

環境電磁波による完全バッテリーレスの人体通信システム実現

代表研究者

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や生体信号センサ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)の研究開発が急務である。申請者はWBANの有力な通信方式として、人体そのものを高周波信号の伝送路とする「人体通信」に注目している。人体通信では高周波信号が電極を介して導電性誘電体である人体に入出力されることで通信を行う[1]。この伝送原理から、図1に示すように、人体近傍のみに電界が分布し高秘匿かつ低消費電力で通信を行える。さらに、「触れる」という動作をトリガにして通信が開始されるため、優れたヒューマンインターフェースとしても期待される。

例えば日常のヘルスケアでは、生体信号センサ等のウェアラブル機器を常に装着し、スマートフォン等へ取得した情報を適宜送信することが重要である。このため、機器の常時動作や充電回数の低減が利便性に直結する。一方、ウェアラブル機器は小型軽量が望ましく、搭載可能なバッテリー容量が限定されるジレンマが生じる。この問題を解決するため、環境に存在する光や熱、振動といった各種エネルギー源から電力を取り出し、省電力なセンサ類の電源として利用するエナジーハーベスティングが注目されている。申請者が特に注目しているのは、環境に存在する様々な電磁波をアンテナにより回収し整流することでエネルギー源とする方式である。しかし、小型なウェアラブル機器に搭載可能な規模のアンテナでは、限られた周波数帯において微弱な電力しか回収できないことが課題となっている。

本研究の目的は、導電性誘電体である人体を電磁波を受信するアンテナ素子とみなし、環境電磁波による発電量を飛躍的に増大し、バッテリーレスの人体通信システムを実現することである。通常ウェアラブル機器に搭載可能なアンテナの利用周波数帯は、形状寸法の制約によりGHz帯付近である。一方で、環境電磁波の中でも電力密度が大きい(送信出力が大きい)のはMHz帯と考えられ、これらの周波数帯の電磁波を小型アンテナで効率よく受信することは一般に困難と考えられる。本研究では特に、人体を介して電力を回収する際に重要な指標となる入力インピーダンスや伝送特性などのパラメータについて実機実験および電磁界解析を用いて評価し、発電可能な電力について見積もりを行う。

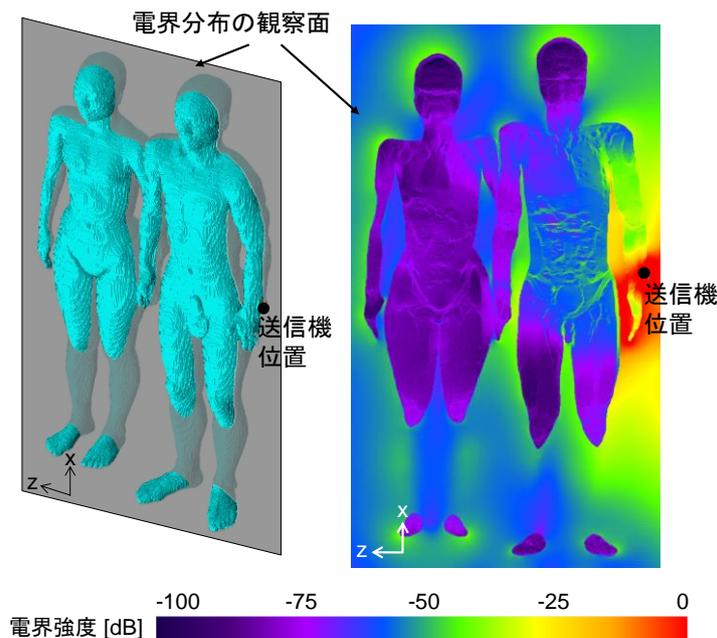


図1 人体通信において人体周辺に分布する電界の計算例

2 環境電磁波の電力密度と回収可能電力の見積もり

人体を電磁波を受信するアンテナ素子とみなし環境電磁波による発電を行う際には、対象とする電磁波の周波数帯域がきわめて重要となる。一方で、利用環境によって存在する電磁波の種類は異なるため、初期段階の検討としてまずは広帯域レクテナを用いて人体に装着した電極からの回収電力を見積もった。ここでは、60 Hz～6 GHz の広帯域に対応するレクテナ素子 (RFD102A) を用いた。擬似的な環境電磁波源として、手首に送信機 (出力電圧 400 mV) を装着し、指先で $5 \times 5 \text{ mm}^2$ のステンレス電極に触れた場合、電極に接続したレクテナの出力は直流 6.8 mV であった。このとき送電効率は -34 dB で、多周波数帯の信号利用やレクテナの最適化で生体信号センサ等を間欠的に駆動できる電力が回収可能な見通しがたった。また、人体に接触しない擬似的な環境電磁波源として、非接触 IC カードのリーダ (出力 100 mW) を用いた場合の回収電力見積もりも行った。IC カードリーダから送信される信号を、手のひらを介し手首の電極とレクテナで受信した。この際の最大出力は 10 V 程度で、強い電磁波源が近くに存在する場合、人体経由でも十分な電力を回収できることが確認できた。本研究の対象からは外れるが、利用環境によっては例えば電子レンジの 2.4 GHz 帯の電磁波などを回収し、有効に使える可能性もある。

最終的な利用周波数帯域の決定について、当初は実際の環境で電力密度測定を行う予定であったが、コロナ禍で屋外測定等が困難となったため、環境電磁波を用いた発電に関する文献情報を総合して適切な帯域を選択した。携帯電話の基地局近傍における電力回収量の見積もり [2]、テレビ放送波を用いた環境発電回路試作 [3]、回路素子の効率からみたレクテナ設計の課題 [4]、人体装着型のレクテナによる無線トランシーバの電力回収 [5]、生体曝露の検討 [6,7] などの情報を総合し 1～100 MHz の帯域を中心に検討を行うこととした。

3 ウェアラブルアンテナ入力インピーダンス特性の評価

身に付けたアンテナで効率良く環境電磁波を受信し発電量を最大化するには、アンテナから人体および空間を見込んだインピーダンス (以降、アンテナの入力インピーダンス) と RF フロントエンド回路のインピーダンスを整合することが不可欠である。このため、電磁界解析と実験を併用してアンテナの入力インピーダンス特性について検討した。まず、ユーザが装着したウェアラブルアンテナの入力インピーダンスを数値電磁界解析によって計算し、性別 (で異なる組織構造) の影響および皮膚の水分状態の影響を見積もった。より現実に近い正確なインピーダンスを計算するため、国立研究開発法人 情報通信研究機構から提供を受けた詳細人体モデル [8] から腕部を抜き出して解析に用いた (図 2)。この左腕部は、皮膚、脂肪、筋肉、腱、血液、皮質骨、海綿骨の 7 組織で構成され、各組織には Cole-Cole 型分散媒質の電気定数 [9] が適用されており、広帯域で実際の生体を模擬した解析が可能である。ウェアラブルアンテナは回路基板、信号電極、グラウンド電極、励振源およびワイヤで構成した。アンテナはスマートウォッチの実装可能面積を想定して、 24 mm^2 の平面に配置されている。送信機構成材料は全て完全導体とした。本研究では手首部分に装着したウェアラブルアンテナの励振源から、アンテナを介して人体および空間側を見込んだ入力インピーダンス (以降、アンテナの入力インピーダンス) について、Finite Difference Time Domain (FDTD) 法による電磁界解析を用いて 1～100 MHz の範囲で計算した。解析の結果、性別による入力インピーダンスの差は、周波数が低いほど大きくなることが明らかになった。また、乾燥皮膚の場合は男女間で入力インピーダンスの差は最大 20%、湿潤皮膚の場合は最大で 10% となった。インピーダンスの変動による高周波信号の反射を考慮すると、性別による入力インピーダンスの差は十分に小さい。すなわち、同じアンテナや後段の回路構成を男女ユーザに共通して使用できると考えられる。また、皮膚の水分状態に対する入力インピーダンスの差は低周波で増加し、11 MHz で最大となった。入力インピーダンス実部で最大差 53%、虚部で最大差 80% である。一方で、数 MHz を超えると、皮膚の水分状態の影響は十分に小さくなった。このため、伝送効率だけでなく入力インピーダンスの安定性を考えた場合、数 MHz 以上の帯域をキャリア周波数に用いることが望ましいと考えられる。

つづいて、同様の条件で被験者実験を行い、ユーザの個人差が入力インピーダンスに与える影響を見積もった。本実験の被験者は 20～30 歳台の日本人で、男性 12 名、女性 10 名、合計 22 名の協力を得た。測定の結果を図 3 に示す。被験者間の入力インピーダンスの差は周波数が低いほど大きくなった。これは電磁界解析の結果と一致しており、表皮効果によって高周波では電流が腕の表層のみに流れるのに対し、低周波では、電流が内部組織まで到達するため、皮膚や脂肪層の厚みなどの個人差が顕著に現れたと考えられる。一方で個人差に起因する入力インピーダンスの変動について、一例として電圧定在波比率 (VSWR) を用いて評価し

た. V_{SWR} は入力インピーダンス変動による信号反射量を評価する指標であり, 0 (反射なし=最良状態) $\sim\infty$ (全反射=最悪状態)の値をとる. 一般的なアンテナシステムでは $V_{SWR}\leq 3$ が望ましいとされる. 個人差によって劣化する V_{SWR} の最悪値は, 1 MHz において男性と女性の被験者でそれぞれ 2.87 と 2.03 となった. また, 5 MHz 以上の周波数では $V_{SWR}\leq 2$ となった. この結果は, 5 MHz を超える周波数が, 個人差を低減し入力インピーダンスを安定させることを意味する. 以上の結果から, 最適な周波数選択により, ユーザ個人差に対して耐性のある環境発電システムが実現できると考えられる.

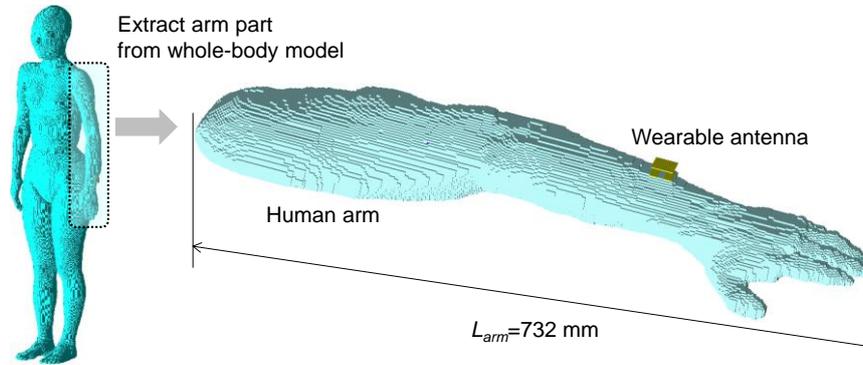


図2 人体とウェアラブルアンテナの数値電磁界解析モデル

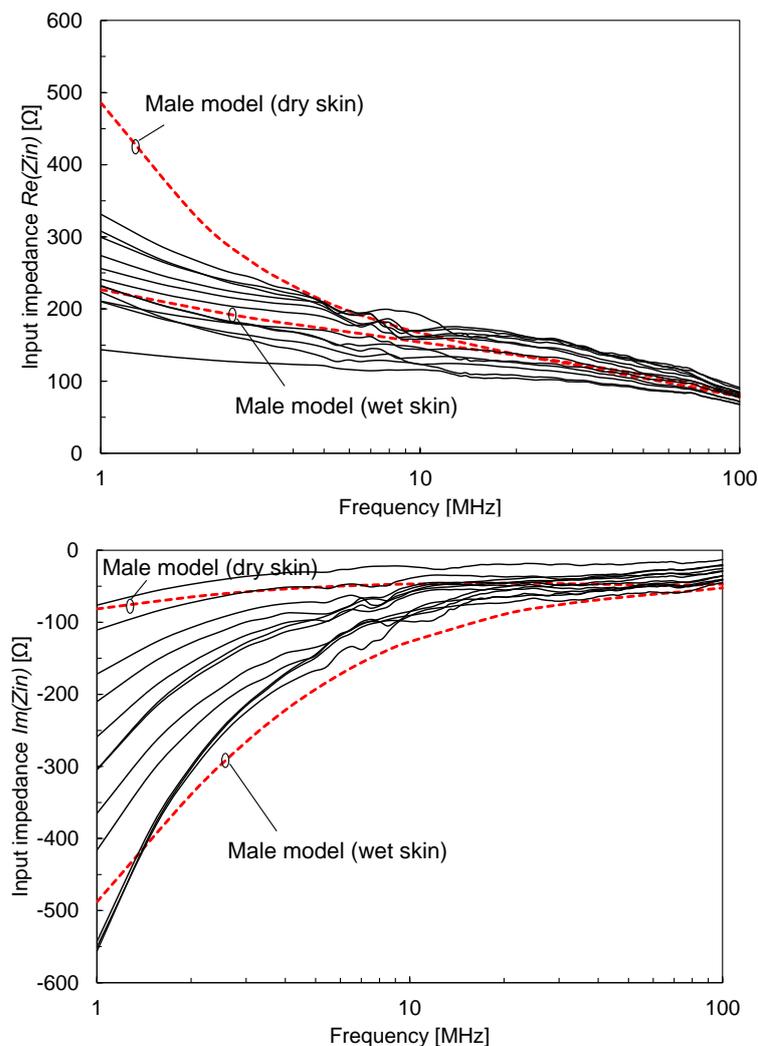


図3 ウェアラブルアンテナ入力インピーダンスの測定結果および解析結果

4 ウェアラブルアンテナの最適化と試作

前章の結果に基づき、図4に示すウェアラブルアンテナを試作した。本アンテナはフレキシブル基板と生体適合メッキ処理した導体箔で構成され、人体の様々な部位に密着して配置でき、繰り返し使用可能である。本アンテナの電気特性に問題ないことは被験者実験で確認済みである。また、各種測定器やウェアラブル測定治具と電氣的に安定した接続ができるよう SMA コネクタを基板上に実装した。受信機はフィルタおよび高周波増幅器で構成し、送信機同様にバッテリー駆動とした。整流・受信回路(現在開発中)は、腕時計サイズの筐体に収納でき、開発済みのウェアラブルアンテナを筐体に直接接続可能である。オシロスコープ等の外部機器を用いず測定できるように、十分なダイナミックレンジを有し、かつ小型化が可能なログアンプ AD8307 の利用を前提として開発を進めている。また、Bluetooth 接続したスマートフォンを通し、ゲインなど各種設定変更やデータ保存を行うアプリもあわせて開発を進めている。

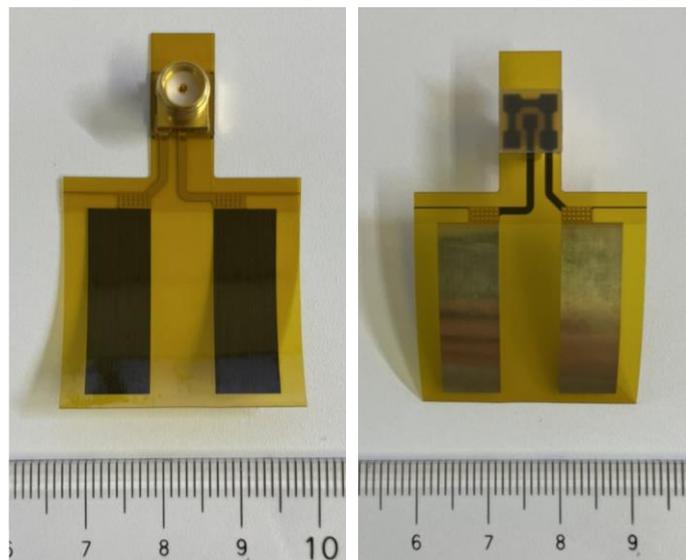


図4 試作したウェアラブルアンテナ

5 まとめ

本研究では、人体を電磁波を受信するアンテナ素子とみなし環境電磁波を用いて発電することで、バッテリーレスの人体通信システムを実現することを最終目標として、電力回収量の見積もり、ウェアラブルアンテナの入力特性解析および測定、それらに基づいて最適化したウェアラブルアンテナの試作等を行った。最適化したウェアラブルアンテナや開発中の整流・受信回路については、継続して評価を行っていく予定である。また、本研究で得られた生体と電磁波の相互作用に関する基礎データは、人体通信のみならず WBAN におけるノイズ低減やバッテリーレス化、さらには電磁曝露など生体に対する安全性評価においても重要な意味を持つと考える。今後は得られた基礎データを土台として、WBAN 機器の設計条件として、利用形態、装着箇所、機器サイズ、周波数帯などが与えられたとき、人体および周辺空間へ効率よく信号を入出力できるアンテナ/電極構造、フロントエンド回路構成、符号化変調方式、生体安全性や電磁雑音対策などを明確化する。すなわち、設計に必要な基礎データを提供し、予備実験や解析を繰り返さず人体通信や WBAN 物理層の基本設計を可能にするような研究に展開していく予定である。

参考文献

- [1] 村松大陸, “ボディエリアネットワーク技術「人体通信」と EMC -基礎と技術動向 EMC を考慮した電極設計-”, 月刊 EMC, Vol.319, pp.25-41, 2014.
- [2] 新井ら, “電磁波による環境発電の課題”, 信学技法, AP2011-72, No.5, pp.43-46, 2011.

- [3] R. J. Vyas, et al., "E-WEHP: A Batteryless Embedded Sensor-Platform Wirelessly Powered From Ambient Digital-TV Signals", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 61, no. 6, pp. 2491-2505, 2013.
- [4] J. Bito, et al., "Ambient RF Energy Harvesting From a Two-Way Talk Radio for Flexible Wearable Wireless Sensor Devices Utilizing Inkjet Printing Technologies", vol.63, no. 12, pp. 4533-4543, 2015.
- [5] 川原, "電磁波からのエネルギーハーベスティング技術とその応用", 月刊 EMC, No.310, pp.71-80, 2014.
- [6] 高橋ら, "人体組織等価液剤を用いた人体等価アンテナの開発", 信学技法, EMCJ2006-30, No.7, pp.65-69, 2006.
- [7] 鯨野, "電波の生体影響に関する 2, 3 の話題", 信学技法, AP2013-189, No.3, pp.25-30, 2014.
- [8] 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.
- [9] 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
Input Impedance Analysis of Wearable Antenna and Experimental Study with Real Human Subjects: Differences between Individual Users	<i>Electronics</i> , Vol.10, No.10	2021 年 5 月
パッシブ方式人体通信における床面グラウンド寄与に関する検討	電子情報通信学会 2021 年総合大会	2021 年 3 月
体通信型 RFID におけるタグ条件に対する受信電力特性	電子情報通信学会 2021 年総合大会	2021 年 3 月
Radio Propagation Analysis for Multiuser WBAN Using 920 MHz ISM-band	The 10th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2021)	2021 年 10 月 (査読中)