

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

小林 禎夫^{†a)}

Development of Evaluation Techniques of Low-loss Materials in Microwave and Millimeter Wave Region and Its Application to Filter Designs

Yoshio KOBAYASHI^{†a)}

あらまし マイクロ波・ミリ波帯における新材料開発のため、また電子回路の高精度設計実現のため、筆者は 50 年間にわたり低損失誘電体材料の評価技術を開発してきた。すなわち誘電体円柱試料の複素誘電率測定及び導体平板の実効導電率測定に有効な誘電体共振器法、誘電体平板の垂直方向の複素誘電率測定に有効な平衡円板共振器法、誘電体平板の面方向の複素誘電率測定に有効な空洞共振器平板測定法、細い丸棒試料の測定に有効な空洞共振器丸棒測定法である。これらの高精度測定法は新誘電体材料の開発に、またフィルタの高精度設計に有効であった。本報告では、それらの歴史的発展過程を振り返る。

キーワード マイクロ波、ミリ波、材料測定、フィルタ、回路設計

1. ま え が き

1965 年、学部改組で 1963 年に新設された埼玉大学工学部電気工学科に就職して以来、マイクロ波工学を専門分野とした研究と学生の教育に従事してきた。研究テーマはマイクロ波誘電体円柱共振器の共振モードの研究、低損失セラミック材料の複素誘電率の測定及びそれを用いた誘電体フィルタの開発、マイクロ波高温超電導材料評価技術及び高温超電導フィルタの開発などである。現在は、2003 年定年 1 年前に創業した埼玉大学発ベンチャー企業サムテック社で電子材料測定法の改善と普及に務めている。

新材料開発はいつの時代にも重要な研究テーマである。また最近では、電磁界シミュレータ及び回路解析ソフトによる電子回路の高精度設計が可能となった。それらのために複素比誘電率（比誘電率 ϵ_r 及び誘電正接 $\tan \delta$ ）や導体表面の実効導電率などの材料定数の正確な値が必要とされる。

1960 年代、電子回路は真空管からトランジスタへと小形化が進み、マイクロ波空洞共振器よりも小形な

共振素子の開発が必要とされていた。S.B. Cohn [1] による比誘電率 $\epsilon_r = 100$ の低損失酸化チタン単結晶を用いた誘電体フィルタに興味をもった。しかし中心周波数の温度依存性が $450 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ あり、銅製空洞の $17 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ に比べても実用的でない。そこで高誘電率、低損失、温度安定性に優れた新セラミックス材料の開発に研究課題を絞ることに覚悟を決めた。日本は磁器などの焼き物の製造技術に優れていると予想したからである。セラミックスを焼く技術は専門家をお願いすることにして、まず従来セラミックスのマイクロ波特性を評価するための材料測定法の開発から始めることにした。これが研究の動機である。過ぎ越してきた技術研究時代を振り返ってみたい。

2. 低損失誘電体材料のマイクロ波評価技術の開発

2.1 誘電体円柱共振器法の開発

セラミックスのような高誘電率材料の測定には、Hakki and Coleman 法 [2] が導体板と試料間の空隙の影響を受けないために最適であると判断した。誘電体円柱試料を 2 枚の導体板で挟んで両端短絡形誘電体円柱共振器を構成し、 TE_{011} モードの共振周波数の測定値より ϵ_r を、また Q の測定値より誘電正接 $\tan \delta$ を求

[†]サムテック有限公司, さいたま市
SUMTEC, Inc., Satama-shi, 338-0003 Japan
a) E-mail: kobayashi@sumtec.biz

めることができる。しかしこの方法には二つの難点があった。一つは、多数の共振ピークから目的の TE_{011} モードをどのように識別するか、もう一つはいかに導体損失を正確に評価して Q の測定値から $\tan \delta$ の正確な値を求めるかという問題であった。

円筒空洞共振器の設計及び共振モードの識別には従来よりモードチャートが利用されていた。これを手本にして、 $\epsilon_r = 10$ と 100 における誘電体円柱共振器用モードチャートを作成する目標を立てた。そのために誘電体円柱導波線路の伝搬モードの計算をする必要があった。その混成モードの伝搬定数を求めるための特性方程式は Stratton [3] や Snitzer [4] などにより知られていた。しかしこの方程式は超越方程式であり、数値解析を必要とする。当時はコンピューターが存在しない時代だったので、有効数字 4 桁のベッセル関数表を用いて、タイガー計算機により数値間を内挿して各伝搬モードの伝搬定数と電磁界分布の数値計算を行った。やがてシャープから現在の電卓に相当する電子式卓上計算機が発売されたが、とても高価であった。次にキャノン製が 40 万円で作成されると早速それを購入した。その機能は現在では 100 円電卓程度であるが、当時はサービス品として一眼レフカメラが提供されたほど高価であった。これにより加減乗除の計算は大幅に楽になったが、伝搬定数計算に必須なルート計算には相変わらずタイガー計算機との併用が必要であった。学生と交代しながら膨大な計算を進めて、ようやく誘電体共振器のモードチャートと共振モードの電磁界分布図を完成させた。

1969 年、長い $MgTiO_3$ セラミック丸棒から多数の長さの異なる円柱試料を切り出し、各円柱試料を 2 枚の 50 mm 角銅板ではさんで両端短絡形円柱共振器を構成して、共振ピークの共振モードの識別実験を行った。鋭い共振ピークの共振周波数は計算結果とよく一致し、モードチャートの有効性は実証された。 TE_{011} モードを用いた個々の試料の側定結果は $\epsilon_r = 15.3 \sim 16.5$ の範囲にばらついており、測定法が怪しいのか試料が怪しいのか当時は大いに悩ましい問題であった。1972 年、村田製作所の脇野喜久雄氏に TiO_2 円柱試料の提供を依頼したところ、多結晶ならば用意できるとのことで 100 個ほど送っていただいた。早速 20 個ほどの試料を測定してみると、 $\epsilon_r = 88 \sim 93$ の範囲にばらついており、更に真夏時期、早朝に冷房した室温 $20^\circ C$ と窓を開け放った午後の室温 35 度における 2 点の測定結果から求めたその温度計数は $820 \sim 910$ ppm/ $^\circ C$

にばらついた。測定法の高精度性に興味をもたれた村田製作所の西川敏夫氏とのお付き合いが始まった。

残された課題は、試料の誘電正接の測定精度を上げるために、導体板損失を正確に評価することである。斉藤らの金属表面及び導波管減衰定数の測定法 [5] を参考にして、長さが整数倍異なる誘電体共振器を用いた 2 誘電体共振器法を提案した。これより誘電体損と導体損の分離測定が可能になった [6]。共振器設計及び実験で観測される多数の共振モードの識別には、作成したモードチャートが大いに役立った。

一方、誘電体共振器の寸法によっては、導体板の外側に手をもってゆくと共振ピークが左右に漂動する低 Q 値の共振モードが TE_{011} モード近傍に現れて誘電率測定に悪影響を与える場合があった。5 cm を 40 cm 角の導体板に変えてもその漂動は変わらない。特性方程式をよく吟味すると、このモードは半径方向にエネルギー放射を伴う TM_{nm0} であることが予想された。このモードは、円柱外部の電磁界が半径方向に伝搬するハンケル関数で表されるので、複素角共振周波数を導入した複素ベッセル関数の複素数計算を必要とする。やがて 1968 年大学に導入された大型電子計算機 TOSBAC3400 を利用して、Fortran プログラム言語による数値解析が可能となった。これより放射損を伴う TM_{nm0} モードの特性を解明することができた [7]。なお、作成した複素ベッセル関数プログラムの計算結果は、安宅らによる円筒関数表 (複素変数) [8] によりチェックすることができた。この結果、両端短絡形誘電体共振器のモードチャートは完成し、誘電率測定時には不要モードとなる TM_{nm0} モードの影響を受けない推奨共振器寸法を提案することができた [9]。本法は、国内 9 機関による高誘電率セラミック円柱共振器を用いたラウンドロビテストにより高精度性が実証され [10]、IEC TC49 委員会を通じて国際標準化された [11]。

2.2 平衡形円板共振器法の開発

1970 年誘電体円柱共振器の研究と同時進行で、ストリップラインと同じ厚さの共振器構造として、2 枚の薄い $MgTiO_3$ セラミック円盤の間に円形銅箔を挟んだ平衡形円板共振器の共振モードの研究を開始した。この実験中、上側セラミック円盤を取り除いてマイクロストリップ構造にすると数 100 あった Q 値が 10 程度に減少する現象を観測した。この現象は放射損によるので高 Q を達成したい共振器としては平衡形構造が必要であると発表した。しかし今から考えると放射素

子としての有望性をアンテナ部門で発表すべきであった。大きな反省事項である。やがて数年後、外国から円形パッチアンテナとして発表され、この種の平面アンテナは急速に研究開発が進展した。幸いにして当研究室からは、アンテナ工学に携わっていた羽石操先生と平衡形円板共振器の電磁界解析に関する卒業研究に携わり東芝のアンテナ部門に就職された鈴木康夫氏がその後の研究で平面アンテナに関する博士号を取得された。

一方で、1969年東大の大越孝敬先生が2次元回路としてのマイクロ波平面回路を提唱され、平面回路研究会を設立された。(現学会制度では第3種研究会に相当すると思う)研究会開催日には、熱気に包まれた活発な研究発表が行われた。この研究会で筆者が「誘電体平面回路」と題して発表した内容が、後日東北大の米山務先生のNRDガイドとして学会発表されたものと同じ発想であったので驚いた。しかし私たちが実験で用いた比誘電率20のセラミック誘電体伝送線路は不要モードが基本モードに悪影響を与えることがわかり、使い物にならなかった。一方米山先生が実験した $\epsilon_r = 2.05$ のPTFEを用いたNRDガイドではそのような現象はなく有効性が実証され、NRDガイド平面回路はその後大いに発展した。平面回路研究会で議論された内容は、大越、三好「平面回路」[12]として結実されている。

平衡形円板共振器に関しては、モード整合法による正確な縁端効果の計算が埼玉大物理学科の田辺孝哉先生のご指導により可能になり[13]、種々の共振モードの共振周波数が高精度に計算できるようになった。この結果を基礎にして、誘電体平板試料の垂直方向の複素誘電率測定法を提案した[14]。本法はふっ素樹脂積層板のマイクロ波誘電特性評価に長年応用され、30年後に日本弗素工業会と日本電子工業会によりJPCA/JFCA共同規格に制定された[15]。本円板共振器は入出力部の励振はストリップラインで行われていたが、薄い試料の場合測定装置の同軸線とストリップライン励振線間のインピーダンス不整合のため測定が困難になることがわかり、銅箔円板の中心から同軸線で励振する構造を提案した[16]。11年後、この励振孔の影響も考慮した共振器構造に関する厳密解析をリッツ・ガレルキン法を適用して成功した[17]。この構造が銅箔円板中心軸上で電界がつよい TM_{0m0} モード($m = 1, 2, \dots$)の選択的な励振に好都合なことに実験中に気付いて、一つの共振器で複数の異なる共振周

波数をもつ TM_{0m0} ($m = 1, 2, \dots$)モードを用いて複素誘電率の周波数特性の測定が可能な平衡形円板共振器法を提案した[18]。最近本法は110 GHzまでの測定に成功している[19]。

従来、ストリップライン共振器法[20]がよく利用されてきた。しかし、ストリップライン両端部の縁端効果の正確な評価方法がなく、また表皮効果によりストリップラインを流れる電流はエッジ両端に集中するので、 $\tan \delta$ 測定に際しケミカルエッチング技術のよしあしによる凹凸の影響で導体損が正確に評価できないなどのあいまいさがあった。一方、本円板共振器法ではベッセル関数による厳密解析により正確な縁端効果を計算できるので正確な比誘電率測定が可能なこと、更に、 TM_{0m0} モードでは円形銅箔上を流れる電流が半径方向成分しかなく円周方向に流れるエッジ電流は存在せず、また円形銅箔表面の実効導電率は2.1で述べた誘電体共振器法により正確に測定されるので、導体損の正確な評価が可能となり、その結果正確な $\tan \delta$ 測定が可能となることである。本法の国際標準化が望まれる。

2.3 空洞共振器平板測定法の開発

1950年代、円筒空洞共振器の TE_{011} モードを用いて誘電体円板試料の面方向の複素誘電率を高精度に測定する方法はよく知られていた[21]。やがて両端短絡板を取り除いて円筒部を遮断導波管として動作させる測定法が高誘電率測定法として提案された[22]。筆者らは、まず導波管励振による空洞共振器構造を用いたミリ波測定の可能性を追求した[22]。しかし、この構造の難点は、誘電体円板試料を空洞内に軸に直角に設置することがむずかしく、また励振孔の大きさを変えられないので励振強度の調整範囲も限られていた。そこで、空洞を真ん中で二つに割ってその間に誘電体平板試料を挟む共振器をループ同軸線で励振する構造に改善し、円筒外部にもれる縁端効果を厳密解析に基づく電子計算機による計算により補正する方法を提案した[24]~[26]。2002年ミリ波帯において空洞共振器が小さくなりすぎて製作が困難になるため、円筒部を遮断導波管として動作させる遮断円筒導波管法を提案した[27]。本法はIEC TC49委員会を通じて国際標準化された[28]。最近この共振器構造により100 GHzにおける測定が発表されている[29]。一方、私たちとは独立にJanezic等がsplit-cylinder resonator method [30], [31]を提案しているが、測定法は私たちと同じ原理に基づいている。和文発表され

た文献は外国人に引用されないで、英文で発表しておくべきであった。反省材料である。

2.4 空洞共振器丸棒測定法の開発

1950年代、空洞共振器摂動法は、マイクロ波フェライトの誘電率及び透磁率の分離測定が可能のために一般的な測定法として普及した[32]。誘電率測定には、TM₀₁₀モードで共振する円筒空洞共振器の中心軸上に小孔をあけて丸棒試料を挿入する構造を用いた摂動法がよく用いられてきた。しかし、試料挿入孔の影響評価及び比誘電率の大きさや寸法に依存する誤差評価が困難であることが難点であった。この問題は、試料挿入孔を含んだ空洞共振器の厳密解析により克服され[33],[34]、本法は最近IEC国際標準化された[35]。

3. 誘電体フィルタの高精度設計

3.1 温度安定性に優れた高誘電率低損失誘電体セラミックスの開発

最近、周波数帯の有効利用のために、ますます急しゅんな帯域外特性の狭帯域通過フィルタ(BPF)が要求されるようになった。急しゅんな帯域外特性の実現には多段化が有効であるが、通過帯域の挿入損失は増加する。挿入損失を減少させるには、高いQ値の共振器を必要とする。共振器を構成する低損失誘電体の実現が望まれる所以である。また小形化及び温度安定性のためには温度変化のない比誘電率の高い誘電体が望まれる。

1973年頃新進気鋭の石川容平氏及び続いて田村博氏が村田製作所で新セラミックス材料及びフィルタの開発を開始されたと伺っている。材料評価には誘電体共振器法が用いられた。1978年オタワにおいてIEEE MTT-Sマイクロ波国際会議が開催された。この会議に、埼玉大学からTM₀₁₀モード誘電体共振器を用いた新構造のBPF[36]、及び村田製作所から温度特性の優れた高誘電率低損失(Zr,Sn)TiO₄セラミックスからなる誘電体共振器を用いたBPF[37]が発表された。特に村田製作所から発表された新セラミックス材料は注目を集め、発表会場は超満員で立ち見が出るほどであった。それ以後、新セラミックス材料の開発競争が世界的に始まり、国内企業からも比誘電率の異なる新材料が次々と発表され、これらの新材料はファインセラミックスと称されるようになった。また、これらのセラミックスは耐電力性にも優れるが、開発された誘電体共振器の相互変調ひずみの高精度測定法[38]による測定結果から、相互変調ひずみに材料依存性が

あることが実証された。

これらの新材料開発に関する発表文献は莫大な数にのぼる。温度特性に優れた種々のセラミックス材料が開発され、2.1で述べた測定法により材料評価された[39]。

3.2 誘電体共振器の電磁界解析

両端短絡形誘電体円柱共振器の共振モードの解析に関しては2.1に述べた。誘電体フィルタに応用される誘電体共振器は放射損を防ぐために周辺を導体で遮蔽される。次の目標として、この遮蔽形誘電体円柱共振器の解析に着手した。モード整合法による電磁界解析により共振モードの完全な理解を可能にし[40]、円柱とリング共振器の最適設計を実現し[41]、誘電体共振器の遮蔽導体がQ値に及ぼす影響を明らかにし[42]、高Q共振器設計を実現した[43]。更に同解析手法によりサファイア円柱共振器などの設計に有効な軸異方性誘電体円柱共振器のモード解析に成功した[44]。一方、K.A. Zakiらが共振器内の解析領域の分割方法を変えて筆者らと同じモード展開法による解析結果を発表した[45],[46]。ここで筆者とZakiにより提案した混成モードの命名法が異なっていたために、1989年「誘電体共振器のモード命名法」に関する小委員会がMTT-S内に創設され、毎年MTT-S国際会議開催中に議論されることになった。日本からは脇野氏と筆者が委員として参加した。筆者はSnitzer[4]に従って混成モードの電磁界分布を考慮してHEとEHと表記すべきと主張したが、Zakiは界分布に関係なく計算した共振周波数の低い方からHEMと表記すべきと主張して互いに譲らなかった。数年に渡って議論されたが結論に至らず、1994年最後は評決で決めることになった。しかし、互いに5票ずつで決着がつかず、この小委員会は解散した。

3.3 マイクロ波誘電体フィルタ

誘電体フィルタは誘電体共振器を複数個電磁界結合されて構成されるため、フィルタ設計は回路解析ソフトと電磁界解析ソフトを駆使して行われる[47]。すなわちBPFを例にとると、まず中心周波数、帯域幅、フィルタ段数を与えて回路解析ソフトから共振器の共振周波数、共振器間結合係数、入出力部の結合のQを計算し、次にこれらの値を実現するために使用する誘電体の比誘電率を与えて電磁界解析ソフトにより共振モードに対する誘電体共振器の寸法及び共振器間距離を計算し、誘電体共振器を複数個配列してフィルタ構造を決定する。この際、結合のQを決定するための共

振器と励振線間距離は通常は実験により求める。このようにして実際にフィルタ構造を作製しても、誘電体固体の比誘電率のばらつきや共振器間距離の設定誤差などにより理想的にはフィルタの周波数特性は得られない。最後に周波数特性の実測波形から回路解析ソフトにより、何番目の共振周波数と段間距離に誤差があるのか診断をして、構造を調整し直し、更に周波数特性を取り直す。この操作を数回繰り返して理想フィルタ波形に近づける手順を踏む必要がある。正確な材料の測定結果を用いることにより試作回数を減らすことが可能である。

1978年脇野氏らの発表以来、空前の誘電体フィルタの研究開発ブームが世界的規模で始まり、多くの論文が発表され、種々の通信機器に応用された[40]。MTT-S国際会議後、西川氏とFord Aerospace社を訪問して、村田製セラミクス共振器を用いた誘電体フィルタがスーパーバード衛星に実際搭載されているのを目にしたときの感激は忘れられない。筆者らに關係する誘電体フィルタの開発について述べる。

1968年S.B. Cohn [1]により発表された $TE_{01\delta}$ モード誘電体共振器を同軸上に配列したBPFに関する高精度設計を15年後の1983年実現した[48]。誘電体リング共振器を用いて、帯域外特性を改善し[49]、新たに $TM_{01\delta}$ モード共振器を用いた帯域外特性に優れたBPFを提案した[50]。また $EH_{11\delta}$ 直交モードを利用した6段カノニカルBPFを3個の共振器で実現し[51]、3重モードを利用した6段だ円関数フィルタを2個の共振器で実現した[52]。

TM_{010} 円柱共振器を用いたフィルタ[37]に関しては、その後この共振器の共振特性の高精度設計を実現し[53]、電界結合型フィルタを開発した[54]。更に TM_{010} モードの飛越結合を利用しただ円関数型BPFを実現した[55]。このフィルタの特許は村田製作所に譲渡され、移動体通信基地局用BPFとして利用された[56],[57],[63]。村田製作所から多くの移動体通信用機器への誘電体フィルタ応用例がIEEE東京支部発行のDenshi Tokyo誌に掲載されており[58]~[64]、貴重な資料となっている。

共振器単体としては、12GHz固体発信器用周波数安定化共振器として、屋外衛星放送受信アンテナきょう体の中で多く利用された。小形の誘電体フィルタは携帯機器の中でアンテナ共用機として多く利用されたが、やがてより小型軽量のSAWフィルタにとって代わられた。以後急速に誘電体フィルタの市場は縮小し、

国内企業の多くはこの分野から撤退した。

最近、 $(Zr, Sn)TiO_4$ セラミックスを用いた6段フィルタを用いて3.7-4.2GHz帯12チャンネル・マルチプレクサが構成された[65]。そのきれいな周波数特性を見たとき、インドの技術レベルの高さに改めて驚嘆した。旧アナログTVの700MHz帯は移動通信用に割り当てられたと聞いているが、国内の中継局に日本製誘電体フィルタが使われることはないのだろうか。

3.4 平面フィルタ及び伝送回路の高精度設計

平面フィルタは実用的観点から、ストリップライン構造からマイクロストリップ構造へと発展してきた。粟井は2000年までに大量に発表されたマイクロ波平面フィルタに関する文献をまとめた[66]。筆者はそれを受けて平面フィルタのパターン設計方法についてまとめた[67]。

平面フィルタは両面に銅箔を張った誘電体積層基板の片側にマイクロストリップ構造のフィルタパターンをエッチング技術により作製して構成される。従来より、積層基板の垂直方向の比誘電率(カタログ値)及び純銅の導電率を用いて設計されてきた。しかし、4GHz以上になると、実験結果が設計値に合わないことが問題になってきた。

この原因は1軸異方性をもつ積層基板の面方向の比誘電率が垂直方向の誘電率と異なること、及びアンカー効果による密着性をよくするために面粗しされた銅箔と基板間の界面導電率が表面導電率と異なることにあるのではないかと予想した。平面回路の高精度設計には基板の垂直方向及び面方向の比誘電率及び銅箔の実効表面導電率及び基板と銅箔間の実効界面導電率の測定値を全て考慮して高精度設計を行うべきであると提案した[68]~[70]。これらの測定には、**2.2**、**2.3**、及び**2.1**の測定法を用いた。その有効性はフィルタ設計[71]及びマイクロストリップ線路の設計[72]において有効であると実証された。

4. 高温超伝導体のマイクロ波評価技術の開発とフィルタ設計

放射損を防ぐために誘電体共振器を導体で覆うと、共振器体積は比誘電率の2分の3乗に小型化されるが、エネルギー集中のため導体損によるQ値は比誘電率の2分の1乗に減少する。この導体損の増加を抑えるために高導電率導体の出現が望まれていた。1986年ノーベル賞に輝いた高温超伝導物質(HTS)が開発

されて、直流抵抗零に感動した。セラミック誘電体をこの超電導体で遮蔽したら高 Q 共振器を実現できるのではないかと期待した。1989 年 MTT-S IMS Work Shop “Microwaves and Superconductivity” に参加して、会場の熱気に圧倒された。帰国後直ちに研究室内で高温超電導体の表面インピーダンスのマイクロ波測定プロジェクトを立ち上げ、1990 年 2 誘電体共振器法による HTS の表面抵抗測定に関する論文を IMS で発表し [73]、翌年の Trans. MTT 特集号: Microwave super-conductivity に掲載された [74]。

一方、一つの誘電体円柱共振器に存在する TE₀₁₂ モードと TE₀₂₁ モードを用いる新しい方法が提案され [75]、この 1 誘電体共振器法は 2 誘電体共振器法と同様に表面抵抗の測定に有効であることが実証された [76]~[81]。また 1 個のサファイア円柱共振器に存在する 4 個の共振モードを用いて、YBCO 膜の表面抵抗の周波数依存性の測定に成功した [82]。サファイア円柱軸と結晶 c 軸を一致させた一軸性誘電体共振器の設計には文献 [44] が大いに役立った。これらの 2 種類の誘電体共振器法は IEC TC90 委員会により国際標準化された。

YBCO 膜をエッチング技術によりフィルタパターンを作製することにより種々の低損失フィルタが実現され [83]~[88]、以後現在でも新しいフィルタの開発が盛んである。しかしセラミックスに HTS 膜を成長させることはできず、最初の夢は実現されていない。

5. む す び

ハードウェアとソフトウェアの調和のとれた技術開発こそが日本の生き残る道であるという信念をもって、ここに述べた低損失電子材料の高精度測定法は将来の新材料開発及び電子回路高精度設計に貢献するものと期待する。

謝辞 長年の研究において、ご協力頂いた埼玉大学の学生諸君に深謝いたします。

文 献

- [1] S.B. Cohn, “Microwave bandpass filters containing high Q dielectric resonators,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.16, no.4, pp.218-227, April 1968.
- [2] B.W. Hakki and P.D. Coleman, “A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range,” IRE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-8, no.7, pp.402-410, July 1960.
- [3] J.A. Stratton, Electromagnetic theory, McGraw Hill, 1941.
- [4] E. Snitzer, “Cylindrical dielectric waveguide modes,” J. Opt. Soc. Am., vol.51, no.5, pp.491-498, May 1961.
- [5] 齊藤成文, 須田徳蔵, “4000 Mc に於ける金属表面損失並びに導波管減衰定数の測定,” 信学誌, vol.35, no.6, pp.251-254, June 1952.
- [6] 小林禧夫, 田中周三, “誘電体共振器による複素誘電率測定法に関する諸検討,” 信学論 (B), vol.59-B, no.4, pp.223-230, April 1976.
- [7] Y. Kobayashi and S. Tanaka, “Resonant modes of a dielectric rod resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-28, no.10, pp.1077-1085, Oct. 1980.
- [8] 安宅彦三郎, 門司正之, 円筒関数表 (複素変数), 丸善, 1948.
- [9] Y. Kobayashi and M. Katoh, “Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-33, no.7, pp.586-592, July 1985.
- [10] 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.
- [11] IEC 61338-1-3 (1999), “Waveguide type dielectric resonators, Part 1-3: General information and test conditions—Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency.”
- [12] 大越孝敬, 三好旦六, 平面回路, オーム社, 1975.
- [13] K. Tanabe, Y. Kobayashi, and S. Tanaka, “Numerical analysis of eigenvalue solution of disk resonator,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-23, no.6, pp.508-511, June 1975.
- [14] 小林禧夫, 小林 晃, 田中周三, 鈴木康夫, “平衡形円板共振器による複素誘電率測定法,” 信学技報, MW75-76, Oct. 1975.
- [15] 日本電子回路工業会/日本弗素樹脂工業会発行, “JPCA-FCL01-2006/JFIA-FP001-2006 規格: ふっ素樹脂銅張積層板のマイクロ波誘電特性の試験方法,” May 2006.
- [16] 小林禧夫, 于 静, 加藤正之, “複素誘電率測定用平衡形円板共振器の励振方法の検討,” 1990 信学秋大, C-64, Oct. 1990.
- [17] H. Kawabata and Y. Kobayashi, “The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited by coaxial cable lines to measure the complex permittivity,” Asia-Pacific Microwave Conf. Proc., pp.1322-1325, Dec. 2001.
- [18] H. Kawabata, K. Hasuike, Y. Kobayashi, and Z.-W. Ma, “Multi-frequency measurement of complex permittivity of dielectric plates using higher-order modes of a balanced-type circular disk resonator,” Proc. 36th European Microwave Conf., pp.388-391, Sept. 2006.
- [19] 金子彰吾, 小林禧夫, 馬 哲旺, “平衡形円板共振器法による 110 GHz にわたる誘電体基板の複素誘電率測定,” 2011

- 信学総大, C-2-50, March 2011.
- [20] D 3380-82, "Standard test method for permittivity (dielectric constant) and dissipation factor) of plastic-based microwave circuit substrates," 1982.
- [21] S. Saito and K. Kurokawa, "A precision resonance method for measuring dielectric properties of low-loss solid materials in the microwave region," Proc. IRE, vol.44, no.1, pp.35-42, Jan. 1956.
- [22] S.B. Cohn and K.C. Kelly, "Microwave measurement of high-dielectric constant materials," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.14, no.9, pp.406-410, Sept. 1966.
- [23] Y. Kobayashi and T. Hataguchi, "Millimeter wave measurement of complex permittivity by dielectric disk resonator method," 9th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves Digest, pp.374-375, Oct. 1984.
- [24] 小林禱夫, 佐藤純也, "空洞共振器による誘電体平板材料の複素誘電率の非破壊測定," 信学技報, MW86-53, EMCJ87-48, Oct. 1987.
- [25] Y. Kobayashi and J. Sato, "Millimeter wave measurement of complex permittivity by improved dielectric disk resonator method," 13th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, pp.302-303, Dec. 1988.
- [26] Y. Kobayashi and T. Shimizu, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by a cavity resonance method," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.1885-1888, June 1999.
- [27] 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. Digest, pp.825-828, Sept. 2002.
- [28] IEC 61338-1-4 (2005) Ed.1: Waveguide type dielectric resonators, Part 1-4: General information and test conditions—Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at millimetre-wave frequency."
- [29] T. Shimizu, Y. Kawahara, S. Akasaka, and Y. Kogami, "Development of a 100 GHz grooved empty cavity for complex permittivity measurements in W band," IEICE Trans. Electron., vol.E94-C, no.10, pp.1650-1656, Oct. 2011.
- [30] M.D. Janezic and J. Baker-Jarvis, "Full-wave analysis of a split-cylinder resonator for nondestructive permittivity measurements," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.47, no.10, pp.2014-2020, Oct. 1999.
- [31] M.D. Janezic, E.F. Kuester, and J. Baker-Jarvis, "Broadband complex permittivity measurements of dielectric substrates using a split-cylinder resonator," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.1817-1820, 2004.
- [32] 小笠原直幸, 鈴木道雄, ミリ波, 日刊工業新聞社, 1961.
- [33] 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., pp.759-762, Oct. 2003.
- [34] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, "An improvement of the perturbation method using a TM_{010} mode cylindrical cavity," IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.12, pp.2371-2378, Dec. 2003.
- [35] IEC 62810 (2005) Ed.1.0: Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods.
- [36] Y. Kobayashi and S. Yoshida, "Bandpass filters using TM_{010} dielectric rod resonators," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.233-235, 1978.
- [37] K. Wakino, T. Nishikawa, S. Tamura, and Y. Ishikawa, "Microwave bandpass filters containing dielectric resonator with improved temperature stability and spurious response," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.63-65, 1978.
- [38] 西川敏夫, 石川容平, 服部 準, 井田良雄, "共振器法による誘電体材料の相互変調ひずみの測定法," 信学論 (C-I), vol.J72-C-I, no.10, pp.650-658, Oct. 1989.
- [39] S.J. Fiedziuszko, I.C. Hunter, T. Itoh, Y. Kobayashi, T. Nishikawa, S.N. Stitzer, and K. Wakino, "Dielectric materials, devices, and circuits," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.50, no.3, pp.706-720, March 2002.
- [40] 小林禱夫, 福岡宣重, 吉田信一郎, "しゃへい形誘電体円柱共振器の共振モード," 信学論 (B), vol.J64-B, no.5, pp.433-440, May 1981.
- [41] Y. Kobayashi and M. Miura, "Optimum design of shielded dielectric rod and ring resonators for obtaining the best mode separation," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.184-186, May 1984.
- [42] Y. Kobayashi, T. Aoki, and Y. Kabe, "Influence of conductor shields on the Q-factors of a TE0 dielectric resonator," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-33, no.12, pp.1361-1366, Dec. 1985.
- [43] Y. Kobayashi and Y. Kabe, "Dielectric rod resonators having high values of unloaded Q," Trans. IECE of Japan, vol.E69, no.4, pp.335-337, April 1986.
- [44] Y. Kobayashi and T. Senju, "Resonant modes in shielded uniaxial-anisotropic dielectric rod resonators," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-41, no.12, pp.2198-2205, Dec. 1993.
- [45] K.A. Zaki and A.E. Atia, "Modes in dielectric loaded waveguide and resonators," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-31, no.12, pp.1039-1045, Dec. 1993.
- [46] K.A. Zaki and C. Chen, "Intensity and distribution of hybrid-mode fields in dielectric loaded waveguides," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-33, no.12, pp.1442-1047, Dec. 1995.
- [47] 小林禱夫, 鈴木康夫, 古神義則, マイクロ波誘電体フィルタ, 電子情報通信学会 (編), 2007.
- [48] 小林禱夫, 吉田信一郎, "誘電体円柱共振器を同軸状に配列

- した帯域通過フィルタの設計,” 信学論 (B), vol.J66-B, no.1, pp.95–102, Jan. 1983.
- [49] Y. Kobayashi and M. Minegishi, “A bandpass filter using high-Q dielectric ring resonators,” IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.379–382, June 1987.
- [50] Y. Kobayashi and M. Minegishi, “A low-loss band-pass filter using electrically coupled high-Q $TM_{01\delta}$ dielectric rod resonator,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-36, no.12, pp.1727–1732, Dec. 1988.
- [51] Y. Kobayashi and K. Kubo, “Canonical bandpass filters using dual-mode dielectric resonators,” IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.137–140, June 1987.
- [52] 小松 繁, 小林禎夫, “3重モード誘電体円柱共振器を用いた帯域通過フィルタの設計,” 信学論 (C-I), vol.J78-C-I, no.2, pp.96–103, Feb. 1995.
- [53] 小林禎夫, 小嶋克人, 吉田信一郎, “しゃへい形 TM_{010} 誘電体円柱共振器,” 信学論 (B), vol.J64-B, no.2, pp.119–125, Feb. 1981.
- [54] 小林禎夫, 小嶋克人, 吉田信一郎, “電界結合 TM_{010} 誘電体円柱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.
- [55] Y. Kobayashi and H. Furukawa, “Elliptic bandpass filters using four TM_{010} dielectric rod resonators,” IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.353–356, June 1986.
- [56] T. Nishikawa, Y. Ishikawa, J. Hattori, K. Wakino, and Y. Kobayashi, “4 GHz band band-pass Filter using an orthogonal array coupling TM_{110} dual mode dielectric resonator,” 19th European Microwave Conf. Proc., pp.886–891, Sept. 1989.
- [57] 西川敏夫, 石川容平, 服部 準, 小林禎夫, “直交結合 TM_{110} モード誘電体共振器を用いた 4 GHz 帯帯域フィルタ,” 信学論 (C-I), vol.J73-C-I, no.2, pp.54–60, Feb. 1990.
- [58] K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, and H. Tamura, “800 MHz band miniaturized channel dropping filter using low loss dielectric resonator,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.24, pp.72–75, 1985.
- [59] K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, and H. Wada, “5 channel dielectric transmitter multiplexer for 800 MHz band cellular system base station,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.25, pp.65–68, 1986.
- [60] K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, and K. Tsunoda, “800 MHz band elliptic function type band-pass filter using high K monoblock ceramics,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.25, pp.117–120, 1986.
- [61] K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, and J. Hattori, “800 MHz surface mount type B.D.L.S. filter,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.26, pp.138–142, 1987.
- [62] K. Wakino, T. Nishikawa, K. Takehara, T. Tanizaki, and Y. Ishikawa, “16 channel dielectric transmitter multiplexer for cellular base stations,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.27, pp.110–115, 1988.
- [63] T. Nishikawa, K. Wakino, T. Hiratsuka, H. Takagaki, and Y. Ishikawa, “800 MHz band high-power band-pass filter using TM_{110} mode dielectric resonators,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.28, pp.115–118, 1989.
- [64] T. Nishikawa, Y. Hata, K. Takehara, K. Kubota, Y. Ida, and Y. Ishikawa, “Dielectric transmitter combiner for 280 MHz band paging system,” Denshi Tokyo, IEEE Tokyo Section, no.29, pp.98–102, 1990.
- [65] V. Singh, K.S. Parikh, S. Singh, and R.B. Bavaria, “DR OMUX for Satellite Communications,” IEEE Microw. Mag., vol.14, no.6, pp.104–118, Sept./Oct. 2013.
- [66] 栗井郁夫, “マイクロ波平面フィルタ,” MWE2000, Microwave Workshops Digest, pp.445–454, Dec. 2000.
- [67] 小林禎夫, “平面フィルタのパターン設計,” MWE2003 Microwave Workshop Digest, pp.527–536, Nov. 2003.
- [68] 小林禎夫, “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.
- [69] 蓮池健一, 川端広一, 小林禎夫, “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.
- [70] Y. Kobayashi, “Microwave characterization of copper-clad dielectric laminate substrates,” IEICE Trans. Electron., vol.E90-C, no.12 pp.2178–2184, Dec. 2007.
- [71] 相羽 英, 小林禎夫, 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.
- [72] 吉富了平, 小林禎夫, 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.
- [73] Y. Kobayashi, T. Imai, and H. Kayano, “Microwave measurement of surface impedance of high-Tc superconductor,” IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.281–284, May 1990.
- [74] Y. Kobayashi, T. Imai, and H. Kayano, “Microwave measurements of temperature and current dependences of surface impedance for high-Tc superconductors,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-39, no.9, pp.1530–1538, Sept. 1991.
- [75] D.-M. Xu and Z.-N. Li, “A novel method for characterizing the surface resistance of two conducting plates shorted at both ends of a dielectric resonator,” 15th European Microwave Conf. Proc., pp.912–916, Sept. 1985.
- [76] Y. Kobayashi and H. Yoshikawa, “Automatic measurements of surface resistance of superconductors

- using two modes in a dielectric rod resonator,” Proc. 27th European Microwave Conf., pp.703–708, Sept. 1997.
- [77] Y. Kobayashi and H. Yoshikawa, “Microwave measurements of surface impedance of high-Tc superconductors using two modes in a dielectric rod resonator,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.46, no.12, pp.2524–2530, Dec. 1998.
- [78] Y. Kobayashi, H. Yoshikawa, and T. Hashimoto, “Frequency dependence of measurement precision in two dielectric resonator methods for estimating surface resistance of high-Tc superconductor films,” 2000 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc., pp.1567–1564, Dec. 2000.
- [79] T. Hashimoto and Y. Kobayashi, “Development of a millimeter-wave coaxial cable measurement system at cryogenic temperature and measurement of the surface resistance of high-Tc superconductor films,” IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, no.3, pp.720–724, March 2002.
- [80] T. Hashimoto and Y. Kobayashi, “An image-type dielectric resonator method to measure surface resistance of a high-Tc superconductor film,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.1, pp.30–36, Jan. 2003.
- [81] T. Hashimoto and Y. Kobayashi, “Two-sapphire-rod-resonator method to measure the surface resistance of high-Tc superconductor films,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.681–688, May 2004.
- [82] T. Hashimoto and Y. Kobayashi, “Frequency dependence measurements of surface resistance of superconductors using four modes in a sapphire rod resonator,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.8, pp.1721–1728, Aug. 2003.
- [83] Z.-W. Ma, T. Kawaguchi, and Y. Kobayashi, “Miniaturized high-temperature superconductor bandpass filters using microstrip s-type spiral resonators,” IEICE Trans. Electron., vol.E88-C, no.1, pp.57–61, Jan. 2005.
- [84] Z.-W. Ma, T. Kawaguchi, and Y. Kobayashi, “Miniaturized high-temperature superconductor bandpass filters using microstrip s-type spiral resonators,” IEICE Trans. Electron., vol.E88-C, no.1, pp.57–61, Jan. 2005.
- [85] Z.-W. Ma, E. Sakurai, and Y. Kobayashi, “Design and measurement of a miniaturized HTS filter using microstrip spiral resonators,” IEICE Trans. Electron., vol.E88-C, no.2, pp.216–220, Feb. 2005.
- [86] Z.-W. Ma, T. Kawaguchi, Y. Kobayashi, D. Koizumi, K. Satoh, and S. Narahashi, “A miniaturized high temperature superconducting bandpass filter using CPW quarter-wavelength spiral resonators,” IEEE Int. Microwave Symp Dig., pp.1197–1200, June 2006.
- [87] Z.-W. Ma, T. Kawaguchi, Y. Kobayashi, D. Koizumi, K. Satoh, and S. Narahashi, “A novel compact HTS interdigital bandpass filter using CPW quarter-wavelength resonators,” IEICE Trans. Electron., vol.E89-C, no.2, pp.140–144, Feb. 2006.
- [88] 小泉大輔, 河合邦浩, 佐藤 圭, 橋本祥一, 馬 哲旺, 小林 禰夫, “CPW1/4 波長共振器を用いたインテグラル形高温超伝導帯域通過フィルタの製作及び評価,” 信学論 (C), vol.J91-C, no.6, pp.341–348, June 2008.
(平成 29 年 2 月 8 日受付, 9 月 12 日公開)



小林 禰夫 (正員：フェロー)

昭 38 東京都立大・工・電気卒. 昭 40 同大学院修士課程了. 同年埼玉大学理工学部助手. 昭 63 同大学工学部教授. 平 16 埼玉大学定年退職, 同年埼玉大学名誉教授, 現在サムテック有限会社代表取締役, マイクロ波工学, 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. 工博. IEEE Life Fellow. 平 7 科学技術振興事業団井上春成賞受賞, 平 23 本会業績賞受賞.