

SuperKEKB における加速モードに起因する結合バンチ不安定性抑制ダンパーの開発

DEVELOPMENT OF A COUPLED BUNCH INSTABILITY DAMPER CAUSED BY THE ACCELERATION MODE FOR SUPERKEKB

廣澤 航輝^{*A)}、赤井 和憲^{A,B)}、絵面 栄二^{A,B)}、小林 鉄也^{A,B)}、吉本 伸一^{A,B)}

Kouki Hirose^{*A)}, Kazunori Akai^{A,B)}, Eizi Ezura^{A,B)}, Tetsuya Kobayashi^{A,B)}, Shin-ichi Yoshimoto^{A,B)}

^{A)}SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

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

Abstract

The Phase-I beam commissioning of the SuperKEKB was conducted from February until the end of June in 2016. We can predict that more high mode coupled-bunch instability caused by the acceleration mode is brought about for high current beam operations of the commissioning from now on. In order to stabilize these, we need a new coupled-bunch instability damper. That is still in development. This damper can stabilize this instability by means of reducing the impedance at each mode frequency in the cavity. The previous damper used in KEKB and Phase-I SuperKEKB operates only -1 mode instability. In contrast to this, new damper supports -1, -2, and -3 mode instability. We expect that this will be effective in the next and subsequent Phase of SuperKEKB commissioning.

1. はじめに

今年2月から6月まで Phase-I コミッショニングのあった SuperKEKB は、KEKB からアップグレードをし40倍のルミノシティを目指す電子陽電子衝突型の円形加速器である [1]。SuperKEKB は 7GeV 電子リングの High Energy Ring (HER) と 4GeV 陽電子リングの Low Energy Ring (LER) を持つ。加速空洞は KEKB のシステムを再利用し ARES 空洞 [2] と呼ばれる常伝導加速空洞と超伝導加速空洞 (SCC) の2種類を用いている [3]。HER には ARES 空洞と SCC が用いられ、LER には ARES 空洞のみが用いられている。ARES 空洞は KEKB 独自の常伝導加速空洞であり、ビームローディングに対する空洞 detune 量を小さくするために3つの空洞を結合し、その1つをエネルギーの蓄積に使用する構造になっている [2]。

大電流の蓄積リングにおいては大きな問題の一つとして結合バンチ不安定性 [4] がある。SuperKEKB の KEKB との大きな違いは、より高いルミノシティを目指すことによるビーム電流値の増大である。結合バンチ不安定性は、ビーム電流が増加するほど大きくなっていく。KEKB の時の不安定性は、 $\mu = -1$ mode と呼ばれる不安定性の mode が問題となり、その時用いられた従来の結合バンチ不安定性ダンパーは $\mu = -1$ mode のみ対応したものであった [5]。

今回の SuperKEKB へのアップグレードに際して、最終的なデザイン電流値においては $\mu = -1, -2$ まで生じると予想される。また、トラブル等で停止して detune しておく空洞によって $\mu = -2, -3$ mode が励起されることがある。この新たに生じるより高次 mode の不安定性抑制のために新しいダンパーの開発を行っており、製造した一部のコンポーネントについては評価を行った。新しいダンパーは $\mu = -1, -2, -3$ mode までの不安定性を抑制できるダンパーである。SuperKEKB の

Phase-I ビームコミッショニングではまだ電流値が小さく、 $\mu = -1$ mode のみが確認できた。この時、KEKB で用いていた従来のダンパーによってビームを安定化した。新しいダンパーは実際にビームを用いた評価に間に合わなかったが、以後の運転において従来のダンパーでは抑えきれない $\mu = -2$ 以上の mode の安定化に貢献することを期待する。

2. 加速モードに起因する結合バンチ不安定性

ビームの運動は加速器を構成するコンポーネントとの相互作用によって定まるが、ビームが励起する電磁場の相互作用がバンチ間に及ぶことによって起こる不安定性が結合バンチ不安定性である。本稿では加速モードに起因する縦方向の結合バンチ不安定性のみを問題とする。

シンクロトロン振動の growth rate が radiation damping で決まる閾値を越えると不安定性が生じてしまう。加速空洞内における wake fields は空洞 impedance によって記述でき、計算するうえで直接 wake fields を考えるよりも impedance を考える方が扱いやすい。振動の growth rate (time) を求めると、結合バンチ不安定性の growth rate は式 (1) によって表される [4]。

$$\tau_{\mu}^{-1} = \frac{MNe^2\alpha_c}{2f_sET_0^2} \sum_{p=0}^{\infty} \{f_p^{(\mu+)} \text{Re}Z^{\parallel}(f_p^{(\mu+)}) - f_p^{(\mu-)} \text{Re}Z^{\parallel}(f_p^{(\mu-)})\} \quad (1)$$

$$f_p^{(\mu+)} = (pM + \mu)f_0 + f_s$$

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

$$f_{rf} = hf_0$$

*hirosawa@post.kek.jp

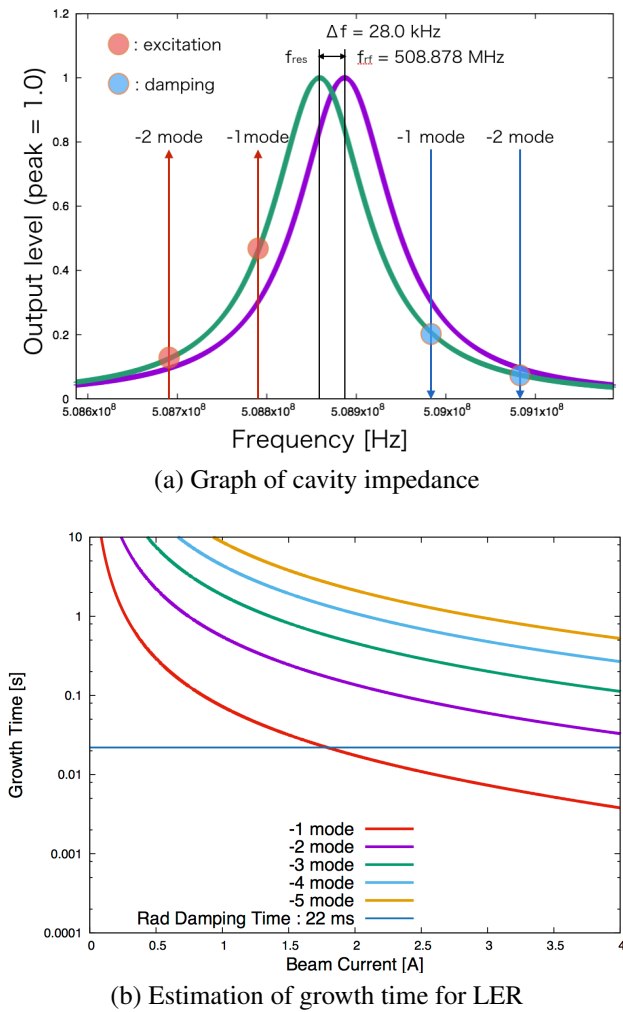


Figure 1: (a): the image of relations between cavity impedance and several modes. In this image, $Q_L = 4000$ to make it easier to understand. (b): a plot of calculation values about oscillation growth time of the coupled-bunch instability modes of $\mu = -1, -2, -3, -4,$ and -5 . Blue horizontal line is threshold radiation damping time.

τ は growth time であり、式 (1) の係数部分が電流に比例する。 Z^{\parallel} は縦方向結合 impedance、 M はバンチ数、 N はバンチ内粒子数、 e は電荷素量、 α_c は momentum compaction factor、 f_{rf} は加速周波数、 E はビームエネルギー、 f_0 はビーム周回周波数、 h は harmonic number、 T_0 は周回周期、 f_s はシンクロトロン周波数である。

加速空洞の場合、縦方向結合 impedance Z^{\parallel} は式 (2) で表される。

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

β は input coupling、 R_{sh} は shunt impedance、 Q_L は loaded-quality factor、 f_{res} は共振周波数である。

ここに現れる μ はビームがリングを周回していることの所産であり、それぞれの $\mu = M - n$ の与える周波数 f に対してしばしば $\mu = M - n$ mode または $\mu = -n$ mode

と呼ぶ。例えば今回問題とする mode は $\mu = -1, -2, -3$ mode である。式 (1) から、加速周波数より低い側の周波数が振動を不安定化すると分かる。

空洞 impedance は式 (2) の関係を持つが、実際の加速において空洞の共振周波数 f_{res} はビームローディングのリアクティブ成分をキャンセルするために空洞を detune する。空洞 detune 量は式 (3) によって表され、ビーム電流とともに増加する [3]。

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

ϕ_s が平衡位相、 V_c がその空洞一台の加速電圧である。一般に電子陽電子リングにおいては、共振周波数 f_{res} が小さくなる (Δf が負になる) 方向にずれる。

空洞 impedance のイメージを Figure 1-(a) に示し、実際に LER の growth time を計算した結果を Figure 1-(b) に示す。Figure 1 に関する SuperKEKB のパラメータを Table 1 示す。

Table 1: SuperKEKB and ARES Cavity Parameter

parameters	LER	HER
for SuperKEKB		
E	4.0GeV	7.0GeV
I_0	3.6A	2.62A
α_c	2.74×10^{-4}	1.88×10^{-4}
f_s	2.43kHz	2.78kHz
harmonic number : h	5120	
f_{rf}	508.878 MHz	
$f_0 = f_{rf}/h$	99.39 kHz	
V_c/cavity	0.48MV	0.5MV
number of cavity	22	8 (and 8 scc)
for ARES cavity		
R_{sh}/Q_0	15 Ω	15 Ω
Q_0	1.1×10^5	
input coupling : β	5	

μ mode の growth rate は $f_{rf} = 508.878\text{MHz}$ から $\pm\mu \times f_0 \mp f_s$ 離れた二つの周波数での impedance の差によって定まる量だが、空洞 detune により共振周波数が低い方向にずれている場合、 $\mu = 0$ mode は常に安定であるが、それ以外の mode は不安定な方向に振動が成長することになる。

Figure 1-(b) に $\mu = -1, -2, -3, -4, -5$ mode までの周波数に対する growth time を示した。図の青い水平な直線は radiation damping による不安定性抑制の閾値を示す。SuperKEKB のビーム電流は LER が 3.6A、HER が 2.6A であるため、特に LER において $\mu = -2$ mode が閾値に近いので条件によっては不安定性が起こることを想定する必要がある。

3. 縦方向結合バンチ不安定性ダンパー

加速モードに起因する不安定性は、不安定性を引き起こす mode の周波数における空洞の impedance が大きいことによって引き起こされる。したがって、不安定性を引き起こす周波数における空洞 impedance を小さくすることができれば、振動の増大を抑えることが

できる。そこで空洞 impedance を抑えるためにビーム pickup 信号を Low Level RF に戻す feedback を採用する。ダンパーは、feedback 信号を 508.878MHz 以下の信号のみを戻して、ビーム振動を抑える位相で合流させることで RF 信号の level をその周波数のみ低減し、impedance を抑える仕組みである。

原理的には feedback 信号が櫛状にピークの列を作る digital filter を用いるのが容易だが、制御の観点から考えると櫛状に作ってビーム pickup の全ての周回周波数に合わせるのは難しい。そこで本ダンパーは入力信号を基底帯域に落とした上で low pass filter を通すことで、復調した際に狭帯域の band pass filter (バンド幅 1kHz 以下) の出力を得て、これを各 mode の周波数に対して合わせることで各 mode の不安定性をそれぞれ独立に抑制する仕様になっている。

今回新しく開発したのは feedback 内で使用する filter である。Filter は Analog 部の Single-Side-Band Filter (SSBF) と Digital 部の Digital Filter (DF) の二つのコンポーネントからなる (Figure 5 参照)。SSBF は、feedback に戻すための 508.878MHz 以下の周波数帯を残して 508.878MHz 以上を落とすことで、DF への入力信号を低い周波数のみにする役割を持つ analog の filter である。DF は残された低い周波数のうち更に各 mode の周波数 (例えば $\mu = -2$ mode の場合は $2 \times f_0 - f_s$) のみを通す band pass filter である。このダンパーを使用するためのビーム pickup からの feedback 信号の経路は Figure 2 に示した経路をたどる。

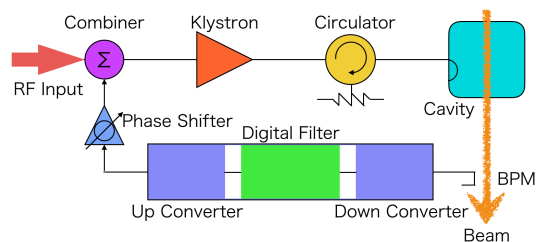


Figure 2: Feedback path of a coupled-bunch instability damper. Our new damper are digital filter, Up Converter, and Down Converter.

KEKB 稼働の際にも $\mu = -1$ mode 結合バンチ不安定性はみられ、それを抑制するために KEKB では $\mu = -1$ mode 抑制ダンパーが使われていた。2016 年 2 月から 6 月末までの SuperKEKB のビームコミッショニング Phase-I においても $\mu = -1$ mode 不安定性は現れていたためその時の抑制には従来の KEKB 用ダンパーを用いた。Figure 3 が実際に使用した Feedback のコンポーネントの写真である。

Figure 4 は実際に SuperKEKB の LER にて従来のダンパーを用いて不安定性抑制の効果を測定したものである。(a),(b)ともに中央のマーカは RF 周波数 f_{rf} から f_0 だけ低い周波数であり、中央から右側に約 1.9kHz だけ離れた場所にあるマーカがシンクロトロン周波数 (f_s) で、いわゆる $\mu = -1$ mode である。Figure 4(a) は、feedback を切った時のビーム pickup 信号であり、 $\mu = -1$ mode の振動が非常に高くなっている。Figure 4(b) は、feedback を入れた時の信号であり、 $\mu = -1$

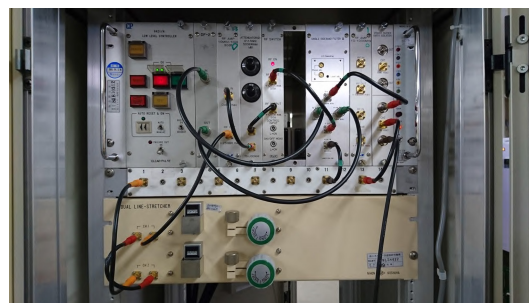


Figure 3: Feedback components to damp cavity impedance at CBI modes.

mode の振動がうまく抑えられている。

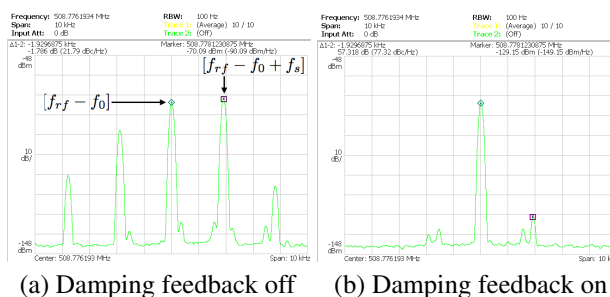


Figure 4: Beam pickup spectrum in the LER with damping feedback (a) and without (b).



Figure 5: New damper for SuperKEKB (Upper: DF and lower: SSBF). Manufactured by Sanko-sha [6].

4. SUPERKEKB 用の新ダンパー

本節では新たに開発した SuperKEKB 用のダンパー (写真: Figure 5、製造: 三光社 [6]) について説明する。従来のダンパーでは $\mu = -1$ mode のみに対応していたが、SuperKEKB においてはビーム電流値増大で $\mu = -2$ mode が現れることが予想される。そのため、少なくとも $\mu = -2$ mode までの不安定性に対応できるダンパーでなければならない。また、トラブル等で detune

しておく空洞がある場合は低い電流でも $\mu = -2, -3$ mode が現れる場合があり、実際に SuperKEKB の Phase-I でも detuning (tuner position) の調整に苦労した。よって電流増大に限らず高次のダンパーはコミッションングを進めるにあたって有用である。その他、技術的な進歩により性能の良いデバイスを使用することで性能向上が期待できる。

Figure 6 は開発中のダンパーと従来のダンパーの違いである。Figure 6-(a) は KEKB のダンパーであり、信号を位相が 90° ずらすことで \sin, \cos の I/Q 変換をしている。Figure 6-(b) が SuperKEKB 用の新ダンパーであるが、近年の技術の進歩でより正確な I/Q 変換が可能になった。市販の I/Q Modulator (Demodulator) でも十分な性能を持っており、今回は市販のものを使用しているが、従来の filter よりも性能が高い。最も重要な点は、KEKB 用のダンパーが $\mu = -1$ mode のみであるのに対して、SuperKEKB 用のダンパーは $\mu = -1, -2, -3$ mode が並列に合成可能となっている点である。これにより、新しいダンパーはそれぞれの mode を独立に抑制することが可能となる。

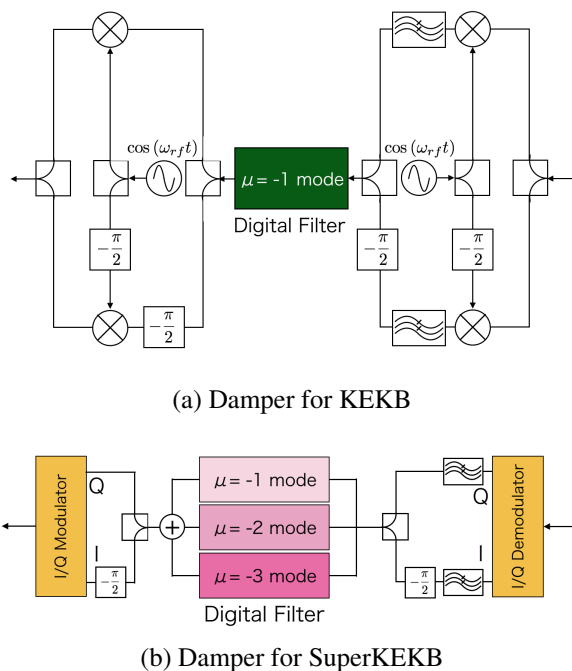


Figure 6: Differences between (a):old and (b):new damper.

新しい DF の構成は Figure 7 に示したようになっている。KEKB 用の filter は ADC/DAC が 8bit で clock 周波数が内部で独立していたが、新しく開発したものは ADC/DAC は 16bit で clock 周波数は加速周波数の RF 信号をリファレンスとして使用し、より正確な digital 処理が可能である。新しいダンパーは操作の利便性のために Ethernet を経由してパラメータを設定、制御するようになっている。KEKB のダンパーでは PC を DF に直接つないで端末により操作し、この際に現在のパラメータを表示できないこと、各パラメータそれぞれが別々の計算方法で 16 進で入力しなければならないこ

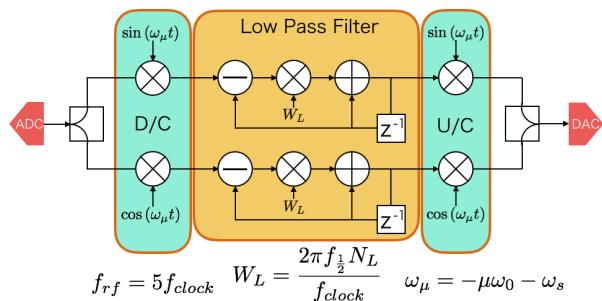


Figure 7: Functional block diagram of digital filter with 16 bit DAC/ADC. The clock signal is provided by dividing RF frequency.

と、電源が入っていないと値を記憶しないことなど多くの不自由があった。

5. 新しいダンパーの特性評価

新しい SSBF に対しては DF への入出力が 3 分岐、3 合成できること。また加速周波数に対する高周波帯域が 508.878MHz+20kHz 以内から 50dB 以上減衰、低周波帯域損失が 508.878MHz-10kHz 以内に 3dB 以下に抑え、それぞれ 500kHz 以上の帯域幅に渡ってこの特性が維持されていることが望ましい。DF は中心周波数の変位幅を 20Hz 刻みで 300kHz 以上の shift が可能であり、バンド幅が 10Hz 刻みで 200Hz~2kHz の可変幅を持つように設計した。

新しい SSBF については製造が出来たので、この性能の目標をもとに特性を評価し、その結果を Figure 8 に示した。これは DF なしで Up/Down converter のみで行った測定である。図から加速周波数を中心にして高周波

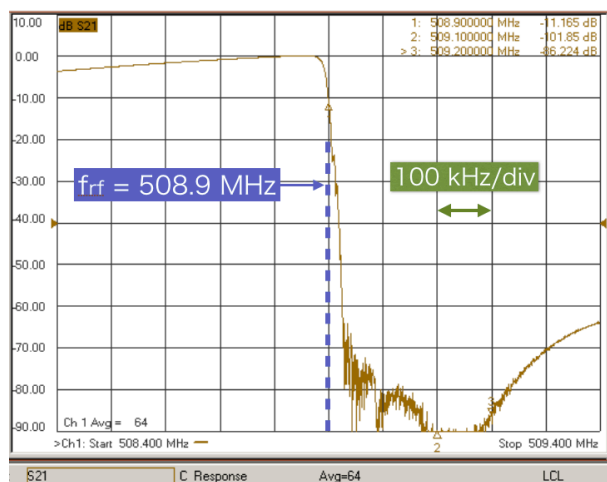
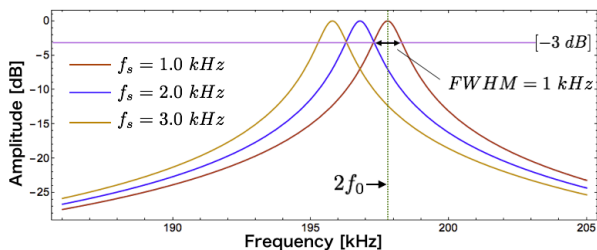


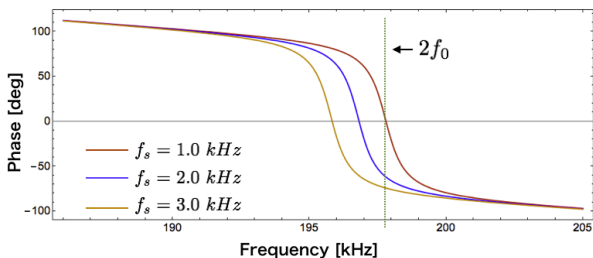
Figure 8: Frequency characteristics of SSBF transmission.

側が 100kHz~300kHz オフセットにおいて 80dB 以上も大きく低減され、低周波側が 0dB 近傍になっており、期待する特性を持っていることがわかる。また、従来のダンパー [5] と比較して高周波側と低周波側の差の特性が 20dB 程度 (使用する mode 範囲では 30dB 程度) 良くなっている。

新しいDFについては現在製造途中であるが、計算によるDFの $\mu = -2$ modeにおける周波数特性をFigure 9に示す。Figure 9- (a), (b) はそれぞれ透過率の振幅、



(a) Amplitude- Frequency characteristics of DF



(b) Phase- Frequency characteristics of DF

Figure 9: Calculation results of DF transmission for frequency at $\mu = -2$ mode.

位相を示す。Figure 8の測定結果から、Figure 9に示すDFを組み合わせた際に予想される伝送特性をFigure 10に示す。Figure 10は $\mu = -1, -2, -3$ modeの並列した(Figure 5- (b)の構成を想定した場合の)伝送特性である。 $f_{rf} + \mu (= -1, -2, -3) \times f_0 + f_s$ の位置にピークがあり、これが各mode周波数で空洞impedanceを低減する。

全てのコンポーネントの製造を終えた後はシステム全体のfeedback特性を評価する。また、SuperKEKBのPhase-IIにおいて実際のビーム運転で試験する。

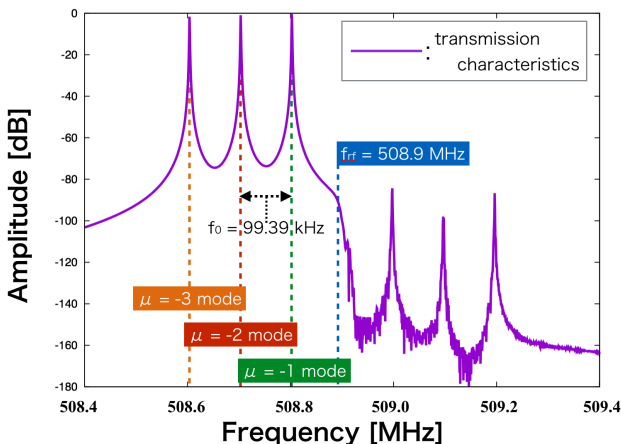


Figure 10: Predicted total transmission characteristics of SSBF with DF from Fig. 8, 9. There are three peaks at -1 mode, -2 mode, and -3 mode.

6. まとめ

KEKBからSuperKEKBへのアップグレードで問題となる高次の結合バンチ不安定性に対応するために新たなダンパーを開発している。従来のダンパーとの最も大きな差異は、 $\mu = -2, -3$ modeの不安定性を抑えることができるという点である。その他ユーザビリティにおいても、細かくはあるが改良を行った。

ダンパーを構成する一部のコンポーネント (Single-SideBand Filter) は完成し、その評価では従来のダンパーよりも非常に良い結果が得られた。今回、ダンパーの完成がSuperKEKBのPhase-Iに間に合わなかったのが、実際の運転でビームを用いた測定はできなかったが、Phase-IIにおいて実際のビームを用いた評価を行う予定である。特にビーム電流の増大によって不安定性が実際に生じた際に、従来のダンパーでは対応できなかった $\mu = -2$ mode以上の不安定性を抑え、ビームの安定化に貢献できることを期待する。

謝辞

本ダンパーの製造に際し、石垣氏をはじめ株式会社三光社の皆様には厳しいスケジュールで柔軟に対応していただき感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011.
- [2] T. Kageyama *et al.*, "ARES CAVITY SYSTEM FOR SuperKEKB", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 2011, pp. 1245-1249.
- [3] K. Akai *et al.*, "RF system for the KEK B-Facility", Nucl. Instr. Meth. A. 499, 2003, pp. 45-65.
- [4] A.W.Chao, "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators.", Wiley-Interscience Publication
- [5] S.Yoshimoto, KEK Internal 2013-2, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, April 2013, pp. 1-6.
- [6] <http://www.sanko-sha.net>