

ウェアラブルデバイスへの利用を想定した 人体通信の伝搬特性に関する実験結果と考察

山本恵理^{†1} 佐々木良一^{†2}

近年, 自分で自分の健康を管理するヘルスケアへの関心が高まっている. ヘルスケアを目的とするデバイスとして用いられるウェアラブルデバイスは, WBAN(Wireless Body Area Network)とよばれる人体を中心とした無線通信により, ハブ端末であるスマートフォンやタブレットとの通信が行われている. この WBAN は, IEEE 802.15.6 によって規格が策定されており, 共通の MAC 層を用い, 物理層として UHF 帯狭帯域通信, 超広帯域通信(UWB), 人体通信(電界方式)の三種類が技術仕様として定められている. 我々はこの中でも, ウェアラブルデバイスへの搭載が期待されている, 消費電力の少ない人体通信について着目した. 人体通信は, 電流方式, 電界方式, 弾性波(超音波)方式の三種類が提案されているが, 電界方式については, シミュレーションによる報告事例はあるが, 実験による測定結果の報告は少ない. また, 人体通信機能は, ウェアラブルデバイスへの搭載が期待されているものの, 実際に搭載された事例は ID カードと玩具の数例しかなく, その通信の安定性については, まだいくつかの課題が残されている. そこで著者らは, 人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスを想定し, スマートフォンの通信を, 人体通信を用いて行う場合の人体上の伝搬特性と周波数特性について, 21MHz と 455kHz の搬送波周波数を用いて測定を行った. この結果, 21MHz に比べ 455kHz を使用した人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスを, 手または足に装着することにより安定した通信を行えることを確認した.

Experimental results and consideration on the propagation characteristics of the human body communication to use for wearable devices

ERI YAMAMOTO^{†1} RYOICHI SASAKI^{†2}

1. はじめに

近年, 高齢化社会の日本において, 一人住まいの高齢者が安心して生活するための自分で自分の健康管理をするヘルスケアが注目されている. また, これらのヘルスケア情報である脈拍, 血圧, 心拍などの生体情報を取得するセンサを有するデバイスとして注目されているのが, ワイヤレス通信機能を搭載したウェアラブルデバイスである. ウェアラブルデバイスとハブとなるスマートフォンなどの端末間で通信を行う, 人体を中心とした通信は, WBAN(Wireless Body Area Network)と呼ばれ, 国際標準規格の IEEE 802.15.6 で共通の MAC 層を用い, 物理層が UHF 帯狭帯域通信, 超広帯域通信(UWB), 人体通信(電界方式)の三つが提案されている[1].

この中で今後, ウェアラブルデバイスへ搭載される通信方式として, 消費電力の少ない人体通信への期待が高まっている[2]. 人体通信は三種類あり, 電流方式, 電界方式, 弾性波(超音波)方式の三つの方式が提案されている. 電流方式に関しては, 人体に影響のない程度の微弱な電気信号を流し, 通信を行う通信方式であり, その安定性や電極構造が簡単なため, 実用化を目指す企業で研究が行われている

[3]. 弾性波方式については, 拓殖大学の前山利幸氏のグループが研究を行っており, 骨伝導, 肉伝導の技術に近い[4].

一方, 人体の周りに存在している電界を使った電界方式については, 直接電極に触れずに非接触で通信できるという特長があり, ウェアラブルデバイスへ搭載するのに適した方式であるが, シミュレーションによる報告事例はあるものの[5], 実験による測定結果の報告事例は非常に少ない[6]. また, 実際に人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスと, ハブ端末との通信システムも前例報告は少なく, その実用化に向けて未知な部分が多い. そのため, ウェアラブルデバイスでの使用を想定した, 人体通信の伝搬特性, 周波数特性を調査し, 調査結果を反映させ, 実際にウェアラブルデバイスとハブ端末との通信システムを構築することでその実用性を検証することは大きな意味がある.

そこで, 本研究では, IEEE 802.15.6 の規格にある, 21MHz の搬送波周波数を使用した人体通信機能を有するウェアラブルデバイスの試作を行い, 人体上の伝搬特性の測定を行った. 試作では送信機, 受信機共に, 人体上の電界に影響を与えないため, 電池で動作する実験装置を製作した. また, KDDI 研究所の発表した論文を参考にし[7], ウェアラブルデバイス同士の通信として放射電界を抑圧した, 伝搬

^{†1} 東京電機大学大学院

^{†2} 東京電機大学

ロスが少ない低い周波数(本論文では455kHz)の搬送波周波数を使用し、同様に人体上の伝搬特性の測定を行った。

本論文ではこれらの測定結果とその実用に向けての検討結果の報告を行う。

2. システムイメージと技術課題

現在、実際にヘルスケアを目的としたウェアラブルデバイスは、Melon社とNeurosky社によって開発された、ヘッドバンド型デバイスの脳波を計測するMelonや[8]、Fitbit社によって開発されたブレスレット型デバイスの一日の消費カロリーなどを測定するFitbit flex[9]などがある。これらは、ウェアラブルデバイスから取得できる生体情報を、WPANの方式であるBluetoothを使用しスマートフォンと共有する。そしてスマートフォンによりその情報を可視化することで、健康管理をすることを目的としている。ここでも、ウェアラブルデバイスに搭載されている通信方式としてWPAN規格のBluetoothが用いられているが、消費電力の大きさが問題となっている。IEEE 802.15.6(WBAN)の定義は、WPANに比べ通信距離は人から3m程度と短くなっているため低消費電力化が可能であるが、UHF帯近距離無線やUWBの無線システムも、ウェアラブルデバイスに内蔵できる形状の小形アンテナの設計が難しい。一方、人体通信は、電界方式の場合、無線通信のアンテナに相当する部品は電極と呼ばれ、これは人体に対し静電結合を行えばよいので小さな板金で構成できるので、ウェアラブルデバイスの筐体などがそのまま電極として利用できる。人体通信では、無線通信における技術課題の多い小形アンテナが不要となるためハードウェア構成が簡単になるメリットは大きい。本研究では、図1に示すように今までのウェアラブルデバイスでハブ端末との通信に使用されていたBluetoothの代替として人体通信を使用し、ヘルスケアシステムの構築を想定した。この際、人体通信は、筐体自体を電極として設計ができるため、ウェアラブルデバイスの小型化を目指し、人体通信の特徴である低消費電力化を意識して設計を行った。システム設計の課題として、電界方式の人体通信では、人体上の伝搬特性が実際の実験によって測定された結果が少ないため、高効率で安定した通信を行うために、人体上の伝搬特性や周波数特性を知ることの意味は大きい。そのため、人体上のどの位置が人体通信機能を搭載したウェアラブル機器と効率よく安定した通信ができるかを実験により確認した。また、IEEE 802.15.6の規格が策定した時期が、2013年5月であり、その搬送波周波数である21MHzを使用した測定結果が少なく、搬送波周波数の違いにより電界強度への変化があるかの測定報告も少ないため、ウェアラブルデバイス同士での高率の良い安定した通信を行える周波数帯を推測するための、評価指標として、測定位置の中心である、胸部を基準にして(0dB)、ウェアラブルデバイスを

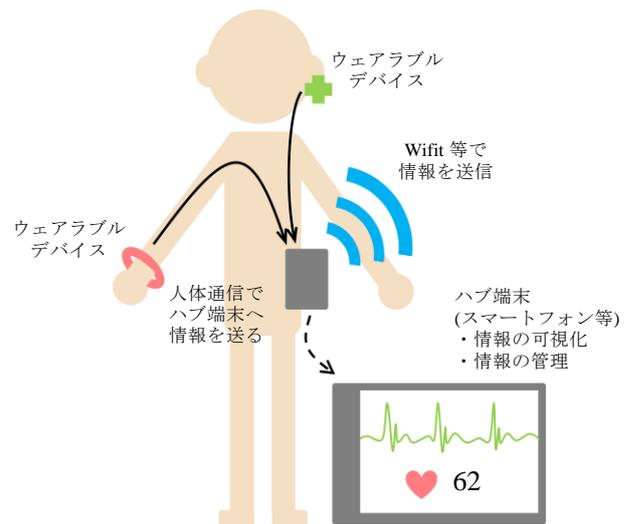


図1 ウェアラブルデバイスによるヘルスケアシステム
Figure1 Healthcare using Wearable devices

装着すると予想される場所での電界強度を測定した。また、IEEE 802.15.6で規格されている21MHzの搬送波周波数と、ウェアラブルデバイス同士で伝搬ロスが少ないとされている500kHz周辺の搬送波周波数を使用して同じ手順で実験を行い、周波数による違いを実測した。

3. 人体通信について

人体を伝送路とし、通信を行う方式を人体通信と呼ぶ。空間に比べ人体上の伝搬損失が小さいため通信を行う際の電力が少なく、空間を飛ばす無線とは異なり漏えいが少ないため、セキュリティ性も高いことが特徴である。この通信方式は、1996年にThomas G. Zimmerman氏が発表した、人体通信に関する論文「Personal Area Networks : Near-field Intrabody Communication」にて、一般にも知られるようになった[10]。人体通信には、前述のように三つの方式が提案されているが、本論文では電極に触れずに通信を行うことができる電界方式について述べる。

3.1 電界方式

3.1.1 電界

電気には正と負の電荷があり、物質によってその電気的性質は異なる。電荷が存在すれば、その周りの空間には電場または電界という電気的な空間が存在する。また、電界中に導体を置くと、静電誘導により導体の表面に誘導電荷が発生する。電界方式の人体通信は、人体を誘電体とみなし、この電界を用いて通信を行う。

3.1.2 電界方式

電界方式の人体通信とは、人間の周りに存在している電界を利用して通信を行う通信方式である。従来、無線通信にはアンテナを用いて、ある特定の周波数に共振させることにより効率を高め通信を行っていた。人体通信では、人

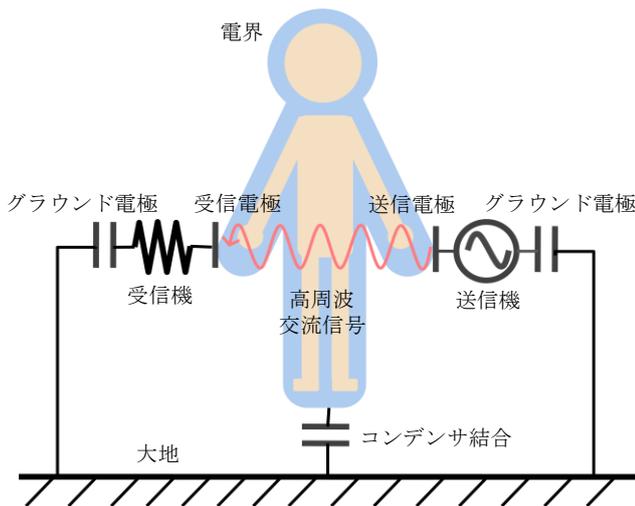


図2 電界方式の人体通信

Figure2 Human body communication based on electric field

体を伝送路とするため、アンテナの代わりに送信機や受信機が人体と静電結合する電極を用いる。送信機の電極に印加される、高周波の交流信号により誘起された人体近傍の電界の変化を、受信機で読み取ることで、送信機から受信機へ情報が伝えられる。このように、電極に直接手を触れることなく通信を行うことができる。ここで、電界方式の人体通信では、グラウンドに向けて電極を配置し、電流の帰還ループを形成する必要がある(図2)。従って、送信機、受信機のおかれる環境によって電流帰還ループの安定性が変わってくるため、電極配置や形状に難しさが出てくる。本論文では、すべてのウェアラブルデバイスは人体上に、また、ハブ端末であるスマートフォンはユーザーが身につけている衣服のポケットに入っていることを想定しているため、通信の安定性に大きく影響を与えると予想される。本研究では、これらの影響を測定実験により確認する。

4. 実験

我々は、電界方式の人体通信によるウェアラブルデバイスとハブ端末の通信における、人体上の伝搬特性と周波数特性を調べるため、IEEE 802.15.6で規格された人体通信の搬送波周波数である21MHzを使用した送信機を試作し実験を行った。また、KDDI研究所のデータを参考にし[7]、455kHzの搬送波周波数を使用した送信機を試作し同様に実験を行った。送信機はヘルスケアを目的とした通信システムを想定し、体温、心拍、発汗などの生体情報を取得しやすい、両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももに送信機を近接させその伝搬特性の調査を行った。送信機および、受信機の構成を図3に示す。生体情報の受信はスマートフォンを想定し、実験に用いた受信機は、測定者が着用している衣服のポケットに、電界強度計から短いケーブルで接続した受信電極を入れ、測定を行った。また、本項の2で述

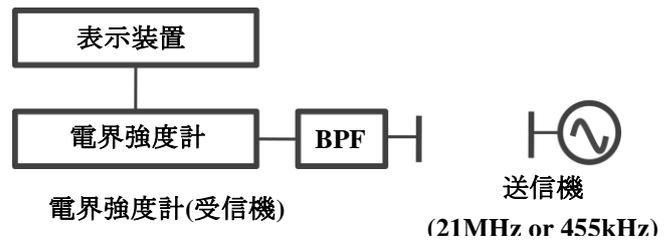


図3 送信機, 受信機の構成図

Figure3 Block diagram of Transmitter and Receiver

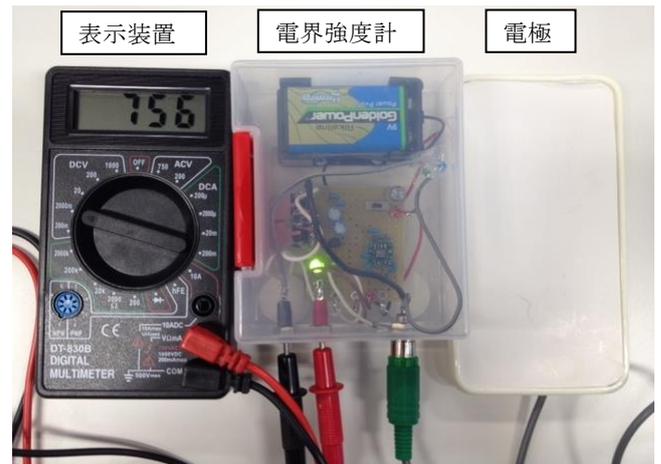


図4 電界強度計

Figure4 Level meter for Field Electric

べているように、電界方式の人体通信は電流帰還ループ用グラウンド電極のグラウンドとの結合具合により通信の安定性が変わることから、人間の姿勢の違いによる伝搬特性の変化についても測定を行った。さらに、電界方式の人体通信の場合、服装の違いも電界に影響を及ぼすことも考えられるので、薄手、中間服、厚手の服装の違いについて測定を行った

4.1 21MHzによる実験

本実験では、受信機としてスマートフォンを想定した電極を有する電界強度計を製作した。スマートフォンを用いている使用者の半数以上はポケットにデバイスを入れて持ち歩いているというマクロミルによる調査から[11]、本研究では、胸ポケットと腰ポケットに受信機を設置した。送信機の搬送波周波数として21MHzを用い、電極印加電圧を振幅9Vのsin波として図5のような測定系を用い実験を行った。

まず、胸ポケットに受信機の電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ各々の電界強度を測定した。この時、人体と電極間の距離は、厚さ1.6mmのガラスエポキシ基板($\epsilon_r=4.8$)を介し、一定を保っている。次に、腰ポケットに電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ同様に各々の電界強度を測定した。

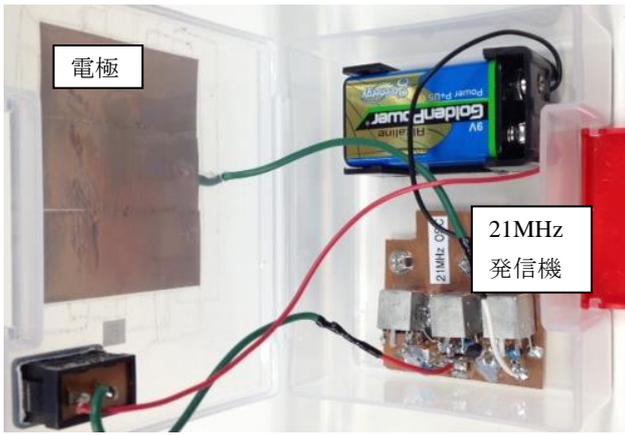


図5 21MHz 送信機
Figure5 21MHz transmitter

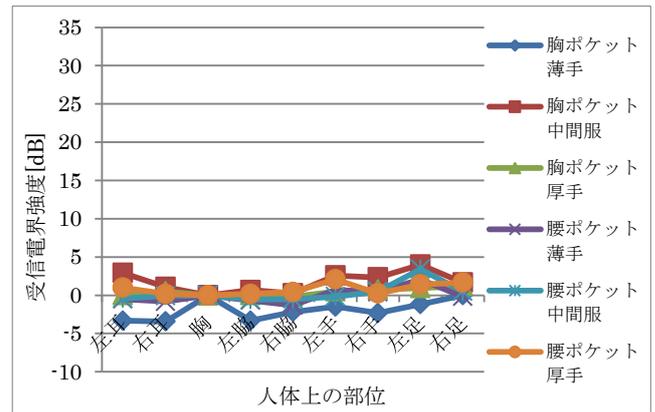


図6 直立姿勢の時の各部位の電界強度
Figure6 Field strength of 21MHz (Standing)

4.2 21MHzの実験結果

21MHzの搬送波周波数を使用し、胸部を基準とした電界強度の測定結果を、直立姿勢の場合を図6、座位姿勢の場合を図7、寝た姿勢の場合を図8に示す。これらの結果から、電界に影響を与えやすいと考えていた服装の違いでの電界の変化はほとんど見られなかった。また、受信電極の位置による違いも電界強度にほとんど影響を与えないことが分かる。一方で、姿勢の違いは、電界に大きな影響があることが分かる。

まずは、姿勢によってもたらされる人体上の全体的な電界強度の差であるが、胸部を基準として直立姿勢のときは、約+3.04dB、座位姿勢のときは、約+6.96dB、寝た姿勢のときは、約+21.58dBの差があった。これは、電界方式の人体通信は、グラウンドとの結合が静電結合のため、人体の姿勢により、人体のグラウンドに対する静電容量が変化しているためと考えられる。直立姿勢のときは足の裏全体の面積が、座位姿勢のときは足の裏と両太もも全体の面積が、寝た姿勢のときは、体全体の面積がグラウンドと平行になっているため、グラウンドとの静電容量が人体の姿勢により変化し、このような差異が生じたと考えられる。

次に、姿勢によってもたらされる、人体上の部位に対する電界強度の差について、人体の姿勢によるグラウンドとの静電結合具合により、人体の表面に存在している電界の強さは全体的に変化すると予想していたが、今回の実験結果からはそのような傾向はみられなかった。姿勢を変えても、両耳、胸部、両脇で電界強度がほぼ変わらずに、低い値にとどまっている。

姿勢により大きく変化が出た人体上の部位は、座位姿勢の場合は両足、寝た姿勢の場合は両手となっている。これらの結果から、電界方式の人体通信は、人体から突起した部分の電界が強いことが分かった。

4.3 455kHzによる実験

同様に、455kHzの搬送波周波数を使用した人体上の伝搬

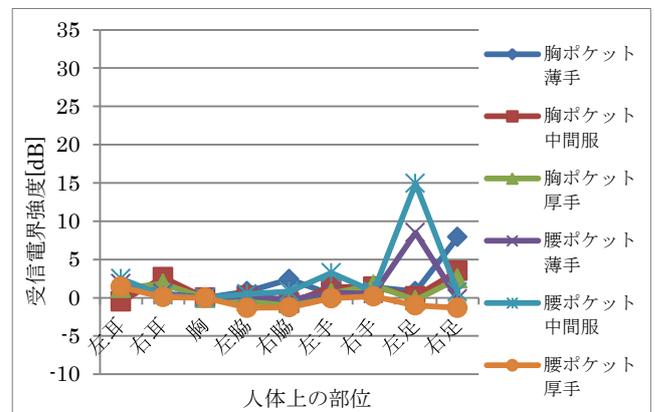


図7 座位姿勢の時の各部位の電界強度
Figure7 Field strength of 21MHz (Sitting)

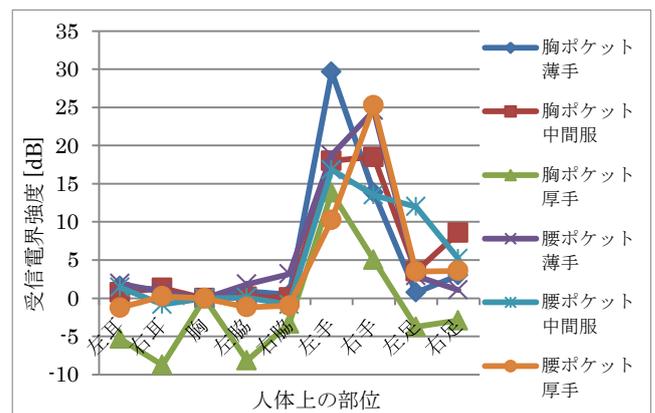


図8 寝た姿勢の時の各部位の電界強度
Figure8 Field strength of 21MHz (Lying)

特性の測定を行った。21MHzの測定の際に使用した受信機はバンドパスフィルタを455kHzに変更し、電界強度計を構成した。受信機は、腰ポケットと胸ポケットに設置した。送信機にはKDDI研究所の論文から得た知見により[7]、ウェアラブルデバイス同士の通信として放射電界を抑え、伝搬ロスが少なく、部品の入手がしやすい455kHzの搬送波

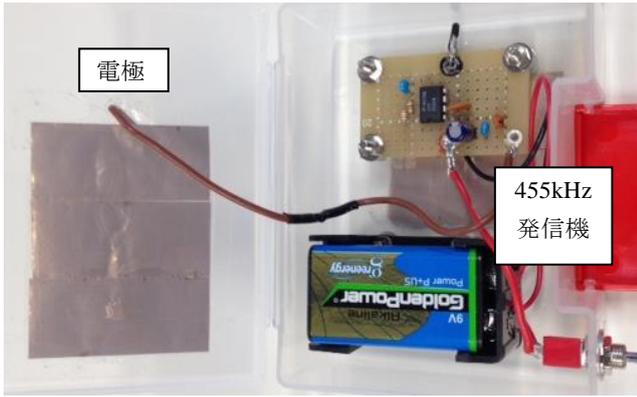


図9 455kHz 送信機

Figure9 455kHz transmitter

周波数を使用し、電極印加電圧を振幅 9V の矩形波として製作を行った。電極は 21MHz 測定時と同じものを用いた。図 9 にその構成を示す。まず、胸ポケットに受信機の電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ各々の電界強度を測定した。次に、腰ポケットに受信機の電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ各々の電界強度を測定した。

4.4 455kHz の実験結果

455kHz の搬送波周波数を使用し、胸部を基準とした電界強度の測定結果を、直立姿勢の場合を図 10、座位姿勢の場合を図 11、寝た姿勢の場合を図 12 に示す。これらの結果から、21MHz と同じく、服装の違い、また、受信電極の位置の違いによる電界への影響は見られなかった。次に、姿勢についての違いは、21MHz と同じく、電界に影響を与えやすいということが分かった。胸部を基準として直立姿勢のときは、約+1.23dB、座位姿勢のときは約+4.26dB、寝た姿勢のときは、約+3.71dB の違いがあった。これらの結果から、周波数を 21MHz よりも低に 455kHz では、人体がアンテナ化せずに、情報が外に飛び出しにくいということが分かった。すなわち、455kHz の方が、21MHz に比べて、送信機、受信機の場所の違い、人体のグラウンドに対する結合具合による影響を受けにくく、伝搬ロスが少ないため、より安定した通信が可能と考えられる。しかし、姿勢によっては、電界が強く発生している部位もあり、直立姿勢のときはどこも平均的な電界強度であるが、座位姿勢のときは 21MHz のときと同じく両足が、寝た姿勢のときも両手が他の部位に比べ電界強度が強くなっているが、21MHz と比べると、それほど大きな差は出ていない。21MHz の場合は、電界強度の最も弱い部位と比べて、直立姿勢の場合、胸ポケット、薄手、右足または胸部の条件で、約+3.42dB、座位姿勢のとき、腰ポケット、中間服、左足の条件で、約+14.92dB、寝た姿勢のとき、胸ポケット、薄手の服装、左手の条件で約+29.67dB 電界強度が最も強くなっている。それと比較して、455kHz の場合は、

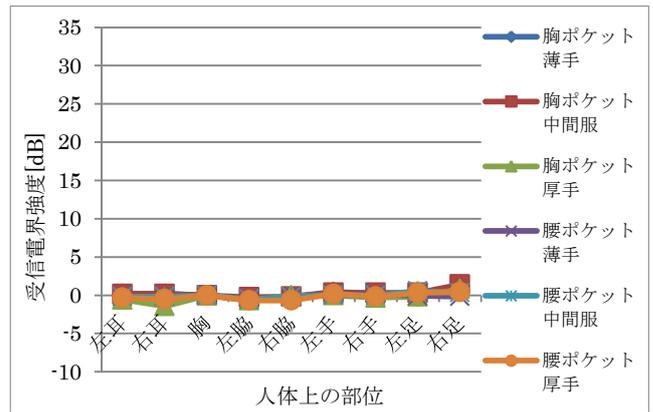


図 10 直立姿勢の時の各部位の電界強度

Figure10 Field strength of 455kHz (Standing)

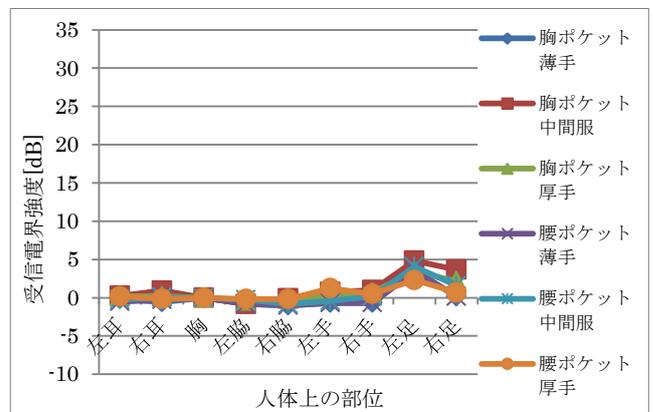


図 11 座位姿勢の時の各部位の電界強度

Figure11 Field strength of 455kHz (Sitting)

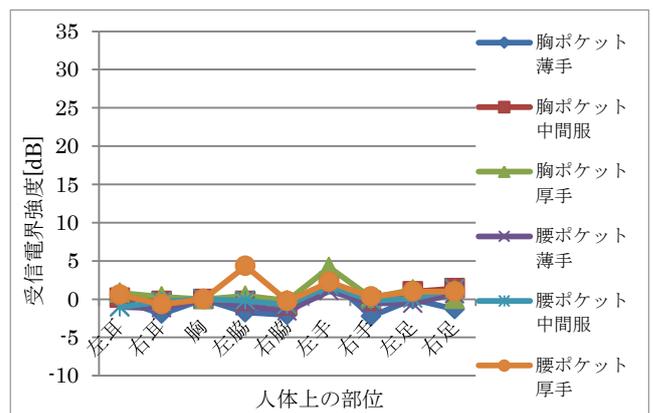


図 12 寝た姿勢の時の各部位の電界強度

Figure12 Field strength of 455kHz (Lying)

電界強度の最も弱い部分と比べて、直立姿勢の場合、胸ポケット、厚手の服装、右足の条件で約+2.25dB、座位姿勢の場合、胸ポケット、中間服、左足の条件で、約+5.66dB、寝た姿勢の場合、胸ポケット、厚手の服装、左手の条件で約+4.34dB 電界強度が最も強くなっている。

5. 実験結果の考察

今回の実験から、455kHzは21MHzと比べると、全体的な部位による電界強度のばらつきは少なく、安定していることが分かった。また当初、電界に影響を与えると予想していた服装の違い、受信機の場所の違いはあまり電界強度に影響を与えないことが分かった。また、胸ポケットと胸部間の電界強度にほとんど変化がなかったことから、従来の無線通信の通信距離が短いと通信がしやすいような傾向は、電界方式の人体通信では見られなかった。

これらの実験結果から、今後のシステム構築へ向けての回線設計に考慮すべき項目であるウェアラブルデバイスの装着位置として、手先や足先に人体通信を搭載したウェアラブルデバイスを装着すると通信が安定する結果が得られた。また、周波数としてはセキュリティの問題を考慮し、外に情報を飛ばさない無線通信として人体通信を搭載する場合は、波長が長く、情報が飛びすぎずに安定した通信の行える500kHz周辺の低い搬送波周波数を使用した通信が適していると実験結果から考察できる。

電界強度が強くなる人体上の部位(両手、両足)は、周波数を変更してもあまり変わらないが、その強さは周波数により変わることがわかる。受信機として想定しているスマートフォンなどのハブ端末は、今回の測定では、その位置による電界強度の違いは見られなかったため、人体の近くにさえあれば通信は可能だと考えられる。また、21MHzと455kHzに共通して、両脇、両耳、胸部のあたりで電界強度が弱い傾向にあることが分かった。

現在、ネックレス型やイヤリング型のウェアラブルデバイスなどもあるが、ここでは人体通信を用いるときには電極構造に工夫が必要である。

今回の実験では、人体通信の装置構成のなかで、通信の安定性に大きな影響を与える電極についての実験を行っていない。人体通信では、従来の無線通信で使用されているアンテナに代わって、電極を使用して通信を行うが、電極構造は通信の安定性を増すために重要になってくると考えられる。

今後の実用化にむけ、今回得られた測定結果から、455kHzを使用した人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスを手、または足に装着することを想定し、小型で低消費電力化を意識し、電極構造も含めて検討する必要がある。

6. おわりに

ヘルスケアを目的とした人体通信を搭載するウェアラブルデバイスの製作の際は、手足からとれる体温や心拍数、歩行時のふらつきなどのヘルスケア情報との組み合わせに適している。

周波数が高いと姿勢によって人体上の電界強度が大きく変化するので、今後、我々は、今回使用した455kHzの

搬送波周波数を使用して、ウェアラブルデバイスの製作を行うことにした。IEEE 802.15.6の規格とは異なる周波数であるが、この周波数においても人体通信は、国内において微弱無線設備として合法的に用いることができる。また、通信傍受対策や通信混信問題に関しては、スペクトル拡散方式が人体通信には適していると考えられている[12]。製作したウェアラブルデバイスと、受信機であるスマートフォンの間で、人体通信による情報のやりとりを行い、今後、人体通信が実際のシステムに導入するためにセキュリティも考慮した検討を行う予定である。

謝辞

本論文の作成にあたり、終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さった東京電機大学 根日屋英之氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 根日屋, "技術シーズを活用した研究開発テーマの発掘", 第6章第6節 人体通信, 技術情報協会. (2013.7.13)
- 2) "手ぶらで「ピッ」人体通信, 商用化へと隔離", 日経エレクトロニクス, pp.91-98, 日経 BP 社 (2008.6.30).
- 3) 高崎, 原, 唐沢, "B-1-44 電流方式を用いた人体伝送における電極面積の影響(B-1.アンテナ・伝播 A(電波伝搬, 非通信利用), 一般セッション)", "電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, vol. 2008, p. 44 (2008.09.02).
- 4) SB リサーチ株式会社, "飛ばない無線「人体通信」", IC カード研究会 196, Card Wave, pp.46-51 (2012.1-2).
- 5) 井上, 大石, 尾林, "B-1-175 人体通信における受信特性変化に関するシミュレーション検討(B-1.アンテナ・伝播 B(アンテナ一般))", "電子情報通信学会総合大会講演論文集, vol. 2013, p. 175 (2013.03.05).
- 6) 根日屋監修, "人体通信の最新動向と応用展開", 第2章, シーエムシー出版 (2011.6)
- 7) 前山, 高崎, 唐沢, "人体を伝送路とする高速通信方式", "電子情報通信学会技術研究報告・A・P, アンテナ・伝播, vol. 106, pp. 53-58 (2006.12.07).
- 8) melon, <http://www.thinkmelon.com>
- 9) fitbit, <http://www.fitbit.com/jp/flex>
- 10) T. G. Zimmerman, "Personal Area Networks: Near-field intrabody communication", "IBM Systems Journal, vol. 35, pp. 609-617 (1996).
- 11) マクロミル株式会社, "スマートフォンに関する調査", http://www.macromill.com/r_data/20110228smartphone/20110228smartphone.pdf (2011.2.28).
- 12) 根日屋, "人体通信の最新技術-生体情報センシングと人体通信の融合がもたらすものは-", "電波技術協会報, FORN (2010.1)