

## HOM DAMPERS FOR KEKB CRAB CAVITY

Yoshiyuki Morita #, Shinji Mitsunobu, Takaaki Furuya, Yasuchika Yamamoto, Teruya Honma, Kota Nakanishi  
Accelerator Laboratory, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0081

### Abstract

KEKB accelerator is a high luminosity electron positron collider with high beam currents. Two crab cavities were installed in the KEKB ring in January 2007 and the crab crossing operation was started. The ferrite HOM dampers of the crab cavity successfully absorbed HOM powers more than 10 kW and enabled the cavity operation with high beam currents. KEKB recently achieved the world record of the luminosity of  $21 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ . The HOM dampers contributed to stable operations of the crab cavity at high beam currents. We will present HOM dampers for the crab cavity, absorbed HOM powers in the HOM dampers during high beam current operations and an addition of SiC HOM damper for higher beam current operations.

## KEKB クラブ空洞の HOM ダンパー

### 1. はじめに

電子・陽電子非対称衝突型加速器KEKB<sup>[1]</sup>は 1998 年 12 月の運転開始以来、有限角交差衝突を行いながら大量のB中間子を生成し、物質・反物質の対称性の破れの研究などを推進してきた。一方でKEKでは長年クラブ空洞の研究開発を行っており<sup>[2]</sup>、2007 年には完成した超伝導クラブ空洞を高エネルギー電子リング (HER)、低エネルギー陽電子リング (LER)にそれぞれ 1 台ずつ入れて<sup>[3]</sup>、世界で始めてのクラブ交差衝突運転を開始した<sup>[4]</sup>。このクラブ空洞<sup>[5]</sup>は超伝導空洞内で励起された高い高周波電磁場によってビームを水平方向にキックする。ビームバンチ先方と後方ではキックする方向が反対となり、ビームバンチを傾ける。傾いた電子ビームバンチと陽電子ビームバンチは衝突点で有限角を持ちながら交差するが、ビームバンチの傾きを有限交差角度と等しく取ることによって正面衝突と同じ効果を得ることが出来る。この交差のことをクラブ交差と呼んでいる<sup>[6,7]</sup>。

クラブ空洞では同軸カプラー終端部 (240 )に 1 つ、大口径ビームパイプ (LBP,240 )に 1 つの HOM ダンパーがついている。HOM ダンパーの機能は 2 つある。1 つは空洞の寄生モードの減衰である。特にKEKBのような大電流加速器ではビーム不安定性が起きないように、十分減衰した設計が必要である<sup>[8]</sup>。もう 1 つの機能は空洞内で発生する HOM パワーの吸収である。大電流を蓄積するため吸収パワーは 10 kW を超える。この HOM パワーを吸収することによって、機器の発熱、破壊を防ぐことが出来る。このように HOM ダンパーは大電流運転にとって必要不可欠な機器となっている。

特に LER は蓄積電流が大きく (1.7A)、大きな HOM パワー (~20 kW) を吸収する必要があったが、クラブ空洞下流に設置されている SiC ダンパーも HOM パワー吸収に寄与し問題なく吸収できた<sup>[9]</sup>。

これらのダンパーの性能がクラブ空洞の長期間の大電流運転を可能にし、また KEKB 加速器のピークルミノシティ世界記録の更新に寄与した。

本稿は KEKB クラブ空洞の HOM ダンパーについて、クラブ空洞運転開始から KEKB 運転終了までの HOM パワー吸収をまとめたものである。

### 2. HOM ダンパーと HOM パワー

本クラブ空洞の HOM ダンパーは KEKB 超伝導加速空洞用に研究開発されたものである<sup>[10]</sup>。フェライト粉末を銅のパイプに高温高圧で焼結 (Hot Isostatic Press, HIP) させて銅パイプ内表面に厚さ 4 mm のフェライトを形成し、外表面を銅パイプの冷却配管で囲み水冷する。口径は同軸ダンパー、LBP ダンパーともに 240 である。

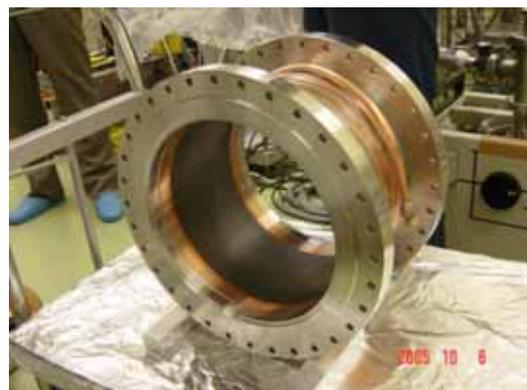


図 1 : クラブ空洞の HOM ダンパー

予想される HOM パワーは ABCI 計算コードによって空洞のロスファクターを求めて計算した。ロスファクターは HER クラブ、LER クラブともに 0.88V/pC である。一方、全 HOM パワーの同軸ダンパーと LBP ダンパーの分配比率も設計上重要な値となる。この比率を求めるため MAFIA 電磁場解析コードを用いて、ビームが通過した場合の電磁場を時間の関数で求め、同軸方向、LBP 方向の HOM パ

# Yoshiyuki.morita@kek.jp

ワーの流れを導いた。その結果、同軸/LBP 比は 0.22 であり、同軸方向に大きなパワーは来ないことが判明し、同軸部の設計、同軸ダンパーの設計に役立てた。一方大部分の HOM パワーは LBP ダンパーに集中する。また LBP ダンパーは直接ビームが作る電磁場を感ずるので、この電磁場による発熱 (self-loss) も考慮しなければならない。計算からパンチ長 6 mm での self-loss はロスファクターにして 0.25V/pC であった。以上の計算結果をまとめて、HER、LER の運転電流でのそれぞれのダンパーの負荷を示したものが表 1 である。

表 1 : 予想されるダンパー負荷

Ring	ビーム電流 (A)	同軸負荷 (kW)	LBP 負荷 (kW)
HER	1.35	2.6	12.2
LER	1.7	4.1	19.2

LER クラブ空洞の LBP ダンパーの負荷は LER 電流が 1.7A のとき 19 kW となり、本当に吸収できるのか疑問視されていた。ダンパー単体の電力試験では 10 kW を最大吸収量としていたが、同じ構造の加速空洞用 SBP ダンパー (220 ) では最大 18 kW の吸収試験を行っても問題なかったため、恐らく吸収できると予想された。また LER クラブ空洞のテーパー (240 150 ) 下流には 150 の SiC ダンパーが挿入されている。これは下流のテーパー (150 94 ) の HOM パワーを吸収するためであるが、MAFIA によるシミュレーションでは SiC ダンパーもクラブ空洞で発生する HOM パワーの吸収に寄与すると考えられるので、LER 空洞の LBP ダンパー負荷はもっと減ると予想された。

### 3. HOM ダンパーの負荷

#### 3.1 クラブ空洞運転直後の HOM パワー

2007 年初頭に KEKB リングに組み込まれたクラブ空洞は 2 月よりビーム運転を開始した。運転開始からしばらくは低電流 (30 mA) によるクラブ交差調整運転が続き、HOM パワーも殆ど観測されなかった。低電流での調整が終了しビーム電流を徐々に上げながら大電流運転に移行しようとしたが、クラブ空洞のように新規にリングに入れられた真空コンポーネントは、まだガス放出が多く、放電を起こす頻度が多かった。そこで、従来の有限角交差衝突が再現できることを確認するため、クラブ空洞をデチューンして電流を上げていった。このとき蓄積した電流は 1.2A/1.4A (HER/LER) である。この後クラブ空洞は 300K まで加温され、内部に凝縮したガスを排気した後ヘリウム温度まで冷却され、再度クラブ交差運転が行われた。このクラブ交差運転では電流を順調に蓄積することが出来、クラブ空洞がチューンされた状態での蓄積電流が 0.7A/1.3A (HER/LER) に達し、またクラブ空洞デチューンでの

有限角交差衝突では 1.35A/1.7A (HER/LER) と従来同様のビーム電流蓄積に成功した。たとえクラブ空洞に何らかの不具合が生じてクラブ交差が出来なくなっても、従来の有限角交差に戻ってルミノシティを出すことが可能であることを証明し、KEKB 運転の可能性を広げることが出来た。

クラブ空洞はデチューンされていても電流を蓄積する限り HOM パワーは HOM ダンパーによって吸収されなければならない。クラブ空洞の HOM ダンパーは問題なく HOM パワーを吸収し、大電流運転を可能とした。図 2 に蓄積電流に対する同軸、LBP ダンパーの吸収熱量を示す。図中の実線は計算によって求められた HOM パワーの予想値である。HER クラブ空洞の HOM ダンパーは 20% 少ないがほぼ計算値を再現している。また同軸、LBP ダンパーの吸収比率も一致している。一方 LER クラブ空洞の HOM パワー吸収量はずっと低い値となり、計算値の 50% しかない。空洞下流の SiC ダンパーも HOM パワー吸収に寄与していると考えられた。SiC ダンパーには発熱量を計測する計器がついていなかったが、表面温度が高かったため 10 kW 以上の熱吸収を行っていると考えられた。LER クラブ空洞の HOM パワーを測定するには、SiC ダンパーの負荷を測定する必要があり、夏季運転停止期間に冷却水の温度計、流量計が設置された。また LBP ダンパーは負荷が高いため冷却水流量を 5 7L/min (LER 側ダンパーは更に 7.5 L/min ) に上げている。表 2 に 2007 年運転開始から夏季運転停止までに達成した HOM パワー吸収量を示す。

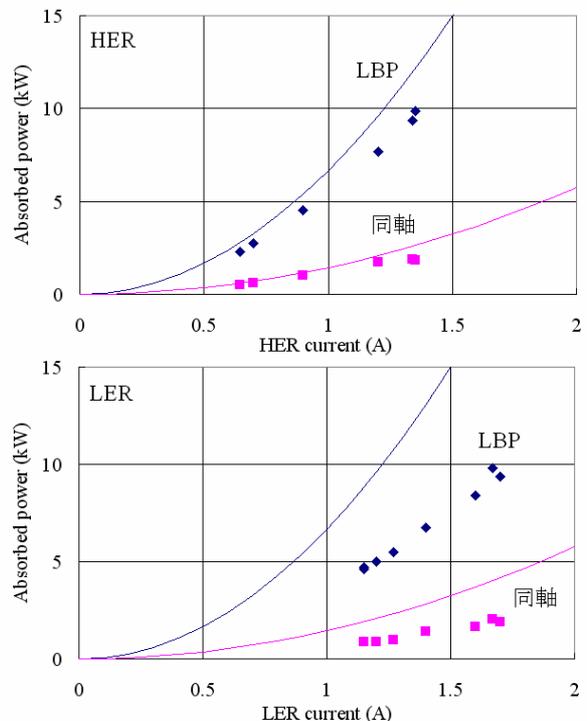


図 2 : 大電流運転での HER ダンパー負荷 (上) と LER ダンパー負荷 (下)。実線は計算による予想値を表している。

表 2 : 大電流運転でのダンパー負荷

Ring	ビーム電流 (A)	同軸負荷 (kW)	LBP 負荷 (kW)
HER	1.35	1.9	9.9
LER	1.7	2.0	9.8

### 3.2 その後の HOM パワーの変化

2007 年後期の運転からクラブ空洞はチューンされたままクラブ交差衝突を維持し、LER は 1.6A の蓄積電流、HER は加速器のチューニングに応じて 0.8A から 1.2A まで徐々に増強されていった。クラブ交差ではバンチ電荷が高いとルミノシティの効率を悪くする問題があったので、同じ運転電流でもバンチ数を増やし、バンチ電荷を抑えたフィルパターンで運転されている。従来の大電流運転では 3.5RF パケット間隔 (S3.5)、1389 バンチ運転であったが、2007 年 10 月以降は殆ど 3.06RF パケット間隔 (S3.06)、1585 バンチで運転されている。バンチ電荷が下がったことで、HOM パワーも多少緩和された。一方、フィルパターンの違いによってビームスペクトルも変わる。図 3 は S3.5 と S3.06 のビームスペクトルを表している。図のように S3.5 はスペクトル強度の強い場所に空洞の共振周波数は存在しない。一方 S3.06 ではスペクトル強度が分散しており同軸カプラーの共振周波数の近傍に強度の強いスペクトルが存在する。同軸カプラーの共振モードは励振し、同軸ダンパーの負荷を上げる。図 4 は LER 空洞の同軸ダンパーの負荷を S3.5 と S3.06 のフィルパターンで比較したものである。S3.06 は S3.5 に比べて 1.8 倍負荷が高い。ただし、増加量自体は 1.6A 運転時でも 1 kW 以下であり、負荷としては殆ど問題とならない。S3.06 のスペクトルは空洞の低次共振周波数 (LOM) を避けているため強い励振はなく、LBP ダンパーの負荷に変化はない。

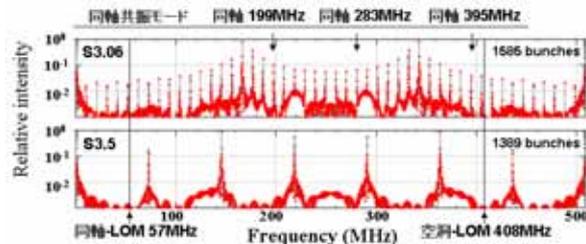


図 3 : フィルパターンによるビームスペクトルの違いと同軸及び空洞共振周波数。S3.06 では幾つかの同軸共振モードが励起振動する。

またこの運転以後 LER 空洞下流の SiC ダンパーの吸収熱量が測定できるようになった。SiC ダンパーの負荷は 1.6A 運転で 14 kW であった。例として SiC ダンパーの負荷を加えた LER 空洞の HOM パワーを表 3 に示す。SiC ダンパーの self-loss は ARES 空洞グループの測定から、ロスファクター 0.41V/pC である。SiC ダンパーを加えた HOM パ

ワーは 16.4 kW であり、計算値よりも 10%多いがほぼ再現している。SiC ダンパーもクラブ空洞の HOM パワー吸収に寄与していることが明らかとなった。

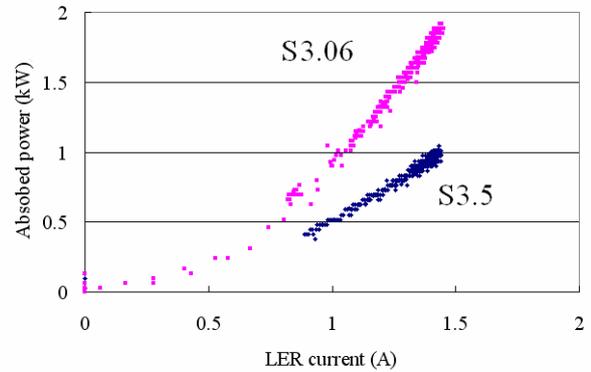


図 4 : LER 同軸ダンパーの負荷の変化

表 3 : SiC ダンパーを加えた LER の HOM パワー

@1.6A	同軸	LBP	SiC	Total
全負荷(kW)	2.5	10.5	14	27
Self (KW)	-	4.0	6.6	
HOM (kW)	2.5	6.5	7.4	16.4

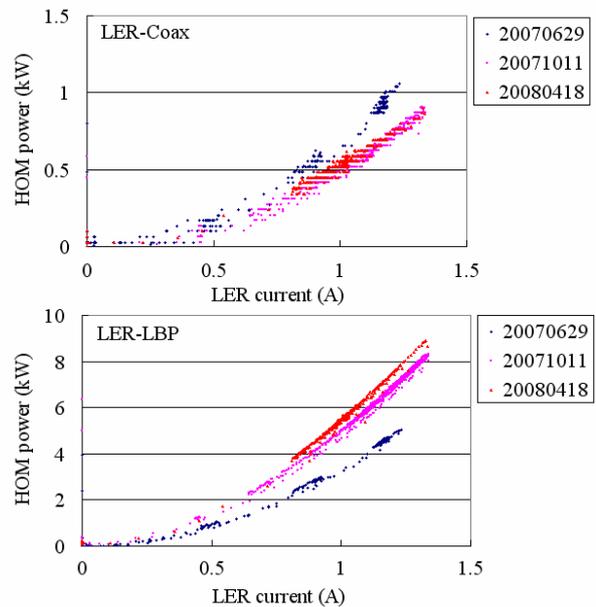


図 5 : 2007 年前期運転とその後のダンパー負荷

2007 年前期運転とその後の運転では LER クラブ空洞の HOM ダンパーの負荷に違いが生じている。図 5 に S3.5 のフィルパターンによる同軸ダンパー LBP ダンパーの負荷を示す。2007 年前期運転の負荷 (青色) はその後のダンパー負荷 (ピンク、赤色) と明らかな差があり、同軸ダンパーの負荷は減り、LBP ダンパーの負荷は増えている。2007 年前

期運転では SiC ダンパーの負荷が測定できていないので全 HOM パワーが変化したかは不明だが、この突然の負荷変動の原因は解明されていない。

### 3.2 SiC ダンパーの追加と HOM パワー

2009 年の運転ではクラブ交差運転が順調に行われた。また新規に導入した skew 六極電磁石での補正がビームクオリティーを改善し、6 月にはピークルミノシティー 21/nb/s の世界新記録を樹立した。KEKB 運転では更なる電流増強が望まれたが、LER の電流が 1.64A で SiC ダンパーの負荷が 15 kW となっていた。また LBP ダンパーの負荷も 12 kW を超えた。SiC ダンパーの電力試験は 10 kW までであったことから、長期運転での SiC ダンパーの負荷を 15 kW と定め、これ以上の HOM パワーには SiC ダンパーを追加することで対応することとした。SiC ダンパーを追加するにはテーパー部 (150φ) に挿入することが最も都合がよい (図 6)。SiC ダンパー挿入に伴って、テーパー部は短くなり全体のロスファクターは 2% 増加するが大きな問題ではない。もともと SiC ダンパーの self-loss が大きいのでこの改造によって大幅な負荷の低減は期待できなかったが、HOM パワーが LBP ダンパーと SiC ダンパーに等しく分配されると仮定すると、SiC ダンパーの負荷が 11 kW まで減り、1.8A までの電流増強が可能となる。

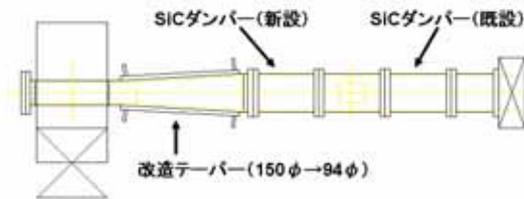


図 6 : 新設 SiC ダンパーと改造テーパー

2009 年夏季運転停止期間中に LER 空洞下流のテーパー部改造と予備 SiC ダンパーの取り付けが行われた。その後 2009 年後期運転が開始され、LER の運転電流は 1.7A まで増強された。SiC ダンパーの追加によって全 HOM パワーは挿入前より 10% ほど増加した。また、HOM パワーは SiC ダンパー同士で分配し、期待通りダンパー負荷を減らした。LBP ダンパーの負荷は予想に反して下がらなかったが、SiC ダンパー負荷の軽減という当初の目的は達成した。

これ以後のKEKB運転は、積分ルミノシティーが  $1000\text{fb}^{-1}$  を超えたことや、KEKB加速器の改造計画が進行するに伴って、高ルミノシティー物理ランから、エネルギーキャン、マシンスタディー重視の方向へ変化し、1.7A以上の電流増強は無かった。クラブ交差衝突運転での最大電流は 1.25A/1.7A (HER/LER)であり、この運転電流でのダンパー負荷を表 4 に示す。

表 4 : クラブ交差運転での最大ダンパー負荷

	同軸	LBP	SiC	SiC2
HER 負荷(kW)	3.0	6.9	-	-
@1.25A				
LER 負荷(kW)	2.5	12.4	13.0	12.2
@1.7A				

## 4. まとめ

クラブ空洞の HOM ダンパーは HOM パワーを十分吸収して大電流運転を可能とし、ルミノシティーの記録更新に大きく貢献した。特に LER ではフェライトダンパーと SiC ダンパーによって 1.7A の電流蓄積に成功した。1.7A はダンパー負荷の限界ではなく、1.8A への電流増強も可能であった。

ダンパー負荷から求まる HOM パワーはほぼ計算値と一致したが、LER 空洞の同軸ダンパーの負荷は計算と一致しなかった。また LER 空洞では運転停止期間の前後で HOM パワーが変化するなど理解できていない現象もある。

## 5. 謝辞

LER クラブ空洞は大電流で運転されたため、HOM ダンパーに関しては空洞設置後もいろいろと改造する必要があった。特に SiC ダンパーの冷却水流量増強や、テーパー部改造、SiC ダンパーの追加作業など KEKB 真空グループの方々に大変お世話になった。SiC ダンパーの製作や追加の検討、そのロスファクターの計算など ARES グループの方々に大変お世話になった。深く感謝します。最後に、様々な協力をして頂いた KEKB 関係者の方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] “KEKB Accelerator Papers”, KEK Preprint 2001-157, Dec. 2001, A.
- [2] K. Hosoyama et al., “Crab Cavity Development”, Proceedings of the 12th International Workshop on SRF, Ithaca, NY, USA, July 10-15, 2005.
- [3] Y. Morita et al., “Crab Cavity Development”, Proceedings of the APAC2007, Indore, India, Jan. 29-Feb. 2, 2007.
- [4] Y. Funakoshi et al., “Performance of KEKB with Crab Cavity”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008.
- [5] K. Akai et al., Proceedings of the 15th International Conference on High Energy Accelerators, 1993, p. 757.
- [6] R. B. Palmer, SLAC-PUB-4707, 1988.
- [7] K. Oide and K. Yokoya, SLAC-PUB-4832, 1989.
- [8] Y. Morita et al., Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, Japan July 20-22, 2005, p. 630.
- [9] Y. Morita et al., Proceedings of the 13th International Workshop on RF Superconductivity, Peking University, Beijing, China, Oct 15-19, 2007, p.623.
- [10] T. Tajima, KEK Report 2000-10, September 2000, A.