

空洞摂動法と電磁場シミュレーションによる高周波吸収体の特性評価手法

MESUREMENT METHOD OF RF ABSORBING CHARACTERISTICS USING A CAVITY-PERTURBATION METHOD AND AN ELECTROMAGNETIC SIMULATION

山口孝明^{#, A, B)}, 山本尚人^{A)}, 内藤大地^{A)}, 高橋毅^{A)}, 坂中章悟^{A)}

Takaaki Yamaguchi^{#, A, B)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Daichi Naito^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}

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

^{B)} Department of Accelerator Science, The Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI)*

Abstract

We measured RF absorbing characteristics of a ferrite sample using a cavity-perturbation method combined with an electromagnetic simulation. In this method, high dimensional accuracy is not needed in the measured sample in contrast with the Nicolson-Ross-Weir (NRW) method. Then, this method is adequate for confirming the measurement results with the NRW method. In this paper, we present the design of the rectangular cavity for measurement, the measurement results for the HF70 ferrite, and comparison of them with those from the NRW method.

1. はじめに

現代の円形加速器では、主に結合バンチ型ビーム不安定性を防ぐ目的で、高周波加速空洞や真空チェンバーに高周波吸収体が多く使われている。吸収体を選定する際、その材料の複素誘電率と複素透磁率を測定し、高周波吸収特性を評価することが不可欠である。高周波での周波数特性の評価手法として、同軸線路や導波管に測定試料を挿入し、反射・透過係数測定から特性を得る Nicolson-Ross-Weir (NRW) 法[1]がよく用いられている。この方法は、幅広い周波数帯域での特性評価に優れている一方で、試料と線路との間に隙間があると測定誤差の要因となるため、測定試料は極めて高い精度で製作する必要がある。例えば、NRW 法の測定でよく使用される内導体外径 3.04 mm、外導体内径 7.00 mm の同軸型サンプルホルダの場合、これに封入するドーナツ型試料は、内径および外径を $\sim 10\mu\text{m}$ の精度で製作する必要がある。実際、製作誤差には限界があるため、NRW 法での測定結果を検証する別の測定方法があることが望ましい。そのような方法として空洞共振器法がある。これは高周波空洞内に測定試料を導入し、電磁場共振モードの共振周波数と Q 値の変化から試料の周波数特性を評価する方法である。この方法では、空洞の共振周波数のみに測定点が限られるが、測定試料の寸法精度にこだわる必要がない点で優れている。しかし、今までに良く知られている空洞共振器法は摂動論に依拠しており、電波吸収が大きい試料には成り立たない。本研究では、今までの空洞共振器法に電磁場シミュレーションを組み合わせることで、試料の電波吸収が非常に大きい場合においても特性評価を行える手法を考案した。その後、実際にアルミ合金製の試料測定用空洞を製作し、KEK Photon Factoryにて開発中の 1.5 GHz 高調波空洞[2]で使用する予定のフェライト HF70 (TDK 社製)の高周波特性を 1.5 – 3 GHz の帯域で測定した。この空洞

共振器法による測定結果と NRW 法での測定結果を比較検討した。

2. NRW 法によるフェライト HF70 の特性評価結果

フェライト HF70 は Ni-Zn 系のフェライトで、0.1 – 10 GHz 帯で高周波吸収特性を有しており、加速空洞や真空チェンバーで高次モードを減衰する用途に適している。我々は、第 4 世代光源でバンチ伸長システムを導入することを目指し、1.5 GHz 高調波空

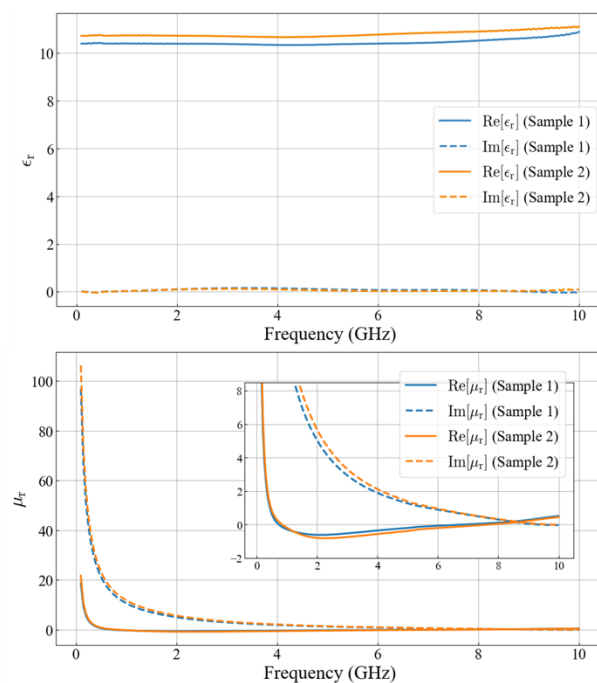


Figure 1: (Upper) relative electric permittivity and (lower) magnetic permeability of the HF70 ferrite measured by NRW method. In the inset of the lower figure, the ordinate is magnified.

yamaguc@post.kek.jp

*Until March 2023

洞の開発研究[2]を行っており、その寄生モード減衰機構にこの HF70 を使用することを考えている。同フェライトの先行導入事例としては、SuperKEKB 加速器の高次モード減衰型真空チェンバー[3]や、東北の次世代放射光施設 NanoTerasu で導入される TM020 型 RF 空洞[4, 5]がある。

ここで、HF70 の NRW 法による特性評価結果を示す。NRW 法での測定試料として、外径 7.00 mm、内径 3.04 mm、厚さ 2 mm のドーナツ状のフェライト試料を 2 サンプル製作した。フェライト試料の外径、内径寸法の製作公差はおよそ 0.1 mm 以下である。これを 1 つずつ同軸型サンプルホルダに入れて測定した。

NRW 法による 2 サンプルの複素比誘電率(ϵ_r)、複素比透磁率(μ_r)の測定結果を Fig. 1 に示す。誘電率は、周波数 0.1–10 GHz の帯域ではほぼ一定値の 10.4–10.8 であった。透磁率においては数百 MHz から数 GHz 帯で虚数部が大きく、高周波吸収特性が確認できる。

また、興味深い点として、透磁率の実部が 2–3 GHz 辺りで負の値をとっている。誘電率・透磁率の虚数部(ϵ_r'' , μ_r'')はエネルギー保存則から正值でなければならない一方、実部(ϵ_r' , μ_r')の符号について物理的に制限はなく負値となっても矛盾はない。この NRW 法での結果を確認するため、空洞共振器法による特性評価を検討した。

3. 空洞摂動論に基づく特性評価法

最初に摂動論に基づく空洞共振器法の原理を示す。今、空洞内に誘電体または磁性体の微小な試料（体積： ΔV ）を導入した場合を考える。空洞内に 1 つの共振モードのみが励起されている場合、その共振モードの共振周波数と無負荷 Q 値はそれぞれ次のように変化する[6]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r' - 1) |E|^2 + \mu_0 (\mu_r' - 1) |H|^2}{4W} \Delta V, \quad (1)$$

$$\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \mu_0 \mu_r'' |H|^2}{2W} \Delta V. \quad (2)$$

ここで、 Δf は試料挿入前の共振周波数 f_0 からの周波数変化量、 $\Delta(1/Q)$ は無負荷 Q 値の逆数の変化量、 W は空洞内の電磁場エネルギー、 E , H はそれぞれ試料を置く前のその位置における電場と磁場である。Equations (1), (2) を使うと、磁場がほぼゼロの場所または電場がほぼゼロの場所に試料を置き、それぞれの場合で Δf , $\Delta(1/Q)$ の値を測定すれば、誘電率と透磁率の実部、虚部を特定することができる。

但し、Eqs. (1), (2) は試料が十分小さいことに加えて、試料が十分低損失のときにのみ成り立つ。一方、電波吸収体として使われる物質は、誘電損失または磁性損失が非常に大きいため Eqs. (1), (2) が一般的に成立せず、誘電率・透磁率の虚数部も周波数変化に寄与する。

現在の CST MW Studio[7]等の電磁場シミュレーションソフトウェアでは、損失のある物質を含めた

電磁場固有モード計算が可能であり、摂動論に依拠せずとも Eqs. (1), (2) の Δf , $\Delta(1/Q)$ の値を計算することができる。そこで、試料測定用の空洞を製作し、空洞共振器法と電磁場シミュレーションを組み合わせ、フェライトの特性評価を試みた。

4. 試料測定用空洞の設計・製作

4.1 空洞形状

試料測定用空洞の形状として、空洞壁面に測定試料を貼り付けやすい矩形型を採用した。矩形型空洞の電磁場共振モード $TM_{m, n, p}$ 及び $TE_{m, n, p}$ モードの共振周波数は、

$$f(m, n, p) = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (3)$$

である。ここで、 c_0 は測定媒質中での光速、 a, b, d はそれぞれ空洞の x 方向、 y 方向、 z 方向の寸法、 m, n, p は正の整数である。

空洞共振器法では特性評価の測定点が共振周波数のみに制限されるため、測定したい周波数に合わせて寸法 a, b, d を選択する必要がある。今回は NRW 法の測定で透磁率の実部が負となる周波数帯 (1.5–3.0 GHz) に的を絞って、空洞寸法を $a=115$ mm, $b=50$ mm, $d=200$ mm と選択した。このときの共振周波数を小さい順に Table 1 に示す。高周波測定を行う際に隣り合う共振が周波数的に近いと、場合によっては共振カーブが重なってしまい Q 値の測定などで正確な値を取得できない可能性がある。Table 1 から少なくとも $(m, n, p) = (0, 1, 1)$ までは隣り合う共振周波数が 80 MHz 以上離れているため特性評価に使用できる。

今回の測定では、TE101, TE102, TE103, TE201, TE011 モードを使用した。これらの共振モードの電磁場分布を Fig. 2 に示す。

4.2 空洞の機械設計と製作

試料測定用空洞の 3 次元 CAD 図と実際に製作した

Table 1: Resonant Frequencies of the Rectangular Cavity

m, n, p	Frequency (GHz)
1,0,1	1.504
1,0,2	1.986
1,0,3	2.599
2,0,1	2.712
2,0,2	3.007
0,1,1	3.090
1,1,0	3.269
1,0,4	3.269
0,1,2	3.352
1,1,1	3.354

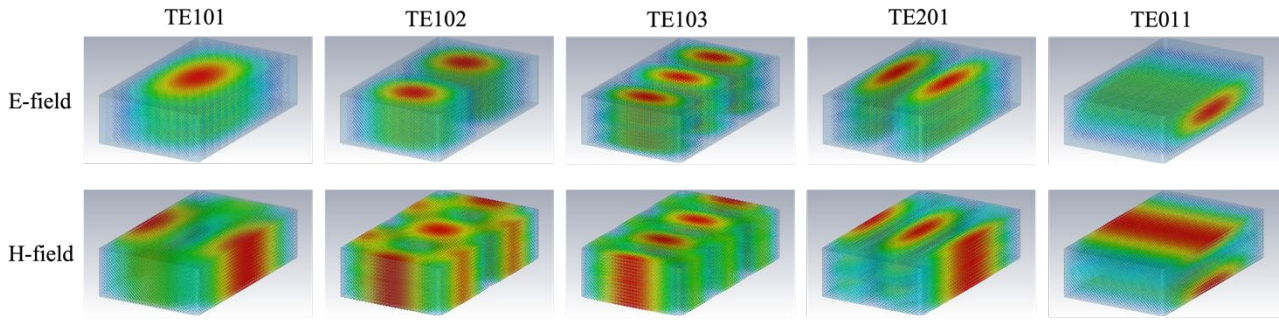


Figure 2: Electromagnetic field patterns of resonant modes used in our measurement. The upper row shows the electric fields and the lower one shows the magnetic fields. The color in the arrows indicates the relative intensity of the fields.

空洞の写真を Fig. 3 に示す。本空洞はアルミ合金 (A5052)製で、上蓋、側面部、底蓋からなる構造である。上蓋と底蓋は M6 ボルトで側面部にそれぞれ固定される。側面部の 4 隅の曲率半径は 4 mm である。

高周波測定を行うためのプローブポート($\phi 5$ mm)を上蓋に 3 箇所、側面部に 1 箇所配置した。測定に使用する共振モードに応じてポートを使い分けた。高周波測定ではアンテナ型のプローブを使用して電磁場共振モードの測定を行った。TEモードの電場とそれと縮退している TM モードの電場は向きが直交しているため、TE モードと TM モードを同時に励振することはないと思われる。

5. 高周波測定

5.1 測定試料

空洞共振器法で測定する試料として、寸法 $8\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の直方体状の HF70 フェライトサンプルを作成した。このサンプルは先の NRW 法で測定した円筒型試料と同じロットのもので制作した。そのため、NRW 法で測定した試料と、空洞共振器法で測定した試料は同一の特性を有すると考えられる。

5.2 測定方法

フェライト試料の特性評価のため、ネットワークアナライザ(Keysight Technologies, E5080A)を用いて空洞の高周波測定を実施した。まず、フェライト試料を挿入しない場合で、各モードの共振周波数周辺でプローブからの反射係数(S_{11})測定を行った。使用したプローブポート(Fig. 3)は、TE101, TE103 モードに対しては Port 1、TE102 モードに対しては Port 2、TE201 モードに対しては Port 3、TE011 モードに対しては Port 4 を使用した。反射係数の測定結果を Fig. 4 に実線 (青色) で示す。

次に試料を挿入して同様の反射係数測定を行った。今回は複素透磁率の測定を行うため、それぞれの共振モードにおいて磁場が強い空洞壁面にフェライト試料を設置した。試料の設置箇所を Fig. 5 に示す。試料は市販の両面テープを用いて貼り付けた。なお、ボルトの締め外しによる共振周波数や Q 値の誤差を低減するため、試料の取り外しのため蓋の開閉を行った際は、トルクレンチを使用しトルク管理を行った。試料ありでの反射係数の測定結果を Fig. 4 に破線 (橙色) で示す。

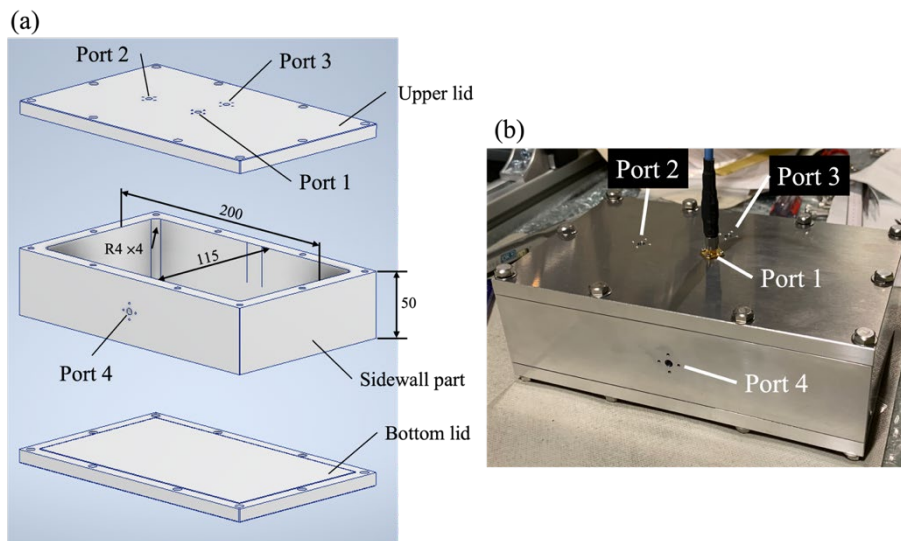


Figure 3: (a) Three-dimensional image of the rectangular cavity, and (b) the photograph of the assembly of the cavity. At this time, the antenna probe was connected to the Port 1 for measurement.

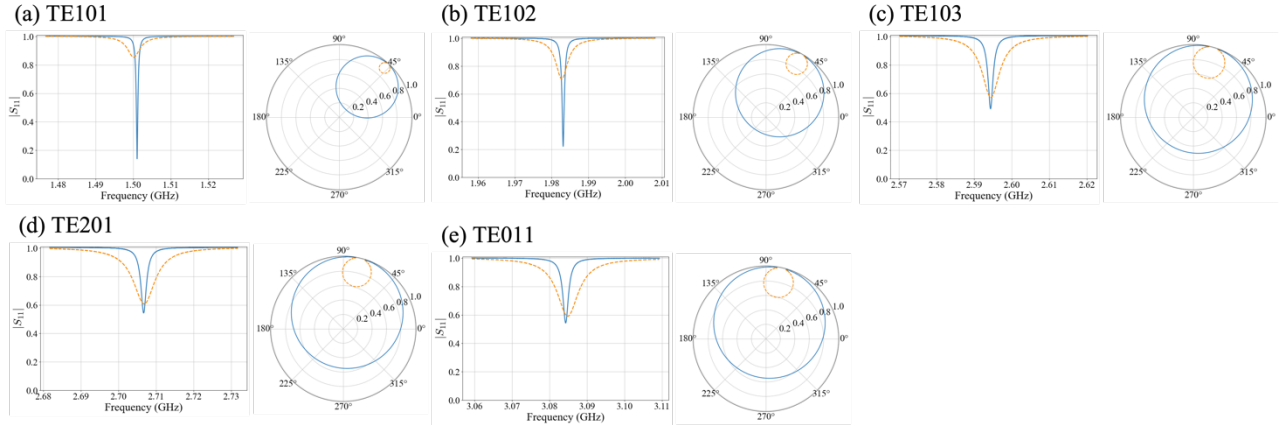


Figure 4: (a) – (e) Measured reflection coefficients (S_{11}) around the resonant frequencies of the TE101, TE102, TE103, TE201, and TE011 modes, respectively. The left figures show the absolute values of S_{11} as the functions of frequency and the right figures show those polar representations. The dashed and solid lines show S_{11} with and without the ferrite sample, respectively.

5.3 解析

測定した反射係数 S_{11} から共振周波数と Q 値を取得するため、測定データを次式にフィットした

$$S_{11}(f) = \frac{\hat{Z}_{in}(f) - 1}{\hat{Z}_{in}(f) + 1} e^{j\phi} + A_{\text{offset}} e^{j\phi_{\text{offset}}}, \quad (4)$$

$$\hat{Z}_{in}(f) = \frac{\beta}{1 + jQ_0(f/f_0 - f_0/f)} + \hat{Z}'(f), \quad (5)$$

$$\hat{Z}'(f) \approx \hat{R}'(f_0) + j \hat{X}'(f_0) + \left(\frac{d\hat{R}'}{df}(f_0) + j \frac{d\hat{X}'}{df}(f_0) \right) (f - f_0). \quad (6)$$

ここで、 f_0 は今測定している共振モードの共振周波数、 $\phi + \pi$ は S_{11} の off-resonance での位相である。また、 $\hat{Z}_{in}(f)$ は detune short circuit (DSC) 面からみた周波数 f_0 近傍における空洞の相対入力インピーダンス、 Q_0 は無負荷 Q 値、 β は共振モードとプローブ間の結合定数である。今、入力インピーダンスは同軸線路の特性インピーダンスからの相対値で考えている。Equation (4) 右辺第 2 項は、ネットワークアナライザの校正誤差等に伴う offset 項である。また、Eq. (5) の右辺第 1 項が今測定している共振モードのインピーダンス、第 2 項の $\hat{Z}'(f)$ がそれ以外の共振モードによるインピーダンスである。Off-resonance のインピーダンスは、周波数 f_0 近傍では緩やかに変化するため、Eq. (6) のように線形近似で十分であろう。

Figure 4 の反射係数の測定結果を Eqs. (4) – (6) にフィットすることでそれぞれの共振モードのフェライト試料有無における共振周波数、無負荷 Q 値を得た。フェライト試料の設置による共振周波数と Q 値の逆数値の変化を Table 2 に示す。括弧内の値は、フィッティング誤差から算出した測定誤差である。

5.4 シミュレーションによる複素透磁率の同定

CST MW Studio, Eigenmode Solver を用いて、フェライト試料の複素透磁率の実部 μ_r' 、虚部 μ_r'' をパラメータとして、Table 2 に示したような Δf , $\Delta(1/Q)$ の値を計算した。計算例として、TE101 モードの共振周波数、無負荷 Q 値の変化 Δf , $\Delta(1/Q)$ をそれぞれ、 (μ_r', μ_r'') 平面での等高線図として Fig. 6 に示す。フェライト試料の設置位置は Fig. 5(a) の位置である。計算では複素透磁率の実部、虚部をそれぞれ $\mu_r' = -5, -4, \dots, 5$, $\mu_r'' = 1, 2, \dots, 11$ と 1 刻みでスイープした。誘電率は NRW 法での測定値 $\epsilon_r = 10.6$ を仮定した。

Figure 6 の等高線図に TE101 モードでの測定結果 $\Delta f = -0.913$ MHz, $\Delta(1/Q) = 23.3 \times 10^{-4}$ に相当する等高線

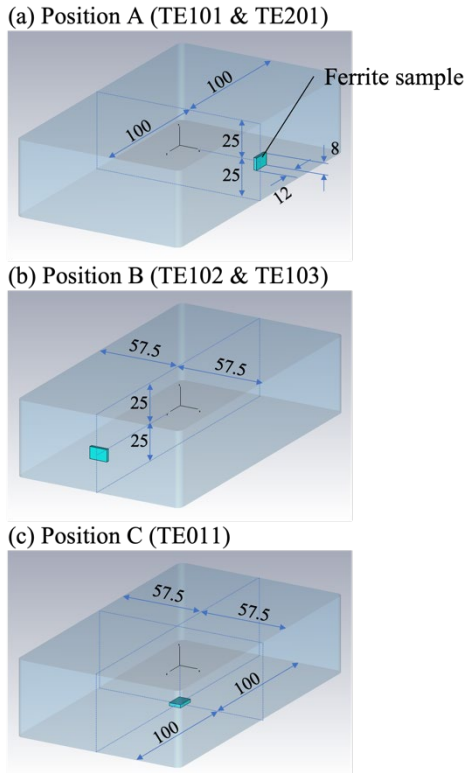


Figure 5: Position of the ferrite sample.

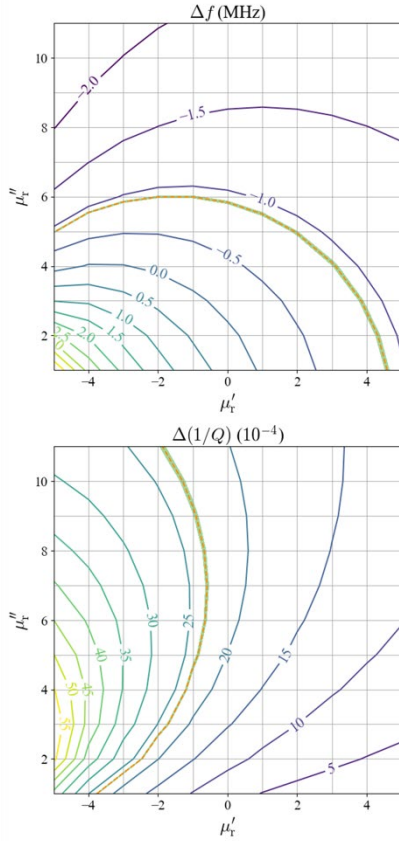


Figure 6: Contour plots of (upper) simulated frequency change (Δf), and (lower) change of the inverse of the unloaded Q [$\Delta(1/Q)$] in the TE101 mode. The position of the ferrite sample is Position A in Fig. 5(a). The abscissa shows the real part of the permeability of the ferrite sample and the ordinate shows its imaginary part. Each grid point shows the simulated (μ_r', μ_r'') point.

を破線 (橙色) で示す。緑色で示した部分は測定誤差を示す。Figure 6 の測定値に相当する 2 つの等高線の交点 (μ_r', μ_r'') が、TE101 モードの共振周波数 1.50 GHz でのフェライト試料の複素透磁率である。このように測定した複素透磁率の値を Fig. 7 に示す。比較のため、Fig. 1 に示した NRW 法での測定結果も示す。エラーバーはシミュレーションでの (μ_r', μ_r'') の刻み幅から決めた。これと比べ $\Delta f, \Delta(1/Q)$ の測定誤差による (μ_r', μ_r'') の測定値の誤差は、その 10% 程度である。

6. 結論

従来の摂動論に基づく空洞共振器法では、損失が非常に大きい試料の特性評価は困難であった。本研究では、空洞共振器法と電磁場シミュレーションを組み合わせ、高周波吸収体の特性評価を行った。実際に、測定用の空洞としてアルミ合金製の矩形型空洞を製作し、フェライト HF70 の特性評価を行った。周波数 1.5 – 3.0 GHz の帯域で空洞共振器法による評価を行ったところ、複素透磁率の測定値は NRW 法の測定結果を概ね再現する結果となった。この結果

Table 2: Changes of the Resonant Frequencies and the Inverses of the Q Factors

Mode	Frequency change Δf [MHz]	Q-factor change (inverse) $\Delta(1/Q)$ [10^{-4}]
TE101	-0.913 (± 0.01)	23.3 (± 0.14)
TE102	-0.399 (± 0.026)	16.3 (± 0.27)
TE103	0.082 (± 0.001)	17.9 (± 0.27)
TE201	0.202 (± 0.009)	21.8 (± 0.64)
TE011	0.538 (± 0.021)	18.6 (± 0.36)

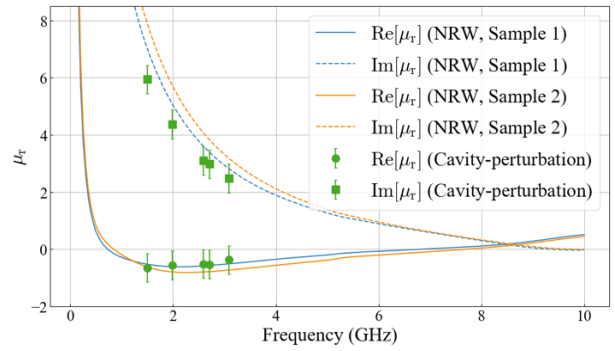


Figure 7: Comparison of the measured complex permeability with the NRW method (solid and dashed lines) and the cavity-perturbation method (circles and squares).

をもって、NRW 法の測定結果の正しさを少なくとも 1.5 – 3.0 GHz の範囲で確認することができた。

今回の測定から、電磁場シミュレーションと空洞共振器法を組み合わせた特性評価方法は、NRW 法の結果の確認に有用であることがわかった。今回はフェライトについて測定を行ったが、今後は SiC など他の物質についても測定を行いたいと考えている。

謝辞

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2104 と JSPS 科研費 JP20H04459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] A. M. Nicolson and G. F. Ross, IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-19, 4 (1970).
- [2] T. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1053, 168362 (2023).
- [3] S. Terui *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1053, 168371 (2023).
- [4] H. Ego *et al.*, in Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan (2019), p. 17.
- [5] T. Inagaki *et al.*, in Proc. IPAC23, Venezia, Italy.
- [6] 藤澤和男, “改訂マイクロ波回路”, コロナ社 (1972), pp. 150 – 152.
- [7] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>