

論文の内容の要旨

論文題目 人体通信の伝送特性の解析手法および機器設計に関する研究

氏名 村松 大陸

本論文は、人体通信の伝送特性の電磁界解析手法および機器設計に関して述べたものである。人体周囲に存在する近距離通信ネットワークはPAN (Personal Area Network)あるいはBAN (Body Area Network)と呼ばれる。身近な例としては、パーソナルコンピュータと周辺機器 (マウス, キーボード, あるいは携帯電話などのモバイル機器) の接続や, 携帯音楽プレーヤーとヘッドホンの接続がPANに該当する。もう少し広い範囲では, 携帯電話と家電を接続して, リモコンとして使用するような場合もPANに含まれる。現在では, 情報通信機器やセンサの小型化はさらに加速され, 身につけていても気にならないほど小型軽量な, 本当の意味での「ウェアラブル」機器が実現しつつある。このような機器の小型化と多機能化にともなって, 通信の秘匿性や消費電力の観点からも, 通信範囲をさらに狭くすることが望まれるようになってきた。このため, PANよりもさらに人体に近い範囲における通信を想定したネットワークであるBAN, 特にWBAN (Wireless Body Area Network)が考えられるようになった。

人体周辺数m以内の近距離無線通信規格としては, 2.4 GHz帯を用いるBLE (Bluetooth Low Energy)や, 日本では特に315 MHz帯の微弱無線や, 400 MHz帯の特定省電力無線の利用が多い。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なることが知られており, これらの周波数帯 (315 MHz~2.4 GHz)において人体の存在は障害として作用する。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, その人体を高周波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。これは一般に人体通信と呼ばれる技術で, 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力することによって生じる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。

人体通信は研究開発が始まって以来20年ほどが経過する技術であるが、認知度はそれほど高くなく、大規模な実用化も行われていない。これは人体通信が未だ発展途上の技術であり、具体的な機器設計手法が明確になっていないことがひとつの原因といえる。従来の人体通信に関する研究は試作機器の開発やそれによるデータ伝送の試みが多数を占めており、個々の事例（特定の機器サイズ、接地状態、搬送波周波数等）に特化した検討内容となっているため、人体通信機器開発や設計における一般論として扱うことはできない。したがって、これまでに報告されている人体通信システムに関する知見をまとめても、新たな人体通信機器を開発する際の設計指針として活用することは難しく、事例ごとに電磁界解析や実験的な検討を行い、試行錯誤的に機器を開発するしかないのが現状といえる。これは人体通信の機器開発を妨げる大きな原因となっている。このような状況を打開するには、人体通信の伝送メカニズムを考慮した上で、機器設計に必要な情報を体系的にまとめることが必要である。

本論文では、人体通信機器の設計条件として、利用形態、装着箇所、サイズ、周波数帯などが与えられたとき、人体へ効率よく信号を入出力できる電極構造、回路の出力インピーダンス、フロントエンド回路構成、生体安全性、電磁両立性といったことを明確に示すことを目標とし、設計に必須な基礎的な伝送メカニズム解明や理論式や実験式といった基礎データの蓄積を行った。本論文は以下の7章から構成される。

第1章では、人体周辺の無線通信技術の必要性について説明し、既存技術と人体通信の比較から、人体通信の優れた特性を示した。さらに、人体通信の方式別に長所、短所をあげ、想定するアプリケーションによって適切な方式を選択できるように配慮した。ついで、これまでの研究開発の経緯について述べ、残った課題と、今後の人体通信機器の開発に必要な不可欠な設計指針について言及した。

第2章においては、人体通信における電磁波と人体の相互作用の影響を正確に解析に反映するために、複数の異なる人体組織の電気的特性についてまとめた。さらに生体組織の細胞レベルでの等価回路と、誘電分散特性について示し、次章以降における検討に必要な情報を網羅した。また、電磁界解析において利用する数値人体モデルの諸元について述べ、簡略化モデルとの比較により、人体通信における電界分布の定性的な特性を計算する上で、簡略化モデルが有用であることを示した。

第3章では、手首などの前腕部に装着されたウェアラブル送信機と、手に持った携帯端末との間の体通信システムを想定し、電磁界解析における人体および送受信機のモデ

ル化について述べた。次に筋肉媒質で構成される円柱状腕モデルを用いて、送受信機の電極構造について検討を行った。送信機に関しては「電極の入力インピーダンス特性」を、受信機については「送受信機間の伝送特性」を考慮して解析および電極の設計を行った。特に送信機に関しては、電極寸法に対する入力インピーダンスの定式化を行い、電極設計の重要な指針とした。さらに、設計した最適構造・寸法を有する送受信機電極と筋肉ファントムを試作し、実験によって解析結果の妥当性および電極最適化の有用性を確認した。

第4章では、従来の筋肉均質媒質の腕モデルにかわって、多数の生体組織および厳密な形状を再現した詳細人体モデルを用いて、「送信機電極の入力インピーダンス特性」と「送受信機間の伝送特性」について解析を行った。ここでは、従来の簡易モデルと詳細モデルで、大きく異なる解析結果が得られることと、詳細モデルの必要性を述べる。同時に、正確な人体通信の諸特性算出のために必要な生体組織と不要な生体組織を明らかにした。

得られた知見にもとづき、簡略な構造を有しているが、詳細人体モデルと同等の正確さで人体通信の諸特性が算出できるモデルを提案した。この簡略化モデルは、モデルの変形や解析に、特殊な変換ツールや大規模な計算機資源が不要であり、かつ実人体に近い人体通信の解析が可能である。また、簡略化されたモデルは単純な形状を層状化しただけであるため、電磁ファントムの作製を行う場合にも優れた構造であるといえる。

5章においては、人体通信の実験を行う際に必要となる生体等価電磁ファントムの開発を行う。ファントム開発にあたり、まず複数人の被験者による電極入力インピーダンス測定実験から、個人差によるインピーダンスばらつきの範囲を確認した。次に、積層角柱モデル各層の電気的特性において許容される誤差範囲を電磁界解析により求めた。その結果を受けて、積層角柱モデルと同様の構造を有する三層構造固体ファントムを開発した。最後に、実際に開発したファントムを用いて、送信機電極の入力インピーダンス特性および送受信機間の伝送特性について評価し、被験者による実験や解析データと比較し、開発したファントムの有用性を示した。

第6章では、改めて人体通信の利用形態に注目し、異なる利用形態における具体的なアプリケーションとして、「両耳に装着した補聴器間の通信」、「手首に装着したスマートウォッチと自動販売機等設置型機器の間の通信」、「握手等による他ユーザとの情報交換」等を想定し、基礎的な解析を行い伝送メカニズムや機器の設計の助けになる情報を蓄積した。また、最終的な人体通信のアプリケーション開発に向けて、汎用人体通信送受信モジュールを設計し、一例として「スマートフォンを用いたLED照明の調光システム」を実装し、システムの有効性を検討した。

第7章では、得られた知見についてまとめ、それらが人体通信機器の開発過程においてどのように役立つのかを述べる。さらに、今後の展望について述べた。

本論文は、以上の7章によって構成される。