

DESIGN STUDY OF A MOVABLE MASK WITH LOW BEAM IMPEDANCE

Yusuke Suetsugu^{1,A)}, Kyo Shibata^{A)}, Akira Morishige^{B)}, Yasuaki Suzuki^{B)}, Masao Tsuchiya^{B)}^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{B)} Kinzoku Giken Co. Ltd.

713 Narihira Shake, Ebina, Kanagawa, 243-0424

Abstract

A novel design of a movable-mask (collimator) for high current accelerators is proposed. The mask head is supported by a ceramics rod to reduce the interference with beam. One side of the rod is coated by a thin conductive material to avoid charge up of the head. The head is made of graphite or ceramics coated with copper to avoid the direct damage by an intense beam. The impedances of trapped modes, the loss factors and so on were evaluated by simulation codes. The frequencies and the Q factors of the trapped modes were also measured using a cold model, and compared with calculated ones.

低インピーダンス型可動マスクの検討

1. はじめに

可動マスク(コリメータ)とは、主に衝突型加速器において、正規のビーム軌道から外れて周回する荷電粒子を測定器の手前で遮断し、測定器のノイズを低減するための真空機器である¹⁻³。可動マスクは、そのヘッド(荷電粒子を遮断する物質)がビームの極近傍にあるため、必然的にビームインピーダンスが高くなる。その結果、発生した高次高周波(HOM)によってビーム振動が励起されたり、また、近傍の真空機器が加熱されたりしやすい。可動マスクは、将来の大電流加速器を実現していく上で重要な開発項目の一つとなっている⁴。

ここでは、従来よりも低いインピーダンスを持つ、新しい構造の大電流加速器用可動マスクを提案する。まず、ビームインピーダンスを低減するために、セラミックスロッドでマスクヘッドを支える。また、マスクヘッドはビームによる損傷を受けにくいグラファイトまたはセラミックスに銅コーティングしたものとする。以下、捕捉モードのインピーダンス、

ロスファクターなどの高周波特性を計算するとともに、コールドモデルを使って捕捉モードの周波数や Q 値を測定して計算結果と比較し、本可動マスクの実現可能性を検討した。

2. 基本構造

基本構造を図1に示す。この可動マスクは下記のような特徴を持つ。

1) マスクヘッドのサポートを誘電体(セラミックス)とすることでビームとの干渉を減らし、ビームインピーダンスを下げる。ただし、マスクヘッドの荷電を防ぐため、側面に導電性の薄い膜をコーティングする。

2) グラファイトまたはセラミックスに銅のコーティングを施したマスクヘッドを採用する。従来使用されてきたチタンや銅ブロックよりも融点が高く、ビームが衝突しても損傷を受けにくい。

3) HOM吸収体としてSiCを装備し、マスクヘッド近傍の捕捉モードを吸収する。

サポートはビームダクトに固定し、マスクチェンバー自身を移動してヘッド位置を調整する¹⁻³。

3. 高周波特性評価

3.1 計算モデル

使用したシミュレーションコードはMicrowave Studio 6.0(MWS)およびMAFIA4.2である(いずれも株式会社エーイーティー)。計算では、ビームダクトを内径94 mmの丸パイプ、マスクヘッドを8 mm × 7 mm × 90 mmの直方体金属(銅)、サポートを4 mm × 4 mm × 30 mmのアルミナ(Al_2O_3 , $\epsilon_r = 9.0$)または4 mm × 6

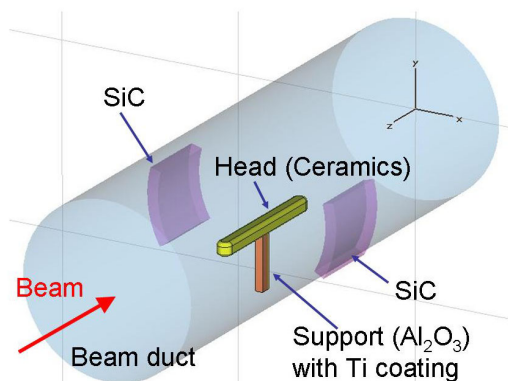


図1: 新型可動マスクの概念図

¹ E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp

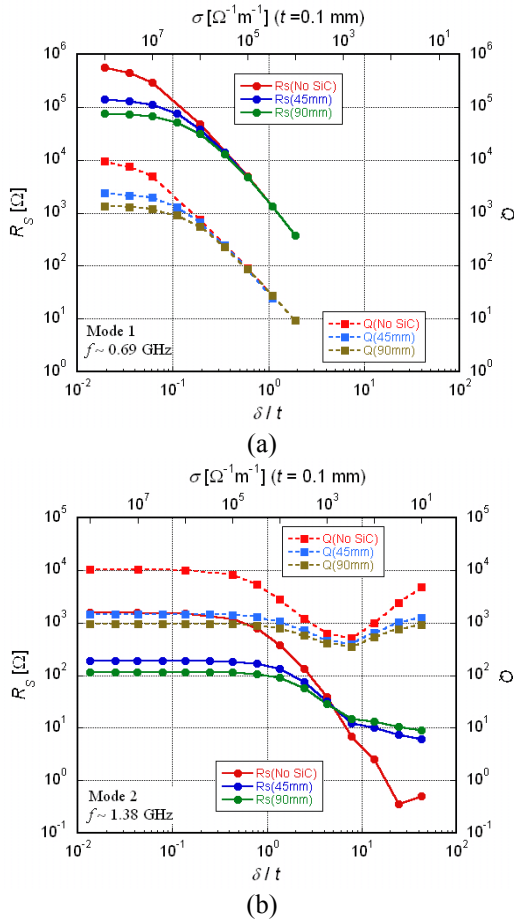


図2 (a)モード1、(b)モード2の縦方向シャントインピーダンス(実線)とQ値(破線)の δt 依存性。SiCの見込角は45°。

mm × 30 mmの窒化ボロン(BN、 $\epsilon_r = 4.0$)とした。捕捉モードの周波数、縦方向および横方向のシャントインピーダンス(R_S 、 R_T)などを、サポート側面の導電性薄膜の導電率(σ)やSiCの面積を変えて計算した。MWSでは、二つのポートを設け、ポート間のSパラメータ(S_{11})を周波数ソルバーで計算した。サポート側面の導電性薄膜の厚み(t)は0.1 mmとした。MAFIAではT3モジュールにて、ウェイクポテンシャルを32 mまで計算してインピーダンスを求めた。バンチ長(σ_z)は4 - 8 mmである。導電性薄膜の厚みは0.8 mmとした。

3.2 捕捉モードのシャントインピーダンス、Q値

高周波特性で最も問題となるのは捕捉モードの影響である。 $\phi 4$ ビームダクトのTE11カットオフ周波数(約1.8 GHz)以下には、約0.69 GHz(モード1と呼ぶ)と約1.38 GHz(モード2と呼ぶ)の2つの捕捉モードがある。モード1はサポートを電流が上下して励起されるモードで、 σ が大きい場合インピーダンスが高くビームに対する影響も大きい。しかし、 σ が小さくなると消える。一方、モード2は、電流がヘッド軸方向に往復するモードで、サポートが金属であっ

ても絶縁体であっても存在する。マスクヘッドの荷電を避けるためには有限な導電率(σ)がなければならないが、 σ が大きいとモード1が問題となる。よって許容できる σ の値を求めることが重要となる。

モード1およびモード2の縦方向シャントインピーダンス(R_S)と R_S/Q の σ に対する依存性を図1(a)および(b)にそれぞれ示す(MWS)。横軸は、導電性膜の表皮深さ(δ)と厚み(t)との比、 δ/t 、である。SiCが無い場合、およびSiCの長さが45 mmと90 mmの場合について計算した。モード1は、 $\delta/t > 2$ では計算不可能なほど弱くなる。 $\delta/t \sim 1$ で $R_S = 1$ k Ω 、 $R_S/Q \sim 50$ である。モード2では、 δ/t が大きくなると R_S 、 R_S/Q とも小さくなる。 $\delta/t = 1 \sim 10$ で $R_S = 100 - 10$ Ω 、 $R_S/Q = 0.1 - 0.02$ である。MAFIAでも、 δ/t で見ると、 R_S はMWSでの結果とほぼ同じ値、傾向であった。ただし、Q値は数分の一小さかった(モード1で $R_S/Q \sim 200$ 、モード2で $R_S/Q = 0.5 - 0.05$)。特にSiCが無く、Q値が高い場合に小さい値が得られた。これは、32mまでの計算ではまだ減衰が不十分なためと考えられる。

横方向のシャントインピーダンス(R_T)でも同様の δ/t 依存性が見られた。モード1では $\delta/t \sim 1$ で $R_T = 3 \times 10^5$ Ωm^{-1} 、 $R_T/Q = 1 \times 10^4$ (MAFIAでは $R_T/Q = 6 \times 10^4$)、モード2では $\delta/t = 1 \sim 10$ で $R_T = 1 \times 10^4 - 1 \times 10^3$ 、 $R_T/Q = 10 - 1$ (MAFIAでは $R_T/Q = 50 - 10$)であった。

KEKBのアップグレード計画であるSuper KEKB (SKEKB)計画では、縦方向の結合バンチ不安定性の成長率を1 s^{-1} にする必要がある⁵、そのためには R_S をモード1で500 Ω 、モード2で200 Ω 以下にしなければならない(ビーム電流2.6A、マスク個数16、 $\alpha = 3.4 \times 10^{-4}$ 、 $f_s = 2 \times 10^3$ Hzの場合に換算して)。そのためには、SiC付きで $\delta/t > 2$ が必要である。一方、横方向の結合バンチ不安定性でも成長率を35 s^{-1} 以下、 R_T を 2×10^3 Ωm^{-1} 以下にしなければならない。この場合もSiC付きで $\delta/t > 2$ が必要である。この値は厚さ1 μm のチタン膜($\sigma = 1.7 \times 10^6$ $\Omega^{-1} m^{-1}$ 、 $\delta/t \sim 10$)で十分実現できる値である。

3.2 ロスファクター

現在KEKBで使用している可動マスクの構造では、バンチ長4 mmにおけるロスファクターは約1.2 VpC^{-1} である(陽電子リング、マスクヘッドとビームの距離10 mm)¹⁻³。これは、SKEKBでの5000バンチ、9.4 Aビームでは200 kWのエネルギー損に相当する。一方、今回提案する新型マスクでは、 $\delta/t \sim 6$ でSiCがあると約0.4 VpC^{-1} 、SiCが無いと0.3 VpC^{-1} と1/3 - 1/4になる。それでもまだ50 - 70 kWのエネルギー損となる。したがって、さらに構造やSiCの配置等を改良してエネルギー損を減らす必要がある。

3.3 マスクヘッドへの入熱

マスクヘッドはセラミックスロッドで支持されているため、マスクヘッドに入る熱はほとんど放射でチェンバーに伝達されると考えてよい。入熱は、バ



図3 コールドモデル

ンチによる壁電流のジュール損と、捕捉モードによるジュール損の二つが主である。

バンチの壁電流による入熱は、Ref [6]にある公式から、約30 Wと見積もられる。ただし、バンチ長は4 mm、ビームとマスクまでの距離は10 mm、マスクヘッドは銅(銅メッキ $\sim 10 \mu\text{m}$)とした。一方捕捉モードによる寄与は、 $\delta t \sim 10$ の場合($R_S \sim 10 \Omega$)、モード2のみを考えればよく、 $R_S/Q = 0.1$ とするとロスファクターは $2.2 \times 10^8 \text{ VC}^{-1}$ 、実効電圧は2.5 Vとなり、結局10 Aのビームでは25 Wとなる。よって計約50 Wの入熱と見積もられる。

いま、単純に面積 $3 \times 10^3 \text{ m}^2$ のマスクヘッドが面積 0.16 m^2 のチェンバーに囲まれているとし、放射のみの熱伝達を考えると、マスクヘッドの放射率を0.5(粗い表面)とすれば、マスクヘッドの温度は約600 $^{\circ}\text{C}$ となる。これは、構成材料から見て問題は無く、またロー付け接合も使用可能な温度である。

4. コールドモデル

新型可動マスク構造の製作性を見るため、および、計算結果を評価するために、大気仕様のコールドモデルを製作した。モデル全体を図3に示す。チェンバーはアルミ製で長さ300 mm、内径は94 mmである。マスクヘッドはグラファイトまたはアルミである。サポートはアルミ、BNおよび Al_2O_3 で製作し、差込み式で交換可能とした。チェンバー側面には幅15 mm、長さ90 mmのSiCの棒を8個(左右に4個ずつ)取り付けた。チェンバー上側から $\phi 3.2 \text{ mm}$ のセミリジッドケーブルを2本挿入しアンテナとした(図3参照)。SiCの数を変えて捕捉モードの周波数、 Q 値を S_{12} スペクトルから測定した。

周波数スペクトルをみると、計算結果と同様、サポートをアルミ(導体)にするとモード1とモード2が、絶縁体(BNと Al_2O_3)にするとモード2のみが観測された。図4はモード2の周波数と Q 値の計算値と測定値を比較したものである。Case 1はSiCが無い場合でCase 2、Case 3となるにつれてSiC棒の数を増やしている。モード2の場合では、周波数も Q 値も計算結果とほぼ一致しているのがわかる。しかし、モード1では周波数はほぼ計算と一致したが、 Q 値は最大で10倍小さかった。これは、サポート部の電

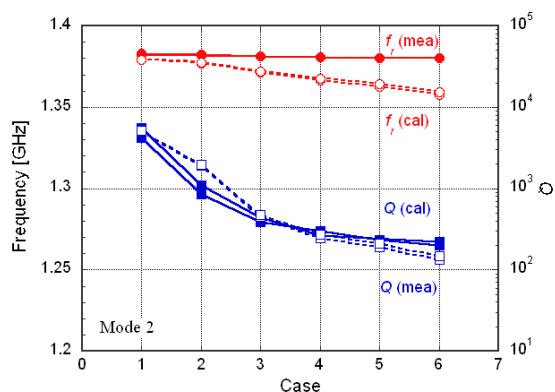


図4 モード2の共鳴周波数と Q 値の測定値および計算値のSiCの数に対する変化。計算には2種類の誘電率を仮定した。

氣的接触が不十分なためと推定される。

サポート側面の導電性膜を模擬するために、側面に40 μm 厚ステンレス、50 μm 厚アルミおよび30 μm 厚銅のテープを貼り付けモード1の Q 値の変化を測定した。 Q 値は約1/10であったが、導電率が悪くなるにつれ Q 値は下がり、計算結果と傾向は一致した。また、実際、1 μm 厚のTiコーティングにて、モード1は観測されなかった。

5. まとめ

将来の大電流加速器用可動マスクの新しい構造を提案した。シミュレーションによる捕捉モードのインピーダンスなどの計算や、コールドモデルでの測定から、実現可能性は十分あることがわかった。今後、現状のKEKB陽電子リング用の試作機を製作し、ビーム試験を行っていく予定である。

謝辞

本研究にあたり、KEKB RFグループの影山達也氏、阿部哲郎氏、竹内保直氏には計算および実験に対してご協力を頂きました。また、KEKBの生田勝宣氏、金澤健一氏には多くの助言を頂きました。ここに感謝します。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, T. Kageyama, K. Shibata and T. Sanami, NIM-PR-A, 513 (2003) 465.
- [2] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Sanami, T. Kageyama and Y. Takeuchi, RSI, 74 (2003) 3297.
- [3] K. Shibata, Y. Suetsugu and T. Kageyama, "Development of Movable Mask with Reduce-HOM Design for KEKB", PAC2003, May 12-16, Portland, p.800.
- [4] Y. Suetsugu, "Vacuum System for High Power Lepton Rings", PAC2003, May 12-16, Portland, p.612.
- [5] <http://www-kekb.kek.jp/SuperKEKB/home.html>.
- [6] A. W. Chao and M. Tigner, "Handbook of Accelerator Physics and Engineering", World Scientific, 1999, p.203.