

マイクロ波帯における丸棒測定用空洞共振器法の高確度化への挑戦

小林 禧夫^{†a)}

Challenge to High Accuracy Measurement by a Stick-Dielectric Cavity Resonator Method

Yoshio KOBAYASHI^{†a)}

あらまし 従来より、誘電体丸棒試料を円筒空洞共振器の中心軸上に挿入する空洞共振器摂動法が電子材料測定法として広く応用されてきたが、正確な誤差評価が困難である難点があった。本論文では、実際に用いる空洞共振器構造における厳密な解析に基づく高精度計算が、摂動計算に付随する系統誤差の減少に有効であり、またこの厳密解析を保証する精密な空洞の設計製作が、偶然誤差の減少に有効であることを実証する。これまでの種々の挑戦の結果、本測定法は比誘電率測定に関して1%、誘電正接測定に関して10%の測定確度（正確さ）を達成できた結果、IEC標準化されるに至った。

キーワード マイクロ波、誘電率測定、摂動法、電磁界解析

1. ま え が き

来る5G（第5世代移動通信システム）社会に向けて、新電子材料開発のため、マイクロ波からミリ波帯にわたる材料定数の正確な測定及びその温度依存性測定への強い要望がある。また電子回路の高精度設計を実現し、試作回数を減少させて開発期間を短縮するためには、誘電体基板及び導体の正確な材料定数の値を用いた電磁界解析ソフトや回路解析ソフトによる設計が必須の技術と認識している[1]~[3]。

筆者は大学在任中からこれまで、フィルタ設計の必要性から低損失誘電体材料のマイクロ波測定の開発に携わってきた[4]。これまでに、比誘電率測定で1%、誘電正接で10%程度の測定確度（正確さ）の実現を目標に、誘電体共振器法、空洞共振器法、遮断円筒導波管法、平衡形円板共振器法、空洞共振器摂動法（以後、空洞摂動法と呼ぶ）に関する高確度化を実現し[5]~[10]、必要に応じて計測装置を所有する諸機関による同一試料のラウンドロビン測定を実施し[11]、[12]、JISやIEC標準化を進めてきた。

筆者はこれまで正確さの高い測定すなわち高確度測

定を達成するため[13]、[14]、測定誤差要因を、測定値のかたよりに起因する系統誤差と測定装置を用いて繰り返し測定を行ったときのばらつきの要因となる偶然誤差に分類して検討してきた。本論文では、近年導入された「不確かさアプローチ」ではなく、伝統的な「誤差アプローチ」により測定の高確度化を述べる。

系統誤差の軽減には、誤差の発生要因を明らかにし、その要因を補正するために、厳密な電磁界解析に基づいた計算ソフトを開発することが重要である。本ソフトは、装置及び試料の寸法誤差などの誤差要因による測定誤差評価にも応用することができる。

また偶然誤差の軽減には、測定における測定値のばらつきの要因を最小にするような装置の開発が重要である。本装置を用いて繰り返し測定を行い、前述のソフトを用いて偶然誤差を評価し、複数の装置の器差間の測定値のばらつきを評価する必要がある。最後に、系統誤差と偶然誤差を誤差伝播の法則を適用し、標準偏差により測定精度が評価される[5]~[12]、[15]。

1960年代からこれまで、空洞摂動法は誘電体やフェライト材料などの電子材料を簡便に測定する方法として広く用いられてきた[16]~[18]。しかし、ベッセル関数の数表と計算尺しか利用できなかった当時の技術では、摂動公式から得られる測定値の測定精度を評価することは困難であった。その後、電子計算機の演算性能の向上とともに厳密解析に基づく高精度な計算が

[†] サムテック有限会社, さいたま市
SUMTEC, Inc., 1-6-1 Hommachi-Higashi, Chuo-ku,
Saitama-shi, 338-0003 Japan

a) E-mail: kobayashi@sumtec.biz

した. その結果を図 2(a) に示すに示す. ϵ_p は ϵ_r よりも大きめに測定され, ϵ_p の誤差は ϵ_r が大きいほど, また d_1 が太いほど大きくなるのがわかる.

次に, 図 2(a) 中に示される共振器に試料挿入孔 $d_2 = 2R_2$ を開け, 丸棒試料を挿入した状態の空洞構造 (図 2(b) 参照) に関して, TM_{0m0} モードの共振周波数 f_1 及び無負荷 Q , Q_{u1} の厳密解析を, リッツ・ガレルキン法を応用したモード整合法により行った [21]~[25].

$d_1 = 3 \text{ mm}$ として, 試料直径 d_1 を変化させた場合の ϵ_p の誤差計算の結果を図 2(b) に示す. この際, g の値は $\epsilon_r < 100$ では 6 mm 以上であれば, 測定に影響しないと評価されたので [22], [24], $g = 10 \text{ mm}$ とした. 試料挿入孔の影響は測定値 ϵ_p を下げる方向に作用することがわかる. 摂動法の測定誤差は, 経験的に 3%程度であると言われているが, $\epsilon_r < 5$ であれば正しいことがわかる.

更に次数 m の大きい TM_{0m0} モードについても同様の検討が行われ, 更に摂動公式 (2) $\tan \delta_p$ に関する検討も行われたが, 省略する.

4. SDCR 法の提案

図 1 の構造に関して, 前節の厳密解析に基づいてプログラミングされた計算ソフトを用いて, TM_{0m0} モードの共振周波数及び無負荷 Q の測定結果から ϵ_r 及び $\tan \delta$ を求める方法を提案する. 本法を丸棒測定用空洞共振器法と称し, SDCR 法 (Stick-Dielectric Cavity Resonator Method) と略称する.

ϵ_r は, TM_{0m0} モードの共振周波数 f_1 の測定値より次の正方行列式を用いて求められる.

$$\det \mathbf{X}(\epsilon_r; f_1, d_1, d_2, D, H, L) = 0 \quad (4)$$

ただし, 行列要素は省略する [23]~[25]. また, $\tan \delta$ は対応するモードの Q_{u1} の測定値を用いて次式より求められる.

$$\tan \delta_r = A/Q_{u1} - BR_s \quad (5)$$

ただし, $L = H + 2g$, g は試料挿入孔深さ, A , B は厳密解析により求められる定数である. また, 円筒空洞の表面抵抗 R_s と導体の導電率 σ は, 次式により関係付けられる.

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega_0 \mu_0}{2\sigma}}, \quad \sigma = \sigma_r \sigma_0 \quad (6)$$

ただし, σ_r は万国標準軟銅の導電率 $\sigma_0 = 58 \times$

10^6 S/m に対する比導電率である. マイクロ波帯では, 電流は表皮効果により表面しか流れないため, σ_r は酸化やキズなどの導体表面状態及び周波数に依存する.

測定に用いる空洞の寸法 D , H 及び σ_r は, 空の空洞共振器の TM_{010} モードと TM_{011} モードの共振周波数及び無負荷 Q の測定結果より, あらかじめ求めておく必要がある [25], [26].

5. 測定治具及び測定結果

SDCR 法は, 1 個の空洞共振器の複数の高次モードを用いることにより, 丸棒試料の ϵ_r 及び $\tan \delta$ の周波数依存性の高精度測定に有効である. これを実証するために, 直径及び高さの異なる 6 個の空洞共振器を製作し, 種々の誘電体丸棒 ($d_1 < 3 \text{ mm}$) の ϵ_r 及び誘電正接の周波数依存性を測定した. その結果, 本法では, ϵ_r 測定に関して 1%, $\tan \delta$ 測定に関して 10% の測定精度 (正確さ) を達成できることを実証することができた [26]~[33].

本節では測定治具及び測定結果の一例について述べる. 測定に用いた TM_{010} モードの共振周波数 3 GHz の純銅製の空洞共振器 ($D = 76.5 \text{ mm}$, $H = 20.0 \text{ mm}$) の写真を図 3 に示す. 同様の構造で 8 GHz 空洞共振器 ($D = 28.7 \text{ mm}$, $H = 7.5 \text{ mm}$) を用意した. 同一試料の周波数依存性を測定できるように, 挿入孔直径 $d_2 = 3 \text{ mm}$ は統一した. 空洞内壁を流れる TM_{0m0} モードの電流は, 上部励振孔から上部短絡板を半径方向に放射状に流れ, 側壁を軸方向に流れを変えて, 下部短絡板より下部励振孔に戻る経路をとるので, 短絡板と円筒部の接続面の隙間は, 共振周波数の変化及び無負荷 Q 値の劣化を招く要因となる. 接合部のはんだ付けはあいまいさを残すので採用しなかった. 円筒部と挿入孔付短絡板は純銅バルク材から一体構造で機械加工されている. 短絡板と円筒部は多数のねじでしっかり固定され, 空洞内壁は鏡面研磨及びアニール処理



図 3 3GHz 空洞共振器の写真

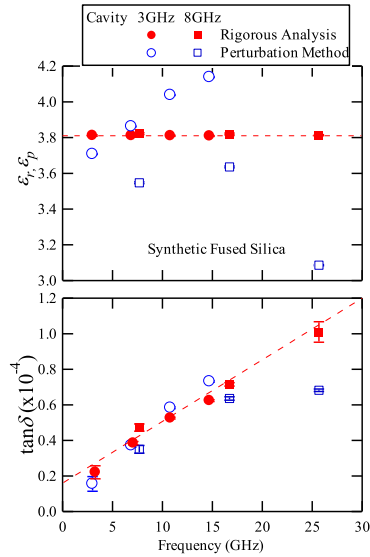


図4 熔融石英ガラスの周波数依存性測定結果

されている。TM_{0m0}モードの励振は先端に微小ループをもつ同軸励振線により磁界結合で行われ、励振強度の調節はマイクロメータ構造により励振線挿入長を可変して行われる。

3GHz空洞の4個のモード ($m = 1 \sim 4$) 及び8GHz空洞の3個のモード ($m = 1 \sim 3$) を用いて、熔融石英丸棒 ($d_1 = 2.698 \pm 0.001\text{mm}$) の比誘電率と誘電正接の周波数依存性を測定した。式(4)–(6)を用いて求めた7点の測定結果を図4に黒丸印及び黒角印で示す[29], [31]。2個の共振器で3–30GHz、すなわち1オクターブバンドの広帯域測定が実現された。比較のため、摂動公式(1), (2)から求めた結果を白抜き丸印と角印で示す。摂動法では、試料挿入孔の影響がモードごとに異なるので、周波数依存性の測定は困難であることがわかる。

6. 国際標準化

本測定法の高精度性は実証されたが、取扱いに専門的な技術を要し、普及に難があった。そこで取り扱いを容易にするために、摂動公式で求められる値を補正する係数をあらかじめ図表化するすることにより正確な値を求める方法として次式を提案した[32]–[35]。

$$\epsilon_r = C_1 \epsilon_p, \quad \tan \delta_r = C_2 \tan \delta_p \quad (7)$$

これより、典型的な寸法の空洞共振器について、TM₀₁₀及びTM₀₂₀モードに対する補正係数 C_1 及び C_2 が厳

密計算式及び摂動公式に基づいて計算され、チャート化された[32]–[35]。TM₀₁₀モードに関するチャートを利用して国際標準化が実現された[19]。

7. 本法の波及効果

- ① 本法を利用して、丸棒試料の温度依存性の測定の可能性について検討したが[36]–[38]、丸棒試料への熱伝導が遅いため、測定に長時間を要することがわかった。
- ② 本法の高精度性を利用して、角柱試料を用いる測定の誤差評価が行われた[39]。
- ③ 空洞の試料挿入孔に誘電体チューブを挿入し、チューブ内に液体を入れて、その複素誘電率を測定する方法を提案し、この方法により液体の高精度測定が実現された[40]–[46]。
- ④ 本法を拡張して、フェライト丸棒の ϵ , μ の分離測定法が提案されている[47], [48]。
- ⑤ 同様の共振器法によるミリ波帯測定への応用が検討されている[49], [50]。

8. むすび

本論文では、厳密な解析に基づく高精度計算が、系統誤差の減少に有効な手段であり、また偶然誤差の減少には、厳密解析を保証する精密な空洞の設計製作が必要であることを実証した。今後、本測定法が普及し、広く浸透することが期待される。

謝辞 筆者は、1965年～2004年、埼玉大学在任中、フィルタ設計の必要性から本論文で述べた電子材料測定法の開発研究を行ってきた。また、定年前に設立したサムテック社で、これらの測定法を発展させるとともに、厳密解析計算プログラムの維持管理に努めている。

長年にわたり本研究に携わってきた大学院生の方々に心からお礼を申し上げるとともに、装置製作にご協力頂いた埼玉大学技官加藤正之氏、及び川島製作所赤坂清三氏に深謝する。また測定の不確かさ評価に関して、文献紹介と貴重なご意見を頂いたサムテック社小林創太郎氏に感謝致します。

文 献

- [1] 相羽 英, 小林禧夫, 馬 哲旺, “誘電体積層基板の一軸異方性を考慮したマイクロ波平面フィルタ設計に関する検討,” 信学論 (C), vol. J91-C, no.12, pp.728–735, Dec. 2008.
- [2] R. Yoshitomi, Y. Kobayashi, M. Kato, and Z.-W. Ma, “Calculation of transmission characteristics in

- microstrip and coplanar lines using copper-clad glass cloth dielectric laminate substrates,” Proc. 2008 China-Japan Joint Conf. on Microwaves, pp.710–713, Sept. 2008.
- [3] 吉富了平, 小林禱夫, 馬 哲旺, “銅張り誘電体積層基板に関する材料定数の測定結果を用いたマイクロストリップ線路の伝搬定数の高精度評価,” エレクトロニクス実装学会誌, vol.14, no.2, pp.114–120, March 2011. 及び表面実装技術, vol.12, no.9, pp.40–47, Sept. 2011. [韓国語翻訳版]
- [4] 小林禱夫, “マイクロ波・ミリ波低損失材料評価技術の開発とフィルタ設計への応用,” 信学論 (C), vol.J100-C, no.10, pp.400–408, Oct. 2017.
- [5] 小林禱夫, “低損失誘電体材料のマイクロ波・ミリ波測定技術,” 特集 エビキダス社会と高周波セラミックス, セラミックス, vol.39, no.8, pp.613–617, Aug. 2004.
- [6] 小林禱夫, “銅張り誘電体積層基板のマイクロ波評価技術,” 信学論 (C), vol.J89-C, no.5, pp.210–216, May 2006.
- [7] 蓮池健一, 川端広一, 小林禱夫, “マイクロ波帯における誘電体基板の一軸異方性複素誘電率の周波数依存性の測定,” 信学論 (C), vol.J89-C, no.12, pp.1039–1046, Dec. 2006.
- [8] 蓮池健一, 川端広一, 小林禱夫, “マイクロ波帯における誘電体基板の一軸異方性複素誘電率の周波数依存性の測定,” 信学論 (C), vol.J89-C, no.12, pp.1039–1046, Dec. 2006.
- [9] Y. Kobayashi, “Microwave characterization of copper-clad dielectric laminate substrates,” IEICE Trans. Electron., vol.E90-C, no.12, pp.2178–2184, Dec. 2007.
- [10] 小林禱夫, “銅層形成誘電体基板のマイクロ波・ミリ波評価,” エレクトロニクス実装学会誌, vol.18, no.5, pp.311–315, Aug. 2015.
- [11] Y. Kobayashi and H. Tamura, “Round robin test on a dielectric resonator method for measuring complex permittivity at microwave frequency,” IEICE Trans. Electron., vol.E77-C, no.6, pp.882–887, June 1994.
- [12] Y. Kobayashi and A. Nakayama, “Round robin test on a cavity resonance method to measure complex permittivity of dielectric plates at microwave frequency,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.13, no.4, pp.751–759, Aug. 2006.
- [13] 南谷晴之, 福田 誠, 電気電子計測, オーム社, 2013.
- [14] E. Garrett, et al., A-Level Physics Exam Board: OCR A, United Kingdom: Coordination Group Publications Ltd. (CGP), 2015.
- [15] 古神義則, 清水隆志, 共振器法によるマイクロ波・ミリ波回路用誘電体材料の評価技術の動向, MWE2018 Workshop Digest, FR4A-1, Nov. 28–30, 2018.
- [16] 小笠原直幸, “空洞共振器の摂動を利用する ϵ , μ の分離測定法,” 電学誌, vol.74, no.795, pp.1486–1492, Dec. 1954.
- [17] 小笠原直幸, 鈴木道也, 布施 正, ミリ波工学, ラテイス, 1976.
- [18] T. Miura, T. Takahashi, and M. Kobayashi, “Accurate Q-factor evaluation by resonance curve area method and its application to the cavity perturbation,” IEICE Trans. Electron., vol.E77-C, no.6, pp.900–907, June 1994.
- [19] IEC62810 Ed.1.0 (2015): Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods.
- [20] 丹保 博, 川端広一, 小林禱夫, “TM₀₁₀ モード円筒空洞共振器を用いた摂動法における誘電率の誤差検討,” 2002 信学総大, C-2-88, March 2002.
- [21] 丹保 博, 川端広一, 小林禱夫, “TM₀₁₀ モード円筒空洞共振器を用いた誘電体丸棒試料の誘電率測定,” 2001 信学ソ大 (エレクトロニクス), C-2-74, Sept. 2001.
- [22] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “An improved perturbation method using a TM₀₁₀ mode cylindrical cavity,” 2002 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc., no.TH4D-2, pp.1007–1010, Nov. 2002.
- [23] 丹保 博, 川端広一, 小林禱夫, “TM₀₁₀ モード円筒空洞共振器を用いた摂動法の改善,” 信学技報, MW2002-137, Dec. 2002.
- [24] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “An improvement of the perturbation method using a TM₀₁₀ mode cylindrical cavity,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.12, pp.2371–2378, Dec. 2003.
- [25] 小林禱夫, 小嶋克人, 吉田信一郎, “電界結合 TM₀₁₀ 誘電体円筒共振器を用いた帯域通過フィルタ,” 信学論 (B), vol.J66-B, no.3, pp.313–320, March 1983.
- [26] 小林達則, 川端広一, 小林禱夫, “TM₀₁₀ モード円筒空洞共振器を用いた丸棒試料の複素誘電率周波数依存性測定,” 信学技報, MW2006-18, May 2006.
- [27] H. Kawabata, T. Kobayashi, Y. Kobayashi, and Z.-W. Ma, “Measurement accuracy of a TM_{0m0} mode cavity method to measure complex permittivity of rod samples,” 2006 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc. FR1C-5, pp.1465–1468, Dec. 2006.
- [28] 中井 宏, 小林禱夫, 馬 哲旺, 川端広一, “TM_{0m0} モード円筒空洞共振器を用いた誘電体丸棒試料の高精度測定,” 第 21 回エレクトロニクス実装学会講演大, 15B-14, pp.141–142, March 2007.
- [29] 中井 宏, 小林禱夫, 鈴木文生, 馬 哲旺, “円筒空洞共振器を用いた複数の TM_{0m0} モードによる石英ガラス丸棒試料の複素誘電率の周波数依存性測定,” 2007 信学ソ大 (エレクトロニクス), C-2-80, Sept. 2007.
- [30] 中井 宏, 小林禱夫, 馬 哲旺, 鈴木文生, “TM_{0m0} マルチモード空洞共振器を用いた複素誘電率の周波数依存性測定,” 2008 信学総大, C-2-88, March 2008.
- [31] H. Nakai, Y. Kobayashi, and Z.-W. Ma, “Wide-band measurements for frequency dependence of complex permittivity of a dielectric rod using multi-mode TM_{0m0} cavities,” 2007 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc, pp.383–386, Dec. 2007.
- [32] 金子彰吾, 小林禱夫, 馬 哲旺, “マルチモード TM_{0m0} 空洞共振器を用いた高損失誘電体丸棒の複素誘電率のマイクロ波測定,” 第 24 回エレクトロニクス実装学会春講演大, 11B-14, March 2010.
- [33] S. Kaneko, H. Kawabata, and Y. Kobayashi,

- “Improved perturbation method of complex permittivity using correction charts for TM_{010} and TM_{020} modes of a circular cylindrical cavity,” Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf., TH3G-47, pp.1448–1451, Dec. 2010.
- [34] 川端広一, 小林禱夫, “摂動法の補正による TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた高精度な複素誘電率測定,” 2013 信学総大, C-2-90, March 2013.
- [35] 川端広一, 小林禱夫, “ TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた複素誘電率摂動法の電磁界解析に基づく高精度補正,” 信学技報, MW2013-44, June 2013.
- [36] 中井 宏, 小林禱夫, 馬 哲旺, 川端広一, 鈴木文生, “摂動法を用いたポリエチレン丸棒の複素誘電率の温度依存性測定,” 2007 信学総大, C-2-92, March 2007.
- [37] 中井 宏, 小林禱夫, 鈴木文生, 馬 哲旺, “ TM_{0m0} モード円筒空洞共振器を用いた誘電体丸棒の複素誘電率の温度依存性測定,” 信学技報, MW2007-16, May 2007.
- [38] Y. Kobayashi, H. Nakai, F. Suzuki, and Z.-W. Ma, “Frequency and temperature dependence measurements of complex permittivity of dielectric rods using some TM_{0m0} modes in a circular cavity,” 2007 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc, pp.383–386, Dec. 2007.
- [39] 中井 宏, 小林禱夫, 馬 哲旺, “マルチモード TM_{0m0} 空洞共振器を用いた角棒試料の複素誘電率測定,” 第 23 回エレクトロニクス実装学会講演大, 12B-17, March 2009.
- [40] 丹保 博, 川端広一, 小林禱夫, “液体の複素誘電率測定における摂動法の改善,” 2003 信学総大, C-2-80, March 2003.
- [41] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “A rigorous analysis of a TM_{010} mode cylindrical cavity to measure accurate complex permittivity of liquid,” 33rd European Microwave Conf. Proc., P2-40, pp.759–762, Oct. 2003.
- [42] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “An improvement of perturbation method for the complex permittivity measurements of liquids,” 2003 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc., vol.1, WEP-65, pp.576–579, Nov. 2003.
- [43] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “Analysis and experiments of a TM_{010} mode cylindrical cavity to measure accurate complex permittivity of liquid,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.694–699, May 2004.
- [44] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “Analysis and experiments of a TM_{010} mode cylindrical cavity to measure accurate complex permittivity of liquid,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.694–699, May 2004.
- [45] 小林達則, 川端広一, 加藤正之, 小林禱夫, “ TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた水に対するエタノール濃度の複素誘電率依存性の測定,” 2005 信学ソ大 (エレクトロニクス), C-2-39, Sept. 2005.
- [46] H. Kawabata and Y. Kobayashi, “Accurate measurements of complex permittivity of liquid based on a TM_{010} mode cylindrical cavity method,” Proc. 2005 European Microwave Conf., pp.369–372, Oct. 2005.
- [47] H. Kawabata, Y. Kobayashi, and S. Kaneko, “Analysis of cylindrical cavities to measure accurate relative permittivity and permeability of rod samples,” Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf., TH3G-50, pp.1459–1462, Dec. 2010.
- [48] 川端広一, 小林禱夫, “円筒空洞共振器の TM と TE モード誘電挿入孔の複素誘電率測定への影響,” 信学技報, MW2012-136, Dec. 2012.
- [49] 清水隆志, 稲田 顕, 古神義則, “丸棒誘電体評価用 50GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器の開発,” 2016 信学総大, C-2-70, March 2016.
- [50] 清水隆志, 稲田 顕, 古神義則, “50GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器を用いた複素誘電率測定に資料配置ずれが及ぼす影響,” 2017 信学総大, C-2-70, March 2017.
(2019 年 7 月 29 日受付, 9 月 12 日再受付,
12 月 13 日公開)



小林 禱夫 (正員:フェロー)

昭 38 年東京都立大・工・電気卒。昭 40 年同大学院修士課程了。同年埼玉大学理工学部助手。昭 63 年同大学工学部教授。平 16 年サムテック有限会社創業 (現在, 同社代表取締役)。平 17 年埼玉大学定年退職。同年埼玉大学名誉教授。専門はマイクロ波・ミリ波工学。特に, 誘電体フィルタ・高温超電導平面フィルタ・誘電体材料及び高温超電導材料の測定に関する研究に従事。工学博士。IEEE Life Fellow。平 7 年科学技術振興事業団井上春成賞受賞, 平 18 年経済産業大臣賞授与 (日本国工業標準化発展への貢献による), 平 23 年電子情報通信学会業績賞授与。