低損失誘電体および高温超電導体のミリ波評価法の開発動向

正 員 小林 禧夫*

Development Trend of Millimeter-Wave Evaluation Techniques of Low-Loss Dielectrics and High Temperature Superconductors

Yoshio Kobayashi*, Member

Recent development trends of several resonance methods are reviewed to measure the complex relative permittivity (relative permittivity ϵ_r and loss tangent $\tan\delta$) of low-loss dielectric materials and the surface resistance R_s of high temperature superconductors (HTS) in microwave and millimeter-wave regions; that is, a cavity resonator method, a cut-off circular waveguide method, a balanced-type circular disc resonator method, a Fabry-Perot open resonator method, a whispering-gallery mode resonator method, a Hakki-Coleman method, a two-dielectric-resonator method, a one-dielectric-resonator method, a dielectric resonator method using NRD-guides, and a perturbation method.

キーワード：低損失誘電体，複素誘電率，高温超電導体，表面抵抗，ミリ波，マイクロ波

Keywords : low-loss dielectric, complex permittivity, high temperature superconductor, surface resistance, millimeter-wave, micro wave

1. はじめに

マイクロ波・ミリ波デバイスの設計や新誘電体材料の開発を行う際には，平板状，円柱状，丸棒状の誘電体材料の複素比誘電率(比誘電率 ϵ_r ，誘電正接 $\tan\delta$)の温度依存性および周波数依存性を高精度に評価することが必要不可欠である。また，最近では高温超電導体(HTS)のマイクロ波応用の研究も盛んに行われており，その表面抵抗 R_s を評価することも重要となっている。本論文では，これらの材料評価法の開発動向について概説する。

2. 誘電体基板および円板試料の評価方法

〈2・1〉 円筒空洞共振器法 この方法は，誘電体基板の面方向の複素比誘電率を測定するために開発され^{(1)~(3)}，2002年JIS規格として制定された⁽⁴⁾。図1にその構成図を示す。この構造は，導体円筒空洞を2つに分割しその間に誘電体基板を挟んで共振器を構成するため，測定試料の着脱が容易であり，非破壊測定に有効である。 ϵ_r は TE_{011} モードの共振周波数 f_0 の測定値より， $\tan\delta$ は無負荷 Q ， Q_u の測定値より求められる。この際，試料と空洞端部に存在する縁端効果は，Ritz-Galerkin法による厳密解析により正確に評価されるため，高精度測定が実現される。また，文献(3)，(8)に示される自動測定システムを用いることにより，複素比誘電率の温度依存性を高精度かつ高能率に測定可能である。

〈2・2〉 遮断円筒導波管法 この方法は，円筒空洞共

振器がミリ波帯で製作困難になるために開発された測定法であり，誘電体基板の面方向の複素比誘電率が測定可能である^{(5)~(11)}。現在，JIS原案として審議されている。図2に

左:空洞共振器 右:誘電体を装荷した共振器

図1 円筒空洞共振器法

(a) 誘電体を装荷した共振器 (b) 空洞共振器

図2 遮断円筒導波管法

* 埼玉大学工学部
〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
Saitama University, Faculty of engineering
255 Shimo-ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi 338-8570

図3 遮断円筒導波管法による空洞共振器および3種類の有機材料の温度依存性の測定結果

その構成図を示す。 ϵ_r はTE₀₁₁モードの f_0 の測定値より、 $\tan\delta$ は Q_u の測定値より縁端効果まで考慮した値が求められる。一例として本法により評価したPTFE平板、Crythnax平板、MPO (Modified Polyolefin) 平板の複素比誘電率の温度依存性の測定結果を図3に示す。

〈2・3〉 平衡形円板共振器法 この方法では、誘電体基板に対して垂直な電界成分を持つTM₀₁₀モードを用いるため、基板の厚さ方向の複素比誘電率を測定することができる^{(12)~(16)}。この共振器は、図4に示すように、厚さ t 、暑さ方向の比誘電率 ϵ_r の2枚の誘電体基板の間に直径 $2R$ の導体円板を挟み、これを2枚の導体板で挟んで構成される。従来は、ストリップ線路を用いて導体円板の側面から励振していたため、薄い誘電体基板の測定に際しては線路幅が狭くなりコネクタとの整合性に問題があった。また高損失材料を評価する場合、モード判別が困難であった。これらを解決するために、同軸線路により円板の軸方向から励振を行う方法が提案された⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。この方法では、円板の中心に電界成分を持つTM_{0m0}モードが選択的に励振されるため、薄い基板や高損失材料に対しても高精度測定が可能である。

〈2・4〉 ファブリペロー開放形共振器法 この方法で

図4 同軸励振平衡形円板共振器法

図5 WGモード共振器法

は、2枚の球面反射鏡を用いて開放形共振器を構成する。1~3×10⁵程度の高 Q 値が実現できるが、反射鏡-平板試料間の平行度を微妙に調整する必要があり、取扱いに熟練を要する^{(17)~(20)}。50GHz帯では75mm角程度の平板試料が必要となり、測定周波数が低くなると共振器および測定装置が更に大型化する。そのため、本法はミリ波帯以上で有効である。

〈2・5〉 ウィスパリングギャラリー(WG)モード共振器法

図5にWGモード誘電体共振器の構成図を示す。誘電体円板の縁付近に励振用の誘電体線路を近づけると、円板内を周方向に伝搬する進行波共振が生じる。円板の直径を媒質内波長の数十倍、厚さを半波長程度にすると、WGモード以外の共振モードは漏洩モードとなり、WGモードの共振ピークのみが周方向モード次数の順に現れる。このとき、 ϵ_r はモード次数および f_0 の測定値より、また $\tan\delta$ は Q_u の測定値より求められる。

この方法では共振器の構成に遮蔽導体を用いないため、ミリ波帯における導体板損失の影響を受けることがなく、従来の共振器法と比較して高い測定分解能で $\tan\delta$ を評価できる^{(21)~(25)}。また、測定に使用する共振モードが一定の周波数間隔で現れるため、複素比誘電率の周波数依存性の測定が容易に行える。

3. 誘電体円柱試料の評価方法

〈3・1〉 Hakki-Coleman 法 この方法は、その簡便さから低損失誘電体円柱の面方向の ϵ_r および $\tan\delta$ の評価方法

図6 誘電体円柱の複素比誘電率測定に用いる
誘電体円柱共振器の構造

図7 2 誘電体円柱共振器法

として広く用いられている⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。測定に用いられる共振器は、図6に示すように、直径 D 、長さ L の誘電体円柱を R_s が等しい2枚の平行導体板の間に装荷し、板バネあるいはマイクロメータにより固定して構成される。本測定では、導体板と円柱間の空隙効果を避けるため導体板に平行な電界成分のみを持つ TE_{0mp} モードを用いる。円柱の ϵ_r は、 TE_{0mp} モードの共振周波数 f_{0mp} より求められる。また $\tan\delta$ は、 TE_{0mp} モードの無負荷 Q 、 Q_{u0mp} の測定値から、銅板の比導電率(パーセント導電率) σ_r を100%と仮定することにより求められる。ただし、 σ_r は万国標準軟銅の導電率 $\sigma_0 (= 58 \times 10^6 \text{ S/m})$ に対する比の百分率であり、 $R_s = (50\omega\mu / \sigma_0\sigma_r)^{1/2}$ の関係がある。しかしマイクロ波帯では、表皮効果により電流は導体表面しか流れないため、導体表面の酸化および表面粗さ等により σ_r の実効的な値は100%以下となる。これにより、本法では $\tan\delta$ が高めに評価される欠点がある。

〈3・2〉 2 誘電体円柱共振器法 Hakki-Coleman 法による $\tan\delta$ 測定法を改善するために、2 誘電体円柱共振器法が開発された⁽²⁸⁾。この方法では直径が等しい2つの誘電体円柱を用いることにより、円柱の $\tan\delta$ と導体板の R_s を高精度に分離測定することができる。図7に示すように TE_{011} モード用円柱は長さ L_1 を持ち、 TE_{013} モード用円柱は長さ $L_3=3L_1$ を持つ。円柱の ϵ_r は各共振器の f_0 の測定値より求められる。また、2つの円柱の $\tan\delta$ が等しいと仮定することにより、両共振器の Q_u の測定値から $\tan\delta$ および R_s を求めることができる。

図8 2 モードを用いた1 誘電体円柱共振器法

図9 1 誘電体円柱共振器法による BMT セラミック円柱
の ϵ_r 、 $\tan\delta$ および銅板の R_s の測定結果

なお、本法はラウンドロビン試験を行った後⁽²⁹⁾、1996年に JIS 規格⁽³⁰⁾ および1999年に IEC 国際規格⁽³¹⁾ としてそれぞれ制定された。また、この測定法用標準セラミック共振器は、JFCC(ファインセラミックスセンター)に準備されている。

〈3・3〉 1 誘電体円柱共振器法 一般に、等しい $\tan\delta$ を持つ円柱を複数個揃えるのは容易でない。これを解決するために、1 誘電体円柱共振器法が提案された⁽³²⁾⁽³³⁾。本法では図 8 に示すように一つの誘電体円柱共振器内に存在する TE_{012} および TE_{021} モードが用いられる。これらの共振モードは高次モードであり、共振器寸法の設計には他の隣接モードの影響を受けないようにモードチャートを用いて正確に行う必要がある⁽³³⁾。円柱の ϵ_r は f_0 の測定値より求められ、 $\tan\delta$ および R_s は両モードの Q_u から求められる。一例として、本測定法により評価した BMT セラミック円柱の測定結果を図 9 に示す。

〈3・4〉 NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法 これまで述べた方法をミリ波帯に应用すると、円柱の高さよりも同軸線路の直径が大きくなり測定が困難になる。これを解決するために、NRD ガイド⁽³⁴⁾を用いた誘電体円柱共振器法が開発された⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。この方法では、誘電体円柱共振器とリング共振器を用いて円柱の ϵ_r 、 $\tan\delta$ および導体板の σ_r を求める。しかし、 ϵ_r の計算が複雑であり、また、 σ_r の測定精度があまり高くないため $\tan\delta$ の測定精度が低いなどの問題があった。最近、誘電体円柱の $\tan\delta$ と導体板の σ_r を簡便かつ高精度に分離測定するために図 10 に示す新しい方法が提案された⁽³⁷⁾。本測定法では、 TE_{021} モード用および TE_{028} モード用の 2 つの共振器が用いられる。

〈3・5〉 TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた摂動法

図 11 に示される TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた摂動法は、その簡便さからマイクロ波帯における誘電体丸棒試料の z 軸方向の複素比誘電率測定法として広く用いられている⁽³⁸⁾。最近、Ritz-Galerkin 法による厳密解析を行うことにより、この共振器の試料挿入孔の影響を考慮したより高精度な摂動法が提案された⁽³⁹⁾。またこの方法は、液体の複

図 10 NRD ガイド励振誘電体円柱共振器

図 11 TM_{010} モード円筒空洞共振器を用いた摂動法

素比誘電率測定にも有効であることが実証された⁽⁴⁰⁾。

4. 高温超電導体の評価方法

〈4・1〉 Hakki-Coleman 法の応用 〈3・1〉 節で述べられた Hakki-Coleman 法は HTS 膜の R_s 測定にも応用された^{(41)~(45)}。共振器は 2 枚の HTS 膜の間にサファイアや $LaAlO_3$ などの低損失誘電体円柱を挟むことにより構成される。この方法では、 $\tan\delta=0$ と仮定することにより TE_{011} モードの Q_u から HTS の R_s を評価する。しかし、10 GHz で $R_s=0.1m\Omega$ 以下の HTS を評価する際には、次節で述べる 2 サファイア円柱共振器法に対し 4 % 程度の誤差を生じる⁽⁴⁷⁾。

〈4・2〉 2 サファイア円柱共振器法 先に述べた 2 誘電体円柱共振器法は、 $(Zr, Sn)TiO_4$ セラミック円柱を用いることにより HTS バルクの R_s 測定にも応用された⁽⁴⁶⁾。しかし、10 GHz で $R_s=0.1m\Omega$ 以下の HTS 薄膜が開発されると、薄膜に比べ円柱の損失が大きくなるためセラミック円柱の代わりに低損失サファイア円柱が用いられるようになった。この方法は 2 サファイア円柱共振器法と呼ばれ⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾、2001 年 IEC 国際規格⁽⁴⁹⁾に採用された。この国際規格では、 $Q_u > 10^6$ 以上の高 Q 測定に対しては図 12 に示す closed-type サファイア円柱共振器が用いられる。サファイア円柱は下部 HTS 膜の中央に配置され、上部 HTS および無酸素銅リングにより

図 12 closed-type サファイア円柱共振器

図 13 YBCO 薄膜および銅板の R_s の周波数依存性測定結果

遮蔽される。ここで、円柱と上部 HTS の間の空隙は M とする。サファイアの一軸異方性を考慮した共振器の最適設計は、モードマッチング法による厳密解析により行われている⁽⁵⁰⁾。

〈4・3〉 1 サファイア円柱共振器法 最近、HTS の R_s の周波数依存性を評価するために、1 個のサファイア円柱共振器内に存在する 4 つの TE_{0mp} モードを用いる 1 サファイア円柱共振器法が提案された^{(51)~(53)}。これにより 1 個のサファイア円柱のみを用いて 3 点の周波数における R_s が測定可能となった。

最後に、2 サファイア円柱共振器法および 1 サファイア円柱共振器法により測定した同一の $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 薄膜および銅板の R_s の周波数依存性測定結果を図 13 に示す。図より、30 GHz における YBCO の R_s は銅板の約 1/20 であることが分かった。これにより、HTS 膜をミリ波デバイスに応用することも期待できる。

5. 測定法の適用範囲および測定精度

これまでに述べた測定法の適用範囲および測定精度を表 1 および表 2 にまとめる。

表 1 複素比誘電率測定法の適用範囲および測定精度

測定法名	f_0 (GHz)	ε_r $\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r}(\%)$	$\tan\delta$ $\frac{\Delta\tan\delta}{\tan\delta}(\%)$
円筒空洞共振器法	2~40	1.1~50 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$
遮断円筒導波管法	30~100	1.1~50 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$
平衡形円板共振器法	2~30	1.1~10 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\pm 5 \sim 20$
ファブリペロー開放形共振器法	40~300	1.1~50 $\sim \pm 0.5$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\sim \pm 10$
WG モード共振器法	40~150	2~50 $\sim \pm 2.0$	$10^{-2} \sim 10^{-5}$ $\sim \pm 10$
2 誘電体円柱共振器法	2~40	2~1000 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ $\pm 5 \sim 20$
1 誘電体円柱共振器法	2~50	2~1000 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ $\pm 5 \sim 20$
NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法	30~100	2~50 $\sim \pm 0.4$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\sim \pm 10$
TM ₀₁₀ 空洞共振器を用いた摂動法	1~30	1.1~50 $\pm 1.0 \sim 7.0$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\pm 10 \sim 30$

表 2 HTS 膜の表面抵抗測定法の適用範囲および測定精度

測定法名	f_0 (GHz)	R_s (mΩ) at 12 GHz	$\frac{\Delta R_s}{R_s}(\%)$
Hakki-Coleman 法	5~30	> 0.1	$\pm 10 \sim 50$
2 サファイア円柱共振器法	10~30	> 0.06	< ± 10
1 サファイア円柱共振器法	7~45	> 0.06	< ± 10

6. まとめ

マイクロ波・ミリ波帯における低損失誘電体材料の複素比誘電率および HTS の R_s の評価法の開発動向について述べた。本論文に示した測定法を適切に用いることにより、高精度な材料評価が可能となり材料開発に大きく貢献できると考える。

謝 辞

論文執筆にご協力頂いた本研究室院生の橋本経君、清水隆志君に深謝します。

(平成 15 年 11 月 20 日受付)

文 献

< 誘電体基板材料の評価方法 >

(円筒空洞共振器法)

- (1) 小林禎夫・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, MW87-53, pp. 41-48 (1987)
- (2) Y. Kobayashi and J. Sato : “Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method”, *IEICE Tech. Rep.*, MW88-40, pp.43-50 (1988)
- (3) G. Zhang and Y. Kobayashi : “Complex permittivity measurement of unknown dielectric plates by the cavity resonance method”, *Proc. 3rd Int. Conf. on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI '97)*, pp.470-473 (1997)
- (4) JIS R1641 (2002):「ファインセラミックス基板のマイクロ波誘電特性の試験方法」

(遮断円筒導波管法)

- (5) Y. Kobayashi and T. Hataguchi : “Millimeter wave measurement of complex permittivity by dielectric disk resonator method”, *The 9th International Conf. Infrared and Millimeter Waves Dig.*, TH4-8, pp.374-375 (1984)
- (6) G. Zhang, S. Nakaoka, and Y. Kobayashi : “Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by the cavity resonance method”, *1997 Asia Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp.913-916 (1997)
- (7) Y. Kobayashi and T. Shimizu : “Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by the cavity resonance method”, *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.1885-1888 (1999)
- (8) 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. Dig.*, THIF-51, pp.2195-2198 (2001)
- (9) 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 (2002)
- (10) T. Shimizu, Z. Ma, and Y. Kobayashi : “Design of a grooved circular cavity for dielectric substrate measurements in millimeter wave region”, *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E86-C, No. 8, pp.1715-1720 (2003)
- (11) 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.* (2003) <to be published>

(平衡形円板共振器法)

- (12) K. Tanabe, Y. Kobayashi, and S. Tanaka : “Numerical Analysis of Eigenvalue Solution of Disk Resonator”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. MTT-23, pp.508-511 (1975)
- (13) 小林禎夫・于 静 : 「平衡形円板共振器による複素誘電率の自動測定」, 信学技報, MW91-117 (1991)
- (14) Y. Kobayashi and J. Yu : “Temperature- dependence measurement of anisotropic complex permittivity for MIC dielectric substrate”, *1992 Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, No.39-2, pp.859-862 (1992)
- (15) 川端広一・小林禎夫 : 「同軸励振平衡形円板共振器を用いた誘電体平板の複素誘電率測定」, 信学技報, MW2000-157, pp.43-50 (2000)

- (16) H. Kawabata and Y. Kobayashi : "The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited by coaxial cable lines to measure the complex permittivity", 2001 *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp.1322-1325 (2001)
- (ファブリペロー開放形共振器法)
- (17) 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)
- (18) Ph. Coquest, T. Matsui, and M. Kiyokawa : "Dielectric Measurement in the 60-GHz Band Using a High-Q Gaussian Beam Open Resonator", *IEICE Trans. On Electronics*, E78-C, pp.1125-1130 (1990)
- (19) 松井敏明 : 「ガウシアンビーム共振器法」, 信学ソ大, PC-1-6, pp.317-318 (1999)
- (20) M. N. Afsar, H. Chi, X. H. Li, and T. Matsui : "A 60GHz open resonator system for dielectric measurement", *Proc. 1989 European Microwave Conf.*, pp.820-823 (1989)
- (ウィスパリングギャラリモード共振器法)
- (21) 古神義則・松村和仁 : 「ウィスパリングギャラリモード共振器を用いたミリ波誘電体材料の温度特性の測定」, 信学総大, C-2-120, pp.171 (2000)
- (22) 古神義則・田村 先・松村和仁 : 「ウィスパリングギャラリモード共振器による 100GHz 帯複素誘電率測定」, 信学論, **J84-C**, No.8, pp.703-706 (2001)
- (23) 古神義則・松村和仁 : 「ウィスパリングギャラリモード共振器を用いた低誘電率誘電体材料のミリ波複素誘電率測定」, 信学論, **J83-C**, No.6, pp.553-558 (2000)
- (24) 田貝雅樹・古神義則・松村和仁 : 「ウィスパリングギャラリモード共振器法による誘電体材料の温度特性評価に関する検討」, 信学ソ大, **C-2-78**, pp.102 (2001)
- (25) Y. Kogami, H. Tamura, and K. Matsumura : "Measurements of complex permittivities in 100GHz band by the Whispering-gallery mode resonator method", *IEICE Trans.*, Vol.J84-C, No.8, pp.703-706 (2001)
- <誘電体円柱材料の評価方法>
- (Hakki-Coleman 法)
- (26) B. W. Hakki and, P. D. Coleman : "A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range", *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-8, pp.402-410 (1960)
- (27) W. E. Courtney : "Analysis and evaluation of a method of measuring the complex permittivity and permeability of microwave insulators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-18, pp.476-485 (1970)
- (2 誘電体円柱共振器法)
- (28) Y. Kobayashi and M. Katoh : "Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-33, No.7, pp.586-592 (1985)
- (29) 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 (1994)
- (30) JIS R 1627 (1996) : Testing method for dielectric properties of fine ceramics at microwave frequency
- (31) IEC 61338-1-3 (1999) : Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency
- (1 誘電体円柱共振器法)
- (32) D. Xu and Z. 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 (1985)
- (33) Y. Kobayashi and H. Yoshikawa : "Microwave measurements of surface impedance of high- T_c superconductors using two modes in a dielectric rod resonator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.46, No.12, pp.2524-2530 (1998)
- (NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法)
- (34) T. Yoneyama and S. Nishida : "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuit", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-29, pp.1188-1192 (1981)
- (35) 石川容平・田中裕明・西田 浩・西川敏夫 : 「NRD ガイドを用いたミリ波用誘電体共振器材料の複素誘電率測定法」, 信学技報, MW90-13, pp.31-36 (1990)
- (36) 石川容平・谷崎 透・齊藤 篤・米山 務 : 「NRD ガイドを用いたミリ波誘電体材料の複素誘電率測定」, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.J78-C-I, No.9, pp.418-429 (1995)
- (37) O. Nakayama, A. Fukuura, and M. Nishimura : "Millimeter-wave measurement of complex permittivity using dielectric rod resonator excited by NRD-guide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.51, No.1, pp.170-177 (2003)
- (TM₀₁₀ モード円筒空洞を用いた摂動法)
- (38) J. Estin and H. E. Bussy : "Errors in dielectric measurements due to a sample insertion hole in a cavity", *IRE Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-8, pp.650-653 (1960)
- (39) K. Kawabata, H. Tampo, and Y. Kobayashi : "An improved perturbation method using a TM₀₁₀ mode cylindrical cavity", *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp.1007-1010 (2002)
- (40) K. Kawabata, H. Tampo, and Y. Kobayashi : "An improvement of perturbation method for the complex permittivity measurement of liquids", *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.* (2003) <to be published>
- <高温超電導体の評価方法>
- (Hakki-Coleman 法の応用)
- (41) Z. Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, W. L. Holstein, D. W. Face, and D. J. Kountz : "High T_c superconductor- sapphire resonator with extremely high Q-values up to 90K", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.MTT-40, pp.2424-2432 (1992)
- (42) J. Krupka, M. Klinger, M. Kuhn, A. Baranyak, M. Stiller, J. Hinken, and J. Modelski : "Surface resistance measurements of HTS films by means of sapphire dielectric resonators", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, pp.3043-3048 (1993)
- (43) N. Tellmann, N. Klein, U. Dähne, A. Scholen, H. Schulz, and H. Chaloupka : "High-Q LaAlO₃ dielectric resonator shielded by YBCO-films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.4, No.3, pp.143-148 (1994)
- (44) J. Mazierska : "Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high temperature superconducting films for microwave applications", *Journal of Supercond.*, Vol. 10, pp. 73-84 (1997)
- (45) D. W. Face, F. M. Pellicone, R. J. Small, L. Bao, M. S. Warrington, and C. Wilker : "Ti₂Ba₂CaCu₂O₈ and YBa₂Cu₃O₇ films on large area MgO and sapphire substrates for high power microwave and rf applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.9, pp.2492-2495 (1999)
- (2 サファイア円柱共振器法)
- (46) Y. Kobayashi, T. Imai, and H. Kayano : "Microwave measurement of current dependence of surface impedance for high- T_c superconductor", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.39, No.9, pp.1530-1538 (1991)
- (47) H. Yoshikawa, S. Okajima, and Y. Kobayashi : "Comparison between BMT ceramic one-resonator method and sapphire two-resonator method to measure surface resistance of YBCO films", *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, pp.1083-1086 (1998)
- (48) Y. Kobayashi, H. Yoshikawa, and T. Hashimoto : "Frequency dependence of measurement precision in two dielectric resonator method for estimating surface resistance of high- T_c superconductor films", *Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.1564-1567 (2000)
- (49) IEC 61788-7 (2001) : Superconductivity -Part 7: Electronic characteristic measurements- surface resistance of superconductors at microwave frequencies
- (50) T. Hashimoto and Y. Kobayashi : "Design of sapphire rod resonators to measure the surface resistance of high temperature superconductor films", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, TH4E-6, pp.1975-1978 (2002)
- (1 サファイア円柱共振器法)
- (51) T. Hashimoto and Y. Kobayashi : "A novel technique to measure frequency dependence of surface resistance of YBCO films using some modes in a sapphire rod resonator", *32nd European Microwave Conf. Dig.*, pp.263-266 (2002)
- (52) T. Hashimoto and Y. Kobayashi : "Measurements of frequency dependence of surface resistance of HoBCO films using some modes in a sapphire rod resonator", *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, Vol.1, WE3D-1, pp.203-206 (2002)
- (53) 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 (2003)

小林 禧 夫

(正員) 1939年7月4日生。65年3月東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月埼玉大学工学部助手, 68年講師, 82年助教授を経て88年同教授。工博。誘電体共振器・フィルタ, 低損失誘電体およ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。95年第20回井上春成賞受賞。IEEE Fellow, 電子情報通信学会フェロー。