

広帯域で利用可能な生体等価ファントムの開発

生体の電気特性を模擬したモデルであるファントムは、移動端末のアンテナ特性評価や電磁波吸収量測定に用いられている。今回、3～10GHzと広帯域で利用可能なファントムを開発した。なお、本研究は千葉大学 フロンティアメディカル工学研究開発センター 伊藤研究室（伊藤公一教授）との共同研究により実施した。

おおにし てるお うえばやし しんじ
大西 輝夫 上林 真司

1. まえがき

移動端末は、通常人体近傍で使用されるため、人体と電磁波の相互影響が生じる。移動端末から放射された電磁波が人体に吸収される電力は、比吸収率（SAR：Specific Absorption Rate）で表される。一方、人体がアンテナ特性におよぼす影響としては、入力インピーダンス、放射指向性、放射効率などの変化が挙げられ、人体近傍使用時に自由空間中と比べてアンテナ特性の劣化が少ないことが望まれる。しかしながら、実人体を用いて内部の吸収電力を測定することは不可能に近いことや、体型などの個人差による測定のみばらつきや再現性の問題を減らすために、生体等価ファントムと呼ばれる模擬人体が用いられている[1]。これは、生体組織の電気特性（比誘電率、導電率）を等価的に模擬したものであり、球や立方体などの単純な形状から人体に近い形状のものまでさまざま、用途により使い分けられている。ファントムには、計算機シミュレーションに用いる数値ファントムと実験に用いる実験ファントムがあるが、本稿では実験ファントムについて述べる。

生体等価ファントムには、液体あるいは固体ファントムがある。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測定法に採用されている[2]。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、一度型を製作すれば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となる。これらのファントムは、3GHz以下の主に移動端末で用いられている

周波数（例えば、1950MHz）ごとに開発されている[3][4]。

一方で、5.2GHz帯無線LANや第4世代移動通信用周波数として5～6GHz帯以下の利用が検討されている。また、3.1～10.6GHz帯を利用するUWB（Ultra WideBand）通信技術が開発されている。このように今後、3GHz以上の周波数帯や広帯域な無線通信が実用化され、これらの移動端末も人体近傍で使用される可能性が大きい。したがって、電磁波吸収量やアンテナ特性を評価するために、高周波数もしくは広帯域な周波数特性を持つファントムが必要となる。

本稿では、開発した広帯域生体等価固体ファントムの組成および電気的特性、さらに、ファントム電気特性の差がアンテナ特性に与える影響について述べる。

2. 生体等価固体ファントム

生体等価固体ファントムは、主に寒天で固形化した寒天ファントムとセラミックを用いたドライファントムが挙げられる[1]。寒天で液体材料を固体化したファントムは、材料の入手や製作が容易であることから広く使用されている。また、800～2500MHzにおいて脳組織と等価な電気特性が模擬可能であることが報告されている[3]。一方、ドライファントムは水分を含有しないため特性の経時変化がほとんどない点が優れている。しかしながら、水の代わりにカーボンや高誘電材料で電気特性を制御しているため、広帯域な周波数特性を得ることが難しい。したがって、本研究では広帯域な周波数特性に着目し、寒天ファントムについて検討を行った。本ファントムの特徴を以下に示す。

- ・自立形状（容器が不要）
- ・材料の入手が容易
- ・製作が容易
- ・任意形状、多層構造の製作が可能
- ・高含水組織を模擬（脳、筋肉など）

日本人男性の平均値を基に製作した上半身ファントムを例として写真1に紹介する。このように、一度型を用意すれば容易にファントムを製作可能で、液体ファントムと異なりファントムを入れる容器も必要ない。



写真1 上半身ファントム (千葉大学 伊藤研究室提供)

3. 生体等価固体ファントムの組成および電気特性

3.1 電気特性の調整

本研究で用いた寒天ファントムの組成例を表1に示す。本ファントムは、寒天により自立形状を保持し、水分の分離を防いでいる。また、TX-151は増粘剤、デヒドロ酢酸ナトリウムは保存料として用いている。

5.2GHzにおけるファントム電気特性と組成の関係を図1に示す。横軸が比誘電率、縦軸が導電率を示しており、各点は、ポリエチレン粉末と塩化ナトリウム量を変化させた場合の電気特性を表している。図より明らかなように、ポリエチレン粉末の量を変化させると比誘電率、導電率の値が、塩化ナトリウム量を変化させると主に導電率が変化することが分かる。したがって、ポリエチレン粉末と塩化ナトリウム量を調整することにより、所望の電気特性を得ることができる。比較のために、生体電気特性として脳および筋肉の平均値[5]を示した。これらの値は図中に存在しており、塩化ナトリウムとポリエチレン粉末量を調整することにより5.2GHzにおいて生体等価固体ファントムが製作可能であることが分かる。また、それ以外の周波数においても、ポリエチレン粉末と塩化ナトリウム量を調整することにより所望のファントムを製作可能である[6]。

3.2 周波数特性

本ファントムの周波数特性 (0.9~10GHz) について測定した結果を図2に示す。筋肉の生体電気特性の平均値に2/3を乗じた値 (以後、2/3筋肉モデル) を目標値とした。これは、胴体を外部から見込んだ際の電気特性が筋肉の電気特性のほぼ2/3と等価であることから用いた。エラーバーは、目標値±10%を表している。図より明らかなように、全周波数帯域において比誘電率の測定結果は±10%以

表1 寒天ファントムの組成例

| 材料名 | 重量[g] |
|-------------|--------|
| 脱イオン水 | 3375.0 |
| 寒天 | 104.6 |
| 塩化ナトリウム | 21.5 |
| デヒドロ酢酸ナトリウム | 2.0 |
| TX-151 | 57.1 |
| ポリエチレン粉末 | 548.1 |

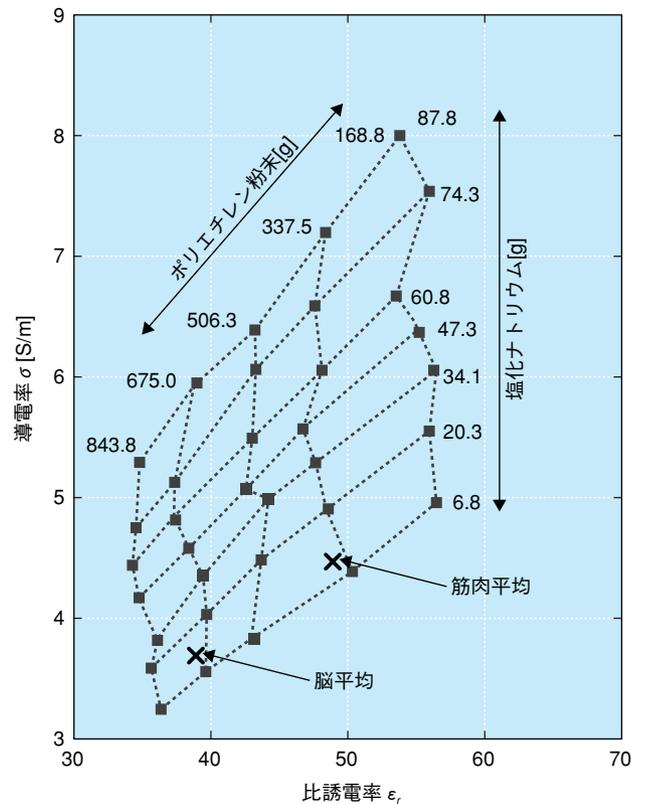


図1 5.2GHzにおけるファントム電気特性と組成の関係

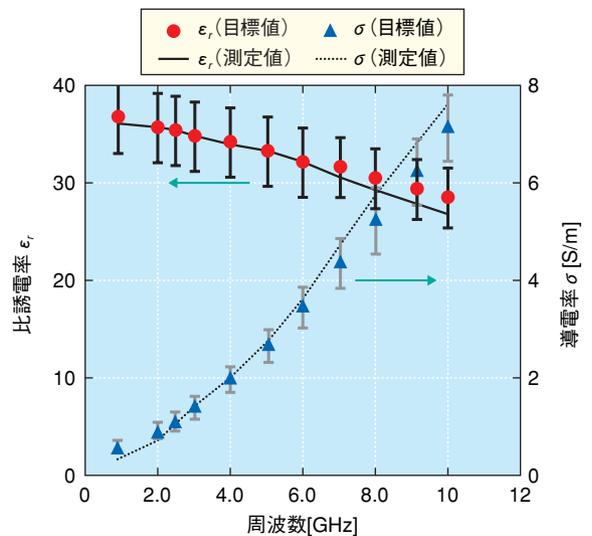


図2 ファントム周波数特性

内に収まっており、また導電率も3GHz以上で±10%以内である。3GHzより低い周波数で導電率に差が生じているものの、3～10GHzにおいて目標値の±10%以内でファントムを製作可能であることが分かった。脳平均を目標値とした場合でも同様な結果が得られている。また、各周波数における目標値に合うように組成比を調整すれば広い周波数範囲で利用可能である。

4. ファントム電気特性の差が与える影響

目標とする電気特性とファントム電気特性との差がSARやアンテナ特性に与える影響をあらかじめ評価しておくことは有用である。本稿では、半波長ダイポールアンテナと平板ファントムを用いて数値計算により評価を行った。評価用モデルを図3に示す。ダイポールアンテナの給電点を対向するファントム面の中心に配置し、アンテナとファントム表面からの距離を10mmとした。ダイポールアンテナは、完全導体とし各周波数に応じてほぼ半波長(0.47波長)になるように設定した。図2で示した2/3筋肉モデルの実測および目標値の電気特性を用いてFDTD(Finite-Difference Time-Domain)法*により計算を行った。

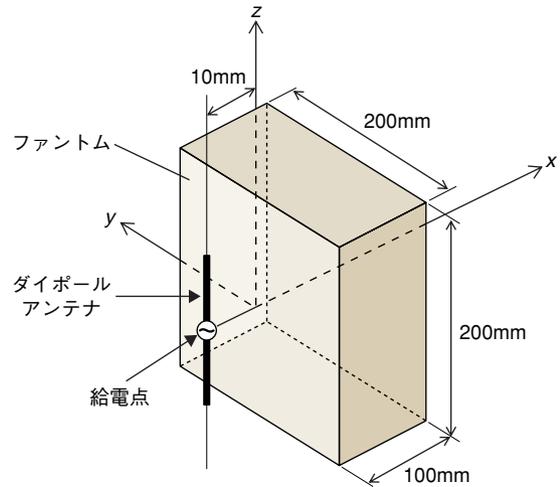


図3 評価用モデル

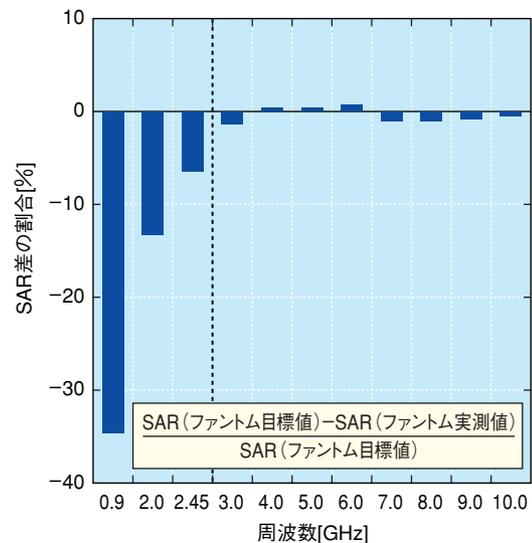


図4 電気特性の差によるSARへの影響

4.1 SAR

SARは、生体組織に吸収されるエネルギーを表す指標であり、以下の式で定義される。

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

ここで、 σ は生体組織の導電率[S/m]、 E は電界強度(実効値)[V/m]、 ρ は生体組織の密度[kg/m³]である。SARの計算結果を図4に示す。縦軸は、実測したファントム電気特性を用いて計算したSARが、目標の電気特性を用いて計算したSARからどれくらいずれているかを示している。ここでのSARは、10gの立方体組織にて平均を行ったものである。図より明らかなように、3GHz以上では差はほぼ1.5%に収まっており、実用上問題ない。一方、3GHzより低い周波数では、差が大きくなっている。これは、低い周波数ではファントムの導電率が目標値からずれていることが原因と考えられる。

4.2 アンテナ特性

次に電気特性の差による放射効率への影響について評価した結果を図5に示す。放射効率については、アンテナを

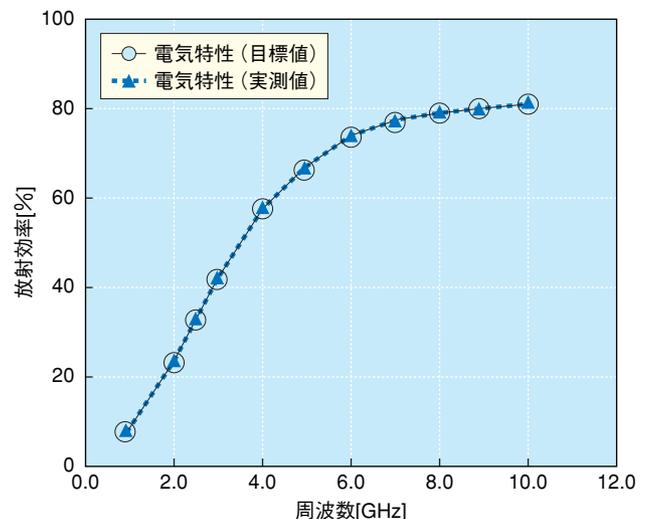


図5 電気特性の差による放射効率への影響

* FDTD法：有限差分時間領域法で、マクスウェルの方程式を直接差分化し時間領域で計算する手法。SARやアンテナ特性の評価に用いられている。

完全導体と仮定したため、アンテナ入力電力と放射電力の比を示している。結果として、SARの結果と異なり、3GHzより低い周波数でもファントム電気特性の差による影響はほとんどなかった。入力インピーダンス特性ならびに放射パターンについても同様な結果が得られている[7]。

5. あとがき

今後のさまざまな周波数や広い帯域を利用する通信に対応すべく、生体等価固体ファントムの開発を行った。さらに、ファントム電気特性の差がSARやアンテナ特性に与える影響について数値計算により検討を行い、アンテナ特性については0.9～10GHzの範囲で単一の組成比で対応可能であることを示した。SARについては、3GHzより低い周波数でファントム電気特性の差が大きくずれが生じるものの、3～10GHzではSARに与える影響は小さくほとんど問題なく使用できることが分かった。もちろん、各周波数における目標値に合うように組成比を調整すれば広い周波数範囲で利用可能である。今後は、ファントムの保存性についてさらに改良を進めていく。

文 献

- [1] 人体電磁ファントム研究会：“人体電磁ファントムに関する調査研究の体系化,” 信学会, ソサイエティ活性化事業, Sep. 2003.
- [2] IEC 62209-1: “Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices-Human models, instrumentation, and procedures-,” First edition, Feb. 2005.
- [3] 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,” 信学誌, Vol. J81-B-II, No. 12, pp. 1126-1135, Dec. 1998.

- [4] T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada and S. Uebayashi: “Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation,” IEEE Trans. Microwave theory and techniques, Vol. 41, No. 1, pp. 136-140, Jan. 1999.
- [5] <http://www.fcc.gov/fcc-bin/dielec.sh>
- [6] T. Onishi, R. Ishido, T. Takimoto, K. Saito, S. Uebayashi, M. Takahashi and K. Ito: “Biological tissue-equivalent agar-based solid phantoms and SAR estimation using the thermographic method in the range of 3-6 GHz,” IEICE Trans., Vol. E88-B, No. 9, pp. 3733-3781, Sep. 2005.
- [7] 滝本 拓也, 大西 輝夫, 齊藤 一幸, 高橋 応明, 上林 真司, 伊藤 公一：“UWB通信帯域における生体等価ファントムの特性,” 信学誌, Vol. J88-B, No. 9, pp. 1674-1681, Sep. 2005.

用 語 一 覧

FDTD : Finite-Difference Time-Domain
 SAR : Specific Absorption Rate (比吸収率)
 UWB : Ultra WideBand