

# 高速無線通信の拡大をけん引する サブテラヘルツ帯材料計測技術

加藤悠人 Yuto Kato 産業技術総合研究所

## 1 はじめに

近年、高速大容量の無線通信を可能にするミリ波・サブテラヘルツ波帯電磁波の利用が急速に拡大している。次世代通信の6Gでは5G以上の高速大容量通信を実現するために100 GHz超の周波数帯の利用が見込まれる。一般に回路の伝送損は周波数が上がるほど増大する一方で、6Gでは5Gの1/100の超低消費電力性能が目指されているため<sup>(1)</sup>、低損失化に向けた先端材料開発が6G実現の鍵となっている。

一般に高周波回路では、誘電体基板の複素誘電率で決まる誘電損と、金属線路の導電率で決まる導体損、回路構造などで決まる放射損の合計で回路全体の伝送損が決まる。そのため、低損失な誘電体基板と金属線路の使用により、誘電損と導体損の両者を低減することが高周波回路の低損失化には不可欠である(図1)。特に5Gや6Gで使用されるミリ波帯では、金属線路と誘電体基板の接着性を保持するための誘電体表面の粗化による実効的な導電率の低下が問題となっている<sup>(2), (3)</sup>。そのため、回路基板材料の開発を行うに当たっては、材料の低誘電率・低誘電正接化と同時に、表面に高導電率の金属層を形成する実装プロセス技術の確立が一般に必要になり、ミリ波帯を含む広帯域での高精度な複素誘電率・導電率計測技術が強く求められている。

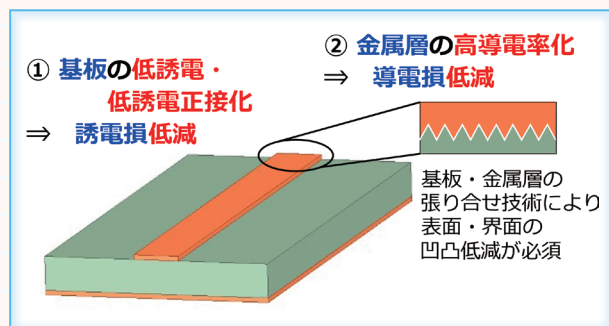


図1 高周波回路の主な損失要因

また、アンテナ、メタサーフェスや回路などの高周波デバイスの設計においても高精度な材料評価技術が求められる。基板材料の誘電率などの材料物性値は、設計やシミュレーションに必須のパラメータであるが、一般に周波数依存性を持つため、デバイスの動作周波数での値を把握し、その値に基づく設計が求められる。

本稿では、100 GHz超の周波数帯まで適用可能なサブテラヘルツ帯材料計測技術について述べる。一般に、高周波帯の材料計測技術としては反射伝送法と共振器法があるが、低損失の基板材料には共振器法が用いられる。共振器法の概論を述べた後に、ミリ波帯を含む超広帯域での複素誘電率計測が可能な平衡円板共振器法について説明し、最後に同方法の導電率計測への展開について述べる。

## 2 共振器法の概要と 高周波化の課題

高周波の材料評価技術には様々な方法が提案されており、各方法は周波数帯や測定する材料の特性に応じて使い分けられる(図2)<sup>(4)</sup>。このうち、高損失材料の複素誘電率評価には反射伝送法が利用されるのに対し、低損失材料の複素誘電率を高感度・高精度に計測する方法としては共振器法が利用される。共振器法では、材料が封入された共振器に特定の電磁界モードを励振させ、その共振周波数と無負荷Q値を評価することで材料の複素誘電率を測定する。

多くの共振器法では基本モードを利用した測定に制限されており、基本的には一つの共振器で単一周波数の測定しか行えない。このような方法では、測定周波数を高周波化するには周波数と反比例した共振器の小形化が必要となり、共振器や誘電体材料の加工精度の問題からおよそ80 GHz超での適用は困難である。共振器の高次モードを利用して複数周波数で測定するためには、

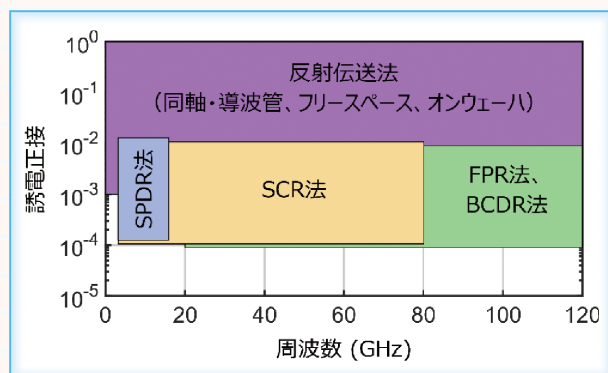


図2 代表的な複素誘電率の測定方法とその適用範囲。文献(4)を元に作成。

SPDR: split post dielectric resonator

SCR: split cylinder resonator

FPR: Fabry-Perot resonator

BCDR: balanced-type circular disk resonator

モードの同定やモード間の干渉による波形ひずみの問題を回避するために、材料評価に利用しない不要モードの抑制が必須となる。

特定の共振モードを選択的に励振させることで、複数周波数かつ広帯域での材料評価を実現し、サブテラヘルツ波帯での適用も可能な方法として、平衡円板共振器法(balanced-type circular disk resonator (BCDR)法)<sup>(5)~(9)</sup>やファブリペロー共振器法(Fabry-Perot resonator (FPR)法)<sup>(10), (11)</sup>がある。このうち、筆者らは平衡円板共振器法に基づく誘電率・導電率計測技術の研究開発を進めており、次章以降ではその取組みを紹介する。

### 3 平衡円板共振器法による複素誘電率計測技術

平衡円板共振器の写真と模式図を図3に示す。この方法では、誘電体サンプルとして、同一の厚さ $t$ と比誘電率 $\epsilon_r$ 、誘電正接 $\tan\delta$ を持つ誘電体シートを2枚用意する。2枚のシートサンプルの間に厚さ $t_c=0.06$  mm、直径 $D$ の銅はく円板を挟み、これらを合わせて2枚の銅板で挟む。シートサンプルで構成された誘電体共振器に対し、銅板の中央に位置する上下の励振孔から同軸線路で励振し、透過を検出する。シートサンプル間に挟まれた銅はく円板の中心と励振孔の中心のアラインメントが確保されたとすると、構造の対称性から、特定の $TM_{0m0}$ モードのみが選択的に励振され、ほかの不要モードは十分に抑制される。したがって、不要モードの影響を受けることなく、高次モードを含めて $TM_{0m0}$ モードの励振を複素誘電率計測に利用でき、各共振周波数と無負荷 $Q$ 値の測定値から、その周波数における材料の複素誘電率を決定できる。複素誘電率の計算において

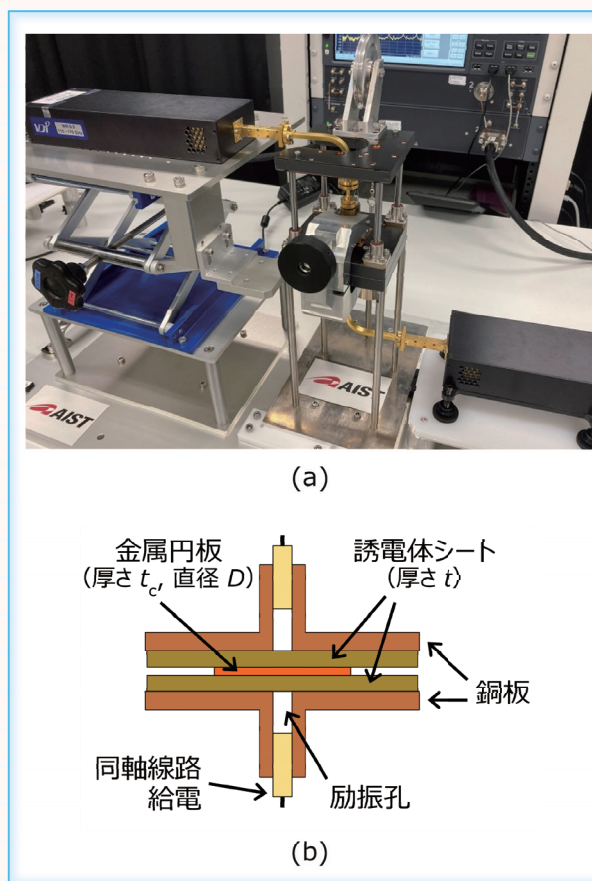


図3 平衡型円板共振器 (a) 写真 (b) 模式図

は、励振孔まで厳密に考慮されたMode-matching法による電磁界解析が利用される<sup>(6), (7), (9)</sup>。なお、この方法では $TM$ モードを利用するため、電界の向きはシート材料に垂直であり、面直方向の複素誘電率が測定される。

平衡円板共振器の特徴は2点ある。一つは、 $TM_{0m0}$ モードの選択的励振と励振孔まで考慮した厳密な電磁界解析の確立により、単一の共振器で10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での複素誘電率計測が可能な点である。もう一つは、測定周波数の可変性である。使用する銅はく円板の直径を変えることで、同一の誘電体サンプルに対して異なる周波数における測定が可能であり、円板径の調整により特定の周波数に合わせた測定を実現できる。これらのことから、単一の平衡円板共振器と径を変えた複数の銅はく円板を組み合わせれば、低損失の誘電体シートに対するほぼ任意の周波数での超広帯域な複素誘電率計測を実施できると言える。

測定周波数の可変性を示す一例として、 $D=9, 12, 15, 18, 21$  mmの銅はく円板から成る平衡円板共振器を用いて、 $t=0.254$  mmのシクロオレフィンポリマー(cyclic olefin polymer (COP))を評価した結果を図4に示す<sup>(12)</sup>。図4(a)の共振波形が示すとおり、共振周波数の位置は円板径に応じてシフトしており、円板径を変えると異なる周波数での材料評価が実現される。

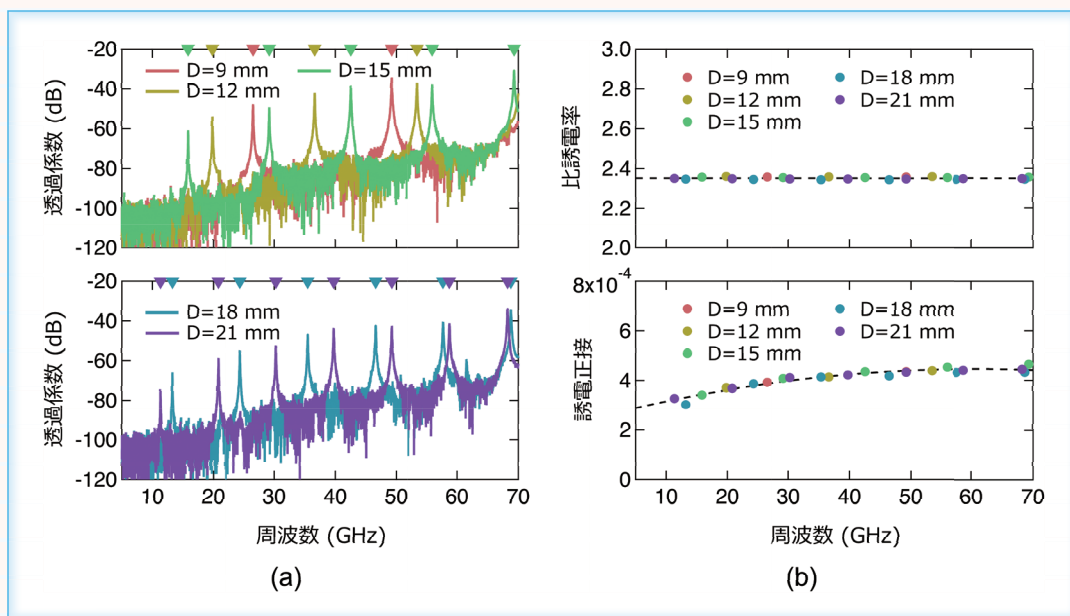


図4 径の異なる銅はく円板を用いた平衡円板共振器でシクロオレフィンポリマー (COP) を評価した結果。  
(a) 共振波形. (b) 比誘電率と誘電正接. 点線は二次のフィッティング曲線を表す.

また, 図4 (b) のとおり, 異なる円板径に対応する比誘電率と誘電正接の測定結果は互いに整合していることが確認できる.

平衡円板共振器法の測定可能な上限周波数は, ①同軸励振線のカットオフ周波数, ②誘電体シートからの電磁波放射のカットオフ周波数の二つの要因で決まる. ①について, 従来型の平衡円板共振器に用いられる 1 mm 同軸励振線では, 同軸エアライン線路のカットオフ周波数は約 130 GHz となる. そのため, 1 mm 同軸励振の平衡円板共振器ではこれより高い周波数での材料評価を行えない. 一方で②については, カットオフ周波数は次式で与えられる<sup>(7)</sup>.

$$f_c^{\text{rad}} = \frac{c}{4(t + t_c/2)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで,  $c$  は光速である. 誘電体シートの厚さが薄いほど, また比誘電率が低いほど, 放射のカットオフ周波数は高周波化し, 例えば,  $t=0.2$  mm,  $\epsilon_r=2$  ではカットオフ周波数は 230 GHz に達する. したがって, 低誘電率の薄膜シートサンプルに対しては, ①が平衡円板共振器法の上限周波数を決定する.

同軸励振線のカットオフ周波数は同軸線路を細くすれば高周波化できることから, 筆者らは 0.6 mm 同軸線路を給電部に用いた平衡円板共振器を開発し (図3 (a)), 最大 170 GHz までの材料評価を実証した<sup>(9)</sup>. 開発した共振器では, 同軸-導波管変換を励振構造内部に実装することで, 極細の 0.6 mm 同軸を接続のインタフェースとせずに, D バンド導波管 (WR-6.5) をインタフェースに使用している. 測定周波数は導波管バンドの 110 GHz から 170 GHz に制限されるものの, 共振

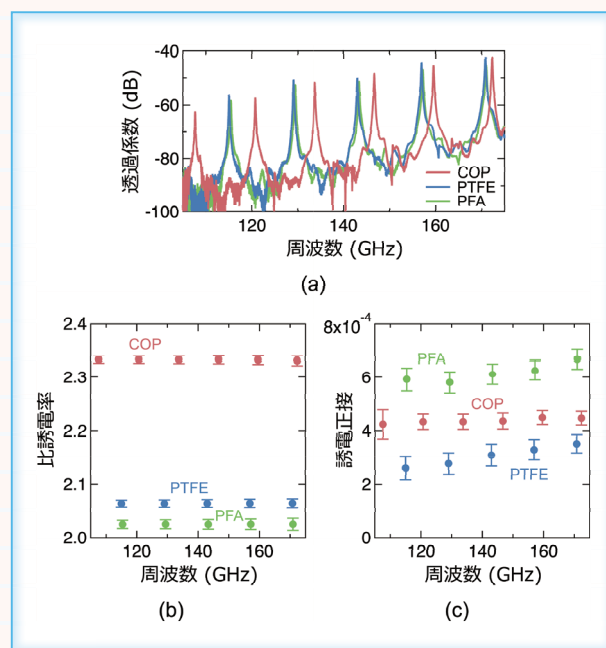


図5 WR-6.5 導波管インタフェース平衡円板共振器による COP, PTFE, PFA の D バンド複素誘電率計測結果.

(a) 共振波形. (b) 比誘電率. (c) 誘電正接.

器の堅ろう性の確保を優先した提案である. 同様のアプローチで, 最大 330 GHz までの材料評価が可能な平衡円板共振器の研究開発を現在進めている.

開発した WR-6.5 導波管インタフェースの平衡円板共振器を用いて, COP, polytetrafluoroethylene (PTFE), perfluoroalkoxy alkanes (PFA) の複素誘電率を測定した結果を図5に示す.



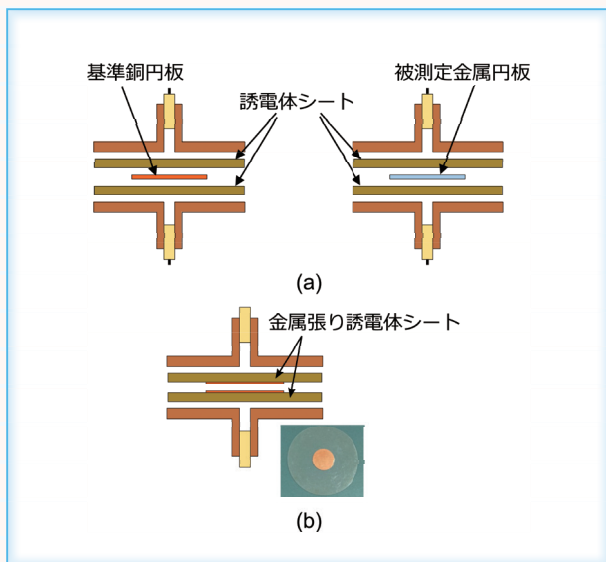


図6 平衡円板共振器法による導電率計測  
(a) 金属はくの導電率計測の構成  
(b) 金属張基板の界面導電率計測の構成

#### 4 平衡円板共振器法による導電率計測技術

金属導電率計測には低損失誘電体の誘電率計測と同じく共振器法が利用されるが、誘電率計測と同様の理由により、ミリ波・サブテラヘルツ波帯への高周波化に課題があった。従来の導電率計測では極小の誘電体柱からなる共振器が必要であり、誘電体柱のサイズで決まる単一周波数のみでの測定しかできないことから、誘電体柱や励振機構の加工精度などの制限により、6Gで利用される100 GHz超のミリ波帯で金属導電率を簡便かつ高精度に計測する技術は確立されていなかった。

筆者らは平衡円板共振器法の導電率計測への展開を進めてきた。これにより、誘電体の精密な機械加工を必要としない簡便な測定系により、10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での金属導電率計測を実現した<sup>(8)</sup>。導電率計測では、図6(a)に示すように同一の低損失誘電体シートと異種の金属円板を組み合わせた2構成の平衡円板共振器を用いる。導電率が既知の基準銅円板から成る共振器と、測定対象の金属円板から成る共振器について無負荷Q値を測定することで、被測定金属円板の導電率を決定できる。また、誘電体シートに円形金属パターンを形成することで、誘電体と金属層の間の界面導電率を評価することも可能である(図6(b))。

円板金属はくの導電率計測の一例として、高周波回路材料として使用される銅はくの導電率を測定した結果を紹介する<sup>(9)</sup>。一般に、回路基板に使用される銅はくは、アンカ効果によって誘電体基板との接着性を強化するために、片面が粗化されている。粗化処理は、銅原はくの上に金属粒子をメッキすることで行われる。ただし、

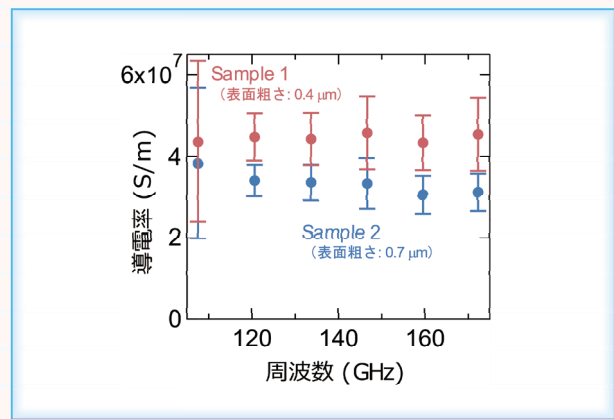


図7 表面粗さの異なる2種類の銅はくのDバンド導電率計測結果

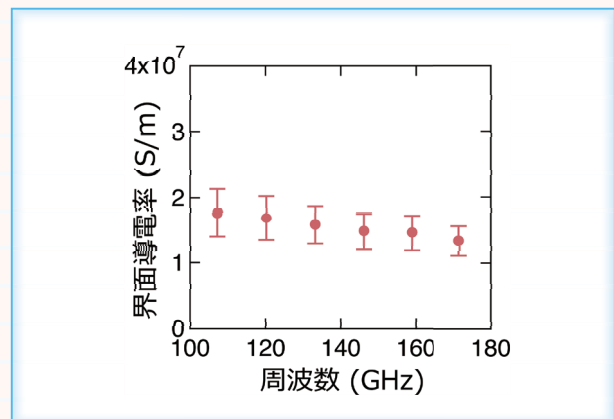


図8 銅張COP基板のDバンド界面導電率計測結果

1. で述べたとおり、特に表皮厚さがサブミクロンオーダーの6G周波数帯域では、表面粗さによって導電率が低減してしまう。この問題を回避するために、粗化粒子の組成、大きさ、形状を最適化して、高い導電率と誘電体基板への強固な接着性を両立する銅はくの開発が求められている。

粗化面の表面粗さが異なる2種類の銅はく(サンプル1,2)を用意し、粗化面の導電率を測定した。測定は図3(a)のWR-6.5導波管インタフェースの平衡円板共振器で行った。銅はくサンプル1と2の表面粗さ(10点平均粗さ)はそれぞれ0.4 μmと0.7 μmである。誘電体シートにはCOPを用いた。導電率の測定結果を図7に示す。2サンプルの表面粗さの違いを反映して、サンプル1の方が、周波数が増加しても高い導電率が維持されている。

界面導電率計測の一例として、COP基板の界面導電率計測結果を紹介する<sup>(13)</sup>。COP基板の片面に円形の銅張金属パターンが形成された評価サンプルを2枚用意し、円形パターンが互いに接触するように重ねて平衡円板共振器を構成する(図6(b))。この構成と、両面が無地のCOP基板と基準銅円板で構成された平衡円板共振器の無負荷Q値を測定・解析することで、COP基板

の金属パターンの界面導電率が測定される。WR-6.5 導波管インタフェースの平衡円板共振器を用いて行った測定の結果を図8に示す。一般に、界面導電率は周波数が増えるほど低下するが、低下の度合いは平滑性などの界面状態に依存することから、ミリ波・サブテラヘルツ波帯でも高導電率が維持される銅はく及びその実装プロセス技術が求められている。この技術開発を支える計測技術として、平衡円板共振器法による導電率計測技術の貢献が期待される。

## 5 まとめ

本稿では、ポスト5Gや6G向けの材料開発やデバイス開発を支えるミリ波・サブテラヘルツ波帯材料評価技術として、平衡円板共振器を用いた複素誘電率・導電率計測技術を紹介した。平衡円板共振器の超広帯域にわたるモード選択性を利用することで、10 GHz程度から100 GHz超にわたる超広帯域での材料評価が単一の共振器で実現される。紹介した計測技術は日本提案で国際標準化が進められており、平衡円板共振器による複素誘電率計測技術は既に2020年にIECでの国際標準化が行われた(IEC63185:2020)。また、導電率計測技術についても、IECでの標準化審議を現在進めており、更なる技術普及が期待される。

本研究の一部は、NEDO ポスト5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業/先導研究(委託)「6Gに向けたミリ波・テラヘルツ帯基地局の高度化のためのアンテナ技術の研究開発」により進められた。

### 文献

- (1) 総務省, “Beyond 5G に向けた情報通信技術戦略在り方—強靱で活力のある2030年代の社会を目指して—,” 情報通信審議会中間答申(2022年6月)。
- (2) G. Gold and K. Helmreich, “A physical surface roughness model and its applications,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 65, no. 10, pp. 3720–3732, Oct. 2017.
- (3) K. Lomakin, G. Gold, and K. Helmreich, “Analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 66, no. 6, pp. 2649–2662, June 2018.
- (4) iNEMI 5G/mmWave Materials Assessment and Characterization Project, “Report 1: benchmark current industry best practices for low loss measurements,” Nov. 2020.
- (5) H. Kawabata and Y. Kobayashi, “The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited

by coaxial cable lines to measure the complex permittivity,” Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC), pp. 1322–1325, 2001.

- (6) H. Kawabata, K.-I. Hasuike, Y. Kobayashi, and Z. Ma, “Multi-frequency measurements of complex permittivity of dielectric plates using higher-order modes of a balanced-type circular disk resonator,” Proc. Eur. Microw. Conf. (EuMC), Manchester, U.K., pp. 388–391, Sept. 2006.
- (7) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband permittivity measurements up to 170-GHz using balanced-type circular-disk resonator excited by 0.8-mm coaxial line,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 68, no. 6, pp. 1796–1805, June 2019.
- (8) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband conductivity measurement technique at millimeter-wave bands using a balanced-type circular disk resonator,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 69, no. 1, pp. 861–873, Jan. 2021.
- (9) Y. Kato, “D-band material characterization using a balanced-type circular disk resonator with waveguide interfaces and a modified full-wave modal analysis,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, pp. 1–10, Art. no. 6009210, 2023.
- (10) H. Chen, H. Chen, W. Che, S. Zheng, X. Xiu, and Q. Xue, “Review and modification of permittivity measurement on open resonator for transparent material measurements at terahertz,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 69, no. 11, pp. 9144–9156, Nov. 2020.
- (11) B. Salski, J. Cuper, T. Karpisz, P. Kopyt, and J. Krupka, “Complex permittivity of common dielectrics in 20–110 GHz frequency range measured with a Fabry–Perot open resonator,” Appl. Phys. Lett., vol. 119, no. 5, Art. no. 052902, Aug. 2021.
- (12) Y. Kato and M. Horibe, “Broadband Permittivity Measurements Using a Frequency-Variable Balanced-Type Circular-Disk Resonator,” Proc. Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM), Paris, France, pp. 1–2, July 2018.
- (13) Y. Kato, “Material characterizations in the D-band using a balanced-type circular disk resonator with waveguide interfaces,” Proc. Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM), Wellington, New Zealand, pp. 1–2, Dec. 2022.

### 加藤悠人

国立研究開発法人産業技術総合研究所。2012 東大大学院修士課程了。同年国立研究開発法人産業技術総合研究所入所。2020 阪大大学院博士課程了。ミリ波・サブテラヘルツ波帯の材料評価技術とメタサーフェス・メタマテリアルの設計・評価技術の研究開発に従事。

