

藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2022年 8月 30日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 明彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 電気通信大学 _____

職 名 准教授 _____

氏 名 村松 大陸 _____



【提出書類】

(1)研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4版3枚以内):研究状況を示す写真等の資料

(2)収支報告書

添付書類:助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合:支払一覧表と支払部門担当者確認署名

⑤

(1)テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

フルパッシブ環境センシングに向けた空間電磁界からの電力再生技術の開発

(2)本研究の期間

(西暦) 2021年4月～2022年3月

(3)本研究の目的

持続可能な未来社会へ向けて様々な環境問題の解決や生活様式の変革が求められる中、自然環境、住環境、人体環境に大量のセンサを配置し種々の物理量(温度、湿度、照度、気圧、音圧、速度、振動、各種の生体信号など)を計測し活用する「環境センシング」システムへの期待が高まっている。こうしたシステムでは取得した環境情報を基地局へ適宜送信することが重要であり、センサの常時動作や電池交換回数の低減が利便性に直結する。一方、環境に配置するセンサ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、空間に存在する様々な電磁界をアンテナで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再生できないことが大きな課題となっている。本研究の最終的な目的は、完全バッテリーレス、すなわちフルパッシブの環境センシングシステム実現を目指し、センサ設置環境に存在する対象物を電力再生システムの一部とみなして、空間電磁界による発電量を飛躍的に増大することである。

(4)本研究の概要

本研究の最終的な目的は、完全バッテリーレス、すなわちフルパッシブの環境センシングシステム実現を目指し、センサ設置環境に存在する対象物を電力再生システムの一部とみなして、空間電磁界による発電量を飛躍的に増大することである。今回助成を受けて行った研究では特に、センシング対象として人間に注目する。人体周辺で利用する通信システムでは現在のところ 2.4 GHz 帯や 920 MHz 帯の無線システムの使用が多い。しかし、一般に周波数が高いほど周囲の(水分を含む)物体に吸収あるいは遮蔽される電磁波のエネルギーは大きくなり、これらの周波数帯で人体は障害として作用し通信を妨げる厄介な存在として扱われてきた。本研究では、従来はいかに影響を除くかが最重要視されてきた対象物(今回は人体)の存在を、電磁界を受信・回収するシステムの一部として積極的に活用する。具体的には各環境や周波数における空間電磁界の電力密度分布を考慮したうえで回収対象とする空間電磁界の周波数を大まかに見積もる。そのうえで、人体に装着したアンテナ電極の入力特性について検討し、ユーザ間の個人差、インピーダンスの整合度やその安定性などの観点から、対象とすべき周波数について検討する。

(5)本研究の内容及び成果

まず回収対象とする電磁波の周波数を検討するため、60 Hz～6 GHz の広帯域に対応するレクテナ素子(RF Diagnostics, LLC, RFD102A)とスペクトラムアナライザ(Tektronix, RSA306B)を用いて、電力密度を測定した。レクテナ入力に人体通信用のステンレス電極を装着し人体手首部に装着し、屋内外で受信電力レベルを測定した結果、21 MHz 帯で-30 から-40 dBm 程度の比較的大きな受信電力が得られた。これは当該周波数帯がアマチュア無線で用いられるバンドのひとつであるためと考えられる。数十 MHz の周波数帯の電磁界を効率よく受信しようとする場合、例えば 10 MHz では 1 波長が 30 m なので、本来は大きなサイズのアンテナが必要となる。しかし、今回の実験のように手首に装着できる程度のサイズでも比較的大きな受信電力を得られたのは、人体そのものもアンテナとして機能し、数十 MHz の周波数帯の電磁界を効果的に受信し電極およびレクテナを経由して回収できたためと考えられる。このため、本研究では電力密度が大きく、かつ人体を用いて効果的な電磁界の回収および電力再生が期待される、数十 MHz 前後を主な対象周波数として検討を進める。

次に、人体に装着したアンテナ電極の入力特性について 1～100 MHz で検討を行った。人体に装着するアンテナ電極は、環境(空間電磁界)、センシング対象(人体)、デバイスを接続するインターフェースとなるため、システムで最も重要な構成要素である。空間電磁界を効率的に回収するという点で、特にアンテナ電極の入力インピーダンス特性(人体に装着する場合はそのユーザのバイオインピーダンス特性ともいえる)は、不要な信号反射を低減するために不可欠な設計パラメータである。本研究では人体に装着した状態のアンテナ電極の入力インピーダンス特性について、様々なユーザが利用することを考慮し、個人差(皮膚の水分状態、年齢、性別、体型など)に注目し、被験者実験と電磁界解析を併用して検討した。測定および解析したアンテナ電極の入力インピーダンス周波数特性を図 1 に示す。

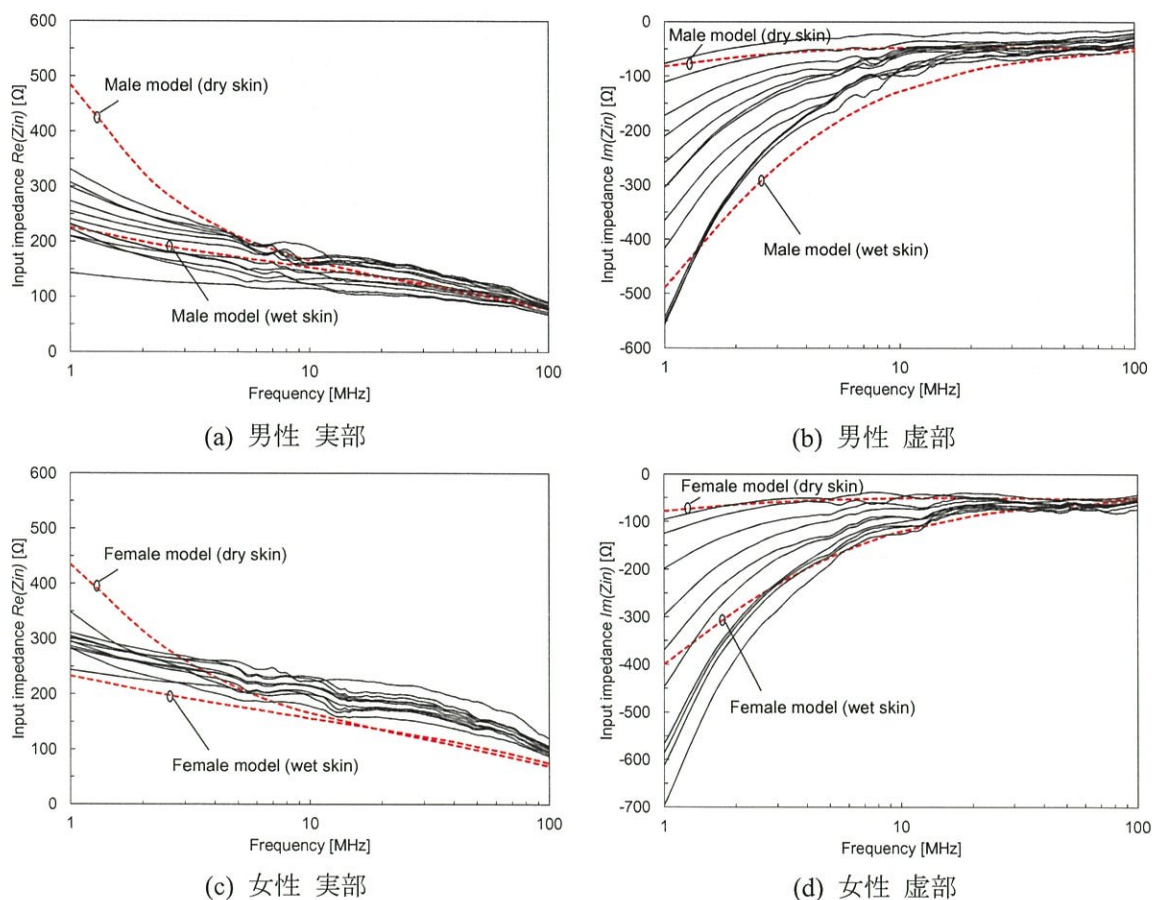


図 1 アンテナ電極の入力インピーダンス周波数特性

入力インピーダンスは被験者の左手首に装着した電極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20～30歳代の日本人22名の協力を得た。検討の結果、インピーダンス変動による高周波信号の反射を考慮すると、性別によるインピーダンスの差は十分に小さかった。すなわち、同一形状のアンテナや、アンテナに接続される整流回路の構成を、男女ユーザで共通して利用できることが期待される。また、皮膚水分状態に対するインピーダンス差は低周波で増大する一方、数 MHz を越える周波数では無視できるほど小さかった。このため、伝送効率だけでなくインピーダンスの安定性を考慮すると、数 MHz 以上を対象周波数として選択することが適切であると考えられる。また、被験者間の入力インピーダンスの差は低周波数で増大した。これは電磁界解析の結果と一致しており、表皮効果により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結果と考えられる。

さらに、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 $VSWR \leq 3$ が望ましいとされる。図2に VSWR の周波数特性を示す。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 $VSWR \leq 2$ 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、最適な空間電磁界の周波数を選択することにより、ユーザ個人差に対してロバストな電力再生技術を実現できると考えられる。一例として、図3に示すウェアラブル電極を試作した。本電極はフレキシブル基板と導体箔で構成され折り曲げが可能で、人体の様々な部位に密着して配置でき、さらに繰り返し使用も可能である。さらに、本電極をインターフェースとして心電図、脈波、血糖値などの各種の生体信号をセンシングできる可能性もあり、別に検討を進めている。

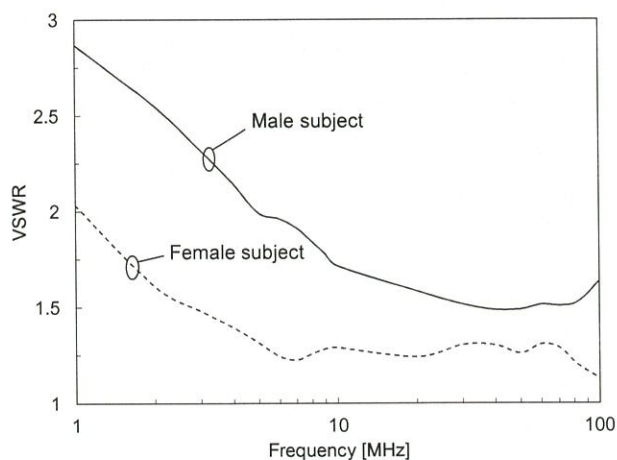


図2 VSWR の周波数特性

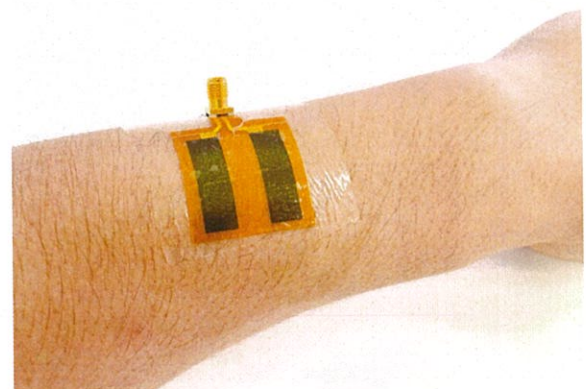


図3 試作したフレキシブルアンテナ電極

(6)本研究の考察

本研究では特に人体を利用して空間電磁界を効果的に回収する方法について検討した。特に環境、対象物、機器のインターフェースとなるアンテナ電極に着目し、その入力インピーダンス特性について評価し、個人差や安定性の点から対象とすべき周波数帯を明らかにした。結果として、アマチュア無線のバンドのひとつである 21 MHz 帯を含む数十 MHz 程度が有力な候補であると考えられる。考今後は人体以外の様々な自然・人工物を対象として、空間電磁界を効率的に回収し電力源とする環境センシングシステムについて検討を進める予定である。

⑤

(7)共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

なし

(8)本研究の成果の公表先

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.

また、2022年度に国際会議への論文投稿を予定している。

[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。