

遮断円筒導波管法によるミリ波複素誘電率の 測定結果に関する検討

針谷 智 清水 隆志 小林 禧夫

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科
〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255
電話: 048-858-3477, Fax: 048-857-2529
E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 遮断円筒導波管法は、長さ方向中央で分割された遮断円筒導波管の間に試料を挟み、 TE_{011} モードの共振周波数 f_0 の変化より比誘電率 ϵ_r を、無負荷 Q , Q_0 より誘電正接 $\tan\delta$ を求めるミリ波帯における測定法である。

本報告では、本法により 3 個の導体円筒空洞を用いて 6 枚の PTFE 平板試料、8 枚のサファイア平板試料についてラウンドロビンテストを行った。その結果、他モードが TE_{011} モードに近接している場合 $\tan\delta$ 測定に影響すること、円筒と試料間に空隙が生じると ϵ_r 測定に影響することがわかった。また、その空隙の影響を考慮することにより、円筒空洞に依存しない高精度な ϵ_r 測定が行えることを実証した。

キーワード 遮断円筒導波管法, ミリ波複素誘電率測定, ラウンドロビンテスト

A Study on Measured Results of Complex Permittivity by Circular Cut-off Waveguide Method in Millimeter Wave Region

Satoshi Harigai, Takashi Shimizu, and Yoshio Kobayashi

Dept. Electrical and Electronic System, Saitama University
Shimo-ookubo 255, Saitama, Saitama, 338-8570 Japan
Phone: +81-48-858-3477, Fax: +81-48-857-2529
E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract We performed round robin test for measurement of the complex permittivity for 6 PTFE plates and 8 Sapphire plates with 3 circular cavities by circular cut-off waveguide method in millimeter wave region. In the results, we found that another mode close to the measured mode affected measurement of $\tan\delta$ and the gap space between circular cavity and sample affected measurement of ϵ_r . We verified that we could measure ϵ_r with a high degree of accuracy by considering the gap space.

Key words Circular cut-off waveguide method, Millimeter wave, Complex permittivity measurement, Round Robin Test

1. はじめに

空洞共振器法は、誘電体平板試料の比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ を、マイクロ波帯において非破壊かつ高精度に測定する方法として知られている^{[1]-[3]}。この方法では、誘電体平板材料を長さ方向に 2 等分した空洞の間に挟み、共振器を構成する。 ϵ_r と $\tan\delta$ は TE_{0ml} モードの共振周波数 f_0 と無負荷 Q 、 Q_u より計算することができる。

遮断円筒導波管法は、遮断円筒導波管を用いることにより空洞共振モードを取り除き、ミリ波帯におけるモード判別を容易にした測定法である。

本報告では、本法によりミリ波複素誘電率測定を行い、円筒空洞と試料間の空隙が ϵ_r に与える影響、および近接モードが $\tan\delta$ 測定に与える影響について検討を行った。

2. 測定原理

図 1 に Ritz-Galerkin 法による解析図を示す。比誘電率 ϵ_g 、厚さ g の支持誘電体に挟まれた比誘電率 ϵ_r 、厚さ t 、直径 d の誘電体平板が、直径 D 、高さ H の導体空洞の間に置かれる。試料の ϵ_r と $\tan\delta$ は TE₀₁₁ モードの共振周波数 f_0 と無負荷 Q 、 Q_u の測定値から、モードマッチング法による厳密な解析^[1]に基づいて開発された Windows 用プログラムを用いて求めることができる。

$\epsilon_r, \tan\delta$ は次式で求められる。

$$\det F(f_0; \varepsilon_r, \varepsilon_g, t, g, D, H, d) = 0 \quad (1)$$

$$\tan \delta = A/Q_n - BR_s \quad (2)$$

さらに、 R_s は導体空洞の表面抵抗であり、次式で

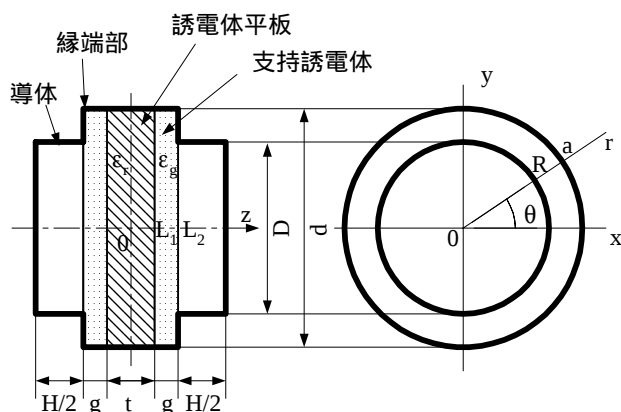


图1 解析图

与えられる。

$$R_s = \sqrt{\pi f_0 \mu_0 / \sigma} \quad (\Omega) \quad (3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_\theta \sigma_r \quad (5)$$

$$\sigma_0 = 58 \times 10^6 \text{ (S/m)} \quad (6)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 σ 、 σ_0 はそれぞれ導体の導電率、万国標準軟銅の導電率であり、比導電率 σ_r は後述のように空洞の Q_u の測定値より実験的に決定される。また、 A と B は D 、 H 、 g の導体摂動による共振周波数の摂動量から計算される定数であり、次式により与えられる。

$$A = \frac{f_0}{-\left(\frac{\Delta f_0}{\Delta \epsilon_r}\right)} \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{120\pi k_0} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\Delta \epsilon_r}{\Delta f_0} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta H} + \frac{\Delta f_0}{\Delta R} + \frac{\Delta f_0}{\Delta g} \right) \quad (8)$$

3. 共振器構造

3.1 寸法および導電率測定用空洞共振器

図 2(a)は 50GHz 帯での測定に用いた空洞共振器の構造を示す。この共振器は誘電体平板試料を挟むために、直径 D 、長さ H の導体円筒空洞が中央で 2 つに分割されている。円筒空洞の両端部の溝は、縮退している TM_{11p} モードの共振周波数を TE_{01p} モードから分離するためのものである。空洞共振器の励振および検波は、先端に微小ループを持つ UT-47 セミリジッド同軸線路（外径 1.2mm）により円筒側面から行われる。誘電体平板の ϵ_r 、 $\tan\delta$ を測定する前に、あらかじめ空洞共振器の D 、 H 、 σ を測定しておく必要がある。ここで、 D と H は測定可能な $TE_{01p}(p=1, 2, \dots)$ モードの共振周波数 f_0 全ての組合せから、 σ_r は TE_{011} モードの f_0 と無負荷 Q 、 Q_u から求められる^[3]。ここでは、寸法比 (D/H) の異なるもの、設計共振周波数 f_0 の異なるものの 3 個の共振器を用いた。

表 1 に 3 個の共振器の D, H 及び σ_r の測定結果を示す。

3.2 誘電体平板試料測定用共振器

厚さ t の誘電体平板試料は図 2 (b)に示すように 2 つに分割された共振器の間に挟み、クリップで固定される。このとき、円筒の両端に電波吸収材をおくと遮断円筒導波管とみることができ、不要な空洞共振モードを抑制することができる。高精度な測定を行うために TE_{011} モードを用い、先端に微小ループを

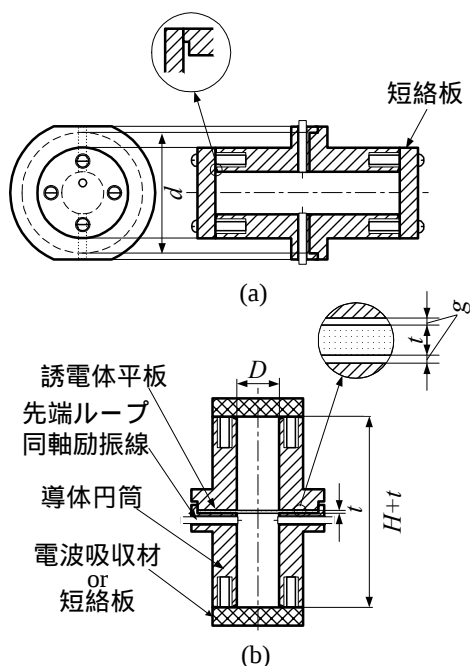


図2 測定に用いる共振器の断面図

(a) 空洞共振器

(b) 誘電体を装荷した共振器

表1 空洞共振器の寸法及び σ_r の測定結果

Cavity	f_0 (GHz)	Q_u	D (mm)	H (mm)	σ_r (%)
C-1	52.640 ± 0.001	10870 ± 90	6.985 ± 0.002	26.117 ± 0.105	80.4 ± 1.3
C-2	56.735 ± 0.002	10030 ± 80	6.482 ± 0.004	24.276 ± 0.282	73.6 ± 1.1
C-3	52.520 ± 0.001	11230 ± 80	6.991 ± 0.002	30.917 ± 0.079	85.7 ± 1.2

表2 PTFE 円板の試料寸法

試料 No.	d (mm)	t (mm)
P1	10.2 $\pm$ 0.071	0.255 $\pm$ 0.002
P2	10.1 $\pm$ 0.007	0.254 $\pm$ 0.001
P3	10.1 $\pm$ 0.007	0.291 $\pm$ 0.001
P4	10.3 $\pm$ 0.354	0.199 $\pm$ 0.001
P5	10.1 $\pm$ 0.021	0.198 $\pm$ 0.001
P6	10.0 $\pm$ 0.028	0.199 $\pm$ 0.001

持つ同軸線路により円筒側面から行われる。

今回、ミリ波帯における測定を目的としたため、薄い試料を用意した。

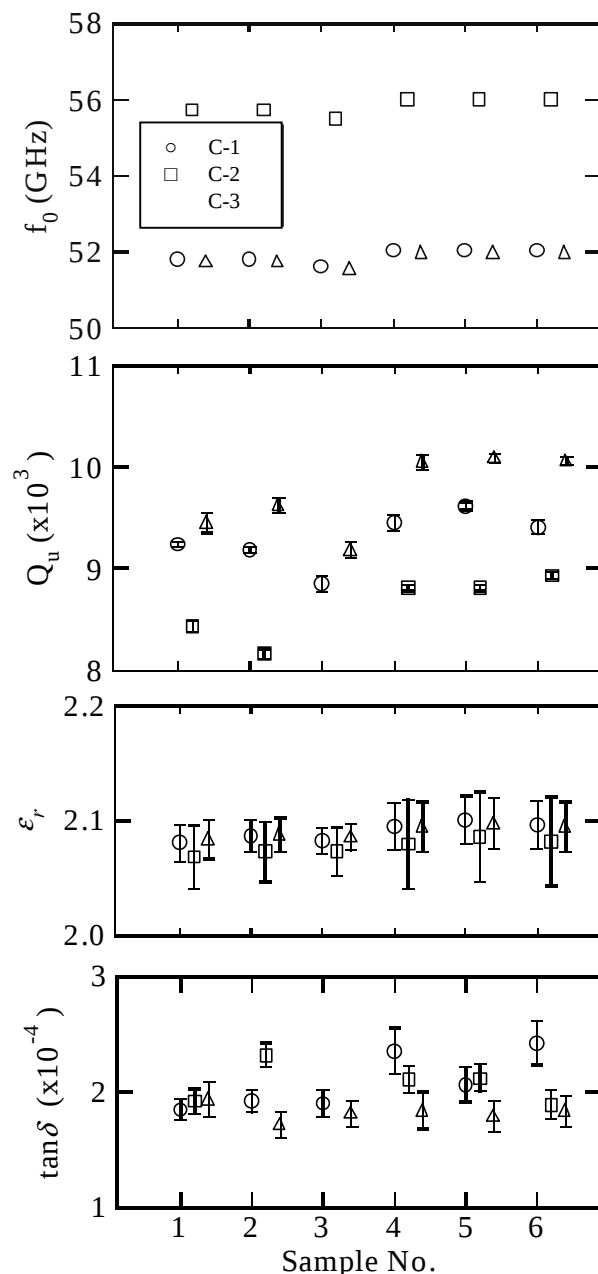


図3 空洞共振器法による PTFE の測定結果

4. 測定結果

4.1 PTFE 円板

表 2 に測定に用いた 6 枚の PTFE 円板試料の寸法（直径 d、厚さ t）を示す。

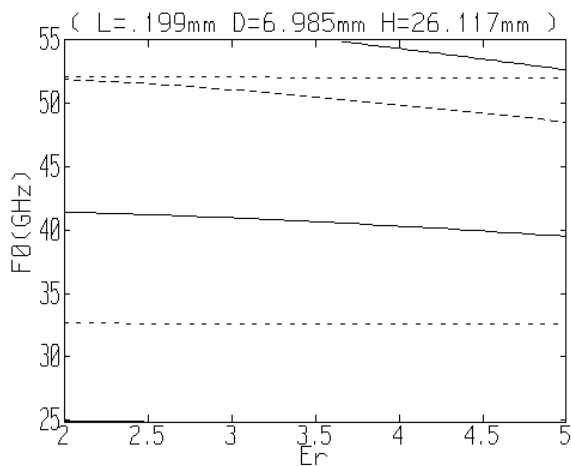
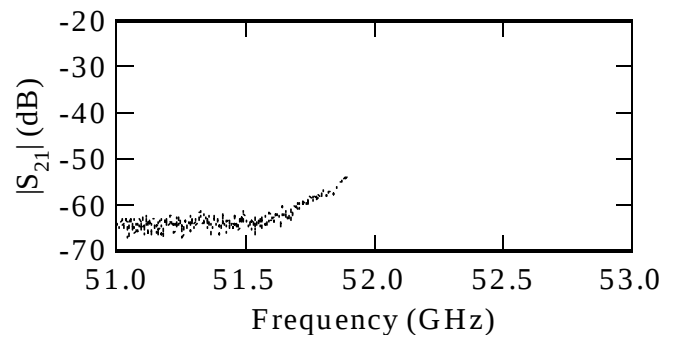
後述の理由により空洞共振器法で測定した。図 3 にその測定結果を示す。 ϵ_r の誤差棒は t の測定誤差、 $\tan\delta$ の誤差棒は Q_u の測定誤差によるものである。この図より、 ϵ_r はよく一致しており、50GHz 帯における PTFE の ϵ_r は 2.08~2.10 である。

一方、 $\tan\delta$ は約 2×10^{-4} であるが、試料 No. P4, 6 では C-1 円筒の場合、 $\tan\delta$ の測定結果が他の導体円筒の場合と比べ高い。これは、共振器により D/H が異なる

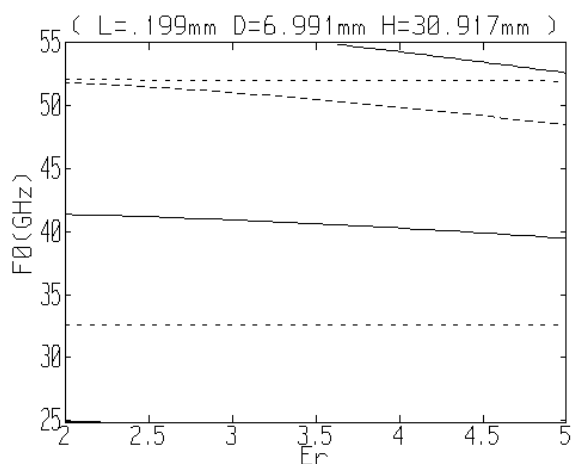
る、または設計共振周波数 f_0 が異なるため、この D/H 、 f_0 のとき他のモードが近接し、 Q_u 測定に悪影響を及ぼしていると考えられる。

図4に試料 No. P4 の遮断円筒導波管法のモードチャートを示す。図5に試料 No. P4 の周波数応答を点線で示す。(a)図は C-1 円筒を用いた場合、(b)図は C-3 円筒の場合である。このとき、いずれの導体円筒においても測定モードに低 Q の TM_{110} モードが重なり、 Q_u はそれぞれ約 4100、5500 ($\tan\delta=2.5 \times 10^{-3}$) であった。

そこで、モード分離するために導体円筒両端の電波吸収材を短絡板におきかえ、空洞共振器法で測定した。図6に空洞共振器法のモードチャートを示す。また、このときの周波数応答を図5中に実線で示す。C-1 円筒では TE_{011} モード付近に空洞共振モードが現れた。このとき、 Q_u は C-1 円筒のとき約 9400、C-3

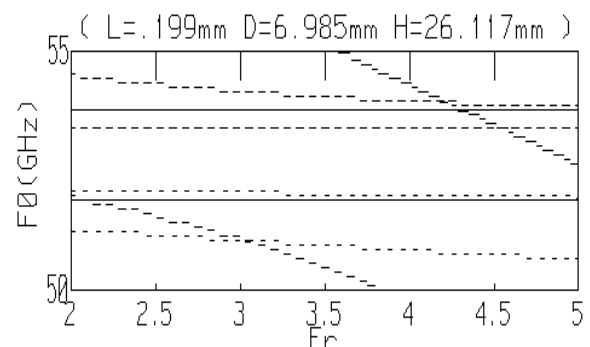


(a) C-1 円筒

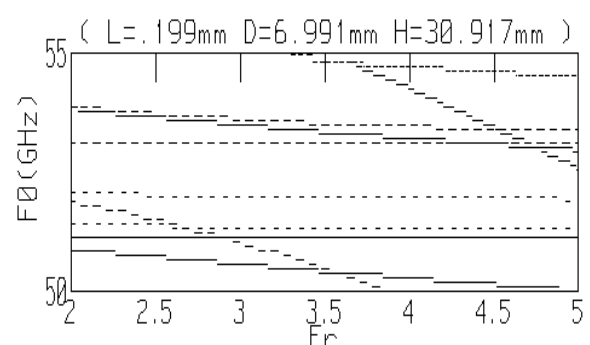


(b) C-3 円筒

図4 遮断導波管法による試料 No. P4 のモードチャート



(a) C-1 円筒



(b) C-3 円筒

図6 空洞共振器法による試料 No. P4 のモードチャート

円筒のとき約 10000 であった。これより、 $\tan\delta$ が高いのは近接モードの影響により Q_u が他の導体円筒より低く測定されたためである。

4.2 サファイア平板

表 3 に測定を行った 6 枚の円板試料の寸法 (直径 d 、厚さ t) を示す。

また、図 7 に遮断円筒導波管法の測定結果を示す。 ϵ_r の誤差棒は t の測定誤差、 $\tan\delta$ の誤差棒は Q_u の測定誤差によるものである。 ϵ_r については概ね 9.3~9.4 の範囲にあるが、試料 No. 1 はそれよりも低く試料 No. 6 はやや高い。しかし、すべての導体円筒で同じ結果であるので、これは試料の個体差であると結論される。この原因としては、 c 軸のずれや格子欠損などが考えられる。

一方、ある一つの試料については、図中 で示した C-3 円筒を用いたとき、他の導体円筒のときと比べ常に ϵ_r が高く評価されている。これは導体円筒と試料間に空隙が生じているためと考え、厳密な電磁界解析^[4]に基づいた計算プログラムにより空隙 $g=0.01\text{mm}$ を与えて ϵ_r を求めた。その結果を図中 ▲ で示す。空隙を考慮することにより ϵ_r はよく一致し、使用する導体円筒に依存しない高精度な測定ができる。

次に $\tan\delta$ については、C-3 円筒を用いた場合、試料 No. S5, 6 の $\tan\delta$ が他の導体円筒の場合と比べ高い。これも PTFE と同様に、近接モードが Q_u 測定へ影響していると考えられる。

図 8 に試料 No. S6 の遮断円筒導波管法のモードチャートを示す。また、図 9 に試料 No. S6 の周波数応答を示す。(a)図は C-1 円筒の場合、(b)図は C-3 円筒の場合である。遮断円筒導波管法の場合、周波数応答を見る限りでは導体円筒による違いは見られないが、 Q_u は C-1 円筒のとき 9200、C-3 円筒のとき 8600 と約 600 の差が見られた。そこで導体円筒の両端の

表3 サファイア平板の試料寸法

試料	d (mm)	t (mm)
S1	9.958 ± 0.003	0.216 ± 0.001
S2	9.958 ± 0.002	0.213 ± 0.001
S3	9.947 ± 0.017	0.209 ± 0.003
S4	9.957 ± 0.008	0.304 ± 0.002
S5	9.949 ± 0.012	0.295 ± 0.002
S6	9.948 ± 0.022	0.298 ± 0.001
S7	10 × 10	0.506 ± 0.001
S8	10 × 10	0.524 ± 0.001

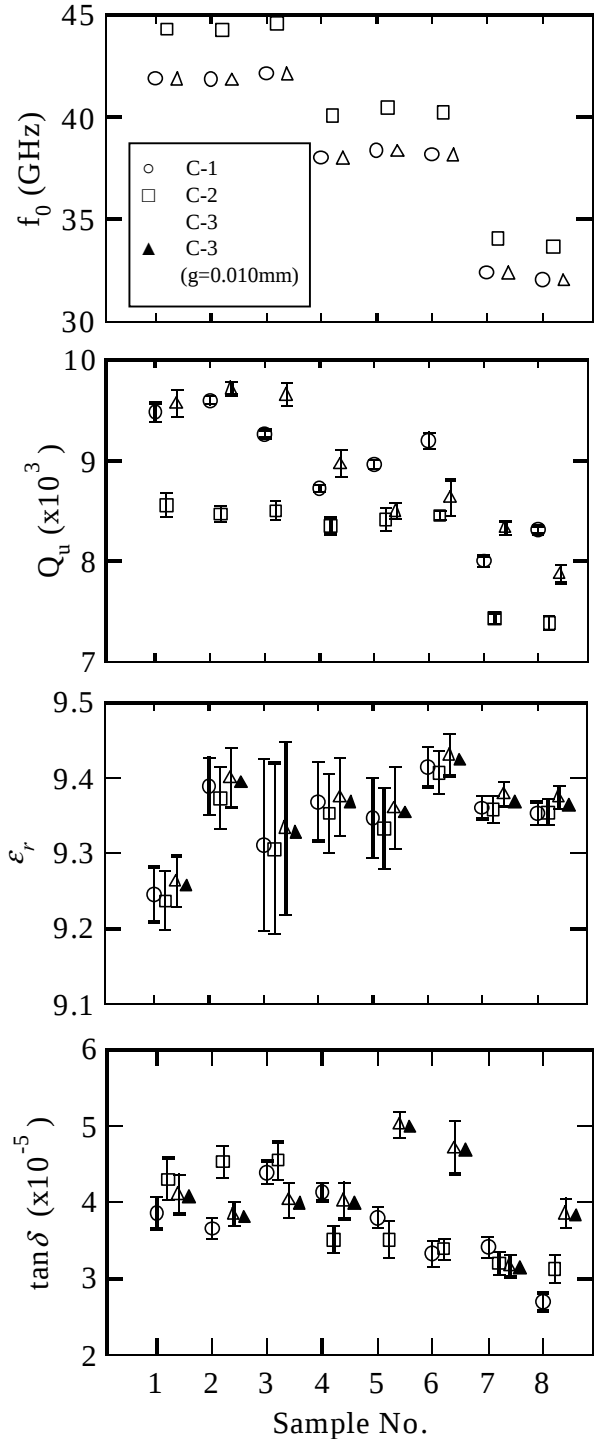
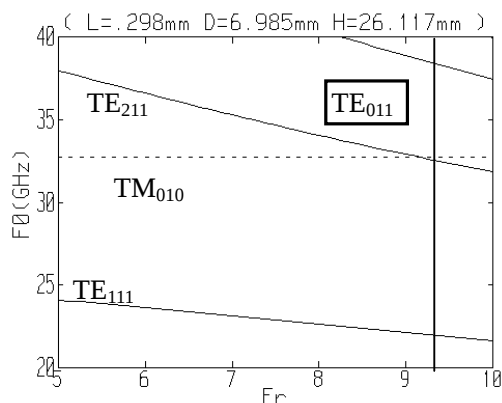
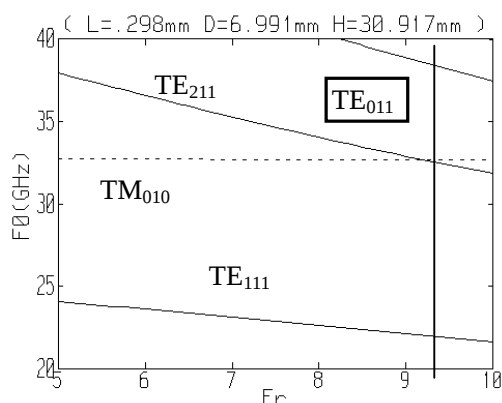


図7 遮断円筒導波管法によるサファイアの測定結果

電波吸収材を短絡板におきかえ、空洞共振器法による測定も行った。図 10 に空洞共振器法のモードチャートを示す。その結果、C-3 円筒では TE_{011} モード付近に空洞共振モードが現れた。これより、 $\tan\delta$ が高く測定されたのは近接モードにより Q_u が低く測定されたためであり、空洞共振モードが十分に減衰しきれなく、電波吸収材の性能がまだ不十分であるということがわかる。



(a) C-1 円筒



(b) C-3 円筒

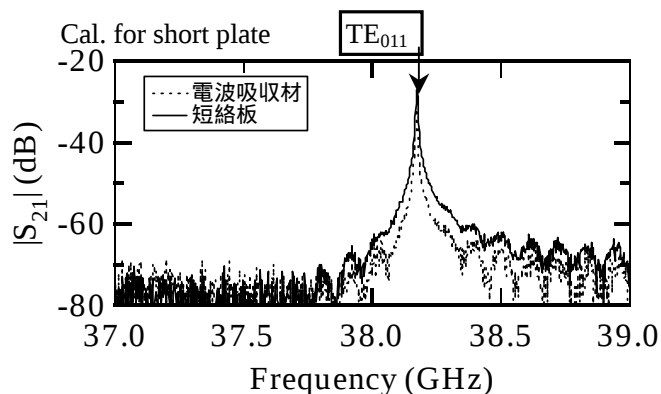
図8 遮断円筒導波管法による試料 No. S6 の
モードチャート

5. まとめ

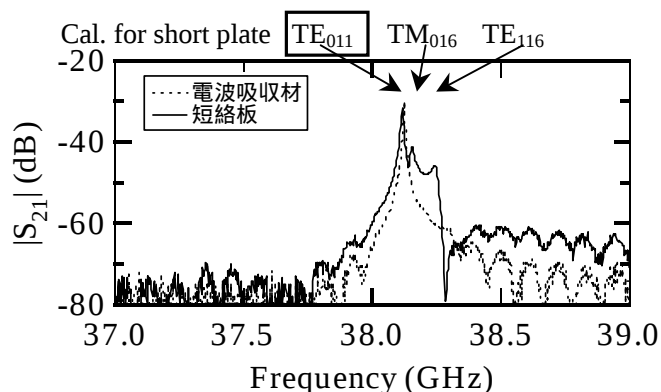
遮断円筒導波管法によるミリ波複素誘電率測定のパラダイムシフトを行った結果、他モードが近接している場合 Q_u 測定に影響しており、 $\tan\delta$ を正確に測定するためには円筒空洞を適当に選ぶ必要があること、導体円筒と試料間の空隙が ϵ_r 測定に影響することがわかった。また、空隙を考慮した測定により、用いる円筒空洞に依存しない高精度な測定が行えることを示した。

参考文献

- [1] Y.Kobayashi and J.Sato, "Nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate materials by a cavity resonance method," 信学技報, MW87-53, pp.41-48, Oct. 1987.
- [2] Y.Kobayashi and J.Sato, "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method," 信学技報, MW88-40, EMCJ88-58, Nov. 1988.
- [3] G.Zhang and Y.Kobayashi, "Complex permittivity measurement of dielectric plates using the lowest TE_{111} mode of a circular cavity resonator," 1996 China-Japan Joint Meeting on Microwaves, Proc., p32-35, Apr. 1996.
- [4] 清水, 針谷, 小林, "遮断円筒導波管法による複素誘電率測定 1", 信学ソ大, C-2-75, Sept. 2001.

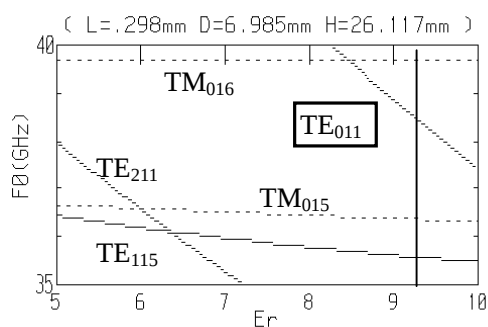


(a) C-1 円筒

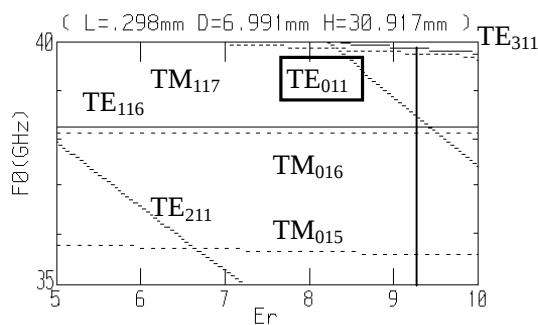


(b) C-3 円筒

図9 試料 No. S6 の周波数応答



(a) C-1 円筒



(b) C-3 円筒

図10 空洞共振器法による試料 No. S6 の
モードチャート