

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23602013

研究課題名(和文) 医用電磁波放射システム研究のための病理組織を含む超広帯域3次元人体等価ファントム

研究課題名(英文) Ultra wide band 3D human equivalent phantoms including malignant tissues for the electromagnetic radiation system research in the field of medical applications

研究代表者

前田 忠彦 (Maeda, Tadahiko)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：40351324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：乳がん病理組織を含む等倍および2倍スケールのUWB帯域人体等価ファントムを開発した。適応重回帰分析をファントム組成データベースに適用し、人体等価ファントムの電気定数目標値に対するファントムの組成を与える自動組成算出ソフトウェアのプロトタイプを試作し、試作精度の評価を実施した。人体頭部組織の形状模擬を目的に、プローブの刺入性に優れ頭部骨格形状模擬に適した柔軟性を持つ骨ファントムの開発を行った。開発した骨ファントムを応用し、皮膚、眼球、脂肪、筋肉、骨、大脳の6組織からなる3次元多層化人体頭部ファントムを試作し刺入性に優れたプローブによる内部電界分布測定を実施した。

研究成果の概要(英文)：1: New compositions for a x1 scale phantom and a x2 scale phantom simulating both cancer and glandular tissues for the replication of the dielectric properties of real human tissue in the UWB frequency band have been developed to be used for wide-band electromagnetic experiments for medical applications.

2: Based on adaptive multiple regression analysis, automatic composition design software for human body-equivalent phantoms has been proposed as the first trial. The materials water, silicone emulsion, glycerin, sodium chloride, and agar can be used to compose human equivalent phantoms. The fabricated phantoms show an average difference between the experimental and target values of 15% for permittivity and 17% for conductivity.

3: A novel bone equivalent phantom, which is suitable to fabricate multi-layer human head phantoms and a multi-layer human head phantom consisting of six tissues: 1) skin, 2) eye, 3) fat, 4) muscle, 5) bone and 6) brain have been proposed and fabricated.

研究分野：時限

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：誘電率 導電率 人体等価ファントム エキスパートシステム 適応重回帰分析 電気定数 層状化ファントム 3次元ファントム

1 . 研究開始当初の背景

医用物理学と電波応用医用機器の研究開発においては実際の患者を対象とする評価実験の機会が制限される場合が多い。これに加えて、患者の個体差による再現性の問題からも医用機器の研究開発段階では適切で効率的な代替手段による研究・開発・検証を実施するための基盤技術を確立しておくことが強く望まれ、特に医用物理学の研究開発のために再現性を維持した代替え実験手段を提供し細密な実験研究環境を複数の研究機関で共通に実現することが必要である。

ここで、医用電波機器は電波を使用するためにアンテナは必須の構成要素であり、医用電波機器用のアンテナは人体に近接して使用されるため、人体の影響を考慮した評価・実験が不可欠である。特にアンテナの給電部分の構造や人体との相互作用が医用電波機器用のアンテナ特性のみならずシステム全体の性能に大きな影響を与えることが知られている。

このため、優れた医用アンテナシステム開発のためには、アンテナの給電部分の構造と人体を含めたアンテナシステム全体の放射機構を解明する必要がある。このような放射機構の詳細な分析のためには測定モデル全体を拡大した拡大測定モデルを用いることが非常に有用である。例えばアンテナと人体モデルをそれぞれ2倍の大きさで作製し、測定周波数帯を1/2とすることで体積的な分解能を8倍にまで高めることが可能となる。

このような拡大モデル(スケールモデル)測定を可能とするためには、1)原型と拡大モデル形状の相似性と、2)原型と拡大モデルそれぞれの測定周波数における複素誘電率の一致が必要となる。具体的には、原型の周波数を f として、この周波数を f/k とする拡大モデルでの測定には、拡大モデルの大きさが原型の k 倍であることに加えて、誘電率が原型と拡大モデルで同一で、さらに導電率が原型の $1/k$ 倍である材料を拡大モデルとして使用する必要がある。

このような背景から、医用電波機器の研究開発段階では、「等倍モデル」に加えて患部を拡大した「拡大病理モデル」を実現し実験手段として用意しておくことが有益である。

一方、人体を含むスケールモデル実現のための最大の課題は、複雑な周波数特性を持つ人体病理組織の電気定数(誘電率と導電率)を実現するための組成と製法を発見することにある。特に、組成の探査は薬品の種類・組み合わせ、さらにその分量に関わる非線形の最適化であるため、非常に多くの試作と実験による探査が必要であり、組織的取り組みが極めて重要となる。

2 . 研究の目的

広帯域のレーダ方式に代表されるように

医用診断の分野で電磁波の利用が期待されており、これらの医用電波機器のシステム全体の特性は人体近傍に配置されるアンテナの特性により影響を受けるため、優れた電波応用医用システムの開発のためにはアンテナと人体を含めた再現性のある実験環境の整備が急務である。これらの機器の研究開発段階では実際に疾患のある患者の組織を使用できる実験の機会が制限されているのが現状であり、医用電波機器の効率的な研究開発のためには、対象となる病理組織の電磁波特性を細密に再現できる新しい人体疾患部の標準モデルの構築が医用物理学の面からも強く望まれる。

また、理工学においては、研究対象を拡大し観察することで、現象を細く把握できることが多く、医用物理学の研究開発においても人体内部の電磁波の挙動を拡大して実験・評価するための「拡大人体モデル」の実現が切望されているが、連続的に人体病理組織の電気定数を細密に再現する必要のある「拡大人体モデル」は世界的にも実現されていないのが現状である。

このような背景から、悪性組織を含む医用病理ファントムを開発し、多様な電気特性を持つ多品種のファントムを超広帯域に3次元構造を含めて実現することを目的として、総合的で戦略的な取り組みを進める。

3 . 研究の方法

(1) 病理組織の目標電気定数と模擬する周波数帯域によるファントムの基本組成の決定： まず、人体のスケールモデル化、病理組織の模擬に必要な電気定数の洗い出しと、これらの電気特性の周波数特性を決定する。病理組織ごとの電気特性に注目した区分を行い、区分ごとの目標電気特性を決定する。これまで進めてきたTX151、グリセリンおよびチタン酸カルシウムを主剤とする縮小型人体等価ファントムの研究を、新たに病理組織を模擬するための研究領域に発展させ、悪性組織に対するモデル化のための基本組成を決定する。特に病理組織のモデル化に伴う基本組成の見極めを行う。またこれらに関連する測定・評価技術の開発を進める。具体的には、ファントム内部の電気定数を評価するための独自のニードルプローブとその校正技術を新たに開発する。

(2) 成分予測技法と添加物による誘電率と導電率の可変可能範囲の研究： 基本材料の組み合わせと新成分の導入に伴う多次元の探索作業が必要である。これらの実験データをより有効に、また有機的に処理し、探査する成分の組成について予測するため適応的重回帰分析による実験式モデルを開発する取り組みを統合的に進める。この研究では、特に「誘電率と導電率の変化の相互依存性」の関係を明らかにする。また、この「誘電率

と導電率の相互依存性」のできるだけ少ない添加物を見出すことを研究目標の柱に据え、研究成果をエキスパートシステムとして統合させる。

(3) アンテナ応答特性を指標とする電気定数の許容誤差範囲の研究： 所望の病理組織に対するファントムの電気定数を実現するための組成を与えるエキスパートシステムとして研究成果を統合するためには、許容誤差についての情報が不可欠である。このための電磁界シミュレーションを実施する。医用機器に採用される候補となるアンテナを複数選択し、医用レーダ装置に用いられる代表的な信号処理をモチーフとして取り上げ、取得されるレスポンスを評価指標に用いて、導電率と誘電率の許容誤差について研究を進める。

(4) 病理組織を模擬するためのファントム組成の探査と決定： 電気定数測定評価技術、実験データの処理と成分予測技法、添加物の電気定数への相互依存性の成果を結集し、目標病理組織に対する電気定数を実現するための組成の探査を戦略的に進める。本研究は病理組織に対する組成目標の集約、試料の試作と評価、新しい実験式の開発という一連の研究作業を統括的に進める点に特徴がある。人体の病理組織に対するファントムの試作条件をデータベース化する。具体的には、病理組織の分類に基づいて3年間の研究期間にまたがる網羅的な試作結果に対して多元的な解析を進め、中心周波数、周波数帯域幅、誘電率および導電率という4つのパラメータを入力条件として与えることで、ファントム作製のために必要な成分と製造プロセス条件を抽出するエキスパートシステムとして統合するための研究に着手する。

(5) 拡大病理ファントムと3次元病理組織ファントム形成への展開： 乳がん診断用など代表的なものに絞込み、その実験のための正常組織および悪性組織の電気定数と形状の洗い出しを行う。スケールモデルでは1.5倍から2倍のスケールモデルで病理組織ファントムの開発を進める。さらに電波医用機器評価への具体的応用として、がんなどの病理組織を含めた精密3次元人体病理ファントム開発を進める。具体的には、病的に分類される悪性組織の電気定数を模擬した上で3次元での病理組織の形状を再現できる形成技術を新たに開発する。この3次元のファントム形成技術を拡張し、その応用として乳癌などの病理組織を含めた3次元の拡大病理組織ファントムと3次元複雑形状ファントムの形成技術の開発を行う。

4. 研究成果

(1) 成分予測技法と添加物による誘電率と

導電率の可変可能範囲の研究： 広帯域における「誘電率と導電率の相互依存性」を明らかにするためにファントムを試作し、添加物に対する電気特性の変化の挙動を把握した。特に、新しい組成領域の探査のため、CaSO₄を用いた600MHz～4GHz帯用人体等価ファントム、UWB帯域用人体皮膚ダウンスケールファントム等の試作から、新しい実験式を開発する取り組みを統合的に進めた。

(2) 病理組織と人体組織の電気特性の模擬に関する研究： 人体部位として乳癌と眼球に注目した研究を進めた。乳癌に関しては、まず、乳房の代表的な構成組織を選択し、これらの組織を広帯域で模擬するために目標電気特性の周波数特性を決定した。次に、乳癌ファントムの基本組成の探査を進め、等倍乳房ファントムを広帯域で実現するための基本組成を初めて明らかにした。さらに、この成果を用いて乳房ファントムの試作に発展させた。眼球に関する研究では、従来の液体型ファントムでは眼球内部の不均質構造を模擬することが出来ないため、独自の半固体ファントムに注目した研究を進めた。併せて、眼球への電磁波の影響を評価するためにSAR測定実験用半固体眼球ファントムに適用するためのニードル型プローブを用いた評価技術に関する研究を進め、固体ファントムに適用できる内部電磁界の新しい測定技術を手法を提案した。

(3) 所望の病理組織に対するファントムの電気定数の許容誤差を評価： 医用機器に採用される候補としてキャビティバックアンテナに注目し、医用レーダ装置に用いられる代表的な信号処理をモチーフとして取り上げ、リング特性と波形持続時間に注目し、ファントム電気定数の許容誤差をアンテナ測定の尺度から判断するための評価基準について研究を進めた。

(4) 病理組織を模擬するためのファントム組成の探査： 前年度までに開発した添加物の電気定数への相互依存性の成果を基に、従来採用している電気定数調整用薬品群に加えて、グリシンと硫酸カルシウムに注目し、電気定数に対する影響の検討を進め、超広帯域人体等価ファントム作成のための基礎資料を取得した。その結果、グリシンは比誘電率の上昇に、また硫酸カルシウムは電気定数の周波数特性の傾きの調整に適した試薬であることを明らかにした。

(5) 拡大アップスケール型病理ファントムと3次元病理組織ファントム形成： 皮膚および筋肉ファントムの超広帯域化に取り組み、グリシン、硫酸カルシウムに加えてポリアクリル酸ナトリウムを試薬として新たに採用し試作を進めた。その結果、600 MHz から20 GHzの帯域で、筋肉、皮膚、2/3

筋肉の各組織を実現する新しい組成を開発した。また、2倍アップスケール病理ファントムに適用するために乳腺および乳癌病理組織ファントムを開発し、開発済の脂肪および皮膚ファントムに組み合わせることで3次元病理組織ファントム形成実験を実施した。

(6) 眼球および頭部簡易モデルファントムとホットスポット現象の測定：眼球および頭部に関する研究として自立性と刺入性に優れた簡易頭部半固体ファントムとダイヤモンド型プローブを開発し、このプローブと非金属平面スキャナを用い眼球内ホットスポット現象を実験的に再現しエネルギー集中を確認した。

(7) 低リングング広帯域放射素子によるイメージング評価：超広帯域レーダの医用応用を目的として、キャピティバックアンテナを採用し、医用レーダ装置に用いられる代表的な信号処理をモチーフとして取り上げ、波形持続時間とレーダ検知特性に注目し、ファントムの電気定数と構造の検討をすすめた。その結果、損失製媒質を内装しリングング特性を改善する媒質条件を明らかにした。

(8) 3次元層状化ファントム：病理ファントムおよび3次元病理組織ファントムを用いて医用レーダアンテナと組み合わせたイメージング評価を推進するため、多層化人体頭部ファントムの基礎検討として、主要組織である皮膚、眼球、脂肪、筋肉、骨、大脳の6組織で構成された3次元層状化ファントムを試作した。既に提案されている骨ファントムは、組成に含まれるポリエチレンパウダーの影響のため加工性と刺入性に課題があるため、ポリエチレンパウダーを除いた組成で新たに形状模擬可能な骨ファントムの開発を行った。主剤をグリセリンとし、添加する水と寒天量を調整することで電気定数と硬度の調整を行い、形状模擬加工性と刺入性に優れた骨ファントムの開発を行った。電気定数の合わせ込みが今後の課題である。

(9) 電気定数の周波数特性を模擬するためのファントム組成設計システム：ファントムの構成要素となる試薬数として、組成の主剤となり電気特性の異なる水、シリコンエマルジョン、グリセリンの3種類と、これに加えて比誘電率を低下し、導電率を上昇させ電気特性の最終調整に利用される4)塩化ナトリウムの4種を選定した。試薬各成分の分量変化に対する電気特性の変化が局所的には直線的な特性を持つとして、目標電気特性により選択的に重回帰分析に使用する複数のサンプルを選択するアルゴリズムを開発した。具体的には、組成データリスト全体の中から目標電気定数に近い値を持つ複数のサンプルを選択する適応的重回帰分析を用いる。その後ファントム作製と測定

を行い、さらにその結果を処理し組成データリストへの登録を行うことで組成データリストの更新が行われる。この一連のプロセスの繰り返しにより自動生成の組成決定精度の向上が図れるエキスパートシステムのプロトタイプを試作した。

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 4 件)

糸澤康司, 井口悟, 前田忠彦, “広帯域CSRR-BPFを利用した静脈認証用生体検知手法の提案,” 電子情報通信学会論文誌B, 査読: 有, vol. J95-B, No. 10, pp.1284-1287, 2012.

宮下功寛, 小川晃一, 前田忠彦, “人体手部の影響を含めた等価回路表現による小形ループアンテナの広帯域減結合設計手法,” 電子情報通信学会論文誌B, 査読: 有, vol. J95-B, No. 9, pp. 1078-1089, 2012.

坂根菜緒, 陳丹, 前田忠彦, “マイクロ波レーダによる乳癌検出への適用を目的とした乳房ファントム,” 電子情報通信学会論文誌B, 査読: 有, Vol. J94-B (9), pp. 1206-1209, 2011.

辻尾良太, 池井慎弥, 前田忠彦, “人体腕部に装着することを想定したスルーホール型八木・宇田アンテナの配列化” 電子情報通信学会論文誌B, 査読: 有, 通信 J94-B (9), pp. 1122-1132, 2011.

[学会発表](計 15 件)

豊田雄介 中島見介 前田忠彦, “半固体多層化人体頭部ファントムを用いた電界分布測定,” 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会, AP2014-10, 発表年月日: 2014年4月18日, 発表場所: 立命館大学(京都府)

前田忠彦 吉田紘 寺内一真 佐藤勇人 小森史哲, “ワイヤレスシステム用人体装着型アンテナ ~ 眼鏡型アンテナとファントム組成設計エキスパートシステム ~,” 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会, AP2014-17, 発表年月日: 2014年4月18日, 発表場所: 立命館大学(京都府)

中島見介 前田忠彦, “人体頭部多層型ファントムに関する検討,” 電子情報通信学会 総合全国大会, B-1-176, March

2014, 発表年月日: 2014年3月21日,
発表場所: 新潟大学(新潟県)

中島見介 前田忠彦, “柔軟性を持つ5 GHz - 20 GHz 帯域用人体等価脂肪ファントムの開発,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-173, 発表年月日: 2013年9月19日, 発表場所: 福岡工業大学(福岡県)

高奥祐弥 戸田純一 中島見介 前田忠彦, “600 MHz-20 GHz 帯域用広帯域人体等価 2/3 筋肉ファントム,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-174, 発表年月日: 2013年9月19日, 発表場所: 福岡工業大学(福岡県)

豊田雄介 高木学 前田忠彦, “広帯域アンテナを用いた簡易頭部ファントム内電界強度分布の検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-176, 発表年月日: 2013年9月19日, 発表場所: 福岡工業大学(福岡県)

高木学 豊田雄介 小森史哲 前田忠彦, “ダイヤモンド型プローブを用いた簡易人体頭部埋め込み固体眼球ファントム内部電界強度分布測定,” 電子情報通信学会 アンテナ・伝搬研究会, AP2013-14, 発表年月日: 2013年4月19日, 発表場所: 関西学院大学(兵庫県)

Fumiaki Komori, Sho Kato and Tadahiko Maeda, “x2 Scale Breast Phantom for Reproducing Human Breast Cancer Tissue,” proc. ISAP 2012, POS2-18, 発表年月日: 2012年11月1日発表場所: 名古屋国際センター(愛知県)

加藤翔, 前田忠彦, “600MHz-25GHz 帯域人体等価皮膚ファントムの開発,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-141, 発表年月日: 2012年9月13日発表場所: 富山大学(富山県)

小森史哲, 前田忠彦, “電気特性の個体差の模擬を目的とした2倍アップスケール乳癌ファントム,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-140, 発表年月日: 2012年9月13日発表場所: 富山大学(富山県)

小森史哲, 前田忠彦, “乳房内組織の3次元形状の模擬を目的とした2倍アップスケール人体乳腺・乳癌ファントム,” 電子情報通信学会 総合全国大会, B-1-177, 発表年月日: 2012年3月23日発表場所: 岡山大学(岡山県)

加藤翔, 前田忠彦, “CaSO4 を用いた

600MHz~4GHz 帯域人体等価ファントム,” 電子情報通信学会 総合全国大会, B-1-178, Mar. 2012, 発表年月日: 2012年3月23日発表場所: 岡山大学(岡山県)

高木学, 前田忠彦, “固体眼球ファントムを用いた相対電界強度分布測定の検討” 信学総大, B-1-179, Mar. 2012, 発表年月日: 2012年3月23日発表場所: 岡山大学(岡山県)

加藤 翔, 前田忠彦, “UWB 帯域用人体皮膚ダウンスケールファントムの開発,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-105, Sep. 2011, 発表年月日: 2011年9月15日発表場所: 北海道大学(北海道)

高木 学, 前田忠彦, “SAR 測定実験用固体眼球ファントムの開発,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-104, Aug. 2011, 発表年月日: 2011年9月15日発表場所: 北海道大学(北海道)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 忠彦 (MAEDA TADAHIKO)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 40351324