

## 表皮効果に起因する損失の低減—その2

(Mitigation of Power Loss due to Skin Effect – II)

○岩下芳久、京都大学化学研究所

### 概要

交流電流は導体の表面のみに集中する表皮効果により、高周波では電流密度、電力損が上がり、ケーブルでの電力伝送や共振空洞のQ値の低下をまねく。この表皮効果による電力損失は薄膜構造の導入により低減が可能である。これの実証実験の結果を示す。

### はじめに

高周波における表皮効果は電流密度、電力損を増やし、ケーブルでの電力伝送や、共振空洞のQ値の低下をまねく。これは従来不可避の効果と考えられ、加速器の分野でも表皮効果そのものについてこれを見直す動きはなかった。しかし、通信の分野では、導体薄膜の積層構造を用いるとこの表皮効果による損失低減が可能であることが報告されている[1]。そこで、このような構造の一解析方法を説明し、その応用として、誘電体空洞に適用した際の解析結果を示した[2]。ここまでが前回のおさらいである。前回指摘した難点に対する解決策と、その検証実験の結果を報告する。

### 薄膜における表皮効果[3]

この章は、前回までのまとめをしておく。厚さ $\delta$ の薄膜が二枚並べてあり、それで仕切られた空間の磁場強度比が  $1 : 0.5 : 0$  となっている ( $\xi=0.5$ ) 状況を考えて (Fig. 1 参照)。それぞれの薄膜の正味の電流は、実成分だけであつ、これらが表裏での磁場振幅の差となるため値が等しくなる。全消費電力は次のように計算できて半無限導体の場合の7割程度となる。

$$P_2 = \int_0^\delta (|j_1|^2 + |j_2|^2) / \sigma dx, \quad (1)$$

一般に、同一厚の  $n$  層を用い、各層に同じ電流を振り分けると、全消費電力は、以下で計算できる。

$$P_n = \sum_{i=1}^n \int_0^d |j_i|^2 / \sigma dx. \quad (10)$$

消費電力が最小になる膜厚は、層数の増加によって薄くなり、その最小値は層数の1/2乗の依存性を持つ。かくて、表皮効果による高周波電力損も、積層薄膜構造をとり、電流配分を適切にすることにより低減できる。一方、損失が増すケースもあるが、このような領域も例えば、電磁シールドなどに有効となろう。

ここでの重要な仮定は、層間での波長が共振器内での波長より十分短いことである。誘電率が十分高いTMモードの誘電体共振器 (Fig. 2 参照) ではこ

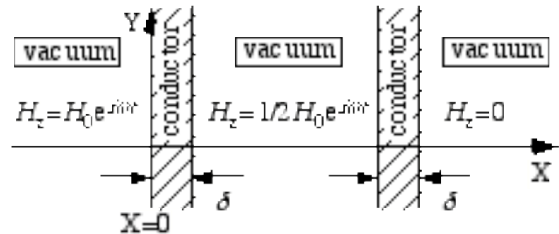


Fig. 1: Two conductor layers are immersed in stepped RF fields: 100%, 50%, and 0%.

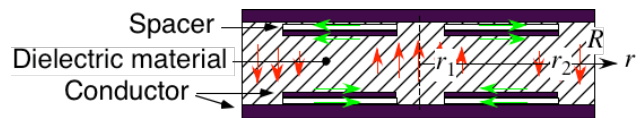


Fig. 2: Dielectric cylindrical cavity with extra electrodes that have washer shape. The thicknesses are exaggerated: inside of the each conventional disc electrode, one smaller washer shape electrode is located with a small distance from the disc.

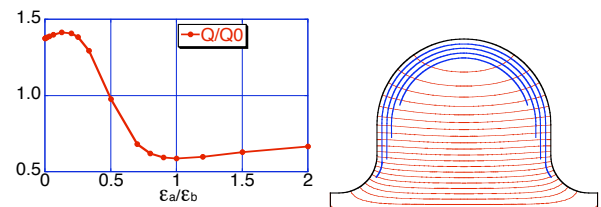


Fig. 3 Left: Relative loss as a function of  $\epsilon_a/\epsilon_b$ . Right: a possible cavity enhancement scheme if material with relative permittivity less than 0.3 is available.

の条件は満たされるが、加速器で使う空洞ではこの条件を満たすことは難しい。空洞内の誘電率 $\epsilon_b$  (空洞の場合は真空の誘電率 $\epsilon_0$ に等しい) と層間のそれ $\epsilon_a$ との比 $\epsilon_a/\epsilon_b$ で損失比を調べるとFig. 3左のようになる。ここから、比誘電率が0.5以下(出来れば0.3程度)の絶縁体が有れば右図のように加速空洞に適用できることが判る。逆にこれ以上では返ってエネルギー消費が増えることになる。これは、薄膜の電磁場の変化する方向の長さは半波長と同程度であるので、本体の空洞とは反対側の薄膜の裏側部分の誘電率が十分低くなければ本体側の波長と同等になって定在波が立ち、そこでのエネルギー消費が返って増えるためであると解釈できる。これを防ぐために誘電率を下げる事が出来れば、局所共振周波数が上がり(波長が短くなる)、層間にエネルギーが入りにくくなる。しかし、空洞内部を真空とすると場合、このような条件を満たす物質は通常考え難いのが難点である。

### 誘電分散

物質の比誘電率は一般に周波数の関数で、その原因に誘電分散が知られている。これは誘電分極の周波数応答が有限であるためであり、配向分極、イオン分極、電子分極等がある (Fig. 4参照) [4]。このうち後者二つが共鳴型であり、誘電率が下がる領域がある (Fig. 4丸でマーク)。これらの領域で誘電率が十分小さくなるところが使えれば空洞の本体側が真空でも薄膜利用により損失に低減が可能になる。

ここで気をつけないといけないのが、誘電率の虚数成分でありこれが大きいと、これまた損失の上昇を招く事に気をつける必要がある。しかし、元々誘電率の絶対値が小さいところが使えれば侵入エネルギー密度も小さいため、うまく選んでやる事が出来れば何とかなるのではないかと思われる。問題はむしろ、誘電体素材の選択にあり、通常加速器で使う周波数帯でこのような現象を起こす物質は知られていない。今後、特殊な高分子か何かマイクロ波領域でこのような特性を示す物質が見つければ応用できる可能性がある。

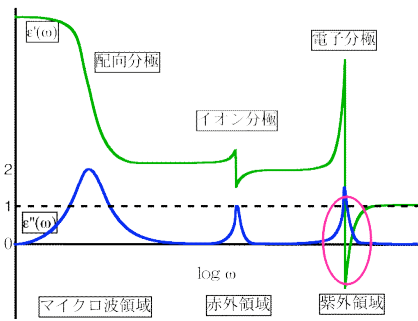


Fig. 4 Dielectric Dispersion.

### 局所共振周波数の制御

前々章で指摘した局所共振はFig. 5のようにモデル化できる。薄膜の長さが半波長程度であると、元々の導体壁面との空間の図のような電磁場が形成される。この場合、磁場分布の腹が中央にあり、また、電場の腹は両端部に形成される。これは中央部がインダクタンスL、端部がキャパシタンスCとなるFig. 6の等価回路を使って考えることが出来る。これの共振周波数を上げるためには、LとCをそれぞれ減らせばよいので、Fig. 7のように中央部を狭めて端部の距離を拡げてやればよい。この距離は波長に比べて大変薄いので、この操作は中央部の距離と端部の距離の比だけで表現できる。

Fig. 8はこれを SUPERFISH で評価した際の体系と電磁場分布であり、 $d_1$  を固定し、 $d_2$  を倍ずつに振って共振周波数を求めた (Fig. 9参照)。ギャップ間隔無限大の極限での周波数は、広がった方の存在を無視すれば、全長が半分になったものとして2倍と推定できる。これは、誘電率を制御した場合に換算すると、周波数が静電容量の平方根の逆数に比例することを考慮して、比誘電率 0.25 に相当する。

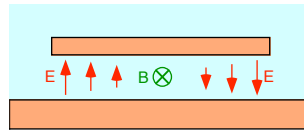


Fig. 5 Local resonance

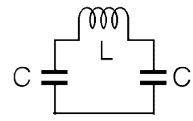


Fig. 6 Equivalent circuit.

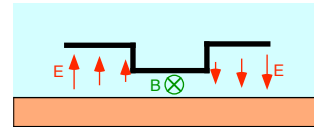


Fig. 7 Raised local resonant frequency.

実際には狭い方のギャップを  $1\mu\text{m}$  としても、100倍で  $0.1\text{mm}$  になるので、周波数比で 1.8 倍辺りまでの改善が実用範囲であろう。これは比誘電率 0.3 に相当するので、何とか前述の実用範囲に届いている。

### 同軸空洞による実証実験

上記の効果を実証するために電磁場のモードが単純な同軸空洞を用いた (Fig. 10参照)。薄膜として  $25\mu\text{m}$  ポリイミドフィルム上に  $5\mu\text{m}$  の銅をスパッタリング+電解銅メッキを施したメタロイナル[5]をポリイミド側をスペーサー層として内導体側に貼り付けて使用する。基本モードでは磁場 (電流) 分布の腹が両端にしかなくこの部分にフィルムを貼り付けるのは困難なため、磁場分布の腹が中央にもある2番目のモードを使用した。この空洞の中央部にフィルムを張りその長さを変えることにより、外導体

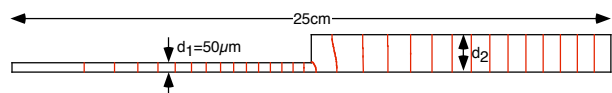


Fig. 8 Evaluation of local resonant frequency.

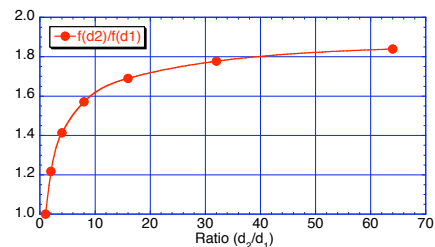


Fig. 9 Resonant frequency as a function of gap ratio.

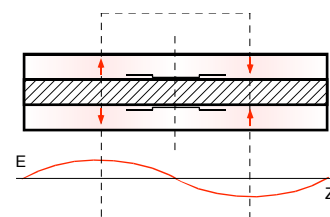


Fig. 10 Experiment on a coaxial cavity.

から変位電流の形で中心導体に向けて流入する電流の、フィルム上の銅箔と中心導体との間との配分比を変える事が出来る。空胴の全長は約 2 m に取り、共振周波数を 150MHz と設定した。

この周波数での表皮厚さはフィルム上の銅箔の電導率を純銅のそれとして計算すると約  $5.4\mu\text{m}$  である。中央部全長 80cm の部分にフィルムを張り、中央部 30cm を直接中心導体に貼り付け、それより外側にポリエチレンメッシュを挟み込むことにより約  $300\mu\text{m}$  のスペーサー層を設けた (Fig. 11参照)。貼り付けたこのフィルムを順次両端からカッターで切り詰めながら Q 値を測定した。測定結果を Fig. 12 に示す。縦軸は測定の最後にフィルムを全て剥がした後の Q 値との比であり、1 以上であれば損失が実際に減ったことになる。厳密には空胴内の蓄積エネルギーと周波数が一定でなければこのような単純な比較は出来ない。しかし、観測された周波数の変化は  $10^{-3}$  以下であり、フォイルの存在による蓄積エネルギー変化もその程度と推測できるのでこれらの影響は無視できる。

Q 値の計算は Fig. 13 に示す体系で行った。計算時間の都合上、周波数を 3GHz にスケールし、さらに内部空間を誘電率 1 万と設定してサイズを百分の一にした。中心導体と薄膜部分の損失のある導体 (純銅) をシミュレートするためにマクスウェル方程式中の次式

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{D} + \sigma\mathbf{E} = (j\omega\epsilon_0\epsilon + \sigma)\mathbf{E} = j\omega\epsilon_0\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right)\mathbf{E}$$



Fig. 11 Polyethylene mesh as a spacer.

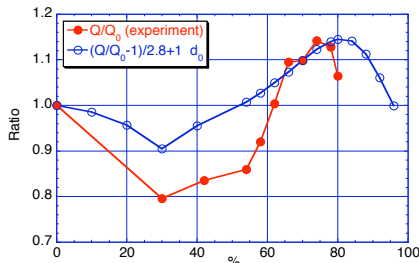


Fig. 12 Measured and calculated Q values

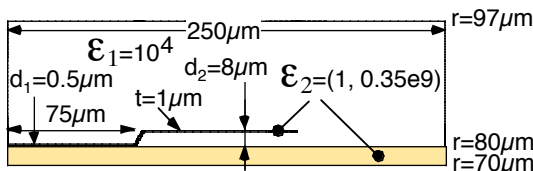


Fig. 13 Geometry for the Q value estimation.

に着目し、 $\epsilon'' = \sigma / j\omega\epsilon_0$  を使って、複素誘電率 ( $1, 0.35 \times 10^9$ ) を持つ誘電体を設定した。縦軸は薄膜部分が無い中心導体のみの損失によるものとの比較で、さらに、次のような補正をした。外導体の損失は中心導体の損失を半径の比 5/2 で割ったものとしてこの範囲で合計 1.4 倍とし、更に全長で半分の部分しか計算していないことから、更に倍にして 2.8 倍が本来の壁面損失と算定する。Q 値の変化としてはこの比で薄められるので、変化分を 1/2.8 倍してプロットしてある。このように、ここでは、端部のロスは勘定には入れていない。結果は、ピークの位置がずれているが傾向は合っていると見えよう。

### 議論

ここまで来ればもうすでに自明かも知れないが、誘電体共振器へ適用した場合の形状を Fig. 14、ギャップの拡大比を 8 倍とした前章と同様のシミュレーションの結果を Fig. 15 に示す。ここでもこの手法により損失低減が期待できるが、このタイプの共振器は高誘電率、低損失の誘電体が必要なため簡単に実験できないので実証は今後の課題である。加速空胴や導波管では壁面の電流方向の長さの波長との比が同軸空胴等と比べて長いため、条件は緩和されるものの、この手法だけではまだ十分ではない。これも今後の課題である。

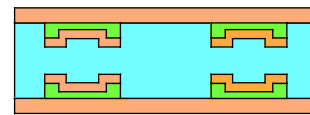


Fig. 14 Stepped foil structure for dielectric resonator.

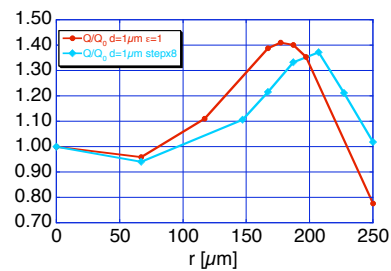


Fig. 15 Calculated Q enhancement for dielectric cavity.

### 参考文献

- [1] J. Hattori, et al.: Low Profile Dielectric Band Elimination Filter using Thin Film Layered Electrode for 2GHz Band Cellular Base Station, IEEE MTT-S Digest 1999
- [2] <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/104/papers/THP43.pdf>
- [3] 第 2 回日本加速器学会年会・第 30 回リニアック技術研究会 報文集、サンメッセ鳥栖, 2005
- [4] [http://atom11.phys.ocha.ac.jp/ftp/pub/lecture/dielectric\\_relaxation.pdf](http://atom11.phys.ocha.ac.jp/ftp/pub/lecture/dielectric_relaxation.pdf)
- [5] [http://www.toray-taf.co.jp/img/product\\_group/Metaloyal.pdf](http://www.toray-taf.co.jp/img/product_group/Metaloyal.pdf)