

SuperKEKBにおける縦方向結合バンチ不安定性に対する新RFフィードバックの実証試験

VERIFICATION OF NEW RF FEEDBACK FOR LONGITUDINAL COUPLED-BUNCH INSTABILITY IN SUPERKEKB

廣澤航輝、赤井和憲、絵面栄二、小林鉄也、中西功太、吉本伸一

Kouki Hirose*, Kazunori Akai, Eizi Ezura, Tetsuya Kobayashi, Kota Nakanishi, Shin-ich Yoshimoto
at SOKENDAI (The Graduated University for Advanced Studies)
and also at High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In the circular accelerator, coupled bunch instabilities (CBIs) are kinds of the coherent instabilities of collective beam with high current. In order to achieve high luminosity, it is necessary to take measures to suppress them, even for SuperKEKB's RF system designed to have high current resistance, and so we newly developed the instability damper for CBIs. In this paper, we report the result that our new damper worked stably with the actual beam operation, since there is the opportunity to demonstrate the effect of the damper in SuperKEKB Phase-2 commissioning.

1. はじめに

SuperKEKBは世界最高のルミノシティを達成すべくデザインされ、KEKBよりアップグレードされた素粒子実験用の電子陽電子蓄積リングである[1]。エネルギー非対称の電子陽電子にそれぞれリングを持つ二重リングの加速器であり、電子蓄積リングはHigh Energy Ring (HER, 7.07 GeV)、陽電子蓄積リングはLow Energy Ring (LER, 4 GeV)と呼ばれている。陽電子にのみ、LERへの入射前にLinacに挿入する形でダンピングリングを備える。

ルミノシティを向上するための作戦として、SuperKEKBでは大交差角ナノビーム方式と呼ばれる新方式と両ビームの大電流化を採用している。ナノビーム方式は極低エミッタンスのリングと衝突点での極小 β によって、衝突点でのビームサイズを限りなく小さくする方法である。大電流化は純粋に交差粒子数を増やすことで、ルミノシティを増大せんとする方法である。どちらも非常に挑戦的な作戦であり、SuperKEKBでの成功が次の衝突器開発における戦略決定のカギとなるため、世界から注目される実験である。

SuperKEKBは2018年3月から同7月中旬までPhase-2コミッショニングが行われた[2]。Phase-2コミッショニングの主な目的は陽電子ダンピングリングの初稼働と、ビーム初衝突および衝突条件のブラッシュアップであった。どちらも無事成功に終わり、現在は新たに見出されたPhase-3に向けた課題をクリアしていく段階にある。

本研究で扱う縦方向結合バンチ不安定性 (Longitudinal Coupled-Bunch Instabilities : LCBI) のダンパーは、SuperKEKBのデザインに焦点を合わせて新たに開発されたRFフィードバックシステムのコンポーネントである[3]。今まではテーブルトップでの模擬実験のみであったが、実際のビームを用いた稼働試

験をPhase-2コミッショニングにて初めて行った。今回の稼働試験をもって実際に効果が得られるかの実証がなされたことになる。本論文ではPhase-2にて行った新ダンパー稼働試験の結果を報告する。

2. LCBIの励起条件

LCBIsは加速周波数、周回周波数、シンクロトロン周波数の整数倍の和を振動のモードとする不安定性である。Figure 1はその概要を図示したものである。不安定化の原因としては、電流値から直接的に生じるのではなく、ビーム負荷による空洞の最適チューニングの結果、空洞の共振周波数が加速周波数から大きく外れることで生じる。Figure 2に実際のARES空洞の値を用いて振動の励起の原因を図示した。ARES空洞とはRFの貯蔵空洞を加速空洞に接続することで、大電流へのビーム負荷耐性を高めた、KEKB/SuperKEKB独自の空洞である[4]。図に示すように、最適な加速のためにはビーム電流に応じた空洞の共振周波数の離調(最適チューニング)が不可欠となるが、その離調によって生じてしまうのがLCBIsである。図を描く際に用いた空洞縦方向インピーダンス: $Z_{||}$ と空洞デチューン量: Δf_a の式は次の2式(Eq. 1,2)で定義される。

$$Z_{||} = \frac{1}{1 + \beta} \frac{R_{sh}/2}{1 + iQ_L(f/f_{res} - f_{res}/f)} \quad (1)$$

$$\Delta f_a = -\frac{I_0 \sin \phi_s}{2V_c} \frac{R_{sh}}{Q_0} f_{rf} \quad (2)$$

ここで、 β は空洞の結合定数、 R_{sh} はシャントインピーダンス、 $Q_{L(0)}$ は負荷(無負荷)Q値、 f_{res} は共振周波数、 ϕ_s はシンクロナス位相、 V_c は加速電圧、 f_{rf} は加速周波数である。超伝導加速空洞も同じ式に従い、負荷Q値が一桁大きいとはいえ、最適チューニングではARES空洞よりも大きな離調量を持つため、大電流負荷時にLCBIsはより深刻となる。

* hirosawa@post.kek.jp

RF 空洞のチューニングによって生じる不安定性の大きさを表すシンクロトロン振動の growth rate : τ_μ^{-1} は、次の式 (Eq. 3) に従う。

$$\tau_\mu^{-1} = AI_0 \sum_{p=0}^{\infty} \{f_p^{(\mu+)} \text{Re}Z_{\parallel}(f_p^{(\mu+)}) - f_p^{(\mu-)} \text{Re}Z_{\parallel}(f_p^{(\mu-)})\} \quad (3)$$

このそれぞれ対応する周波数 $f_p^{(\mu\pm)}$ は、 $f_p^{(\mu+)} = (pM + \mu)f_0 + f_s$ または $f_p^{(\mu-)} = \{(p+1)M - \mu\}f_0 - f_s$ であり、周回周波数の整数倍の係数を表す μ は一般に $0 \leq \mu \leq h$ の値をとる。ここで、 h はバンチのハーモニック数、 A はビームの運転パラメータに依存する定数係数、 I_0 はビーム電流値、 f_s , f_0 はそれぞれシンクロトロン周波数と周回周波数である。

Figure 3 にこの growth rate の $\mu = -1, -2, -3, -4$ モードの場合を HER/LER それぞれの場合で示した。横軸が電流値 [A]、縦軸が growth rate [s⁻¹] である。計算時のパラメータは SuperKEKB のデザインパラメータ (Table 1) を使用し、閾値はシンクロトロン放射減衰による減衰率を用いた (横線)。図に示すように SuperKEKB の目標となるルミノシティ: 8.0×10^{35} [cm⁻²s⁻¹] を実現するためには、少なくとも $\mu = -1, -2$ モードへの対策が必須である。しかし KEKB にて用いられていた従来の LCBI ダンパーは $\mu = -1$ モードにのみ対応しており、 $\mu = -2$ モードを抑制できない [5]。そこで我々は SuperKEKB 用の LCBI ダンパーを新たに開発し、フィルタ特性の向上を行った。

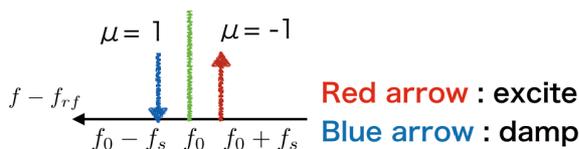


Figure 1: Frequency Positions of LCBIs to excite and to damp.

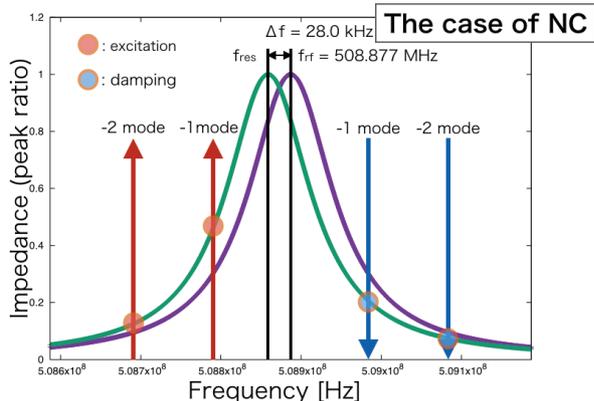


Figure 2: The illustration of cavity impedance and LCBIs.

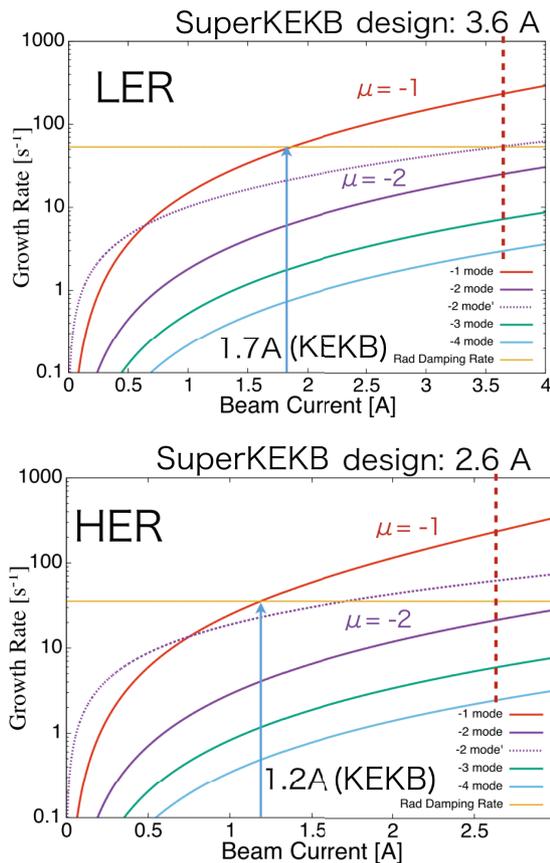


Figure 3: Growth rate by beam current. Dotted curve indicates $\mu = -2$ mode in the case of a cavity parked with 150-kHz detuning.

Table 1: SuperKEKB and Cavity Parameters

parameters	value	
for SuperKEKB	LER	HER
Energy : E	4.0 GeV	7.0 GeV
Beam current : I_0	3.6 A	2.62 A
Mom. compact. : α_c	3.25×10^{-4}	4.55×10^{-4}
Synch. freq. : f_s	2.43 kHz	2.78 kHz
Harm. number : h	5120	
RF frequency : f_{rf}	508.877 MHz	
$f_0 = f_{rf}/h$	99.39 kHz	
Number of cavity	22	ARES 8, SC 8
for Cavity	ARES	SC
V_c / cavity	0.5 MV	1.5 MV
R_s/Q_0	15 Ω	93 Ω
Q_0	1.1×10^5	2.0×10^9
coupling factor : β	5.0	4.0×10^4

3. LCBI ダンパーとシステムの構成

SuperKEKB のバンチドビームは縦方向の運動として、508.877 MHz の RF 場に加速され、2.5 kHz のシンクロトロン周波数と 99.39 kHz の周回周波数を持つ。不安定性の強さはウェイク場の減衰率とイン

ピーダンスによって決まり、特にこの3つの周波数の整数倍の和の中で、空洞の共振周波数近傍が最もインピーダンスが高い。加速周波数におけるインピーダンスは加速電圧に直結するため、影響を与えないように、その近傍の周波数にのみ手を加える必要がある。

このLCBIsの周波数は既知であり、さらに離散的に点在する。そこで、LCBIsダンパーはモードフィードバックと呼ばれる、指定した周波数のみフィードバックする方法をとる。ピックアップ信号をLLRF制御系 [6] に戻し、通常の加速信号に乗せて送るため、RFフィードバックの一種である。具体的には不安定性の励起作用を与える周波数 (Eq. 3 $f_p^{\mu+}$) のウェイク場のみをフィードバックで打ち消す方法をとる。Figure 4にそのフィードバックの模式図を示した。空洞ピックアップでは、加速電場のゲインが強すぎるために、対象の周波数に対して十分なゲインが与えられなかった。そのため、信号はビームピックアップ信号を用いてフィードバックシステムを構築している。

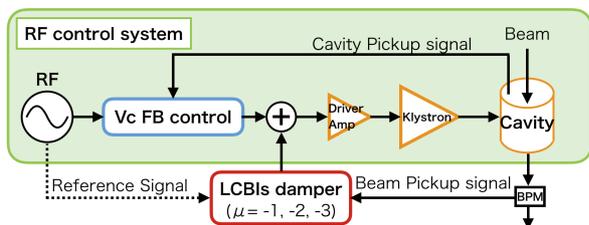


Figure 4: The block diagram of RF feedback system for LCBIs damper and LLRF Vc control.

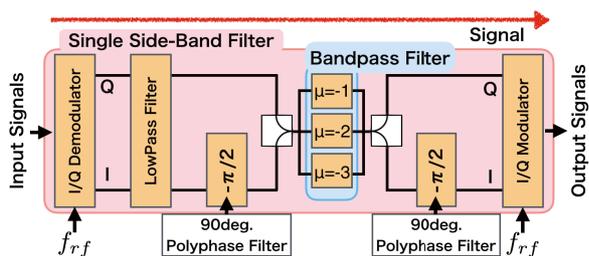


Figure 5: The functional block diagram of LCBIs damper. Phase parameters are tunable independently for each mode, and each bandpass filter is installed in parallel.

Figure 5は新たに開発したダンパーの機能を示すブロック図である。ピックアップ信号を基準となる加速周波数から低い側のみ切り出し、さらに励起側の周波数サイドバンド ($\mu f_0 + f_s$) のみをバンドパスフィルタリングして、逆位相で戻す。Figure 6に信号のフィルタリングの様子を模式図で示した。加速周波数を基準に片側みの帯域を通すフィルタには単側帯波フィルタ (Single Side-Band Filter:SSBF) を採用し (Fig. 6上)、IQ変調/復調器と90°多層フィルタを用いて実現している [7]。このフィルタで同時に加速信号をリファレンスにベースバンド変調を行っ

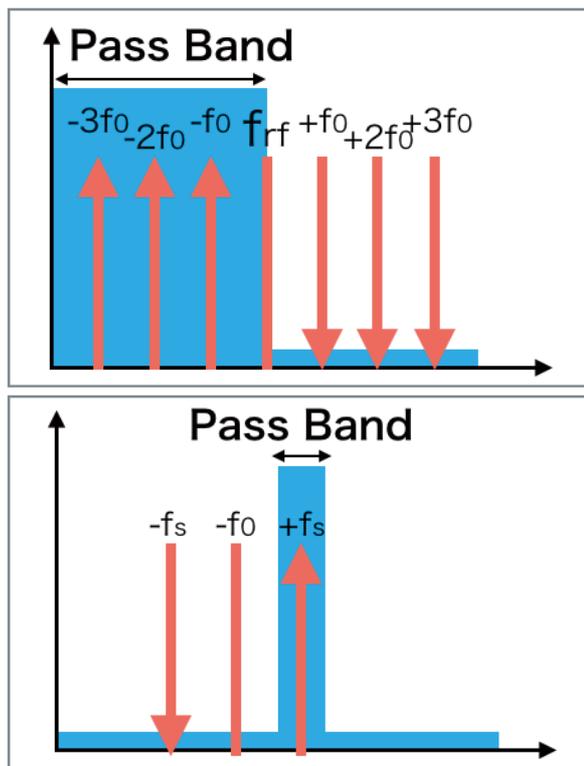


Figure 6: Illustrations of filtering by a SSBF (top) and a bandpass filter (bottom).

ている。バンドパスフィルタは加速周波数をベースバンドとして、リファレンス信号から計算した周回周波数と手動設定のシンクロトロン周波数をオフセットとしたローパスフィルタによって実現している [7]。コンポーネントとしては、Field Programable Gate Array (FPGA) にて実装した。このダンパーの特徴としては、各モードを異なるバンドパスフィルタでフィルタリング (Fig. 6下) することで、各モードの位相をそれぞれ独立に設定できることである。これはSuperKEKBのRFシステムの持つクライストロンの周波数特性が非常に狭帯域であるために、100 kHz離れた周波数では著しく位相が回るからである。精緻なフィードバック制御のために、SSBF1台に対して3台のバンドパスフィルタを接続するようにしたものをも一つのダンパーとし、これをLLRF1ステーションに一对一で対応させる。ループゲインのみダンパー外のハードウェアによって調整しており、位相を含めたその他のフィードバックパラメータは制御ネットを通してEPICS制御が可能となっている。

4. 実際のビーム運転における $\mu = -1$ モード および $\mu = -2$ モードダンパーの稼働試験

SuperKEKBのPhase-2では、1台の超伝導空洞を休止させたために生じた $\mu = -1$ モードと $\mu = -2$ モードを抑えるために、新たなダンパーが必要となった。最終的にはHER/LER双方のダンパーを調整し、運

用試験を行うことができた。Figure 7 にセットアップの様子を撮影した写真を示す。位相調整用のトロンポーン(ラインストレッチャー)は念の為に設置しているが、実際は FPGA 内部でモードごとの位相調整を行っているため必要としない。

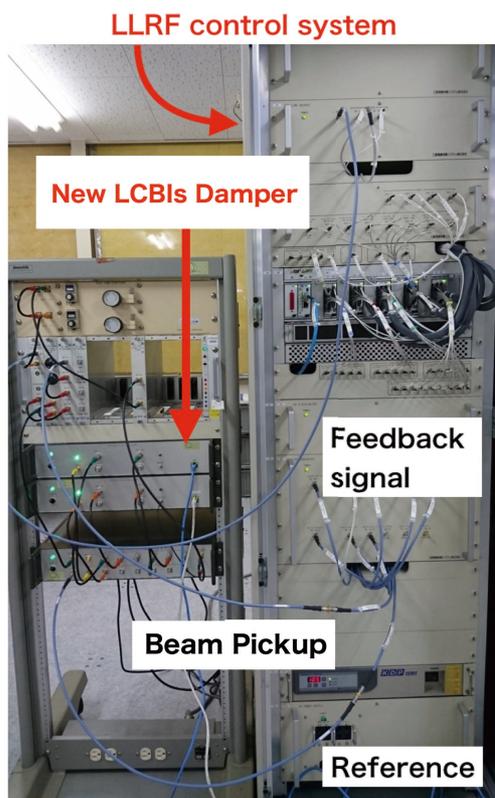


Figure 7: The picture of setup of an LCBI dampers with an LLRF station.

ダンパーの調整は特にループゲインと位相が重要となるが、先に小さなループゲインで励起状態となる位相を探し、その逆位相に設定するという方法をとった。ループゲインは、ビームがアポートしない程度のゲインに調整し、最終的に +50 dB とした。Table 2 に運転中設定していたダンパーの諸パラメータを示す。

Table 2: LCBI Dampers Setting Parameters for Phase-2 Operation

parameters	value	
	for $\mu = -1$	for $\mu = -2$
LCBI dampers param.		
freq. offset for f_s	2440 Hz	2440 Hz
bandwidth of 1st BPF	2000 Hz	3000 Hz
bandwidth of 2nd BPF	2000 Hz	OFF
Phase setting	15°	30°

HER では 450 mA から $\mu = -1$ モードが生じた。1 台の休止空洞があることによって、非常に小さい電流から不安定化が確認された。休止空洞は共振周波数を 150 kHz 小さい周波数へ離調するため、 $\mu = -2$

モードに対しても影響を与える。 $\mu = -1$ モードと $\mu = -2$ モードの中心に対して高い側にあるか低い側にあるかによって、どちらの growth rate が大きくなるかが決まる。

Figure 8 および Fig. 9 に実際にダンパーを適用し LCBI を抑制した結果を示す。Figure 8 は $\mu = -1$ モード、Fig. 9 は $\mu = -2$ モードを抑制した結果である。Figure 8, 9 それぞれにおける上図は、ダンパーを切って振動が励起している状態を示している。同じく下図は、ダンパーを入れて振動を抑制した状態を示している。この時、測定に用いた Spectrum Analyzer は $\mu = -1$ モード (Fig. 8) では中心周波数を $f_{rf} - f_0$ に設定し、span は 10 kHz に設定してある。励起状態では 2 番目のシンクロトロンサイドバンドまで明確に見えているが、ダンパーを入れた状態ではシンクロトロンサイドバンドが見えない状態まで振動が抑制されていることがわかる。続いて、同様の方法で $\mu = -2$ モードの抑制も行った。中心周波数を $f_{rf} - 2f_0$ に設定し、span は 10 kHz に設定してある (Fig. 9)。この時、 $\mu = -1$ モードのフィードバックも同時に行っている。図中の中央のスペクトルは $\mu = -1, -2$ モードそれぞれ $f_{rf} - f_0$ と $f_{rf} - 2f_0$ であり、これは加速周波数に対する 1 次と 2 次の周回周波数サイドバンドである。これは図中“D2”マーカーの位置に相当し、詳細な周波数は上部に記してある (M1 + D2)。ここで“M1”マーカーは RF 加速周波数 ($f_{rf} \sim 508.877$ MHz) に合わせており、図中には現れていない。同様に、LCBI にとって重要な励起モードのスペクトルは右側にあたる。マーカーは“D3”に合わせており、M1 + D3 がマーカー位置の周波数である。

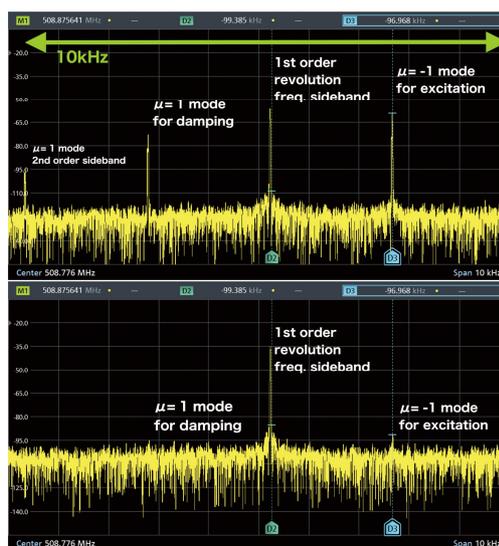


Figure 8: Spectrum of the beam pickup signal drawn by a spectrum analyzer without the $\mu = -1$ mode damper (top), and with the damper (bottom). After the damper on, the marker “D2” is at $f_{rf} - f_0$ and “D3” is at $f_{rf} - f_0 + f_s$. The center frequency was set to 508.776 MHz which is equal to “D2” marker, and the frequency span of this measurement was set to 10 kHz.

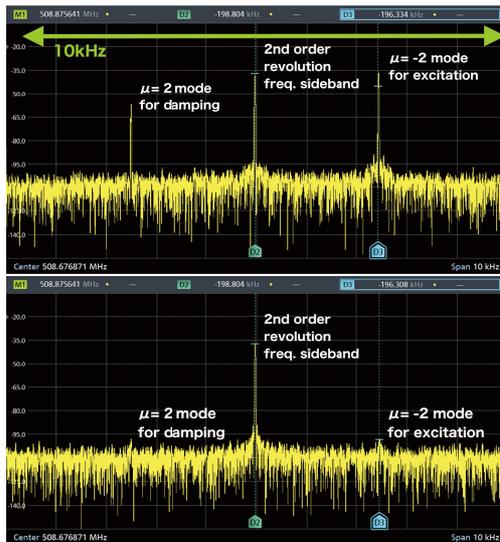


Figure 9: Spectrum of the beam pickup signal drawn by a spectrum analyzer without the $\mu = -2$ mode damper (top), and with the damper on (bottom). After the damper on, the marker “D2” is at $f_{rf} - 2f_0$ and “D3” is at $f_{rf} - 2f_0 + f_s$. The center frequency was set to 508.677 MHz which is equaled to “D2” marker, and the frequency span is same to Fig. 8 (10 kHz).

5. まとめ

SuperKEKB用に新たに開発されたLCBIsダンパーは、Phase-2にて初めて実際のビーム運転で運用された。今回最も重要視していた、 $\mu = -2$ モードの抑制およびモードを並列して抑制することにも成功し、ダンパーの稼働試験で期待通りの性能を確認できた。ループゲインの上限値も概ね予想通りであったが、 $\mu = -2$ モードにおいては期待よりも抑制効果が弱い結果を得た。これはクライストロンの個体差により、帯域が予想以上に狭かったという理由が考えられる。Phase-2で扱った電流値までは制御出来たが、Phase-3以降の更なる大電流化に向けては、ダンパーを適用するRFステーションの数を増やす必要がある。本試験によって、SuperKEKBのLCBIsはこのモードフィードバックで十分に対応できることが確認できたので、この方式で今後LCBIsの対策を行っていく。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys., 03A011 (2013).
- [2] A. Morita for SuperKEKB commissioning team., “Status of SuperKEKB phase-2 commissioning”, presented in ICHEP2018, 877 (2018).
- [3] K. Hirose *et al.*, “DEVELOPMENT OF A LONGITUDINAL FEEDBACK SYSTEM FOR COUPLED BUNCH INSTABILITIES CAUSED BY THE ACCELERATING MODE AT SuperKEKB”, Proceedings of IPAC2017, pp. 3989-3991 (2017).
- [4] T. Kageyama *et al.*, “アレス空洞系「KEKBから Su-

perKEKBに向けて””, Proceedings of PASJ2011, pp. 1245-1249 (2011).

- [5] S. Yoshimoto, “KEKBの加速モードに起因する結合バッチ不安定を抑制するフィードバックシステム”, KEK Internal 2013-2, pp. 1-6 (2013).
- [6] T. Kobayashi *et al.*, “LLRF controls in SuperKEKB Phase-1 commissioning”, arXiv:1803.09037 [physics.acc-ph] (2017).
- [7] K. Hirose *et al.*, “A New Damper for Coupled-Bunch Instabilities caused by the accelerating mode at SuperKEKB”, presented in LLRFworkshop2017, O21, (2017).