

ミリ波誘電体平板複素誘電率測定における遮断円筒導波管法の測定精度

清水 隆志^{†*a)} 小林 禧夫^{†b)}

Measurement Accuracy of the Cut-Off Waveguide Method in the Millimeter Wave Measurements of Complex Permittivity of Dielectric Substrates

Takashi SHIMIZU^{†*a)} and Yoshio KOBAYASHI^{†b)}

あらまし 筆者らは、低損失誘電体材料の複素誘電率の温度依存性をミリ波帯において高精度かつ高能率に測定する方法として、遮断円筒導波管法を提案してきた。本論文では、14個の共振器と3枚の低損失誘電体平板を用いて、複素誘電率測定を行い、本法の測定精度に関する検討を行う。その結果、本法の測定精度は比誘電率測定に関しては、 $\varepsilon_r = 2 \sim 30$ の範囲で $\pm 0.3\%$ 程度に収まり、誘電正接測定に関しては、 $\tan \delta = 10^{-2} \sim 10^{-5}$ の範囲で $\pm 15\%$ 程度に収まる高精度測定法であると評価することができた。更に、本法の高精度性を生かし、常温付近におけるPTFE平板の 0.1°C ごとの温度依存性を測定し、 19°C 、 32°C 付近に ε_r の変曲点が存在することを明らかにした。

キーワード 遮断円筒導波管法、複素誘電率測定、温度依存性測定、ミリ波

1. ま え が き

近年の情報通信の急速な進展に伴い、映像やデータを大量に伝送する高速大容量移動体通信網を実現するために、ミリ波帯の利用が期待されている。それに伴い、ミリ波回路への応用のために低損失かつ低価格な新材料の開発が求められている。

ミリ波帯において、それらの誘電体材料を評価する測定法がいくつか報告されている[1]～[6]。これらの測定法では、測定精度に関する検討は行われているが、測定の信頼性や安定性に関する検討は十分に行われていない。一方、筆者らは、ミリ波帯において低損失誘電体平板の複素誘電率の温度依存性を高精度かつ高能率に測定する方法として、遮断円筒導波管法[7]～[11]を提案してきた。しかしながら、他の測定法の測定精度1～10%と比べ、本測定法は後述のとおり0.3%と非

常に高精度であるため、ラウンドロビン試験を行い、他の測定法と比較することが難しい現状である。

そこで、本論文では14個の材料測定用共振器と3枚の低損失誘電体平板を用いて、複素誘電率測定を行い、遮断円筒導波管法の測定精度及び信頼性に関する検討を行う。更に、本法の高精度性を生かし、比誘電率に相転移に応じた変曲点をもつことが知られているPTFE平板の複素誘電率を常温付近において 0.1°C ごとに測定を行い、その温度依存性を示す。

2. 測 定 原 理

複素誘電率測定に用いる共振器構造を図1(a)に示す。直径 D 、長さ H の導体円筒の中央に厚さ t 、直径 d (ただし、 $d \geq 1.2D$)の誘電体平板を装荷し、遮断 TE_{0m1} モード誘電体円板共振器を構成する。この共振器の励振及び検波は、先端に微少ループをもつ外径1.2 mmのUT-47セミリジッド同軸線路を用い、半径方向より磁界結合で行う。

縁端効果まで考慮した比誘電率 ε_r は TE_{0m1} ($m = 1, 2, \dots$)モードの共振周波数 f_0 の測定値よりリッツ－ガラキン法に基づく厳密解析から導出した次式を用

† 埼玉大学工学部、さいたま市

Faculty of Engineering, Saitama University, Saitama-shi, 338-8570 Japan

* 現在、東北工業大学ハイテクリサーチセンター

a) E-mail: shimizu@reso.ees.saitama-u.ac.jp

b) E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

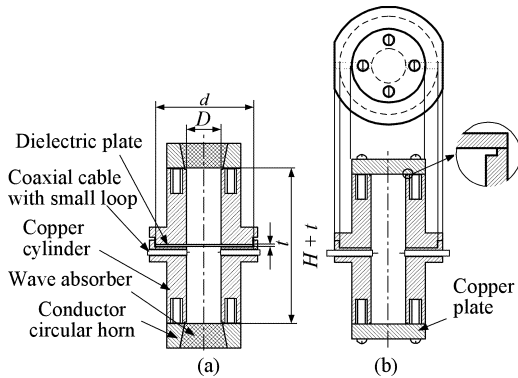


図1 測定に使用する共振器の断面図 (a) 誘電体を装荷した共振器 (b) 空洞共振器

Fig. 1 Cross sectional view of resonator structures used for measurements. (a) Circular cylindrical resonator clamping a dielectric plate (b) Circular empty cavity.

いて求める．

$$\det \mathbf{H}(\varepsilon_r; f_0, D, H, t, d) = 0 \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{H}$ は正方行列であり、煩雑であるので省略される[11]．また、リッツ－ガラキン法による計算精度0.01%は、後述の測定精度0.3%に比べて無視できるほど小さい．

また、縁端効果まで考慮した誘電正接 $\tan \delta$ は無負荷 Q, Q_u の測定値より次式を用いて求める．

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

ただし、導体表面の表面抵抗 $R_s = (\pi f_0 \mu_0 / \sigma)^{1/2}$ 、実効導電率 $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$ 、比導電率 σ_r 、万国標準軟銅の導電率 $\sigma_0 = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$ であり、定数 A, B は式(1)を用いて導体寸法の摂動量から計算される定数である[11]．

本測定法では、あらかじめ導体円筒の D, H, σ_r を求めておく必要がある．これらの値は、図1(b)に示す空洞共振器を用いて、 TE_{01p} と TE_{01q} モード($p, q = 1, 2, \dots, p \neq q$)の共振周波数 f_p, f_q 及び、無負荷 Q, Q_u の測定値より求める[11]．この際、導体円筒と短絡板との間に設けた溝により、 TE_{01p} モードと縮退する TM_{11p} モードの共振周波数を下げて、二つのモード間の縮退を解いている[12]．

3. 材料測定用共振器

本測定法の測定精度及び信頼性を検討するために、14個の共振器(No.1～14)を製作した．ただし、共振器No.1～4は、図2(a)に示す試料挿入部が遮へいさ

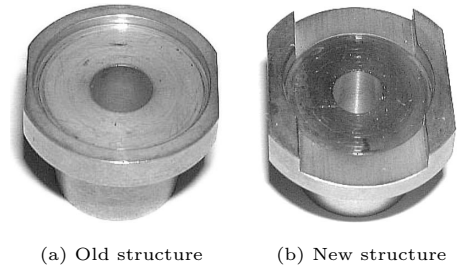


図2 共振器の試料挿入部の写真

Fig. 2 Photographs of sample holder part of the resonator.

表1 14個の共振器の寸法と比導電率の室温での測定結果
Table 1 Measured results of dimensions and relative conductivities for 14 circular empty cavities at $24 \pm 1^\circ \text{C}$.

共振器 No. 製作(年/月)	$f_0(\text{GHz})$	Q_u	$D(\text{mm})$	$H(\text{mm})$	σ_r (%)
1 (1999/10)	52.521 ± 0.001	11130 ± 50	6.991 ± 0.002	30.917 ± 0.080	84.8 ± 0.7
2 (2000/02)	52.646 ± 0.001	11050 ± 40	6.993 ± 0.006	23.770 ± 0.283	82.3 ± 0.5
3 (2000/03)	56.735 ± 0.001	10210 ± 20	6.480 ± 0.003	24.289 ± 0.008	75.0 ± 0.2
4 (2000/03)	52.640 ± 0.001	10680 ± 40	6.985 ± 0.002	26.118 ± 0.105	76.2 ± 0.5
5 (2002/09)	52.366 ± 0.001	10560 ± 50	7.011 ± 0.002	31.066 ± 0.044	76.1 ± 0.7
6 (2002/09)	52.286 ± 0.001	10650 ± 60	7.022 ± 0.002	31.045 ± 0.045	77.3 ± 0.8
7 (2002/09)	52.292 ± 0.001	10360 ± 60	7.020 ± 0.002	31.033 ± 0.031	73.2 ± 0.8
8 (2003/09)	52.400 ± 0.001	11070 ± 90	7.006 ± 0.002	30.981 ± 0.145	82.0 ± 1.4
9 (2003/09)	52.401 ± 0.001	11080 ± 100	7.006 ± 0.002	30.983 ± 0.168	82.2 ± 1.5

れている旧構造の共振器であり、共振器No.5～14は、図2(b)に示す試料挿入部の半分を開放した新構造の共振器である[13]．

表1に $24 \pm 1^\circ \text{C}$ における各共振器の寸法及び比導電率の測定結果を示す．ただし、 D, H の値は、数組の

TE_{01p} と TE_{01q} モード ($p, q = 1, 2, \dots, p \neq q$) の f_0 の測定値から計算した値の平均値であり、測定値のばらつきを測定誤差とした。また、 σ_r は TE_{011} モードの Q_u の測定値から計算した値である。

4. 14 個の共振器による同一誘電体平板の測定結果

14 個の共振器を用いて、 $t = 0.508 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ の Ba (Mg, Ta, Sb)O₃ 平板 (村田製作所製、以下 BMT)、 $t = 0.506 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ のサファイア平板

(信光社製)、 $t = 1.156 \text{ mm} \pm 0.003 \text{ mm}$ の改質ポリオレフィン平板 (以下 MPO) の ε_r , $\tan \delta$ を TE_{011} モードにより、 $24 \pm 1^\circ \text{C}$ にて測定した。測定は 10 回行い、そのうち、 Q_u 値が高い五つを選び、その平均値を測定値とし、その平均二乗誤差を測定誤差とした。その測定結果を図 3 に示す。ただし、測定試料の厚さ及びそのばらつきは、最小表示量 0.001 mm のマイクロメータ [14] を用いて、試料の中央及び四隅の測定を $24 \pm 1^\circ \text{C}$ にて行い、その平均値を測定値とし、その平均二乗誤差を測定誤差とした。

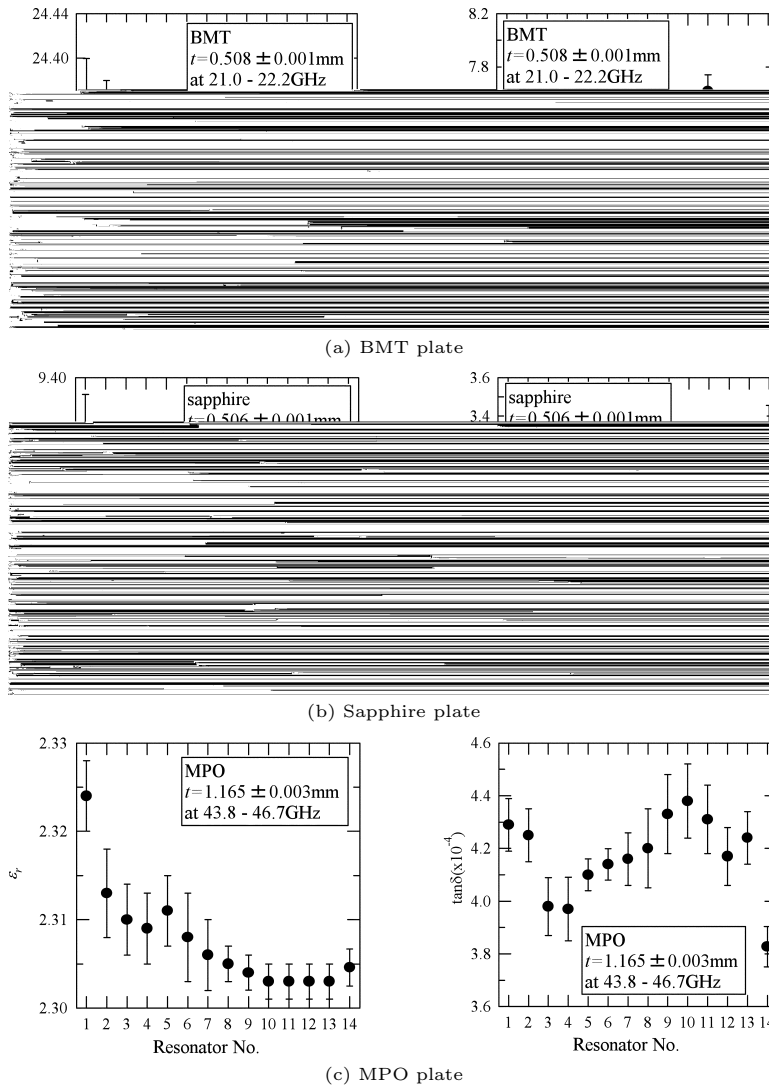


図 3 14 個の共振器による誘電体平板の測定結果

Fig. 3 Measured results of 3 dielectric substrates by using 14 resonators.

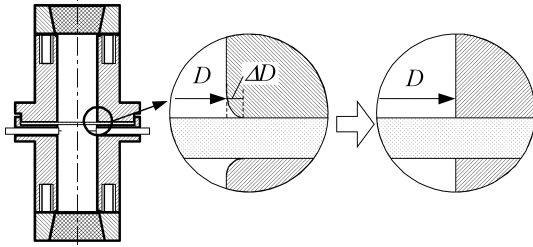


図4 共振器の製作精度の改善

Fig.4 The improvement of manufacturing skill of the resonators.

共振器の製作年月が新しくなるほど、 ε_r が低く評価される傾向にあることが分かる。これは、図4に示すように導体円筒と試料間の隙間が製作技術の向上により改善されてきたためと考える。つまり、すき間が存在するとき、実際の共振器直径は $D + \Delta D$ であるために共振周波数は低下する。しかし、共振器直径を D として計算するため、比誘電率が見かけ上高く評価されると説明できる。

個々の共振器における ε_r の測定誤差は、 D, t, f_0 の測定誤差によって決定され[11]、いずれの測定試料でも $\pm 0.2\%$ 程度であると評価される。更に、共振器間の測定値のばらつきを考慮した ε_r の測定精度は 1% 程度である。また、個々の共振器における $\tan \delta$ の測定誤差は、 Ql

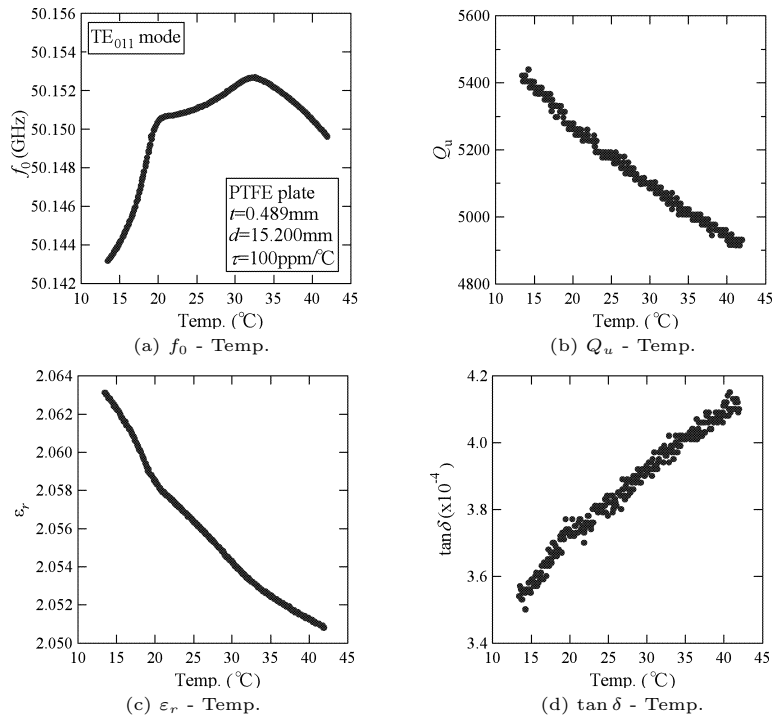


図 6 PTFE 平板の温度依存性の測定結果

Fig. 6 Measured results of temperature dependencies of PTFE plate.

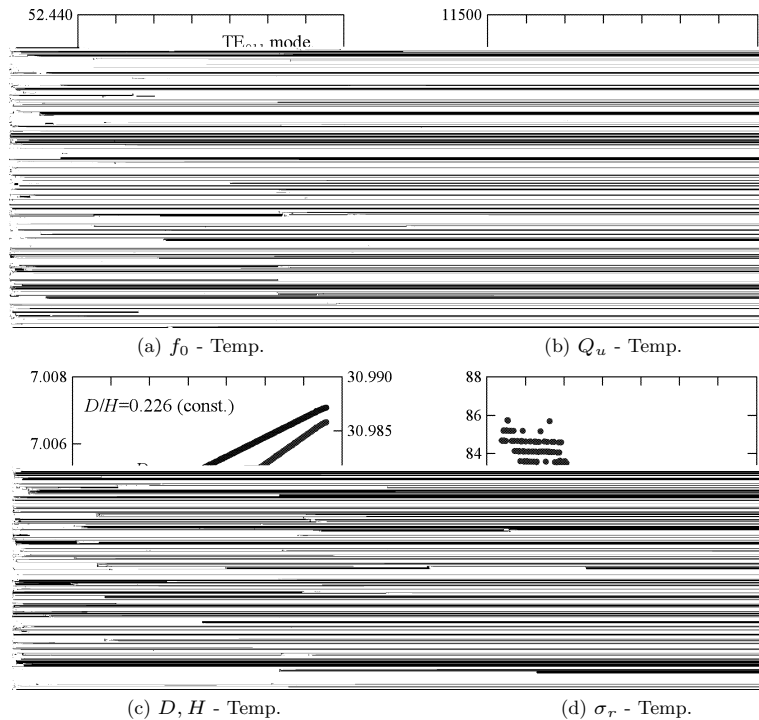


図 7 円筒空洞共振器 No. 8 の温度依存性の測定結果

Fig. 7 Measured results of temperature dependencies of circular empty cavity No.8.

き、本システムにおける N.A. の最大ポイント数 801 点を用いると、1 点当りの周波数間隔は、12.5 kHz となる。この場合、測定誤差を含んだ Q_u は次式で表される。

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{-\frac{IL}{20}}} \quad (3)$$

ただし、 IL は挿入損、 Q_L は負荷 Q であり、次式で与えられる。

$$Q_L = \frac{f_0 \pm 12.5 \text{ (kHz)}}{\{f_h \pm 12.5 \text{ (kHz)}\} - \{f_l \mp 12.5 \text{ (kHz)}\}} \quad (4)$$

ただし、 f_0 、 f_h 、 f_l は、それぞれ中心周波数、3 dB 帯域幅の高い側の周波数、3 dB 帯域幅の低い側の周波数である。

式 (3) より、 Q_u の測定誤差を求めると ± 50 となり、図 7(b) に示す測定結果の離散幅とよく一致する。これより、本温度依存性測定システムの無負荷 Q の測定分解能は、中心周波数及び N.A. のスパン幅/ポイント数によって決定される。一方、比誘電率測定において、この測定誤差は、他の誤差要因に比べ、無視できるほど小さい。

7. む す び

本測定法の測定精度は、比誘電率測定に関しては、 $\epsilon_r = 2 \sim 30$ の範囲で $\pm 0.3\%$ 程度に収まり、誘電正接測定に関しては、 $\tan \delta = 10^{-2} \sim 10^{-5}$ の範囲において、 $\pm 15\%$ 程度に収まると結論される。本法の高精度性を生かし、常温付近における PTFE 平板の 0.1°C ごとの温度依存性を測定し、 19°C 、 32°C 付近に ϵ_r の変曲点が存在することを明らかにした。

これより、遮断円筒導波管法は、20 ~ 50 GHz 帯における低損失誘電体平板の複素誘電率測定法として、最も高い測定精度と高い信頼性及び安定性をもつ測定法であると結論される。

謝辞 実験に御協力頂いた本学の三井裕司氏及び実験装置の製作をして頂いた本学の加藤正之氏に感謝致します。なお、本研究の一部は、文部科学省の平成 15 年度科学研究費補助金 (課題番号 14550318) によって行われた。

文 献

- [1] A. L. Cullen and P. K. Yu, "The accurate measurement of permittivity by mean of an open resonator," Proc. Roy.

Soc. A, vol.325, pp.493-509, 1971.

- [2] M. N. Afsar, H. Chi, X. H. Li, and T. Matsui, "A 60 GHz open resonator system for dielectric measurement," Proc. 1989 European Microwave Conf., pp.820-823, 1989.
- [3] Ph. Coquest, T. Matsui, and M. Kiyokawa, "Dielectric measurement in the 60-GHz band using a high-Q Gaussian beam open resonator," IEICE Trans. Electron., vol.E78-C, no.8, pp.1125-1130, Aug. 1995.
- [4] Y. Kogami, H. Tamura, and K. Matsumura, "Measurements of complex permittivities in 100 GHz band by the whispering-gallery mode resonator method," IEICE Trans. Electron. (Japanese Edition), vol.J84-C, no.8, pp.703-706, Aug. 2001.
- [5] Y. Ishikawa, T. Tanizaki, A. Saitoh, and T. Yoneyama, "Complex permittivity measurement of dielectric materials using NRD guide at millimeter wave length," IEICE Trans. Electron. (Japanese Edition), vol.J78-C-I, no.9, pp.418-429, Sept. 1995.
- [6] A. Nakayama, A. Hukuura, and M. Nishimura, "Millimeter-wave measurement of complex permittivity using dielectric rod resonator excited by NRD-guide," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.51, no.1, pp.170-177, Jan. 2003.
- [7] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of GaAs plates by a circular waveguide method," 2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, THIF-51, pp.2195-2198, June 2001.
- [8] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of some low-loss dielectric plates by a novel cut-off circular waveguide method," 32nd European Microwave Conf. Proc., pp.825-828, Sept. 2002.
- [9] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "50 GHz measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by a cut-off circular waveguide method," 2001 Topical Symposium on Millimeter Waves. Digest, P-10, March 2001.
- [10] 西野智弘, 清水隆志, 小林禎夫, "遮断円筒導波管法による複素誘電率測定のラウンドロビントスト," 2003 信学総大, C-2-78, March 2003.
- [11] T. Shimizu and Y. Kobayashi, "Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurements in millimeter wave range," IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.672-680, May 2004.
- [12] T. Shimizu, Z. Ma, and Y. Kobayashi, "Design of a grooved circular cavity for separating degenerate TE and TM modes in dielectric substrate measurements," 2002 Asia-Pacific Microwave Conf. Digest, vol.2. TH4D-5, pp.1019-1022, Nov. 2002.
- [13] T. Shimizu, T. Nishino, and Y. Kobayashi, "Some discussions of the resonator structure for the cut-off waveguide method and the round robin test," 33rd European Microwave Conf. Proc., P2-39, pp.755-758, Oct. 2003.
- [14] JIS B 7502 (1994), マイクロメータ.
- [15] 加屋野博幸, 榊原孝彰, 小林禎夫, "空洞共振器法による誘

電体平板材料の複素誘電率の温度特性の自動測定,” 信学技報, SAT91-82, MW91-75, Sept. 1991.

(平成16年4月5日受付, 7月14日再受付)



清水 隆志 (正員)

1999 埼玉大・工・電気電子卒, 2001 同大大学院博士前期課程了, 2004 同大学院博士後期課程了, 同年4月東北工業大学ハイテクリサーチセンター研究員・博士(学術). 低損失誘電体のミリ波測定, ミリ波デバイスに関する研究に従事. IEEE 会員.



小林 禎夫 (正員:フェロー)

1965 都立大大学院工学研究科修士課程了, 同年4月埼玉大学工学部助手, 1968 講師, 1982 助教授を経て1988 同教授・工博. 誘電体共振器・フィルタ, 低損失誘電体及び高温超電導材料のマイクロ波・ミリ波測定の研究に従事. 1995 第20回井上春成賞受賞. 現在, IEEE

Fellow.