

UHF 波帯移動体端末用アンテナ設計のための人体のモデリングに関する検討

木南 克規[†]

和田 寛規[†]

平田 晃正^{†a)} (正員)

塩沢 俊之[†] (正員)

A Study on the Human Body Modeling for Mobile Terminal Antenna Design at UHF Band

Katsuki KIMINAMI[†], Hiroki WADA[†], Nonmembers,
Akimasa HIRATA^{†a)},
and Toshiyuki SHIOZAWA[†], Regular Members

[†] 大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻, 吹田市

Department of Communication Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita-shi, 565-0871 Japan

a) E-mail: hirata@comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし 本論文では, 解剖学的に厳密な人体全身モデル (リアルモデル) 及び形状は厳密であるが均質媒質からなるモデル (均質等価モデル) を用いて, 人体の不均質性が UHF 波帯アンテナの放射特性に与える影響について検討し, 人体の不均質性がアンテナの放射特性に与える影響は十分小さいことを明らかにしている。

キーワード リアルモデル, 均質等価モデル, 放射特性, UHF 波帯移動体端末用アンテナ

1. ま え が き

人体近傍で使用されるアンテナを設計, 開発するにあたっては, 人体の存在がアンテナの放射特性に与える影響について, 定性的かつ定量的に評価することが望ましい [1]。しかしながら, 実際の人体を用いた実験によりその影響を詳細に検討することは, 多くの不確定要素を含むため, 簡単とはいえない。そのため, 人体の形状及び組織構成を考慮した数値解析用人体モデル (リアルモデル) を構築し, それを用いて数値計算を行うことにより, 人体のアンテナ放射特性に与える影響を検討することは意義深い。

ところで, UHF 波帯の低い周波数帯及び UHF 波帯より低い周波数帯では, 携帯電話端末などとは異なり, 移動体端末は人体胴体部近傍で用いられる場合がある。また, アンテナの寸法が比較的大きくなるため, アンテナの放射特性を評価するために全身あるいはそれに近い人体モデルを用いる必要がある。しかしながら, リアルモデルは非常に複雑であり, それを計算機上で取り扱うには, 多くの労力及び計算コストが必要となる。そのため, 従来の研究では, 人体のアンテナの放射特性への影響を調べるために, リアルモデルの代わりに, 均質媒質からなり, 形状が直方体や円柱等

の簡単なモデルが用いられてきた [2] ~ [4]。しかしながら, 人体の組織構成を単純化し, 人体を均質であると仮定したこれらのモデルが, どの程度の妥当性を有しているかに関しては, 十分検討されてはいないようである。

そこで本論文では, 400 MHz で動作する半波長ダイポールアンテナを用いて, 人体の不均質性がアンテナの放射特性に与える影響について定量的に評価することにより, 人体の組織構成を単純化したモデルを用いることの妥当性について検討する。

2. 解析モデルと手法

2.1 解析モデル

解析に用いるリアルモデルは, インターネットサイト [5] から得たものである。このモデルは, 1 辺 3 mm の立方体セルから構成されており, その大きさは 58.8 cm × 34.2 cm × 187.8 cm である。組織構成は皮膚, 脂肪, 筋肉, 骨, 脳組織, 眼球組織, 臓器等 38 媒質からなる。また, 形状のみ厳密で組織構成を一律な媒質で単純化したモデル (均質等価モデル) は, 形状がリアルモデルと等しく, 均一媒質として 2/3 筋肉等価媒質を用いたものである。400 MHz における 2/3 筋肉等価媒質の媒質定数の値は, 比誘電率 $\epsilon_r = 38.6$, 導電率 $\sigma = 0.55$ S/m である。

2.2 解析手法

本論文では, 電磁界を計算するための手法として, FDTD 法 [6] を用いる。この際, 吸収境界条件としては, 精度が良く, 実装が比較的容易な Berenger の PML (8 層) を用いる。また, FDTD 法では, 複雑な構造をした物質を取り扱う際には, その媒質境界を正確にモデル化するために, 細かいセルサイズを用いる必要がある。しかしながら, 細かいセルを用いると計算機への負荷が大きくなる。そこで本論文では, 誘電体サブグリッド法 [7] を用いて, 人体モデルを取り扱うことにする。この手法を用いることにより, 簡単な事前処理を加えるだけで, FDTD 法において, セルサイズの 1/2 の解像度の構造物を扱えるようになる。したがって, 本論文ではセル長をモデルの解像度の 2 倍である 6 mm に選ぶ。

次に, 人体全身モデルとアンテナの位置関係を図 1 に示す。一般に業務用移動体端末では, アンテナは人体腹部, 腰部, あるいは肩部などに装着される [8]。そこで本論文では, 一例として, アンテナを人体腹部前面に配置するものとし, 地面から給電点までの高さは 108 cm とする。電磁波源としては, アンテナ長が

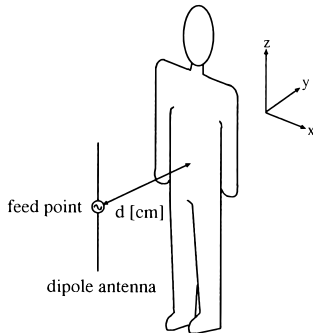


図1 人体モデルとアンテナの位置関係
Fig.1 Geometry of the problem.

35.4 cm, 直径が 1.0 mm の半波長ダイポールアンテナを用いる。ただし, アンテナの寸法は共振周波数がおおよそ 400 MHz 帯になるように選択した。給電方法としては無限小ギャップ給電を用いた [9]。また, アンテナは実際の無線機使用状態を想定して鉛直方向に配置した。

3. 解析結果

3.1 アンテナの入力インピーダンスとインピーダンス不整合による反射電力

ダイポールアンテナを図1のように配置し, 人体とアンテナ間の距離 d を変化させた場合の, アンテナの入力インピーダンスの変化を図2に示す。また, リアルモデル及び均質等価モデルを用いて得られた数値解析結果とともに, 実際の人体を用いた実験結果についても示す。図中の表記 (1), (2) は, 被験者を変えて測定した場合の結果を示している。また, 真空中でのダイポールアンテナの入力インピーダンスは $Z_i = 70.95 + 0j [\Omega]$ である。ここで, 本論文では人体とアンテナ間の距離 $d = 3 \text{ cm}$ 以上について解析を行う。これは, 本論文で用いた人体全身モデルの場合, $d = 3 \text{ cm}$ 以下では, アンテナと人体モデルが接触し, 正確な計算が行えなくなるためである。

図2から, アンテナの入力抵抗及び入力リアクタンスは, 距離とともに変化する様子がわかる。振動の中心はほぼ自由空間中の値であり, アンテナとモデル間の距離 $d \rightarrow \infty$ では自由空間中の値に収束すると考えられる [10], [11]。また, リアルモデルあるいは均質等価モデルのどちらのモデルを用いた場合でも, 得られた結果は, 実際の実験結果によく一致していることがわかる。均質モデルを用いた場合の結果とリアルモデルを用いた場合の結果との比較から, 人体を均質

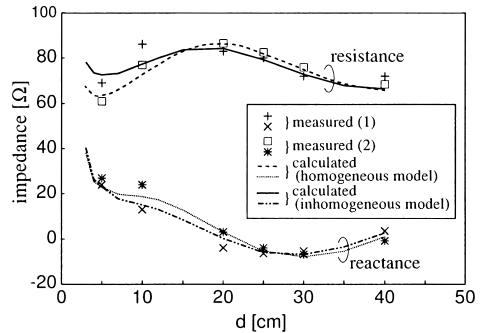


図2 人体モデル存在下でのアンテナの入力インピーダンス
Fig.2 Input impedance of the antenna in the presence of the human body model.

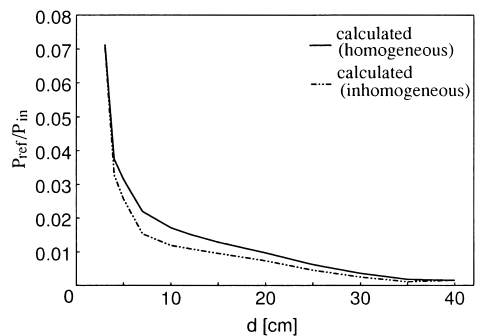


図3 インピーダンス不整合による反射電力
Fig.3 The power reflected by the impedance mismatch.

と仮定することにより生じる誤差は最大で約 10Ω 程度であることがわかる。しかしながら, この誤差は, 実験において被験者の違いにより生じる差異と同程度であることがわかる。

次に, 図2に示した入力インピーダンスの変化により生じる反射電力の変化を図3に示す。図において, P_{ref} は反射電力, P_{in} はアンテナへの入力電力である。図3より, 均質等価モデルを用いたときの反射電力の変化の様子は, おおむねリアルモデルを用いた場合の結果と同様であることがわかる。 $d = 5 \text{ cm}$ 以下では, 値が急激に増加しているが, これは, アンテナと人体との相互作用 (近傍界の影響) がより大きくなるためであると考えられる。また, 人体を均質と仮定することにより, 反射電力を若干大きく見積もるものの, 生じる反射電力の誤差は最大で 1% 程度であり, その値はアンテナ設計の点からみると非常に小さい。

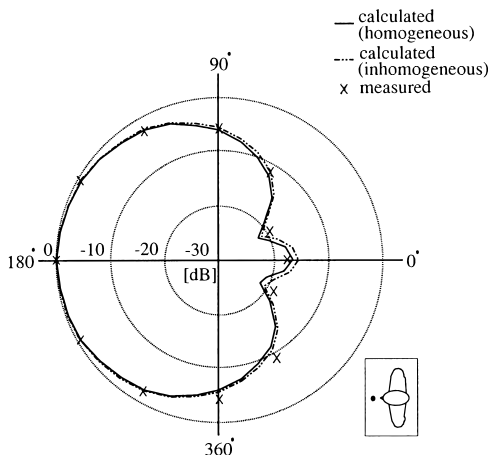


図4 人体存在下でのダイポールアンテナの放射指向性 ($d=10$ cm)

Fig. 4 The radiation pattern of the dipole antenna in the presence of the human body model ($d=10$ cm).

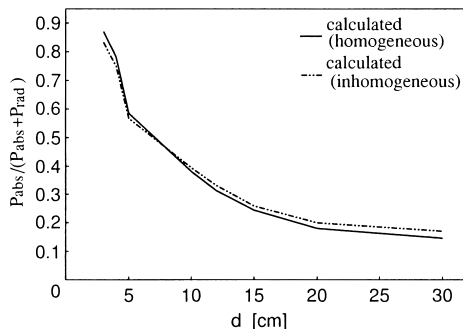


図5 人体モデルに吸収される電力

Fig. 5 The amount of the power deposited in the human body model.

3.2 アンテナの放射指向性

図4に、アンテナの給電点を含む水平面内 (x - y 平面, 図1参照) におけるアンテナの放射指向性の数値解析結果及び実際の人体を用いた実験結果を示す。ここで、人体モデルとアンテナ間の距離は10 cm とする。また、図4において、 0° の方向が人体モデルの存在する方向である。図4から、放射指向性に関しては、数値解析結果と実験結果はほどよく一致していることがわかる。また、均質等価モデルを用いた場合の結果とリアルモデルを用いた場合の結果も非常によく一致し、人体を均質と仮定することにより生じる誤差は十分小さいことがわかる。

3.3 モデルに吸収される電力

ダイポールアンテナから放射される電力に対するモデルに吸収される電力の割合 $P_{abs}/(P_{abs} + P_{rad})$ を図5に示す。ここで、 P_{abs} はモデルに吸収される電力、 P_{rad} は放射電力である。図5から、人体とアンテナ間の距離が大きくなるにつれて人体モデルに吸収される電力の割合は減少していく様子がわかる。また、均質等価モデルを用いた場合の吸収電力の変化の様子はリアルモデルに対する結果とおおむね同様であり、吸収される電力量もほぼ一致している。

4. むすび

本論文では、形状及び組織構成が厳密な人体全身モデル (リアルモデル) 及び形状は厳密であるが、組織構成を単純化した均質媒質からなるモデル (均質等価モデル) を用い、人体の不均質性がアンテナの放射特性に与える影響について検討した。特に、人体が存在することによる半波長ダイポールアンテナの入力インピーダンス、水平面内の放射指向性、人体モデルに吸収される電力の割合の変化について計算を行った。

その結果、均質等価モデルを用いた場合、リアルモデルを用いた場合の結果と比較して、アンテナの放射特性に多少の誤差が生じることがわかった。しかしながら、生じた誤差はアンテナ設計の点からみると十分小さく、また、それは実際の人体の個体差により生じる差異と同程度であることがわかった。

ここでは誌面の都合上示さないが、アンテナを腰部後方に配置した場合及びアンテナとして筐体上モノポールアンテナを用いた場合についても同様の結果が得られた。また、本論文では一例として400 MHz 帯を取り扱ったが、より低い周波数帯では、人体組織と比べて波長が長くなるため、人体の不均質性の影響は更に小さくなることを付記しておく。

謝辞 本研究を行うに際し、御協力頂いた関西大学助教授堀井康史博士、大阪大学大学院工学研究科足立隆彦氏に深謝する。

文 献

- [1] M. Burkhardt and N. Kuster, "Review of exposure assessment for handheld mobile communications devices and antenna studies for optimized performance," in Rev. Radio Science 1996-1999, W.R. Stone ed., chap.34, Oxford Univ. Press, 1999.
- [2] 伊藤公一, "アンテナ・伝搬研究における人体のモデル化," 信学誌, vol.82, no.9, pp.956-966, Sept. 1999.
- [3] 小柳芳雄, 小川晃一, "人体近傍におかれたダイポールアンテナの解析," 1996 信学秋期大会, B-80, 1996.
- [4] 小柳芳雄, 朝比奈敏寛, 小川晃一, 伊藤公一, "150 MHz

- 帯小型アンテナ解析用の人体ファントムモデルに関する一検討” 信学論 (B), vol.84-B, no.1, pp.142–145, Jan. 2001.
- [5] ftp://starview.brooks.af.mil/EMF/dosimetry_models
- [6] A. Taflové, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, MA, 1995.
- [7] G. Marrocco, M. Sabbadini, and F. Bardati, “FDTD improvement by dielectric subgrid resolution,” IEEE Trans. Microwave Theo. Tech., vol.46, no.12, pp.2166–2169, 1998.
- [8] C. Hill and T. Kneisel, “Portable radio antenna performance in the 150, 450, 800, and 900 MHz bands “Outside” and In-Vehicle,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.40, no.4, pp.750–756. 1991.
- [9] S. Watanabe and M. Taki, “An improved FDTD model for the feeding gap of a thin-wire antenna,” IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol.8, no.4, pp.154–158, 1998.
- [10] 渡辺聡一, 多氣昌生, 野島俊雄, “携帯無線機のアンテナ入力インピーダンスに対する人体頭部との相互作用による影響” 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.9, pp.557–565, Sept. 1996.
- [11] J. Cooper and V. Hombach, “The specific absorption rate in a spherical head model from a dipole with metallic walls nearby,” IEEE Trans. Electromag. Compat., vol.40, no.4, pp.377–382, 1998.
- (平成 14 年 5 月 15 日受付, 7 月 10 日再受付)