

WBAN 物理層の統合的評価を可能にする多組織構造電磁ファントムの開発

研究代表者 村松 大陸 東京理科大学 理工学部 助教

1 はじめに

情報機器の小型軽量化により、ユーザがスマートウォッチをはじめとした複数のウェアラブル機器を身につけることはもはや一般的となった。同時に、これらの機器を相互に接続する Wireless Body Area Network (WBAN)の開発も進んでおり、920 MHz 帯、2.4 GHz 帯、UWB 帯 (3.1~10.6 GHz) のシステムが検討されている [1]。しかし、一般に周波数が高いほど人体に吸収される電磁波のエネルギーは大きく、これらの周波数帯で人体は障害として作用し、人体に接触/近接するウェアラブル機器間の通信では問題となる [2, 3]。このように、無線通信において人体は電磁波を減衰させ通信を妨害する厄介な存在であるが、その人体を短波帯 (3~30 MHz) 信号の伝送路としてとらえ、有効活用しようという発想がある [4]。これは一般に人体通信 (電界通信とも) と呼ばれる技術で、人体に接触または近接させた電極 (アンテナ) を介して高周波信号を入出力し通信する、一種の無線通信方式である。

人体通信では、人体表面を流れる電流と、周囲に形成される近接場電界が通信に寄与する。人体は電氣的にみると導電性誘電体であるので、電極を介して人体に高周波信号が励振された場合、人体表面には高周波電流パスが形成される。また、数十 MHz 以下の周波数では人体と空間 (空気) の界面には近接場電界 (準静電界) が生じ、遠方への放射電磁界に比べて支配的となる。近接場電界は距離に応じて指数関数的に減衰する性質をもつため、信号伝送時に周辺空間に電磁界がほとんど漏洩せず、秘匿性に優れ、電磁雑音を発生しない通信が可能となる。また、通信距離が限定されるため、空中の電磁波を利用する既存の無線通信技術より低消費電力で通信が行える可能性がある。さらに、通信対象となる人や物に「触れる」ことで伝送路が確立するため、ユーザの動作を利用した直感的なヒューマンインターフェースに利用できるといった特長もある。図 1 に、人体通信における人体周囲の電界分布を、NICT より提供された二体の全身人体モデル [5] を用いた電磁界解析によって計算した例を示す。この例では、向かって右側の男性モデル手首部分に装着された電極から 10 MHz の信号を励振している。人体の周囲のみに電界が分布し、かつ、手をつないだ女性モデル周囲にも強い電界が伝搬している様子が観察される。一方で、人体から離れた位置では電界強度は急激に小さくなっていることが確認できる。

人体通信を含む WBAN 物理層の実験評価では、生体安全性や実験の再現性の観点から、人体の電気定数を模擬した電磁ファントムや、実使用時の電磁環境を再現するウェアラブル測定治具が必要不可欠である。しかし、従来ファントムは 300 MHz 以上の帯域でのみ人体の電気定数を模擬しており、筋肉等の単一組織で構成されている。このためアンテナ (電極) が人体に接触/近接する WBAN の評価へ適用することはできない。また従来研究から、ネットワークアナライザ等の商用電源に接続された大型機器が、WBAN 物理層の評価に大きな影響を与えることも明らかになっている。本研究では、WBAN 物理層の統合的評価を目指し、短波帯で生体組織の電氣的特性を模擬し、皮膚、脂肪、筋肉等の複数組織からなる電磁ファントムを開発し、測定手法について検討した。

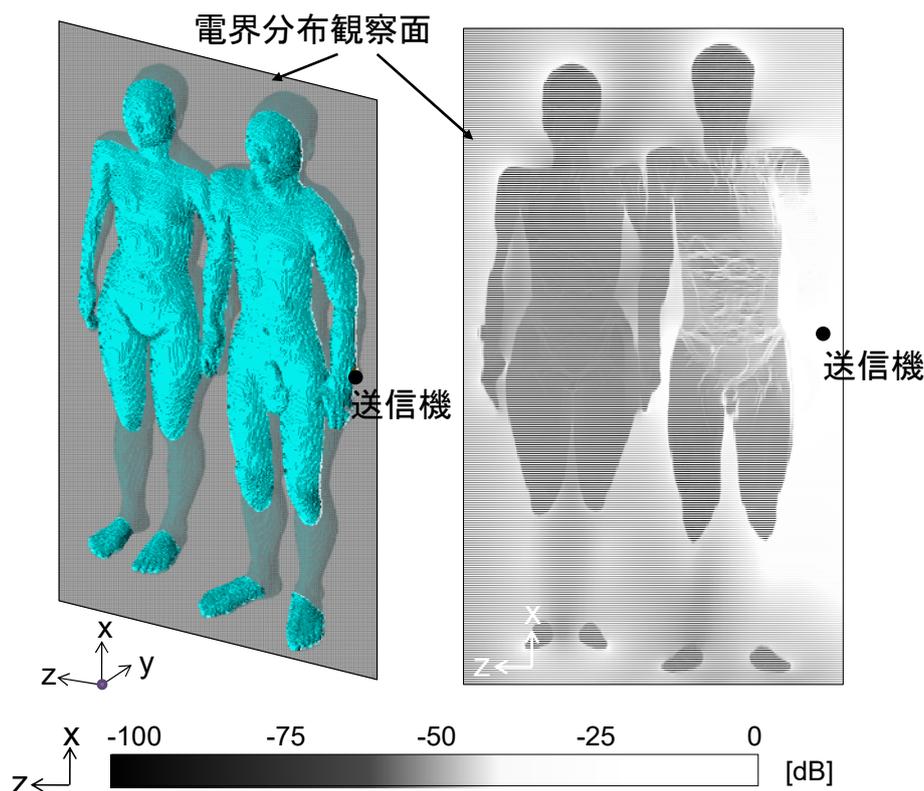


図2 人体通信において人体周辺に分布する電界の計算例

2 電磁ファントムの研究開発動向

携帯電話やウェアラブル機器等、人体に相当近接した箇所における無線通信使用を前提とするシステムの普及にともない、無線通信部のアンテナから発生する電磁波と人体との相互作用を定量的に評価することが必要不可欠になっている。ここで述べる相互作用とは、無線通信機器に及ぼす影響と、反対に無線通信機器から生じる電磁波が人体に及ぼす影響の双方を指す。人体が無線通信機器の特性に及ぼす影響として主たるものは、人体近接時のアンテナ特性（入力インピーダンス、放射指向性、利得などのパラメータ）の変化である [2,6]。一方、電磁波が人体に及ぼす主要な影響としては、電磁波が生体に吸収されジュール熱損失となり温度が上昇し、生体細胞にダメージを与える熱作用と、電磁波に曝露した際に生体内に誘導電流が生じ、神経細胞や各種筋に影響を及ぼす刺激作用がある。こうした人体と電磁波の相互作用を定量的に評価するために、実人体を用いて実験的に検討を行うことは再現性や倫理的な問題から極めて困難であり、生体組織の電気的特性を模擬した人工物質が必要不可欠となる。こうした背景から、生体組織の電気定数を模擬した電磁ファントムの研究開発が広く行われてきた[7]。

従来の無線通信システムのアンテナ評価と同様に、人体通信における電極の入力インピーダンス特性や送受信機間の伝送特性などを実験的に評価するために、電磁ファントムが必要となる。しかしながら、従来ファントムは主として携帯電話アンテナの特性評価を目的として開発されているため、対象とする周波数帯が300 MHz以上となっており、それ以下の周波数帯、例えば人体通信での利用が期待される短波帯(3~30 MHz)においては、生体組織の電気的特性を模擬できていない。また、従来は、アンテナから人体を見たときに、全身あるいは特定の部位が均質構造であると仮定して、均質媒質からなるファントム(特に筋肉ファントム)を使用している場合がほとんどである。アンテナと人体が電氣的に十分離れていると見なせる場合には均質ファントムの使用は妥当であるが、アンテナが電磁波長に比較して人体に非常に近接する場合には十分な精度が得られないことが明らかになっている [6]。WBANのようにアンテナ/電極が人体に接触あるいは近接するシステムの登場にともない、今後より高度に生体を再現した電磁ファントムが必要不可欠となっている。

3 筋肉・脂肪・皮膚 固体/高含水ゲルファントムの開発と評価

従来研究として、筋肉ファントムの適用範囲を低周波帯域へ拡張する試みはいくつかあるものの、皮膚や脂肪ファントムに関してはほとんど例がない。これは、例えば人体通信での利用が期待される短波帯（3～30 MHz）において、生体組織が示す高い誘電率の再現が困難であることが主な原因である。このため、図2に示す人体腕部を模擬した三層構造の固体ファントムおよび高含水ファントムを開発した。第一段階として、10～30 MHz において実用可能なレベルの電気定数を有する皮膚、脂肪、筋肉それぞれを模擬した単組織固体ファントムを製作し特性評価を行った。各ファントムは高精度の電気定数測定のため、平行平板法による誘電体テストフィクスチャ（Keysight 16451B）を用いた。各ファントムの寸法は、誘電体テストフィクスチャに適合する寸法である $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ とした。当初は同軸管透過法を用いることを想定し治具の開発をすすめていたが、固体ファントムの充填時に発生する気泡を完全に排除できないこと、排出の際に治具内にファントム断片が残留してしまう等の課題が生じたため、平行平板による測定を採用している。表1～3に、10, 20, 30 MHz におけるファントム各層の電気定数（比誘電率 ϵ_r 、導電率 σ [S/m]）の目標値（各組織の電気定数）[8]、開発したファントムの測定値を示す。皮膚および筋肉ファントムは目標値を比較的良好に模擬出来ているのに対して、脂肪ファントムは比誘電率、導電率ともに目標値からは大きな差がある。これらの差がWBANシステムの物理層評価においてどの程度の影響を与えるかについては、第4章において詳述する。

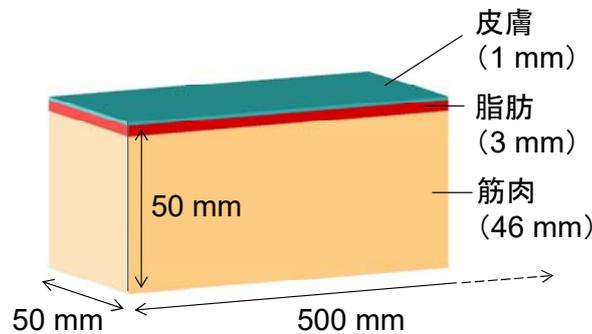


図2 三層構造の固体ファントム

表1 10, 20, 30 MHz における固体皮膚ファントムの電気定数

周波数 [MHz]	ϵ_r 目標値	ϵ_r 測定値	σ 目標値	σ 測定値
10	360	494	0.20	0.12
20	209	365	0.36	0.30
30	153	266	0.5	0.45

表2 10, 20, 30 MHz における固体脂肪ファントムの電気定数

周波数 [MHz]	ϵ_r 目標値	ϵ_r 測定値	σ 目標値	σ 測定値
10	14	313	0.029	0.09
20	9.7	204	0.06	0.21
30	8.1	132	0.0076	0.30

表3 10, 20, 30 MHz における固体筋肉ファントムの電気定数

周波数 [MHz]	ϵ_r 目標値	ϵ_r 測定値	σ 目標値	σ 測定値
10	170	792	0.62	0.1
20	111	716	0.64	0.31
30	92	631	0.66	0.59

一方、成型が容易かつ安価に試作可能な高含水ゲルファントムの需要も高く、固体ファントム同様の三層構造が望ましいと考えられる。本研究では、筋肉および脂肪組織に焦点を当て、高含水ゲルファントムの開発を行い、平行平板法によりその電気的特性を評価した。表4および5に、各ファントムの組成を、図3および4にファントムの電気的特性を示す。筋肉ファントムはイオン交換水 1000 g に対して添加する塩化ナトリウムの量を変化させ、脂肪ファントムは食用油 300 g に対して添加するイオン交換水の量を変化させて、各電気定数を測定した。その結果、筋肉ファントムはイオン交換水 1000 g に対して塩化ナトリウム 5.4 g を添加した場合に $\sigma=0.640$ S/m, $\epsilon_r=73.0$ となり、脂肪ファントムはイオン交換水 100 g に対して食用油 300 g を添加した場合に $\sigma=0.0269$ S/m, $\epsilon_r=19.8$ となり、各組織の電気的特性をよく再現できた。一方、皮膚ファントムに関しては、生体組織の高い誘電率を再現できておらず、今後は炭素繊維材料等の混合によるさらなる性能改善を行っていく予定である。

表4 高含水ゲル筋肉ファントムの組成

Component	Additive amount [g]
Deionized water	Adjusted
Soybean oil	300
Agar	15
Surfactant (Dertergent)	30

表5 高含水ゲル脂肪ファントムの組成

Component	Additive amount [g]
Deionized water	1000
Sodium chloride	Adjusted
Agar	31

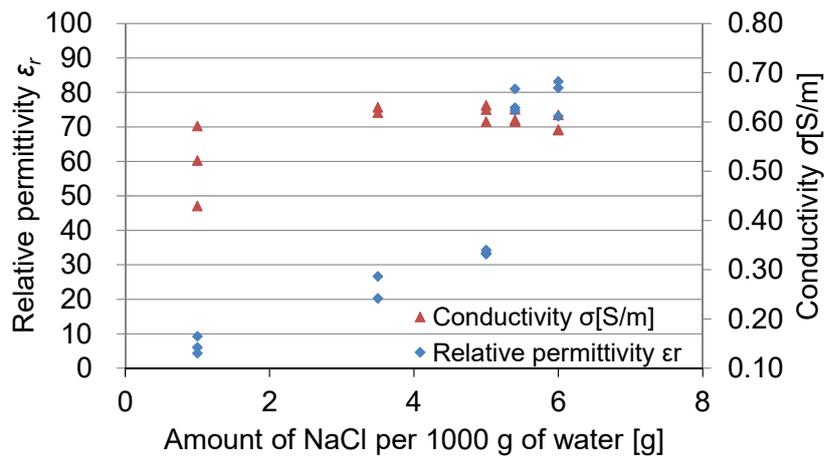


図3 高含水ゲル筋肉ファントムの電気定数

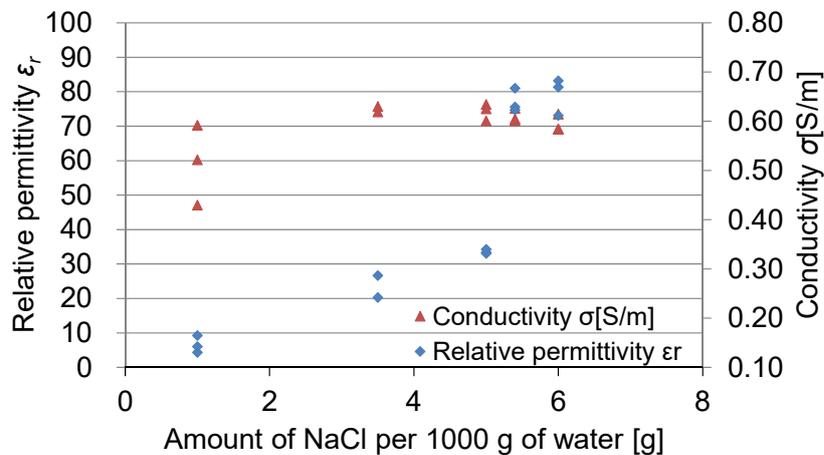


図4 高含水ゲル脂肪ファントムの電気定数

4 三層固体ファントムによる電極入力インピーダンスの評価

開発した三層固体ファントムを用いて、WBAN 物理層の重要な評価指標のひとつである、人体通信送信機電極の入力インピーダンスの測定を行った。三層固体ファントムによる測定結果および数値電磁界解析による計算結果を図5に示す。ファントムおよび数値人体モデルの左手首に相当する箇所に電極を装着した状態で測定を行った。ファントム表面の不均一さや、電極を押しつける圧力によって入力インピーダンスが変動するため、測定はファントム長手方向の中央付近の異なる位置に置いて、3回測定を行った。図5に示した測定結果は3回の測定の平均値である。比較のため、詳細腕部モデルおよび均質円柱モデルを用いた解析結果をあわせて示す。グラフ内の塗りつぶした範囲は、詳細腕部モデルによって計算された電極入力インピーダンス Z_{in} 特性の $1/2 \sim 2$ 倍の範囲であり、送信機回路の出入力インピーダンスを詳細腕部モデルによって計算された Z_{in} の値に設定したと仮定した場合、この範囲にファントムによる測定値がおさまっていれば電極の VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)特性が2以下となることを意味する(もしファントムで測定される入力インピーダンス特性と詳細腕部モデルで計算される入力インピーダンス特性が完全に一致していれば、VSWRは0となる)。つまり、ファントムが人体の入力インピーダンス特性をどの程度模擬できているかどうかを表すひとつの指標となる。グラフからわかるように、均質円柱モデルによる解析値が VSWR=2以下の範囲からはずれているのに対して、三層固体ファントムによる測定結果は範囲内におさまっている。このことから、開発した三層固体ファントムは、人体の電気的特性を良好に模擬できていると考えられる。また、丸および菱形のプロットは、ファントムの電気的特性を電磁界解析上の積層角柱モデル各層に割り当てた数値ファントムによる解析結果である。数値ファントムにより計算された入力インピーダンスは、測定値に近い値をとっており、測定が適切に行われていることが確認できる。

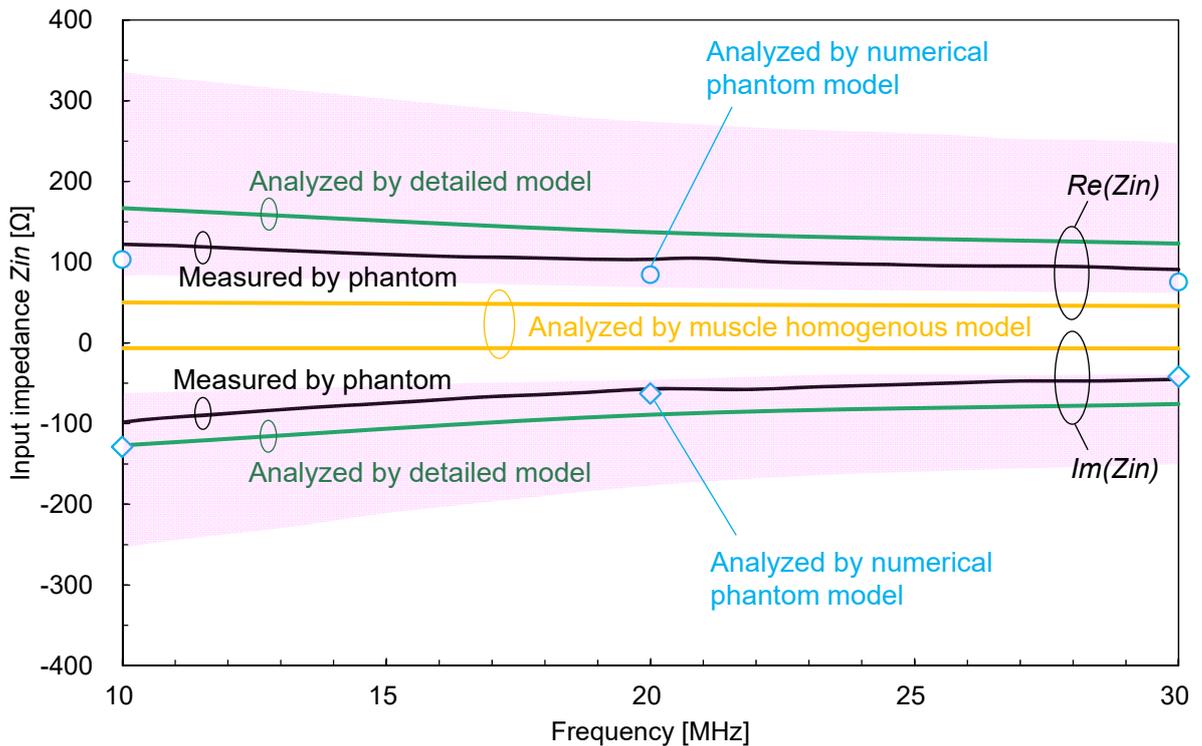


図5 三層固体ファントムによる送信機電極の入力インピーダンス測定

5 伝送特性評価用の小型バッテリー駆動発振器の開発

本研究で開発したファントムは、アンテナ（電極）が人体皮膚に接触/近接する WBAN システムの統合的評価への適用を目標としている。評価指標のうち、アンテナの入力インピーダンス特性および送受信アンテナ間の伝送特性は最も重要な評価指標である。このうち入力インピーダンス特性は、ファントム自身の電気定数評価と同様の方法で、インピーダンスアナライザを用いて測定することが可能である。一方で、平衡型である人体通信電極に対して不平衡な同軸給電を行うと、同軸ケーブルにコモンモード電流が流れ、人体の伝送特性を正確に測定できないことが問題になっている。また、ケーブルや大型の測定器間で生じる結合も深刻な測定誤差を招く。このため、バランスや光ファイバ等によるアイソレーションを試みたが、測定系の影響が依然として残ることを確認した。このため、伝送特性測定におけるファントムの有効性を正確に評価するため、実際のウェアラブル機器使用環境と同様に、バッテリーで駆動する小型の測定機器を開発する。送信機として、デジタル直接合成発振器（DDS）による任意周波数の正弦波発振回路を製作した。本発振器はマイコンやバッテリーまで含め、 $30 \times 30 \times 15 \text{ mm}^3$ 程度の外形寸法である。さらに、測定中に発振周波数等の各種条件を調整するために測定者が測定系（ファントム、被験者、送受信機等）に近づくと、WBAN の測定では大きな影響が生じる可能性がある。このため、本研究で開発した小型バッテリー駆動発振器は、2.4 GHz 帯を用いる Bluetooth で接続されたタブレット端末によって発振周波数を変更可能な仕様とした。現在は発振側（送信側）治具のみ開発が完了している状況であるが、本研究を通してすでに受信機側の仕様詳細も決定しており、可能な限り速やかに開発に取りかかり、小型バッテリー駆動の送受信機および開発したファントムを用いて、人体通信を中心とした WBAN の物理層の特性測定を行う予定である。

6 まとめ

人体通信を含む WBAN 物理層の実験評価において、生体安全性や実験の再現性の観点から人体の電気定数を模擬した電磁ファントムや、電磁的な実使用環境を再現するウェアラブル測定治具が必要不可欠である。本研究では、WBAN システム、特に人体に接触/近接する電極により短波帯の電気信号を入出力し通信を行う人体通信システムの物理層評価への適用を想定し、皮膚、脂肪、筋肉ファントムから構成される、人体腕部を模擬した三層構造の固体ファントムおよびゲルファントムの開発を行った。第一段階として、10~30 MHz において実用可能なレベルの電気定数を有する皮膚、脂肪、筋肉それぞれを模擬した単組織固体ファントムを製作し特性評価を行った。開発した皮膚および筋肉を再現した固体ファントムは目標値を比較的良好に模擬出来ているのに対して、脂肪ファントムは比誘電率、導電率ともに目標値からは大きな差があり、継続的な検討が必要であることが明らかになった。また、成型が容易かつ安価に試作可能な高含水ゲルファントムについても多組織化を想定し、本研究では特に筋肉および脂肪組織に焦点を当て、高含水ゲルファントムの開発を行った。その結果、筋肉ファントムはイオン交換水 1000 g に対して塩化ナトリウム 5.4 g を添加した場合に $\sigma=0.640 \text{ S/m}$, $\epsilon_r=73.0$ となり、脂肪ファントムはイオン交換水 100 g に対して食用油 300 g を添加した場合に $\sigma=0.0269 \text{ S/m}$, $\epsilon_r=19.8$ となり、各組織の電気的特性をよく再現できた。一方、高含水皮膚ファントムに関しては、生体組織の高い誘電率を再現できておらず、今後は炭素繊維材料等の混合によるさらなる性能改善を予定している。

開発した三層固体ファントムを用いて、WBAN 物理層の重要な評価指標のひとつである人体通信送信機電極の入力インピーダンスの測定を行った。その結果、従来の数値電磁界解析に積極的に用いられてきた均質円柱モデルによる解析値が $VSWR=2$ 以下の範囲からはずれているのに対して、三層固体ファントムによる測定結果は範囲内におさまっていることが確認された。このことから、開発した三層固体ファントムは人体の電気定数を良好に模擬できていると考えられる。最後に、測定用ケーブルや大型の測定器間で生じる結合が WBAN の評価に深刻な影響を与えることを考慮し、実際のウェアラブル機器使用環境と同様に、バッテリーで駆動する小型の測定機器を開発した。送信機として、デジタル直接合成発振器（DDS）による任意周波数の正弦波発振回路を採用した。さらに、無線で測定器の状態を制御可能とするため、Bluetooth で接続されたタブレット端末によって発振周波数を変更可能な仕様とした。今後はさらに小型バッテリー駆動の受信治具を開発し、本研究で開発したファントムおよび送信治具とあわせて、人体通信を中心とした WBAN の物理層の特性測定を行う予定である。

【参考文献】

- [1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.6: Wireless Body Area Networks, IEEE Computer Society, 2012.
- [2] M.A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "EM Interaction of Handset Antennas and a Human in Personal Communications," Proc. IEEE, vol.83, no.1, pp.7-17, 1995.
- [3] E. Murakuni, N. Higaki, and K. Shiba, "Analysis of human body electric field distribution using the transmitting antenna in an implantable device," Inst. Electron., Inf. Commun. Eng., vol. 33, no. 15, pp. 13-18, 2009.
- [4] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult male and female of average height and weight and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry "Physics in Medicine and Biology, Vol.49, pp.1-15, 2004.
- [5] M.A. Jensen, et.al., "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," Proc. IEEE, vol.83, no.1, pp.7-17, 1995.
- [6] 宇野由美子, 他, "2~10 GHzにおける人体の組織構造がアンテナ特性に与える影響評価," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J93-B, No.2, pp.278-285, 2010.
- [7] 伊藤公一, 他, "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, vol.181, No.12, pp.1126-1135, 1998.
- [8] Gabriel, R W Lau, C Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz", Phys. Med. Biol. 41, pp.2251-2269, 1996.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Evaluation of Blood Phantom for Non-invasive Blood Glucose Measurement Based on Bioelectromagnetic Response	The 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2018)	2018年7月(採択済 発表予定)
Transmitter-Receiver Distance and Equivalent Output Impedance in Human Body Communication	IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2018 (WCNC 2018)	2018年4月
人体通信における送信機電極間隔が伝送特性に及ぼす影響と等価回路モデル	第32回エレクトロニクス実装学会 春季講演大会論文集	2018年3月
Influences of User's Posture and Contact Conditions of Electrodes on the Transmission Characteristics of Human Body Communication	The 6th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2017)	2017年10月
ウェアラブル機器と据置型機器間の人体通信における姿勢変化と伝送特性	2017年度精密工学会秋季大会公演論文集	2017年9月
Evaluation of Ground Loop through the Floor in Human Body Communication	International Journal of Wireless Information Networks	2017年5月