転中の実際の温度を測定するために、一つのコリメータヘッドに熱電対を埋め込んだ。ヘッド面に溝掘って熱電対を埋め込み、上から銅のプレートで蓋をした。運転時に、流した冷却水の流量は $4\sim 5\text{ l}/\text{min}$ である。流量は、冷却水用ポンプの能力と配管長さで制限された。運転時のビーム電流に対する温度の変化を Fig. 7 に示す。温度はビーム電流に対して直線的に上昇していることがわかる。ベース温度を $25\text{ }^\circ\text{C}$ とした場合、温度上昇率は、約 $6.8\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ mA}$ である。ここから、設計電流の 2.4

Table 1: Results of the Thermal Analysis for a Horizontal-type Collimator Jaw

| Flow (l/min) | Temp of measuring point ($^\circ\text{C}$) | Max temp ($^\circ\text{C}$) | Pressure loss (Pa) | Outlet water temp ($^\circ\text{C}$) |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|--|
| 2.5 | 216 | 296 | 2067 | 50.8 |
| 5 | 187 | 258 | 6977 | 40.42 |
| 7.5 | 177 | 245 | 14243 | 36.96 |

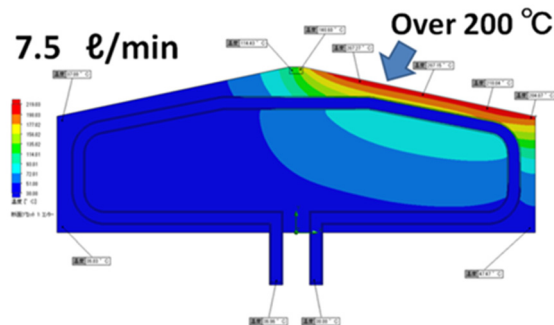


Figure 6: Calculated temperature distribution for a horizontal-type collimator jaw.

A では約 $190\text{ }^\circ\text{C}$ と予想され、シミュレーション結果の $187\text{ }^\circ\text{C}$ と近い値になることがわかる。

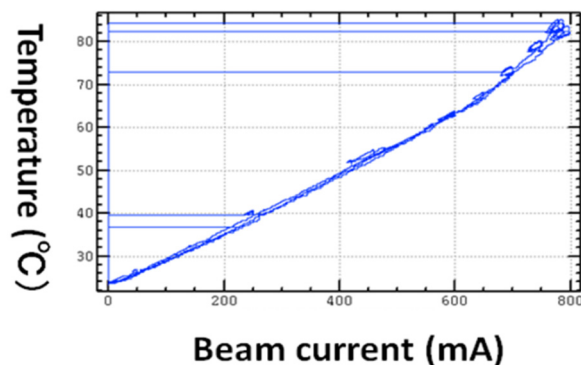


Figure 7: Temperature of a collimator jaw as a function of beam current.

5. キックファクターの計算と測定

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バンチ電流の閾値は(1)式で与えられる[3]。

$$I_{thresh} = \frac{C_1 f_s E/e}{\sum_i \beta_i k_{\perp i}(\sigma_z)} \quad (1)$$

ここで C_1 :定数(~ 8)、 f_s :シンクロトロン周波数、 E/e :ビームエネルギー(eV)、 β_i : 問題となる機器のある場所のベータ関数、 $k_{\perp i}$: そのキックファクター(バンチ長 σ_z の関数)である。SuperKEKB の横方向インピーダンスのほとんどはコリメータからの寄与なので、その評価は非常に重要である。キックファクターの値は、コリメータの設置場所、設置台数、ヘッド部の開口等を検討するための有用な指針となる。GdfidL で計算した垂直方向および水平方向コリメータのキックファクターを Fig. 8 に示す[4]。バンチ長は 6 mm として計算した。横軸 d (mm)はビームパイプ中心軸(ビーム軌道位置)とヘッド先端間の距離である。

ビーム運転中にコリメータヘッド位置を変えて、チューンを測定し、キックファクターの評価を試みた。測定は LER を使い、1 バンチ、ビーム電流約 1 mA で行った。測定結果を Fig. 9 に示す。水平方向コリメータの測定は Phase-1 運転時に 2 台動かし測定した。垂直方向コリメータの測定は Phase-2 運転時に 1 台のみ動かし測定した。縦軸は、測定したチューンから 0 mA のときのチューンを引いて、ビーム電流(mA)で割ったものである。この測定したチューンシフト量からキックファクターを計算した。チューンからキックファクターの変換には、(2)の式を用いた[5]

$$\Delta v_q = -\frac{T_0 I_b}{4\pi E/e} \sum_i \beta_i k_{\perp i} \quad (2)$$

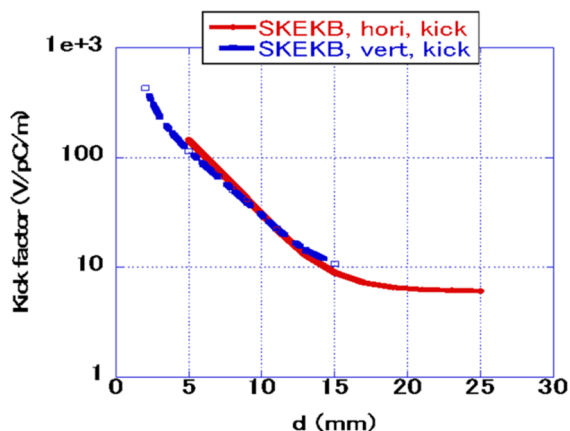


Figure 8: Calculated kick factors for SuperKEKB type horizontal and vertical collimators as a function of d [mm].

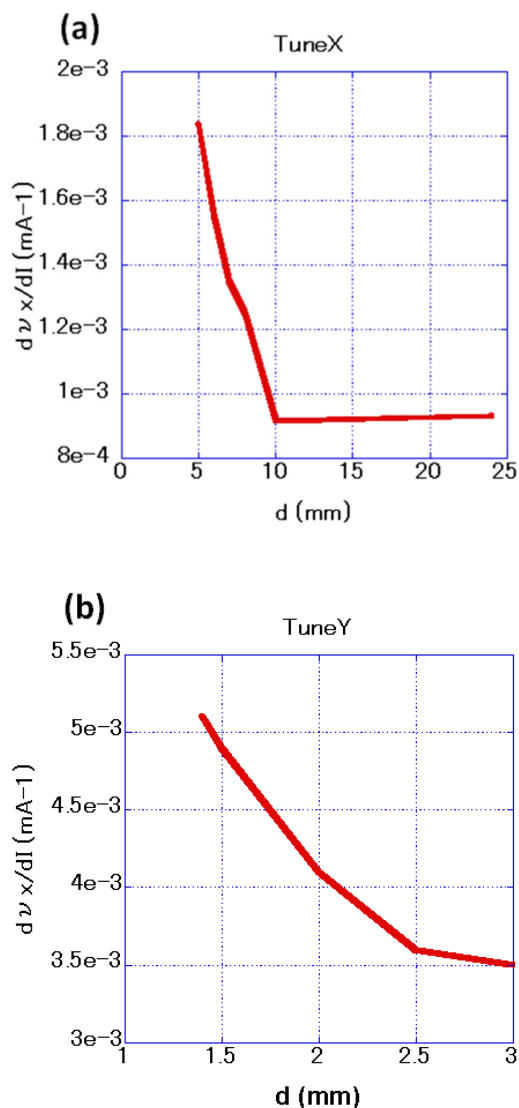


Figure 9: Measured (a) horizontal tune shift ($d\nu_x$) and (b) vertical tune shift ($d\nu_y$) per unit beam current (I [mA]) as a function of td [mm].

ここで v_q : チューン、 T_0 : 周回周波数、 I_b : バンチ電流である。Figure 8 に示す通りに、計算からは水平方向コリメータの d を 25→5 mm にしたときのキックファクターの差分は 139 V/pC/m となり、測定からは 94 V/pC/m (コリメータ 1 台当たり) となった。また、垂直方向コリメータは d を 3→2 mm にしたときのキックファクターの差分は 187 V/pC/m となり、測定からは 140 V/pC/m となった。横方向インピーダンスは、水平・垂直コリメータ共に、測定値は計算値のファクター 1.5 以内に収まり、非常に合っていると考えている。

6. 運転中に発生した問題

運転中に起きた特記すべき問題は 2 つある。1 つ目は、2018 年 6 月 25 日に、LER 垂直方向のコリメータヘッドにビームが衝突して損傷を受けたことである[2]。

コリメータののぞき窓から見た損傷したコリメータヘッドを Fig. 10 に示す。この事象が起きた後から、ビームの入射率が悪くなり、また、検出器でのバックグラウンドも増えた。放射線が強いことと、大気開放が必要なことから、運転中にコリメータヘッドの交換は行わず、1.5~2 mm ほどコリメータ本体を水平方向にシフトすることで、運転を続けた。Figure 11 に、損傷を受けたコリメータ下流にある光ファイバロスモニターのビーム入射中の信号を示す。Figure 11(a) は正常時の、(b) は損傷を受けた直後の信号である。明らかに状況が異なっているのがわかる。Figure 10 の赤丸部分の突起物が原因ではないかと推察

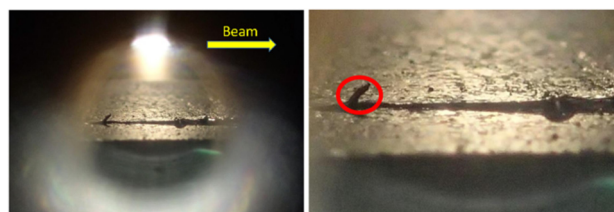


Figure 10: Damaged collimator jaw.

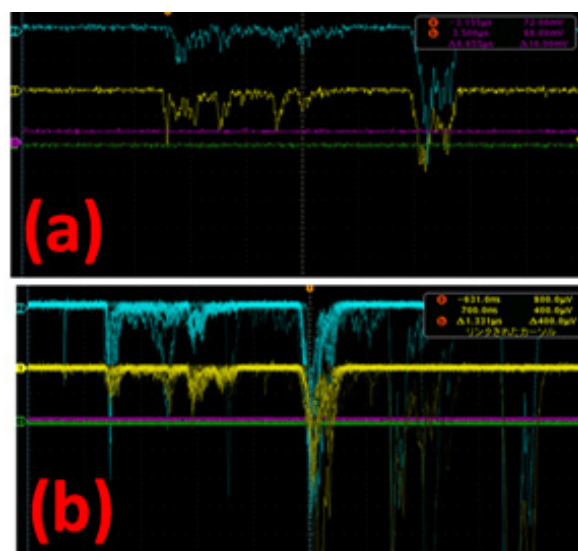


Figure 11: Signals of optical fiber-type loss monitors at the downstream of the collimator (a) before and (b) after its jaw was damaged.

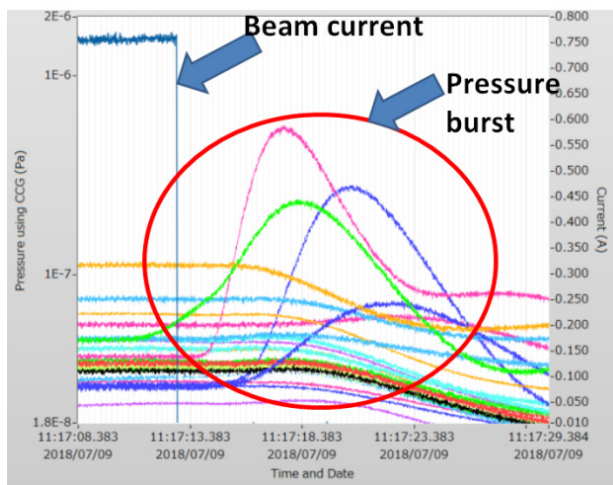


Figure 12: Pressure bursts observed near the collimator when jaw was damaged by the steered beam.

されている。続いて、7月8日にはHER垂直方向のコリメータヘッドにビームが衝突してヘッドが傷ついた。その時のコリメータ近くの圧力とビーム電流の時間変化をFig. 12に示す[6]。ビームが失われた時刻に圧力が跳ねているのがわかる。

2つ目は、LERでの進行方向ビーム不安定性の励起である。2 RF-bucket space/4 train/120 × 4 bunch/300 mAのときに見られた不安定性が、衝突点に一番近いコリメータの d を9.5→13.5 mmにした時に、一部のモードの強度が小さくなった。

Figure 13にその時の振動のモードスペクトラムを示す。横軸にモードナンバー、縦軸に強度をとった。これは、この不安定性にコリメータが関わっている可能性を示唆している。今後詳細な調査を行う予定である。

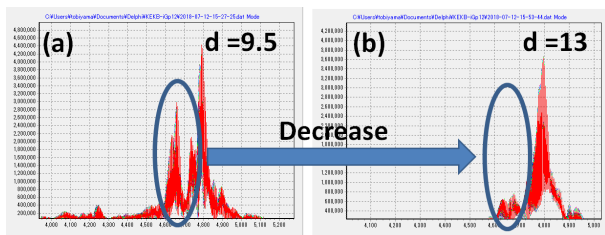


Figure 13: Mode spectrum of the longitudinal beam instability (a) before and (b) after opening the collimator jaw observed in LER in the case of a bunch fill pattern of 2 RF-buckets space.

7. 結論と今後の展望

- 1) 熱伝導・インピーダンス・スペースの問題をクリアしたコリメータヘッドの設計と製作を行った。熱解析・インピーダンスの計算値は、ビームを用いた測定値とよく合っていた。
- 2) RFフィンガーと櫛歯型RFコンタクトの設計と製造を行い、ビーム運転時に健全に働くことを示した。

- 3) Phase-2 運転時にいくつかの問題が見つかった。今後の運転のために対処手段を検討していく

謝辞

コリメータヘッド設計に関して多くの助言、協力を頂いたKEKB 加速器グループの皆様、SuperKEKB コミッショニンググループの皆様へ深謝致します。また、コリメータ製作にあたり、様々な要求・課題に対して真摯に対応して頂いた金属技研株式会社の栗原氏・澤島氏、株式会社ミラプロの森重氏、入江工研株式会社の舘氏・大島氏に、深謝致します。

参考文献

- [1] S. Metcalfe *et al.*, “THE PEP-II Movable Collimators”, SLAC-PUB-11752.
- [2] T. Ishibashi *et al.*, “Development and operational status of Collimators in SuperKEKB Phase-2”, Abstracts of PASJ, Nagaoka Japan, 7-10, Aug. 2018, THP113.
- [3] A. Chao *et al.*, “Handbook of Accelerator Physics and Engineering”, pp. 136.
- [4] T. Ishibashi *et al.*, “DESIGN OF COLLIMATOR FOR SUPERKEKB POSITRON RING”, Proceedings of PASJ, Nagoya, Japan, 3-5 Aug, 2013 pp. 1191-1195.
- [5] T. Ieiri *et al.*, “MEASUREMENT OF WAKE EFFECTS BY MEANS OF TUNE SHIFT IN THE KEKB LOW-ENERGY RING”, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland. 2101-2103.
- [6] T. Ishibashi *et al.*, “Monitoring system for impulsive pressure rising in vacuum system of SuperKEKB main ring”, Abstracts of PASJ, Nagaoka Japan, 7-10, Aug. 2018, WEP118.