

4-3 テラヘルツ帯におけるばく露評価に向けた生体組織の光学特性の分析

4-3 *Spectroscopic Analysis of Biological Tissues for EMF Exposure Evaluation in Terahertz-frequency Region*

水野 麻弥 山崎 祥他 長岡 智明

MIZUNO Maya, YAMAZAKI Shota, and NAGAOKA Tomoaki

現在、検討が進められている移動通信システム Beyond 5G / 6G では、100 GHz を超える電波の利用が想定されており、テラヘルツ帯の無線通信に関わる技術の研究開発が活発化している。また、それらの実用化に向けて、人体への安全性を確保するために、皮膚や眼部組織へのテラヘルツ波の吸収や、それによる温度上昇に関するデータの取得が求められている。しかしながら現状では、100 GHz を超える周波数領域において、正確にばく露特性を評価するための技術がまだ確立されていない。そのため我々は、ばく露特性データの取得に向けた研究開発の一環として、分光分析法による生体組織の光学特性の分析や、その分析データを基に生体組織ファントムの作製等を行った。本稿では、一例として、角膜やファントムの複素比誘電率測定の結果などについて報告する。

THz technology over 100 GHz has been considered for wireless communications (Beyond 5G / 6G), and made great progress. For these practical uses, it is necessary to accumulate data of the THz wave absorption in the skin and eyes and its thermal effects to ensure electromagnetic safety. However, technologies to evaluate the THz wave exposure property are insufficient. Therefore, our group has been conducting spectroscopic analysis and phantom development of biological tissues toward the exposure property evaluation in the THz-frequency region. In this paper, data examples such as dielectric constants of cornea and its phantom will be reported.

1 まえがき

おおむね 0.1 THz から 10 THz のテラヘルツ波と呼ばれる電磁波は、電波としては周波数が高く、安定した発生・検出技術の開発がミリ波等に比べて遅れていた。しかし 1990 年代になり、基礎研究が急速に進み、そして 2000 年代以降、光技術や半導体技術等の進展により機器の性能が向上したことで [1][2]、様々な分野においてテラヘルツ波の応用が検討されるようになった。例えば、可視光などに比べてテラヘルツ波は不透明なプラスチックや塗料などを比較的よく透過する特性を持ち、それらの内部に欠陥等があれば反射や散乱が生じて伝搬するテラヘルツ波の信号強度等は変化する。また、テラヘルツ波は水に吸収されやすい特性を持つことから、植物の葉っぱ等の試料を伝搬するテラヘルツ波の信号は水分量に応じて変化する。テラヘルツ波は、このような試料の状態に応じた信号の変化(図 1)が得られるため、非破壊検査への応用が検討されるようになり、テラヘルツ波の透過や反射特性の変

化を測定することができる分光システムは検査ツールとして期待され、開発が進んだ [3]。

上述のようなテラヘルツ帯の発展により開発された分光システムは、今では様々な仕様で商品化され、医学・薬学・生物学分野などの研究の促進に貢献している。電磁環境研究室においてもコラーゲンなどの生体高分子について吸収特性を調査するために、テラヘルツ分光システムを活用してきた [4][5]。そして、分子レベルから組織レベルの分光研究に発展し、現在、テラヘルツ波の人体への安全性に関する研究の一環として、皮膚や眼部組織の光学特性を分析している。本稿では、その分析に不可欠なテラヘルツ帯の分光分析法について概説し、一例として角膜や生体組織を模擬したファントムの複素比誘電率の測定結果などについて報告する。

2 テラヘルツ帯における分光分析法

光と電波の中間の周波数領域であるテラヘルツ帯では、従来、光を応用した分光システムの開発が進んで

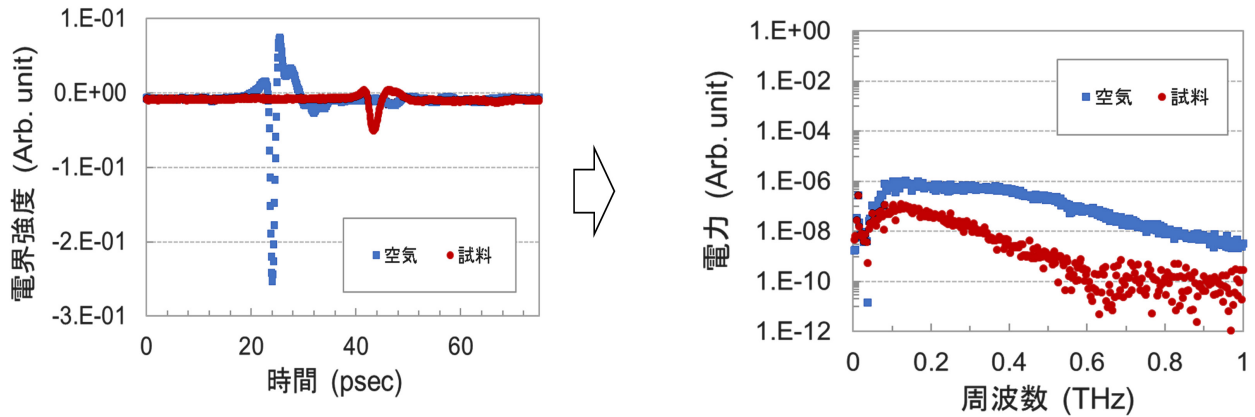


図1 テラヘルツ波の時間波形とスペクトル変化のイメージ

いる。中でも広帯域で分光可能なフーリエ変換型遠赤外分光光度計やテラヘルツ時間領域分光システムがよく知られている。フーリエ変換型遠赤外分光光度計が物質の透過率や反射率測定に用いられてきたのに対して、テラヘルツ時間領域分光システムは、パルス波を使用し振幅と位相の両方を取得できるため、物質の複素比誘電率の測定や、材料内部の断層像を取得する用途などへも広く利用されている。

テラヘルツ時間領域分光システムは、テラヘルツ波の発生器と検出器等から構成され、多くの市販システムでは、超短パルスレーザー光をビームスプリッターで2つの方向に分け、一方をテラヘルツ波発生用の光伝導アンテナに入射し、パルス幅が約1 psのテラヘルツパルス波を発生させる。そして、検出用光伝導アンテナに入射するもう一方の超短パルスレーザー光に加える時間遅延を走査し、複数のタイミングでテラヘルツ電界を測定することによって、テラヘルツパルス波の時間波形を取得する。試料からの反射パルス波を取得するタイプのテラヘルツ時間領域分光システムを用いた場合、多層構造を有する試料では、各層の界面からの反射パルスが、厚みや屈折率によって異なる時間に観測されるため、断層画像の取得が可能となる。また、テラヘルツ波の時間波形をフーリエ変換すると、約0.1 THzから3 THzを超える広い周波数領域の振幅と位相データが得られる。試料を設置しない場合のバックグラウンド信号との振幅比や位相差から複素反射係数を算出でき、理論式と比較を行うことにより試料の複素屈折率を得、複素比誘電率や吸収係数を算出することが可能である。複素比誘電率は、物質の定数(例えば、アンテナ基板の定数であれば、電波の放射特性を左右する重要な値のこと)であり、より正確な測定値が求められる。そのため、これまでに我々はテラヘルツ時間領域分光システムの国内外の比較試験に参画し、材料の屈折率や厚み等に応じた光学系の選択や、

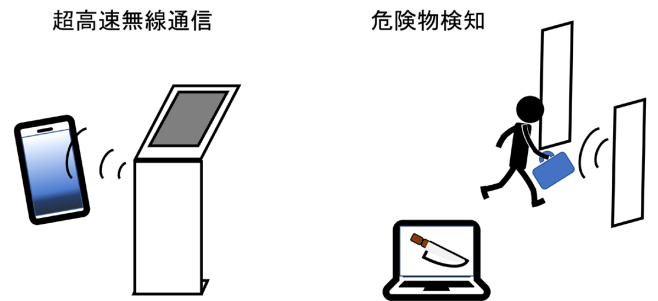


図2 テラヘルツ帯電波の利用イメージ

測定プロトコルの検討が重要であることを明らかにしてきた [6]。さらに、透過率が比較的高い試料では、テラヘルツ時間領域分光システムと透過型ユニットを組み合わせた分光システムが適切であるが、水分を多く含む生体組織においては、全反射 (Attenuated Total Reflection: ATR) 型ユニットを使用することで、正確な測定が可能であることも検証してきている [7]。

3 テラヘルツ帯ばく露特性データ取得に関する研究背景

テラヘルツ時間領域分光法が非破壊検査のツールの1つとして注目されている一方、図2のような超高速無線通信 [8] やボディスキャナ [9] といった一般環境で用いられるテラヘルツ技術の研究開発も進んでいる。移動通信システム Beyond 5G / 6G で活用が見込まれる周波数としてテラヘルツ帯の周波数が検討されていることで、増幅器やアンテナ等のコンポーネントの開発が加速化し、標準化の動きも高まっている [10]。実用化に向けた更なる今後の動向としては、5Gにおいて準ミリ波やミリ波の人体への安全性を確保するために、ばく露量を推定する技術やガイドラインの改定が必要となったように、これからテラヘルツ波について、人

体への吸収とそれによる温度上昇(ばく露特性)データ取得に必要な技術の開発や人体への安全性に関するガイドラインの検討が進んでいくものと思われる。

Beyond 5G / 6G では、0.1 THz を超えるテラヘルツ帯までの電波の利用が想定されており、国際的には 0.275–0.450 THz が陸上移動及び固定業務用として新たに特定され、国内においても 1.1 THz まで特定実験試験局として実験環境の支援が行われるなど、実用化に向けた動きが活発化している。ところが、0.1 THz を超える周波数領域においては、テラヘルツ波の人体ばく露特性データを取得するための計測技術の多くは発展途上であり、いまだ整備されていない。また、0.3 THz を超える電波の周波数領域においては、電波防護指針が策定されていない状況にある。このような状況に鑑みて、総務省では、テラヘルツ帯における人体ばく露評価技術の研究開発を推進し、生体電磁環境の研究についても計画が進められている。ばく露特性を知るためには、数値人体モデルを用いた数値シミュレーションや生体組織等価ファントム等を用いた測定が必要になるが、それらを高精度で実施するためのシミュレーション技術や計測技術の開発だけでなく、それらの基盤情報である生体組織のテラヘルツ帯の複素比誘電率や、生体組織の形状に依存するテラヘルツ波の伝搬特性の把握が鍵となる。テラヘルツ帯においては、体表の高含水組織や汗、涙での電波吸収が大きく、テラヘルツ波が体の深部まで浸透することは困難であるため、主に皮膚や眼の角膜についてデータベース化が進められている。しかしながら、生体組織の表面形状や水分量などの個体差を考慮したデータの蓄積はいまだ十分とは言えず、データの拡充が求められている。

4 生体組織の光学特性の測定

これまでに述べた理由から、我々はテラヘルツ帯に

おける皮膚や角膜などの光学特性の測定を進めている。ミリ波帯と同様に、ネットワークアナライザを用いた同軸プローブ法や自由空間法による測定も可能であるが、ここでは、広帯域で測定が可能なテラヘルツ時間領域分光システムを使用した測定例を紹介する。なお、テラヘルツ時間領域分光システムを用いて測定した複素比誘電率データは、ネットワークアナライザを用いて測定したデータとおおむね一致することが確認されている [7][11]。

ATR 型テラヘルツ時間領域分光システムを使用し、生理食塩水とブタの角膜について複素比誘電率を測定した結果を図3に示す。水の複素比誘電率は、実部、虚部共に値が高いことがよく知られているが、水とたんぱく質等から成る角膜の複素比誘電率は、水分子とたんぱく質の相互作用により実部の値は低下し、また、緩和周波数が低周波側にシフトする影響でテラヘルツ帯における虚部の値は水と異なることが明らかとなっている。このような生体組織の誘電特性データは、水分やたんぱく質の量によって異なるため、特性のバラつきについても考慮して分析することによって、ばく露特性をより正確に捉えることが可能になると考えている。具体的には、生体組織等価ファントムの作製では、角膜や皮膚の光学特性を実現するために、材料である純水や生理食塩水、グリセリン、オイル、寒天などの混合比を調整し、測定された生体組織の複素比誘電率データに近づける。つまり、測定した誘電特性が生体組織本来の特性に近いほど、正確なばく露特性データの取得につながるため、試料の個体差による複素比誘電率のバラつきも調査している。一例として、角膜に関する測定結果を図4に示す。ブタの角膜の複素比誘電率のバラつきは、皮膚などに比べて小さいこと、また、このブタの角膜の複素比誘電率を生理食塩水、グリセリン、寒天を材料とすることで再現できることがわかった。0.1 THz から 1 THz の広帯域において複

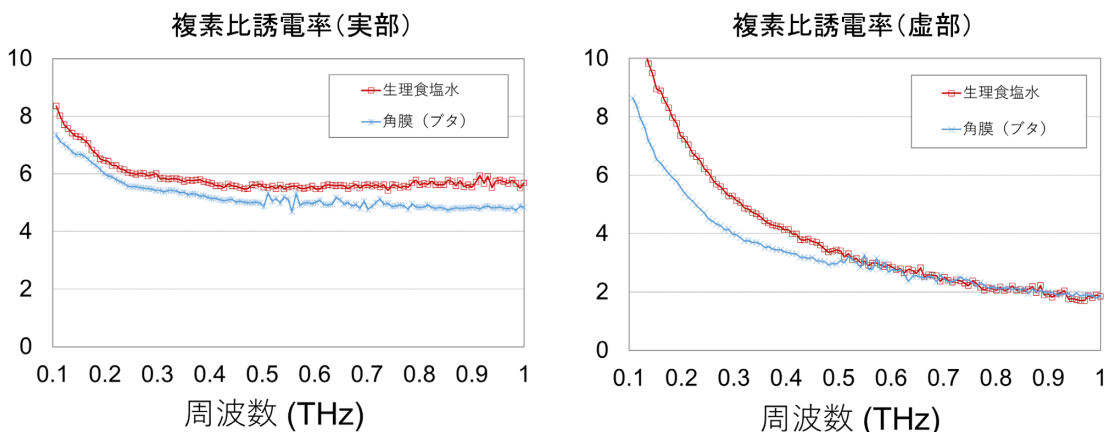


図3 生理食塩水とブタ角膜の複素比誘電率データの一例

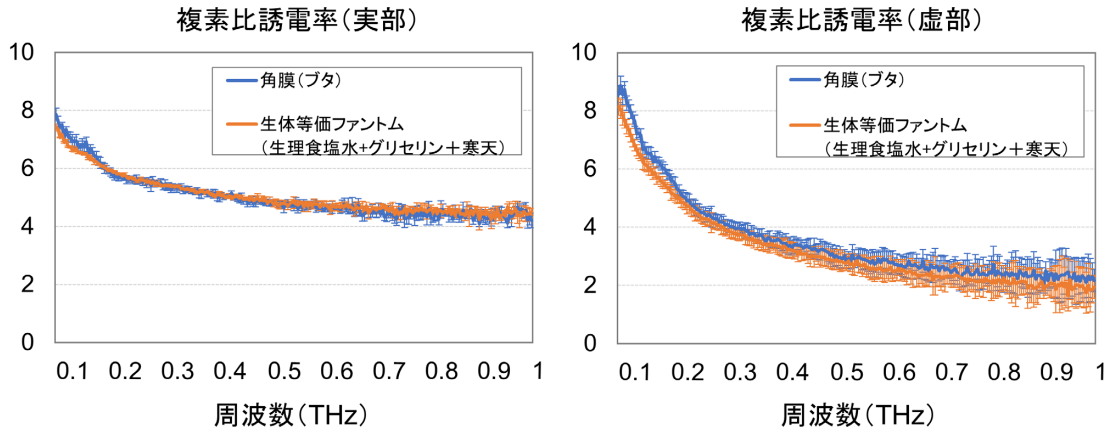


図4 ブタ角膜の複素比誘電率を再現した生体等価ファントムの測定データの一部

素比誘電率の実部、虚部共にブタ角膜の値を精度良く再現していることが確認できており、高精度な実験的ばく露評価への利用が期待される。

さらに我々は、生体組織の表面の形状や水分量等に依存するテラヘルツ波の伝搬特性についても分析を進めている。眼球の場合、形状は球形であるが、その表面にある涙層によりテラヘルツ波の反射や透過量が異なる様子がテラヘルツ時間領域分光システムにより観測されている。リアルタイムで分光計測を実施した結果、涙層の厚み及び角膜中の水分の減少により反射率が変化していたことが確認された [7]。このような実験を行うことで、角膜等価ファントムに再現すべき特性、例えば、形状や涙の付加などの検討を進めている。

皮膚については、表皮に含まれる水分量によってテラヘルツ波の反射率が異なることがよく知られている。それに加えて、表面の皮丘、皮溝、しわ等の形状によっても反射率が異なることが近年の実験で確認されつつある。特に、0.3 THz に近づくとき表皮の表面の粗さが原因で、反射率が低下する。実際、ATR型ユニットで表皮をシリコンプリズムに押し当てることで表面を平滑化し測定した反射率よりも、表面粗さがある場合には反射率が小さくなることが実験的にも示された。また、透過率についても同様に、表面形状が影響することが確認されており、皮膚の皮丘や皮溝は、テラヘルツ波へのばく露評価を行うにあたって、データのばらつきの一因となり得ることがわかってきた。そこで、皮膚等価ファントムの作製においては、図5(a)のように光干渉断層計を用いて、ブタの皮膚の断層像を取得し、図5(b)のような同等の表面粗さを有する皮膚組織等価ファントムの作製を進めている。このように、テラヘルツ帯の分光システムを用いて取得した生体組織の光学特性データは、高精度な人体ばく露評価に向けた研究において、基盤データとして活用されるものであり、データの蓄積、検証を継続している。

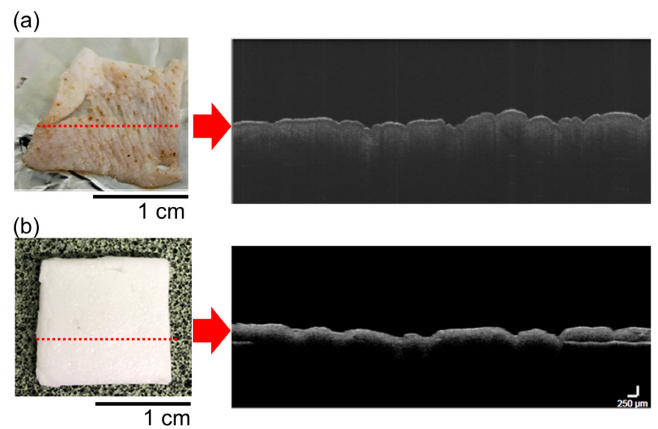


図5 (a) 皮膚と (b) ファントムの表面形状のイメージ

5 まとめと今後の展望

本稿では、テラヘルツ帯で使用されている分光分析法や、ばく露評価に向けた生体組織の分光測定について概説した。主に、皮膚や眼部組織の分光データを取得し、それらのデータを基に実験的ばく露評価に不可欠な生体組織等価ファントムの作製を進めている。今後、生体組織等価ファントムがテラヘルツ波にばく露されたときの温度上昇特性について、開発中の入射電力や温度上昇分布を高空間分解能で測定する新技術と組み合わせることで、明らかにしていく予定である。これによって、人体への安全性に関するガイドラインの根拠となるデータの取得を目指す。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究 (JPMI10001) の支援により実施されている。

【参考文献】

- 1 伊藤弘昌, "テラヘルツ波の課題と展望," 電子情報通信学会誌, vol.89, pp.450-455, 2006.
- 2 鈴木左文, "コンパクトな半導体デバイスを用いたテラヘルツ開拓," 電子情報通信学会ソサイエティマガジン, vol.47, pp.183-189, 2018.
- 3 深澤亮一, "テラヘルツ時間領域分光法とイメージングへの応用," 精密工学会誌, vol.82, pp.213-216, 2016.
- 4 Maya Mizuno, Akira Yamada, Kaori Fukunaga, and Hiroaki Kojima, "Far-infrared Spectroscopy of Salt Penetration into Collagen Fiber Scaffold," Journal of Biological Physics, vol.41, pp.293-301, 2015.
- 5 Maya Mizuno, Noriko Yaekashiwa, and Soichi Watanabe, "Analysis of Dermal Composite Conditions Using Collagen Absorption Characteristics in THz Range," Biomedical Optics Express, vol.9, no.5, pp.2277-2283, 2018.
- 6 Maya Mizuno, Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, Kaori Fukunaga, Yozo Shimada, and Chiko Otani, "Classification of Terahertz Spectrometer for Transmittance Measurements of Refractive Materials," IEICE Electronics Express, vol.13, 20160532, pp.1-12, 2016.
- 7 M. Mizuno, H. Kitahara, K. Sasaki, M. Tani, M. Kojima, Y. Suzuki, T. Tasaki, Y. Tatematsu, M. Fukunari, and K. Wake, "Dielectric property measurements of corneal tissues for computational dosimetry of the eye in terahertz band in vivo and in vitro," Biomed. Opt. Express, vol.12, pp.1295-1307, 2021.
- 8 P. Vitaly, K. Thomas, and H. Iwao, "IEEE 802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G," IEEE Communications Magazine, vol.58, pp.28-33, 2020.
- 9 G. Tzydynzhapov, P. Gusikhin, V. Muravev, A. Dremin, Y. Nefyodov, and I. Kukushkin, "New real-time sub-terahertz security body scanner," J. Infrared Millim. Terahertz Waves, vol.41, pp.632-641, 2020.
- 10 笠松 章史, 竇迫 巖, "テラヘルツ波無線通信の研究開発動向," 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, vol.12, pp.176-182, 2018.
- 11 T. Tosaka, K. Fujii, K. Fukunaga, and A. Kasamatsu, "Development of Complex Relative Permittivity Measurement System Based on Free-Space in 220-330-GHz Range," IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol.5, pp.102-109, 2015.



水野 麻弥 (みずの まや)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士(工学)
生体電磁環境



山崎 祥他 (やまざき しょうた)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究員
博士(農学)
生体電磁環境



長岡 智明 (ながおか ともあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士(医科学)
生体電磁環境
【受賞歴】

2022年 電波功績賞電波産業会会長表彰
2013年 第59回(平成25年度)前島密賞
2004年 Physics in Medicine and Biology
最優秀論文賞 (Robert Prize)