

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会 **B** 論文誌 通 信

VOL. J97-B NO. 7

JULY 2014

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

研究速報

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

井之上瑞紀[†] (学生員) 菅 良太郎[†] (学生員)

齊藤 一幸^{††a)} (正員) 高橋 応明^{††} (正員: シニア会員)

伊藤 公一^{††} (正員: フェロー)

Impact Evaluation from Temperature Dependent of Tissue-Equivalent Phantom to Input Impedance of Antenna for Body-Centric Wireless Communications

Mizuki INOUE[†], Ryotaro SUGA[†], *Student Members*,

Kazuyuki SAITO^{††a)}, *Member*,

Masaharu TAKAHASHI^{††}, *Senior Member*, and

Koichi ITO^{††}, *Fellow*

[†] 千葉大学大学院工学研究科, 千葉市

Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学フロンティア医工学センター, 千葉市

Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

a) E-mail: kazuyuki_saito@faculty.chiba-u.jp

あらまし 生体等価ファントムを利用したアンテナの特性評価において、ファントムの温度変化に伴い電気定数が変化し、アンテナの入力インピーダンスに影響を与える可能性があるため、温度変化がファントムの電気定数とインピーダンスに及ぼす影響について検討した。

キーワード 生体等価ファントム, 温度変化, 電気定数, アンテナ入力インピーダンス

1. ま え が き

人体通信 [1] では、通信機器を人体に近接若しくは装着して使用するため、人体近接時におけるアンテナの特性を定量的かつ客観的に評価する必要がある。そこで、再現性のある実験を行うために、生体組織と電気定数 [2] (比誘電率 ϵ_r , 導電率 σ S/m) が等価な模擬人体 (以下、ファントム) が用いられている。ファントムは、セラミック製の固体ファントムや、水溶液を用いた液体ファントムなど、用途により様々な種類が存在する [3]。その中でも本論文では、寒天で液体材料を固体化した半固体ファントムについての検討を行う。通常、ファントムは、測定環境の温度 (例えば室温) において実際の生体の温度 (体温) における電気定数を実現するように調整されている。

ところで、誘電体は温度によってその電気定数が変化することが知られている [4]。そのため、誘電体である半固体ファントムも、温度によって電気定数が変化することが考えられる。ファントムの温度が大きく変

化する状況の一例として、ファントムの腐食、及び、カビの発生を防止するため、冷蔵保存したファントムを使用する場合や、空調が不十分な冬季の室内で実験を行う場合などが挙げられる。ファントムを冷蔵庫から取り出して即座に測定に使用した場合と、冷蔵庫から取り出してから長時間測定環境に放置してから測定に使用した場合は、当然のことながらファントムの温度は異なる。また、半固体ファントムは周囲環境の温度に影響を受けるため、室温によって温度が変わることも考えられる。更に、人体やファントムなどの誘電体に近接して使用されるアンテナは、近接している誘電体の電気定数によってアンテナ特性が変化する。したがって、再現性があり、より高精度にファントムを用いたアンテナ特性評価を行うためには、ファントムの温度と電気定数の関係を把握しておくことが重要である。しかしながら、これまで、ファントムの温度と電気定数の関係を明らかにした検討はあまり行われていない。

そこで本論文では、ファントムの温度と電気定数の関係を明らかにすることを目的とし、検討を行った。近年、人体通信技術が注目され、ファントムを用いた様々な検討が数多く行われていることから、人体通信用ファントムにおいて温度依存性を検討した。まず、ファントムの温度を変化させた際の電気定数を測定し、ファントムの温度と電気定数の関係を明らかにした。次に、測定結果から得られたファントムの温度と電気定数の関係をもとに、ファントムの温度が変化した際の人体通信用アンテナの入力特性を数値計算により算出した。

2. ファントムの温度と電気定数の関係

人体通信で使用される周波数は、IEEE 802.15.6 [5] で定められている。本論文では、そのうちの一つである 21 MHz について検討した。

2.1 測定条件

本論文で使用したファントムの組成を表 1 に示す。室温 (24.5°C) におけるこのファントムの電気定数

表 1 ファントムの組成
Table 1 Composition of the phantom.

Material	Amount [g]
Deionized Water	538.0
Agar	22.5
Aluminum Powder	245.0
Sodium Chloride	0.8

は、21 MHz における筋肉の電気定数 ($\epsilon_r = 104.8$, $\sigma = 0.67 \text{ S/m}$) [6] との差異が 5.0%以内であり、筋肉の電気定数をおおむね模擬していることを確認した。

このファントムの温度を、冷蔵保存を想定した 10°C 程度から、測定環境の室温が高温である場合を想定した 40°C 程度の範囲で変化させ、電気定数を測定した。電気定数測定時のファントムの温度は、 10.3°C , 24.5°C , 41.7°C であった。各ファントムの温度は、冷蔵庫、室温、 50°C 程度の湯の中に十分な時間放置して得られた温度である。

温度測定には直径 2.1 mm の棒状温度測定用センサ (安立計器 BS-22) を用い、ファントムの温度を複数箇所測定し、ファントム全体の温度が均一であることを確認した。棒状のセンサを刺すことでファントム内に空気が入ることを防ぐため、組成や温度条件が同じファントムを複数個用意し、電気定数を測定するファントムと温度を測定するファントムに分けて温度を測定した。また、ファントムの電気定数は、インピーダンスアナライザ (Wayne Kerr Electronics 社 6530B) を用いた二端子法により測定した [7]。

2.2 測定結果

図 1 にファントムの温度と電気定数の関係を示す。ここでは、21 MHz における電気定数を示しており、図中のシンボルは測定した電気定数の平均値、実線は最小 2 乗法によって求めた測定値の近似線、点線は筋肉の電気定数 [6]、エラーバーは測定誤差の範囲を示している。測定結果より、比誘電率は温度の上昇に伴い低下することがわかる。これは、誘電体であるファントム内の分子運動が熱によって激しくなり、配向が起りにくくなったためである [4]。また、導電率は温度の上昇に伴い上昇する。これは、ファントムの温度上昇に伴い、ファントム内の自由電子が増加し電流が流れやすくなるためである。近似線より、本論文で使用したファントムの場合、温度変化によって生じる電気定数の変動は 1°C あたり、比誘電率は約 0.9% (約 0.9)、導電率は約 1.4% (約 0.009 S/m) であった。

以上の結果から、ファントムの温度が変動すると電気定数が変化するため、電気定数測定時には、ファントムの温度に十分に留意する必要があるといえる。これらの結果は表 1 の組成のファントムの場合であり、全てのファントムに当てはまるということではない。しかしながら、他の組成の場合であっても、ファントムの温度には留意する必要がある。また、添加物や使用周波数で特性が変化することも考えられるため、使

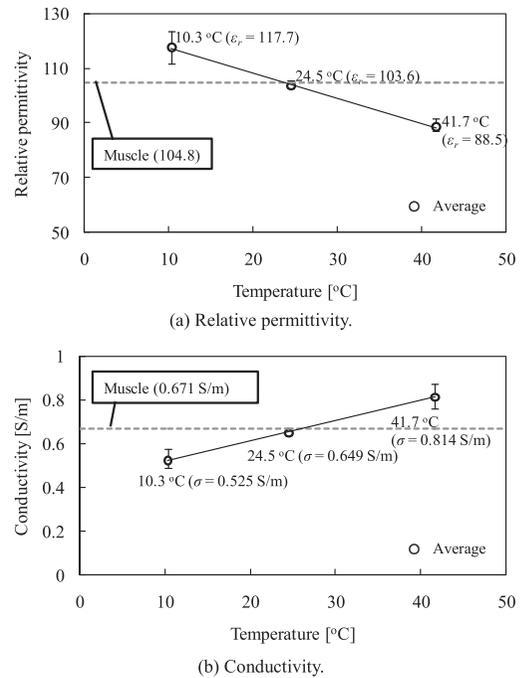


図 1 21 MHz における温度変化に伴う電気定数の変化
Fig. 1 Temperature dependence of electrical properties at 21 MHz.

用するファントムに応じた検討をする必要がある。

3. 温度変化に伴う電気定数の変化がアンテナ入力特性に与える影響

ここでは、ファントム実使用状況を考慮して検討を行う。ファントムの温度を制御しつつ送信機の入力インピーダンスを測定することは難しいため、この検討には計算機シミュレーションを用いる。2.2 の測定結果から得られたファントムの温度と電気定数の関係をもとに、ファントムの温度が変化した場合の人体通信用アンテナの入力特性を数値計算により算出した。

3.1 数値計算モデルと計算条件

High Frequency (HF) 帯の周波数を用いる人体通信では、送信機を着用した付近に電界が集中することが報告されている。そこで本論文では、人体通信用デバイスを腕に装着することを想定し、送信機を着用した腕部のみを用いて検討を行う。本研究で用いた腕部ファントムは、日本人の平均的なサイズを考慮した $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ の直方体の筋肉均一ファントムである。図 2 に送信機モデルを示す [8]。この送信機は 21 MHz の正弦波信号が出力される信号電極と、回路のグランドレベルに接続された

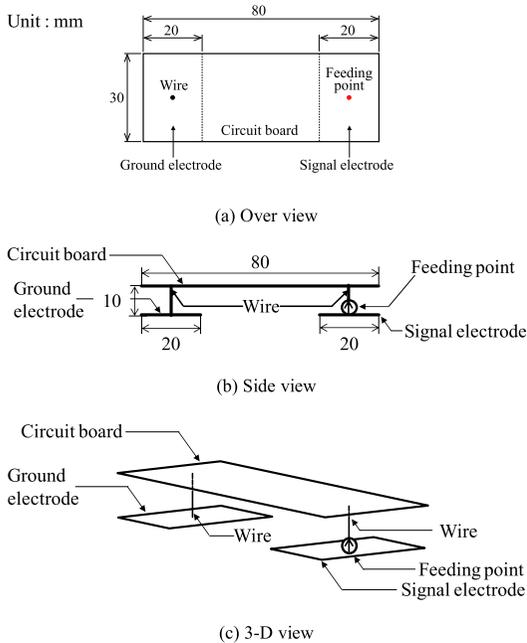


図 2 送信機モデル

Fig. 2 Exterior of the transmitter model.

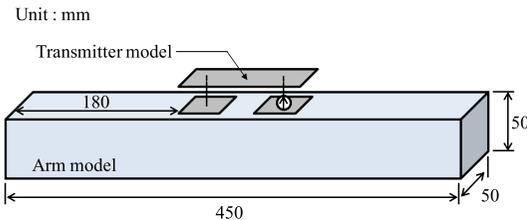


図 3 数値計算モデル

Fig. 3 Calculation model.

接地電極の 2 枚で構成されている．図 3 に数値計算モデルを示す．送信機を腕モデル上に配置し，FDTD (finite-difference time-domain) 法を用いて送信機の入力インピーダンスを算出した．FDTD 法による数値計算を行う上で，セルサイズは送信機付近においては細かく，そこから離れるに連れてセルサイズを粗くする不均一セルを用いた．ここで最小セルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5.0 \text{ mm}$ ，最大セルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 20.0 \text{ mm}$ とした．タイムステップは 9.62 ps ，吸収境界条件は 16 層の Perfect Matched Layer (PML) とした．送信機は完全導体としてモデル化し，解析を行った．検討を行った温度範囲は，室温の 24.5°C を中心に 12.5°C から 36.5°C までとし，温度を 2°C ずつ変化させた．各温度における電気定数

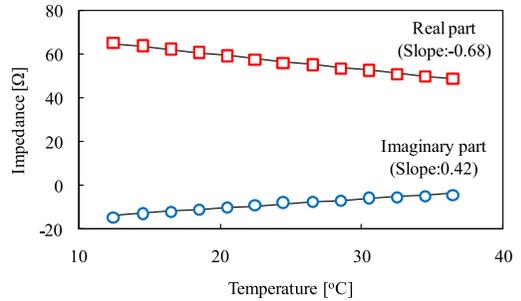


図 4 温度変化と入力インピーダンスの関係

Fig. 4 Connection of temperature and input impedance.

は，図 1 の近似線より推定した．

3.2 解析結果

図 4 に温度変化に伴う電気定数の変化と送信機の 21 MHz における入力インピーダンスの関係を示す．これより，温度変化に伴う電気定数の変化により，送信機の入力インピーダンスが変化していることが確認できる．ファントムの温度変化によって生じる入力インピーダンスの変動は，最小 2 乗法により得られた近似直線の傾きより， 1°C あたり，実部は約 0.68Ω ，虚部は約 0.42Ω であった．この結果より，空調機により測定環境の室温がおおむね一定に保たれており，電気定数測定時と入力インピーダンス測定時のファントム温度の差異が小さい場合には，温度変化に伴う電気定数の変化が入力インピーダンスに与える影響はほとんど無視できるといえる．なお，本論文で検討した条件においては，ファントムの温度が室温 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の範囲であれば，室温時との入力インピーダンスの差異はおおよそ 10.0% 以下となることを確認した．

一方で，極端な例として，ファントムの温度が 12.5°C (例えば，空調設備が整っていない真冬の室温や冷蔵保存していたファントムをすぐに使用した場合の温度) と 36.5°C (例えば，空調設備が整っていない真夏の室温) の場合を比較すると，インピーダンスの実部，虚部ともに 10Ω 以上の差異がみられた．

HF 帯を使用した人体通信は，送信機から空間に放射される電波ではなく，人体近傍における電界の寄与が大きいと考えられる [9]．そのため，同程度の周波数を使用した他の人体通信用送信機を用いた場合でも，誘電体に接している部分は多くないため，本論文と同様の結果が得られると考えられる．また，本論文では，計算機シミュレーションによる結果のみを示したが，生体等価ファントムの電気定数や温度条件，送信機ア

ンテナの特性が同様の実験的検討を行った場合は、入力インピーダンスの値や変化傾向は、おおむね一致すると考えられる。

4. む す び

本論文では、ファントムの温度変化に伴う電気定数の変化が、アンテナの入力特性に与える影響について検討した。まず、人体通信の通信実験に使用する腕ファントムの温度変化と電気定数変化の関係を明らかにするため、ファントムの温度を変化させた際の電気定数を測定した。その結果、本検討で使用した腕ファントムの場合には、温度が 1°C 変化するにつれて、比誘電率は約0.9%、導電率は約1.4%変化することを明らかにした。次に、FDTD法を用い、温度変化に伴う電気定数の変化により、人体通信用アンテナの入力インピーダンスがどの程度変化するかを検討した。その結果、ファントムの温度が室温 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲であれば、室温時との入力インピーダンスの差異はおおよそ10.0%以下であり、電気定数測定時と入力インピーダンス測定時のファントムの温度が極端に違う場合は、入力インピーダンスの値に大きな差異があることを確認した。

今後は、ファントムの温度が入力インピーダンス以外のアンテナの諸特性に与える影響を明らかにする予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号24360132)により行われた。

文 献

- [1] P.S. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications*, Artech House, 2006.
- [2] 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.*, vol.41, pp.2251–2269, April 1996.
- [3] 伊藤公一, 河井寛記, 齊藤一幸, "生体等価ファントムの現状と今後の展望," *信学論 (B)*, vol.J85-B, no.5, pp.582–596, May 2002.
- [4] 徳永正晴, *誘電体*, 培風館, 1991.
- [5] IEEE web site, <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.6-2012.html>
- [6] FCC web site, <http://transition.fcc.gov/oet/rfsafety/dielectric.html>
- [7] 菅良太郎, 井之上瑞紀, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, "HF帯用生体等価ファントムの開発," *信学論 (B)*, vol.J96-B, no.9, pp.964–970, Sept. 2013.
- [8] 藤井勝之, 伊藤公一, 田島 茂, "人体を伝送路として利用したウェアラブル送受信機の信号伝送状況の計算モデルに関する検討," *信学論 (B)*, vol.J87-B, no.9, pp.1383–1390, Sept. 2004.
- [9] 羽賀 望, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一, "準静電界を用いた人体通信チャネルにおける姿勢及び大地の影響," *信学論 (B)*, vol.J95-B, no.2, pp.257–264, Feb. 2012.
(平成 25 年 12 月 16 日受付, 26 年 2 月 18 日再受付)