

DEVELOPMENT OF COMB-TYPE RF BRIDGE

Yusuke Suetsugu^{1,A)}, Kyo Shibata^{A)} and Mitsuru Shirai^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

A comb-type RF bridge (shield) has been developed and applied to bellows chambers and gate valves in a chain of R&D of the vacuum system for advanced high intensity accelerators. The comb-type RF bridge has a structure of nested comb teeth, and has higher thermal strength and lower impedance than those of a conventional finger-type one. Various types of bellows chambers and gate-valves with the comb-type RF bridge have been installed in the KEK B-Factory (KEKB) rings since 2003 in series. The decrease in temperatures of the bellows and the body of gate valves was observed by using the comb-type RF bridge. The availability of the bridge has been demonstrated up to a beam current of 1.7 A with 1389 bunches and for a bunch with a length of approximately 7 mm.

櫛歯型RFブリッジの開発

1. はじめに

加速器に使用されるベローズチェンバーやゲートバルブには、内部にRFブリッジ(シールド)と呼ばれる機構が備わっている。RFブリッジは、機器内部の隙間や空洞を埋めてバンチに伴う壁電流を滑らかに流すことで、高調波成分(Higher Order Modes, HOM)の発生を防ぎ、またビームインピーダンスを下げる役割を持つ。これらの機器のRFブリッジは、伸縮機能を保ちつつ電氣的接触を維持する必要があり、従来、薄い金属製のフィンガーをダクト断面形状に並べたもの(フィンガー型)が用いられてきた^[1]。しかし、フィンガー間の隙間から漏れるHOM(特にTEモード)によって機器が発熱し易い、フィンガースライド部の電氣的接触の保証が難しい、フィンガーが薄く熱的に弱いといった問題がある。実際、1 A以上の電流を蓄積しているKEKのBファクトリー(KEKB)では、HOM発生源近くに設置された機器の発熱やフィンガーの損傷が見られている^[2, 3]。さらに大きな蓄積電流や短いバンチ長が要求される将来の加速器ではより深刻な問題となる。この様な状況の下、我々は櫛歯型のRFブリッジを提案した^[4]。これはフィンガー型に比べてインピーダンスが低く、熱的強度も高い。2003年から、ベローズチェンバーやゲートバルブのRFブリッジに適用すべく試作・開発を行ってきた^[4, 5]。ここでは櫛歯型RFブリッジの紹介の後、それらの機器をKEKBリングに設置して行った試験の結果等について報告する。

2. 櫛歯型RFブリッジ

櫛歯型RFブリッジは、従来の薄いフィンガーを使用せず、櫛歯が互いに噛み合った構造をしている^[4]。図1はベローズチェンバーに適用した場合の模式図である。2つの櫛歯(Comb-teeth#1と#2)が重なり合っている。典型的な歯の寸法は、長さ10 mm、幅

1 mmで、櫛歯間隔は2 mmである。櫛歯の径方向の厚みは10 mmである。原理的には、ビームが誘起する壁電流の高周波成分は主に噛み合った櫛歯間の容量で、低周波成分は背後(外側)の通常のRFコンタクト(アウトサイドシールド)を通して流れる。初期型(Ver.0)では櫛歯間の奥にフィンガー(バックフィンガー)も設けていた(図1)。この櫛歯型RFブリッジの特徴は、(1) 歯が厚さ1 mmの銅なので熱的に強い、(2) ダクト内面に段差が無くインピーダンスが小さい、(3) TEモードのHOMが漏れにくい、(4) ダクト内面にスライド部が無いので伸縮時にダストの発生が少ない、(5) 各種のダクト断面に適用できる、等である。例えば、直径94 mmのビームパイプ用のRFブリッジのロスファクターはフィンガー型(ステップ1 mm付き)に比べて1/3~1/4となる。一方、フィンガー型に比べ、ストローク長が短い($\leq \pm 4$ mm)、許容曲げ角が小さい($\leq \pm 20$ mrad)という制限がある。

3. ベローズチェンバーへの適用

最初に適用されたのは円形断面(内径94 mm)を持つベローズチェンバーであった^[4, 5]。櫛歯は無酸素

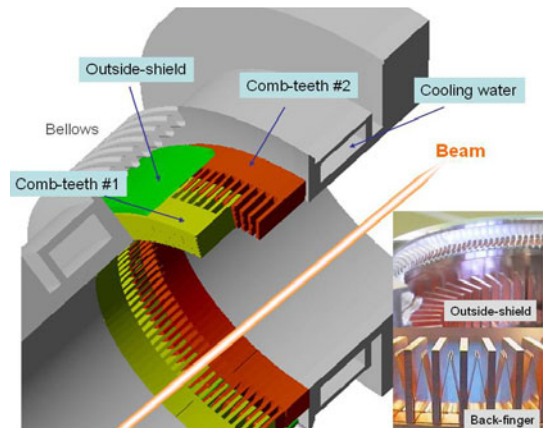


図1 : 櫛歯型RFブリッジの構造

¹ E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp

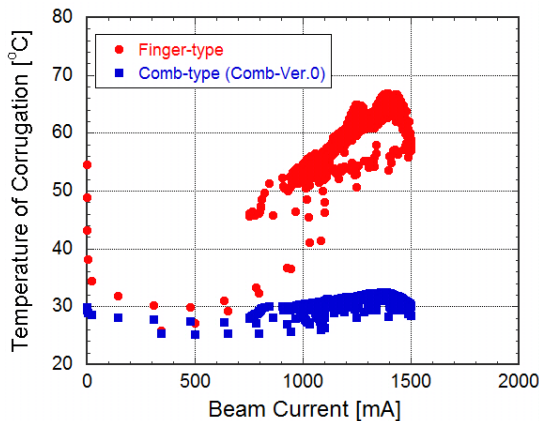


図2：櫛歯型とフィンガー型RFブリッジを持つベローズチェンバーのベローズひだの温度(1389バンチ)。

銅で、ベローズやフランジはステンレス製である。この試作器では、アウトサイドシールドとバックフィンガーが併用されていた(Ver.0)。2003年、KEKB陽電子リングの可動マスクと呼ばれる真空機器の近くに2個設置された。この可動マスクは、リングの中でも強いHOMを発生する機器の一つで^[6, 7]、1.7 Aのビームによって可動マスクで励起されるHOMのパワーは約11 kWである。従来のフィンガー型RFブリッジを持つベローズチェンバーでは発熱が問題となっていた。図2は、同じ場所で従来型と櫛歯型RFブリッジを使用した場合の、ベローズひだの温度を比較したものである。櫛歯型の場合の温度上昇はフィンガー型に比べて約1/6となった。すなわち、RFブリッジを漏れ出るHOMが少なくなった。この時、内部の櫛歯部分の温度は50°C ($\Delta T = 26^\circ\text{C}$)で問題のない範囲であった。また、ベローズひだの温度変化はバンチフィルパターンに鈍感だった。可動マスクには、ユニバーサルベローズと呼ばれる、ベローズと短管を組み合わせたチェンバーが必要である^[6, 7]。このベローズの発熱も問題であった。この可動マスク用のベローズは約 ± 20 mradの曲げが要求されるが、櫛歯型RFブリッジでも適応可能な範囲である。そこで、2004年にKEKB陽電子リングの可動マスク用に4個設置した。櫛歯型RFブリッジを用ベローズでは1.7 A蓄積時でもひだの温度は37°C ($\Delta T = 11^\circ\text{C}$)と、フィンガー型の場合(温度58°C、 $\Delta T = 32^\circ\text{C}$)の約1/3となった。

ベローズチェンバーの試作と並行して、構造を簡略化するために、バックフィンガーを省いたものを考案した(Ver.2)。ただし、歯を径方向に楔型にして横方向オフセット時の接触が外側になるようにした。この構造のRFブリッジを用いた場合、ベローズひだの温度上昇は省かない場合の2倍程度にはなったが、従来型よりもまだ十分低いことがわかった。バックフィンガーを省くことで、構造・製作工程が単純化される。しかし一方、アウトサイドシールド

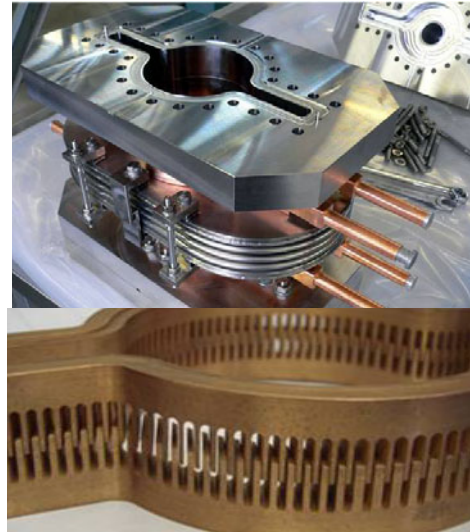


図3：アンテナチェンバー付きビームダクト用のベローズチェンバー(上)と内部の櫛歯構造(下)。

を省きバックフィンガーのみとしたところ(Ver.1)、フィンガー間で放電・発熱が確認された。バックフィンガーのみでは1 Aの電流に耐えられなかったと考えられる。

円形断面に引き続き、レーストラック型断面を持つベローズチェンバーを試作し、2005年にKEKB電子リングに設置した。断面は、幅104~150 mm、高さ50 mmである。このRFブリッジはアウトサイドシールドのみとした(Ver.2)。この場合も、フィンガー型の場合に比べてベローズひだの温度上昇は低下した。ビーム電流は1389バンチで1.4 Aであった。

さらに、将来の大電流加速器のビームダクトは、強烈な放射光に対処するため、ビームチャンネルの側にアンテナチェンバーがあるような複雑な断面になると予想される^[8]。櫛歯型のRFブリッジはこのような複雑な断面形状にも適用できる。図3は2006年に試作されたアンテナチェンバー付きビームダクト用のベローズチェンバーと、その内部のRFブリッジである^[9, 10]。ビームチャンネル部の内径は90 mm、全幅は220 mmである。アンテナチェンバー部の高さは14 mmである。現在陽電子リングに計8個設置され、運転に供している。

4. ゲートバルブへの適用

ゲートバルブもRFブリッジ構造を内部に備えていて、従来はフィンガー型が用いられてきた。KEKBでは、1 A以上のビーム電流での通常運転時、ベローズチェンバーと同じく、発熱やそれに起因する圧力上昇が観測されている。そこで、櫛歯型RFブリッジを適用したゲートバルブをVAT Vakuumentile AGと共同で開発した^[10]。

最初の試作器はやはり円形断面(直径94 mm)を持つKEKB陽電子リング用であった。図4にゲートバルブ用RFブリッジ部を示す(開状態)。ゲートバルブ本体の構造は、RFブリッジ部を除き従来型と同じ



図4：櫛歯RFブリッジを適応した円形断面ゲートバルブの内面(開状態)。

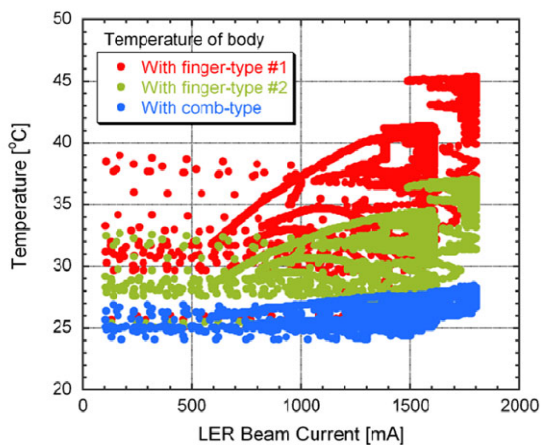


図5：従来型と櫛歯RFブリッジを採用した場合のゲートバルブボディ温度 (1389バンチ)。

である。櫛歯は無酸素銅、筐体(ボディ)はステンレス製である。RFブリッジの基本的構造はペローズチェンバーの場合と同じであるが、ゲートバルブではダストによる真空シールド部への損傷が問題となるため、最初からバックフィンガーを省いてアウトサイドシールドのみとした(Ver.2)。ただし、両端を固定してスライド部は無い。つまり、縮む時(開閉動作時)、バックサイドシールドは外側へ膨らむ。ゲートバルブの場合、横方向のオフセットを考慮する必要が無いので、ペローズチェンバーよりも櫛歯型RFブリッジを適用し易い。試作したゲートバルブは、陽電子リングの可動マスクの近くに設置された。ビーム運転時のボディ温度の変化を図5に示す。1.8 A蓄積時、ボディの温度は38~45°C ($\Delta T = 14 \sim 26$ °C)から28 °C ($\Delta T = 4$ °C)に下がった。ボディ温度の低下は、ボディ内部へのHOMの漏れが小さくなったことを意味する。なお、温度に幅があるのは、ボディの熱容量が大いためである。

2004年、レストラック型断面のゲートバルブを試作し電子リングに設置した。同じくボディの温度低下を確認した。また、ゲートバルブ近傍のペローズの温度上昇も小さくなり、ゲートバルブで発生するHOMも少なくなったことがわかった。

そして、2006年には、ペローズチェンバーと同様、アンテチェンバー付きビームダクトに対応したゲ-

ートバルブを試作し陽電子リングに設置した。1.7 A蓄積後も問題なく動作することを確認した。ただし、ビームに面したステンレス部分が長く、壁電流による発熱が観測されている。銀コーティングなどの対策が今後必要であろう。

5. まとめ

櫛歯型RFブリッジを適用したペローズチェンバーやゲートバルブは、KEKBのビーム試験を通してその有用性が確認された。アンテチェンバー付きビームダクトのような複雑な断面にも対応でき、将来の大電流・短バンチ加速器用の有望なRFブリッジを提供できた。とは言い、KEKBのアップグレード計画であるSuper KEBKではバンチ長は3 mm、蓄積ビーム電流は9.4 Aと現KEKBよりも遥かに条件が厳しい。将来のERLではさらに短いバンチ長が要求される。また、ILCのダンピングリングでは非常に小さいエミッタンスを実現するために、インピーダンスに細心の配慮が要る。これらの加速器にも十分応用できるよう、さらに検討・開発を進めていく予定である。

謝辞

本研究にあたり、KEKの生田勝宣氏、金澤健一氏、影山達也氏、竹内保直氏には有益な助言を多数いただきました。また、エスエスケイバキュームエンジニアリングの川田鶴勇氏、森井実氏にはゲートバルブ製作に関してご尽力を頂きました。ここに深謝します。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, K. Ohshima and K. Kanazawa, Rev. Sci. Instrum. **67** (1996) 2796.
- [2] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, S. Kato, H. Hisamatsu, M. Shimamoto and M. Shirai, J. Vac. Sci. Technol. A **21** (2003) 1436.
- [3] Y. Funakoshi, et al., "KEKB PERFORMANCE", Proc. EPAC2004, Lucerne, July 2004, p.707.
- [4] Y. Suetsugu, M. Shirai and K. Shibata, PRST-AB **6** (2003) 103201.
- [5] Y. Suetsugu, M. Shirai, K. Shibata, K. Murata, M. Kaneko, K. Sakamoto, K. Sugisaki and M. Kawahara, NIM-PR-A **531** (2004) 367.
- [6] Y. Suetsugu, T. Kageyama, K. Shibata and T. Sanami, NIM-PR-A **513** (2003) 465.
- [7] Y. Suetsugu, T. Kageyama, Y. Takeuchi and K. Shibata, NIM-PR-A **533** (2004) 295.
- [8] Y. Suetsugu, Proc. PAC2003, Portland, May 2003, p. 612.
- [9] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, H. Hisamatsu, K. Oide, F. Takasaki, A. E. Bondar, V. Kuzminykh, A. Gorbovsky, R. Dostovalov, K. Sennyu and H. Hara, NIM-PR-A **538** (2005) 206.
- [10] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, M. Shirai, A. E. Bondar, V. S. Kuzminykh, A. I. Gorbovsky, K. Sonderegger, M. Morii, K. Kawada, RSI **78** (2007) 043302.