

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360132

研究課題名(和文)電波測定用高精細人体ファントムの開発

研究課題名(英文)Development of human body phantoms for electromagnetic wave

研究代表者

伊藤 公一(Ito, Koichi)

千葉大学・フロンティア医工学センター・教授

研究者番号：90108225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：携帯電話に代表される携帯端末の普及に伴い、無線端末と人体の相互影響評価について、ファントムを用いた数多くの研究がなされてきた。しかしながら、既存のファントムは、全体が等しい電気定数をもつ均質ファントムであるため、カプセル内視鏡のように、人体深部の構造がその特性に大きな影響を及ぼす機器の評価においては、このような均質ファントムを用いるだけでは十分とは言えない。そこで、本研究では、人間の生体構造を十分に再現した生体等価電磁ファントム(電波測定用擬似生体)を開発した。さらに、カプセル内視鏡への非接触無線給電アンテナを考案し、開発したファントムを用いて、そのアンテナ特性の実験的評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The performances of antennas for mobile communications, which are used in vicinity of the human body, have been evaluated employing tissue equivalent phantoms. In these cases, "uniform" tissue equivalent phantoms are mainly employed. However, the uniform phantom is not suitable to evaluate performances of the antenna, which are used inside the human body such as capsular endoscope. Therefore, in this study, a realistic abdomen phantom has been developed. This phantom consists of muscle, lung, heart, liver, stomach, large intestine, and small intestine. In addition, as an example, the antenna for wireless power transmission of capsular endoscope has been developed. Moreover, performances of developed antenna have been investigated by the phantom. From the results, good agreements between calculation and measurement are observed. So, it is considered that the developed phantom is effective for performance evaluation of the antennas, which are used in and around the human body.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：人体電磁ファントム 電気定数 カプセル内視鏡 無線電力伝送

1. 研究開始当初の背景

近年、人体の近傍において、携帯電話以外にも電磁波の用途が広がりつつある。その一つがカプセル内視鏡である。これは、既存のいわゆる「内視鏡検査」と異なり、錠剤のような小さな内視鏡を飲み込むだけで検査が行えるという非常に画期的な技術であるため、注目を集めている。この全長 2 cm ほどの小さな内視鏡の内部には、それよりもさらに小さなアンテナが収められており、体内で撮影された画像はこのアンテナにより外部の診断装置へと送信される。

このカプセル内視鏡が現在抱えている問題として、供給電力による性能限界というものがある。現在利用されているカプセル内視鏡は、内蔵の電池のみを電力源としているため、体内で撮影を行う際に、その小さな電池では解像度や撮影回数に限界がある。そこで、最小限の電力量で効率のいい画像伝送を行うためには、通信品質の向上が必要不可欠となる。カプセル内視鏡のように、人体内部から通信が行われる場合、人体の影響によるアンテナ特性つまり通信品質の変動が非常に大きいため、それらを含めたアンテナの設計が大変重要である。しかしながら、現在利用されているカプセル内視鏡のアンテナは、複雑な人体構造の影響を実験的に評価する手法が確立されていないため、それらを考慮した設計が行われていない。

一方、最近では、「無線電力伝送技術」を応用し、体内のカプセル内視鏡へのワイヤレスによる電力の供給が検討されている。カプセル内視鏡への無線による電力供給については、これまで企業や大学(Kenji Shiba, *et al.*, "Energy Transmission Transformer for a Wireless Capsule Endoscope: Analysis of Specific Absorption Rate and Current Density in Biological Tissue," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.55, no.7, pp.1864-1871, July 2008.)などにより研究が行われている。その方式としては、「電磁誘導方式」が用いられている。電磁誘導方式では、カプセル内および体外に 2 種類のコイルを配置し、周波数にして約数百 kHz の磁界を体内に誘起させることで、ファラデーの法則によりカプセル内視鏡へと電力を送ることができる。しかしながら、現在のところ、カプセル内視鏡への無線電力供給は実用化に至っていない。その原因の一つとして、人体への影響評価が十分にされていないということが挙げられる。電磁誘導による電力供給では、体内に誘起された磁界による刺激作用および発熱の恐れがあるため、人体への安全性を裏付けるための検証を行う必要がある。

さらに、通信の際に、内視鏡から放射される電磁波による影響についても調査しなければならない。ここで、人体の安全性の評価指標として総務省では制限値が定められており、電磁誘導による電力供給のような数百 kHz の場合では体内の電流密度[A/m²]が用い

られ、通信のように UHF 帯 (300 ~ 3000MHz) が使用される場合は比吸収率 : SAR(Specific Absorption Rate[W/kg])が用いられる。

これらを定量的に評価するためには、実際に人体を使用することはできないため、ファントム(擬似生体)が広く用いられている。ファントムとは生体の物理的特性を模擬する物体であり、模擬する対象の物理特性に合わせてこれまでに、電磁波用ファントムや超音波用ファントムが提案されている。しかしながら、既存のファントムは、全体が等しい電気定数をもつ均質ファントムであるため、人体組織を忠実に再現したファントムは存在しない。携帯電話とは異なり、カプセル内視鏡のように人体深部の構造が大きな影響を及ぼす機器の評価においては、このような均質ファントムを用いるだけでは十分とは言えない。そこで、本研究は、カプセル内視鏡および人体との相互影響における、より詳細な実験的評価のために、実際の人間の生体構造を十分に再現した生体等価ファントム(リアルファントム)を開発することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、実際の人間の生体構造を十分に再現した生体等価電磁ファントム(電波測定用擬似生体)の開発を目的とする。携帯電話に代表される携帯端末の爆発的な普及に伴い、無線端末と人体の相互影響評価について、ファントムを用いた数多くの研究がなされてきた。しかしながら、既存のファントムは、全体が等しい電気定数をもつ均質ファントムであるため、人体の各組織が忠実に再現されたファントムは存在しない。さらに、今後ますます発展が期待されるカプセル内視鏡のように、人体深部の構造がその特性に大きな影響を及ぼす機器の評価においては、このような均質ファントムを用いるだけでは十分とは言えない。そこで、本研究では、実際の MR 画像を基に人体の内部構造を忠実に模擬したファントムを開発し、電波を利用した機器の実験的評価における新たな手法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では以下の手順で行った。

(1) 生体組織の同定

ファントム開発に必要な胴体内部における生体組織の同定を行う。そこで、まず、図 1 に示す人体の各組織を忠実に数値的に再現した高精細数値人体モデル(長岡智明ほか, "日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発," *生体医工学*, vol.40, no.4, pp.45-52, Dec. 2002.)を用いて、人体内部でのアンテナ特性および電磁波による生体組織への影響を詳細に数値解析する。これらの結果から、相互影響の評価に大きな影響を与える組織を 10 種類程度に限定する。



図1 高精度数値人体モデル

(2) 各生体組織と電気定数の等しいファントムの開発

これまで数種類の材料より、生体組織の誘電率および導電率にほぼ等しい値をもつ生体等価個体電磁ファントムを開発してきた。そこで、これまで培ったファントム作製プロセスを基に、(1)で同定した10種類程度の生体組織を模擬したファントムを開発する。また、人体は周波数により電気定数が変化するため、使用が予想される周波数に応じたファントムを開発する。

(3) 実験用ファントムの開発

最後に、(2)で開発した各組織のファントムを用い、実際に人体モデルを組み立てることで、胴体を模擬したリアルファントムを完成させる。そのために、同定を行った肝臓や小腸など、人体の各組織と近い形をしたファントムを作る必要がある。最初は、ファントムを作製するための「型」を開発する。図2に示すように、各組織のデータから、3Dプリンタを用いて各組織の型を作成する。また、開発したリアルファントムの有用性を検証するために、(1)で解析した計算機シミュレーションの結果と比較する。

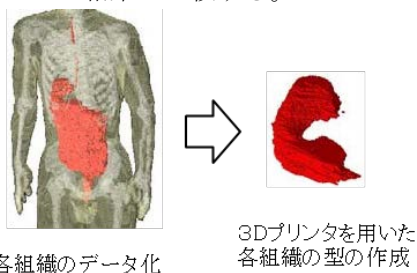


図2 リアルファントム作成の手順

4. 研究成果

(1) 臓器数の選定

体内組織を含む胴体を模擬した生体等価ファントムを作製するにあたり、全ての人体組織を模擬することは難しい。そこで、作製する人体組織の選定を、数値人体モデルを利用して検討した。数値人体モデルには、日本人平均成人男性を51種類の電気定数で模擬した高精度数値人体モデルの両腕と頭部を除いた胴体を利用した。体表から5mmの位置に電力送信用アンテナを想定したスパイ

ラルアンテナを粘着ゲルで貼付した。送信アンテナ素子の真下に、アンテナ間距離が34mmとなる小腸内にカプセル内視鏡を配置し、その周りを厚さ3mmの腸壁で覆った。数値人体モデルの電気定数を変化させた時の受信アンテナの反射係数および送受信アンテナ間の透過係数を計算した。

透過係数の結果を図3に示す。51種類の組織をもつ数値人体モデルの計算結果と筋肉、小腸および脂肪の数値人体モデルの計算結果が最も近くなった。小腸の電気定数は、筋肉の電気定数と差が大きく、カプセル内視鏡と密着しているため、受信アンテナの反射係数に大きく影響したと考えられる。また、脂肪の電気定数は、筋肉の電気定数と差が大きく、全身に分布しているため計算結果に大きく影響したと考えられる。以上より、カプセル内視鏡が小腸に位置する場合は、筋肉、小腸および脂肪の組織が特に影響が大きく、模擬する必要があると考える。

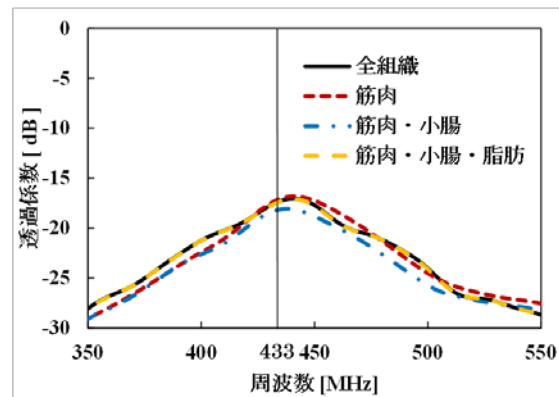


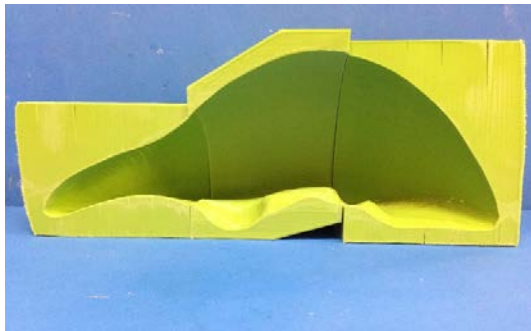
図3 組織と透過係数

(2) 臓器ファントムの作製

カプセル内視鏡が腹部にある場合は、筋肉・小腸および脂肪を模擬する必要があると分かったが、現在、カプセル内視鏡は大腸や胃などの消化管への応用も研究されている。したがって、大腸や胃も模擬する必要があると考えた。また、胃のカプセル内視鏡に電力を送る場合、肝臓や肺、心臓などの大きな臓器も影響があると考えられる。そこで、本研究では、まず模擬する組織を筋肉と臓器に限定する。模擬する臓器は、小腸、大腸、胃、肝臓、肺、および心臓である。これら臓器のファントムを作製するためには、ファントムの型を作製する必要があるものの、実際の人体を撮影した画像から臓器を選定して型を作製することは難しい。そこで、市販されている人体臓器モデルを利用して臓器ファントムの型を作製する。まず、購入した臓器モデルを、3Dスキャナを用いて数値データ化した。次にスキャンして得られた数値データを編集し、臓器の型データを作製した。そして、3Dプリンタを利用して臓器の型を作製した。

本研究では、型用の臓器モデルとして大阪人体模型センターが販売している「等身大全身内蔵トルソー アルティメット EX」を利用した。臓器は複雑な形状をしているため、実

際にファントムを作製した際に型からファントムを取り出しやすくするため、型は複数に分割した。図4に作製した臓器ファントムの型の一部を示す。大腸は、薄い中空のファントムを作製することが難しかったため、円柱で模擬することにした。小腸も体内でまともまっていることから、直方体の中に空洞を設けることで模擬することにした。また、胴体の型は、過去に本研究室で作製した成人男性モデルを元にした型を利用した。



(a) 作製した肝臓ファントムの型 (半分)



(b) 作製した胃ファントムの型 (半分)

図4 作製した臓器ファントムの型

(3) ファントムレシピの作成

胴体全体を模擬するにあたり、ベースとなる筋肉等価ファントムが必要である。筋肉等価ファントムのレシピは先行研究で作成されているが、作製する胴体ファントムは非常に大きく重さもあるため、自立形状を保つために先行研究のレシピよりも全体の材料に対する寒天の割合を高くした。また、新たに大腸、肝臓および胃の臓器ファントムのレシピを開発した。作製した臓器ファントムの区別が付きやすいように食紅を使用して染色した。

図5に作製した各臓器ファントムを示す。作製したファントムの妥当性を確認するために、電気定数の測定を行った。測定は10ヶ所で行い、その平均値を測定値としている。所望の周波数における比誘電率と導電率の値は、どの臓器ファントムも目標値と誤差10%以内であり、作製したファントムは妥当であると判断した。



(a) 肝臓ファントム



(b) 胃ファントム



(c) 心臓ファントム



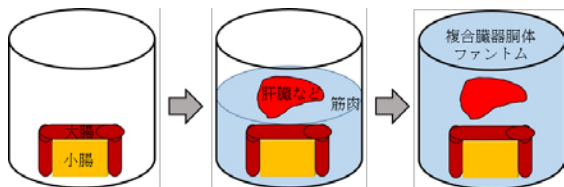
(d) 肺ファントム

図5 作製した臓器ファントム

(4) 複合臓器胴体ファントム

作製した筋肉ファントムおよび臓器ファントムを利用して体内も模擬した胴体ファントムの作製を行った。作製手順を図6に示す。まず、予め作製した小腸ファントムおよび大腸ファントムを胴体ファントムの型に

配置し、次に、大腸全体を覆うまで筋肉ファントムを胴体ファントムの型に流し込む。筋肉ファントムがある程度固まった後、その上に胃ファントムと肝臓ファントムを乗せ、再度、筋肉ファントムを、肝臓ファントムを覆うまで流し込む。筋肉ファントムがある程度固まった後、その上に肺ファントムと心臓ファントムを乗せ、最後に、筋肉ファントムを型全体に流し込み、複合臓器胴体ファントムを作製した。図7に作製した複合臓器胴体ファントムを示す。



(a) 臓器ファントムの配置手順



(b) 小腸ファントム・大腸ファントムの配置

図6 複合臓器胴体ファントム作製手順



図7 作製した複合臓器胴体ファントム

(5) 透過係数の測定

作製した複合臓器胴体ファントムの妥当性を確認するために、考案した受信アンテナおよび半波長ダイポールアンテナを用いて、透過係数の測定を行った。ダイポールアンテナ

は、電力送信用アンテナを想定して、体表から15 mmの位置に配置した。ネットワークアナライザを用いて、ダイポールアンテナを体軸方向に配置した場合の透過係数の測定を行った。図8に計算結果との比較を示す。数値計算の結果と測定結果が概ね一致したことから、作製した胴体ファントムは妥当であると考えられる。

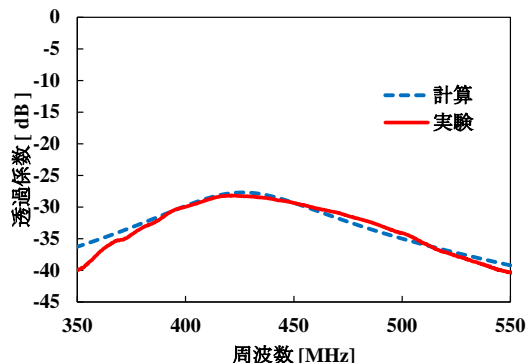


図8 計算結果と実験結果の比較

また、筋肉のみで模擬したファントムを用いた場合よりも体内を数種類の臓器で模擬したファントムを用いた場合の方が、透過係数が低いことが分かった。これは、一種類の電気定数で模擬した場合よりも数種類の電気定数で模擬した場合の方が、様々な場所で電磁波の反射が起こり減衰したためであると考えられる。以上の結果から、多臓器ファントムで検討する必要性が確認された。

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)

①井之上瑞紀, 菅良太郎, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公二, “生体等価ファントムの温度変化が人体通信用アンテナの入力インピーダンスに与える影響の評価,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol.J97-B, no.7, pp.574-577, July 2014.

②Shogo TSUZAKI, Kazuyuki SAITO, Masaharu TAKAHASHI, and Koichi ITO, “Development of antenna for wireless power transmission to capsular endoscope,” IEICE Communications Express, 査読有, vol.3, No.4 pp.138-143, Apr. 2014.

③Ryotaro SUGA, Mizuki INOUE, Kazuyuki SAITO, Masaharu TAKAHASHI and Koichi ITO, “Development of multi-layered biological tissue-equivalent phantom for HF band,” IEICE Communications Express, 査読有, vol.2, no.12 pp.507-511, Dec. 2013.

④菅良太郎, 井之上瑞紀, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公二, “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, 査読有, vol.J96-B, no.9, pp.964-970, Sep. 2013.

[学会発表] (計 20 件)

①武井大輔, 齊藤一幸, 伊藤公二, “カプセル内視鏡への無線電力供給評価のための生体

等価ファントム,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, p.590, 滋賀, Mar. 2015.

②Daisuke TAKEI, Kazuyuki SAITO, and Koichi ITO, "Small Antenna Stowed in Capsular Endoscope for Wireless Power Transmission," 2015 International Workshop on Antenna Technology (iWAT2015), pp.355-356, Soul, Korea, Mar. 2015.

③Koichi ITO, Daisuke TAKEI, and Kazuyuki SAITO, "Microwave Antennas for Wireless Power Transmission to Capsular Endoscope," 2015 International Workshop on Antenna Technology (iWAT2015), p.22, Soul, Korea, Mar. 2015.

④Daisuke TAKEI, Kazuyuki SAITO, Masaharu TAKAHASHI, and Koichi ITO, "Design of receiving antenna for wireless power transmission to capsular endoscope," 31st URSI General Assembly and Scientific Symposium, Beijing, China, Aug. 2014.

⑤津崎翔吾, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “カプセル内視鏡への無線電力伝送システムの開発,” 2014 年電子情報通信学会総合大会, p.167, 新潟, Mar. 2014.

⑥武井大輔, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “カプセル内視鏡用無線電力伝送アンテナ,” 2014 年電子情報通信学会総合大会, p.166, 新潟, Mar. 2014.

⑦戸梶敬規, 津崎翔伍, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “カプセル内視鏡への無線電力伝送-送信アンテナの位相制御による-,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.87, 東京, Mar. 2014.

⑧紺翔平, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “カプセル内視鏡への無線電力伝送のための人体電磁ファントム,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.64, 東京, Mar. 2014.

⑨Shogo TSUZAKI, Kazuyuki SAITO, Masaharu TAKAHASHI and Koichi ITO, “Development of antenna for wireless power transmission to capsular endoscope,” Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, pp195-200, Hanoi, Vietnam, Jan. 2014.

⑩Koichi ITO and Ho-Yu Lin, “Physical Human Phantoms for Evaluation of Implantable Antennas,” IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies For Biomedical and Healthcare Application (IMWS-Bio 2013), Singapore, Dec. 2013.

⑪Koichi ITO, “Wearable antennas for body-centric wireless communications,” Proceeding of Third International Symposium on InfoComm and media Technology in Bio-Medical and Helthcare Application, pp.8-9, Taoyuan, Taiwan, Nov. 2013.

⑫齊藤一幸, 井之上瑞紀, 菅良太郎, 高橋応明, 伊藤公一, “HF 帯用生体等価電磁ファン

トムの電気定数測定,” 日本ハイパーサーミア学会第 30 回大会, p.168, 神奈川, Aug. 2013.

⑬井之上瑞紀, 齊藤一幸, 菅良太郎, 高橋応明, 伊藤公一, “HF 帯における生体等価電磁ファントムの開発,” 日本ハイパーサーミア学会第 30 回大会, p.194, 神奈川, Aug. 2013.

⑭Mizuki INOUE, Ryotaro SUGA, Kazuyuki SAITO, Masaharu TAKAHASHI, and Koichi ITO, “Development of biological tissue-equivalent agar-based solid phantom in HF band,” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), p.1482, Stockholm, Sweden, Aug. 2013.

⑮津崎翔伍, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “アレリアンテナを用いたカプセル内視鏡への無線電力伝送,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, p.176, 岐阜, Mar. 2013.

⑯井之上瑞紀, 菅良太郎, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “HF 帯用生体等価ファントム開発のための基礎検討,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, p.358, 岐阜, Mar. 2013.

⑰武井大輔, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, “カプセル内視鏡への無線電力供給のためのファントム形状の検討,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.112, 東京, Mar. 2013.

⑱小泉真人, 高橋応明, 齊藤一幸, 伊藤公一, “カプセル内視鏡への無線電力伝送用受信アンテナの基礎検討,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.83, 東京, Mar. 2013.

⑲大屋祐一郎, 高橋応明, 齊藤一幸, 伊藤公一, “高精細人体モデルを用いたインプラントブルアンテナの特性評価,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.82, 東京, Mar. 2013.

⑳菅良太郎, 齊藤一幸, 高橋応明, 井之上瑞紀, 伊藤公一, “HF 帯における生体等価ファントムの電気定数測定に関する基礎検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, AMT2012-8, pp.7-10, 那覇, Dec. 2012.

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 公一 (ITO, Koichi)
千葉大学. フロンティア医工学センター・教授
研究者番号 : 90108225

(2)研究分担者

高橋 応明 (TAKAHASHI, Masaharu)
千葉大学. フロンティア医工学センター・准教授
研究者番号 : 70267342

齊藤 一幸 (SAITO, Kazuyuki)
千葉大学. フロンティア医工学センター・准教授
研究者番号 : 80334168