

# SuperKEKB における超伝導空洞の SiC 製 HOM ダンパーのビーム試験

## STATUS OF SiC HOM ABSORBERS FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES AT SuperKEKB

岡田 貴文 <sup>\*,A)</sup>, 赤井 和憲 <sup>A)</sup>, 西脇 みちる <sup>A,B)</sup>, 古屋 貴章 <sup>A)</sup>, 光延 信二 <sup>A)</sup>, 森田 欣之 <sup>A,B)</sup>,  
Takafumi Okada <sup>\*,A)</sup>, Kazunori Akai <sup>A)</sup>, Michiru Nishiwaki <sup>A,B)</sup>, Takaaki Furuya <sup>A)</sup>,  
Shinji Mitsunobu <sup>A)</sup>, Yoshiyuki Morita <sup>A,B)</sup>

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

<sup>B)</sup> Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

### Abstract

In SuperKEKB accelerator, 509 MHz higher-order-mode (HOM) damped superconducting cavities (SCC) is operating for the electron ring. The design beam current of SuperKEKB is 2.6 A for electron. However, it is estimated that about half of the HOM power generated in superconducting cavity emit to the downstream beam pipe, increasing the load on the downstream cavity's HOM damper. Additional SiC dampers have been installed to the downstream section. It has been confirmed that the SiC damper reduces HOM power absorbed by ferrite dampers of the downstream cavities. In this report, we will describe the results of beam test with the SiC dampers and the evaluation of the equivalent loss factor of dampers.

### 1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、非対称なエネルギーを持つ電子・陽電子を衝突させるリング型 B-factory である。ルミノシティの向上のため、SuperKEKB の設計蓄積ビーム電流は、陽電子用リングである Low energy ring (LER) で 3.6 A、電子用リングである High energy ring (HER) で 2.6 A である [1]。これは、KEKB での最大蓄積電流の 2 倍近くとなる。現在までに、最大蓄積電流は LER で 1.4 A、HER で 1.1 A が達成され、ピークルミノシティは、KEKB の 2 倍を超える  $4.7 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$  を記録している。

HER では、KEKB 用に開発された高調波 (Higher-Order-Mode, HOM) 減衰型超伝導空洞が用いられており [2, 3]、ビームが励起する HOM は口径の大きなビームパイプによって空洞から取り出され、フェライト製の HOM ダンパー [4] によって吸収される。KEKB での達成電流である 1.4 A では、16 kW もの HOM がフェライトダンパーによって吸収された実績がある [5]。SuperKEKB の超伝導空洞は、基本的には KEKB と同様な運用がなされるが、設計ビーム電流の 2.6 A では空洞 1 台で発生する HOM パワーが 37 kW と KEKB の 2 倍以上に増大すると予測されている [6, 7]。特に高い周波数の HOM はさらに下流側に放出され、ほかのコンポーネントに対しての熱負荷となり、最悪の場合機器を破壊する。そのため、SuperKEKB では、この高い周波数の HOM を吸収するため、SiC ダンパーを空洞下流に新たにインストールし、下流側の熱負荷を軽減する。利点としては、

- 安定した長期運転実績のある超伝導空洞の構造を変更せずに済む。
- 空洞についているフェライトダンパーと別のダ

ンパーを用いるため、熱負荷を分散させることができる。

- 空洞へのパーティクル汚染を極力なくして設置、取り外しが可能である。
- 超伝導空洞本体から離れているため空洞へのパーティクル汚染の可能性が小さい。

ことがあげられる。この SuperKEKB 超伝導空洞用 SiC ダンパーはプロトタイプ開発が 2013 年ごろから開始され、1 号機が 2018 年に導入された [6-9]。今回新たに 2 号機を設置しビーム試験を実施したため、これを報告する。

### 2. SuperKEKB 高調波減衰型超伝導空洞

#### 2.1 KEKB 型超伝導加速空洞

SuperKEKB の超伝導加速空洞は、KEKB 用に開発され、10 年以上に渡りビーム運転に利用されたものである。この空洞の特徴として、CW で大電流のビームを加速するため、高調波減衰に重きが置かれ開発されている [2]。Figure 1 に空洞の断面図を示す。空洞の構造として、ニオブ製セルの外側に Small Beam Pipe (SBP)、Large Beam Pipe (LBP) と呼ばれるビームパイプがクライオスタット外まで伸びている。

ビームパイプ径を大きくすることで、空洞のセルで発生した HOM が伝搬できる構造であり、特に LBP はアイリス部より径が大きく、ビームをキックするような低い周波数の HOM が伝搬できる。ビームパイプから伝搬した HOM は空洞両端の HOM ダンパーによって吸収される。空洞の HOM ダンパーはフェライト製で、フェライトは吸収特性はよいが、ビームパイプに接合することが困難であり、Hot Isostatic Pressing (HIP) を用いて銅製ビームパイプに接合されている [4]。フェライト製 HOM ダンパーの先はテーパ形状のダクトとなっており、ウェイク場の発生をなるべく抑える構造となっているが、ここで発生した HOM は反射され、フェライト製 HOM ダンパー

\* okadat@post.kek.jp

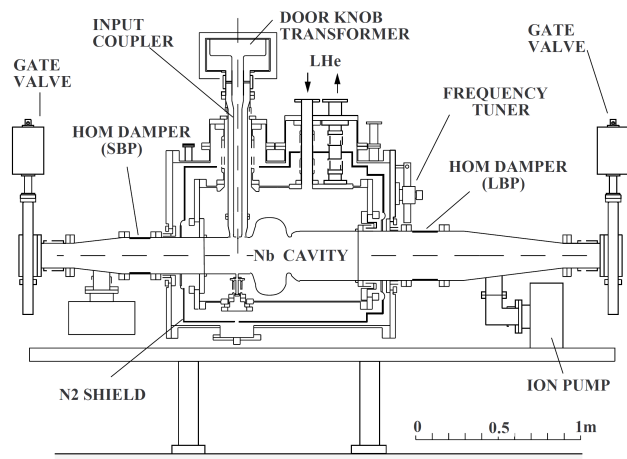


Figure 1: Cross-sectional drawing of SCC for KEKB type HOM damped superconducting cavity [2, 10]. Ferrite HOM dampers were equipped on both SBP and LBP. The LBP and SBP diameters are 300 mm and 220 mm, respectively.

によって吸収される。空洞の両端にはゲートバルブが取り付けられており、外側のビームパイプと接続されている。ビームパイプのカットオフ周波数より高い HOM はビームパイプを通じて空洞の下流に放出され、下流側の空洞の HOM ダンパーの熱負荷となる。

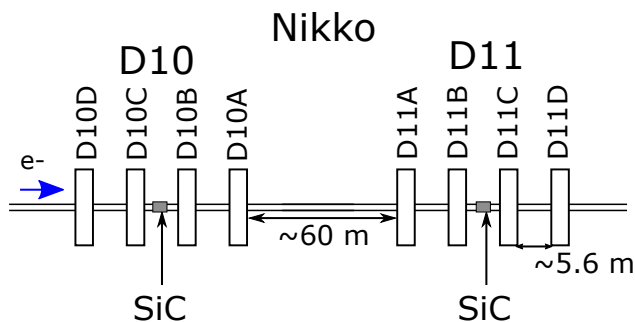


Figure 2: Cavity layout at Nikko section of SuperKEKB. Square symbol shows SC cavity. The electron beam pass from left side to right side. D10D cavity located at the most upstream. SiC dampers were installed downstream of D10C and D11B, respectively. There is the distance section between D10 section and D11 section as around 60 m. The distance of each cavity is around 5.6 m.

SuperKEKB では、KEKB と同様に日光直線部に 8 台の超伝導空洞が設置されている。Figure 2 に日光直線部の空洞と SiC 製 HOM ダンパーの配置を示す。このうち、D10 側 4 台と D11 側 4 台の間には、約 60 m の直線区間がある。空洞間の距離は約 5.6 m あるが、上流の空洞から放出された高い周波数の HOM に対して十分に減衰せず、下流の空洞の HOM ダンパーの熱負荷が重畳されていくことがビーム試験の結果からもわかっている [9]。

## 2.2 SiC 製 HOM damper

高い周波数の HOM のパワー増大に対応するため、すべての空洞下流に追加の HOM ダンパーを導入することを計画しており、Fig. 2 に示す通り、現在までに 2 組の SiC 製 HOM ダンパーをビームラインに設置し、試験を行っている。

フェライトは高周波の吸収効率が良いものの、近年の製作では、HIP での変形や切削工程における割れなどが発生することがあった。一方、SiC は加工がフェライトと比較して容易であり、ガス放出率が少ないこと、クラックなどによるパーティクル汚染の可能性が低いこと、KEKB でのクラブ空洞や ARES 空洞での実績 [11-13] があることなどの利点があるため、SiC 製 HOM ダンパーを採用した。1 組目の SiC 製 HOM ダンパーは 2018 年に D10C 下流に設置され、下流側の D10B の HOM ダンパーの負荷が軽減し、SiC 製 HOM ダンパーの有効性が確認された [9]。この時のビーム運転条件は、HER の蓄積ビーム電流約 760 mA、バンチ電流約 0.5 mA であった。2021 年夏には、D11B の下流側に 2 組目の SiC 製 HOM ダンパーを導入した。

## 3. SuperKEKB の運転における超伝導空洞の実績

SuperKEKB の順調な運転に伴い、2021 年 10-12 月 (2021c) から 2022 年 2-6 月 (2022ab) の運転では、さらなるルミノシティ向上のため、蓄積ビーム電流が大幅に上げられた。2022ab の運転では、8 台の超伝導空洞のトリップレートが 0.07/day/8 空洞と安定した運転実績を得た。また、最大蓄積電流であった 1.1 A 時の典型的なビームパワーは空洞 1 台当たり 250 kW 以上を達成し、安定したビームパワー供給ができている。

2022ab の運転では、蓄積ビーム電流の増加に合わせてバンチ数を徐々に増やす手法が取られた。バンチフィルパターンは、これまで主に 3-RF bucket spacing が使われてきたが、バンチ数増加に伴い今回初めて 2-RF bucket spacing のパターンが用いられた。SuperKEKB では、1-RF bucket は約 2 ns に相当する。

## 4. 解析手法

ここでは、Equivalent loss factor (Eq. LF) を定義し、HOM ダンパーの熱負荷の評価を行う [14]。ビームは空洞の構造によって決定されるロスファクター ( $k$ ) の値によって、パワー ( $P$ ) を失う。

$$P = kqI \quad (1)$$

$q$  はバンチチャージ、 $I$  は蓄積ビーム電流を表す。ロスファクターはビームが失うパワーについての係数であるが、ここでは、実際の HOM ダンパーの熱負荷を考えたい。ロスファクターに依存してビームが失ったパワーは、ダンパーに吸収されたり、ビームパイプを通じて流れていく。このとき、構造全体のロスファクターをダンパー表面やビームパイプ断面のエ

エネルギーフローの比で分配した値を Eq. LF (V/pC) として定義する。

式 1 の  $k$  として Eq. LF を用いれば、ダンパーの熱負荷や下流へ放出するパワーを、それぞれ見積もることができる。

ビーム運転における実際の熱負荷測定では、まず、HOM ダンパーが吸収した熱量を冷却水の出入り口における冷却水温度と流量から得る。また、冷却水はチラーによって、循環し熱の除去が行われるため、温度には周期的な変動がある。Figure 3 に HOM ダンパーの冷却水の変動の例を示す。したがって、吸収

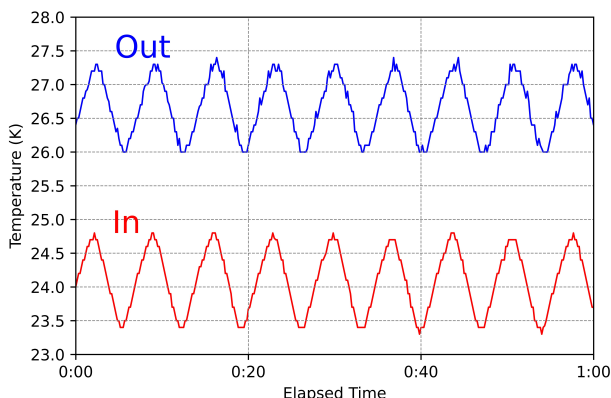


Figure 3: Example of the water temperatures of the HOM damper. The temperatures have oscillated by the temperature stabilization of a chiller. Absorbed power was obtained from the average temperature difference of inlet and outlet temperatures. The temperature was averaged for a long period of time enough to measure temperature differences accurately.

熱量は冷却水の温度の周期変動が無視できるよう十分に時間を長くとした平均から求めた。吸収された熱量  $Q$  は、定圧比熱容量の定義から、

$$Q = \rho c \Delta T f_w \quad (2)$$

と表せる。このとき、 $\rho$  は水の密度、 $c$  は水の比熱容量、 $\Delta T$  は出入口の温度差、 $f_w$  は水の流量を示す。この吸収された熱量をバンチ電流と蓄積ビーム電流の積で規格化することで、Eq. LF を求める。

## 5. ビーム試験結果

### 5.1 SiC 製 HOM ダンパーによる下流側熱負荷の軽減

Figure 4 に D11 側での SiC 製 HOM ダンパーの導入前後での熱負荷の例を示す。横軸は D11 の空洞の HOM ダンパーと SiC 製 HOM ダンパーの位置を示し、左端がビーム上流である。上側の図の縦軸は、吸収熱量を示し、下側の図の縦軸は、D11A の HOM ダンパーの吸収熱量に対する比である。蓄積ビーム電流やバンチ数 ( $n_b$ ) が異なるため、単純な比較はできないが、SiC 製 HOM ダンパー導入前の 2021 年 3-6 月 (2021ab) と、導入後である 2022ab における近

い運転条件での比較を行った。この時の各 HOM ダンパーの熱負荷は 4-6 kW 前後であった。HOM ダンパーの熱負荷は、下流側になるにつれ増加する傾向があるが、SiC 製 HOM ダンパーの導入によって、下流側の HOM ダンパーの熱負荷が軽減されたことがわかる。

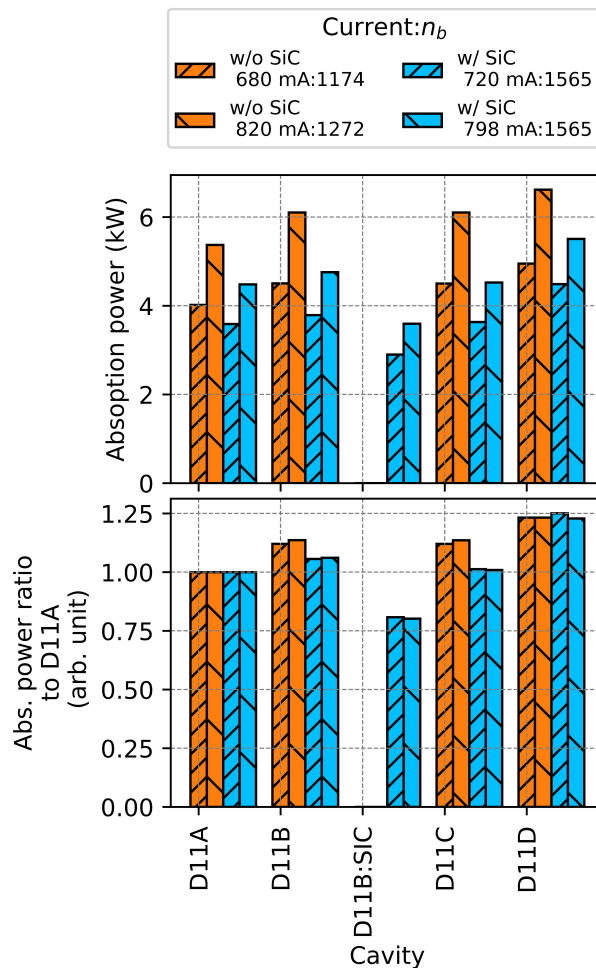


Figure 4: Example of the absorbed power of HOM dampers under a similar operating condition of HER current and bunch number. Orange bars show the absorbed power at D11 HOM dampers before installing SiC HOM damper (operation 2021b). Blue bars show the absorbed power at D11 HOM dampers with SiC HOM damper (operation 2022ab). Bottom figure shows the ratio of absorbed power to the D11A HOM damper (most upstream).

Figure 5 に、いくつかの蓄積ビーム電流での各 HOM ダンパーの吸収熱量を示す。横軸は、各空洞の SBP, LBP フェライト製 HOM ダンパーと空洞間に設置された SiC 製 HOM ダンパーの位置を示す。Figure 4 同様、左端がビーム上流である。各蓄積ビーム電流で SiC 製 HOM ダンパーの吸収熱量は大きく、その下流側の空洞のフェライト製 HOM ダンパーの熱負荷が大きく減少している結果を得た。今期の 2022ab 運転では、それぞれの HOM ダンパーの吸収

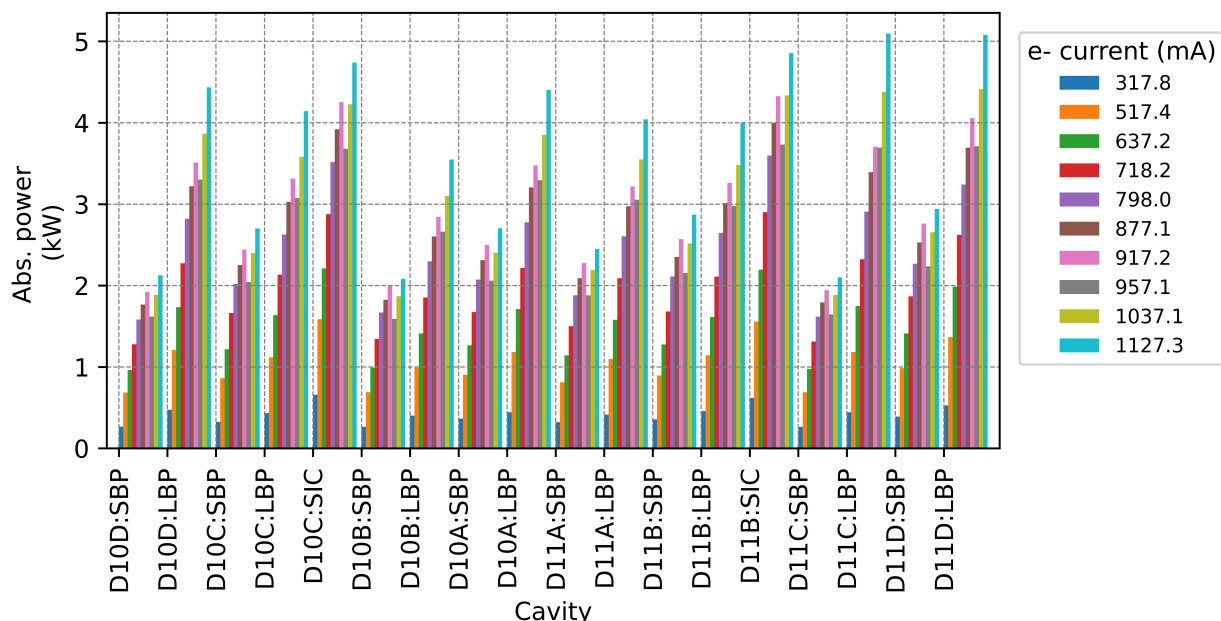


Figure 5: Absorbed power of each HOM damper with HER current. Horizontal axis shows location of HOM damper.

熱量は最大約 5kW@1130mA であった。空洞全体で見ると、SBP と LBP のフェライト製 HOM ダンパーでの熱負荷の合計として、約 8kW 程度であった。現在の蓄積ビーム電流ではこの熱負荷は問題とならないが、今後予定される蓄積ビーム電流 2 A 以上の運転にあっては、吸収量増加に伴いダンパー温度の上昇が想定される。フェライトの割れ防止の観点から、銅ダクトの温度は 60 度以下に保つ必要がある [6]、熱負荷の分散のために SiC 製 HOM ダンパーをすべての空洞間に導入する必要がある。現在のチラーの冷却能力は空洞 1 台当たり 27kW であり、冷却能力の増強も必要である。具体的には、現在は SiC 製 HOM ダンパーの冷却は空洞のフェライト製 HOM ダンパーに寄生した冷却水経路を用いているが、別のチラーを用いるなどの独立した冷却系を構築する対策が必要である。

## 5.2 Eq. Loss Factor

各 HOM ダンパーの吸収熱量から、Eq. LF を求める。上述の定義から、Eq. LF は蓄積ビーム電流とバンチ電流あたりの吸収熱量として求める。Figure 6 に Eq. LF をバンチ電流を横軸として示す。SBP のフェライト製 HOM ダンパーと SiC 製 HOM ダンパーの Eq. LF は、バンチ電流の増加に対してほぼ一定か、わずかに減少する傾向がみられた。一方、LBP の Eq. LF はバンチ電流によらず、ばらつきが生じた。

## 5.3 Eq. LF の Bunch 数依存性

バンチ電流とバンチ長の関係は測定されている [15] ことから、Fig. 6 に示した SiC 製 HOM ダンパーの Eq. LF のバンチ電流依存性はバンチ長依存性を示していると考えられる。Eq. LF はロスファクターを各場所での熱負荷の分配率を用いて分配したもので

あるため、空洞のロスファクターとしては SPB、LBP のフェライト製 HOM ダンパーの和として考えられる。このとき、熱負荷の分配率は一定である必要はないが、ロスファクターがバンチ長に依存しているため、Eq. LF もバンチ長に依存するはずである。しかし、Fig. 6 に示すように、LBP の HOM ダンパーの Eq. LF はバンチ電流に対して一意的でなかった。

3 章でも述べたが、今回の運転では、これまでと異なり、蓄積ビーム電流を増加するに従い、バンチ数を増やす手法がとられたため、バンチ数についての依存性を確認した。Figure 7 に、Eq. LF を、横軸をバンチ数として示す。LBP のフェライト製 HOM ダンパーでは、バンチ数に依存して Eq. LF が増加する傾向が得られた。

空洞はビームによって誘起された HOM にも共振するため、バンチ間隔 ( $T_b$ ) が HOM の decay time ( $T_d$ ) より長い場合、build-up される。SuperKEKB の空洞における HOM のうち、特にインピーダンスが高い TM011 と TM020 の周波数と  $R_{sh}/Q_0$  と  $Q_0$  を、Table 1 に示す。HOM はそれぞれが、全電場のフーリエ成分

Table 1: Measured Frequency And the  $Q$  Value of Monopole HOM's [16].

Frequency (MHz)	mode	$R_{sh}/Q_0$ ( $\Omega$ )	$Q_0$	LF (V/pC)
1018	TM011	6.6	106	0.0106
1027	TM020	6.4	95	0.0103

のひとつとして考えられるので、それぞれの単一の HOM にたいして考えることができる。空洞に残っていた HOM ( $V_{HOM}$ ) は、 $\tau = \frac{T_b}{T_d}$ 、 $\delta = (\omega_{HOM} - \omega_{RF})T_b$  と

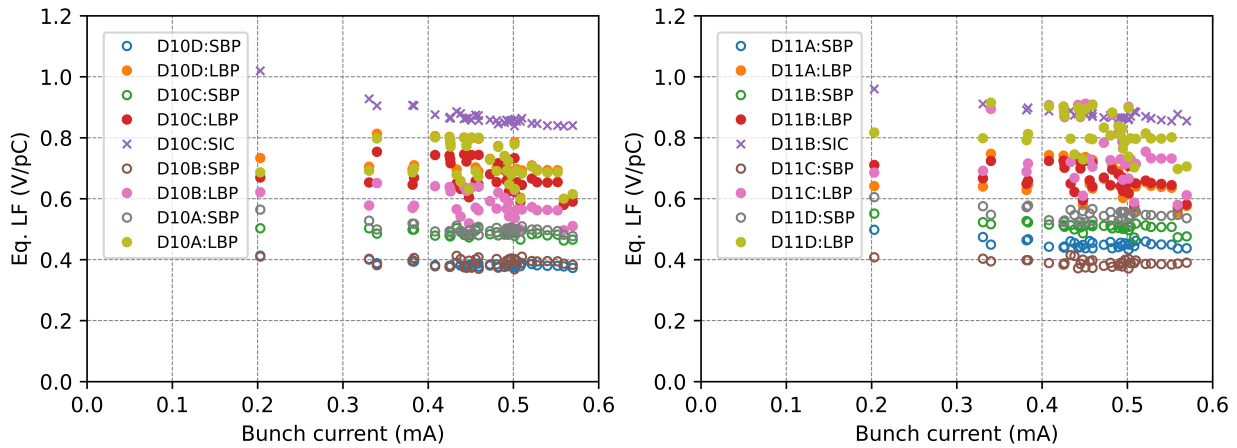


Figure 6: Equivalent loss factor with respect to bunch current. Left figure show D10 HOM dampers and SiC HOM damper. Right figure show D11 HOM dampers and SiC HOM damper. SBP and SiC HOM damper were depend on the bunch current. LBP HOM damper was scattered in the bunch current.

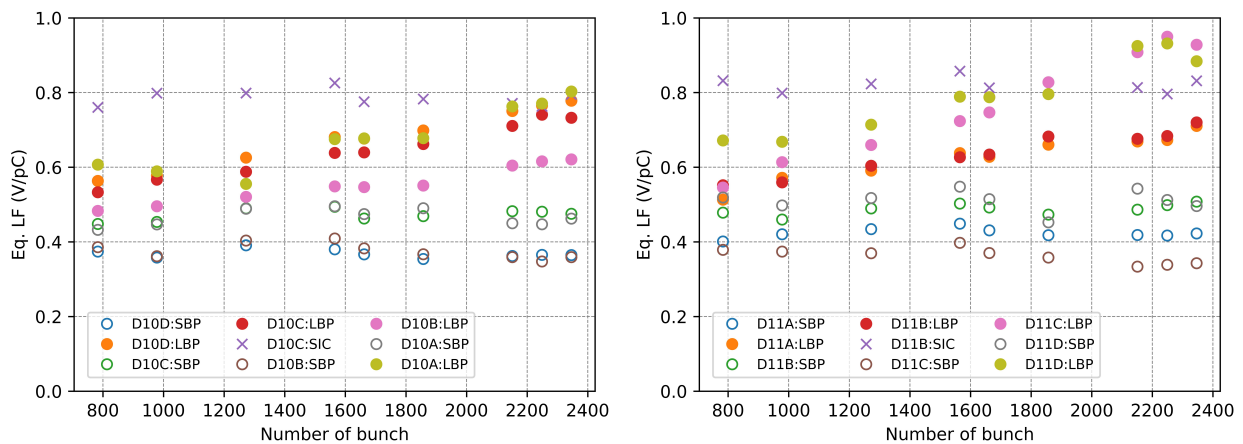


Figure 7: Number of bunch dependence of Eq. LF. Eq. LF at LBP increased with number of bunch.

定義すると、次のバンチが来る  $T_b$  後には、 $V_{\text{HOM}}e^{-\tau}e^{i\delta}$  だけ減衰し位相が回転する。このとき、 $\omega_{\text{HOM}}$  は HOM の共振角周波数、 $\omega_{\text{RF}}$  は加速モードの共振角周波数とした。2-RF bucket spacing の場合は  $T_b = \text{約 } 4\text{ ns}$  後に、3-RF bucket spacing の場合は  $T_b = \text{約 } 6\text{ ns}$  後に、次のバンチが通過する。single bunch-induced voltage を  $V_{b0}$  とすると、全体の積み重ね  $V_{\text{beam}}$  はバンチ自身が誘起した電圧の半分は感じるため、

$$V_{\text{beam}} = V_{b0} \left( \frac{1}{1 - e^{-\tau}e^{i\delta}} \right) = -V_{b0}F(\tau) = V_{\text{HOM}} \quad (3)$$

が成り立つ。ここで、 $F(\tau)$  を定義した。このとき、HOM のパワーとなるのは、

$$P = \frac{|V_{\text{beam}}|^2}{R_{\text{sh}}} \quad (4)$$

であるため、Eq. LF の定義からこの比で LF が分配される。これら仮説については、CST などの計算機を用いたロスファクターとの比較を通じて今後より詳細な検証を進めていく。

## 6. まとめと今後

SuperKEKB の HER の加速に用いられている超伝導空洞では、蓄積ビーム電流の増加によって HOM パワーの増大が懸念される。その対策として、SiC 製 HOM ダンパーを空洞間に設置することにより、下流側の熱負荷を低減する。2021 年夏に新たに導入したものを含めて、2 組の SiC 製 HOM ダンパーが導入されている。2022ab の運転では、2 組の SiC 製 HOM ダンパーの導入により、下流側の空洞に備え付けられたフェライト製 HOM ダンパーの熱負荷の軽減が確認された。また、Eq. LF はバンチ電流以外にバンチ数にも依存することがわかり、特に LBP 側 HOM ダンパーで顕著であることが分かった。今後、蓄積ビーム電流の増強に伴う HOM パワー増加の見積り再検討などが必要である。HOM パワー増強の対策としては、チラーの増強が必要となるが、重要な今後の課題としてバンチ数の依存性がなぜ生じるかの解明がある。今後、計算機を用いて複数台の空洞

を含めた Eq. LF の検証、2 バンチとの相互作用を含めた検証を行っていく。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2013, no. 3, p. 03A011, 2013.; <https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>
- [2] T. Furuya *et al.*, “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-Factory”, in *Proc. SRF’ 95*, Gif-sur-Yvette, France, Oct. 1995, paper SRF95F35, pp. 729–733; <https://accelconf.web.cern.ch/SRF95/papers/srf95f35.pdf>
- [3] S. Mitsunobu *et al.*, “High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity”, in *Proc. SRF’ 95*, Gif-sur-Yvette, France, Oct. 1995, paper SRF95F36, pp. 735–739; <https://accelconf.web.cern.ch/SRF95/papers/srf95f36.pdf>
- [4] T. Tajima, “Development of Higher-Order-Mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities”, KEK Report 2000-10(2000).
- [5] Y. Morita *et al.*, “Status of KEKB Superconducting Cavities and Study for Future SKEKB”, Proc. SRF2009, Berlin, Germany, Sep. 2009, TUPPO022, pp. 236–238; <http://accelconf.web.cern.ch/SRF2009/papers/tuppo022.pdf>
- [6] M. Nishiwaki, K. Akai, T. Furuya, A. Kabe, S. Mitsunobu, and Y. Morita, “Developments of HOM Dampers for SuperKEKB Superconducting Cavity”, in *Proc. SRF’ 13*, Paris, France, Sep. 2013, paper THP061, pp. 1058–1060; <https://accelconf.web.cern.ch/SRF2013/papers/thp061.pdf>
- [7] M. Nishiwaki, K. Akai, T. Furuya, A. Kabe, S. Mitsunobu, and Y. Morita, “Developments of SiC Damper for SuperKEKB Superconducting Cavity”, in *Proc. SRF’ 15*, Whistler, Canada, Sep. 2015, paper THPB071, pp. 1289–1292; <https://accelconf.web.cern.ch/SRF2015/papers/thpb071.pdf>
- [8] M. Nishiwaki *et al.*, “SuperKEKB Phase-1 における超伝導空洞の運転状況と SiC ダンパーの開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 914–918; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP037.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP037.pdf)
- [9] M. Nishiwaki *et al.*, “SuperKEKB Phase2 における超伝導空洞の運転状況”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 428–432; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP049.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP049.pdf)
- [10] T. Furuya *et al.*, “Recent Status of the Superconducting Cavities for KEKB”, in *Proc. SRF’ 99*, Santa Fe, NM, USA, Nov. 1999, paper MOP001, pp. 31–36.
- [11] T. Kageyama *et al.*, “The ARES cavity for KEKB”, Conf. Proc. of APAC98, pp. 773–775, 1998
- [12] Y. Takeuchi *et al.*, “HOM absorber for the ARES cavity”, Conf. Proc. of PAC97, 3, 2986–2988 vol.3, 1997,
- [13] Y. Morita *et al.*, “HOM Dampers for KEKB Crab Cavity”, Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010, p.537-540.
- [14] Y. Morita, “Superconducting cavity”, presented in the 23rd KEKB Acc. Review, KEK, Mar. 3-5, 2014.
- [15] G. Mitsuka, presented in the 23rd KEKB Acc. Review, KEK, Jul. 8-10, 2019; <https://www-kek.k.kek.jp/MAC/2019/>
- [16] KEKB B-Factory Design Report, KEK, Jun. 1995.