

Mitigation of Power Loss due to Skin Effect-III

Yoshihisa Iwashita, Yujiro Tajima, Masahiro Ichikawa, Hiromu Tongu, Hiroshi Fujisawa
ICR, Kyoto University
Gokanoshō, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

A part of a conductor surface has to be covered with insulated thin conductor foils in order for the skin loss to be mitigated. A resonant frequency of the insulator volume tends to fall close to the operating frequency and consume extra energy. This effect can be reduced with a thickness step of the insulating layers. A precise measured data of this effect on a coaxial cavity is presented together with calculated results using a simulation code for axi-symmetric geometry. A new analysis method using transmission line model would help to widen its application.

表皮効果に起因する損失の低減－その 3

1. はじめに

導体薄膜を使うことによる表皮効果での電力損失の低減は、1951年にA.M.Clogston[1]によって提唱されていたが、未だその実装例は多くなく、普及しているとは言い難い。この薄膜を使う手法では、一般に、空洞内における特定の内表面を、基材から絶縁された導体薄膜で電流の流れる方向に半波長のオーダーにわたってカバーする必要がある。この際、薄膜と基材との間の絶縁層が新たな共振器を構成するので、この空間に過剰なエネルギーが入ることを防ぐ必要があるがこれを如何に防ぐかが難問であり、普及を妨げてきた一因と我々は考えている。最近になって誘電体共振器における実装例が報告された[2]。この系に於いて、薄膜電極の形状を工夫することにより、製作上の制約の緩和が可能になった[3]。

これに対して、前回、絶縁層の厚さを場所により変化させこれを防ぐ方法を紹介し、150MHz周波数帯での予備的な実測の確認を報告した[4,5]。その後実験を繰り返し、確度の高い測定値を得た。また、電磁界分布を形状を与えて直接計算するシミュレーションの方もより実体に近い体系を用いて実験値と比較を行った。任意の形状を与えて電磁界分布を直接計算する方法はいかなる形状でも扱えるメリットはあるが、一般に、通常の空洞では 10^6 程度のサイズ比を持つメッシュを同時に扱う必要があるためメッシュ数が膨大になり、実用上は軸対称もしくは2次元の形状のみがその計算対象となり適用範囲が大きくない。このため、伝送線路による解析方法を試みたので、その結果も報告する。

2. 薄膜に於ける表皮効果

Fig.1aのように電気伝導率 $\sigma(\gg i\omega\epsilon)$ を持つ半無限空間を占める導体を考えると、導体内での電流分布は以下のように表記できる。

$$j(x) = j_0 e^{-(1+i)x/\delta}, \quad \delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$$

ここで、 δ はいわゆる表皮厚さである。この導体表面に絶縁層を挟んで導体薄膜をおく。導体薄膜に表面電流の一部を負担させて電流密度の緩和が出来れば、薄膜の裏側（基材側）の磁場分布は表側より減少する。この比を ξ と置けば、表からの右向きの成分 j_f と裏からの左向き j_b の成分を使って、薄膜内の電流分布は以下のように書ける。

$$j(x) = H_z(0) \left(j_f e^{-(1+i)x/\delta} + j_b e^{-(1+i)(\alpha\delta-x)/\delta} \right),$$

導体中で位相は急速に変化するが、この状況を直感

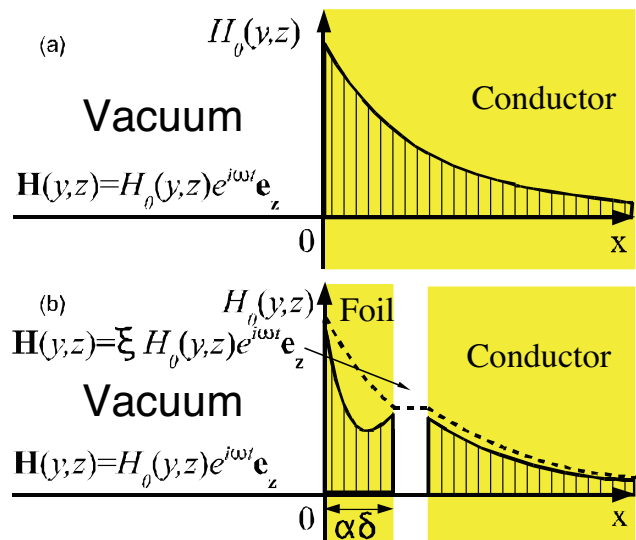


Figure 1: Bulk conductor and a conductor foil immersed in RF field. The magnetic field has only a component parallel to the surface of the bulk and the foil. (a) A bulk conductor alone. (b) An insulated conductor foil layer on a bulk conductor. The solid lines shown in the conductors shows the absolute value of the current density or the magnetic field in the conductors. The broken line shows that in the bulk case (a) as a comparison.

的に理解するために、これを無視して損失に関する絶対値を示したのがFig.1bである。この図では薄膜の厚さが適当であれば、中央付近で右向き成分と左向き成分が充分打ち消し合うという状況を示している。表皮厚さより充分薄ければこの打ち消し合いが大きくなり、薄膜中の電流密度の絶対値そのものも小さくなる。この辺りの詳細などは他稿に譲る。電力損失比を表の磁場強度と裏の磁場強度比 ξ の関数で表したのがFig.2である。薄膜の厚さ $\alpha\delta$ をちょうど表皮厚さ程度($\alpha=1$)に選べば、 $\xi=0.5$ 程度に電力損失に関する最小値が得られる。

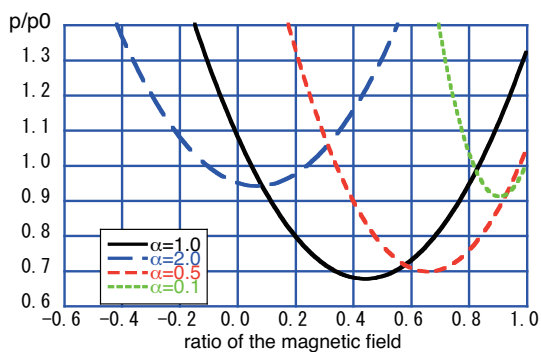


Figure 2: The power loss P of Fig. 1(b). The power loss is normalized by P/P_0 . P_0 is the power loss for Fig. 1(a).

誘電体共振器への適用の詳細は前回[5]の繰り返しになるので割愛するが、導体薄膜を基材上の全面に置かず、その面形状や絶縁体層の厚さを工夫することにより、実装が可能である。

4. 同軸空洞での実測

Fig.3のような体系で同軸空洞における上述の手法の効果を確認している。空洞の長さは2mで、下から2番目の共振モードで150MHzを用いている。表皮厚さは $5.4\mu\text{m}$ なので、メーカーの公称値 $5\mu\text{m}$ のメタライズドカプトンシートを使用した。これを中央の半分領域に貼り、端から切り詰めていき、Q値をその都度測定した。更なる実験手法の詳細は前回の報告に譲る[5]。今回行った、詳細な測定結果をシミュレーション結果とともにFig.4に示す。縦軸は最後にシートを全部はぎ取った後のQ値を基準にした比、横軸は薄膜シートの長さである。測定精度などから考えて、有意の差が得られている。空洞全体の内表面の1/4程度しかカバーしていないため、この上昇は約4割に相当すると考えられ、基材も数に入れた層数の平方根程度に改善できるという予想を裏付けている。

シミュレーションは、POISSON/SUPERFISHコードグループに含まれているCFISHを使って行った。

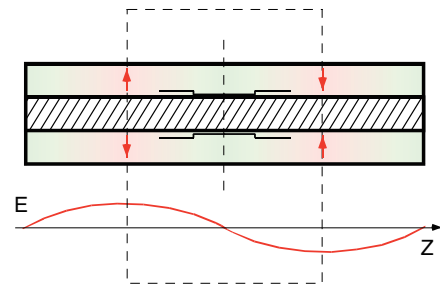


Figure 3: Experiment on a coaxial cavity.

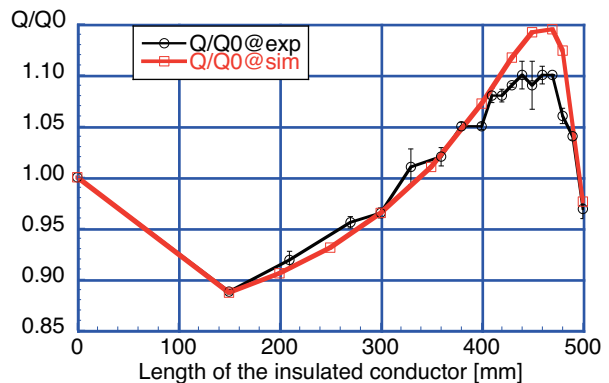


Figure 4: Measured and calculated Q values.

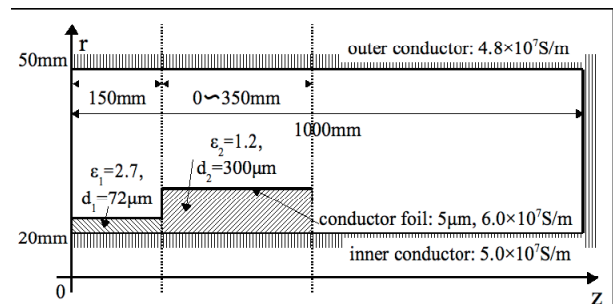


Figure 5: Geometry for the Q value estimation.

今回は地道に形状通りに体系を入れて行った(Fig.5参照)。ここでは端板以外のすべての導体表面を損失のある体積として扱っている。ピークの高さなどに若干の相違が見られるが、これは導体箔の厚さや表面粗さ、電気伝導率の不均一性などに依るものと想像される。

5. 伝送線路による解析

メッシュを切る2次元コードでは任意の形状を扱うことが出来るという利点がある反面、今回のような全体系に比して非常に細かい構造を取り扱う問題は手間や時間が非常にかかり、かつ見通しが悪いという難点がある。このため、薄膜と基材間の絶縁層を一種の伝送線路として扱い解析を行ってみた。同軸空洞の内導体近傍(薄膜の下を含む)の磁場分布とその上の領域の磁場分布を模式的に表したのが

Fig.6及び7である。Fig.6は均一厚さの導体薄膜カプトンシートを貼った場合の分布である。Fig.6aでは、シートの長さが層間波長 λ の1/4以下の時の分布であるが、一般に絶縁体は比誘電率が本体側（空洞部）よりも大きいため、空間的位相が早く廻る。 $Z=0$ は対称性から磁場分布の腹となる。磁場はシートの端で連続になるため、絶縁層内の磁場はその外よりも大きくなる（ $\xi > 1$ ）。また、 $\lambda/4$ よりも長くなると、Fig.6bのようになり、符号まで反転する。電力損失の低減が起こるには上述のように $\xi \sim 0.5$ 程度の条件があるため、このままでは実現できない。

Fig.7では絶縁層の部分に段を付けてある。ギャップの広い領域から狭い方を見ると、インピーダンスが非常に小さいので、ショートしているように見え、空間位相の進み方が一旦リセットされるようになる。このため、全体として波長が延びる。各寸法を適当に選べば、層間の磁場分布が外部の約半分という条件（ $\xi = 0.5$ ）に近い条件が実現できる。

このようにして解析した結果をCFISHによるそれと比べたのがFig.8であり、非常に良く合っている。

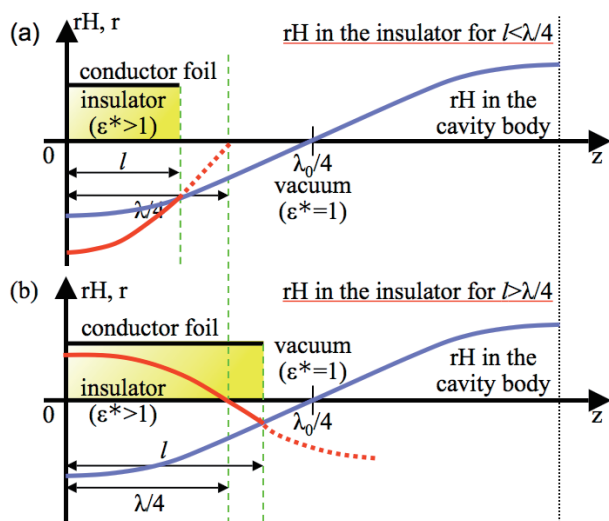


Figure 6 Distributions of the magnetic field, rH .

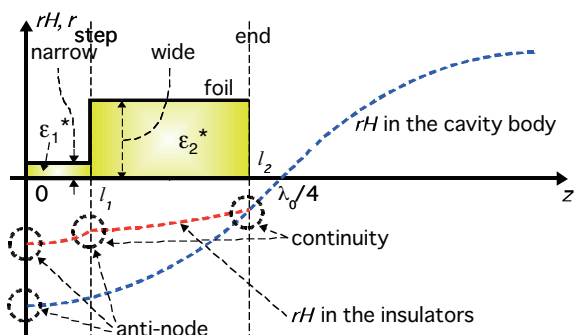


Figure 7 The distribution of the magnetic field, rH , when the insulated conductor has a stepped structure.

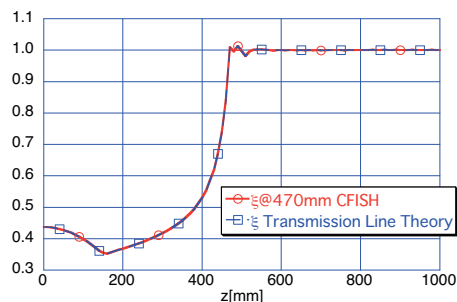


Figure 8 The magnetic field ratio ξ as a function of Z .

残念ながら、これを実測するのは至難の業であるが、 Q 値の変化がよく合っているので、大きなずれはないと思われる。

6. まとめ

今回は、前回に引き続いて実験を繰り返し、測定精度を上げることが出来た。CFISHシミュレーションについても、前回は計算時間の短縮のため周波数や形状をスケールした体系で行ったが、メッシュの切り方を工夫することにより、ほぼ、実物に近い体系で行うことができた。寸法や誘電率、電気伝導率なども個別に測定したものを使っているため、全体のサイズに比べて4～5桁小さいスケールのメッシュサイズを使っているが、測定値とシミュレーションの一致は良いと言えよう。誘電率や電気伝導率などの測定ではRFではなく、低周波やDCで行ったので、分散や表面粗さなどが考慮できず、若干のずれはこれらに起因するものであろう。

CFISHシミュレーションではやはり膨大なメッシュを切る必要があり、その手間や計算時間がバカにならない。伝送線路を使った解析はこれに対する解決策で、比較的直感に訴える手法であり、今後の設計に新たな指針をあたえることができよう。

参考文献

- [1] A. M. Clogston, Reduction of Skin-Effect Losses by the Use of Laminated Conductors, Proc. of the IRE, **39**-7, July 1951, pp.767-782
- [2] 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
- [3] Y. Iwashita: Reduction of Power Loss Caused by Skin Effect, LINAC 2004, Lübeck, Germany pp. 700-702. <http://cern.ch/AccelConf/104/PAPERS/THP43.PDF>
- [4] Y. Iwashita: "Mitigation of Power Loss Due to Skin Effect by Thin-Layered Film", Proc. of LINAC 2006, Knoxville, TN, USA pp. 785-787 <http://cern.ch/AccelConf/106/PAPERS/THP086.PDF>
- [5] Y. Iwashita, Mitigation of Power Loss due to Skin Effect-II, Proc. the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan) http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceedings/T/TO06.pdf