

完全バッテリーレスの人体通信環境に向けた マルチバンド生体アンテナの研究

Multi-band Bio-Antenna for a Full Battery-less Human Body Communication

M20助自104

代表研究者 村松大陸 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻
准教授

*Dairoku Muramatsu Associate professor, Graduate School of Informatics and Engineering,
Department of Mechanical and Intelligent Systems Engineering,
The University of Electro-Communications*

This study focuses on harnessing environmental electromagnetic waves as an energy source for wearable devices. The challenge lies in the limited power collection capacity of antennas on small wearables. Our goal is to create a battery-free human body communication system, utilizing the human body as an antenna element due to its conductive dielectric properties. We aim to design a wearable antenna that resonates in the MHz band, leveraging the altered input characteristics of an antenna when near or in contact with the human body. Before prototype development, we studied the antenna's input impedance characteristics through experiments and electromagnetic field analysis. We analyzed the wearable antenna's input impedance on the wrist, considering factors like gender and skin moisture, across 1 to 100 MHz. Subject experiments were conducted to understand individual user differences in input impedance. Using this data, we're modeling the antenna's input impedance characteristics. We assessed impedance variation using the voltage standing wave ratio (VSWR), an index for signal reflection due to impedance variation. Ideally, VSWR should be ≤ 3 for antennas. Our findings showed a VSWR of 2.87 for males and 2.03 for females at 1 MHz. Above 5 MHz, VSWR was ≤ 2 for all subjects, suggesting reduced individual differences and stable impedance in this frequency band. This indicates potential for a power regeneration technology resilient to user differences, considering the environmental electromagnetic field's frequency. A prototype wearable antenna, made of a flexible substrate and conductive foil, was then developed.

研究目的

日常のヘルスケアなどでは、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ネルギーハーベスティングが注目されている。我々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、限られた周波数帯域において極めて微弱な電力しか回収できないことが大きな課題となっている。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、完全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。

概 要

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のは数百MHz以下の帯域だが、これらを小型アンテナで効率よく受信することは一般には困難である。本研究では、アンテナの入力特性が人体近接・接触時に大きく変化することを利用し、MHz帯で共振可能なウェアラブルアンテナの試作を目指す。また、アンテナ試作に先駆けて、発電量増大に必要なアンテナの入力インピーダンス特性について、実験と電磁界解析を併用して検討した。

まず、手首に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FDTD法による電磁界解析により計算し、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MHz帯の周波数範囲で広く見積もった。より現実に近い精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から腕部を抜き出して解析に用いた。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。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。信号電極とグラウンド電極として、我々の過去の検討に基づきそれぞれ $8 \times 24 \text{ mm}^2$ の電極を採用した。アンテナの構成材料のうち導電性のもの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、電極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(XFDTD, Remcom Inc.)を用いて1~100MHzの範囲で計算した。

計算の結果、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、同じウェアラブル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、1 MHzで最大となった。入力インピーダンス実部では最大差53%、虚部では最大差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。

さらに同一条件で被験者実験を行い、ユーザ個人差が入力インピーダンスに与える影響を同様の周波数範囲で見積もった。本結果を用い、ウェアラブルアンテナの入力インピーダンス特性のモデル化をすすめている。さらに得られた特性に基づき、個人差に起因する入力

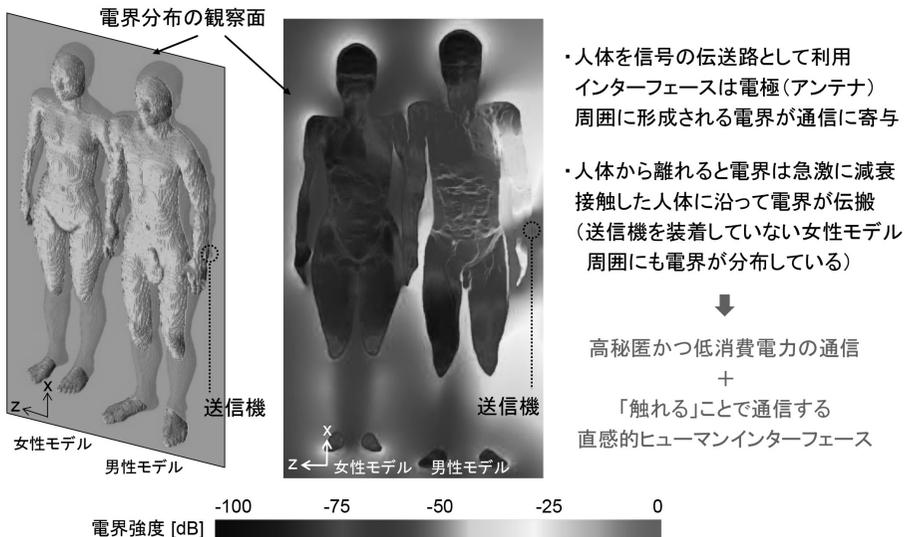
インピーダンスの変動について、一例として電圧定在波比率 (VSWR) を用いて評価した。VSWRは入力インピーダンス変動による信号反射量を評価する指標であり、0 (反射なし = 最良状態) ~ ∞ (全反射 = 最悪状態) の値をとる。一般的なアンテナシステムではVSWR ≤ 3が望ましいとされる。得られた入力特性からVSWRの周波数特性を算出した結果、個人差によって劣化するVSWRの最悪値は、1 MHzにおいて男性被験者グループで2.87、女性被験者グループで2.03となった。また、5 MHz以上の周波数では全被験者でVSWR ≤ 2となった。この結果は、5 MHzを超える周波数帯において、個人差を低減し入力インピーダンスを安定させることが可能であることを示している。以上の結果から、回収する環境電磁波の周波数を考慮することにより、ユーザ個人差に対してロバストな電力再生を実現できると考えられる。この結果を受け、フレキシブル基板と導体箔で構成されるウェアラブルアンテナの試作を行った。試作アンテナの詳細な特性については今後検討予定である。また、MHzだけでなく

GHz帯などの環境電磁波も有効活用するため、パッチや寄生素子などの構造をアンテナに積層化することでマルチバンド化し、さらなる発電量の増大も目指していく。

本文

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。我々は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」を検討している。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し通信を行う。この伝送原理から、図1の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」動作をトリガに通信が開始するため、優れたヒューマンインターフェースにもなる。

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。我々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、限られた周波数帯域において極めて微弱な電力しか回収できないことが大きな課題となっている。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、完全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AMラジオ放送(530 kHz~1.6 MHz)、FMラジオ放送(76~108 MHz)、地上波デジタル放送(470~710 MHz)等であり、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困難である。一例として身長170 cmの人体を大地グラウンドに立った1/4波長モノポールアンテナとみなした場合、人体の誘電率による波長短縮を考慮した上で、共振周波数はおよそ1.7 MHzと計算される。これは例えば、AMラジオ放送等の電磁波を効率良く受信できるアンテナと考えられる。本研究では、アンテナの入力特性が人体近接・接触時に大きく変化することを利用し、MHz帯で共振可能なウェアラブルアンテナの試作を目指した検討を行った。また、アンテナ試作に先駆けて、発電量増大に必要な不可欠となるアンテナの入力インピーダンス特性について、実験と電磁界解析を併用して検討した。

まず、手首に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FDTD法による電磁界解析により計算し、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MHz帯の周波数範囲で広く見積もった。より現実に近い精確なインピーダンスを計算するため、国

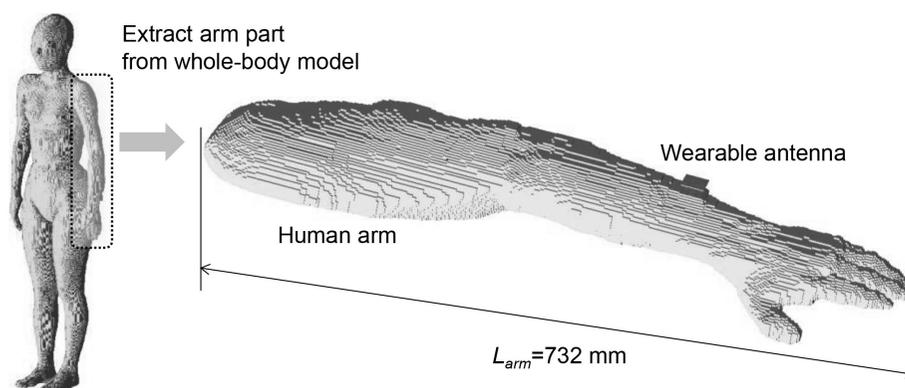


図2 数値電磁界解析モデル

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。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。信号電極とグラウンド電極として、我々の過去の検討に基づきそれぞれ $8 \times 24 \text{ mm}^2$ の電極を採用した。アンテナの構成材料のうち導電性のもの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、電極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(XFdtd, Remcom Inc.)を用いて1~100MHzの範囲で計算した。計算の結果を図3に示す。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

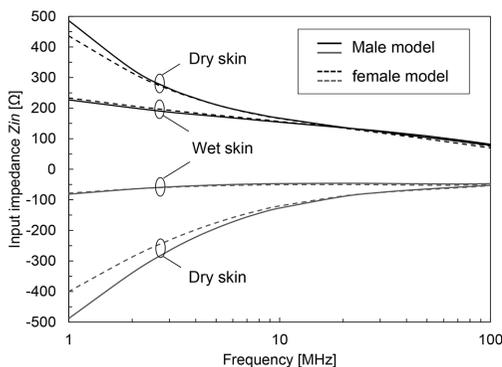


図3 数値電磁界解析によるアンテナ入力インピーダンスの計算結果

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、同じウェアラブルアンテナや後段の回路構成を男女ユーザー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、1 MHzで最大となった。入力インピーダンス実部では最大差53%、虚部では最大差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、手首に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被験者実験によって測定し、ユーザー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。試作タグ電極と測定系を図4に示す。試作ウェアラブルアンテナは回路基板を模擬した銅板、ステンレス板による信号電極およびグラウンド電極、ワイヤ、アクリル板、SMAコネクタで構成した。また、着脱を容易にするため腕時計のケースにアンテナ電極を内蔵した。信号電極およびグラウンド電極はSMAコネクタの内導体および外導体にそれぞれ接続されている。アンテナ電極各部の寸法は電磁界解析モデルのものと同様である。アンテナの入力インピーダンスは被験者

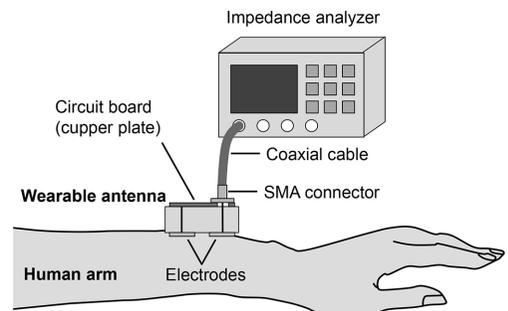


図4 試作アンテナと入力インピーダンスの測定系

の左手首に装着した試作アンテナをインピーダンスアナライザに接続して測定した。本実験の被験者は合計22名の協力を得た。測定の結果を図5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。VSWR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 $VSWR \leq 3$ が望ましいとされる。個人差

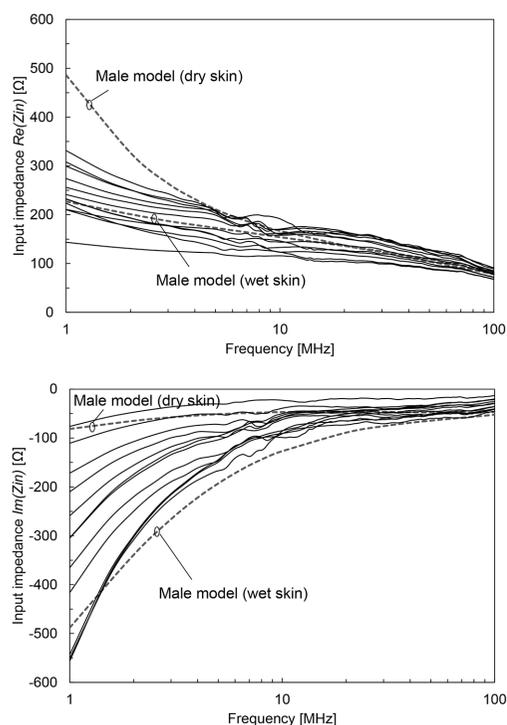


図5 被験者実験によるアンテナ入力インピーダンスの測定結果

によって劣化するVSWR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 $VSWR \leq 2$ となった。この結果は、5 MHzを超えるキャリア周波数が、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、最適なキャリア周波数を選択することにより、ユーザ個人差に対して耐性のある人体通信システムが実現できると考えられる。

この結果を受け、図6に示すフレキシブル基板と導体箔で構成されるウェアラブルアンテナの試作を行った。試作アンテナの詳細な特性については今後検討予定である。

今後の研究の見通し

本研究では特に人体を利用して環境電磁波を効果的に回収する方法について検討した。特にMHz帯の電磁波を効率的に回収するため、人体に装着したウェアラブルアンテナの入力インピーダンス特性を広帯域で解析し、さらに実験的検証も行ったうえでフレキシブルなウェアラブルアンテナを試作した。今後は人体の様々な部位に装着した場合の入力特性や発電特性を検証するとともに、MHz帯だけでなく

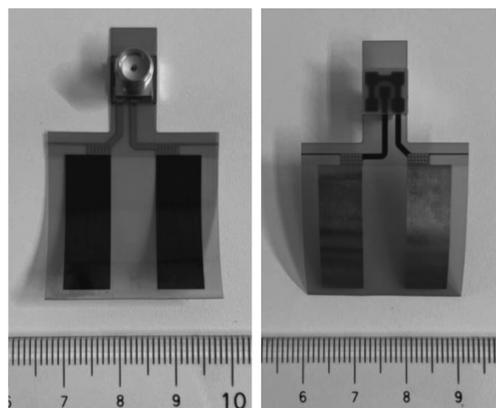


図6 試作したウェアラブルアンテナ

GHz帯などの環境電磁波も有効活用するため、パッチや寄生素子などの構造をアンテナに積層化することでマルチバンド化し、さらなる発電量の増大を目指した取り組みを進めていく。

本助成金による主な発表論文、著書名

[関連する原著論文]

- 1) D. Muramatsu, Y. Sasaki, “2.4 GHz/5.6 GHz Dual-use Wearable Patch Antenna Integrated with Electrodes and Parasitic Element for Wireless Body Area Network”, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, Vol.19, No.1, 2023. (Accepted)
- 2) D. Muramatsu, M. Kodama, “Signal transmission analysis in implantable human body communication for abdominal medical devices”, *AIP Advances*, Vol.13, No.8, pp.1-7, 2023.
- 3) 村松大陸, 佐々木健, “短波帯向け多層ファントムのバイオインピーダンス模擬性能評価”, *電気学会論文誌C*, Vol.142, No.5, pp.625-626, 2022.
- 4) D. Muramatsu, K. Arai, K. Higuchi, “A Study on Floor Ground Contribution in Semi-Passive Human Body Communication”, *IEICE Commun. Express*, Vol.11, No.1, pp.39-45, 2022.
- 5) D. Muramatsu, K. Sasaki, “Input Impedance Analysis of Wearable Antenna and Experimental Study with Real Human Subjects: Differences between Individual Users”, *Electronics*, Vol.10, No.10, pp.1152-1164, 2021.

[関連する国際会議論文]

- 1) Y. Sasaki, D. Muramatsu, “21 MHz/2.4 GHz Dual-Use Wearable Antenna for IEEE 802.15.6 Wireless Body Area Network”, IEEE GCCE 2023, Oct. 2023. (Accepted)
- 2) M. Kodama, D. Muramatsu, “Analysis of Implantable Human Body Communication for Implantable Abdominal Medical Devices”, IEEE EMBC 2023, T7-PG18, Jul. 2023.
- 3) D. Muramatsu, “Radio Propagation Analysis for Multiuser WBAN Using 920 MHz ISM-Band”, IEEE GCCE 2021, pp.450-451, Oct. 2021.

[関連する国内学会発表]

- 1) 佐々木章乃, 村松大陸, “ボディエリアネットワーク向け21 MHz/2.4 GHz動作ウェアラブルアンテナ”, *LIFE* 2023, 3A2F5, pp.1-3, 2023年9月
- 2) 小玉美悠, 村松大陸, “腹部埋込型医療機器を対象としたインプラントブル人体通信の研究”, 令和5年電気学会全国大会, 3-005, 2023年3月
- 3) 村松大陸, 新井健太, 樋口健一, “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, B-19-19, 2021年3月
- 4) 李贊, 佐々木健, 村松大陸, “人体通信型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, A-14-4, 2021年3月