

# RF CHARACTERISTICS ANALYSIS OF DUCT-SHAPED MICROWAVE ABSORBERS FOCUSING ON SURFACE WAVE MODES

Yasunao Takeuchi #

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

## Abstract

The duct-shaped microwave absorber, such as a beam pipe HOM damper, is considered as a waveguide partially filled with dielectric material if the loss tangent for the absorber material is small enough. When almost input RF waves propagate inside the dielectric material mainly in the waveguide, the field patterns of the waves are similar to those of the surface wave modes in some cases. For example when the  $TM_{01}$  wave is fed from the input port of the waveguide, a surface-wave-like mode, which is similar to a surface wave mode ( $TM_0$ ) along a dielectric slab, appears along the dielectric material. Therefore the RF characteristics of the duct-shaped absorber would be explained by the properties of the surface wave modes. This paper describes the RF characteristics analysis of the duct-shaped microwave absorbers using the properties of the surface wave modes.

## 表面波モードに着目したダクト形マイクロ波吸収体の高周波特性解析

### 1. はじめに

マイクロ波領域で誘電損失特性を持つ SiC セラミックスや、磁性損失特性を持つフェライト等を用いたダクト形マイクロ波吸収体は、ビームパイプ HOM 減衰器、ダクト形マイクロ波ダミーロード等の高周波要素部品として、加速器で広く応用されている<sup>[1][2][3]</sup>。よく使用される図 1 の様なダクト形マイクロ波吸収体の形状は、マイクロ波の進行方向に沿って、吸収体が設置されている。そのため、誘電率と透磁率の虚数部が各々の実数部に比べて十分に小さい場合は、見方を変え、吸収体があたかも誘電体伝送線路を構成する様な構造となっているように見える。したがって、このような誘電体伝送線路の特徴を調べれば、吸収体の高周波特性を予想することができると考えられる。

一般に、マイクロ波の進行方向に沿って置かれた損失の小さい誘電体は、誘電体伝送線路を形成して、いわゆる表面波モードが伝搬する。このような表面波モードでは、「大部分の電磁波が誘電体内部に集中して伝搬する」電磁場分布が存在する場合があることが知られている<sup>[4]</sup>。また、導波管の様な境界が存在する場合でも、大きさや周波数の条件で、近似的に表面波のモードが支配的になる場合がある<sup>[5]</sup>。したがって、ビームパイプ HOM 吸収体のような、導波管内部に誘電体がある構造でも、大きさや周波数条件によっては、性質がよく知られている表面波を考察することにより、近似的ではあるがより容易にその高周波特性を理解することができる。

このような表面波の性質を応用して設計された吸収体の例として、KEKB の ARES 空洞で使用されている砲弾形 SiC セラミックスを用いた、導波管型 HOM 減衰器がある<sup>[6]</sup>。この HOM 減衰器では、砲弾形 SiC セラミックス（直径 55 mm、有効長 400mm）2 本が HOM 導波管の終端面から挿入され

た形状で、約 0.8~2GHz の HOM を吸収する設計となっている。この吸収体の設計においては、まず、複素比誘電率 ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) の虚数部分が小さいとして、 $\epsilon_r'' = 0$  の条件で、矩形導波管の  $TE_{10}$  モードから変換される、円柱誘電体導波路の最低次の表面波モードである  $HE_{11}$  モードを調べることにより、吸収体内の高周波伝搬特性が調べられた<sup>[4]</sup>。特徴的な  $HE_{11}$  モードの性質として、1) 遮断周波数は存在せず、 $f > 0\text{Hz}$  から伝搬可能である、2) SiC セラミックスのような比誘電率が比較的大きい（約 20@1GHz）場合は、直径、誘電率で決まるある周波数 ( $f_{c_{HE11}}$  とする) より低い周波数 ( $0 < f < f_{c_{HE11}}$ ) では、電磁波が誘電体外部を主として伝搬し、 $f_{c_{HE11}}$  より高い周波数 ( $f > f_{c_{HE11}}$ ) では、誘電体内部を主として伝搬する、が挙げられる。したがって、誘電損失がある現実の吸収体では、誘電体内部を主として伝搬する  $f > f_{c_{HE11}}$  の場合に、大きな吸収特性が得られることが予想される。この性質が砲弾形 SiC セラミックスを用いた HOM 吸収体の設計に適用され、 $f_{c_{HE11}} < 0.8\text{GHz}$  を実現する砲弾形 SiC セラミックスの誘電率と太さ（直径 55mm）の組合せが決定された。さらに、その結果現れる、 $f_{c_{HE11}}$  付近で急に変化する吸収率の周波数特性は、RF シミュレーションと実機の低レベル RF 測定の方々の方法で確認されている<sup>[7]</sup>。

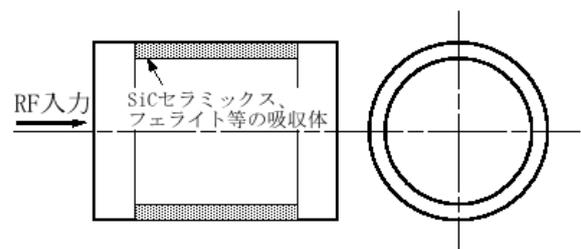


図 1 : ダクト形マイクロ波吸収体の概略図

# ytake@post.kek.jp

本件では、図 2 のダクト形吸収体モデルについて、砲弾形吸収体の特性解析に習い、表面波モードに着目して高周波特性を説明することを試みる。ダクトへの入力マイクロ波モードを、 $TM_{01}$  として、次の手順で、具体的な解析を実施する。

- (1) ダクト形吸収体 (図 2) の吸収率 ( $=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ ) の周波数特性を、RF シミュレーションコード (hfss) を用いて計算し、周波数の上昇に伴って、吸収率が急激に増加する ( $f_{c_{HE11}}$  と同じような) 性質があることを示す。
- (2) RF シミュレーションコード (hfss) を用いて、損失のない場合、図 2 の形状において表面波のようなモードが存在することを確認する。すなわち、誘電率の増加、厚さ  $t$  の増加、周波数の上昇に伴って、各々の場合に、主として誘電体外部に分布していた電磁場分布が、誘電体内部及びその表面付近に集中する電磁場分布に変化する ( $f_{c_{HE11}}$  と同じような) 性質があることを確認する。
- (3) よく知られている表面波の性質を用いて高周波特性を評価するために、円筒状の誘電体を、導体上に置かれた無限平板の誘電体モデルで近似的に表し、円形導波管の  $TM_{01}$  モードから移行する最低次の表面波モード ( $TM_0$ ) に注目する。平板状の誘電体外部では、 $TM_0$  モードの電磁場は、平板の外側に向かって指数関数で減衰するが、その減衰定数を調べることによって、表面波が主として誘電体内部を伝搬するか、外部を伝搬するかを評価する。
- (4) フェライト等の吸収体材料に見られるような、比較的大きな誘電率と透磁率の両方を持つ吸収体の特性について、(3)の平板モデルで簡単に考察する。

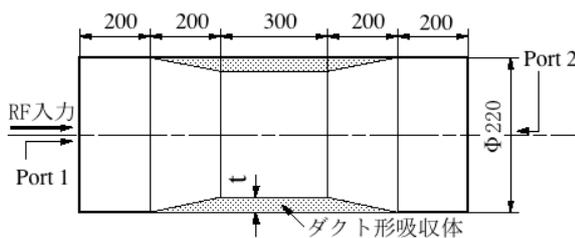


図 2：ダクト形吸収体の計算用モデル

## 2. RF シミュレーションコード (hfss) による計算

RF シミュレーションでは、図 2 に示す形状のモデルを使用した。ダクト内の伝搬モードから、吸収体へのモード変換が滑らかになるように、吸収体のテーパ部分が 200mm と長く設定してある。入力するマイクロ波は、ビームパイプ HOM 減衰器で主として対象にされる円形導波管の  $TM_{01}$  モードを仮定し、周波数は  $TM_{01}$  モードの遮断周波数より十分高いとする。ダクト直径を 220mm ( $TM_{01}$  遮断周波数：1.04GHz) とし、周波数は、1.1~3GHz の範囲で、

特に  $f_0 = 1.5\text{GHz}$  付近での特性に注目した。

図 2 のモデルで、吸収体の厚さ  $t$  と誘電率をパラメータとして、ダクト形吸収体の吸収率を計算した。比透磁率は、 $\mu_r = 1$  (無損失) とした。ダクトの厚さは、5、7.5、10、15、20 (mm) の 5 種類とした。比誘電率 (実数部) は、5、10、20、30 の 4 種類を選択し、 $\tan \delta$  はすべて 0.1 とした。

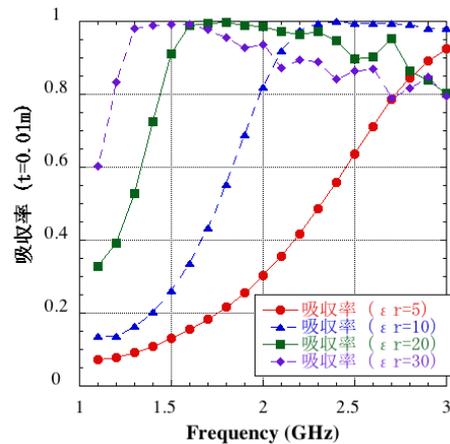


図 3：ダクト形吸収体の吸収率の周波数特性。  
厚さ  $t = 0.01\text{m}$ 、 $\epsilon_r$ ：5~30 ( $\tan \delta = 0.1$ )。

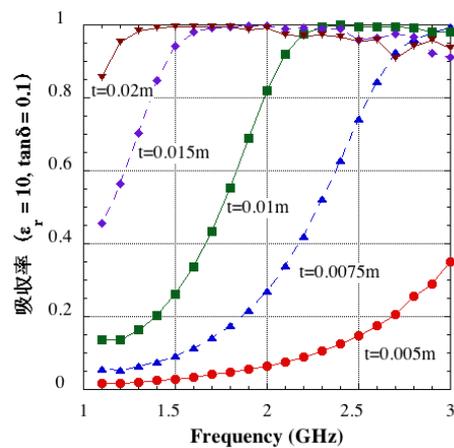


図 4：ダクト形吸収体の吸収率の周波数特性。  
 $\epsilon_r = 10$  ( $\tan \delta = 0.1$ )、厚さ  $t$ ：0.005~0.02m。

図 3 に、比誘電率 (実数部) をパラメータとした吸収率 ( $t = 0.01\text{m}$ ) の周波数特性を示す。各誘電率 (実数部) の値毎に、周波数の上昇に伴って、急に吸収率が増加している。また、誘電率の増加によって、吸収率の急増する周波数が低くなり、吸収率増加の曲線の傾きが大きくなっている。図 4 では、厚さ  $t$  をパラメータとした吸収率 ( $\epsilon_r = 10$ ) の周波数特性を示す。厚さ  $t$  が増加するとともに、吸収率の急増する周波数が低くなっている。

次に、伝搬モードの電磁場分布を観察するために、周波数 1.5GHz で、無損失 ( $\tan \delta = 0$ ) の場合のシミュレーションを実施した。図 5、図 6 に  $t = 0.01\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 5$  のモデルと、 $t = 0.01\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 30$  のモデルの電場分布を示す。図 5 のモデルでは、誘電体外部を電

磁波が主として伝搬していることが分かる。一方、 $\epsilon_r$ を増加させた図6のモデルでは、誘電体の平坦部において、平板状誘電体の表面波の  $TM_0$  モードによく似た電場分布となっており、大部分の電磁波が誘電体内部及びその表面近くを伝搬している。このような伝搬モードの電場分布の変化は、厚さ  $t$  の増加、周波数  $f_0$  の上昇の場合でも、それぞれ確認された。

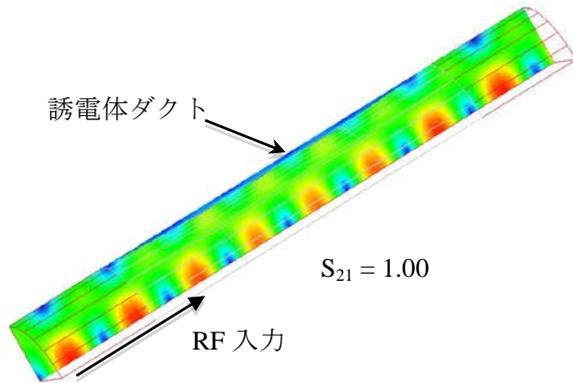


図5：無損失の場合の電場分布。  
 $t = 0.01\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 5$  ( $\tan \delta = 0$ )、 $f_0 = 1.5\text{GHz}$ 。

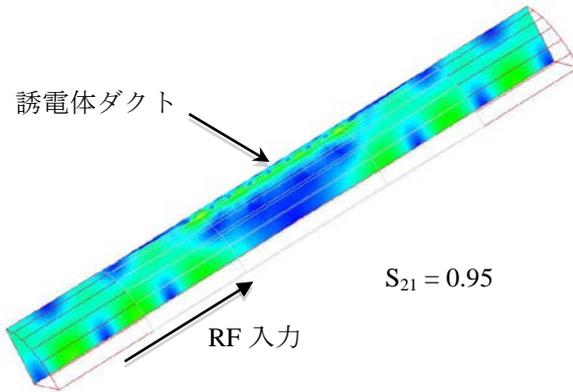


図6：無損失の場合の電場分布。  
 $t = 0.01\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 30$  ( $\tan \delta = 0$ )、 $f_0 = 1.5\text{GHz}$ 。

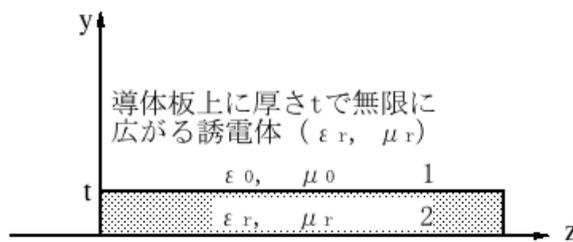


図7：導体上の誘電体平板モデル

### 3. 導体上の誘電体平板モデルでの表面波

RF シミュレーションの結果、ダクト形吸収体の RF 特性は、誘電率、厚さ、周波数の増加に伴って、急に吸収率が増加する性質（前述の砲弾形吸収体でも同様の性質が見られる）があることが分かった。

特に無損失の場合、誘電率の増加、厚さ  $t$  の増加、または、周波数  $f_0$  の増加に伴って、電磁波が主として誘電体外部を伝搬する電場分布から、主として内部を伝搬する電場分布に変化することが明らかになった。そして、主として誘電体内部を伝搬する電場分布は、導体上の誘電体平板での伝搬モードである、表面波の  $TM_0$  モードによく似ている。このことから、ダクト形吸収体の円筒形状を平板状に展開した、図7の導体上の誘電体平板モデル（無損失）を考えて、 $TM_0$  モードの性質を調べてみる。

図7に示す、導体上に置かれた無限平面の誘電体板（無損失）のモデルにおいて、 $z$  方向に進む  $TM$  波の基本方程式は、(3-1) ~ (3-2b) で表され、その解は (3-3a) ~ (3-4b) で表される<sup>[8]</sup>。

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k_c^2 E_z = 0 \quad (3-1)$$

$$k_{c1}^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2 \quad \text{誘電体外部} \quad (3-2a)$$

$$k_{c2}^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 \quad \text{誘電体内部} \quad (3-2b)$$

$$E_z = A_1 e^{-py} \quad (p > 0) \quad \text{誘電体外部} \quad (3-3a)$$

$$E_z = j2A_2 \sin k_{c2} y \quad \text{誘電体内部} \quad (3-3b)$$

$$pt = (k_{c2} t \cdot \tan k_{c2} t) / \epsilon_r \quad (3-4a)$$

$$(k_{c2} t)^2 + (pt)^2 = (\omega/c)^2 (\epsilon_r \mu_r - 1) t^2 \quad (3-4b)$$

ここで、誘電体外部での  $E_z$  は、指数関数的に  $\exp(-py)$ 、( $p > 0$ ) で減衰することから、この減衰定数  $p$  を求めることによって、誘電体内部を伝搬する電磁場を評価することができる。すなわち、減衰定数  $p$  が十分に大きい場合には、主として誘電体内部を電磁波が伝搬し、 $p$  が小さい場合は、主として誘電体外部を伝搬する。

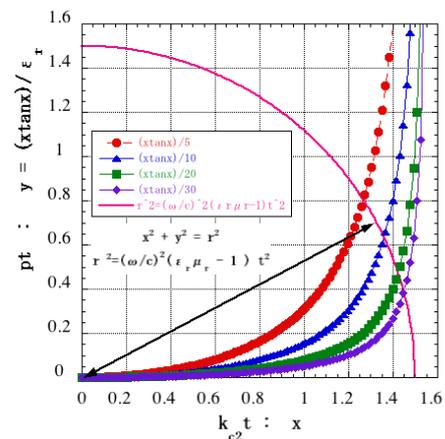


図8： $TM_0$  モードの固有値を求めるグラフ

図8は  $TM_0$  モードの解を得るために、(3-4a)、(3-4b) 式を具体的に表したものであり、固有値は、これらの曲線の交点から求められる。ここで、(3-

4a) 式の関係を表す曲線では、誘電率が大きくなるほど、減衰定数を表す  $pt$  の曲線の立ち上がりが急激になる。また (3-4b) 式は、図 8 上で、1/4 周の円を表す。その半径は、(3-4b) 式右辺の平方根で表され、周波数の上昇、誘電体の厚さの増加、誘電率の増加と共に大きくなる。これらの曲線から、次のような表面波 ( $TM_0$ ) の性質が分かる。

- (1) (3-4b) 式の半径が、(3-4a) の  $pt$  が立ち上がる付近 (約 1.4) を超えると、解を表す 2 つの曲線の交点での  $pt$  の値が急に大きくなり、 $t$  を固定した場合、誘電体外側での解の減衰定数が急に増大する。すなわち、(3-4b) 式の半径約 1.4 前後で、 $TM_0$  モードの電磁波の様子が急に変化することを意味する。1.4 より小では、電磁波は主に誘電体外部を伝搬し、1.4 より大では、主に誘電体内部を伝搬する。従って、(3-4b) 式より、厚さ  $t$  と誘電率を固定すると、ある周波数で伝搬の様子が急に変化する。
- (2)  $kc_2=1.4$  付近での (3-4a) 式を表す曲線の

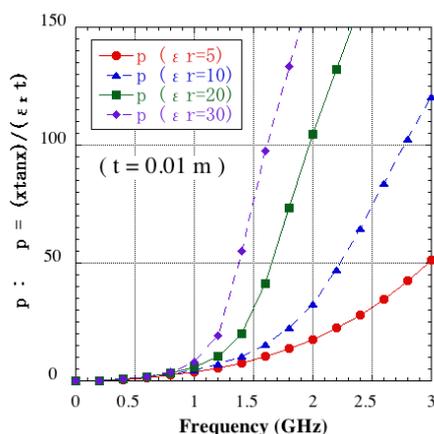


図 9：数値計算により得られた、 $TM_0$  モードの減衰定数  $p$  ( $t = 0.01\text{m}$ ,  $\epsilon_r$ ; 5~30)。

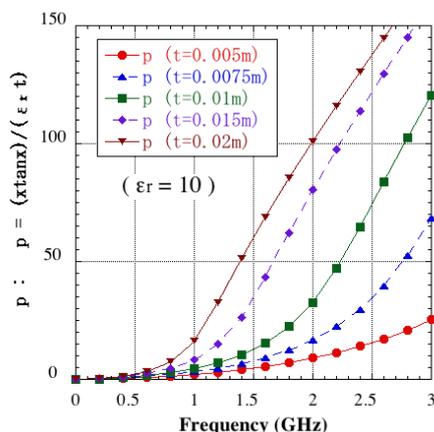


図 10：数値計算により得られた、 $TM_0$  モードの減衰定数  $p$  ( $\epsilon_r = 10$ ,  $t$ ; 5~20mm)。

$pt$  の立ち上がり、誘電率が大きいほど急激であることから、誘電率が大きいほど、(1)で示した  $TM$  モードの電場分布の変化が急になることが分かる。

次に、(3-4a) 式、(3-4b) 式から、数値計算により、具体的に  $p$  を求めた結果を図 9~図 10 に示す。図 9 では、厚さ  $t$  を  $0.01\text{m}$  に固定して、比誘電率をパラメータとして減衰定数  $p$  の周波数特性を表している。前述の (1) (2) の予想通り、周波数の増加に伴って、 $p$  が急に増加し、そして、比誘電率が大きいほど、 $p$  が急に増加し始める周波数が低くなり、かつ、その傾きが大きくなっている。図 10 では、比誘電率を 10 に固定して、厚さ  $t$  をパラメータとしている。厚さ  $t$  の増加に伴って  $p$  が急に増加し始める周波数が低くなっている。

#### 4. 考察

図 2 の形状のダクト形吸収体モデルで、誘電率虚数部を小さめ ( $\tan \delta = 0.1$  に固定) に選び、誘電率実数部と誘電体の厚さ  $t$  をパラメータとして、 $TM_0$  モードのマイクロ波入力での吸収率の周波数特性を計算した。その結果、

- (1) 周波数を上げていくと、吸収率が急に増加し始める周波数が存在する。
- (2) 誘電率 (実数部)、厚さ  $t$  が大きいほど、吸収率が急増し始める周波数が低い。
- (3) 誘電率 (実数部) が大きいほど、吸収率の急増する傾きが大きい。

等の性質が確認された。さらに、無損失 ( $\tan \delta = 0$ ) のモデルにおいて、誘電率、厚さ  $t$ 、周波数をパラメータとして、伝搬モードの電場分布を求めた。その結果、

- (4) 誘電率の増加、厚さ  $t$  の増加、周波数の上昇に伴って、それぞれの場合に、主として誘電体外部を伝搬する電場分布から、主として誘電体内部を伝搬する電場分布に変化することが確認された。
- (5) 主として誘電体内部を伝搬する電場分布は、円筒状誘電体を平面に展開した形状での表面波の  $TM_0$  モードによく似ている。

等が確認された。

これらの結果から、誘電損失が小さいダクト形吸収体の特性は、導体上の平板状誘電体 (無損失) の表面波の  $TM_0$  モードの性質で説明できるのではないかと予想して、その性質を調べた。 $TM_0$  モードの電場は、平板状誘電体外部では、指数関数的に減少するため、その減衰定数  $p$  を調べれば、ダクト形吸収体の吸収率の変化に対応する情報が得られる。その結果、

- (6) 周波数を上げていくと、減衰定数  $p$  が急に増加し始める周波数が存在する。
- (7) 誘電率、厚さ  $t$  が大きいほど、減衰定数  $p$  が急増し始める周波数が低い。
- (8) 誘電率が大きいほど、減衰定数  $p$  急増する傾きが大きい。

等の性質が確認された。(6) ~ (8) の平板状モデ

ルでの  $TM_0$  モードの性質は、(1) ~ (3) のダクト形吸収体の吸収特性の傾向に対応している。また、定量的にも、例えば、図 3 の  $\epsilon_r = 30$  ( $t = 0.01m$ ) のデータで吸収率が 1 近くになる周波数は、約 1.2~1.4GHz であるが、図 9 の  $\epsilon_r = 30$  ( $t = 0.01m$ ) のデータで減衰定数  $p$  が急増し始める周波数は、約 1.2~1.4GHz であり、ほぼ一致している。さらに (4) ~ (5) の無損失のダクト形吸収体モデルの電場分布の変化は、平板状モデルの  $TM_0$  モードの性質に対応している。

従って、損失が小さい ( $\tan \delta = 0.1$  程度) のダクト形吸収体の吸収特性 (RF 入力:  $TM_{01}$  モード) の内、誘電率の増加、厚さ  $t$  の増加、周波数の上昇に伴って急増する吸収率の性質は、導体上の平板状誘電体モデルの表面波の  $TM_0$  モードの性質によって説明できる。

ここで述べたような表面波の性質を利用したマイクロ波吸収体では、電磁波を誘電体内に集中させて伝搬させることによって、小さな形状に設計することができる。そのためには、比誘電率と厚さ  $t$ 、周波数の組合せにおいて、減衰定数  $p$  が十分に大きい値であることが必要である。従って、比誘電率は 1 に近い小さい値ではなく、この条件を満足する程度に大きい必要がある。ただし、比誘電率が大きい場合には、誘電体への電磁場の入射で反射が大きくなることが予想されるため、図 2 のモデルで用いたテーパ構造のような工夫も必要になると考えられる。

KEKB 加速器の超伝導空洞で使用されているビームパイプ HOM 減衰器の吸収体には、フェライトが採用されており、その比誘電率と比透磁率は、 $\epsilon_r = 11 - 0.5j$ ,  $\mu_r = 2 - 7.5j$  ( $f_0 = 1.5GHz$ ) である<sup>[2]</sup>。透磁率の  $\tan \delta$  が約 3.75 と大きいため、無損失の平板状誘電体の表面波の性質では、近似できない。しかし、誘電率と透磁率の虚数部が小さいモデルを考えると、平板状誘電体の表面波の  $TM_0$  モードの性質を適用できると考えられる。このようなモデルでは、(3-4b)式の  $\mu_r$  の値が 1 より大きくなって、図 8 の円の半径が  $(\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$  に比例して大きくなる。このとき、(3-4a)式には  $\mu_r$  が含まれないので、注意が必要である。

## 5. 結論

損失が小さい ( $\tan \delta = 0.1$  程度) のダクト形マイクロ波吸収体の吸収特性 (RF 入力:  $TM_{01}$  モード) の内、誘電率の増加、厚さ  $t$  の増加、周波数の上昇に伴って急増する吸収率の性質は、一般によく知られている、導体上の平板状誘電体モデルの表面波の  $TM_0$  モードの性質によって説明できる。このような手法は、無損失の誘電体内及びその周辺の電磁場分布から、吸収体の性質を近似的に説明するものであるため、容易に吸収体の特性を予想できる特徴がある。そして、様々なタイプのマイクロ波吸収体の設計に、応用可能な手法であると考えられる。今後、損失 ( $\tan \delta$ ) が大きい場合についても、同じような手法を検討していきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] M.Izawa, et al., "Beam Test of a SiC Duct Developed for an RF Damped Cavity", EPAC96-WEP053L.
- [2] T.Tajima, "Development of Higher-Order-Mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities", KEK Report 2000-10.
- [3] J.Watanabe, et al., "Duct-Shaped SiC Dummy Load of L-band Power Distribution System for XFEL/Spring-8", IPAC10-THPEA024.
- [4] Y.Takeuchi, et al., "The SiC Absorber for the KEKB ARES Cavity", EPAC96-WEP062L.
- [5] R.E.Collin, "Foundations for Microwave Engineering", 2<sup>nd</sup> edition, Chapter 3, Section 3.10, McGraw-Hill Inc..
- [6] T.Kageyama, et al., "The ARES Cavity for KEKB", APAC98-6D039.
- [7] Y.Takeuchi, et al., "High-Power Testing of Bullet-Shaped SiC Ceramic HOM Absorbers for KEKB ARES Cavity", pasj6-fpaca56.
- [8] 多くのマイクロ波の教科書に取り上げられているが、例えば、中島将光, "マイクロ波工学", 第 6 章, 森北出版.