

人体通信用高含水ゲルファントムの電気的特性改善に関する検討

A Study on Improvement of the Electrical Characteristics of Highly-Hydrous Gel Phantom for Human Body Communication

○ 町田雄太 (東京理科大学) 山本隆彦 (東京理科大学) 越地耕二 (東京理科大学)

Yuta MACHIDA, Tokyo University of Science
Takahiko YAMAMOTO, Tokyo University of Science
Kohji KOSHIJI, Tokyo University of Science

Abstract: Human body communication (HBC) is a new communication technology which has raised expectations of applications such as a health-care and elderly support system recently. It is important to develop experimental phantoms emulating the electrical properties of the human body for the accurate, reproducible, and well-controlled characterization of wearable devices. Furthermore, using real human body is very challenging and involves some ethical issues, and hence it is desirable to experiment using appropriate phantom in order to investigate the performance of wearable devices. Highly-hydrous gel phantom has been widely employed in the use of more than 300 MHz for its handling and trial product is easy, however, it isn't able to simulate well the electrical characteristics of the human body in use at 30 MHz or less. In this paper, we studied on the improvement of the electrical properties of highly-hydrous gel phantom with additional new materials for the use at 30 MHz or less.

Key Words: Body area network (BAN), human body communication (HBC), experimental phantom, complex permittivity.

1. はじめに

近年、ウェアラブルコンピュータとユビキタスネットワーク環境の統合に向けた研究が盛んに行われている。この一例として、人体周辺でネットワークを構成するBAN(Body Area Network)での利用を目的とした、至近距離での無線通信技術である人体通信⁽¹⁾が注目を集めている。Fig.1 に示すように、この技術は体表に電極を装着するウェアラブル機器や人体に埋め込まれた機器、例えば、携帯電話やPDA(Personal Digital Assistance)などに触れることにより、人体を介して形成される通信路により情報を伝送するシステムである。

人体通信は、人体を通信路とするため、Bluetooth・赤外線・微弱無線などを用いた空中伝搬する無線通信とは異なり、信号伝送時に周辺の空間に電界がほとんど漏洩しないため、秘匿性を有し、また低電力で低干渉な通信が実現できると期待されている。1995年にMITのT. G. Zimmermanによる近傍電界を用いた通信技術として提案⁽¹⁾されてから様々な検討が始まり、近年では、生体情報を伝送する手段として個人認証システム⁽²⁾、スマートホーム、軍事、ヘルスケア等の分野へ応用されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

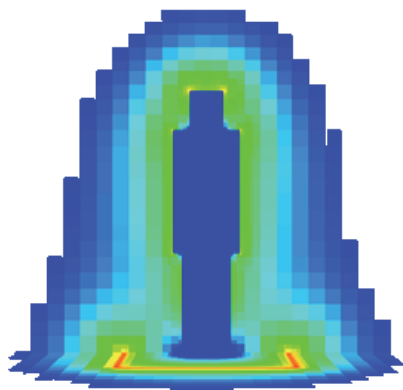


Fig. 1 An Image of the Electric field distribution around the human body for Human Body Communication

BAN での使用を目的としたウェアラブルアンテナの研究は主にISM(Industrial Scientific Medical)帯域である2.45 GHz⁽⁵⁾と5.5 GHz⁽⁶⁾、またUWB(Ultra-Wideband)帯(3.1 GHz – 10.6 GHz)⁽⁷⁾やUHF帯(300 MHz – 3 GHz)⁽⁸⁾での使用を想定した周波数域で行われ、IEEE 802.15.6 で決められたHBC-PHY(人体通信の物理層)である数十 MHz 帯での周波数帯域で検討はあまり報告されていない。

また、アンテナの性能の評価のために実測をする際に、人体を用いて実験を行うことは非常に難しく、ヘルシンキ宣言の倫理規範をはじめとして多くの制限がある。また、計測データの再現性の観点からも、アンテナの性能を実験的に評価するためには生体を模擬した生体ファントムが有用である。

過去の検討⁽⁹⁾より、生体の電気的特性を模擬した高含水ゲルファントム⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾に着目し、人体通信をはじめとする低周波数帯域での使用のため、カーボンマイクロコイル(Carbon Micro Coil : CMC)⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を添加し、CMCを添加し、電磁ファントムの電気的特性の改善が図れることが分かっている。本稿では、カーボンを添加したファントムを試作し、比誘電率及び導電率の動作検討を行った。

2. 生体評価ファントム

ファントムとは人体の音波特性、温度特性など、何らかの特性を模擬したものの総称である。また、用途に応じて液体、半固体(ゲル)、固体と多様である。

液体状のファントムは、流体を保持するための容器が必要であり、また、人体に及ぼす電磁界の影響を評価する値である比吸収率SAR(Specific Absorption Rate)をファントム表面で計測することができない。半固体状のファントムは、形を保持するための容器を必要とせず、また、アンテナの伝送特性やSARを測定することができる。固体状のファントムは、比較的広い範囲にわたって電気的特性を模擬しており、他のファントムと比べて電気的特性を長い期間維持できるため長く用いることが出来る。しかし、固体状のファントムは非常に高価であり、作成するのも難しい。

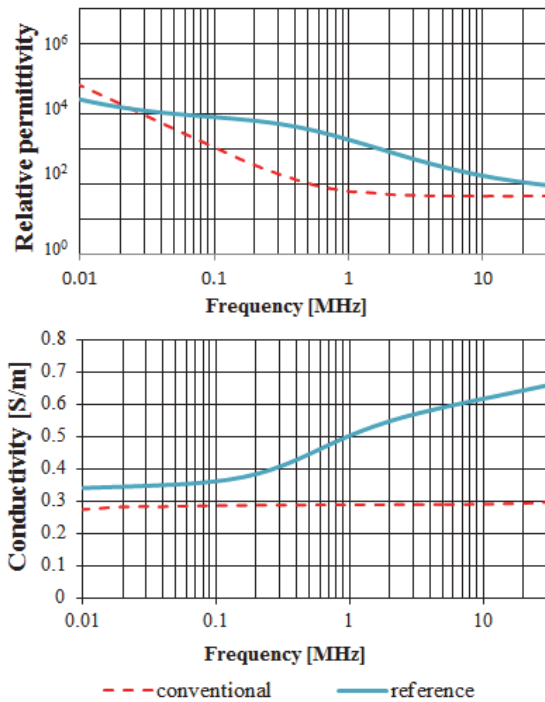


Fig. 2 Comparison of electrical characteristics between the literature(reference⁽¹³⁾) and the conventional phantom

そこで本稿では、試作及び取り扱いが容易な半固体状のファントムである高含水ゲルファントムに着目し、比熱に関する検討も必要であるが、誘電率と導電率についてのみ検討を行った。高含水ゲルファントムは、300 MHz 以上を対象に電磁ファントムとして広く用いられているが、Fig.2に示すように 30 MHz 以下の使用においては生体の電気的特性を十分に模擬できていないため、低周波数帯においての電気的特性の改善が必要である。過去の検討において、高含水ゲルファントムに CMC を添加し、電磁ファントムの電気的特性の改善が図れることが分かっている。その動作についてカーボンを加えたファントムを試作し、比較することで検討を行った。

3. 高含水ゲルファントムの作成方法⁽¹⁴⁾

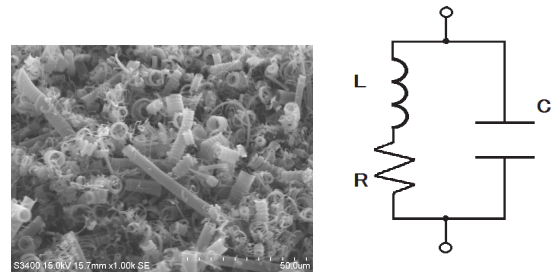
高含水ファントムは、ポリエチレン粉末及び塩化ナトリウム(NaCl)の質量を調整することにより、それぞれ比誘電率及び導電率の調整が可能である。以下に作成手順、Table 1 に従来の高含水ファントムのレシピを示す。

Table 1 The recipe of conventional phantom

Ingredients	Weight[g]	Effects
Deionized Water	580	Main
Agar	17	Forming
TX-151	14	Thickener
Polyethylene powder	56	ϵ_r

3-1 カーボンマイクロコイル

カーボンマイクロコイル (Carbon Micro Coil : CMC) は、炭素繊維を直径数 μm 、全長数十～数百 μm のコイル状(らせん構造)の素材であり(Fig.3(a))、電気的特性は LCR 共振回路として表すことができる(Fig.3(b))⁽¹⁵⁾。L 成分による実効的に比誘電率の増加を目的とした。また、導電性をもつ炭素素材であることから、導電性向上の効果もある⁽¹⁴⁾。



(a) CMC(SEM) (b) Equivalent circuit
Fig.3 CMC : Carbon Micro Coil

3-2 カーボン

CMC における効果を検証する目的で、比較対象としてカーボン粉末を添加したものを試作した。カーボンは、導電性をもつ素材であることから、導電性向上の効果がある。また、カーボン単体を添加したファントムにおいても実効的に比誘電率の向上の効果があることが分かっている。ここでは、その動作の検証を行った。

3-3 NaCl

電解質である NaCl は、水に溶かすことでイオンとなり、導電率が上昇する。導電率の特性は、低周波数帯域でも比誘電率ほどの極端な変化は見られないため、NaCl での調整は可能である。

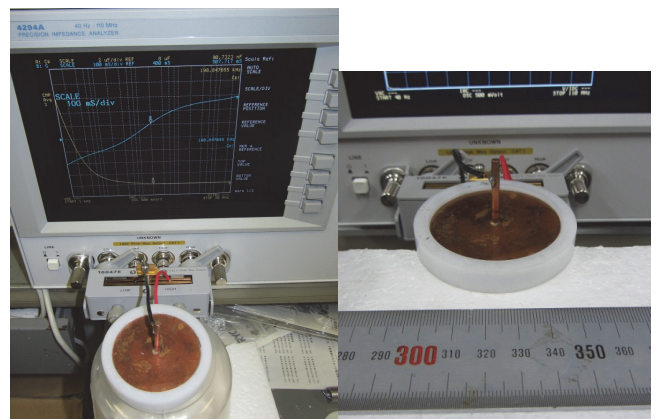
4. 周波数帯域の測定方法⁽¹⁴⁾

金属板間に測定する試料を挿入しコンデンサを形成(Fig.4(a))し、これを Fig.4(b)に示す回路とみなしてインピーダンスを測定し、(1)式および(2)式から比誘電率および導電率を算出した。

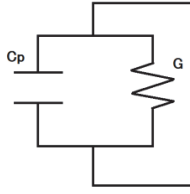
測定にはインピーダンスアナライザ (Agilent 4294A, California USA) を用い、周波数帯域を 100 kHz~30 MHz とした。電極の平行板には直径 5 cm の銅円板を用い、試料のファントムの厚さは 1 mm 程度とした(Fig.4(a))。

$$C_p = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} [F] \quad \leftrightarrow \quad \epsilon_r = C_p \frac{d}{\epsilon_0 S} \quad \dots (1)$$

$$G = \frac{S}{\rho d} = \frac{\sigma S}{d} [S] \quad \leftrightarrow \quad \sigma = G \frac{d}{S} [S/m] \quad \dots (2)$$



(a) Picture of Measurement



(b) Equivalent Circuit Measurement

Fig.4 Measurement System with the phantom

5. 測定

過去の検討⁽⁹⁾より、高含水ゲルファントムに CMC を添加し、電気的特性の改善が図れることが分かっている。その動作についてカーボンを加えたファントムを試作し、誘電率と導電率についての検討を行った。ここでは、導電率の向上を NaCl, 比誘電率の向上をカーボンに期待し、材料の調合を変化させ文献値⁽¹³⁾に近づく比率を検討した。今回試作したファントムの組成を Table 2 に示す。

Table 2 Corrective strategy of electrical property

	NaCl	Carbon
①	1 g	Newly add 1 wt.%
②		Newly add 1.5 wt.%
③		Newly add 3 wt.%
④	3 g	Newly add 1 wt.%
⑤		Newly add 1.5 wt.%
⑥		Newly add 3 wt.%
⑦	5 g	Newly add 1 wt.%
⑧		Newly add 1.5 wt.%
⑨		Newly add 3 wt.%

5-1 比誘電率の結果

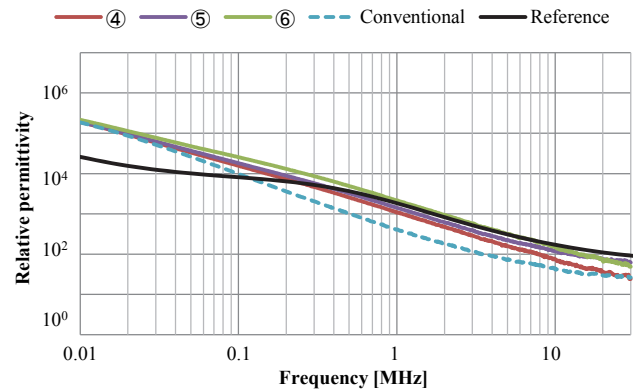
カーボンの添加量の変化に対する比誘電率の測定結果と、NaClの添加量の変化に対する比誘電率の測定結果を、それぞれ Fig.5 (a)と Fig.5 (b)に代表して一部の結果を示す。

Fig.5(a) より、カーボンの添加量が増加するに従い、比誘電率も改善されていることが分かる。また、1 MHz 程度で⑥と文献値⁽¹³⁾がほぼ一致し、1 MHz~10 MHz の間で文献値⁽¹³⁾に比較的近い特性となった。Fig.5(b) より、NaCl の添加量が増加するのにも従い、比誘電率が改善していることが分かる。400kHz 程度で⑧と文献値⁽¹³⁾がほぼ一致し、400 kHz~10 MHz の間で文献値⁽¹³⁾に比較的近い特性となった。

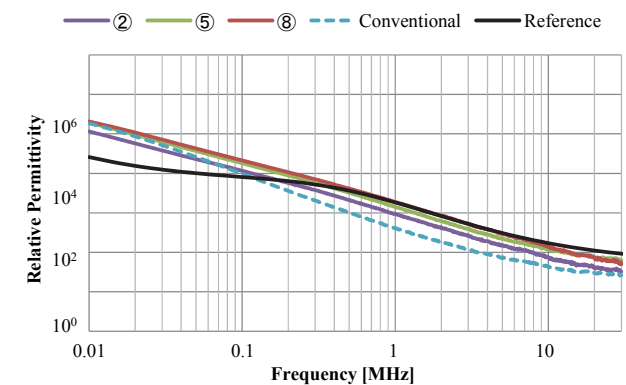
5-2 導電率の結果

カーボンの添加量の変化に対する導電率の測定結果と、NaClの添加量の変化に対する導電率の測定結果を、それぞれ Fig. 6 (a)と Fig. 6 (b)に代表して一部の結果を示す。

Fig.6(a) より、カーボンの添加量が増加するに従い、導電率が上昇することが分かる。200 kHz~10 MHz の間で文献値⁽¹³⁾に比較的近い特性となり、⑤と⑥の間の値である。Fig.6(b) より、NaCl の添加量が増加するに従い、導電率が上昇することが分かる。150kHz 程度で⑧と文献値⁽¹³⁾とほぼ一致し、150 kHz~3 MHz の間で文献値⁽¹³⁾に比較的近い特性となった。

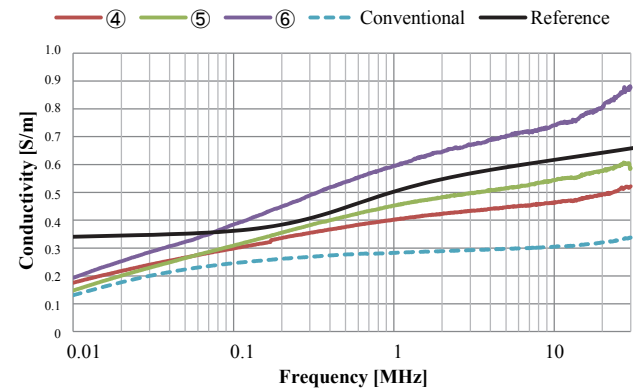


(a) Relative permittivity characteristics of ④, ⑤, ⑥

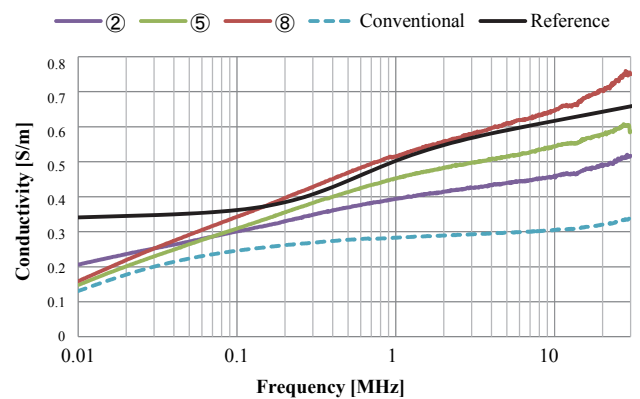


(b) Relative permittivity characteristics of ②, ⑤, ⑧

Fig.5 Electrical characteristics of relative permittivity of the phantom made on an experimental basis (low frequency)



(a) Conductivity characteristics of ④, ⑤, ⑥



(b) Conductivity characteristics of ②, ⑤, ⑧

Fig.6 Electrical characteristics of conductivity of the phantom made on an experimental basis (low frequency)

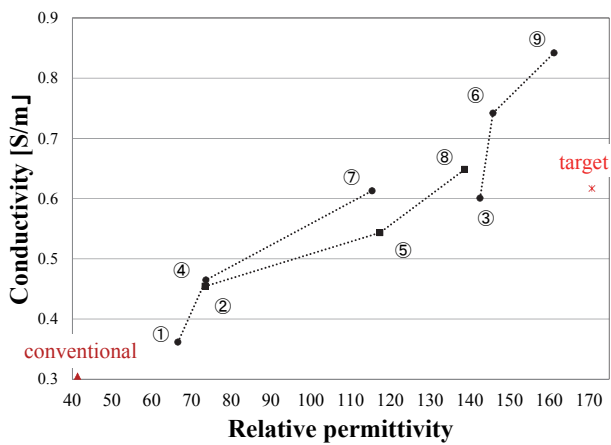


Fig. 7 Changes in the electrical characteristics by preparation of raw materials at 10MHz

5-2 ファントムの電気的特性改善評価

人体通信での使用を目的とし、カーボン及び NaCl の添加量を変化させた際の 10 MHz におけるファントムの比誘電率及び導電率の変化を Fig.7 に示す。

Fig.7 より、カーボン及び NaCl の添加量の変化は、ファントムの比誘電率及び導電率に対し影響を与え、従来のファントムに比べてより目的とする文献値⁽¹³⁾の電気的数値に近づいていることが示唆された。

Table 3 に、本稿での目標値(比誘電率:170.7, 導電率:0.61)に対する比誘電率及び導電率の達成度を示す。Table 3 より人体通信での使用を目的とした 10 MHz での電気的特性は、③のファントムにおいて、比誘電率は 59 %, 導電率は 47%の改善が得られた。

Table 3 Achievement rate for the reference value⁽¹³⁾ [%]

	Relative permittivity	Conductivity
③	83.5	97.4
Conventional	24.2	49.5

6. まとめ

本稿では、生体の電気的特性を模擬した電磁ファントムにおける高含水ゲルファントムを取り扱い、カーボンを加えた際の低周波数帯域における電気的特性の動作を確認することを目的とした。

従来の高含水ファントムに対し、カーボンと NaCl の添加量を調節した複数のファントムを作成し、低周波数帯域の測定、比較検証を行った。

カーボン及び NaCl の添加量を増加させることにより、ファントムの比誘電率及び導電率が改善されることが示唆される結果となった。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究 B・12018248)により行われた。

参考文献

- (1) T. G. Zimmerman : “Personal Area Networks (PAM) : Near-Field Intra-Body Communication”, M. S. thesis, MIT Media Laboratory,(1995)

- (2) 大木哲史, 小松尚久, 川辺秀樹, 細田泰弘, “電界通信を用いた本人認証へのバイオメトリック暗号技術の適用”, IEICE technical report 109(39), 79-84, 2009
- (3) P. S. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body Centric Communication Systems*, Norwood, MA: Artech House, 2006.
- (4) D. Guha and Y. M. M. Antar, *Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications*, NewYork: Wiley, 2011.
- (5) G. A. Conway and W. G. Scanlon, “Antenna for over-body-surface communication at 2.45 GHz”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 57, no. 4, pp. 844-855, Apr. 2009.
- (6) S. Zhu and R. Langley, “Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 4, pp. 926-935, Apr. 2009.
- (7) A. Alomainy, M. Zhadobov, R. Sauleau, and K. Ito, “A Compact UWB antenna for on-body applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 4, pp. 1123-1131, Apr. 2011
- (8) 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, 通信II-無線通信・無線応用, J81-B-2(12), 1126-1135, 1998-12-25.
- (9) T. Yamamoto, K. Sano, K. Khoshiji, X. Chen, S. Yang, M. Abe and A. Fukuda, “Development of electromagnetic Properties of Human Phantom at Low-Frequency band by Using Carbon Microcoil”, 日本AEM学会誌, Vol. 21, No.2, 146-151, 2013.
- (10) 浜田リラ, 王蓉, 斉藤一幸, 岡野好伸, 村松敬一, 伊藤公一, “人体モデルに用いる生体等価ファントムの実用的検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P, アンテナ・伝播 96(224), 39-44, 1996-08-22.
- (11) 陳秀琴, 元島栖二: 「らせん構造を持つカーボンマイクロコイル」, 社団法人日本化学会, 化学と教育, 54(3), 146-147, 2006-03-20.
- (12) 元島栖二, 陳秀琴: 「カーボンマイクロコイルのモルフォロジーと成長メカニズム(<特集>結晶成長とキラリティ)」, 日本結晶成長学会誌, 35(1), 37-45, 2008-04.
- (13) Italian National Research Council “Nello Carrara”-Florence(Italy), <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop>.
- (14) T. Yamamoto, K. Sano, K. Khoshiji, X. Chen, S. Yang, M. Abe and A. Fukuda, “Development of electromagnetic phantom at low-frequency band Date submitted”, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2013-07-04.
- (15) 江口宇三郎: 「カーボンマイクロコイルの応用」, 鶴岡工業高等専門学校研究紀要 41, 1-4, 2006-12

連絡先

東京理科大学理工学部電気電子情報工学科 越地研究室
〒278-8510 千葉県野田市山崎2641 東京理科大学12号館5階 越地研究室
TEL 04-7124-1501(内線3743) FAX 04-7120-1741