

令和 6 年 9 月 6 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04559

研究課題名（和文）100GHz帯計測システムの開発：高感度・高精度・高能率な誘電体評価

研究課題名（英文）Development of a 100GHz band measurement system: High sensitivity, high accuracy and high efficiency dielectric evaluation

研究代表者

清水 隆志 (Shimizu, Takashi)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：80500397

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、次世代通信技術で検討されている75-110 GHz帯における高度な電子デバイス開発の根幹を成す要素技術の一つである100 GHz帯誘電体材料評価技術を実現することが目的である。新たに開発した100 GHz帯TM₀m₀モード空洞共振器を用いて、熱可塑性樹脂丸棒の複素誘電率評価を行い、その誘電特性を明らかにするとともに、拡充し続けてきた複素誘電率データベースと本結果を比較することで、本評価技術の有効性を実証した。なお、測定精度は、比誘電率に関して±3%程度、誘電正接に対して±5%程度である。本技術の開発により、次世代通信技術に適用可能な各種誘電体材料の開発の加速が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会インフラとしてのマイクロ波帯利用が急速に拡大しており、最近ではミリ波帯が注目されている。通信分野では数GHzや24～86 GHz帯、センシング分野では79 GHz帯の利用が進んでいる。こうした産業応用に対して、学術的には30～75 GHzにおける電子デバイス用材料評価技術や設計・開発技術が出揃ってきた。本研究成果は、今後ますますの利用が期待される75～110 GHz帯における高精度なミリ波回路設計に対応した材料評価技術を提供する。この技術は特に、日本が優位性を持つ材料開発に有用であり、産業化の基盤となることから、その社会的意義は非常に大きいといえる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to realize the dielectric material evaluation technology for the 100 GHz band, which is a fundamental element technology for the development of advanced electronic devices in the 75-110 GHz band, considered for next-generation communication technologies.

Using the newly developed 100 GHz band TM₀m₀ mode cavity resonator, the complex permittivity of thermoplastic resin rods was evaluated, revealing their dielectric properties. By comparing these results with the continuously expanded complex permittivity database, the effectiveness of this evaluation technology was verified. The measurement accuracy has approximately ±3% for the relative permittivity and ±5% for the loss tangent, respectively. This technology will be expected to accelerate the development of various dielectric materials applicable to next-generation communication technologies.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：材料計測 誘電体 複素誘電率 空洞共振器 ミリ波

1. 研究開始当初の背景

社会インフラとしてのマイクロ波帯利用が急速に拡大しており、最近ではミリ波帯が着目されている。第5世代移動通信システムでは、数 GHz、24~86 GHz 帯が国際的な対象とされた。さらに、次世代移動通信システムでは、より高い周波数帯の検討が始まっている。また、衝突防止センサとして 79 GHz 帯自動車レーダが実用化され、先進運転支援システムや自動運転システム搭載車の実現には、より多くの周波数帯の活用がキーとなる。このような産業界の動向に対して、学術的には 30 ~ 75 GHz における電子デバイス用材料評価技術や設計・開発技術が出揃ってきた。

今後は、より高い周波数帯である 75 ~ 110 GHz における、産業化の礎となる、高精度なミリ波回路設計に対応した材料評価、とりわけ日本が優位性を有する材料開発分野において、この帯域における誘電体材料の複素誘電率評価技術が求められている。

2. 研究の目的

周波数に寸法諸元が影響を受けることなく製作できる、学術的に未踏な 100 GHz 帯での高感度・高精度な計測を実現する、空洞共振器を開発することを目的とする。さらに、開発した共振器を用いた 100 GHz 帯計測システムを実現することを目的とする。

具体的には、以下の開発仕様を目標とする。

- 空洞共振器：直径 3 mm、高さ 6 mm、試料挿入孔 1~2 mm (容易な試料交換性)、100 GHz での性能指数 Q 値 ≥ 4000
- 複素誘電率計測精度：比誘電率 $\epsilon_r \leq 10$ の材料において、誘電正接 $\tan\delta \leq 0.01$ 、(不確かさ、分解能) は ($\Delta\epsilon_r \leq 5\%$, 0.01), ($\Delta\tan\delta \leq 30\%$, 0.0001)

3. 研究の方法

(1) 100 GHz 帯誘電体試料評価用空洞共振器の開発

正確な複素誘電率を得るため、高周波の電界成分が適切に試料へ印加されるよう、共振電磁界モードとして、 TM_{0m0} モードを選択し、試料は丸棒形状とする。さらに、 TM_{0m0} モードを利用することで、複数周波数での測定が可能となり、より高い周波数帯での測定も行える。さらに、高周波電流の経路を分断せずに、試料交換が容易な構造の共振器を高度な有限要素法に基づくシミュレーションにより見出す。また、共振器は金属部品の組立構造体であるため、固定ねじによる組立では、軸方向に僅かな空隙が生じ、高周波電流の経路を分断することが従来から課題であった。その対策手段として、熱拡散接合のような新規な接合手法を導入し、開発仕様を満足する空洞共振器を開発する。

(2) 100 GHz 帯計測システムの実現

高能率かつ高精度な 100 GHz 帯複素誘電率計測システムを開発する。複素誘電率の計算手法として Ritz-Galerkin 法とモード整合法をベースとした厳密な電磁界解析結果を利用することで測定精度の高精度化を目指す。並行して、計測システムを構築し、遮断円筒導波管法ならびに円筒空洞共振器法による測定結果を通じて、有効性の検証を行い、学術的に未踏な 100 GHz 帯高感度・高精度な誘電体丸棒材料の複素誘電率計測システムを実現する。

4. 研究成果

(1) 100 GHz 帯誘電体試料評価用空洞共振器の開発

(a) 径方向分割 50 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器

まず、100 GHz 帯よりも試作が容易な 50 GHz 帯において、径方向分割 TM_{0m0} モード空洞共振器の検討を行った。

従来、 TM_{0m0} モード空洞共振器の製造時に一般的に用いられてきた構造は、軸方向における分割構造である。軸方向分割の場合、共振器導体内壁を流れる高周波電流を分断することになるため、 Q 値の大幅な劣化が生じやすい。このため、分割して各部品を製作後、熱拡散接合による一体化が行われる。この手法を採用することで、ミリ波帯においても高い Q 値が得られるが、誘電体丸棒測定用共振器としての取り扱いが困難となる。径方向における分割構造では、導体内壁を流れる高周波電流を分断しないため、 Q 値の劣化が少ないことが期待できる。さらに、誘電体丸棒試料を挟みこむように装荷出来るため、試料破損や試料が内部に残る恐れが無く、効率的な測定が期待できる。

3次元電磁界シミュレータにより計算した分割時の空隙 gap による共振周波数および無負荷 Q への影響を図 1 に示す。軸方向分割の場合、10 μm までの空隙は、共振周波数にほとんど影響を及ぼさない。しかし、僅かでも空隙が生じた場合、大幅な Q 値の劣化が生じることがわかる。一方、径方向分割では、5 μm 以上の空隙が生じると、共振周波数に及ぼす影響が、軸方向分割よりも大きくなるのが分かる。一方、無負荷 Q 値は、10 μm 程度の空隙が生じて、その影響がほとんど無いことがわかる。

無酸素銅を用いて、径方向分割 50 GHz 帯 TM_{010} モード空洞共振器を 5 つ作製した。作製した共振器の分割時の写真を図 2 に示す。試料挿入孔 2 個、円筒導体部 1 個が熱拡散接合により、凹型構造部品として作成されている。この部品 2 点の凹んだ部分を向かい合わせに位置合せ用ピンにより組合せることで、共振器を構成する。また、試料挿入部に丸棒試料を挟みこんで共振器を構成することで、複素誘電率測定が可能となる。なお、共振器の励振・検波は、磁界結合により、径方向両端に固定された微調整機構付先端微小ループ同軸励振線により行う。また、測定系との接続部には、1mm Female 同軸コネクタを採用している。

試作した共振器を温度 25 °C、湿度 50% の高精度恒温恒湿環境室内にて、ネットワークアナライザ HP8510C を用いて評価した。50 GHz 帯共振器の周波数応答の測定結果を図 3 に示す。また、共振特性から算出した共振器パラメータを直径 D_{20} 、高さ H_{20} 、比導電率 σ_{r20} は設計通りの共振特性が得られており、従来の軸方向分割 50GHz 帯共振器と同程度以上の性能を有することを確認した。

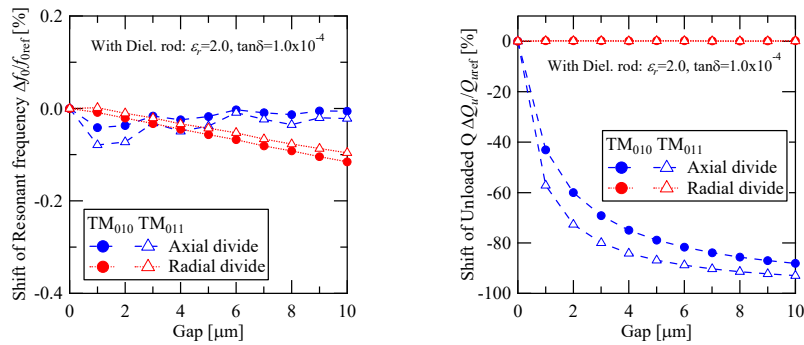


図 1 空隙が及ぼす影響の計算結果(誘電体丸棒装荷)

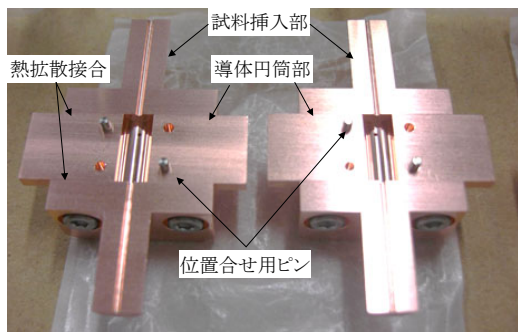


図 2 試作した共振器の写真

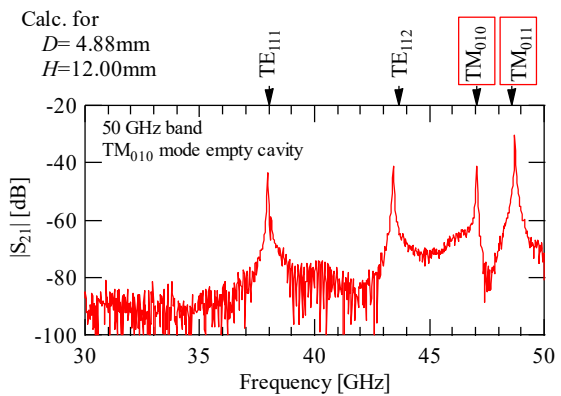


図 3 試作した共振器 No.3 の周波数応答

(b) 軸方向分割 100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器

径方向分割 50 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器の有効性が確認できたため、100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器の開発を行った。当初、径方向分割によるアプローチを進める予定であったが、径方向分割 50 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器を用いた実験的検討を進めたところ、共振器励振部ネジ構造に機械的脆弱性があることが判明した。そこで、その改善を施したところ、分割共振器自体に歪みが生じ、製作当初には生じていなかった隙間が想定以上に生じ、性能指数 Q 値が半減する事態が生じた。そこで、100 GHz 帯誘電体材料評価システムの構築を優先し、機械的構造に実績がある軸方向分割を採用した 100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器による測定システムの実現に目標を変更した。

100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器の各部設計値は、スケール則に従い、直径 $D = 2.44$ mm、高さ $H = 6.00$ mm、試料挿入孔の直径 $d_1 = 1.00$ mm、高さ $g = 20.0$ mm とした。また、切削加工精度および使用可能な同軸線路径を考慮し、励振線挿入孔の直径 $d_{ex} = 0.6$ mm とした。

軸方向分割共振器の場合、切削加工の工程上、各部を分割して製作する必要がある。この分割構造は、高周波電流を横切って、僅かな空隙が生じうるため、 Q 値の大幅な劣化が懸念される。そこで、3次元電磁界シミュレータを用いて、空隙が 100 GHz 帯共振器の共振特性に及ぼす影響について、あらためて検討した。その結果、空隙の増加により共振周波数はわずかに上昇する傾向がある。一方、無負荷 Q は $1 \mu\text{m}$ 程度の僅かな空隙が生じただけでも大きく劣化することを確認した。したがって、熱拡散接合による各部の機械的密着が必要であることが判明した。

以上の設計に結果に基づいて、100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器を無酸素銅により 3 個作製した。作製した共振器の写真を図 4 に示す。円筒導体部を上下に配置した試料挿入孔部で挟み

込み、ネジ止め+熱拡散接合により各部を密着して、共振器を構成している。また、外形は共振器の位置合せや扱いやすさを重視して、角型とした。なお、共振器の励振・検波は、磁界結合により、径方向両端に固定された微調整機構付先端微小ループ同軸励振線により行う。また、測定系との接続部には、1 mm Female 同軸コネクタを採用した。なお、丸棒誘電体の複素誘電率測定時には、試料挿入孔部に設けた直径 $d_1 = 1$ mm の穴より試料を挿入する。

ネットワークアナライザ HP8757D により、温度 25 °C、湿度 50% に設定した高精度恒温恒湿環境室内にて、試作した 100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器を評価した。100 GHz 帯共振器 No.2 の周波数応答の測定結果、共振特性から算出した共振器パラメータを直径 D_{20} 、高さ H_{20} 、比導電率 σ_{20} の測定結果を図 5, 6 にそれぞれ示す。いずれの共振器も熱拡散接合前では、 Q 値が低く、実効比導電率もまた低い値である。一方、接合後は Q 値が上昇し、実効比導電率も上昇しており、熱拡散接合の有効性を確認した。特に、共振器 No.3 は、無負荷 Q 値 4000 以上、比導電率 80% 以上の目標値を達成しており、低損失材料評価用として、十分な特性を有する丸棒誘電体試料評価用 100 GHz 帯 TM_{0m0} モード空洞共振器を実現したといえる。

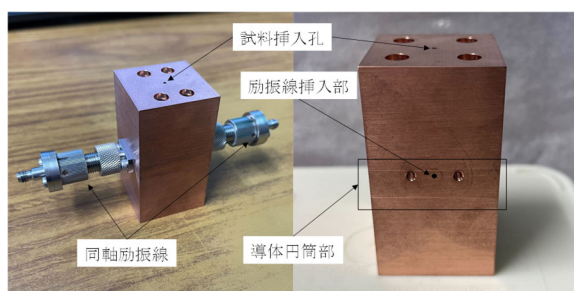


図 4 試作した 100GHz 帯共振器の写真

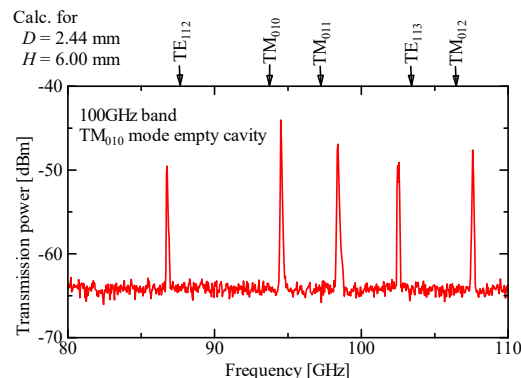


図 5 試作した共振器の周波数応答

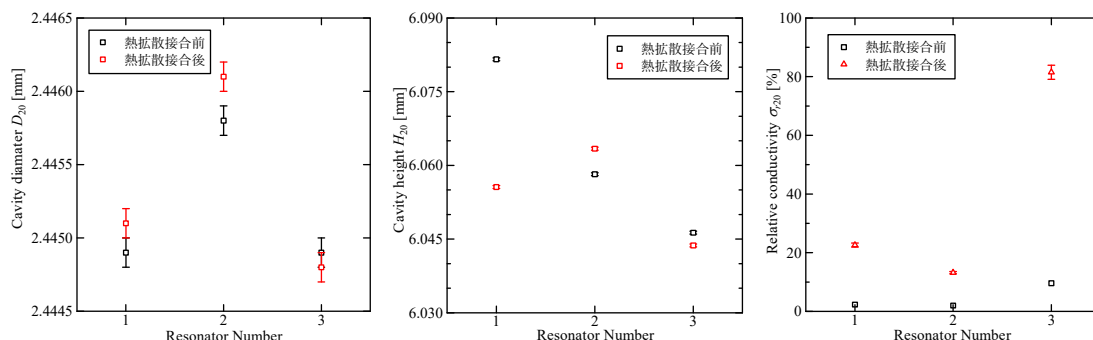


図 6 熱拡散接合前後の測定結果の比較

(2) 100 GHz 帯計測システムの実現

開発した 100 GHz 帯 TM_{010} モード空洞共振器を用いて、100 GHz 帯誘電体材料評価システムの構築およびその有効性の検証を行う。

直径 d_1 の丸棒誘電体を挿入した試料挿入孔の直径 d_2 、高さ g 、直径 D 、高さ H 、比導電率 σ_r を有する TM_{010} モード空洞共振器の断面図を図 7 に示す。誘電体丸棒試料の比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan \delta$ は、 TM_{010} モードの共振周波数 f_0 と無負荷 Q 値 Q_u より、次式で求まる。

$$\det X(\epsilon_r : f_0, d_1, d_2, g, D, H, N, M) = 0 \quad (1)$$

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

ただし、行列数 N 、展開項数 M は、計算値が十分に収束する 200 とする。また、定数 A, B は式 (1) より求まる値であり、導体の表面抵抗 $R_s = \sqrt{\pi f_0 \mu_0 / \sigma_0 \sigma_r}$ 、万国標準軟銅の導電率 $\sigma_0 = 58 \times 10^6$ S/m、真空の透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m である。

また、本測定法における比誘電率 ϵ_r および誘電正接 $\tan \delta$ の合成標準不確かさ $u_c(\epsilon_r)$ 、 $u_c(\tan \delta)$ は、次式で求められる。

$$u_c^2(\epsilon_r) = \sum_{i=1}^6 \left\{ \frac{\partial \epsilon_r}{\partial x_i} u(x_i) \right\}^2 \quad u_c^2(\tan \delta) = \sum_{j=1}^9 \left\{ \frac{\partial \tan \delta}{\partial y_j} u(y_j) \right\}^2$$

ここで、 $u(x_i)$ と $u(y_j)$ は要素 x_i, y_j の標準不確かさである。 x_i ($i : 1, 2, \dots, 6$) は f_0, d_1, D, H, d_2, g であ

り、 y_j ($j: 1, 2, \dots, 9$)は $f_0, d_1, D, H, d_2, g, Q_u, \sigma_r, \varepsilon_r$ である。これらの $f_0, d_1, D, H, g, Q_u, \sigma_r$ の不確かさはAタイプ評価、 d_2 の不確かさはBタイプ評価を用いる。 $|\partial \varepsilon_r / \partial x_i|, |\partial \tan \delta / \partial y_j|$ は要素 x_i, y_j の感度係数であり、式(1), (2)を用いて求める。

図8に、スカラーネットワークアナライザ HP8757D、周波数掃引器 83620A、増幅器 8349B、通倍器 83558A、検波器 85025C、測定用ソフトウェアおよび100 GHz帯共振器により構成した100 GHz帯誘電体材料評価システムを示す。なお、この評価システムは、温度25°C、湿度50%の高精度恒温恒湿環境室内に配置している。共振特性 f_0, Q_u は、共振波形に生じる測定機器のノイズの影響を最小限にするために、最小二乗法によるフィッティングを用いた手法で取得する。測定1回毎にサンプルを取り出し、再挿入を5回繰り返し、平均値と拡張不確かさを求めている。

本システムにより、3種各4本の熱可塑性樹脂細丸棒サンプル(3Dプリンタ用フィラメント Z-PCABS, Z-ULTRAT, Z-HIPS)の複素誘電率測定を行う。比較として、50 GHz帯 TM_{010} モード共振器により、同サンプルを測定した。一例として、Z-PCABSの複素誘電率の測定結果を図9に示す。また、図中のAve.は、サンプルNo.1~4の平均値とその不確かさを示している。比誘電率に関する100 GHz帯共振器と50 GHz帯共振器の測定結果は、不確かさの範囲内で一致した。一方、誘電正接は測定周波数の増加に伴い、わずかに増加する傾向が見られ、周波数依存性などの要因が考えられる。なお、本評価技術の測定精度は、比誘電率に関して±3%程度、誘電正接に対して±5%程度である。

以上の結果より、開発した100 GHz帯 TM_{010} モード空洞共振器および構築した100 GHz帯誘電体材料評価システムは細丸棒誘電体の複素誘電率測定に有効であることを実証した。

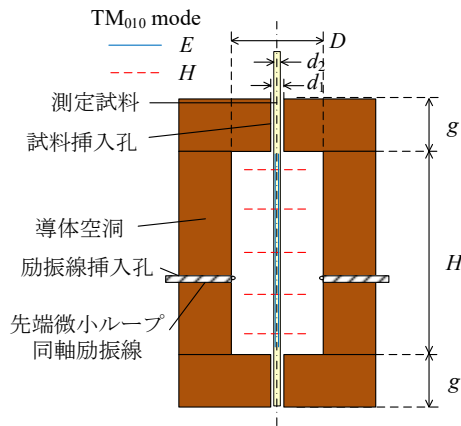


図7 測定システム



図8 測定システム

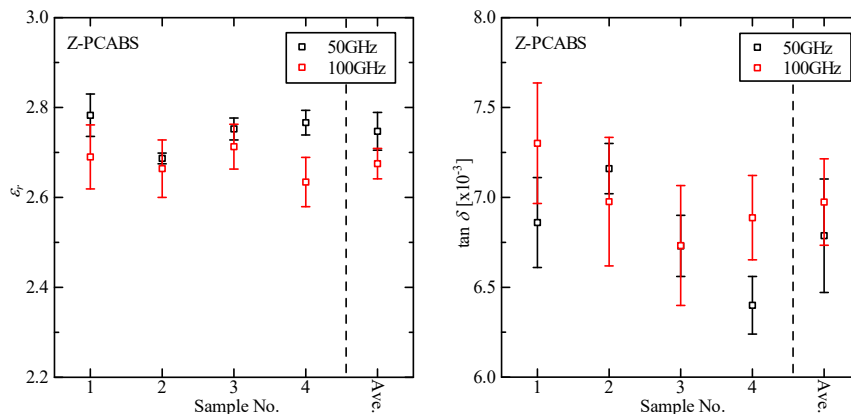


図9 熱可塑性樹脂 Z-PCABS の複素誘電率の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高橋駿平, 清水隆志	4. 巻 268
2. 論文標題 丸棒誘電体評価用100 GHz帯TM010モード空洞共振器の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 33 - 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋駿平, 清水隆志	4. 巻 396
2. 論文標題 100 GHz帯TM010モード空洞共振器を用いた細丸棒誘電体の複素誘電率測定に関する検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 95 - 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長谷修治, 清水隆志	4. 巻 115
2. 論文標題 円筒空洞共振器法によるミリ波複素誘電率の湿度依存性評価に関する実験的検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 214 - 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂田凌, 清水隆志	4. 巻 EDD23
2. 論文標題 ミリ波円筒空洞共振器を用いた高周波誘電体基板の複素誘電率の周波数依存性測定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Masayuki Kobayashi, Yoshinori Kogami	4. 巻 142
2. 論文標題 Frequency Dependence Evaluation of Complex Permittivity using Multiple Samples by the Cut-off Circular Waveguide Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 855-856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieej.iss.142.855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Yoshinori Kogami	4. 巻 1
2. 論文標題 Frequency Dependence Measurements of Complex Permittivity for YSZ Crystal Plates by the Cut-Off Circular Waveguide Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 139-141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/APMC55665.2022.9999977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水隆志	4. 巻 313
2. 論文標題 径方向で分割した丸棒誘電体評価用50GHz帯TM010モード空洞共振器の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 60-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋駿平, 清水隆志	4. 巻 1
2. 論文標題 3Dプリンタ用熱可塑性丸棒のミリ波複素誘電率および不確かさ評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会, 電子デバイス研究発表会資料	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石崎旭, 長谷修治, 清水隆志	4. 巻 411
2. 論文標題 複合誘電体基板を構成する誘電体材料のミリ波複素誘電率の抽出手法の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 114~117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Hayashi, Yoshinori Kogami, Takashi Shimizu	4. 巻 142
2. 論文標題 High Efficiency Complex Permittivity Measurement of a Dielectric Rod Using a 50 GHz Band TM ₀₁₀ Mode Cavity Resonator with a Small Sample Insertion Hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 40 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Masaya Kokufuda, Yusaku Hirano, Yoshinori Kogami	4. 巻 141
2. 論文標題 Effective Conductivity Measurements for Additive Manufacturing Technology Conductor using Two Dielectric Rod Resonator Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 915 ~ 916
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.915	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Kouhei Takahagi, Kazuaki Ebisawa, Yoshinori Kogami	4. 巻 1
2. 論文標題 Complex Permittivity and Uncertainty Evaluations for an Ultrathin Photosensitive Insulator Film Using a Millimeter Wave Circular Cavity Resonator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 461 ~ 463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APMC52720.2021.9661632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Takuya Hayashi, Yoshinori Kogami	4. 巻 1
2. 論文標題 Complex Permittivity Measurement for Thin Dielectric Rods with High Permittivity Using a 50 GHz Band TM ₀₁₀ Mode Cavity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 464 ~ 466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APMC52720.2021.9661810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森田雄介, 清水隆志	4. 巻 254
2. 論文標題 3Dプリンタ製2.4GHz帯空洞共振器を用いた誘電体平板の複素誘電率測定に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 52 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 林拓矢, 清水隆志	4. 巻 1
2. 論文標題 大口径試料挿入孔を持つ50GHz帯TM ₀₁₀ モード空洞共振器を用いた高誘電率丸棒材料の複素誘電率測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会, 電子デバイス研究発表会資料	6. 最初と最後の頁 9 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 林拓矢, 清水隆志	4. 巻 400
2. 論文標題 試料挿入孔径の異なるTM ₀₁₀ モード空洞共振器を用いた高周波向け熱可塑性樹脂のミリ波複素誘電率測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 146 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長谷修治, 清水隆志	4. 巻 400
2. 論文標題 36GHz帯空洞共振器を用いた複素誘電率の湿度依存性評価手法の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 152 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Kohei Takahagi, Yoshinori Kogami	4. 巻 141
2. 論文標題 Study on Thermoplastic Resin Plates Outputted by a FDM Type 3D Printer Using a High Precision Complex Permittivity Measurement Method in Millimeter Wave Region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 105 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinori Kogami, Kazufumi Igarashi, Takashi Shimizu	4. 巻 140
2. 論文標題 Measurement of Complex Permittivity of a Dielectric Thin Film by the Cylindrical Cavity Resonator Having Sliding End Plates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 492 ~ 495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.140.492	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水隆志, 小林正幸, 古神義則	4. 巻 1
2. 論文標題 36GHz帯共振器を用いた複素誘電率の周波数依存性測定の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会, 電子デバイス研究発表会資料	6. 最初と最後の頁 21-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 林拓矢, 古神義則, 清水隆志	4. 巻 1
2. 論文標題 径試料挿入孔を有する50GHz帯TM010モード共振器を用いた高効率測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会, 電子デバイス研究発表会資料	6. 最初と最後の頁 13-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木村泰希, 古神義則, 清水隆志	4. 巻 20
2. 論文標題 円筒空洞共振器法を用いた薄型誘電体フィルムの高能率温度依存性評価に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告書	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Shimizu, Yoshinori Kogami	4. 巻 1
2. 論文標題 Millimeter wave measurements of low loss dielectric materials for 5G/6G era smart mobility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ, Technical Meeting on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 長谷修治, 清水隆志
2. 発表標題 環境湿度がミリ波空洞共振器評価に及ぼす影響の検討
3. 学会等名 2023電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水隆志
2. 発表標題 次世代電磁波応用を切り拓く低損失誘電体材料の複素誘電率評価技術
3. 学会等名 MWE 2023 Microwave Workshop (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Sakata, Takashi Shimizu
2. 発表標題 Complex permittivity measurements of high-frequency substrates using a 60 GHz band circular empty cavity
3. 学会等名 Thailand-Japan Microwave 2023 TJMW2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水隆志, 長谷修治
2. 発表標題 ミリ波複素誘電率の連続的な湿度依存性評価手法に関する検討
3. 学会等名 2024電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shuji Nagaya, Takashi Shimizu
2. 発表標題 Humidity dependence measurements of complex permittivity for polyimide and PTFE sheet in a 36 GHz band
3. 学会等名 3rd Thailand-Japan Microwave Student Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunpei Takahashi, Takashi Shimizu
2. 発表標題 Complex permittivity evaluation of thermoplastic filaments for an FDM type 3D printer in the 50 GHz band
3. 学会等名 3rd Thailand-Japan Microwave Student Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水隆志, 森田雄介, 崎谷淳也
2. 発表標題 ユビキタスな誘電体材料評価システムの実現に向けた基礎検討
3. 学会等名 気学会「ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術」/「ユビキタスワークを推進する通信技術」調査専門委員会 合同報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水隆志
2. 発表標題 マイクロ波材料評価におけるユビキタスな研究教育の実践的検討
3. 学会等名 気学会「ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術」/「ユビキタスワークを推進する通信技術」調査専門委員会 合同報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水隆志
2. 発表標題 低コストVNAの測定精度に関する調査
3. 学会等名 気学会「ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術」/「ユビキタスワークを推進する通信技術」調査専門委員会 合同報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林拓矢, 清水隆志
2. 発表標題 小径誘電体用TM010モード空洞共振器を用いた複素誘電率の高効率測定
3. 学会等名 第2回 宇都宮大学コラボレーション・フェア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷修治, 清水隆志
2. 発表標題 36GHz帯空洞共振器を用いたポリイミドフィルムの湿度依存性測定
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会 第27回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水隆志, 森田雄介, 林拓矢
2. 発表標題 ICTイノベーションを支援する高周波材料評価技術の最新動向
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Shimizu, Yoshinori Kogami
2. 発表標題 Complex Permittivity Measurement Technique for a 3D Printed Rectangular Dielectric Rod using an NRD Guides at 60-GHz Band
3. 学会等名 ARFTG Microwave Measurement Conf (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水隆志
2. 発表標題 5G/6G世代向け低損失誘電体材料の評価技術とその応用
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Hayashi, Yoshinori Kogami, Takashi Shimizu
2. 発表標題 Study on effective insertion procedure of a thin dielectric rod for a 50GHz band complex permittivity measurement
3. 学会等名 IEICE, Thailand-Japan Microwave Student Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村泰希, 古神義則, 清水隆志,
2. 発表標題 薄型フィルムの36GHz帯温度依存性の高能率評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Hayashi, Yoshinori Kogami, Takashi Shimizu
2. 発表標題 Study on 50GHz band measurement method of a thin dielectric rod with high ϵ_r for an FDM type 3D printer
3. 学会等名 IEEJ, Joint Indo-Japanese Smart City Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kogami Lab. & Shimizu Lab.
<http://mmw.ee.utsunomiya-u.ac.jp/>
研究成果 Shimizu's Web Site
<http://mmw.ee.utsunomiya-u.ac.jp/~shimizu/category/research/paper-list/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------