

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32607

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700462

研究課題名(和文) テラヘルツ帯における人体皮膚ファントムの開発

研究課題名(英文) Development of the human tissue-equivalent phantom for millimeter wave range

研究代表者

山本 洋 (Yamamoto, Hiroshi)

北里大学・一般教育部・助教

研究者番号：00381640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000 円、(間接経費) 510,000 円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ帯における人体皮膚のファントムの作成を目的として、表皮の複素比誘電率データの蓄積・計測方法の改良・ファントム素材となり得る各種材料の物性値測定データの蓄積を行った。人体のような柔らかい試料に対しては、これまでの計測技術では再現性の高い測定が難しい場合があり、このためエリプソメトリーと呼ばれる手法にプリズムを導入し、柔らかく不定形の素材に対しても精度良く複素比誘電率を測定できる系を開発した。これらの蓄積をもとにテラヘルツ帯において人体表皮の複素比誘電率を模擬するファントムを作成した。

研究成果の概要(英文)：For the development of the human tissue-equivalent phantom in terahertz range, I have accumulated the complex relative dielectric constants of human skin, improved the measurement methods, and also accumulated the material properties of varieties of samples which may be materials of human tissue-equivalent phantom. For biological materials such as human skin, it was sometimes difficult to realize the measurement with good reproducibility. Thus I have improved the ellipsometry measurement and developed a system that can measure the complex relative dielectric constants with high accuracy for the soft, protean materials. Based on these results, I have developed a phantom which simulate the complex relative dielectric constants of human skin in terahertz range.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：生体情報・計測 ミリ波 エリプソメトリー

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波の特徴は、様々な物質を透過する（逆に生体に密接に関連する物質に対しては吸収が大きい）こと、ある程度波長が短い（例えば 1THz で約 0.3mm）ため良好な分解能のイメージング画像が得られること、X線と比べ人体に対して安全であること、などであり、近年医療分野への応用研究が盛んに進められている。

ファントムとは、医療診断や計測技術の領域において様々な試験や検討を行う際に、人体の代用として使用される一種のモデルであり、X線やCT撮影用、超音波診断装置の評価用などではすでに様々な製品が販売されている。放射線被曝量軽減などの目的からこうしたファントムは医療現場で数多く使用されており（例えば「医療分野におけるファントムの利用の現状と標準化に向けての課題」赤羽恵一、FB News, No 350 6-10 (2006) など）また近年では携帯電話の安全性を実証するために、マイクロ波帯電磁波の頭部への影響解明にも利用されている。しかしながら、テラヘルツ帯域においてはこれまでそのような高周波信号を簡易に扱うことが難しかったため、臨床学的な検討はほとんど進んでいなかったのが実情である。

テラヘルツ帯域の電磁波は水による吸収が大きいため、人体深部の情報を得るのには適さないが、マイクロ波などの低周波電磁波と比べ高解像度の検査が可能であり、また衣類、布などに対する透過率が高いことから、比較的体表面に近い部位に対しては、様々な医療現場における検査技術に用いることができる。このような研究分野において強く必要とされていたのは、広範なデータ蓄積と、基準となる標準的なサンプルの確立であった。

### 2. 研究の目的

本研究は、テラヘルツ電磁波を用いた皮膚の非接触モニタリングを目指し表皮組織ファントムの開発が目的である。申請者が北里大学の伊藤弘教授と共に開発したテラヘルツ領域での計測技術（「Millimeter-wave ellipsometry of human skin based on photonics technology」Hiroshi Yamamoto, Hiroshi Ito and Makoto Noshiro, IEICE Electron. Express, Vol. 7, No. 13, pp.964-968, (2010)）を用いれば、短時間で様々な物質のテラヘルツ領域での材料物性値を測定することができる。この技術を用いて人体皮膚（表皮、真皮など）のテラヘルツ帯における物性値、特に複素誘電率の解明を行い、そうしたデータの蓄積から人体表皮組織の複素比誘電率を再現するファントムを開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

皮膚組織の物性値測定には、これまで伊藤弘教授と共に開発してきた実験系を使用した。この系では、テラヘルツ波の発生に光技

術を利用する独自の手法を用いている。単一走行キャリアフォトダイオード（UTC-PD）と呼ばれる素子を用い、フォトミキシングと呼ばれる手法でテラヘルツ波を発生させる。これにより発生したテラヘルツ波をエリプソメトリーと呼ばれる偏光解析法に使用し、試料の複素誘電率を測定することができる（図1）。

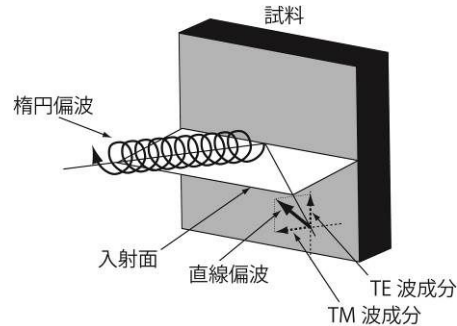


図1：エリプソメトリーの概念図

エリプソメトリーではテラヘルツ波を試料に入射、反射波の偏光状態の変化から非破壊・非接触に複素誘電率を測定することができる。これまでに開発した実験系を用いて人体表皮（前腕部）の複素比誘電率を測定しており、これを再現できるファントムの素材・構造を探った（図2）。

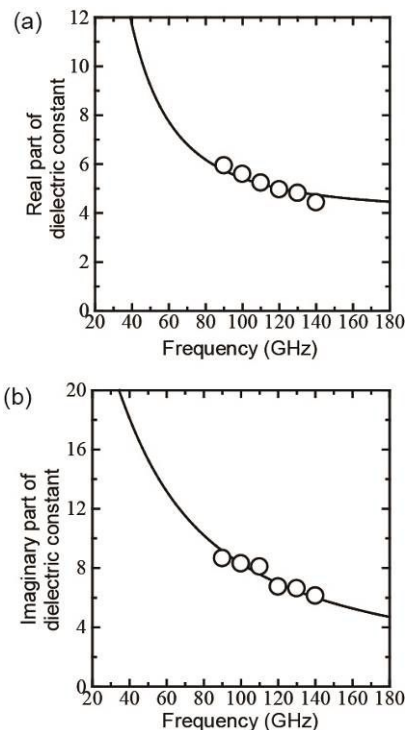


図2：人体表皮（前腕部）複素誘電率の周波数依存性(Hiroshi Yamamoto et al, IEICE Electron. Express, Vol. 7, No. 13, pp.964-968, (2010) )

### 4. 研究成果

#### 1) 測定系の改良

人体表皮の複素比誘電率のデータをさらに

精度良く測定し、蓄積するため、測定系の改良が必要となった。これまでの測定系では、テラヘルツ波を照射する領域が広く、その範囲内の複素比誘電率の平均値を測定していたが、より詳細な複素比誘電率の変化を計測するためには照射領域を絞り、狭い領域に対する計測を実現する必要がある。このため、放物面鏡を用いて照射領域を絞ったエリプソメトリ測定系の開発を進めた。

この過程において、照射領域を絞ると、それまで用いてきた2台のレーザーを用いたフォトミキシングでは電磁波の干渉性が高いことによる悪影響が大きく、測定結果を大きく歪めてしまうことがわかった。これを防ぐためには、片方のレーザーを干渉性の弱い特殊な光源 (SLD 光源) に変えるなどの手法が有効であるが、一般にこうした光源は広い帯域を持っており、そのままでは単一の周波数を必要とするエリプソメトリ測定に適用できない。そこで、帯域の非常に細い光フィルターを用い、SLD 光源からの光を半値幅約 0.5GHz 程度まで狭めたものと通常のレーザー光を合波することによって、エリプソメトリ測定に十分使用可能な半値幅を持ち、干渉性の低いテラヘルツ電磁波を発生させることに成功した。これを用いて、狭い領域に対する複素比誘電率の測定を実現した。図 3 は開発した測定系を用いた精製水の複素比誘電率周波数依存性の測定結果であり、人体のような水の影響が強い素材に対して、十分な精度を持って複素比誘電率が測定可能であることを示している。

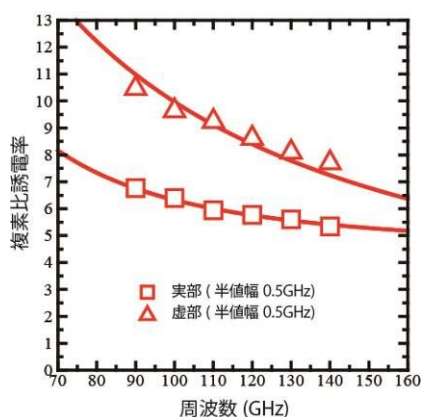


図 3：測定領域を絞ったエリプソメトリによる精製水複素比誘電率の周波数依存性

さらに、人体など柔らかい素材に対して、狭い領域の測定を行う場合、測定領域の形状が平面でないことによる影響が無視できないことがわかってきた。通常エリプソメトリ測定においては、得られた計測データから複素比誘電率を求める際に数値計算が必要となるが、この計算において平板状で、かつ動かない試料を仮定している。生体関連試料に対してはこの仮定が満たされておらず、特に測定領域が狭い場合にはこの影響が無視

できないことが測定を進めていくにつれ明らかになった。こうした問題を解決するため、系内に図 4 に示すような界面平坦化プリズムを設置し、これに試料を押しつけることで測定を行う新たな計測系を開発した。

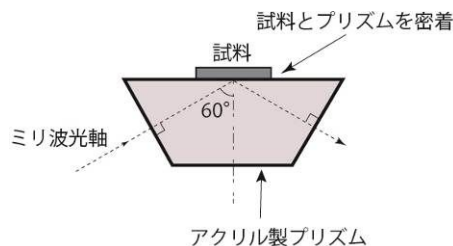


図 4：界面平坦化プリズムの概念図

この系では、プリズムに試料を押しつける結果、界面の平坦化と試料位置の固定を同時に実現でき、生体試料のような柔らかく不定形で、時に動く試料に対しても精度良く複素比誘電率を測定できる。図 5 はこの系を用いて牛の筋肉切片の複素比誘電率を測定した結果であるが、水分含有量の多さを反映して水の複素比誘電率の周波数依存性に似た形を示しており、これまでの他の研究結果とよく一致する。

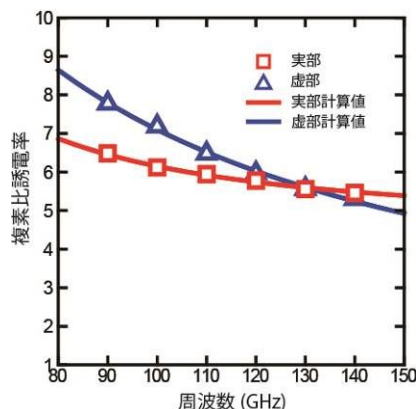


図 5：界面平坦化プリズムを用いたエリプソメトリによる牛筋肉切片複素比誘電率の周波数依存性

また、この系ではプリズムによって試料表面が覆われるため、水分の多い生体関連試料に顕著な、試料の乾燥を防いだ測定が可能である。これらの成果によって、人体表皮の複素比誘電率をこれまでより精度よく測定できるようになった。

## 2) ファントムの作成

上記の測定系を用い、様々な素材に対する複素比誘電率の計測を行い、蓄積されたデータを元に人体表皮の複素比誘電率を模擬するファントムを開発した。生体試料は、もとも水分の影響を強く受けた複素比誘電率の周波数依存性を示すが、人体皮膚も同様の傾向を示すことがわかっており、また気温や湿度などの外的要因によっても変化する。このため、吸水性の樹脂などを用い、含水率が高く、かつ柔らかく不定形であるような構造

を持つファントムを作成した。作成したファントムの示す複素比誘電率周波数依存性はこれまで測定された人体表皮のものをある程度再現するものであった。また、水分含有率を変化させることにより湿度などの外的要因による複素比誘電率の変化を模擬することが可能であり、様々な人体反応と物性値の関連を調査するための基礎となるファントムを作成することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Millimeter-Wave Ellipsometry Using Low-Coherence Light Source,  
Hiroshi Yamamoto and Hiroshi Ito,  
IEICE Trans. Electron., Vol. E97-C, No. 5, pp.460-462 (2014)

Reflection-Geometry Measurements of Biological Materials Using Photonically Generated Millimeter Waves,  
Hiroshi Yamamoto and Hiroshi Ito,  
IEICE Trans. Electron., Vol. 96-C, No. 2, pp. 235-240 (2013)

[学会発表](計 2 件)

界面平坦化プリズムを用いたミリ波エリプソメトリーの検討,  
山本 洋、伊藤 弘、  
電子情報通信学会 2014 年総合大会、  
2014 年 3 月 19 日、新潟大学(新潟県新潟市)

低コヒーレンス光源を用いたミリ波エリプソメトリーの検討,  
山本 洋、八代 花菜子、伊藤 弘、  
電子情報通信学会 2013 年総合大会、  
2013 年 3 月 20 日、岐阜大学(岐阜県岐阜市)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 洋 (YAMAMOTO Hiroshi)

北里大学・一般教育部・助教

研究者番号：00381640