

# ミリ波帯用生体等価固体ファントムの開発

|       |         |                          |
|-------|---------|--------------------------|
| 代表研究者 | 齊 藤 一 幸 | 千葉大学 フロンティア医工学センター 教授    |
| 共同研究者 | 高 橋 応 明 | 千葉大学 フロンティア医工学センター 准教授   |
| 共同研究者 | 長 岡 智 明 | 情報通信研究機構 電磁波研究所 研究マネージャー |

## 1 はじめに

近年、高周波利用技術の発展に伴い、ミリ波帯周波数の電波を利用した機器が身の回りで使用されている。例えば、最近の自動車には、高級車だけでなく小型車にまでミリ波技術を応用した衝突防止レーダーが装備されており[1]、また空港では、従来の金属探知機では検出できなかった非金属製の危険物を探知するミリ波によるイメージング装置[2]が稼働している。さらに医療分野でも、非接触で患者の呼吸や心拍を測定したり、がんを検出[3]したりするためのミリ波帯周波数の電波利用が研究されている。また、現在普及が進んでいる第5世代通信技術(5G)に基づいた移動通信では、高速・大容量通信を目指し、ユーザが手に持つ携帯端末(いわゆるスマートフォン)にまでミリ波帯アンテナが内蔵されている[4]。このような状況では、①アンテナ極近傍に生体組織という高誘電率かつ高損失(高導電率)の物体が存在する場合のアンテナ特性(入力インピーダンスや放射パターンなど)を的確に評価する必要があり、一方で、②アンテナから放射されるミリ波帯周波数の電磁波エネルギーが生体組織にどの程度吸収されるのかも評価しなければならない。これらは、製品(アンテナ)開発段階で数値シミュレーションによって様々に検証されているものと考えられる。一方、こういったパラメータは、実測による評価が重要である。しかしながら、現状ではミリ波帯において手軽に使用できる生体等価ファントムが存在しないため実験的評価は難しい。ここで、生体等価ファントムとは、生体組織と同一の電気定数をもつ物質[5]であり、倫理的および技術的(実人体を使用した各種測定は、測定結果が安定しない)に、こういった研究の遂行には不可欠の物体である。

これまでに、マイクロ波帯[6]やそれより低い周波数帯[7]用の生体等価ファントムはいくつか開発されており、ミリ波帯用のものは、ごく限られた生体組織を模擬するものや、体内での電磁波エネルギー吸収量に関するコンプライアンステスト用の液剤(液体ファントム)が、わずかに用いられているに過ぎない。そこで本研究では、10 GHz から 50 GHz 程度までの周波数範囲で“筋肉”や“皮膚”などの人体組織の電気定数を作り分けることができる生体等価“固体”ファントムの開発を目的とする。

## 2 研究方法

### 2-1 マイクロ波帯用ファントムの特性確認

まず、既存のマイクロ波帯周波数用ファントムのミリ波帯周波数領域での特性を把握する。既存のマイクロ波帯周波数用ファントムは、10 GHz 程度まで使用できるとは言え、図1からもわかるように、導電率については周波数が高くなるにつれて、目標値(文献値)とのずれが大きくなっている。生体組織の導電率は、周波数が上昇するにつれて、急激に値が増大するため、ファントムがその特性に完全には追従できていないと言える。そこで、本研究で目的とする上限周波数の50 GHz 程度までの周波数領域について、目標値とどの程度のずれが生じるのか検証する。

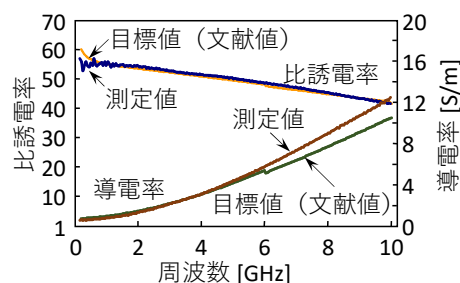


図1 既存のマイクロ波帯ファントムの特性

## 2-2 ミリ波帯用ファントムの組成検討

目標値と既存ファントムの電気定数の差異が明らかになったら、その差異を低減させるべくファントムを構成する材料の組成を検討する。これまでのマイクロ波帯周波数用ファントム開発の知見により、こういった物質（材料）がファントムの誘電率、導電率に大きな影響を与えるのかがわかっているのです。それらの物質の組成比を検証することで、ミリ波帯周波数における各種生体組織の電気定数の目標値に合致するファントムを開発する。さらに、過去のマイクロ波帯周波数用ファントム開発時に検討した（結果的に、既存のマイクロ波帯用ファントムでは用いていない）様々な物質の配合を検討し、それらの電気定数がどのように変動するのかを把握し、将来、様々な電気定数のファントムを実現する際の基礎データとする。

ミリ波帯域での生体組織の電気定数は、いくつかの研究機関で測定され参照可能である。本研究では、その中の一つである国立研究開発法人情報通信研究機構が公開している値[8]を目標値に設定する。

## 2-3 ミリ波における電気定数測定

一般に、周波数が高くなるほど、各種パラメータの測定は難しくなる。例えば、アンテナ入力インピーダンスはマイクロ波帯よりもミリ波帯の方が測定が難しい。また、そもそもマイクロ波帯用アンテナよりもミリ波帯用アンテナの方が寸法精度に対する要求が厳しい。こういったことは生体等価ファントムにおける電気定数測定でも同様であり、ミリ波帯における試作ファントムの電気定数測定は、マイクロ波帯の測定よりも難しいことが予想される。

調査した結果、表1に示す測定器・測定プローブの構成でミリ波帯におけるファントムの電気定数測定が可能であることがわかったため、本研究ではこの機器構成で電気定数測定を行った。図2に、測定システムの写真を示す。なお、測定周波数は、電気定数測定プローブが5 GHz～67 GHzに対応しているものの、それを接続するベクトルネットワークアナライザの測定可能周波数が1 MHz～43 GHzであったため、本研究では5 GHz～40 GHzにおいて、試作した生体等価ファントムの電気定数を評価した。

表1 測定装置詳細

| 機器                  | メーカー、型番 など                                                         |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ベクトルネットワーク<br>アナライザ | Anritsu MS46131A                                                   |
| 電気定数測定プローブ          | 測定可能周波数：1 MHz～43 GHz<br>SPEAG DAK-1.2E-TL2<br>測定可能周波数：5 GHz～67 GHz |

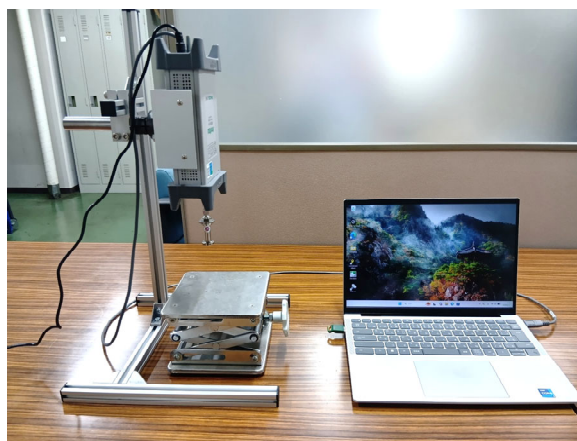


図2 ミリ波帯における電気定数測定システム

### 3 結果

#### 3-1 マイクロ波帯用ファントムの特性確認

図 3 に、従来のマイクロ波帯用ファントムのミリ波帯域での電気定数測定結果を示す。ここで、“筋肉”、“皮膚”は、文献値[8]の値であり本研究での電気定数の目標値である。比誘電率、導電率ともに、数値のオーダーや周波数依存の傾向は、ファントム測定値と目標値と同様である。しかし当然のことながら、組成の何らかの調整は必要であることがわかる。

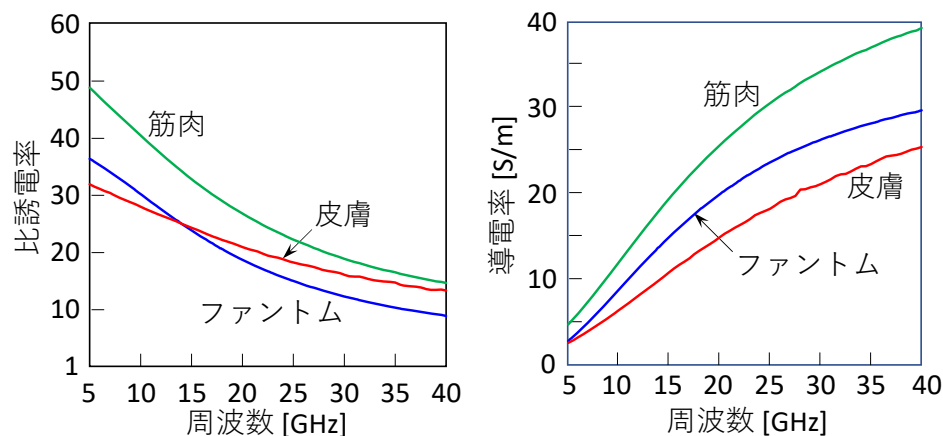


図 3 既存ファントムのミリ波帯域での電気定数

#### 3-2 ベースファントム

ファントムの組成を検討するにあたり、まず、基準とするベースファントムを設定した。このファントムの組成を表 2 に示す。ここで、ファントム電気定数に大きな影響を与えるのはポリエチレンパウダーであり、寒天粉末はファントムを固めるため、キサンタンガムはファントム作製時に材料の粘度を増すため、デヒドロ酢酸ナトリウムは防腐剤である。この組成で作成したファントムのミリ波帯での電気定数測定結果を図 4 に示す。幸いなことに、このファントムの電気的特性は、“筋肉”の特性とほぼ一致しているため、表 2 の組成でミリ波帯において筋肉の電気的特性を実現できると言える。

表 2 ベースファントムの組成

| 材料          | 比率 [%] |
|-------------|--------|
| 脱イオン水       | 87.2   |
| ポリエチレンパウダー  | 9.6    |
| 寒天粉末        | 2.8    |
| キサンタンガム     | 0.3    |
| デヒドロ酢酸ナトリウム | 0.1    |

合計 100%になるように端数処理を行った

#### 3-3 組成の調整

ミリ波帯の電磁波エネルギーは、例えば、それよりも周波数が低いマイクロ波の電磁波エネルギーよりも生体組織に浸透する距離が短く、多くの場合に生体組織表面から数 mm しか浸透できない。こういった状況であるので、ミリ波帯における生体等価ファントムは、“筋肉”の電気定数を実現するよりも“皮膚”の電気定数を実現することの方が重要であると考えられている。そこで、皮膚の電気定数をファントムで実現するにあたり、前述のベースファントムに対してさらに別の材料を添加してその特性を検証した。

まず、ベースファントムの組成に、アルミニウムパウダーを添加した。アルミニウムは金属であり生体組織とは全く異なる特性をもつと考えられる。しかしながら、我々のこれまでの経験によれば、微細なアルミ

ニウム粒子を水や寒天粉末等から構成されるファントムに比較的多く加えると、粒子間で静電容量が発生し、ファントムの電気定数に影響を与えることがわかっているため、この性質がミリ波帯においてどのように現れるか確認する必要があると考えた。図5にその結果を示す。アルミニウム粉末の分量を増加させるとともに、全周波数範囲で比誘電率、導電率ともに上昇することがわかった。また、この際に、比誘電率は低周波数側、導電率は高周波数側で変化の度合いが大きいと言える。しかしながら、この程度 of アルミニウム粉末の量では、ファントムの電気的特性を劇的に変化させるほどの影響を与えるには至らないこともわかった。

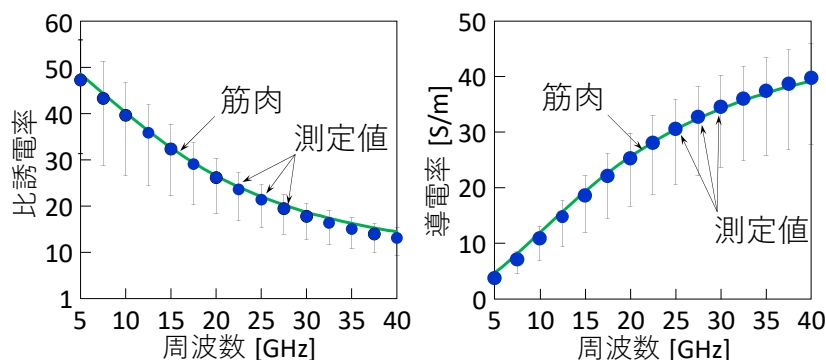


図4 ベースファントムのミリ波帯域での電気定数

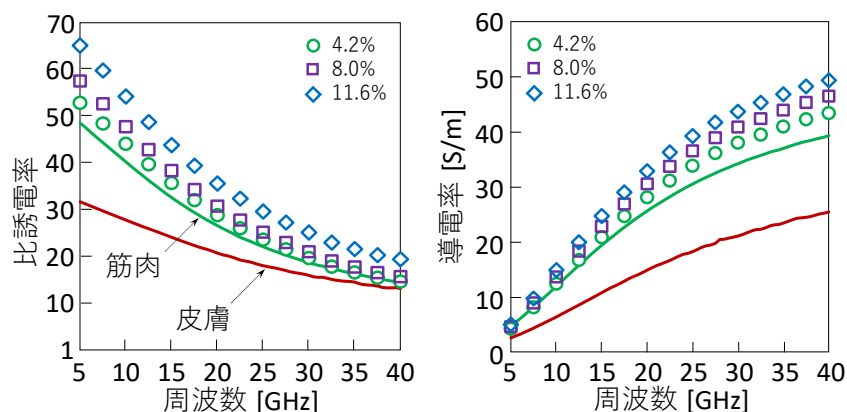


図5 ベースファントムへのアルミニウム粉末の添加

次に、ベースファントムの組成のうち、脱イオン水の一部をグリセリンに置換した。グリセリンには保湿作用があることから、特に、ファントムの比誘電率に影響を与えるのではないかと考えた。図6に、ベースファントムの組成に3種の異なる分量のグリセリンを置換したファントムの電気定数を示す。この結果より、脱イオン水の一部をグリセリンに置換することで、確かに電気定数は変化するものの、その分量を多くしても電気定数を変化させる効果は限定的（飽和する）であることがわかる。

さらに、ベースファントムの組成に、スクロース（砂糖）を添加した。スクロースは、比較的周波数が低いマイクロ波帯の液体ファントムの材料として用いられている例があるため、マイクロ波帯においても何らかの電気定数変化をもたらすかどうか調査することにした。図7に、ベースファントムの組成に4種の異なる分量のスクロースを添加したファントムの電気定数を示す。この結果より、スクロースの分量を17.9%としたときに、“皮膚”の電気定数を比較的良好に模擬できることがわかる。

以上をまとめると、ベースファントムそのものはミリ波帯において“筋肉”とほぼ同じ電気定数を模擬することが可能であり、さらにスクロースを添加することによって、“皮膚”の電気定数を模擬できることがわかった。なお、これらの結果は、[8]において公開されている値を目標値に定めた場合のものであるため、目標値を別の文献から定める際には、図4～7の結果を参考にすることで組成を決定できると考えられる。

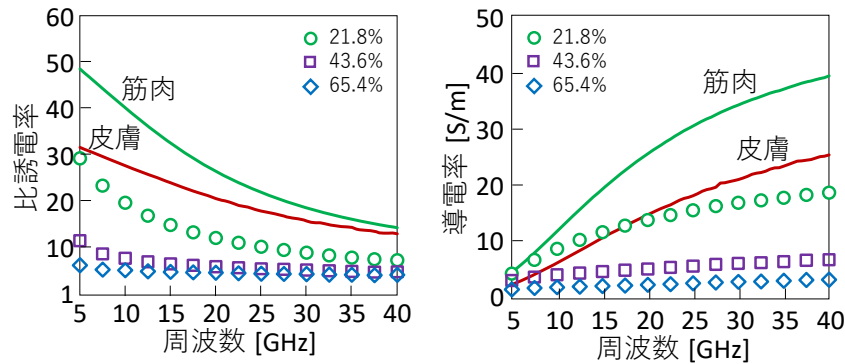


図6 ベースファントムへのグリセリンの添加

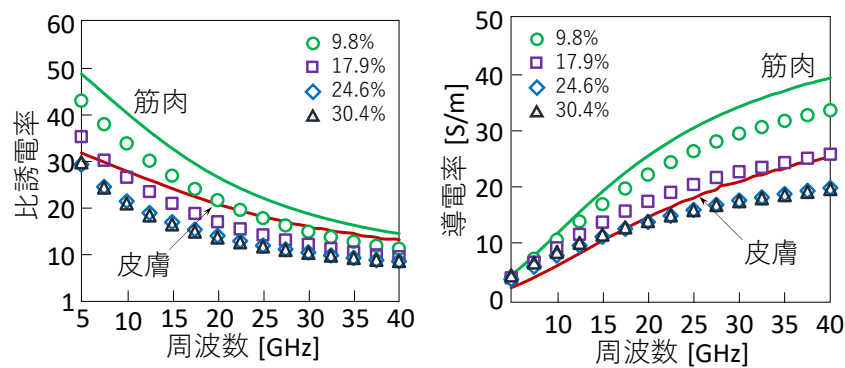


図7 ベースファントムへのスクロースの添加

### 3-4 材料の変更

前節までに説明したように、ミリ波帯用のファントムの組成がある程度決定できた。しかし、残念ながら、このファントムの主成分の一つであるポリエチレンパウダーについて、最近、入手（購入）が難しくなってしまった。そこで、この問題を解決すべく、ポリエチレンパウダーに代わる材料を探索することにした。本研究で開発したファントムは主成分が水である。水の比誘電率は、約80程度であり生体組織と比較すると高い。そこで、比誘電率が低いポリエチレンパウダーを添加することで、誘電率を生体組織の値に近づけることができる。こういった観点から、ポリエチレンパウダーの代替品として、タルク粉末を用いることにした。タルクは、含水珪酸マグネシウムを主成分とした鉱石の粉末であり、化粧品、医薬品、塗料などに広く用いられている。そのため、ファントムの材料として入手しやすい。

タルク粉末を導入するにあたり、従来の配合をベースに組成の再検討を行った。その結果、タルク粉末を用いた場合、増粘剤であるキサンタンガムを添加せずとも材料が均一に混ざることを確認した。そのため、タルク粉末を使用した組成では、キサンタンガムを除外した。タルク粉末を使用した場合のファントム組成を表3に示す。何回かの試行錯誤を経て、図8、9に示すように、ミリ波帯において、筋肉等価、皮膚等価のファントムを開発することができた。ただし現時点では、タルク粉末やその他材料の分量を変更した際の電気定数変化についてまでは検討できていないので、その点に関しては今後の課題である。



表 3 タルク粉末を使用した組成

| 材料          | 比率 (図 8) [%] | 比率 (図 9) [%] |
|-------------|--------------|--------------|
| 脱イオン水       | 65.2         | 39.5         |
| タルク粉末       | 32.6         | 59.2         |
| 寒天粉末        | 2.1          | 1.2          |
| デヒドロ酢酸ナトリウム | 0.1          | 0.1          |

合計 100%になるように端数処理を行った

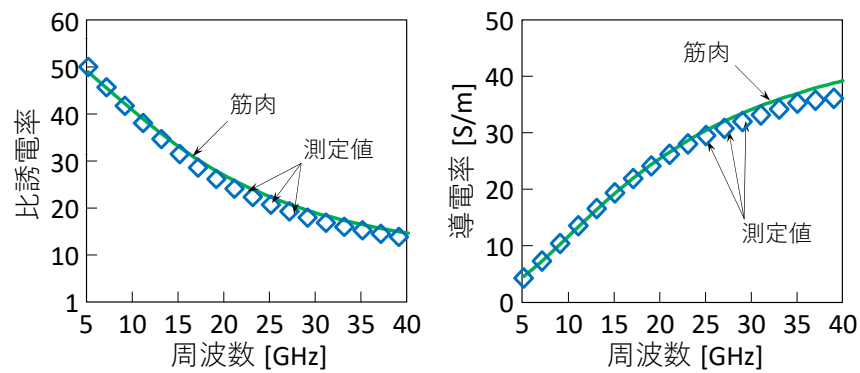


図 8 タルク粉末を用いたファントム (タルク粉末 : 32.6 %)

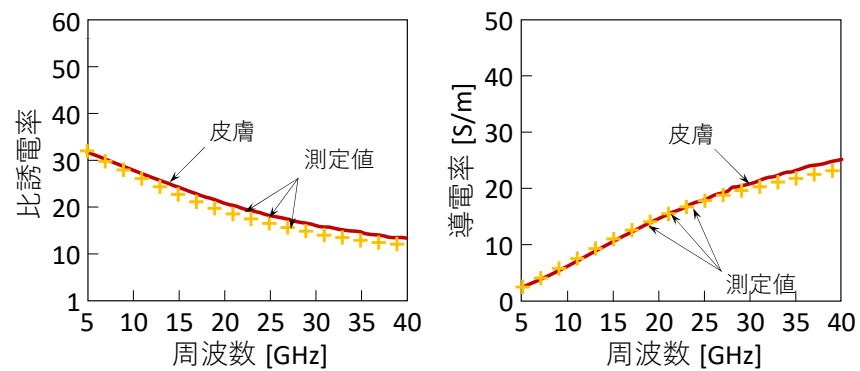


図 9 タルク粉末を用いたファントム (タルク粉末 : 59.2 %)

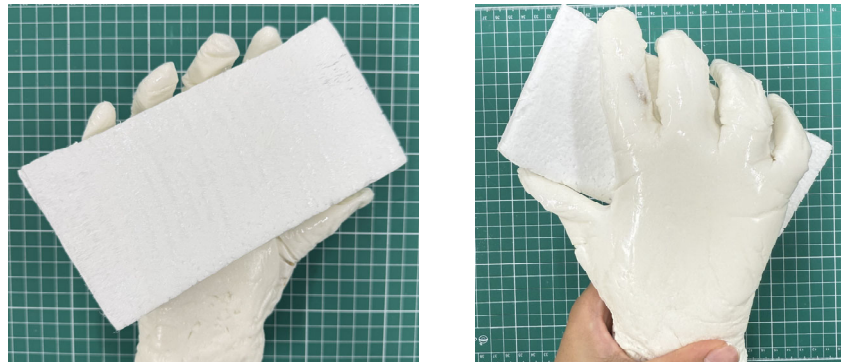


図 10 “手”の形状に加工したファントム

## 4 まとめ

本研究では、40 GHz までのミリ波帯において生体組織の筋肉と皮膚の電気定数を模擬可能な半固体ファントムを開発することができた。なお、目標値である筋肉や皮膚の電気定数は、引用する文献によっても多少の差がある。したがって、もし、本研究で引用した[8]とは別の文献値を目標に設定した場合には、図 4～7 の結果を参考にすることで、比較的容易に材料の組成を決定できると考えられる。

一方、本研究で開発したファントムは図 10 のように加工することが可能であるので、スマートフォンに代表されるような携帯無線端末の各種特性評価に使用することが可能である。

### 【参考文献】

- [1] M. I. Khan, S. Liu, M. K. Khan, S. Ur Rahman, “Eight elements mm-wave MIMO antenna for anti-collision radar sensing application with novel hybrid techniques,” AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 167, 154687, Apr. 2023.
- [2] X. Zhuge, and A. G. Yarovoy, “A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., vol. 49, no. 1, pp. 509-518, Jan. 2011.
- [3] A. Mirbeik, R. Ashinoff, T. Jong, A. Aued, and N. Tavassolian, “Real-time high-resolution millimeter-wave imaging for in-vivo skin cancer diagnosis,” Scientific Reports vo. 12, no. 4971, Mar. 2022.
- [4] I.-J. Hwang, B. K. Ahn, S.-C. Chae, J.-W. Yu, and W.-W. Lee, “Quasi-Yagi antenna array with modified folded dipole driver for mmWave 5G cellular devices,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 5, pp. 971-975, May 2019.
- [5] 伊藤公一, “アンテナ・伝搬研究における人体のモデル化,” 電子情報通信学会誌, vol. 82, no. 9, pp. 956-966, Sep. 1999.
- [6] 伊藤公一, 古屋克己, 岡野好伸, 浜田リラ, “マイクロ波帯における生体等価ファントムの開発とその特性,” 電子情報通信学会論文誌 B-II, vol. J81-B-II, no. 12, pp. 1126-1135, Dec. 1998.
- [7] 菅 良太郎, 井之上瑞紀, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “HF 帯用生体等価ファントムの開発,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J96-B, no. 9, pp. 964-970, Sep. 2013.
- [8] 情報通信研究機構, “Database of Tissue Dielectric Properties for Electromagnetic Modeling of Human Body,” < [https://www2.nict.go.jp/cgi-bin/202303080003/public\\_html/index.py/](https://www2.nict.go.jp/cgi-bin/202303080003/public_html/index.py/) >.

### 〈発 表 資 料〉

| 題 名                                                                                               | 掲載誌・学会名等                                            | 発表年月        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| Preliminary investigations of developing tissue-equivalent solid phantom for millimeter wave band | The 10th Indonesia Japan Joint Scientific Symposium | 2025 年 10 月 |
| ミリ波帯用生体等価半固体ファントムの開発                                                                              | 2025 年電子情報通信学会総合大会                                  | 2026 年 3 月  |