

# SuperKEKB における加速モード結合バンチ不安定性のダンパー特性評価と抑制シミュレーション

## EVALUATIONS OF DAMPER CHARACTERISTICS AND DAMPING SIMULATIONS FOR COUPLED BUNCH INSTABILITIES CAUSED BY THE ACCELERATING MODE AT SUPERKEKB

廣澤航輝<sup>\*A)</sup>、赤井和憲<sup>A,B)</sup>、絵面栄二<sup>A,B)</sup>、小林鉄也<sup>A,B)</sup>、中西 功太<sup>A,B)</sup>、西脇 みちる<sup>A,B)</sup>、吉本伸一<sup>A,B)</sup>

Kouki Hirose<sup>\*A)</sup>, Kazunori Akai<sup>A,B)</sup>, Eizi Ezura<sup>A,B)</sup>, Tetsuya Kobayashi<sup>A,B)</sup>,

Kota Nakanishi<sup>A,B)</sup>, Michiru Nishiwaki<sup>A,B)</sup>, Shin-ichi Yoshimoto<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup>SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

SuperKEKB is based on a nano-scheme at interaction region and high beam current. Coupled-bunch instabilities (CBI) caused by accelerating mode become more severe as the beam current increases. In the KEKB operation, the resulting lowest mode of CBI (called  $\mu = -1$  mode) is suppressed by the existing CBI dampers. We estimate that SuperKEKB design beam current will force large synchrotron oscillations to excite, which include more high modes CBI ( $\mu = -2, -3$  modes). So we developed a new CBI damper that can suppress  $\mu = -1, -2, -3$  modes. In tabletop measurements, the characteristics of the new CBI damper satisfy our required specifications. In this paper, the characterization and damping simulation results of the new CBI damper are reported.

### 1. はじめに

SuperKEKB は KEK つくばキャンパスにあるエネルギー非対称電子陽電子衝突型円形加速器である。2016年2月から6月末まで Phase-I 試運転が行われ、2018年1月から Phase-II 試運転が計画されている。SuperKEKB は KEKB を基に、特に衝突点付近のビーム光学系と電流値のアップグレードを軸に設計されている [1]。目標電流値は電子蓄積リング (High Energy Ring: HER) が 2.6A (KEKB では 1.2A) で陽電子蓄積リング (Low Energy Ring: LER) が 3.6A (KEKB では 1.6A) である。本研究は大電流化に起因する縦方向結合バンチ不安定性で特に加速モードに因るものを対象とし、その安定化が目標である。そのために SuperKEKB 用の新しい不安定性ダンパーを開発した。前回の年会では本ダンパーの開発状況と従来のダンパーとの比較などの報告を行なった [2]。今回の報告では実際の運用を見越し、3つ全てのモードに対応した環境で完成したダンパーを用いた特性評価を行い、またその際の振動減衰の様子をシミュレーション評価した。

### 2. 加速モードに起因する結合バンチ不安定性

この加速モードに起因する結合バンチ不安定性 (Coupled-Bunch Instabilities: CBI) は主に”ビーム電流値”: $I$  とビーム軌道上にある”構造体のインピーダンス”: $Z$  に比例し、不安定性の指標である振動の振動成長

率: $\tau_\mu^{-1}$  は次の関係で表される。

$$\tau_\mu^{-1} = AI_0 \sum_{p=0}^{\infty} \{f_{p,\mu}^{(+)} \operatorname{Re} Z^{\parallel}(f_{p,\mu}^{(+)}) - f_{p,\mu}^{(-)} \operatorname{Re} Z^{\parallel}(f_{p,\mu}^{(-)})\} \quad (1)$$

$$f_{p,\mu}^{(+)} = (pM + \mu)f_0 + f_s$$

$$f_{p,\mu}^{(-)} = \{(p+1)M - \mu\}f_0 - f_s$$

$$f_{rf} = hf_0$$

ここで  $A$  は運転条件で決まる定数係数、 $I_0$  はビーム電流値、 $M$  はバンチ数、 $f_s$  はシンクロトロン周波数、 $\mu$  はモード数、 $h$  はハーモニクナンバー、 $f_0$  は周回周波数である。 $\mu$  は独立な周波数のモードであり、 $\mu = M-1, M-2, \dots$  をそれぞれ  $\mu = -1, -2, \dots$  モードと呼ぶ。本研究で問題とする構造体は加速空洞であり、加速のために必要な高インピーダンスが同時に最大の不安定性源になってしまうというものである。その共振点付近の空洞インピーダンスは周波数に関して次式で表される。

$$Z^{\parallel}(f) = \frac{1}{1 + \beta} \frac{\frac{R_s}{2}}{1 + iQ_L \left( \frac{f}{f_{res}} - \frac{f_{res}}{f} \right)} \quad (2)$$

ここで  $\beta$  は結合度、 $Q_L$  が負荷  $Q$  値、 $f_{res}$  が空洞共振周波数である。加速空洞は加速周波数近傍が共振点になるように設計されているが、ビーム負荷下では空洞内電磁場とビームが相互作用することで実際の共振点に変化する。ビーム負荷状態で加速周波数が共振点と一致するためには、ビーム電流値に合わせて空洞単体の共振周波数を調整する必要がある。このデチューン量の関係が次式である。

$$f_{res} - f_{rf} = \Delta f = -\frac{I_0 \sin \phi_s}{2V_c} \frac{R_s}{Q_0} f_{rf} \quad (3)$$

\*hirosawa@post.kek.jp

$V_c$  は空洞 1 台あたりの電圧、 $\phi_s$  はシンクロナス位相 (バンチ中心が乗る加速電磁場の位相) を表す。ここにも電流値が現れており、電流値が変化すると安定性は大きく変化することになる。その変化の様子を Fig. 1 に示す。図には CBI の励起項と減衰項も示した。図のようにデチューンが大きくなるほどに CBI は深刻になる。図に示したインピーダンスのデチューン量は ARES

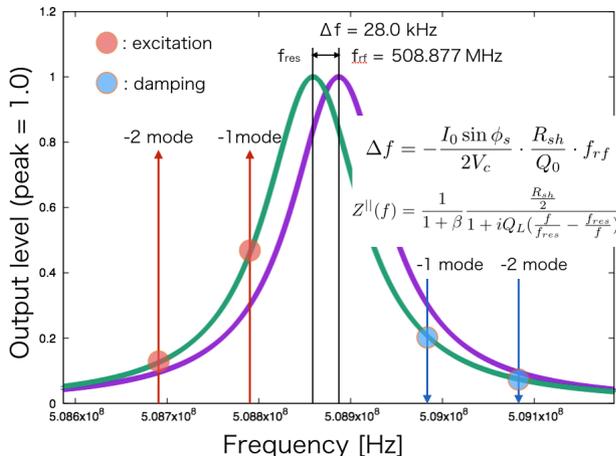


Figure 1: Cavity detuning.

の SuperKEKB 設計パラメータを用いた際のものである。超伝導空洞はまた異なるデチューン量となる。

SuperKEKB には KEKB 独自の構造の常伝導加速空洞 (ARES) [3] と超伝導加速空洞があり、HER にはそれぞれ 8 台ずつ、LER には ARES のみ 22 台ある。これを踏まえた CBI 成長率を Fig. 2 に示す。上側が LER で下側が HER である。横軸がビーム電流値、縦軸はバンチ振動振幅の成長率を示す。実際の振幅成長率は放射減衰との差で与えられるため、閾値として放射減衰量を水平な直線と併記した。それぞれ図のモードを見ると、 $\mu = -1$  モードは KEKB 到達電流値でも既に生じることが分かり、実際 KEKB では不安定化した。SuperKEKB では更に急速な不安定性を持つ振動となってしまう、大きな成長率を抑えるための対策が必須である。 $\mu = -2$  モード以上はギリギリでないようにも見えるが、本計算は理想的な場合での値であり、運転時にはトラブルなどで一時的に空洞を休止させることも想定される。紫の点線はちょうど一つの空洞を 150kHz デチューンし休ませた状態を仮定した計算であり、この場合は目標電流値に到達する前に不安定化することが分かる。以上より、目標電流値に対して、 $\mu = -1, -2, -3$  モードが不安定化する恐れがあるので、これを抑制するために、新しいダンパーの開発を行った。SuperKEKB は 2017 年 12 月から Phase-2 試運転が予定されており、そこでの運転試験に向けて特製評価やシミュレーションなどを行った。

また、本研究における計算に使用したパラメータを Table 1 に示す [1] [4]。

### 3. 新しい CBI ダンパー

CBI ダンパーのシステムは従来通り [5] であり、ピックアップ信号のうち不安定化する周波数のみを、加速

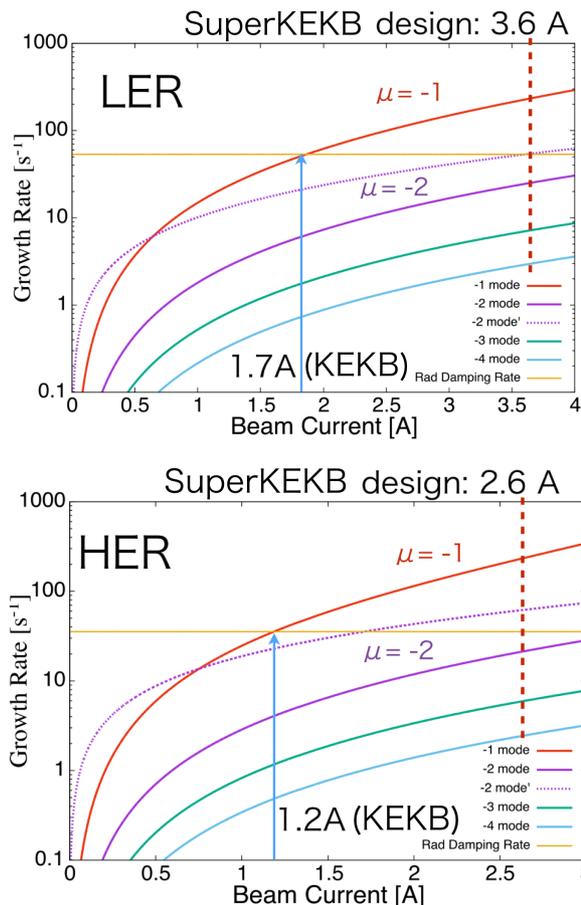


Figure 2: Growth rate of CBI and threshold (radiation damping).

Table 1: SuperKEKB and Cavity Parameter

| parameters                 | value                 |                       |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | LER                   | HER                   |
| for SuperKEKB              |                       |                       |
| Energy : $E$               | 4.0GeV                | 7.0GeV                |
| Beam current : $I_0$       | 3.6A                  | 2.62A                 |
| Mom. compact. : $\alpha_c$ | $3.25 \times 10^{-4}$ | $4.55 \times 10^{-4}$ |
| Synch. freq. : $f_s$       | 2.43kHz               | 2.78kHz               |
| 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                    |
| $V_c/cavity$               | 0.5MV                 | 1.5MV                 |
| $R_s/Q_0$                  | 15Ω                   | 93Ω                   |
| $Q_0$                      | $1.1 \times 10^5$     | $2.0 \times 10^9$     |
| coupling factor : $\beta$  | 5.0                   | $4.0 \times 10^4$     |

用とは逆位相になるように Low-Level Radio Frequency (LLRF) 制御系に戻す RF フィードバックを用いる。一つのダンパーが働くシステム全体の模式図を Fig. 3 に示す。図中のダンパーの部分 CBI ダンパーである。

新しいダンパーは、従来のダンパーでは抑制できない  $\mu = -2, -3$  モードを抑制することを目標としている

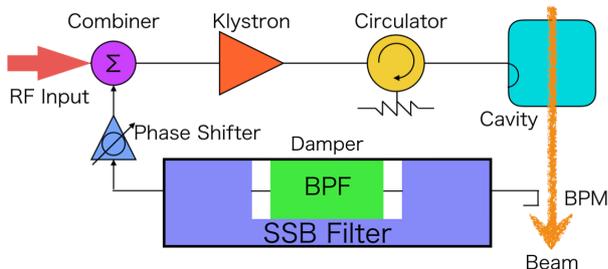


Figure 3: RF feedback system for CBI damping.

が、 $\mu = -1$  モードにも対応している。これにより、本ダンパーの備える新要素である  $\mu = -1, -2, -3$  モードの並列とそれぞれの独立制御を実現することができる。CBI ダンパーの仕組みは Fig. 4 に示す。CBI ダンパーはベースバンド変調と単側波帯フィルタ (SSBF) の役割を持つアナログ部とバンドパスフィルタ (BPF) の役割を持つデジタル部に分かれており、それぞれ異なるコンポーネントで構成される。(Fig. 5 参照。) ピックアップ信号

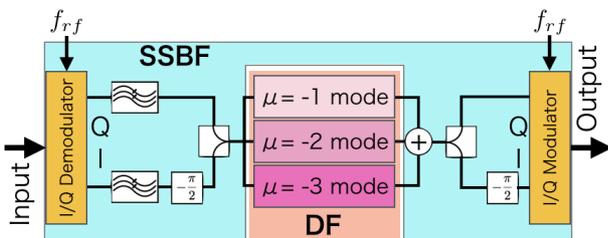


Figure 4: Schematic of the CBI damper mechanism.



Figure 5: Photograph of the CBI damper.

は最初に SSBF によってベースバンド変調と SSB 変調を同時に行われる。SSBF を実現するために、IQ 信号を通した際に片方の位相が 90 度回るオールパスフィルタを用いており、このフィルタは従来のものよりもフィルタ数を増加 (4 段→6 段) し、より広い範囲で 90 度変化を維持できるように改良を行なった。その後、(最大) 3 つに分割され、BPF に送られる。BPF ではそれぞれのモード: 100kHz ( $\mu = -1$ )、200kHz ( $\mu = -3$ )、300kHz ( $\mu = -3$ ) の位置を中心にバンドパスフィルタリングされる。フィルタの特性はバンド幅や位相、中心位置のオフセットなどが調整できる。BPF の後は分

かれていた信号を合成し、再度 SSBF に戻りキャリア周波数 (508.877MHz) にアップコンバートする。位相は主に CBI ダンパー外部の移相器で調整するが、BPF にそれぞれ位相特性があるため、100kHz 前後でゲインがそれほど落ちない隣り合ったモードは、互いに打ち消しあう可能性がある。したがって、3 つのピークでもっともゲインが確保できるように BPF の内部パラメータ位相を変化させる必要がある。続く本ダンパーの特性評価ではこの点に注意して位相調整を行なっている。

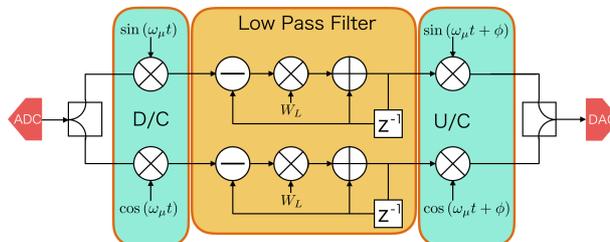


Figure 6: BPF circuit in FPGA.

BPF の作成は FPGA 評価キット (XILINX KC705) を用いている。内部の仕組みは Fig. 6 に示す。入力信号:  $x$  に対する出力:  $y(x)$  は次式の関係を持つ。

$$y(x) = \left| \frac{W_L}{1 - (1 - W_L)e^{-2i\pi \frac{x}{f_{clock}}}} \right|^2 \quad (4)$$

$$W_L = \frac{2\pi f_{\frac{1}{2}}}{f_{clock}}$$

$f_{\frac{1}{2}}$  はフィルタのバンド幅である。クロック数:  $f_{clock}$  は加速 RF を外部リファレンスし 5 分周したもの ( $\approx 100MHz$ ) である。このように BPF はローパスフィルタとベースバンド変調を組み合わせ実現している。また、適用するモードの変更や細かい周波数のオフセットや位相の調整などはベースバンド変調の部分で行っており、図ではアップコンバータの部分で処理している。この FPGA 内部での正弦波の取り扱いには数値制御発振器 (Numerically Controlled Oscillator) 方式を用いている。ダンパーの主な仕様、改良箇所は次の通りである。

- BPF を並列し  $\mu = -1, -2, -3$  モードに対応
- IQ 変調と  $90^\circ$  フィルタを改良し SSB 特性を向上
- BPF の設定で  $\mu = -1, -2, -3$  モードの切り替え可能
- モードごとに独立に位相調整可能
- クロック周波数を外部参照
- クロック周波数: 10MHz → 100MHz
- AD/DAC のビット数: 8bit → 16bit
- 内部ビット数: 14bit → 24bit
- Ethernet を実装 (操作は EPICS 使用)

- 設定パラメータを不揮発性メモリに保存可能

上から4つ目までは非常に基本的かつ重要な事項であり、これまでに述べた内容に含まれる。続く項目は精度を向上させるものである。クロック周波数の外部参照機能により加速用RFと同期させることができ、クロック周波数には参照した周波数を5分周したものを使用する(外部入力なしだと内部オシレーターを用いる。)操作にはEthernetを実装し、制御ネットワークを介して制御が可能である。一対一のテスト測定の際は専用のソフトウェアを用いていたが、実際の運用を見越してEPICS stream deviceによる操作ができるように新たにプロトコルとレコードを作成したので、以後はコンソールからレコードを打ち込めば容易に操作ができる。パラメータの保存については、内部の不揮発性メモリへの保存に加えてSDカードへの書き込みも出来るようになってきている。以上が主な改良点である。

#### 4. CBIダンパーの特製評価

新しいダンパーは現在、BPFが4台とSSBFが2台ある。それぞれLERとHERのPhase-II試運転で生じる可能性のある $\mu = -1, -2$ モードに対応するために用意したものである。BPFはデジタルデバイスであるためにほとんど素子ごとの個体差はないが、SSBFはアナログデバイスであるので個体差が大きい。特性評価の結果も、デジタルデバイスは優位な差は見られなかったが、SSBFはある程度の差が見られた。Figure 7に新しいSSBF単体の測定を従来の結果と比較して示す。阻止域の大きな低減が実現でき、通過域はリップルがほとんど見られない非常に平坦な特性を実現できた。ダ

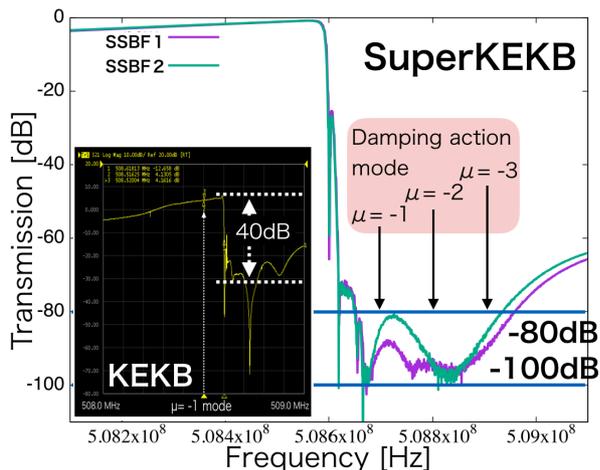


Figure 7: Characteristics of SSBFs and comparison with existing one.

ンパー全体の特性評価は模擬空洞を用い、Fig. 8に示す環境で測定した。模擬空洞のQ値は9000、また模擬空洞後のアンプは空洞でロスするゲインの補填の目的でありフィードバックゲインとは異なる。位相の調整の方法はまず $\mu = -1$ モードを外部の移相器で調整し、その後 $\mu = -2$ モードと $\mu = -3$ モードを順にBPF内

部の位相パラメータで調整している。BPFにそれぞれの位相特性があるので、完全にフィードバック信号として強め合う調整はできないが、影響が可能な限り小さい場所を微調整しながら探した。測定の結果はFig. 9に示す。

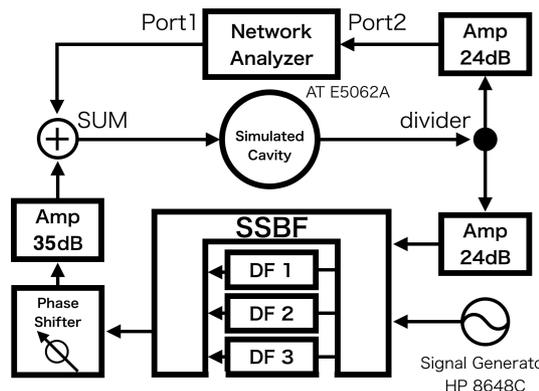


Figure 8: Block diagram for the feedback loop evaluation.

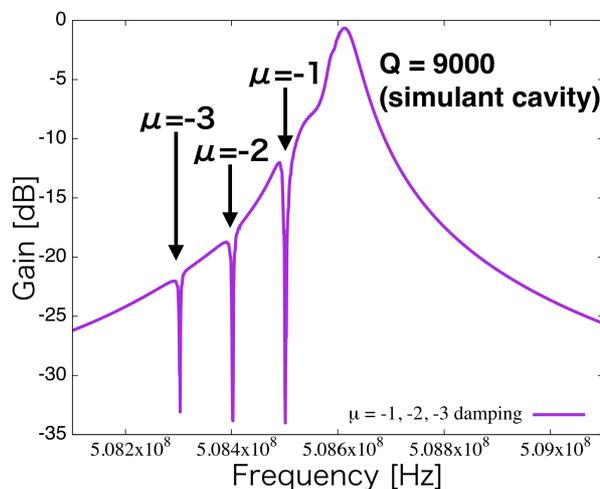


Figure 9: Damping characteristics for the feedback loop evaluation.

#### 5. 振動の抑制シミュレーション

評価式は時間ステップごとにバンチ振動を評価したものであり次式の関係を用いている。

$$\ddot{\tau}_n(t) + 2(\tau_{rd}^{-1} - \tau_{gr}^{-1})\dot{\tau}_n(t)\omega_s^2\tau_n(t) = \mathcal{F} \quad (5)$$

$$\mathcal{F} = G_{total} \frac{\alpha_c e}{T_0 E_s} V$$

ここで $\tau_n$ は振動の位相差(時間差)であり、 $\tau_{rd}^{-1}$ は放射減衰率、 $\tau_{gr}^{-1}$ はCBIによる振幅成長率、 $\omega_s$ はシンクロトロン角振動数、 $\mathcal{F}$ はフィードバックによるキック力である。 $\mathcal{F}$ はフィードバックゲイン $G_{total}$ を係数にし、上式の関係を持っている。 $\alpha_c$ はモメンタムコンパクションファクター、 $T_0$ は周回周波数、 $E_s$ はシンクロ

ナス粒子のエネルギー、 $V$ が電圧である。全体のフィードバックシステムの模式図は Fig. 10 に示す。ここで、

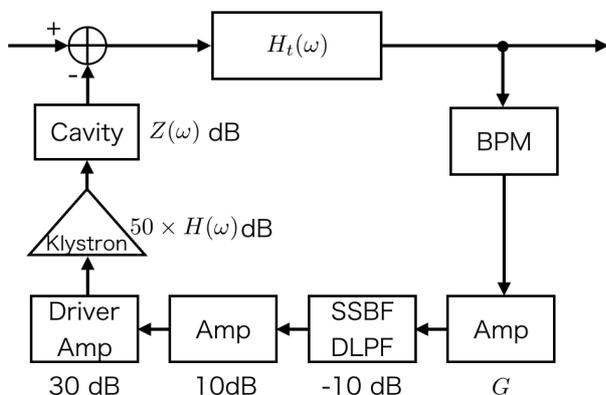


Figure 10: Block diagram of the CBI damping system for feedback simulations.

$H(\omega)$  はクライストロンの周波数特性であり、 $H_t(\omega)$  はビーム振動の周波数応答に相当する関数である。

$$H_t(\omega) \cdot x = \frac{F_g}{-\omega^2 + 2\tau_{rd}^{-1}i\omega + \omega_s^2} \quad (6)$$

ここで  $x$  はビーム振動の振幅、 $F_g$  はビーム振動に依存するウェイク場による作用である。

シミュレーション結果はダンパー前のアンプで+70dB した場合の結果と+60dB の結果を例として Fig. 11 に示す。ピックアップ信号のゲインが必要となるが、これは Phase-I 試運転で測定した BPM からの出力を参考にした。LER を想定し、且つ振動の成長が著しい  $\mu = -1$  モードに関して目標電流値 ( $I_0 = 3.6A$ ) での計算である。ループ内のクライストロンなど他のコンポーネントにも周波数特性があるのでこれらの測定値も用いて計算をおこなっている。アンプによるゲインが非常に大きい、これは BPM の出力が非常に小さいからであり空洞ピックアップを用いることでこの挿入ゲインは小さくすることができる。Phase-II 試運転でより正確な値を測定し本運転に備えて再計算する予定である。ま

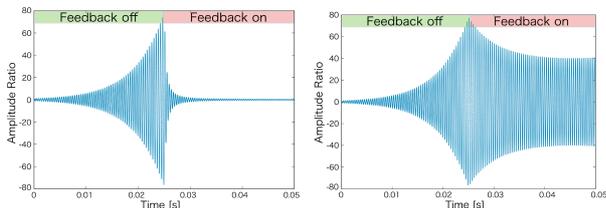


Figure 11: Damping simulations with CBI feedback at LER. Left:  $G=+70\text{dB}$ , Right:  $G=+60\text{dB}$ .

た HER には ARES と超伝導空洞があるので、それらに挿入した際の抑制効果の違いも計算を行なった。それを Fig. 12 に示した。ARES 空洞はチューン量を低減する設計の空洞であるため、CBI への影響は少ない。従って、フィードバックによる抑制効果も小さくなる。そのため、ダンパーは超伝導空洞に適用する方が効果が

高いことが分かる。シミュレーションの結果から、適用するのは超伝導空洞でなければ抑制するのが難しいということが分かる。以上のシミュレーションを参考

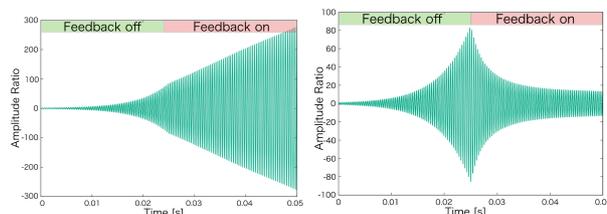


Figure 12: Damping simulations with CBI feedback at HER, and its feedback gain is +60dB. Left: Application to ARES, Right: Application to Superconducting Cavity.

にして、運転時に必要なフィードバックゲインを見積もる。

## 6. まとめ

SuperKEKB での大電流運転に向けて、その際に生じる”加速モードに起因する結合バンチ不安定性”を抑制するべく、新しいダンパーを開発した。開発したダンパーは従来のダンパーより良い特性になるように設計されており、実際の特性評価の結果は、我々の要求する仕様に対して非常に良い結果が得られた。特に阻止特性は-80dB 以上の阻止が確認でき、抑制効果を持つ項への影響がほぼ無くすることができた。ループ測定では与えたフィードバックゲイン通りのインピーダンスの相殺が確認できた。以上、CBI ダンパーの特性評価では非常に良い結果が得られた。また、制御に関しては EPICS の Stream device 用にプロトコルとレコードを作成したので、現在はこれを用いての制御が可能である。続いて抑制シミュレーションの結果からフィードバック信号にはゲインを多く入れなければならないと考えられるので、できるだけ大きなフィードバックゲインが得られるように空洞からのピックアップ信号を用い、さらに複数の空洞に対してダンパーを適用することが必要であると考えている。Phase-II 試運転の前に大電力を含めた全体の試験を行い、空洞ピックアップとビームピックアップの比較を行う。空洞に悪影響がないのであれば、ゲインの関係上空洞ピックアップが良いと考えられるのでその確認を行う。その後 Phase-II 試運転にて実際の抑制試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 03A011 (2013).
- [2] K. Hiroswa *et al.*, Proc. of PASJ2016, TUP012 (2016).
- [3] T. Kageyama *et al.*, Proc. of PASJ2011, pp. 1245-1249 (2011).
- [4] K. Akai *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A. 499, pp. 45-65 (2003).
- [5] S. Yoshimoto, KEK Internal 2013-2, pp. 1-6 (2013).