

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700502

研究課題名(和文) 周期構造化により低周波数帯域の電気的特性を合致させた電磁ファントムの研究

研究課題名(英文) Study on electromagnetic phantom electrical characteristics matched at low-frequency band by the periodic structuring

研究代表者

山本 隆彦 (Yamamoto, Takahiko)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：50579761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人体通信や各種医療機器の電気的性能評価を行う上で、生体の電気的特性を模擬したファントムを用いることは機器の信頼性向上の観点から有用である。従来のファントムは低周波数帯域における生体の電気的特性を十分に模擬しておらず改善が必要であった。本研究では高含水ゲルファントムの広帯域化を目的に、特に低周波数帯域における電気的特性の改善を行った。

研究成果の概要(英文)：The use of electromagnetic phantom that mimics electrical characteristics of human body is important in case the evaluation of reliability of the implantable or wearable devices. The high hydrous phantom, which is made up mainly of deionized water, is easy to operate orthopedically while retaining the desired form, and it can imitate the broadband electrical properties of the living body. For this reason, it is useful as a phantom for many applications. The electrical properties at the low-frequency band, however, have not been fully mimicked. This study describes the evaluation and improvement of the characteristics of a high hydrous phantom at the low-frequency band.

研究分野：医用生体電子工学

キーワード：ファントム 誘電率 導電率 カーボン繊維 電磁両立性 計測

1. 研究開始当初の背景

体内埋込型機器や密着型機器をはじめとする多くの医療機器、生体を伝送路として用いる通信機器等においては、生体の存在を考慮した性能試験を行うことが必要不可欠である。これを人体により行うことは、人体実験にあたる場合があり、ヘルシンキ宣言等に抵触する可能性がある。また、動物実験によりこれを行うことは、再現性やコストの問題に加えて、ポロニア宣言にて採択された 3R (Replacement, Reduction, Refinement) をはじめ、近年欧州地域を中心に動物実験禁止の風潮があり、倫理的な観点においても問題といえる。このため、人体実験や動物実験を行うことなく、しかも生体の存在を考慮した機器の性能試験を行えることが望ましい。そのため、例えば生体の音速を模擬した超音波ファントムが、生体の誘電率や導電率(以下、電気的特性という)を模擬した電磁ファントムなど、人体の種々の特性を模擬したファントムが利用されている。

本研究では生体の比誘電率 ϵ_r および導電率 σ を模擬した電磁ファントムを対象としている。電磁ファントムには液体、固体、高含水ゲルファントムなど種々ある。液体ファントムは、液剤を保持するための容器が必要であるが、電界プローブを走査することが容易なことから移動端末の SAR (Specific Absorption Rate) 測定に採用されている。固体ファントムは、ファントム内をプローブ走査できないものの、試作後は保持する容器を必要とせず、任意形状のファントムを製作することが可能である。高含水ゲルファントムは生体と同様の水を主原料としていることから、300 MHz 以上において広帯域にわたって筋肉の電気的特性を模擬しており、試作が容易で比較的低価格であることから広く用いられている。

2. 研究の目的

図1および2は文献を参考に試作した高含水ゲルファントムおよび擬死後1時間以内のウシ上腕筋の誘電率および導電率特性である。高含水ゲルファントムは主原料となるイオン交換水、誘電率調整のためのポリエチレン粉末、導電率調整のための塩化ナトリウムに対して、凝固のための寒天、防腐剤、これらを一緒に混ぜるための増粘剤を添加し作成する。ファントムの導電率は10 MHz以上の周波数帯域においてウシ上腕筋とよく一致している。これに対して、比誘電率の特性は30 MHz以下の周波数帯域においてウシ上腕筋と大きく異なっている。このため、低周波数帯域においては電気的特性の改善が必要であることがわかる。一例として、10 MHzにおいて誘電率調整のためのポリエチレン粉末および導電率調整のための塩化ナトリウムの割合を検討した結果を図3に示す。ウシ上腕筋と比較して、特に誘電率を増加させる必要があるが、従来の材料の調

合割合調整のみでは所望の誘電率および導電率を得られないことがわかる。これに対し、HBC (Human Body Communication) や EMC (Electromagnetic Compatibility) 試験などにおいて 300 MHz 以下の周波数帯域のニーズが高い。そこで、本研究では低周波数帯域における電磁ファントムの電気的特性改善について検討を行った。

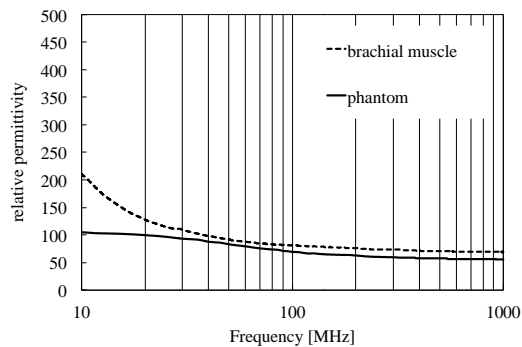


図1 高含水ゲルファントムの誘電率

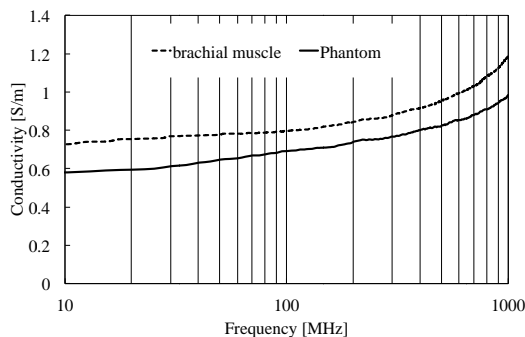


図2 高含水ゲルファントムの導電率

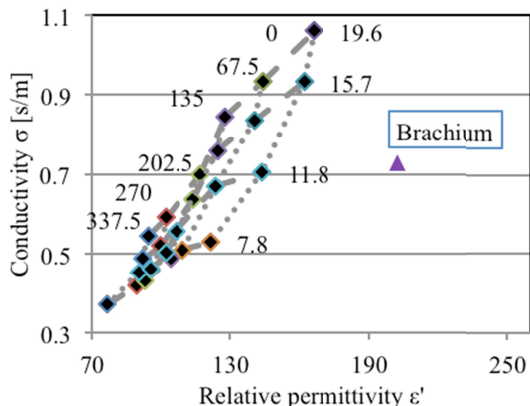


図3 材料割合調整とファントムの電気的特性

3. 研究の方法

(1) 周期構造によるファントムの電気的特性向上の検討

20 MHz 程度以下の周波数帯域における比誘電率特性の変化は、細胞の周期構造により発生する β 分散が考えられる。細胞の等価回路は図4のように表わすことができ、上部が細胞膜、下部が細胞内液の等価回路である。 β 分散は、数十 MHz 以下において細胞膜および細胞内液が同図に示す等価回路として表わ

すことができ、この周波数帯域において周波数の増加とともに実効的な誘電率が減少する現象をいう。等価回路の合成アドミタンスは

$$Y = \frac{1}{R_2} \frac{(wC_1R_2)^2}{1 + \{w(C_1 + C_2)R_2\}^2} + jwC_1 \frac{1 + w^2C_2(C_1 + C_2)R_2^2}{1 + \{w(C_1 + C_2)R_2\}^2}$$

と表される。C₁, C₂ および R₂ を適切に選び、2 種類の物質を層構造となるように配置することで、ファントムの誘電率および導電率は図 5, 6 のようによく一致する。

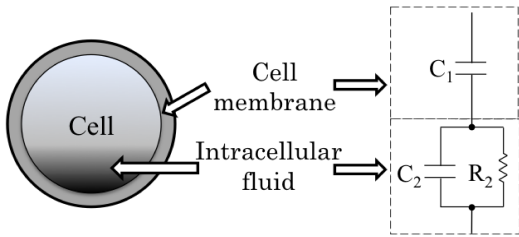


図 4 細胞の等価回路

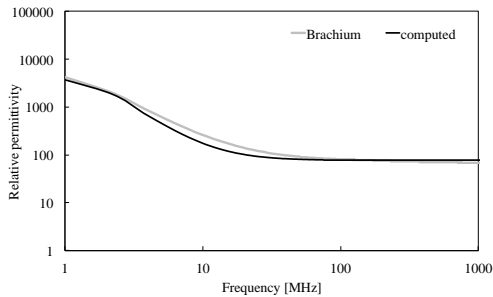


図 5 ウシ上腕筋と等価回路より算出したファントムの比誘電率の比較

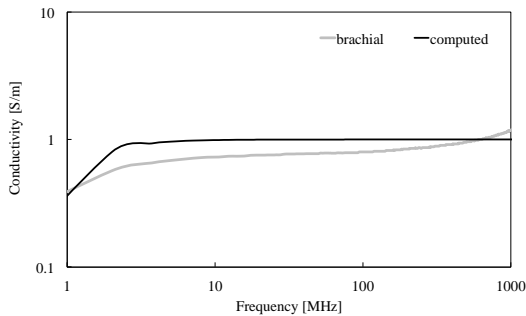


図 6 ウシ上腕筋と等価回路より算出したファントムの導電率の比較

しかしながら、この方法は各層に対して垂直に電流が流れる場合に限って上記の特性を得ることができるのにくわえ、厚みに高い精度が要求される。このため、試作困難といえる。

(2) 誘導性材料の添加による電気的特性向上

電気的特性の評価には、平行平板コンデンサの原理を用いた。図 7 に測定に用いた導体板を示す。直径 50 mm の円形銅板 2 枚の間に円形平板状のファントムを挿入し、インピーダンスアナライザによりキャパシタンス C お

よびコンダクタンス G を測定した。ファントムの誘電率および導電率は

$$\epsilon' = \frac{Cd}{\epsilon_0 S}$$

$$s = \frac{Gd}{S}$$

により与えられる。ここで、 ϵ_0 , S, d はそれぞれ真空の誘電率、極板面積、極板間距離である。 ϵ' を増加させるためにはキャパシタンス C を増加させる必要がある。そこで、図 8 に示すように、キャパシタンスに対して直列にインダクタンスを挿入することができれば、実効的なキャパシタンスは増加する。ファントムに添加するインダクタとして、SEM(scanning electron microscope) 画像を図 9 に示すカーボンファイバを用いた。

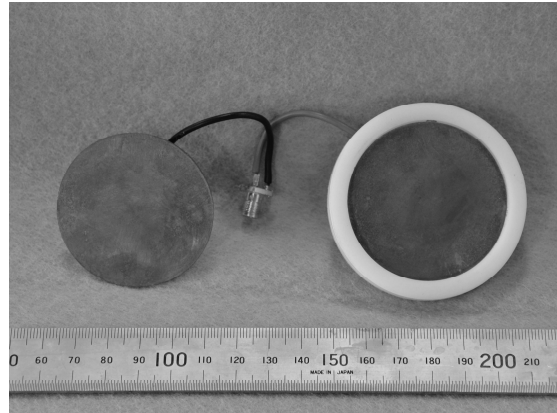


図 7 電気的特性測定用電極板

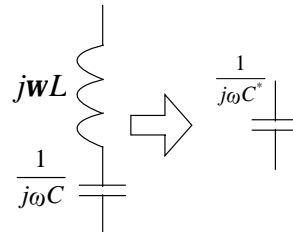


図 8 インダクタンスの挿入と実効キャパシタンス

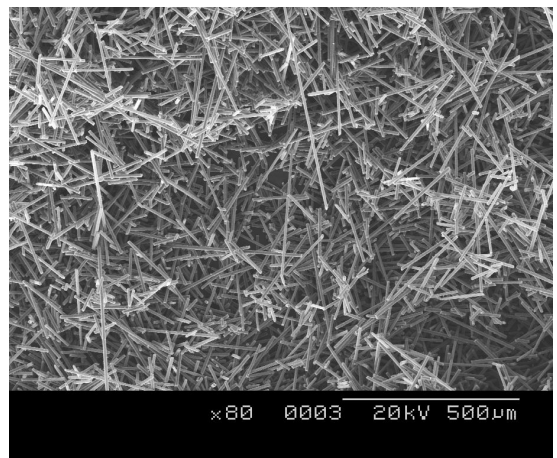


図 9 カーボンファイバの SEM 画像

4. 研究成果

カーボンファイバを添加した際のファントムの誘電率および導電率特性を測定した。結果を図 10, 11 に示す。カーボンファイバを添加したファントムの誘電率は、添加量の増加とともに増加し、500 kHz 付近において増加率が最大となった。特に、添加量が 2% のときの誘電率特性は 5 MHz 以上において生体の電気的特性の文献値とよく一致していることがわかる。

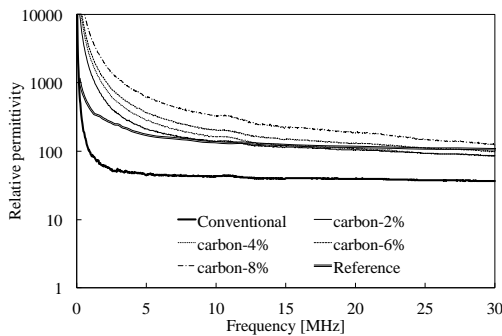


図 10 カーボンファイバ添加ファントムの誘電率

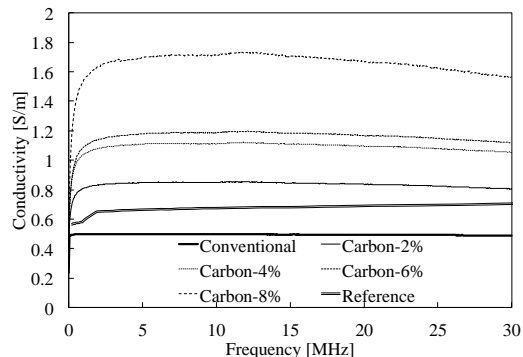


図 11 カーボンファイバ添加ファントムの導電率

本研究では、生体の電気的特性を模擬したファントムの開発、高機能化を目指し、繊維状カーボン従来の高含水ゲルファントムに添加した際の特性評価および、電気的特性改善のメカニズムについて検討を行った。その結果、カーボンファイバの添加により低周波数帯域において電気的特性は大幅に改善され、特に 2% のカーボンファイバを添加したファントムは 5~30 MHz の周波数帯域にわたって生体の電気的特性(誘電率)とよく一致した。このファントムは当初計画を行った周期構造を有するファントムと比較して試作が容易であるため、実用性が高い。本研究で得られた成果は、低周波用電磁ファントムの必要な種々の研究開発分野において大いなる貢献をもたらした。

カーボンファイバの方向を制御することにより、電気的特性に異方性を有するファントムを実現することができる可能性がある。今後は、他の組織を模擬したファントムの開発を進めると同時に、異方性を有するファン

トムの研究開発を行う予定である。

引用文献

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, No.12, pp.1126-1135, 1998

S. Gabriel, R. W. Lau and C. Gabriel. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, *Phys. Med. Biol.* 41, pp. 2251-2269, 1996

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 7件)

T. Yamamoto, K. Sano, K. Koshiji, X. Chen, S. Yang, M. Abe, A. Fukuda : Improvement of electrical properties of human phantom in low-frequency band by using carbon microcoil, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 査読有, Vol. 21, No. 2, pp.146-151, 2013

T. Yamamoto, K. Koshiji, A. Fukuda : Development of test fixture for measurement of electrical characteristics of gel-like materials and measurement of immediately sacrificed animal tissue characteristics, *IOP Journals Physiological Measurement*, 査読有, Vol.34, No.9, pp.1179-1191, 2013, DOI : 10.1088/0967-3334/34/9/1179

T. Yamamoto, K. Sano, K. Koshiji, X. Chen, S. Yang, M. Abe, A. Fukuda : Development of Electromagnetic Phantom at Low-Frequency Band, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, pp.1887-1890, 2013

Y. Machida, T. Yamamoto, K. Koshiji : A Study on Transmission Characteristics and Specific Absorption Rate Using Impedance-Matched Electrodes for Various Human Body Communication, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, pp.1883-1886, 2013

山本隆彦, 越地耕二: 低周波数帯域用電磁ファントムの開発—カーボン材料の添加と評価—, 電気学会研究会試料 リニアドライブ研究会, 査読無, LD-13-083 ~103, pp.13-16, 2013

山本隆彦, 越地耕二, 福田亜希子: カー

ボン材料の添加による高含水ゲルファントムの広帯域化, エレクトロニクス実装学会平成 25 年度第 3 回超高速・高周波エレクトロニクス実装研究会, 査読無, Vol.13, No.3, pp.1-4, 2013_

T. Yamamoto, K. Koshiji, A. Fukuda : Improvement in the Electrical Characteristics of a High-hydrous Gel Phantom by the Addition of Inductive Materials at a Low-frequency Band, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol.22, No. 2, pp.144-149, 2014

[学会発表](計 6 件)

佐野貴紀, 山本隆彦, 越地耕二, 陳秀琴, 楊少明, 阿部正彦, 福田亜紀子: カーボンマイクロコイルによる高含水ファントムの低周波数帯域における電気的特性の改善, 第 22 回ライフサポート学会フロンティア講演会, 2013 年 3 月, 東京電機大学(東京都足立区)

町田雄太, 山本隆彦, 越地耕二: 詳細人体腕部モデルを用いた電磁界共振結合ボディエリア通信の検討, 2013 年 9 月, 生活生命支援医療福祉工学系連合大会 2013, 山梨大学(山梨県甲府市)

山本隆彦, 越地耕二: 低周波数帯域における高含水ゲルファントムの電気的特性改善, 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013 年 9 月, 福岡工業大学(福岡県福岡市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 隆彦 (YAMAMOTO, Takahiko)

東京理科大学・理工学部・講師 研究者番号:

50579761

(2) 研究協力者

越地 耕二 (KOSHIJI, Kohji)

東京理科大学・名誉教授 研究者番号:

60130332