

近距離電磁界伝送に関する研究

高崎 和之

電気通信大学大学院

電気通信学研究科

博士（工学）の学位申請論文

2014年8月



近距離電磁界伝送に関する研究

博士論文の審査委員

主査	唐沢	好男	教授
審査委員	山尾	泰	教授
審査委員	肖	鳳超	准教授
審査委員	和田	光司	准教授
審査委員	藤井	威生	准教授

著作権所有者
高崎 和之

2014

Abstract

Recently, lack of radio resources becomes a serious problem in Personal Area Network(PAN) year by year due to a rapid increase of needs. The traditional communication method of PAN uses radio waves such as wireless LAN or Bluetooth. In this paper, the methods to build a PAN without radio waves radiation are discussed to solve radio resource problem. This paper presents two methods. The first method is a communication scheme which uses human bodies as a transmission channel. The second method is a simultaneous transmission scheme of electric power and data. The scheme uses using electric field coupling by plate electrodes for data transmission and magnetic field coupling by coils for electric power transmission.

The method of communication using human bodies as a transmission channel, is called "human body communication". The human body communication was used for low-speed communication, such as the transmission of small data like a user ID. On the other hands, high-speed human body communication is required for PAN. This paper evaluates the frequency characteristics of a human body and effects of individual differences. Transmission channel by the human body is affected by the size and shape of the electrode. When electrode area is too small, the transmission characteristics are degraded. Moreover to realize a wideband data transmission, investigation of modulation scheme is very important. Since the transmission characteristic of human body is not flat in frequency, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a promising transmission scheme in this communication. By using OFDM in accordance with the electrical characteristics the communication with 34Mbps was succeeded.

When mobile device is charging, method of non-contact power supply is often used. But there is a problem that power transmission efficiency is reduced when the information modulate the power. As one of the solutions, we suggest the method for transmitting information simultaneously with power. The characteristics of this method is to use electric field coupling and magnetic coupling with a plate electrodes and coils. This paper proposed a new configuration simultaneously transmitting both electric power and data. Both coupling has been conventionally used. But it was difficult to be arranged to overlap the electrode and the coil. It is an important thing to reduce the volume of the electrode for mobile. Conventionally, when electrodes are stacked with coils, power transmission efficiency is degraded significantly. However, by cutting a part of the ring-shaped electrode, it was possible to prevent a decrease in power transmission efficiency. In addition, the method makes it possible to add a resonance circuit to the power transmission. Finally, an experiment of transmitting high-speed information and power for charging was successful.

概要

近年、携帯電話やコンピュータの発達により、ウェアラブルコンピューティングや、ユビキタスコンピューティングが現実になりつつある。現在では、日本国内のほぼすべての場所で携帯電話を利用することができ、屋外にいてもいつでもどこでもインターネットに接続することができるようになった。それに加え、携帯電話の機能も飛躍的に進化し、従来は音声通話のみの単機能だったものが、電子メールに対応したり、ブラウジングに対応するなどし、さらに、2000年代後半頃からはスマートフォンと呼ばれる多機能型携帯電話が登場し、パソコンと同様に任意のアプリケーションをインストールして、自分好みにカスタマイズし利用することが可能となった。それに伴い、さまざまな周辺機器も発売され、携帯電話を中心とした極小規模なネットワークが構築される機会が急激に増加した。この極小規模なネットワークは、ユーザー毎にその周辺に構築されることから、PAN(Personal Area Network)や、BAN(Body Area Network)などと呼ばれている。PANを構築するための近距離通信技術としては、無線LANやBluetoothといった、電波を用いたものが利用されているが、電車内や集合住宅のように狭いエリアに人が多く集まるところでは、多くのPANが同時に稼働するため、干渉が生じ正常な通信が妨げられてしまうなどの問題が生じている。また、Bluetoothや無線LANが利用しているIMSバンドの2.4GHz帯は、ジャンクバンドと呼ばれるほどの飽和状態であり、今後、利用機器が増加した場合には、さらに利用しにくくなることも予想される。

この問題のように、通信機器と周辺機器をどのように接続するかはラスト1m問題と呼ばれ、その解決法が盛んに研究されており、本研究では、このラスト1m問題を解決するための手段として、無線LANやBluetoothに代わる近距離通信技術の検討を行った。その際、携帯電話が中心となって構成するPANはユーザーが活動している時とそうでない時の2つの状態に大別できることに着目し、それぞれに対し、ユーザー自身の身体を伝送路として利用する通信方式、いわゆる人体通信方式を利用した高速通信方式と、非接触給電と同時に電界結合による高速通信を実現する方法を提案し、検討を行った。

人体通信では、さまざまな伝送方式が提唱されているが、従来の方式はいずれもシングルキャリアの変調方式を採用しており、人体の持つ電気的特性から、高速通信には適していなかった。本研究では、人体の持つ電気的特性を改めて調査し、変調方式としてマルチキャリア方式のOFDMを用いることで、この問題を解決して従来よりも高速の通信を実現した。また、その有効性を検証するため、地上波デジタル放送2チャンネル分のRF信号を、300kHz～約12MHzにダウンコンバートしたLow IF信号を用いて伝送実験を行い、人体を用いて34Mbpsの速度で情報伝送を行うことができることを確認した。さらに、これまで計算機シミュレーション等を必要とした電極面積が伝送損失に与える影響について、電極面積といくつかのパラメータによって簡易的に計算することにも成功した。

電力と情報の同時伝送では、近年、防水性向上や充電の簡便化のため需要が多い非接触給電について、磁界結合による電力伝送と同時に電界結合によって情報を伝送する方法を示した。磁界結合や電界結合それぞれ単独での伝送は従来から一般的に用いられている方法であるが、電極の形状を工夫することで従来は不可能であった磁界結合用のコイルの上に電界結合用の電極板を重ねて配置することを可能とした。これにより、磁界結合用コイルの特性を単一周波数に合わせて最適化することが可能となり、従来よりも高効率な電力伝送が可能となった。また、情報伝送についても、従来のように電波として空間にエネルギーを放出しないため、秘匿性が高く、利用者の多い場所でも干渉を受けにくい通信を実現した。

目次

Abstract	i
概要	ii
目次	iv
図目次	vii
略語の定義	ix
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の概要	2
1.3 本論文の構成	4
第2章 研究背景	5
2.1 近距離通信技術	5
2.1.1 有線方式	5
2.1.2 無線通信方式	6
2.1.2.1 IEEE802.11	7
2.1.2.2 ZigBee	7
2.1.2.3 Bluetooth	8
2.1.3 人体通信方式	8
2.1.3.1 電流方式	9
2.1.3.2 電界方式	11
2.1.3.3 音波方式	12
2.2 近距離無線通信技術が抱える問題	13
2.3 無線電力伝送	14
2.3.1 磁界結合方式	14
2.3.2 磁界共鳴方式	14
2.3.3 電界結合方式	15
2.3.4 その他の形式	15
2.4 電力と情報を同時に伝送する方式	16
2.5 人体の電気的特性	17
2.5.1 周波数に対する誘電率と導電率の変化	17
2.5.2 模擬人体（ファントム）	17
第3章 人体通信の高速化	19
3.1 人体の電気的特性	19

3.1.1	伝搬損失シミュレーション	19
3.1.2	生体を用いた伝搬損失の測定	21
3.1.2.1	安全に関する検討	22
3.1.2.2	電極の製作	22
3.1.2.3	実験方法	22
3.1.2.4	実験結果	23
3.2	帯状新型電極の開発	24
3.2.1	柔軟性の確保と小型・軽量化	24
3.2.2	電極位置の固定方法	25
3.2.3	新型電極の特性評価	25
3.3	棒状電極	27
3.3.1	大きさの検討	27
3.3.2	特性評価	28
3.4	主要な伝搬メカニズムの推定	30
3.4.1	伝搬メカニズムの推定	30
3.4.1.1	仮説1：電流による伝搬	30
3.4.1.2	仮説2：電界による伝搬	30
3.4.2	実験方法	31
3.4.3	実験結果	32
3.4.4	個人差	32
3.4.5	周波数特性変動要因	33
3.5	OFDM ベースバンド信号伝送実験	35
3.5.1	実験システムの構築	35
3.5.2	実験結果	37
3.5.3	システム全体の伝送特性の評価	41
3.5.3.1	容量性結合	41
3.5.3.2	総合伝送特性	42
3.6	電極面積が伝送特性に与える影響	43
3.6.1	伝送経路の仮定と定式化	43
3.6.2	実験方法	45
3.6.3	実験結果	45
3.7	模擬人体（ファントム）の製作と評価	47
3.7.1	模擬人体（ファントム）	47
3.7.2	ファントムの選定	47
3.7.3	ファントムの製作	47
3.7.4	電気的特性の評価（帯状電極）	49
第4章	近距離無線電力・情報同時伝送	50
4.1	従来技術の問題点	50

4.2	提案手法	51
4.3	磁界結合型電力伝送	53
4.3.1	共振回路による電力伝送効率の改善	53
4.3.2	情報電極挿入の影響	53
4.4	電界結合型情報伝送	57
4.4.1	情報伝送特性	57
4.4.2	受信機の入力インピーダンスの影響	59
4.4.3	電力伝送と情報伝送の干渉	60
4.4.4	干渉の軽減	61
4.5	電力情報同時伝送実験	64
4.6	位置ズレに対する検討	66
第5章	結論	68
	謝辞	70
	参考文献	71

目次

1.1	無線 LAN を利用した PAN 同士の干渉	2
1.2	本論文の構成	4
2.1	近距離通信方式の分類	5
2.2	送受信機間の閉回路の構成	10
2.3	1 電極方式	10
2.4	2 電極方式	10
2.5	電界方式（光学素子を用いる方法）	12
2.6	電界方式（光学素子を用いない方法）	12
2.7	磁界結合方式による電力伝送	14
2.8	磁界共鳴方式による電力伝送	15
2.9	電界結合方式の概略図	15
2.10	人体の電気的特性	17
3.1	人体の電気的特性	19
3.2	FDTD 法による解析のモデル	20
3.3	解析結果	20
3.4	製作した電極の概観（上側：送信用電極 下側：受信用電極）	22
3.5	人体の周波数特性	23
3.6	新たに製作した電極の外観	25
3.7	電極を装着した様子	25
3.8	新型電極と旧型電極の特性の比較	26
3.9	電極を手で握った様子	27
3.10	製作した棒状電極と等間隔で保持するための治具	28
3.11	棒状電極の周波数特性	28
3.12	仮説 1 の電流経路イメージ	30
3.13	電極間距離を変化させたときの伝播損失の変化	32
3.14	個体差の測定結果	33
3.15	トータルレコーダ・システムの構成図	36
3.16	トータルレコーダ・システム（再生系のみ）	36
3.17	DAC とアップコンバータを同軸ケーブルで接続した場合の復調画像	37
3.18	実験風景（電極を装着した 2 人が握手をしているところ）	38
3.19	伝送に成功したときの復調画像（図 3.18 の状態で伝送したとき）	38
3.20	実験風景（電極を装着した腕同士で握手している様子）	39
3.21	電極を装着した腕同士で握手した場合（図 3.20 の状態）の復調画像	39

3.22	伝送に失敗したとき（画質劣化）の例	40
3.23	実験装置とその配置	40
3.24	容量性結合と人体の伝送損失の比較	41
3.25	等価回路	42
3.26	総合伝送特性	42
3.27	等価回路	44
3.28	電極を固定した様子	44
3.29	厚紙による開口	44
3.30	開口面積を変化させた場合の伝送損失測定結果	45
3.31	皮膚の誘電率と導電率	46
3.32	製作した型	48
3.33	完成したファントム（整形前）	48
3.34	完成したファントム（整形後）	48
3.35	ファントムと人体の伝播損失の比較	49
4.1	提案方式の概略図	51
4.2	提案方式の基本構成	52
4.3	基準とした磁界結合型電力伝送の条件	52
4.4	共振回路の有無による電力伝送特性の違い	53
4.5	電極の形状	54
4.6	電極の大きさ	55
4.7	情報電極の形状が電力伝送損失に与える影響	55
4.8	情報伝送系の等価回路	57
4.9	測定条件	58
4.10	情報電極間の伝送損失	59
4.11	測定条件	59
4.12	入力インピーダンスに対する周波数特性の変化	60
4.13	電力送電コイルが情報受信電極に与える干渉	61
4.14	シールド電極による干渉軽減効果	62
4.15	シールド電極が情報伝送に与える影響	62
4.16	実験系の構成	64
4.17	電極の寸法	64
4.18	電極の外観（送電用コイルと情報電極）	65
4.19	実験風景	66
4.20	回転方向のズレに対する伝搬損失の変化（情報伝送）	67
4.21	回転方向のズレに対する伝搬損失の変化（電力伝送）	67

略語の定義

ASK	Amplitude Shift Keying
BAN	Body Area Network
CN (CNR, C/N)	Carrier to Noise Ratio
DAC	Digital to Analog Converter
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
Freq. Conv.	Frequency Converter
FSK	Frequency Shift Keying
GND	Ground
GPS	Global Positioning System
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
IMS	Industry Science Medical
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
Low IF	Low Intermediate Frequency
MOS FET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSC	Oscillator
PAN	Personal Area Network
PHS	Personal Handy-phone System
PSK	Phase Shift Keying
PoE	Power on Ether
RFID	Radio Frequency Identifier
SG	Signal Generator
SN (SNR, S/N)	Signal to Noise Ratio
SNS	Social Networking Service
USB	Universal Serial Bus
WAN	Wide Area Network

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

近年，コンピュータや通信機器の小型・高性能化によって，それらの機器は，様々な場所で利用され，既に我々の生活に欠かすことのできない存在となっている．ユーザーにコンピュータの存在を意識させず利用させるユビキタスコンピューティングや，コンピュータやその周辺機器を衣服のように身にまとい利用するウェアラブルコンピューティングも実現しようとしている．しかし，それらの実現にあたり効率的な近距離通信技術の開発が課題となっている．

ウェアラブルコンピューティングやユビキタスコンピューティング実現の背景には，携帯電話や PHS の普及によって，コンピュータ間の通信が従来主流であった電話回線や専用線を利用した有線通信方式から無線接続方式に変化したことや，携帯電話自体の機能や性能が向上し，スマートフォンと呼ばれる高性能型の携帯電話が登場したことがある．スマートフォンの登場によって，ユーザーは携帯型の端末にパソコンと同様に好みのアプリケーションソフトウェアをインストールできるだけでなく，端末に内蔵された電子コンパスや GPS，カメラなどを利用して様々な情報を生成・処理することができるようになり，それを，いつでもどこからでも世界中に発信することができるようになった．また，スマートフォンの多くには携帯電話網を利用した通信装置の他に無線 LAN や Bluetooth と呼ばれる近距離用の無線通信装置が内蔵されており，周辺機器を無線で接続し利用することができる．このように，スマートフォンとその周辺機器によってユーザー毎に構築されるような極小規模なネットワークを PAN (Personal Area Network) や BAN (Body Area Network) と呼び，PAN や BAN を利用すると，スマートフォンを鞆に入れたままでも，ヘッドセットを利用して音声通話を行ったり，腕時計型の表示デバイスを利用して新着メールを確認するなど，ユーザーの利便性が飛躍的に向上する．そのため，PAN や BAN の利用者は急激に増加しており，今後も増加が予想されている[1]．さらに，端末の性能向上により，リッチコンテンツと呼ばれるような映像・音声を扱う機会が急激に増加している．PAN や BAN は，前述のように半径数十 cm 程度の規模のネットワークであるのに対し，現在の構築に用いられている無線 LAN や Bluetooth は表 1.1 に示す通り数十 m 程度の規模のネットワークを対象とした規格であるため，電波資源の無駄遣いが発生し，電波資源枯渇の大きな一因となっている．図 1.1 に示すように，利用者が密集している場所では干渉によ

る通信障害も発生する．この問題はラスト 1m 問題とも呼ばれ，解決が急務とされている．そこで，本研究では，無線 LAN や Bluetooth に代わる近距離通信技術について検討を行った．

表 1.1 無線 LAN (IEEE802.11) と Bluetooth の最大通信距離

	最大通信距離[m]
無線 LAN (IEEE802.11)	100
Bluetooth	30
PAN,BAN	1

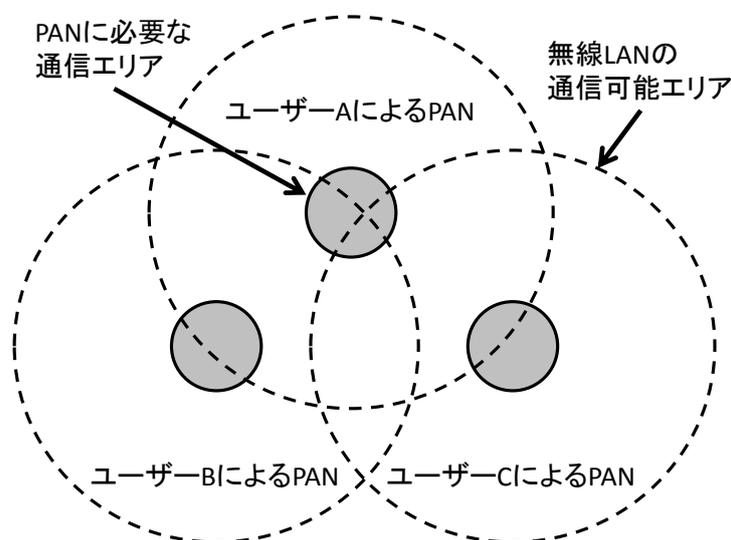


図 1.1 無線 LAN を利用した PAN 同士の干渉

1.2 研究の概要

ユーザーが活動している際，スマートフォンとその周辺機器によって構築される PAN は，その中心にユーザーの身体が存在していることから，ユーザー自身の身体を伝送路として用いるいわゆる人体通信を利用することを考えた．人体通信は，1995 年に Thomas Guthrie Zimmerman 氏によって PAN と共に提唱されており [2]，その後さまざまな機関で研究がおこなわれ，電界を用いる方式や電流を用いる方式，音波を用いる方式などが提案されている [3]～[16]．電界を用いる方式は，送信機によって発生させた電界を導波管の原理で人体内部に閉じ込め，そこから漏れだす微弱な電界を特殊な光学素子を用いて検出したり，電位差として皮膚表面から取り出している．電界を用いる方式の場合，送受信機を皮膚に直接接触させる必要がない特徴があるが，漏れ出す電界が微弱であるため，特殊な光学素子

を用いるなど、検出方法に工夫が必要である。また、握手によって PAN 同士を接続することはできない。電流を用いる方式では、人体を誘電体として利用し、微弱な高周波電流を流すことで通信を実現している。電界方式に比べ、送受信機は簡単な構成でよく、握手によって PAN 同士を接続することができるが、電極を皮膚に接触させる必要がある。超音波による方式は、電界を用いる方式同様、人体内に超音波の振動を閉じ込め、漏れ出る振動によって情報を伝送するものであり電氣的な影響がないため、医療現場などでの利用が注目されている。以上のように、いずれの方式も一長一短であるが、従来の研究では、いずれの場合も、シングルキャリアの変調方式を利用していたため、周波数利用効率が悪く大容量の伝送路として利用することは難しかった。また、人体の持つ電氣的特性についても、電磁界暴露に対する安全性の検証や、携帯電話など、人体に密着させて使用する機器のアンテナ設計等の目的で多数の先行研究があるが[17][18]、本研究で提案するように周波数の低い領域を広帯域で利用した通信のための研究は行われていない。そこで、本研究では、人体の持つ電氣的特性を改めて調査し、数百 kHz~20MHz 程度の周波数が人体通信に適していることを発見した。また、成人男女 15 人の伝送特性を測定した結果、その領域では、大きな個人差は見受けられないことも確認した。さらに、従来は、計算機シミュレーション等によって計算しなければならなかった電極面積と伝送損失の関係を電極面積といくつかのパラメータによって簡易的に計算できることも示した。しかし、前述の周波数領域を利用する場合、従来のシングルキャリア方式では高速伝送に適さないため、マルチキャリア方式である OFDM を利用して情報を伝送することを提案し、地上波デジタル放送で用いられている ISDB-T 方式による情報伝送実験を行った結果、約 12MHz の帯域を利用して 34Mbps の情報伝送に成功した。また、今後の実験における再現性を確保するため、文献を参考にファントムと呼ばれる疑似人体を製作し、その特性を評価した。その結果、課題が残ったものの、約 1MHz から 13MHz 程度の周波数領域では、十分に実用的であることを確認した。

一方、ユーザーが活動中でない場合、すなわち、次の利用に備えてスマートフォンを充電している場合も、スマートフォンは内部データの同期やソフトウェアアップデートなどのため常時通信を行っている。屋内で充電する場合、PLC (Power Line Communication) を利用すれば、充電器までは有線によるネットワークを接続することができる。しかし、近年では、小型化されたコネクタの機械的強度の問題や、異物の付着による焼損事故の発生[19]、高い防水性の確保、デザイン性などの観点からワイヤレス給電方式が注目を集めており、業界統一の規格が制定されるなどの動きが盛んである。この場合、PLC によるネットワークは利用することができない。伝送される電力を情報によって変調し情報を伝送する方式は従来から用いられているが、この方式では電力伝送効率が悪く、受電側から送電側への通信も高効率で行うことは難しい。そこで、従来から用いられている磁界結合型非接触電力伝送に対して影響を与えることなく情報通信を付加する方法を検討し、コイル間に平板電極を挿入する方式を提案した。提案手法は、平板電極の形状を工夫することによ

って、コイル間の電力伝送に影響を与えず、電界結合によって情報伝送を実現するものである。本研究では、1Wの電力を伝送しながら約17Mbpsの情報伝送を実験に成功した。

1.3 本論文の構成

本論文は図 1.2 に示すように 5 つの章から構成されている。

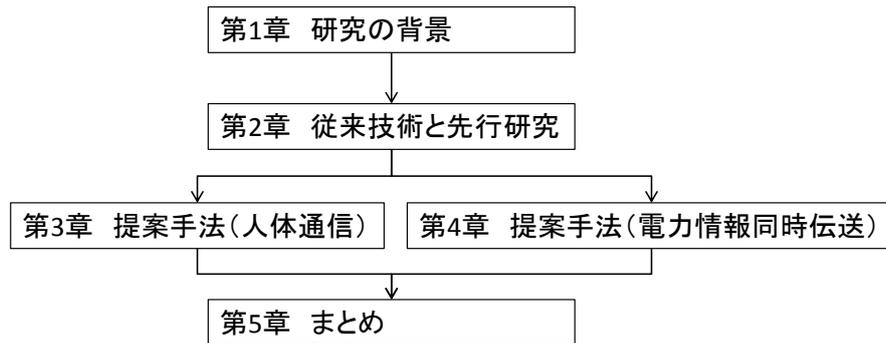


図 1.2 本論文の構成

まず、第 1 章（本章）では、研究の背景と各章の概要を説明し、第 2 章で人体通信と近距離電力伝送について、文献調査によって得られた先行研究の詳細な説明を述べている。特に、人体通信に関しては、目的が異なる同様の研究が多く行われており、それらの研究との差異についてもここで詳細に述べている。第 3 章と第 4 章では、提案手法を人体通信と電力情報同時伝送に分けてそれぞれ詳細に説明している。第 3 章では人体の電気的特性や個人差、電極形状の違いによる伝送特性の変化などについて述べている。また、類似の先行研究に対する本研究の優位点についてはここで述べている。第 4 章では、電力と情報を同時に伝送する方式について、電力伝送と情報伝送を分離することによる電力伝送効率の改善効果や、受信機の入力インピーダンスを高くすることによる周波数特性の変化、電力伝送が情報伝送に与える干渉について、電力伝送と情報伝送に分けて詳細に述べている。最後に、第 5 章は、本論文の結論であり、本研究で得られた結果の総括を述べている。

第2章

研究背景

2.1 近距離通信技術

LAN や PAN の構築に用いられる近距離通信技術は、図 2.1 に示すように、ケーブルを用いて機器同士を直接接続する有線方式と、電波や光などを用いる無線方式、人体を伝送路として用いる人体通信方式などに大別することができ、人体通信方式は、さらに電流を用いる方式と電界を用いる方式、音波を用いる方式に大別することができる。電流方式の代表例としては、松下電工のタッチ通信システム[3][4]や SONY CSL のウェアラブルキー[5]などがあり、電界方式には NTT のレッドタクトン[6][7]などがある。

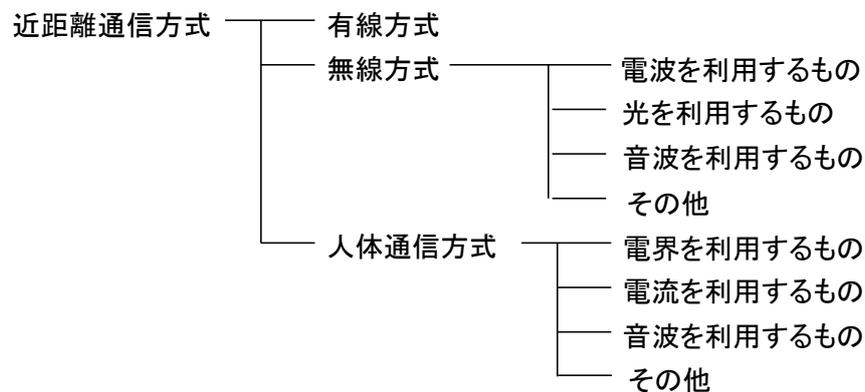


図 2.1 近距離通信方式の分類

2.1.1 有線方式

有線方式は、その名の通りデバイス間をケーブルで接続する方式で、最も古典的な方式であるが、通信速度が速く干渉を受けにくいいため、コンピュータとディスプレイの接続などの場面で現在でもよく利用されている。しかし、ケーブルがユーザーの行動を妨げたり、機械的なストレスによる物理的破損が生じやすいため、携帯型の機器には不向きな方式である。有線方式でよく用いられている方式とその特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1 有線方式の代表例と主な仕様

	USB				RS-232	HDMI
	1.1	2.0	3.0	3.1		
通信速度 [bps]	12M	480M	5G	10G	115.2k	18G
最大通信距離[m]	5	5	3	3	15	5
変調方式	NRZI	NRZI	PRBS	PRBS	NRZI	PRBS
信号振幅 [V]	3.3	0.4	0.4	0.4	30	オープンドレイン (受信端で 3.3V に 50Ω でプルアップ)
給電能力 [W]	2.5	2.5	4.5	5.0	給電機能なし	0.25

USB は、Universal Serial Bus の略称で、1990 年代後半からパーソナルコンピュータとその周辺機器の接続を中心に利用が増えた方式である。現在も広く一般に用いられており、表 2.1 に示すとおり複数の規格が存在する。通信のほか、電力の供給も可能であるため、携帯電話や周辺機器の充電に利用されることもある。給電能力は規格によって異なるが、電圧は 5V で統一されている。また、通信に着目すると、ホスト側には下位互換性があるため、USB3.1 対応の最新のコンピュータでも USB1.1 のみに対応した古い周辺機器を利用することができる。しかし、USB3.0 対応の新しい機器を USB2.0 対応のコンピュータに接続した場合、転送速度は USB2.0 の上限値に制限されるほか、コンピュータ側の給電能力によっては周辺機器を駆動できないなどの問題が生じることがある。

HDMI(High-Definition Multimedia Interface)は、コンピュータや映像機器と表示装置を接続することを主な目的とした通信規格である。映像信号のほか、音声信号も伝送でき転送速度が非常に速いことが特徴である。

RS-232 は本来、PAN より広範囲の通信を対象として策定された通信規格である。歴史が長く通信速度は低速であるが、通信や回路構成が容易であることから、通信速度を要求されないデバイスの制御などでよく利用されている。しかし、コンピュータ本体や周辺装置の小型化・高性能化に伴い、汎用性が高く、通信速度の速い USB によって置換されつつある。

2.1.2 無線方式

PAN は、半径 1m 程度の極小規模なネットワークであることから、従来は、安価に高品位な伝送路を確保できる有線方式が主流であった。しかし、機器を携帯し、複数の機器を相互に接続するようになると、ケーブルの重量や、接続部の耐久性に問題が生じ、電波や光を用いる無線接続方式が利用され始めた。無線方式は、高周波回路が必要になるなど装置の構成が複雑であることに加え、法的な手続きが必要なことも多く、コストがかかる方

式であったが、回路のワンチップ化や汎用モジュールの量産などにより、安価で容易に利用できるようになり、現在では一般的に用いられるようになった。

しかし、無線接続方式は、音や光、電波などの形でエネルギーに情報を乗せて空間に放射するため、有線通信方式に比べ秘匿性が劣り、狭い範囲で多くの装置が稼動すると混信による通信障害が発生するなどの問題がある。また、電波を利用する場合には、電波法により、周波数帯域や送信電力などが厳しく制限され、無線局の免許または認可が必要となる。電子レンジや医療機器などのため、ISM バンドと呼ばれる免許なしで運用できる特別な周波数が決められているが、各国が独自のルールで周波数を割り当て、運用してきたため、世界各国で利用できる ISM バンドは 2.4GHz のみとなっている。先にも述べたとおり、ISM バンドは、通信だけでなく、電子レンジや医療機器、産業機械などにも利用されているため、ジャンクバンドと呼ばれるほど飽和状態となっていることから、電波の届く範囲を制御する電波制御技術の開発が期待されている。

2.1.2.1 IEEE802.11

俗にワイヤレス LAN と呼ばれるもので、周波数や帯域幅、変調方式などにより、a, b, h, g, n などの規格が存在する。企業や学校などでコンピュータを相互に接続する LAN の代替として提唱された規格で、通信速度は 11~600Mbps と高速で、通信範囲は半径約 100m 程度である。占有帯域幅が広く、チャンネル数が少ないため、同時に 4 台以上の端末が通信しようとするとう混信によるスループットの低下が発生する。

IEEE802.11 は変調方式にスペクトラム拡散方式や OFDM 方式を用いているため、ハードウェアが高価という弱点があったが、コンピュータとブロードバンドインターネットの普及に伴う爆発的普及で、低価格化が進んだ。

表 2.2 IEEE802.11 の規格

	IEEE802.11a	IEEE802.11b	IEEE802.11g	IEEE802.11n
周波数帯 [GHz]	5.2	2.4	2.4	2.4
転送レート [Mbps]	54	11	54	600
伝送距離 [m]	100	100	100	100

2.1.2.2 ZigBee

ZigBee は家電メーカー業界団体 HomeRF ワーキンググループにより提唱された規格で、ローデータ速度、ロー消費電力、ローコストの 3 つのローを特徴とした規格である。リモートセンシングのような計測用途やエアコン、洗濯機、冷蔵庫など、いわゆる白物家電と呼ばれる機器に組み込まれることを主な用途として想定した規格のため、通信速度は

250kbps と低速で，通信範囲は 30m 程度となっている．拡散方式は直接拡散方式である．通信速度が低速である分，占有帯域幅が狭く，チャンネル数が多いため，同時に多くの端末が通信可能である．携帯電話に着目すれば，ZigBee を用いて通信を行う機器は非常に少ないが，家電への組み込みが前提の規格であることから，リモートセンシングやユビキタスコンピューティングを支える技術になると期待されている[20][21]．

2.1.2.3 Bluetooth

Bluetooth は 1998 年に Bluetooth Issue Group によって提唱された通信プロトコルで，IEEE 初の近距離ワイヤレス規格(IEEE802.15.1)として承認された．拡散方式は周波数ホッピング方式(Frequency Hopping Spectrum Spread)をとっており，通信距離は 10m 程度，通信速度は 1Mbps である[22]．現在，携帯電話やデジタルカメラなどを中心に搭載され利用されている．ただし，Bluetooth はその規格上，1 台のマスターノードに対し，7 つのスレーブノードしか接続できず，周波数ポッピング方式のため，ノードがネットワークに参加するために多少時間が必要となるなどの問題点があり，日本国内では IEEE802.11 のように爆発的な普及はしておらず，通信速度とエリアの面で IEEE802.11 と ZigBee の中間的な存在となっている．

表 2.3 無線接続方式の代表例

	IEEE802.11	ZigBee	Bluetooth
周波数帯[GHz]	2.4 / 5.2	2.4	2.4
転送レート[bps]	～600M	～250k	～1M
通信範囲[m]	100	30	10

2.1.3 人体通信方式

人体通信方式は，人間の身体を伝送路として用いる伝送方式で，1995 年に Thomas Guthrie Zimmerman 氏により PAN と共に提唱されている[2]．しかし，当時の技術では，人体を伝送路として利用するメリットが少なく，また，通信速度も低速であったため，あまり注目を集めなかったが，近年，ラスト 1m 問題のブレークスルーとして再び注目を集めている．人体通信方式は，情報を電流で伝送するか，電界で伝送するかによって，電流方式と電界方式に大別することができる．ここで，表 2.4 にこれまでに発表されている主な人体通信方式の概要を示す．

表 2.4 人体通信方式の先行研究の概要

研究機関	名称	通信方式	変調方式	周波数 [Hz]	信号電圧 または電流	通信速度 [bps]	参考文献番号
松下電器	タッチ通信システム	電流	ASK	533k	<500 μ A	3.7k	3,4
ワシントン大学		電流	FSK	140k 180k	20V _{p-p}	56k	8
千葉大学		電流		10MHz	3V _{p-p}		9,10
SONY SCL	Wearable Key	電流	FSK		1.5V _{rms}	9.6k	5
NTT	レッドタクトン	電界	なし (IEEE802.3)		25V	10M	6,7
東京大学		電界	FM	10.7M			11,12
拓殖大学		音波	SS	10M	—	2M	13

2.1.3.1 電流方式

電流方式は、図 2.2 に示すように送受信機間に閉回路を構成し、電流によって情報を伝送する方式である。送受信機間に閉回路を構成するためには、送信機から受信機に向けて電流を流す経路と、それを戻すための経路の 2 つの経路が必要となるが、人体通信では一つの経路を人体を用いて構成し、もう一つの経路を機器筐体間の容量性結合や、筐体アースなど、人体以外のものを用いて構成するのが一般的である。なお、便宜上、前者の経路を流れる電流を信号電流、後者の経路を流れる電流を帰路電流と呼ぶ。ここで、図 2.3 に示すように信号電流用の電極のみを用いる方式を 1 電極方式と呼ぶこととする。また、先に代表例として示した松下電器のタッチ通信システムでは、信号電流を流すために人体を利用し、帰路電流は機器間の容量性結合を利用して流しているが、図 2.4 に示すように送信機の電極を信号電流用と帰路電流用の 2 つとすることにより、人体を利用して容量性結合を強める工夫がされている。この方式を 2 電極方式と呼ぶこととする。なお、人体に流すことができる電流の大きさは、さまざまな観点からその最大値が規定されており、最も厳しいものは、500 μ A 以下と規定されている。これは、民生用の体脂肪計が測定時に流す電流と同じである。2 電極方式は、人体を用いて容量性結合を強くし、帰路電流を流しやすくすることができる反面、信号電流の大部分が比較的近距离に設置されている電極に流れてしまい、受信機に流れる信号電流が小さくなってしまうという欠点がある。また、人体は、運動状態や精神状態により発汗状態などに違いが見られ、また、体脂肪率などの個体差によっても周波数特性の不均一などが生じる。従来の方式では、伝送路の特性と送信機のマ

タッチングや、帰路電流の流れる経路の確保が問題とされており、周波数特性が均一であるとみなすことが出来る狭い帯域で通信を行っていたため、伝送速度を向上させることが困難であった。なお、電流方式は、人体を導線の代わりに利用しているため、握手によってPAN同士を接続することが出来る特徴がある。

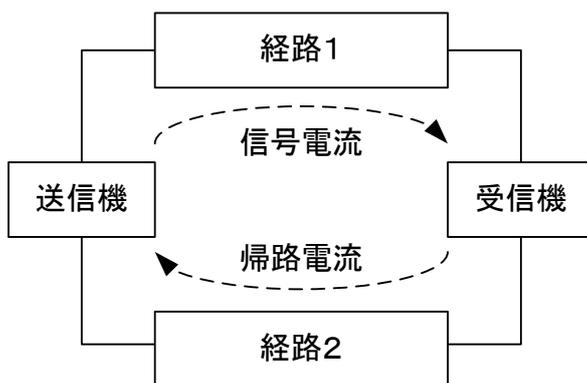


図 2.2 送受信機間の閉回路の構成

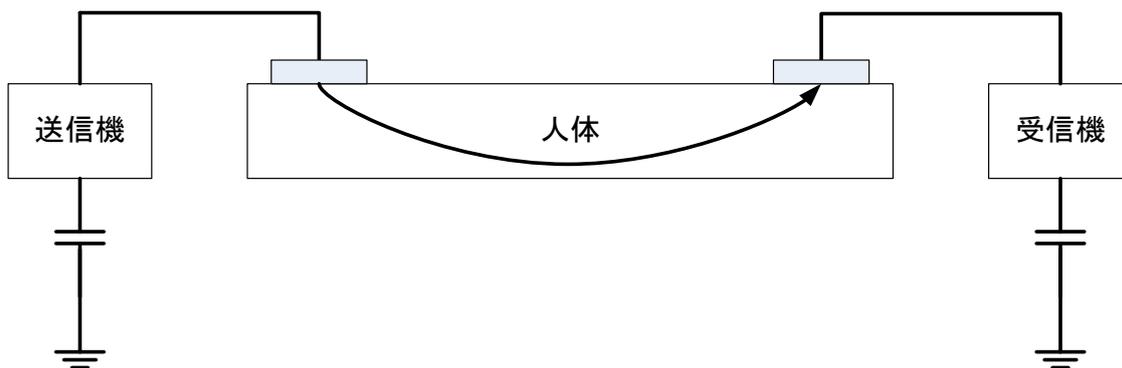


図 2.3 1 電極方式

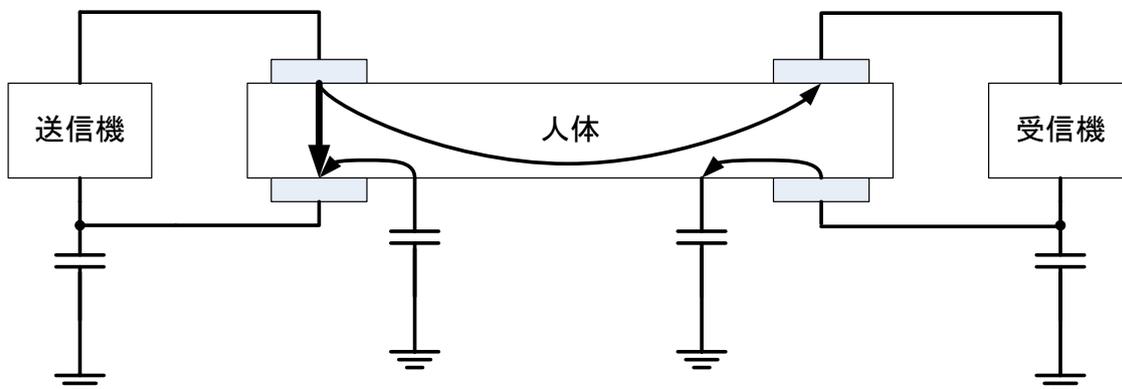


図 2.4 2 電極方式

電流方式を利用した製品には、タッチ通信システム[3][4]がある。これは、POSシステムや病院などの薬剤管理システムと組み合わせて利用されるもので、腕時計型の通信機と、ID情報を伝送する機能を付加したラベルによって構成されている。薬剤管理を例に挙げると、薬剤を取り出したユーザーが薬剤名の書かれたラベルに手を触れると、ユーザーの手首に取り付けられた腕時計型の通信装置とラベル間で人体通信による情報通信が行われ、ユーザーが取り出した薬剤の情報が通信装置内のメモリに記録される。その後、薬剤管理システムの端末にユーザーが手を触れると、人体を介して通信装置内に保存されたデータが薬剤管理システムに転送され、入力作業を効率化したり、誤調合を防止することができる。また、商品化はされていないが、Wearable key[5]は腕時計型の送信機とドアの内部に組み込まれた受信機間で人体通信を利用したID情報の交換が行われ、ドアノブに手を触れるだけで自動的に解錠することなどを実現するシステムである。このように、電流方式による人体通信は、伝送速度が低いことからID交換など小容量の情報交換がその利用目的であった。

2.1.3.2 電界方式

電界方式は、人体の誘電率が空気よりも大きいことを利用し、光ファイバーと同様の原理で電界を体内に閉じ込め、漏れ出る電界によって情報を伝送する方式である。人体の表面から漏れ出たわずかな電界を検出するため、図 2.5 に示すように電界の変化を検出できる特殊な光学素子（光電素子）が用いられることもある[7]。この場合、送信機と受信機は電氣的に完全に切り離されるため、コモンモードノイズの影響を受けず、送受信機共に人体に対して非接触で通信が可能である。しかし、接触部分の不整合による反射や、人体表面から漏れ出す電界が微弱であることなどから、握手による PAN の接続は不可能である。また、光学素子を用いず、入力インピーダンスを十分に高くした受信機を用いて図 2.6 に示す方法で通信を行うこともある。

電界方式の応用例としてレッドタクトン[6][7]が挙げられる。レッドタクトンは衣服や手袋、靴などを身につけたままでも通信が可能であり、Wearable key と同様、ID 情報の交換によるセキュリティ装置として利用されている。

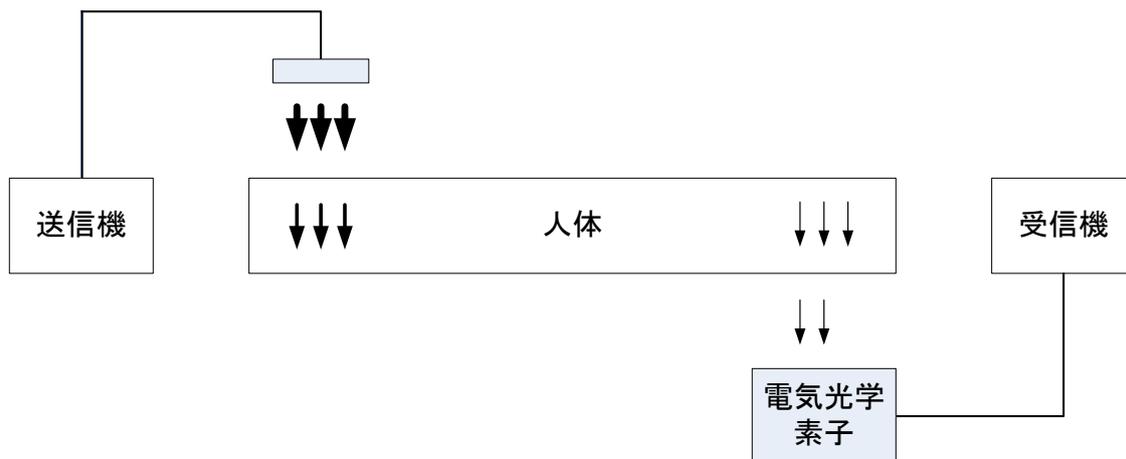


図 2.5 電界方式（光学素子を用いる方法）



図 2.6 電界方式（光学素子を用いない方法）

2.1.3.3 音波方式

音波方式は、超音波などを用いて通信を行う方式である。電磁波を用いないため、医療分野への利用が期待されており、情報通信を行いながら生体情報のモニタリングを行う装置も試作されている[13].

2.2 近距離無線通信技術が抱える問題

電波を利用して通信を行うためには電波法による規制を受け、使用する周波数や出力の大きさなどが制限される。無線局の免許なしで誰でも利用できる周波数帯は「ISM バンド」と呼ばれ、世界各国ではほぼ共通で利用できる ISM バンドは 2.4GHz 帯のみとなっている。そのため、IEEE802.11b や Bluetooth, ZigBee はいずれもこの周波数を利用している。しかし、この周波数帯はこれらの通信用途のほかにも、電子レンジ、産業機械、医療機器などさまざまな機器に利用されており、「ジャンクバンド」と呼ばれるほど混み合っている状態で、近年、混信等の通信障害が問題となっている。このほか、400MHz 帯は高画質な映像の転送に必要な帯域幅の確保が難しく、大容量の情報を短時間で伝送できないきなどの問題がある。

また、無線通信にはサービスの提供範囲内ならどこでも利用できるというメリットがある反面、サービスエリアを厳密に限定することができないという技術的な問題もある。たとえば、家庭内に設置した無線 LAN のアクセスポイントに第三者が屋外から無断でアクセスし、犯罪に利用されてしまったなどという問題は、まさに通信範囲の制御がうまく行えていないからに他ならない。また、犯罪行為に利用されるに至らなくても、日本国内には、誰でも簡単にアクセスできてしまうような無線 LAN アクセスポイントが、多数存在していると警鐘が鳴らされている。

2.3 無線電力伝送

無線による電力伝送も、人体通信同様、伝送距離やそのメカニズムによって、いくつかの方式に分類することができる。従来、長距離伝送では、マイクロ波など無線を用いるものが主流であったが[25]、近年、共鳴現象を用いる伝送方式[26][27]が提唱され、盛んに研究が行われている。一方、近距離の伝送は、磁界を用いるもの、電界を用いるもの、電波を用いるもののほか、音波などの振動を用いるものに大別することができ[27][28]、特に磁界の結合を利用するものは30年ほど前からコードレス電話機や、電動歯ブラシなどの充電器を中心に広く利用されている[25]。主な伝送方式の概要を次に示す。

2.3.1 磁界結合方式

磁界結合による非接触給電は、電磁誘導方式とも呼ばれており、図2.7に示すように磁氣的に結合した2つのコイルを用いて電力を送受するものである。コイルと交流電源のみで構成できるため、安価で信頼性が高いことから、近距離非接触給電方式の中で最も一般的に利用されている。伝送距離はコイルの内径と同程度であり、一般に数mm～数cm程度と非常に短い[29]ため、コードレス電話機や電動歯ブラシなど、定位置に置かれるものへの給電によく利用されている[30]。また、コイル間に導体が挿入されると、渦電流や誘導電流によって発熱するため、民生用では、伝送電力を数百mW程度に制限するのが一般的であるが、工業用では数kW級の伝送が実現している[27]。磁界結合による電力伝送メカニズムを次に示す。

- ①送電コイルに電流が流れるとアンペールの法則により、磁界が発生する。
- ②送電コイルと十分近い位置にある受電コイルは、送電コイルによって発生した磁界の影響を受け、ファラデーの電磁誘導の法則から起電力が生じる。

送電コイルに交流電流を流した場合、それにより生じる磁界は時間に対して常に変化するため、受電コイルにも常に起電力が生じることとなる。伝送効率を高くするには、コイル間距離を短くしたり、共振回路を付加するなどの方法が有効である。

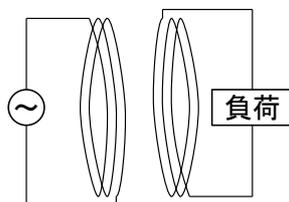


図 2.7 磁界結合方式による電力伝送

2.3.2 磁界共鳴方式

磁界共鳴方式は、2006年にMITによって発表された方式で、基本原理は磁界結合方式と同じであるが、従来の磁界結合による電力伝送は、伝送距離がコイルの内径に依存し、長

距離の伝送には適していなかった点を改善した方式である[26]。図 2.8 に示すように、励磁コイルの近くに特定の周波数で共振するように調整された補助コイルを設置することで受電コイルを貫く磁束を多くするよう工夫されていることが特徴である。補助コイルの作用により、伝送距離だけでなく配置の自由度も向上し、コイル径の数倍程度の距離を離しても高い伝送効率が得られ、テレビなどの家電製品の非接触給電に向けた研究が盛んに行われている[27]。MIT によって実施された実験によると、直径 60cm のコイルを用いた場合、コイル間距離が 1m のときは伝送効率が約 90%、伝送距離を 2m とした場合でも伝送効率は約 45%と磁界結合方式に比べ、伝送効率の大幅な改善が確認できたとされている[27][30]。

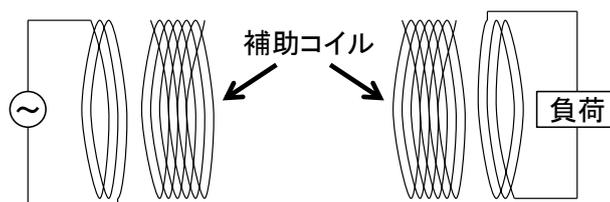


図 2.8 磁界共鳴方式による電力伝送

2.3.3 電界結合方式

電界結合方式は、図 2.9 に示すような平行平板コンデンサを構成し、電力を伝送する方式である。大きな電流を伝送することができないため、昇圧回路を用いて数百～数 kV 程度まで昇圧してから電力を伝送している。大きな電流が流れないことから電極部分の発熱が少ない、位置ずれに強いなどの特徴を有する反面、昇・降圧回路が必要であることや、高電圧を扱うため、厳重な安全対策が必要などの欠点があるが、共振現象を利用した電界共振型の電力伝送システムが提案されるなど[32]、今後の発展が期待されている方式である。

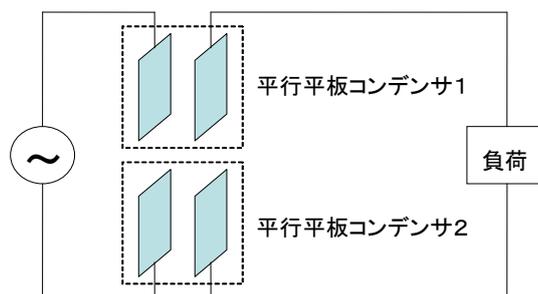


図 2.9 電界結合方式の概略図

2.3.4 その他の方式

電力伝送には、前述の方式のほか、電波を用いる方法[31]や RFID の一部で利用されているマイクロ波方式や、医療機器などで利用されている超音波方法[28]などがある。

2.4 電力と情報を同時に伝送する方式

伝送する電力を情報で変調し、電力と情報を同時に伝送する方式は古くから良く用いられてきた方式の一つであり、現在でも、非接触型 IC カードや RFID など利用されている。情報を伝送する搬送波のエネルギーを電力伝送に利用しているため、変調方式によっては情報伝送を付加することで電力伝送効率が低下してしまう。また、電力伝送の周波数が高くなると、スイッチング素子の効率が悪くなり、逆に、周波数が低くなると搬送周波数より広帯域の信号を伝送できないため、情報伝送を広帯域化できないという欠点がある。電力伝送効率は、送受信に用いるコイルの共振周波数を搬送周波数にあわせて調整することで、改善が見込めるが、帯域幅が狭くなるため、高速通信には不向きとなり、電力伝送効率と通信速度はトレードオフになってしまう。また、受電側から送電側へ情報を送信する場合は受電側の負荷の状態を変化させて、それを給電側で検出するのが一般的であるが、電力の利用効率が悪く、また、高速通信には不向きである。

2.5 人体の電気的特性

2.5.1 周波数に対する誘電率と導電率の変化

人体の電気的特性については携帯電話が人体に与える影響の調査など、数多くの分野でさまざまな角度から研究が行われており、図 2.10 に示すように周波数により誘電率・導電率が変化することが知られている[17][18][23]. それに伴い、伝搬特性も変化を示すと予想されるが、それについての研究はこれまでほとんどなされていない. なお、人体（筋肉）の誘電率は図 2.10 に示すように周波数の増加に対し、減少する傾向にあり、導電率は周波数が高くなるほど増加することがこれまでの研究で分かっている[18].

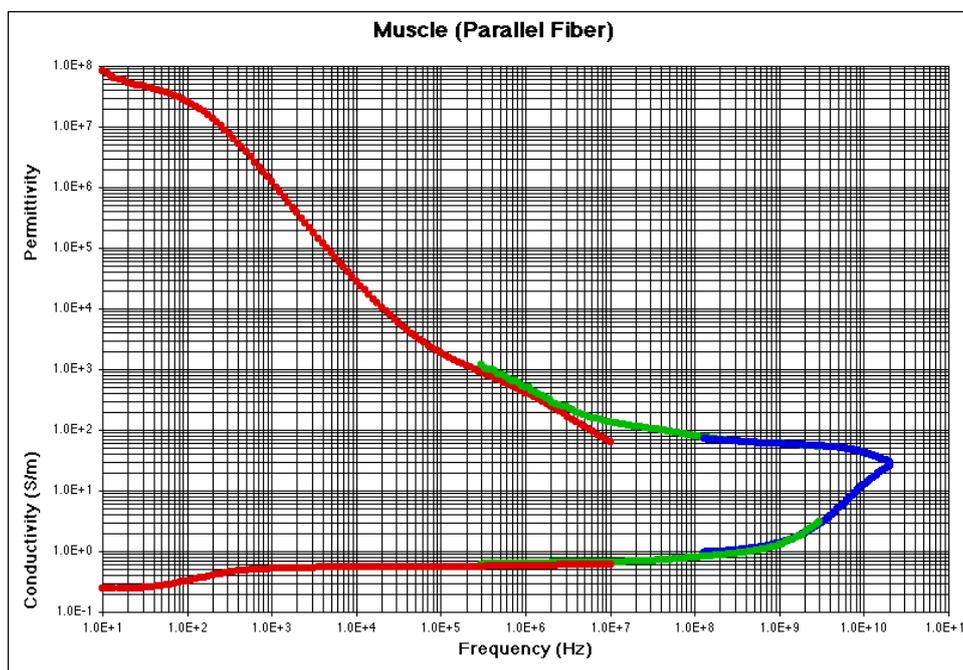


図 2.10 人体の電気的特性[18>(*1)

人体通信における情報の伝搬メカニズムの解析には、多数の先行研究[3]～[11][24]があり、伝搬メカニズムが電流によるものであるか、電界によるものであるかによって大きく異なる. 本研究では、伝搬メカニズムを判別する手法について 3.4 節で詳細に述べている.

2.5.2 模擬人体（ファントム）

人体はその電気的特性に注目した場合、健康状態や、発汗状態などの要因により、常にその特性が変化しており、実験の再現性に欠ける. そのため、ファントムと呼ばれる模擬人体を用いた実験が良く行われている[9][24]. ファントムは、その使用用途に応じ、「電気的特性を等しくしたもの」、「磁気的特性を等しくしたもの」、「重量を等しくしたもの」、

*1 <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/AppendixA.html> より引用

「大きさを等しくしたもの」などさまざまなものが存在する。

また、電氣的に特性の等しいファントムにも、寒天で固形化した寒天ファントムとセラミックを用いたドライファントム、電解液を用いた液体ファントムなど、さまざまな材質のファントムが存在する。ドライファントムは水分が含まれていないため、特性に経時変化がほとんどないという特徴があるが、カーボンや高誘電体により電氣的特性を制御しているため、使用できる周波数範囲が狭いという欠点を持っている。また、液体ファントムはその名の通り液体のため、それ自身で形状を保持することが出来ず、容器が必要となるなど、一長一短である。ファントムを用いた実験では、人体の電氣的特性を正確に再現することが要求されるが、実際に人間の身体の構造を模擬することは現実的ではないため、特定の周波数において、その特性が等価とみなせるようなものがよく利用されており[24]、広い周波数帯域での評価は行われていない。従来技術では、人体通信は筐体生体信号を利用していたため、特定周波数における伝送特性の評価で十分であったが、本研究の場合、広帯域の信号を扱う必要があるため、ファントムについても広い帯域で人体と等しい特性を示すことが要求される。本研究では、千葉大学伊藤研究室で開発された高含水組織用生体等価ファントム[38]を参考に、ファントムの試作と評価を 3.4 節で行っている。

第3章

人体通信の高速化

3.1 人体の電気的特性

2.5節で述べたように，人体の電気的特性は図3.1示すように周波数によって大きく変化することが知られているが，人体の電気的特性に対する伝送特性の検討はこれまでほとんど研究されていなかった．そこで，本研究では人体の伝送特性を計算機シミュレーションと実験によって調査した．

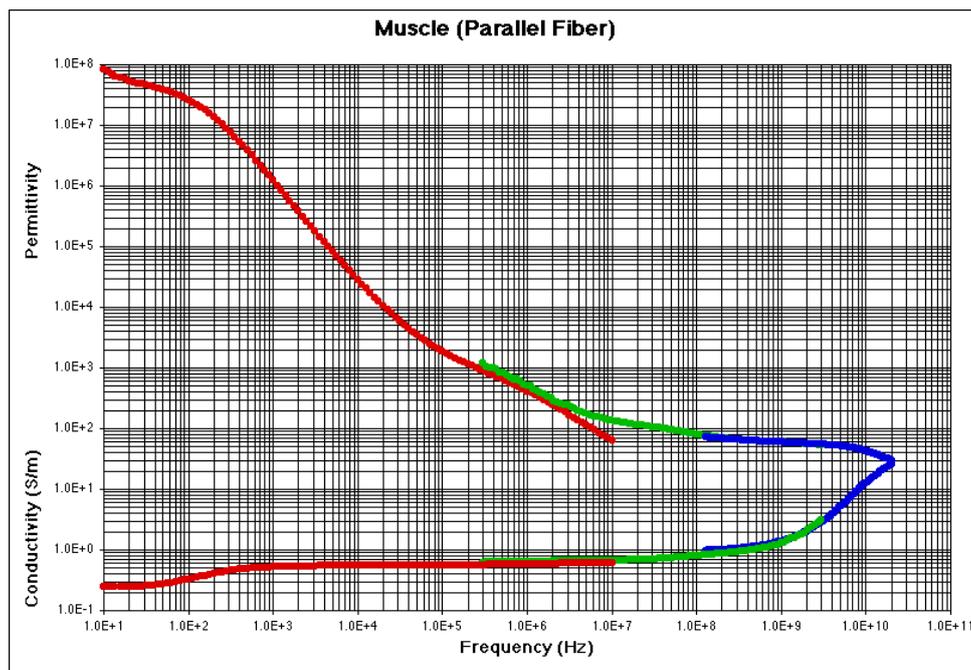


図 3.1 人体の電気的特性（再掲，*1）

3.1.1 伝搬損失シミュレーション

前節において，人体の伝搬特性が周波数によって変化する可能性が明らかとなったため，周波数に対する伝搬損失の変化を計算機シミュレーションにより調査した．シミュレーシ

*1 <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/AppendixA.html> より引用

ヨンは KDDI 研究所 特別研究員（当時）の前山の協力の下，FDTD 法によって行った。図 3.2 と図 3.3 にシミュレーションを行った計算モデルとその結果を示す。なお，このモデルは，日本人の平均的な腕を $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 450\text{mm}$ の立方体に近似したものであり，千葉大学藤井らの研究[9]を参考に電極の形状を定めた。

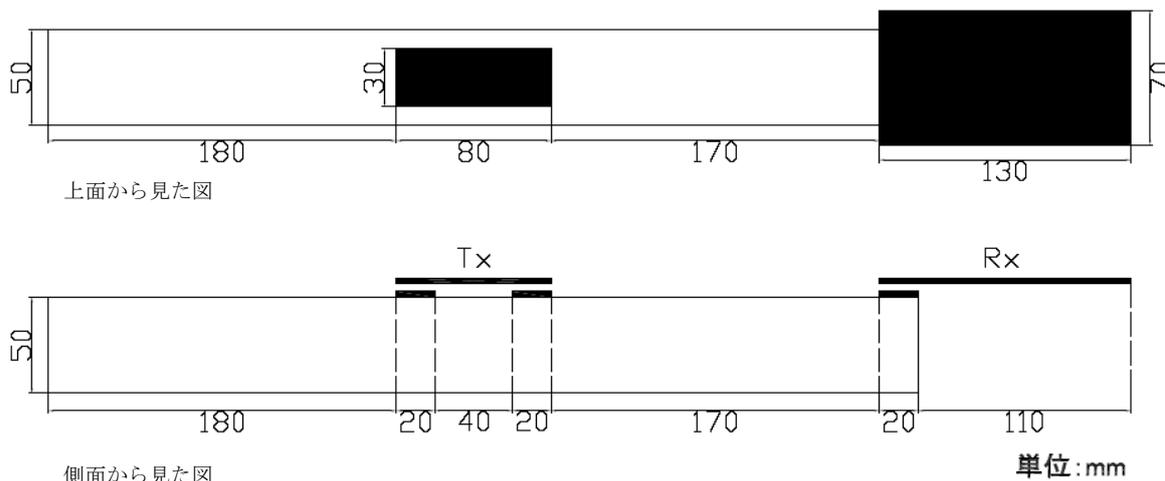


図 3.2 FDTD 法による解析のモデル

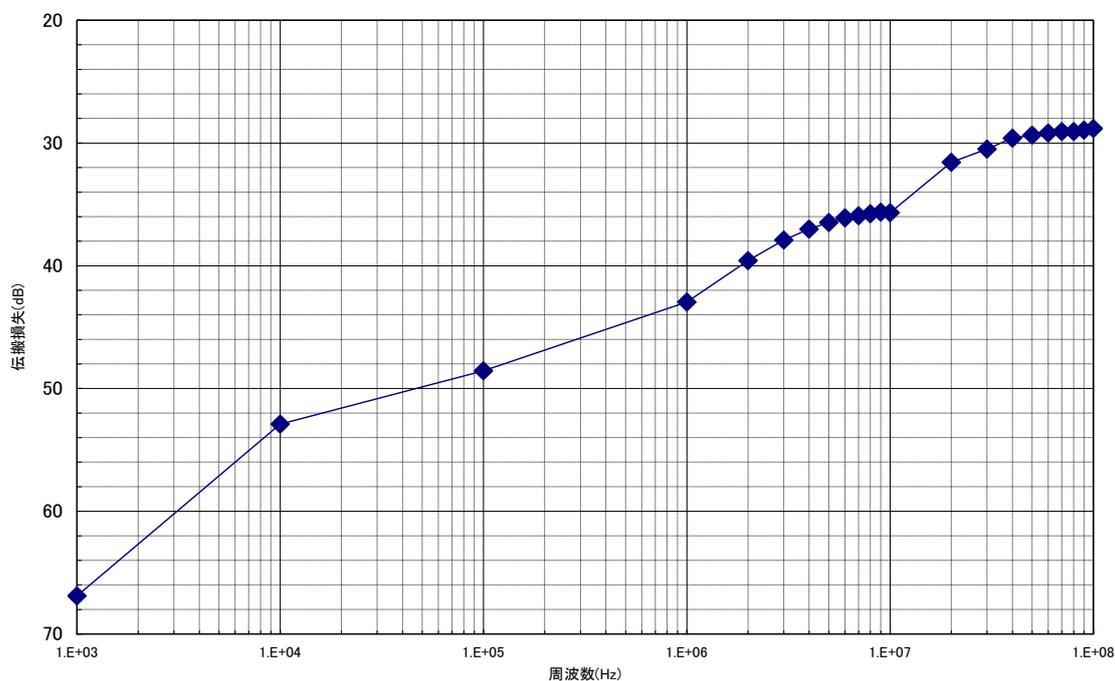


図 3.3 解析結果

図 3.3 より，10KHz から 10MHz 付近までは誘電率の変化がそのまま伝搬損失に現れていることが確認できた。また，10MHz 以上の部分では，図 3.1 において誘電率の変化の傾

向が緩やかになるが、図 3.3 に示すシミュレーションの結果には大きな傾向の変化は見られない。これは、この周波数領域はすでに無線通信の領域であることから、一部のエネルギーが人体ではなく空間を伝搬したものであると考えられ、電極の特性が現れたものであると考えられる。

3.1.2 生体を用いた伝搬損失の測定

実際に生体を用いてネットワークアナライザにより伝搬損失を測定し、シミュレーション結果と比較した。測定にはアンリツ株式会社製の低周波数帯用ネットワークアナライザ MS4630B を用い、人体と計測器の接点となる電極は電子工作用に市販されている紙フェノール生基板を加工し自作した。以下にネットワークアナライザ MS4630B の主な仕様を示す。

表 3.1 ネットワークアナライザ MS4630B の主な仕様

周波数範囲	10Hz~300MHz
周波数分解能	0.01Hz
平均雑音レベル	<-110dBm (RBW:1kHz,80kHz~1MHz) <-120dBm (RBW:1kHz,1~300MHz)
分解能帯域幅	3,10,30,100,300,500,1k,2k,3k,4k,5k,10k, 20kHz および自動
出力レベル範囲	出力ポート A:0~+21dBm 出力ポート B:-6~+15dBm
出力分解能	0.01dB
振幅測定範囲	>120dB
振幅測定精度	0.001dB

3.1.2.1 安全に関する検討

人体を用いた実験を行うにあたり、人体に対し十分に安全である信号レベルを確認し実験を行った。人体に対する安全指針（電波防護指針）は、ARIB STD-38 によって規定されており [33]、健康な人体に流し続けても影響がない電流の最大値は $500 \mu\text{A}$ とされている。この値は、市販されている体脂肪計などのガイドラインとしても用いられているものである。

1 電極方式の場合、送信機の出力はすべて人体を通過して受信機に流れるので、受信機の入力インピーダンスを 50Ω とした場合、最大 14dBm の電力を伝送することができる。実験においては、さらに 4dB 安全マージンを設け、受信端で 10dBm 以下となるようにする

こととした。

また、機器の漏電等による感電事故を防止するため、各機器はアース端子付の電源ケーブルでコンセントを用いて実験を行った。

3.1.2.2 電極の製作

人体の周波数特性を測定するにあたり、人体と測定器を接続するための電極の製作を行った。電極は図 3.2 に示すモデルと同様の形状となるように製作し、実験を行う上での利便性等を考慮し、ケーブル長は 0.8m とした。製作した電極の外観を図 3.4 に示す。

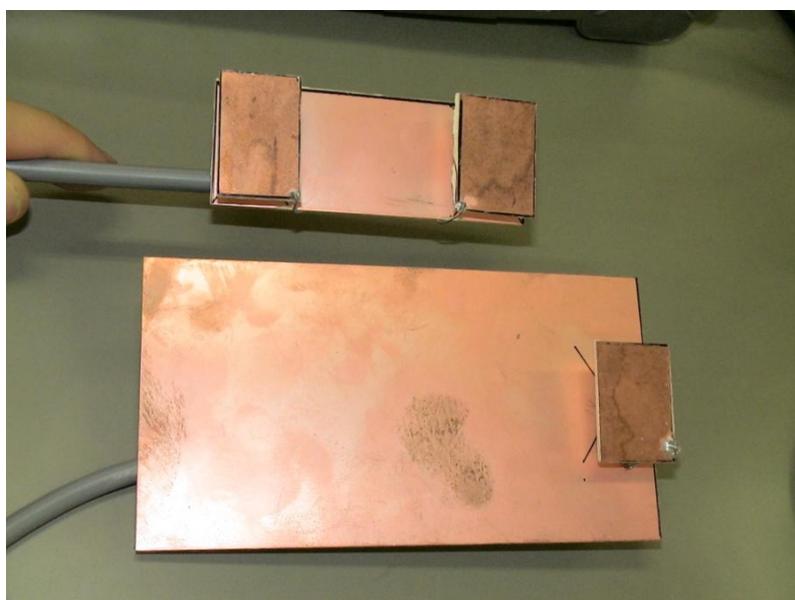


図 3.4 製作した電極の外観（上側：送信用電極 下側：受信用電極）

3.1.2.3 実験方法

3.1.2 節の実験は、ネットワークアナライザを用い、1kHz～100MHz の範囲における伝搬損失を測定した。以下に実験の手順を示す。なお、実験は万が一の事態に備え、被測定者以外の者の付き添いの下で行った。

1. ネットワークアナライザの設定を行う。

測定範囲：1kHz～100MHz(対数表示モード)

分解能帯域幅：100Hz（固定）

出力：0dBm

測定モード：LOG MAG

2. 送信電極と受信電極の信号電極を短絡させ、キャリブレーションデータの測定を行う

3. キャリブレーションデータによる測定結果補正を ON にする
4. 電極間距離が FDTD 法の解析と等しくなるように電極を腕に当て、周波数特性を測定し、結果を保存する
5. 電極を腕に当てない場合の周波数特性を測定し、結果を保存する

3.1.2.4 実験結果

人体の周波数特性について、実測値と計算機シミュレーション結果の比較を図 3.5 に示す。

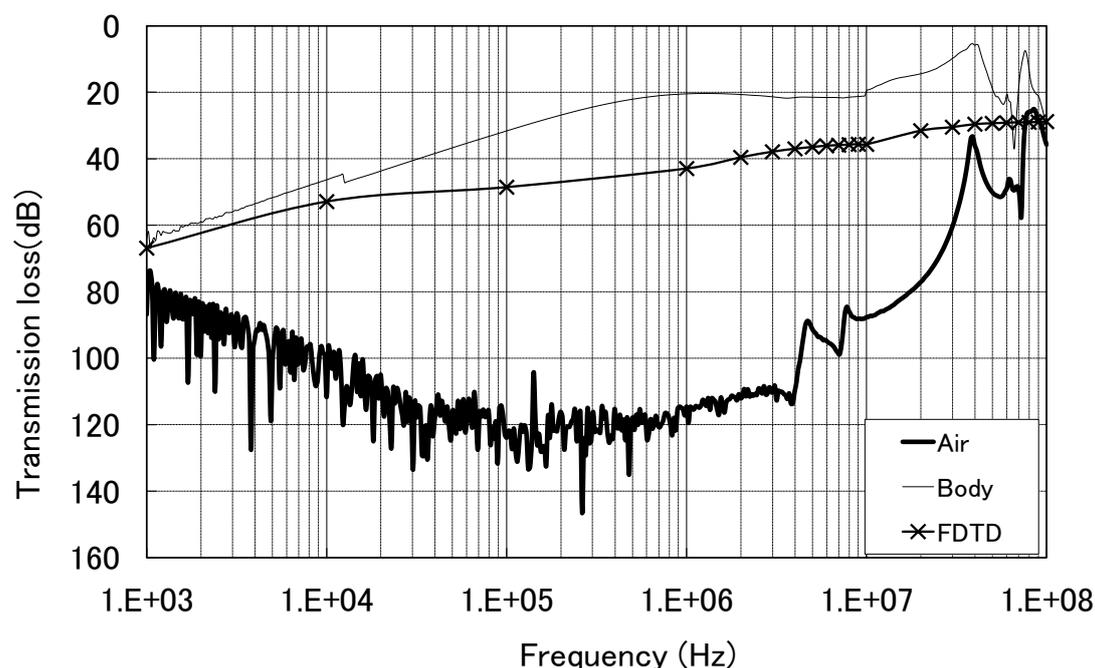


図 3.5 人体の周波数特性

図 3.5 より、人体は通常の試料にくらべ個体差が大きいということを考慮すれば実測値とシミュレーションの結果と傾向的に一致していると判断できる。しかし、両者の間には 20dB 程度の差があり、他の要因を検討する必要がある。また、人体がない場合でも数十 MHz 以上の周波数の高い部分では伝送路が形成されていることも確認できる。これは、3.1.2 節でも述べたように、送受信電極がアンテナとなり、空間を介して結合したためと考えられる。したがって、人体を伝送路として通信を行う場合は、40MHz より低い周波数を用いなければならないことが分かった。

また、本実験で用いた電極は形状的に固定が難しく、実験中に移動してしまったり、受信電極の GND 電極が腕に接触してしまうことがあった。また、柔軟性のない材料を用いたため、腕に密着させることが出来なかった。そのため、固定しやすく、腕に密着させることのできる電極の開発が今後の課題として残された。

3.2 带状電極の開発

前節の実験において、人体の電気的特性を測定し、数十 MHz 程度までなら伝送路として有効に機能することが確認されたが、電極の物理的な形状やそれ自身に固定機能がないことから、実験中に電極を固定することができず、計測中に電極が動いてしまい測定が失敗してしまうことがあった。また、サイズが大きすぎて実用性の面でも課題があった。そこで、次に挙げる特徴をもつ電極を新規に開発した。

- ・ 柔軟性があり、人体に密着させられること
- ・ 小型、軽量であること
- ・ 位置が固定できること
- ・ 従来の電極と比較し、特性が劣化しないこと

3.2.1 柔軟性の確保と小型・軽量化

前回の実験で用いた電極（以下、従来型電極と呼ぶ）は、片面に銅箔の貼り付けられた紙フェノール基板を用いていたため、柔軟性がなく、人体表面の曲面に密着させることが出来なかった。これは、電極の押さえ方によって接触面積が変化し、実験の信頼性に影響を与える重要な問題である。また、受信電極は 70mm×130mm と手のひら程の大きさがあり、腕に対して水平に保つことが困難であった。これも、前述の問題と同様に結果の信頼性に影響を与えかねない。そこで、新しい電極には、半田吸取り線として市販されている銅線をリボン状に編んだものを採用し、電極の柔軟性を確保した。電極の長さは次節に示す固定法に必要な長さである 0.7m とした。また、人体に接触していない GND 電極は開放とした。

なお、単線ではなくリボン状のものを採用した理由は、

- ・ 細い単線は人体を傷つける恐れがある
- ・ 繰り返し使用してもバラバラになりにくい
- ・ 入手が容易で保守が簡単

の 3 点である。

また、ケーブルの取り回しのしやすさを考慮しケーブル長を 0.8m から 1.0m に変更した。これらの改良により、同軸ケーブルの長さを従来型電極に比べ 25%長くしたにもかかわらず、全体の重量は 123.5g(送信用と受信用の 2 つの電極の合計の重量)と、従来型の 145.7g に比べ 15%の軽量化に成功した。これにより、被験者に対する負担を軽減させることが出来た。



図 3.6 新たに製作した電極の外観

3.2.2 電極位置の固定方法

従来型電極では、電極の持ち手部分を手で持ち人体に押し当てて特性を測定していたが、誘電体である人体（測定者以外の人体）が電極の近くに存在すると、測定結果に影響を及ぼす恐れがある。人体以外でも電極の固定に特殊な治具を使用すれば、測定結果に影響が及ぶ可能性は否定できない。そこで、図 3.7 に示すように手首に巻きつけ、固定する方法で電極を固定した。



図 3.7 電極を装着した様子

3.2.3 新型電極の特性評価

新たに開発した電極を用いて 3.1.2.3 節と同様の実験を行い、新型電極の特性を測定した。その結果を図 3.8 に示す。なお、図 3.8 中の旧型電極とは図 3.4 に示した電極である。

図 3.8 より、旧型電極に比べ新型の電極は伝搬損失が 10dB 程度低減していることが確認でき、今回開発した電極は旧型電極よりも特性が優れていることが確認された。これは、旧型の電極に比べ皮膚への密着度が増し、接触面積が増加したためと考えられる。しかし、それと同時に空間を伝搬するエネルギーも増加していることが確認できる。これは、同軸ケーブルのシールド部分に戻りの電流が流れていないことによる漏れと、信号線を長くし

たことにより、ロッドアンテナとしての作用したことが原因と考えられる。そのため、今後は、信号線の露出を少なくし、なおかつ接触面積の大きい電極形状の模索と、信号線とGND間に抵抗などを挿入して戻り電流を発生させ、同軸ケーブルからの漏れを最小限にする工夫が必要であると考えられる。

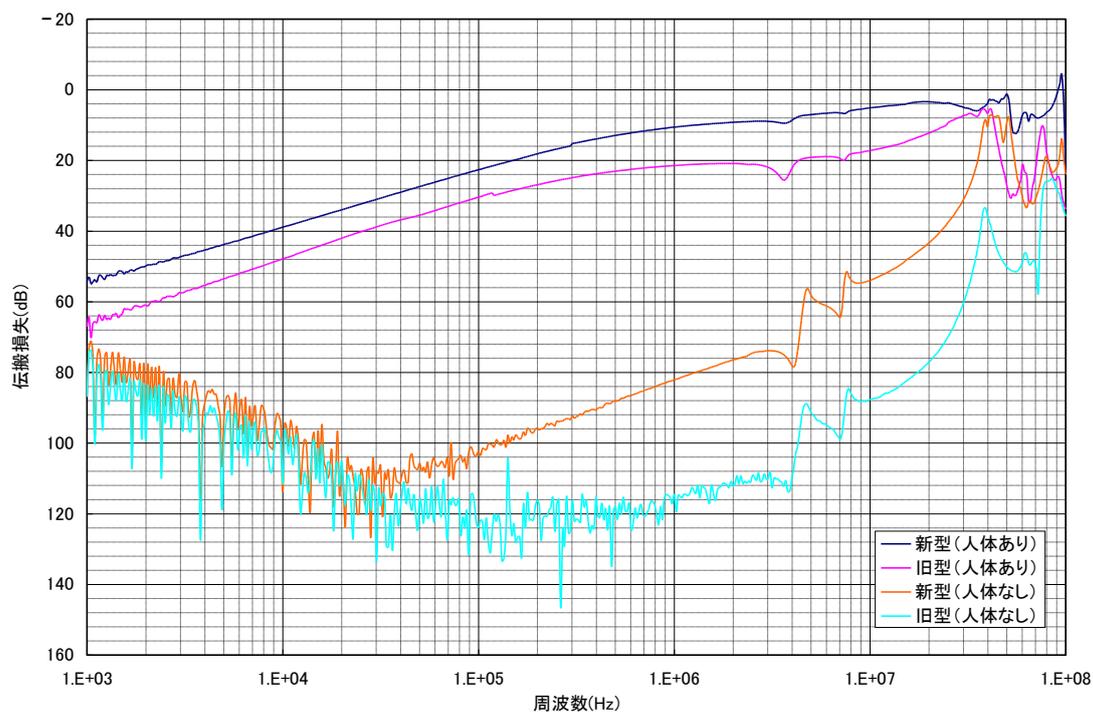


図 3.8 新型電極と旧型電極の特性の比較

3.3 棒状電極

前節に示した帯状電極は初期のものに比べ、皮膚への密着度や固定性に優れているが、容易に脱着ができない問題があった。また、電極の装着に時間がかかるため、実用性の面で問題があった。そこで、より簡単に確実な接触ができる電極として、棒状の電極を製作することとした。棒状電極は、図 3.9 に示すように電極を握ることにより電極との接触が得られ、その状態が保持される構造となっており、携帯電話のような通信機器を握っている状態に近く、電車のつり革や、自動車のハンドルなど、様々な部分に容易に実装できることから、より現実に即していると考えられる。

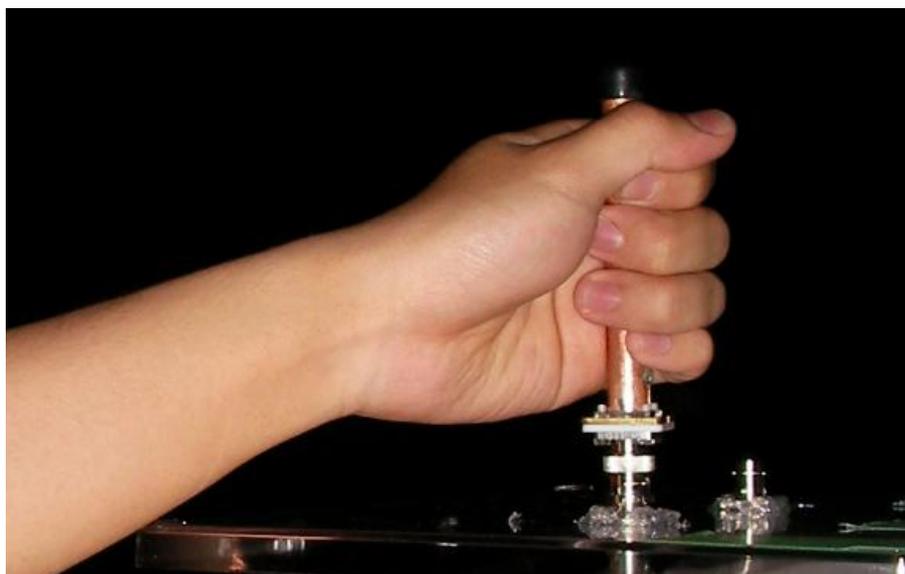


図 3.9 電極を手で握った様子

3.3.1 大きさの検討

本電極は、アンテナのように空間にエネルギーを放出するものではないため、電極の長さは波長に関係がなく、自由度が極めて高い。そこで、太さ、長さを変えて各種の棒を握り比べた結果、太さ 12mm、長さ 100mm 程度のものが最も握りやすかったため、この大きさを電極の大きさとして採用した。電気的な接続は帯状電極と同様で、同軸ケーブルの芯線が電極に接続され、シールドは開放となっている。

また、実験結果の再現性を確保するため、製作した電極を 100mm の間隔で保持するため、図 3.10 に示すような治具も製作した。

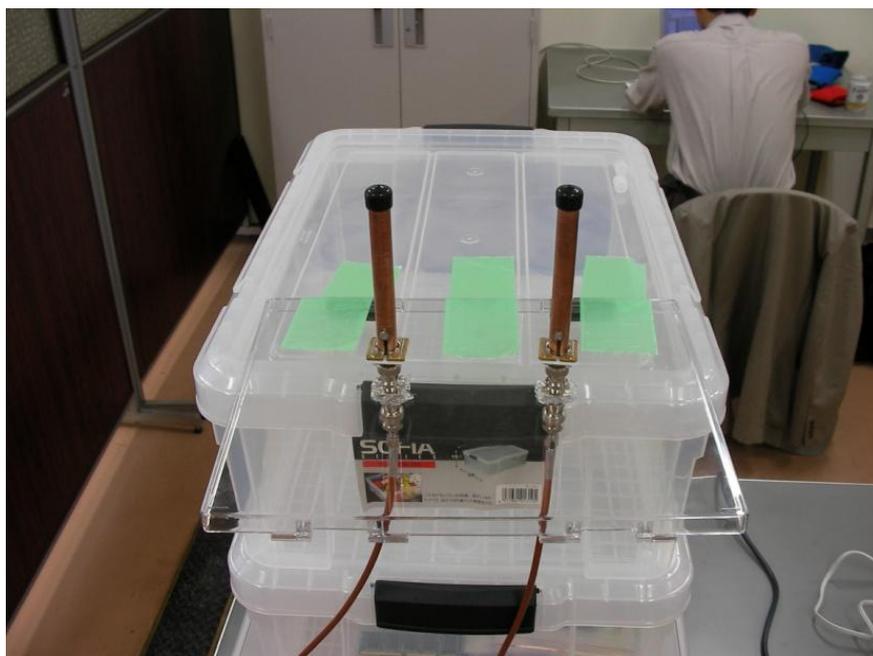


図 3.10 製作した棒状電極と等間隔で保持するための治具

3.3.2 特性評価

製作した棒状電極の周波数特性を図 3.11 に示す。

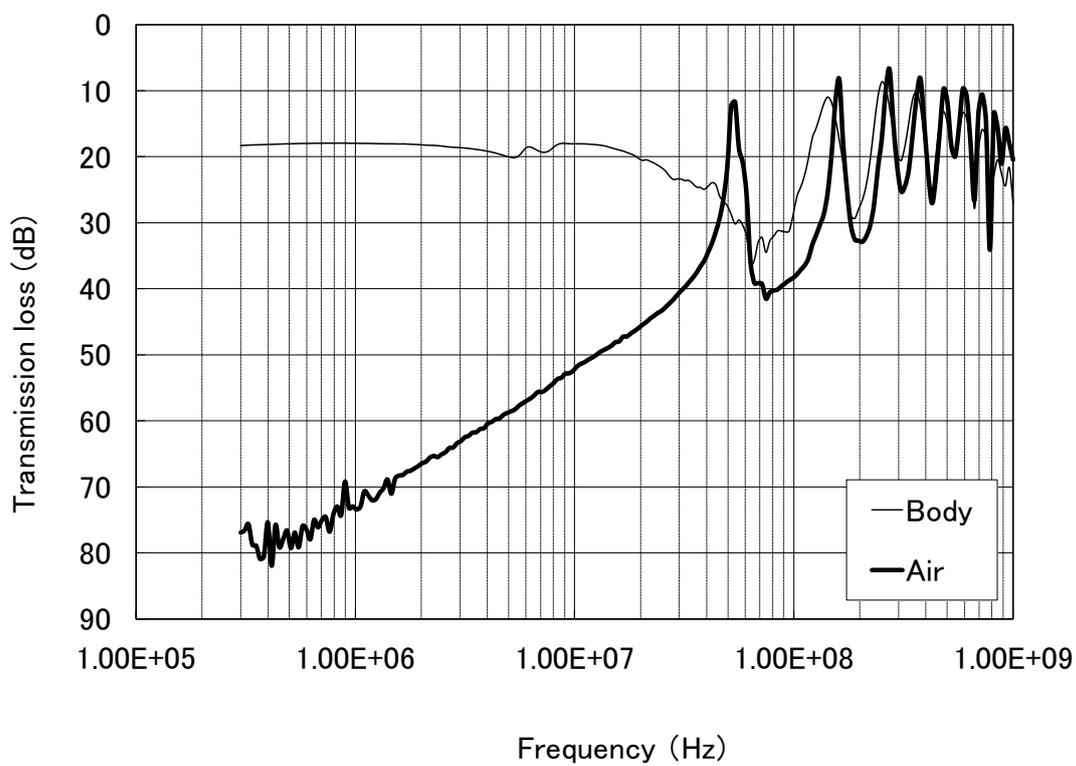


図 3.11 棒状電極の周波数特性

図 3.11 より、50MHz 以上の周波数において、人体がない場合の損失が人体がある場合の損失よりも小さくなることがあるが、これは、電極がアンテナとして作用し、電極間の結合が強くなったためと考えられる。また、带状電極の伝送特性と棒状電極の伝送特性を比較すると、棒状電極は、带状電極に比べ約 1MHz より周波数が高い部分では損失が大きいものの、周波数が低い部分では損失が小さく、変動が少ないことが分かる。このことから、低周波領域で広帯域な通信を行う場合、带状電極よりも棒状電極のほうが優れていると言って良いであろう。

3.4 主要な伝搬メカニズムの推定

3.4.1 伝搬メカニズムの推定

人体の電気的特性や、人体伝送における情報の伝搬メカニズムについて、これまで数多くの研究が行われてきたことは 2.5 節ですでに述べた。そこで本研究では人体通信の主要な伝搬メカニズムを確認すべく、次のような 2 つの仮説を立てて実験を行った。

3.4.1.1 仮説 1：電流による伝搬

まず、1 つ目の仮説は、3.1 節で示したように人体は誘電体であり、その両端に電極を接続すると人体は見かけ上、コンデンサと等価となる。また、ネットワークアナライザ内部では、送信側と受信側の GND が接続された状態となっている。これらのことから、ネットワークアナライザ内部の発振器・人体・ネットワークアナライザ内部の検出器（ミキサ）で閉回路が形成され、電流が流れることにより信号が伝搬した可能性である。この場合、誘電率が大きい、または周波数が高いほうが電流が流れやすくなるため伝搬損失は小さくなるものと予想される。また、誘電体の厚さ（電伝送路長）が薄いほうが静電容量が大きくなり、伝搬損失は小さくなるものと予想される。

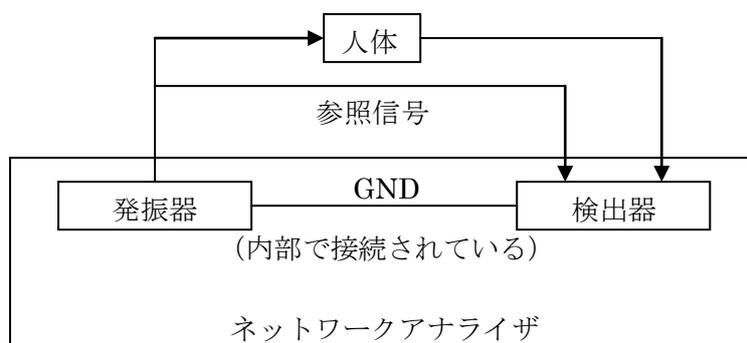


図 3.12 仮説 1 の電流経路のイメージ

3.4.1.2 仮説 2：電界による伝搬

もうひとつの可能性は、送受信電極付近の人体がそれぞれアンテナとして作用し、送信電極とその付近の人体が電界を励振させて、受信電極と GND 面の間に電圧が誘起された可能性である。この場合、電界強度は電極間の直線距離の二乗に反比例して減衰すると考えられることから送信電極（とその付近の人体）と受信電極の間隔が狭いほど伝搬損失が小さくなるものと予想される。

3.4.2 実験方法

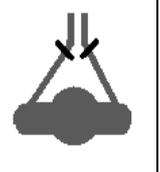
被験者の両手首にそれぞれ送信用，受信用の帯状電極を取り付け，3.2.2 節と同様の方法で伝搬損失の測定を行った。ただし，電極の配置を，

- a.左右に広げた状態
- b.手首を接近させた状態（間隔約 5cm. ただし両手は接触させない）
- c.両手を接触させた状態

の3つの状態に変化させた。これまでの実験により，10MHz 以下の部分では，エネルギーは体内を伝搬していることが確認されていることから，a.と b.の状態は，電極同士の直線距離は短いものの，エネルギーが伝搬する伝送路に目を向けると，腕→胴体→腕であることに変わりはなく，送路長は等しいと考えられる。また，手のひら同士を接触させた場合，仮に，手首→手掌→手首という新たな伝送経路が形成されたとすると，その距離は最短で 7cm 程度となる。

これら3つの状態の違いを表 3.2 にまとめる。

表 3.2 電極の配置状態の違い

	a.	b.	c.
電極間の直線距離 (cm)	135	10	5
伝送路長 (最短距離) (cm)	135	135	7
電極位置のイメージ (図中の黒線部分が電極)			

3.4.3 実験結果

電極間の状態を変化させた場合の伝搬損失の変化を図 3.13 に示す。

この結果より，伝送路長の等しい状態 a.と状態 b.には，伝搬損失に大きな違いは見受けられないが，伝送路長が a., b.に比べて短い状態 c.は最大で約 7dB ほど損失が減少していることが確認できる。

また，電極間距離の違いによる特性の変化は見受けられないことから，信号は電流によって人体内部を伝搬していることが確認され，また，接触によって，伝送路を形成することも分確認された。これは，2 人の人間が，握手をすることで PAN 同士を接続し，情報のやり取りを行うことが可能であることを意味している。なお，50MHz 付近で伝搬損失が

負の値を示している（利得が正となっている）部分があるが、人体が増幅器として作用することはないので、人体または電極が外部から何らかの雑音を受けたものと考えられる。

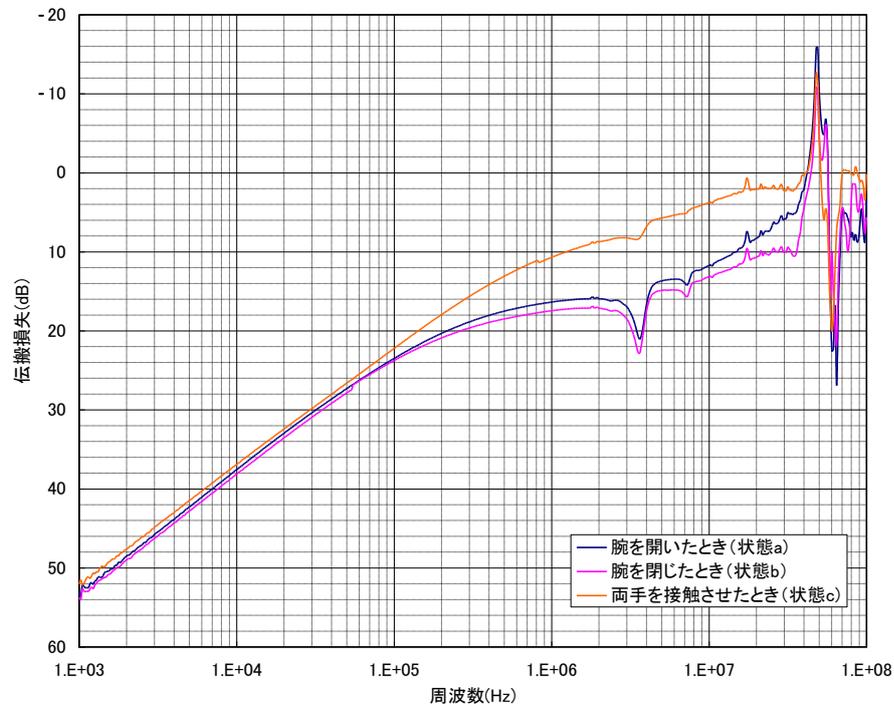


図 3.13 電極間距離を変化させたときの伝搬損失の変化

3.4.4 個人差

人体の電気的特性は、体格や体質、体調などの影響を受けることが容易に想像できる。顕著な個人差が見られない場合、特性を固定のイコライザを用いて伝送路特性を均一にすることが可能であるが、個人差が顕著な場合には、イコライザの特性を動的に変化させるか、周波数選択性フェージングに耐性のある変調方式を用いることで伝送品質の改善が必要と考えられる。個人差を評価するため、成人男女の 15 名の伝送特性を測定した。その結果を、図 3.14 に示す。

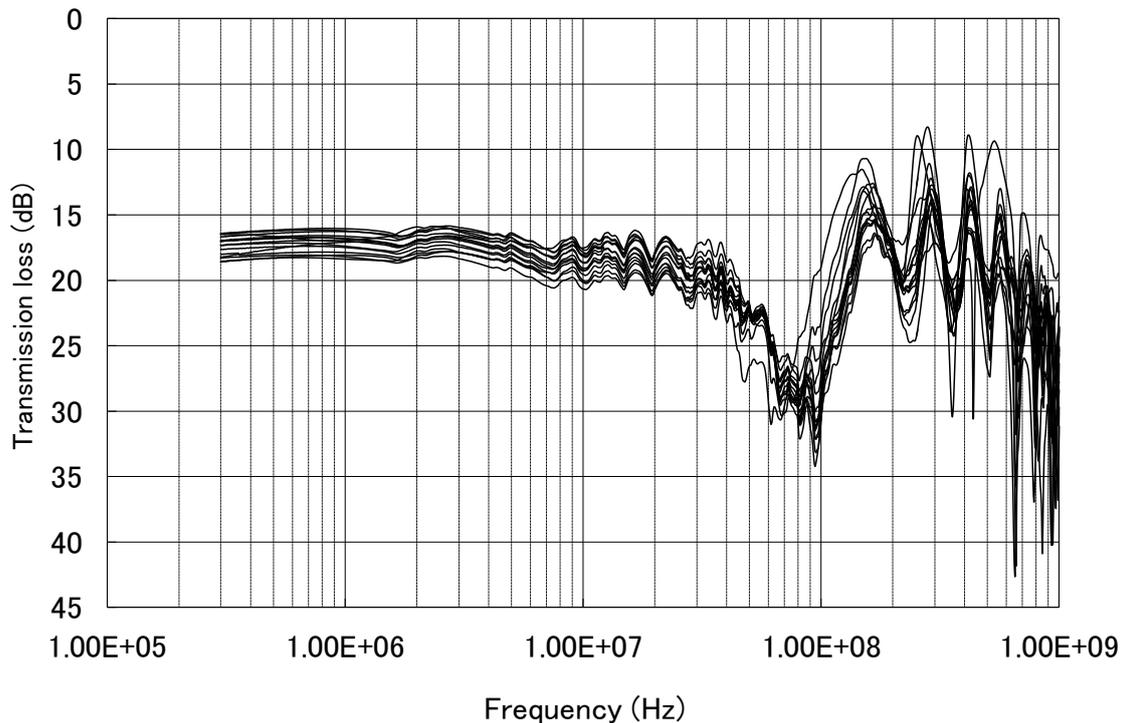


図 3.14 個体差の測定結果

図 3.14 から、伝送損失に 4dB 程度の個体差があることが確認できる。個体差が発生する要因としては、

- ・筋肉，体脂肪等の組成
- ・発汗状態
- ・電極の握り方

などが考えられ、人体は 15~20dB 程度の損失と考えれば良いことが分かった。損失の周波数に対する増減の傾向には特徴的な差異は見受けられないことから、増減の傾向には個人差は無いものと考えられる。

3.4.5 周波数特性の変動要因

図 3.14 に示す成人男女 15 人の伝送特性には、顕著な違いが見受けられなかったが、いずれもいくつかの特定の周波数で損失が増大していることが確認できる。また、図 3.11 からは、電極のみで人体がない場合でも同様の現象が生じることが確認できる。これは、棒状電極が送信系と整合しアンテナとして効率的に機能した結果、局所的に周波数特性が良くなったためであると考えられる。

人体ありの場合の特性に関しても、100MHz 以上の周波数領域においては電極に人体が接触したために、整合状態が変化し共振周波数が若干変化したものの、人体なしの場合と同じような結果が得られたものと考えられる。

また、50MHz における皮膚の比誘電率を 100、空間を伝搬する距離を棒状電極の間隔と同じ 100mm、皮膚内を伝搬する距離を 1.5m とすると、空間を伝送したものと皮膚を伝搬したものの波数差は 2.48 となることから、互いに逆相の波が打ち消しあった結果、伝送損失が増大し、人体がない場合に現れた共振点が見えなくなってしまったと考えられる。

3.5 広帯域情報伝送実験

人体の電気的特性の調査結果より，人体通信は，十数 MHz 程度までの周波数領域で行わなければならないことが分かった．そのため，高速で通信を行うためには，周波数利用効率の良い変調方式を用いる必要がある．本研究と並行して行われた原和輝の研究[34]において，人体と電極の間に絶縁体を挿入するなどし，伝送路が劣悪な環境となった場合，シングルキャリア方式である DQPSK に比べマルチキャリア方式である OFDM のほうがビットエラーレートが低くなることが知られている．図 3.15 は文献[34]に示されている伝送する信号の帯域幅を 2,4,6MHz と変化させた場合の変調方式の違いによるビットエラーレートの比較である．縦軸がビットエラーレート，横軸が搬送波の中心周波数となっている．この結果より，広帯域信号を伝送する場合は OFDM が優位であることが分かる．さらに，OFDM は無線 LAN や地上デジタル放送にも利用されている方式であり，既に変復調を行うチップがスマートフォンの内部に組み込まれていることから，実際にスマートフォン等に搭載する際，利用しやすい変調方式であると言える．そこで，本研究では OFDM 方式を採用した，電流方式による人体通信の実用性を確認することとした．

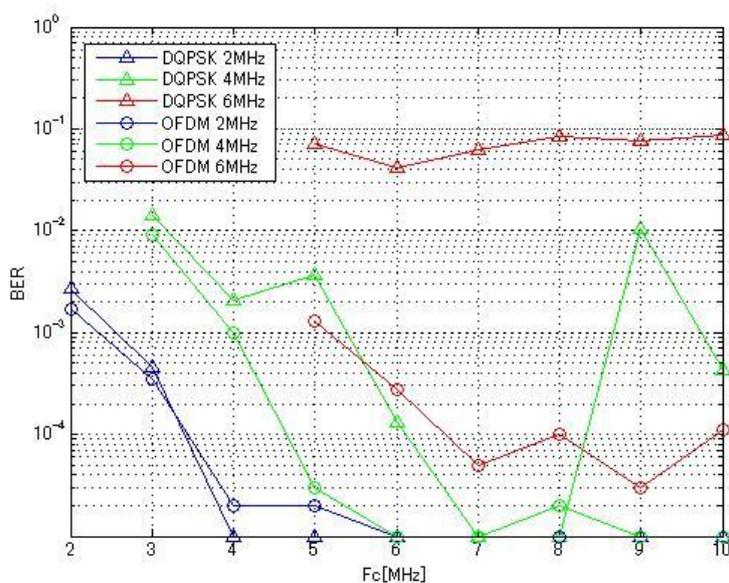


図 3.15 変調方式の違いによるビットエラーレートの比較[34>(*1)

3.5.1 実験システムの構築

OFDM 方式は，三角関数の直交性を利用し，FDM(Frequency Division Multiplexing)方式のサブバンド間の密度を向上させ，周波数利用効率を格段に向上させた変調方式であり，地上波デジタル放送にも利用されている変調方式である．そのため，シングルキャリ

*1 原和輝，“人体通信の伝送方式に関する研究，”電気通信大学大学院電気通信学研究科平成 21 年度修士論文より引用

ア方式で周波数選択性フェージングが問題となる場合であっても、個々のキャリアの帯域幅が狭い OFDM 方式はその影響を受けにくいという特徴がある。また、各サブキャリアのスペクトル配置が密であるため、周波数利用効率が非常によいことも特徴の一つである。

今回実験で用いる OFDM 信号は当研究室で開発されたトータルレコーダ・システムを用いて過去に収録された地上波デジタル放送の信号を用い、その評価は伝送された信号を復調し、テレビ画面に映し出された映像により、十分に鑑賞に堪えられるものであれば伝送成功と評価することとした。これは、市販の SG では地上デジタル放送 1ch 分の信号しか生成できないが、トータルレコーダシステムでは複数 ch のより広帯域な信号ソースを実現できるためである。

トータルレコーダ・システムは、電気通信大学唐沢研究室の竹本らによって開発された「テレビ放送などの変調波をそのまま収録することの出来る変調波収録システム」であり、その構成は図 3.16 に示すようになっている[35]。トータルレコーダ・システムにより収録・再生される Low IF 信号の帯域幅はテレビ放送の周波数割り当ての関係から 1ch あたり 6MHz となっており、隣接する複数の放送局の信号が収録されている。本研究では、0.3~6MHz と 6.3~12MHz の 2 つの広帯域信号を利用した。また、トータルレコーダ・システムにすでに収録されている放送波（以下、試験信号とよぶ）の S/N 比とデコーダが復調不能となる S/N 比の間には約 30dB の余裕があることから、特別な補正を行わなくても、デコーダで正常に復調できる可能性が高いとも考えられる。

なお、本研究では竹本らによって開発されたトータルレコーダ・システムの再生系のみを利用した。DAC とアップコンバータ間に 3.2 節で用いた帯状電極を接続し、それを人体に接続することで、トータルレコーダ・システムの出力が人体を伝送路として伝搬した後にアップコンバートされ、デコーダに入力されるよう、システムを改造した。

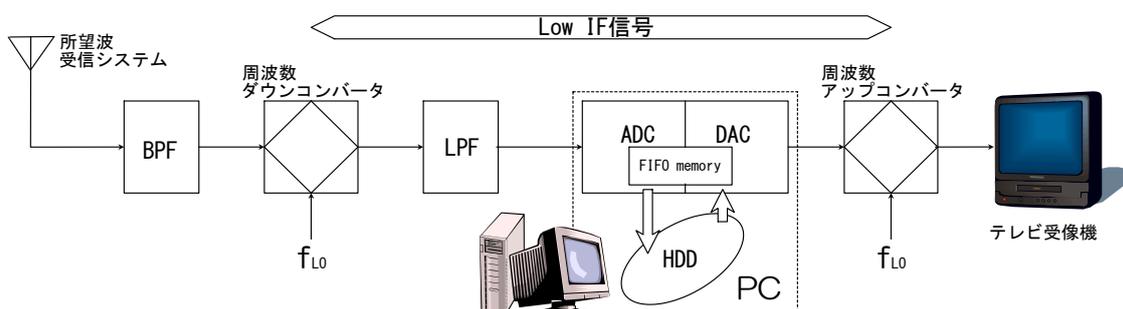


図 3.16 トータルレコーダ・システムの構成図(*1)

*1 電気通信大学大学院電気通信学研究科平成 18 年度修士論文「地上デジタル放送移動体受信特性評価用トータルレコーディングシステムに関する研究」より引用



図 3.17 実験に用いたトータルレコーダ・システム（再生系のみ）

3.5.2 実験結果

トータルレコーダシステム（DAC）の出力を直接周波数アップコンバータへ入力した場合の復調映像を図 3.18 に示す。図 3.18 より、この時の C/N は、47dB であることが分かる。次に、図 3.19 に示すように 2 人の被験者がそれぞれ片方の腕の手首付近に電極を装着し、反対側の手で握手をした場合の伝送結果を図 3.20 に示す。この場合、 C/N は 17dB に低下しているものの、映像に乱れがないことが確認でき、握手をした場合には、人体を介して 2 つの PAN を接続できることが確認できた。また、図 3.21 に示すように、電極を装着した腕同時で握手をした場合には、図 3.22 に示すように、 C/N の改善がみられた。なお、指先同士を接触させた場合や、電極を装着していない人を介して 3 人が握手をした状態でも伝送に成功したが、電極を押さえる力が弱いなど、さまざまな要因により図 3.23 に示すようにまったく復調できない場合もあった。また、テレビ放送 2 チャンネル分のベースバンド信号（帯域幅：12MHz、伝送速度 34Mbps）の伝送にも成功した。いずれの状態においても、電極を腕から離したり、握手をやめると復調不能となったことから、人体を伝送路として用いていることも確認できた。なお、34Mbps という速度は低速の有線 LAN(10Mbps) や一般的な無線 LAN(IEEE802.11b,11Mbps) に比べ 3 倍ほどの速度であり、マルチメディア

ア通信にも十分に対応できる通信速度で情報を伝送できたと言え、提案する手法が有効であることが確認できた。また、DAC とアップコンバータの GND を切り離れた状態においても、上述のように正しく復調されることが確認された。このことから、バッテリー駆動などで GND が共通でない 2 つの機器の間でも PAN を形成することが可能であると考えられる。



図 3.18 DAC とアップコンバータを同軸ケーブルで接続した場合の復調映像



図 3.19 実験風景（電極を装着した 2 人が握手をしているところ）



図 3.20 伝送に成功した時の復調映像（図 3.19 の状態で伝送したとき）



図 3.21 実験風景（電極を装着した腕同士で握手している様子）



図 3.22 電極を装着した腕同士で握手(図 3.21)した場合の復調映像



図 3.23 伝送に失敗したとき (画質劣化) の例

3.5.3 システム全体の伝送特性の評価

3.5.3.1 容量性結合

機器間の容量性結合は、機器筐体の表面積やその配置によって大きく変化すると考えられるが、ここでは、その一例として図 3.24 に示すような実験系における容量性結合について評価を行った。

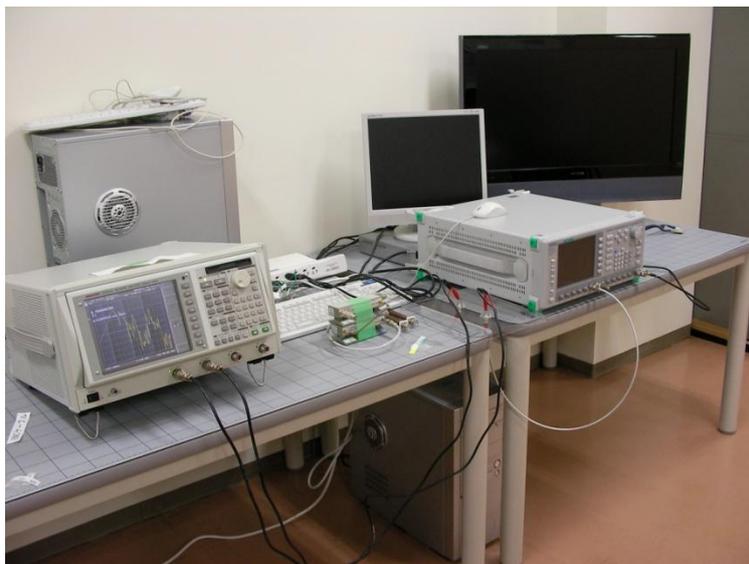


図 3.24 実験装置とその配置

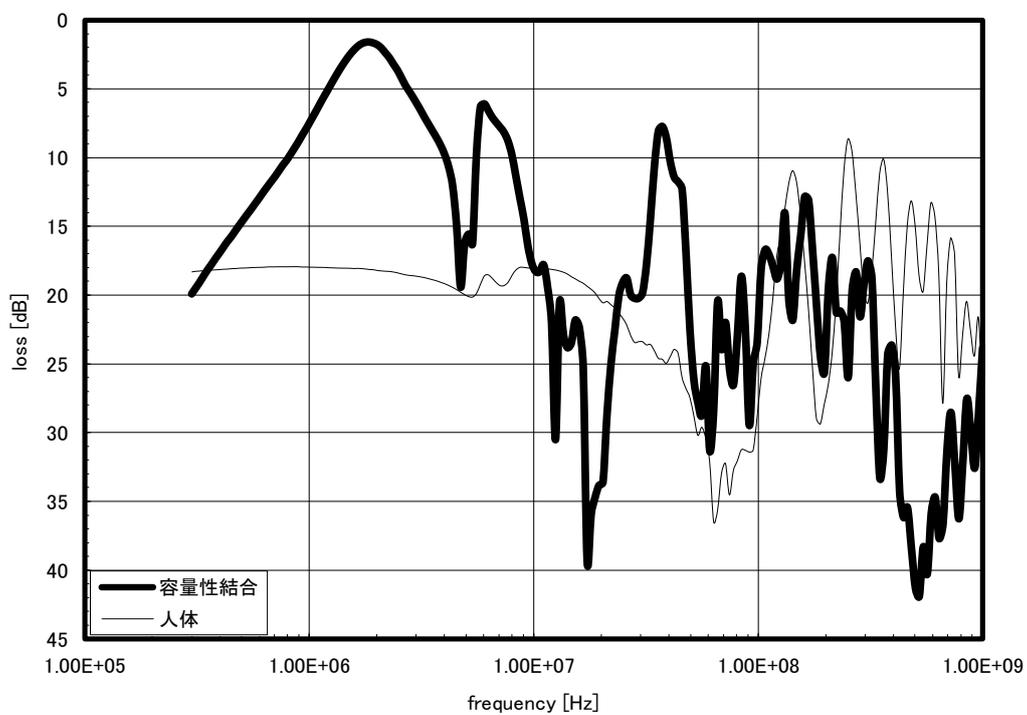


図 3.25 容量性結合と人体の伝送損失の比較

図 3.25 より、容量性結合の周波数特性は人体に比べ損失は小さいが、変動の幅が大きいという特徴があることが分かった。なお、図 3.25 において、容量性結合の損失が人体を伝送した場合の損失よりも小さくなっているが、図 3.24 に示す実験系は、筐体面積が大きく静電結合が得られやすい条件にあることや、筐体アースの接続を切り離したものの、電源装置内のコンデンサやトランスを介して経路が構成されたことが原因と考えられる。今後、筐体面積や機器間距離と得られる静電結合の関係について定量的な評価を行っていきたいと考えている。

3.5.3.2 総合伝送特性

人体伝送の伝送路の伝送特性は 3.3 節で示した人体の伝送特性と前節で示した空間の容量性結合の和となる。

本実験の実験系の等価回路を図 3.26 に示す。

人体、容量性結合をインピーダンスに変換したものをそれぞれ Z_1 、 Z_2 とすると、測定される系の電圧降下率 L は、送信機の実出力電圧と受信機の実入力電圧の比となり、

$$L = 20 \log_{10} \frac{50}{50 + Z_1 + Z_2} \quad (3.1)$$

として求めることができる。このようにして人体の周波数特性と空間の容量性結合から算出した人体伝送路の総合伝送特性を、図 3.27 に示す。本実験で用いた系では、24~30dB の損失で情報を伝送することができることが分かる。また、周波数により、6dB 程度伝送損失の差があることが確認できた。

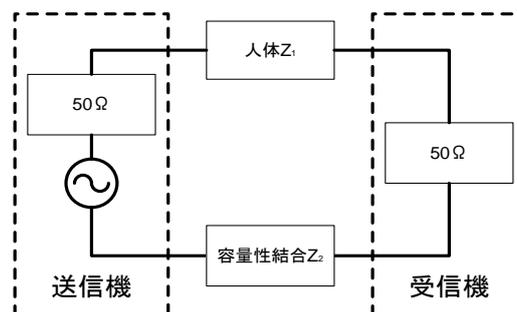


図 3.26 等価回路

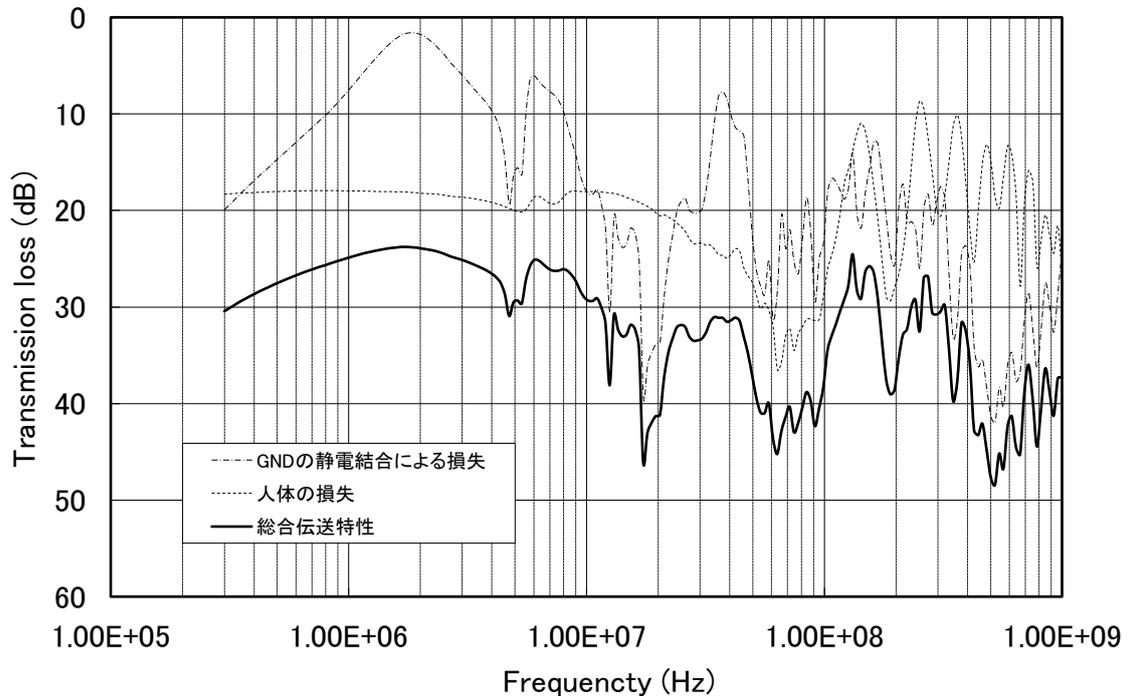


図 3.27 総合伝送特性

3.6 電極面積が伝送特性に与える影響

人体伝送における伝送特性のシミュレーションには、**FDTD**法がよく用いられている[9][36][37]。しかし、人体は筋肉の外側を皮膚と呼ばれる膜のようなもので覆われた構造となっており、その中に血管や骨などが存在している。それだけでなく、皮膚の厚さは、部位により異なるなど、人体の構造を厳密にモデル化するのは計算機のリソースや計算時間の面から現実的ではない。そのため、通常は、モデルの簡略化など、工夫が必要である。数値解析以外の方法では、実験によって測定を行う以外に伝送特性を知る術がなく、簡便に定量的な伝送特性を求める手法が必要とされている[38]。

本節では、人体伝送のメカニズムに着目し、電極面積が伝送特性に与える影響について検討を行った。

3.6.1 伝送経路の仮定と定式化

本実験は、ネットワークアナライザを用いて、電極の接触面積を変えた場合の伝送特性を測定するものである。よって、受信機の入力インピーダンスは 50Ω 、帰路はネットワークアナライザ内で接続されており、損失のない理想的なものと考えることができる。

前節で述べているとおり，ヒトの体は電気的特性の異なる物質が何層か重なった構造となっている．電極が直接接触するのは皮膚であり，電気的に見ると導電率が小さく電流を流しにくい物質であることがわかる．皮膚の下には筋肉の層があり，こちらは皮膚と比べ導電率が大きく電流を流しやすい性質がある．従来の研究では，厚さの薄い皮膚の部分を見捨てて筋肉についてのみ検討されることが多かったが，電気的に性質の異なる物質であるため，分けて考えることとする．

このように考えると，電流は，

送信電極→皮膚→筋肉→皮膚→受信電極

という経路を辿ることとなり，簡単な電気回路で考えると図 3.28 に示すようになると考えられ，伝送損失（電圧低下率） L は

$$L = 20 \log \left| \frac{Z_i}{Z_i + Z_h + \frac{d_t}{A_t S_t(f)} + \frac{d_r}{A_r S_r(f)}} \right| \quad (3.2)$$

として求めることができると考えられる．ただし， Z_i は受信機の入力インピーダンス， Z_h は電極面積の影響を受けないインピーダンス， A_t と A_r はそれぞれ送受信電極の面積， S_t ， S_r はそれぞれ送受信電極が接する部分の皮膚の導電率， d_t ， d_r はそれぞれ送受信電極が接する部分の皮膚の厚さである．ここで，図 3.27 に示す等価回路において，各インピーダンスを抵抗とキャパシタを並列としたものを考えることもある[38]が，抵抗成分に対して容量成分が十分に小さいため，抵抗成分についてのみ考えることとする．

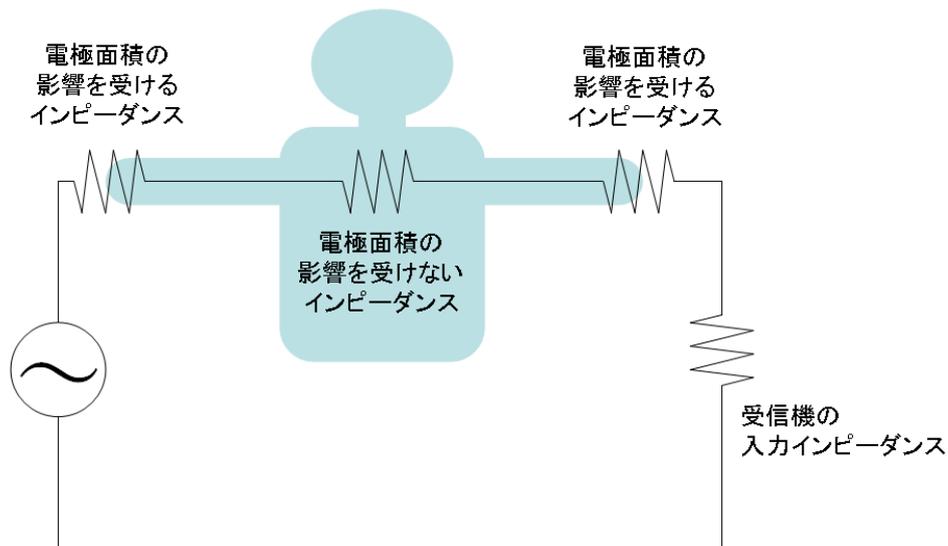


図 3.28 等価回路

3.6.2 実験方法

図 3.29 および図 3.30 に示すような板状の電極（120mm×150mm）を 10mm の間隔をあけて机の上に固定し、開口を設けた厚紙を重ねてその上から手掌を接触させ、開口面積と伝送損失の関係をネットワークアナライザを用いて測定した。

なお、絶縁体として厚紙を用いた理由は、プラスチックと比べ加工がある点に加え、誘電率が小さく、空気に近いためである。



図 3.29 電極を固定した様子



図 3.30 厚紙による開口

3.6.3 実験結果

受信電極の開口面積を変化させた場合の伝送損失の変化を図 3.31 に示す。この結果から、開口面積が大きくなるほど、伝送損失が小さくなっていることが確認できる。また、開口面積に比例して損失が小さくなっていることがわかる。また、式(3.2)を用いて計算した値を計算値として図中に示した。ここで、電極面積の影響を受けないインピーダンスを $300\ \Omega$ 、皮膚の厚さを 4mm 、送信電極の開口面積を 900mm^2 とした。皮膚の導電率は図 3.32 を利用した。

図 3.31 より、計算値と実測値は $1\sim 2\text{dB}$ 程度の誤差範囲で非常によく一致していることがわかる。このことから、式(3.2)を用いておおよその伝送損失を算出することが出来ることが確認できた。また、伝送損失は電極面積と電極が接する部分の皮膚の厚さと導電率によって決まることも確認された。

スマートフォンなど物理的なスペースの制約から、電極面積を最小限にとどめる必要がある機器の設計にあたっては、許容される伝送損失が決まれば、式(3.2)より必要とされる電極面積を求めることが可能となった。また、伝送損失を $25\sim 30\text{dB}$ 程度まで許容できる場合、電極の面積は 100mm^2 程度(1cm 四方程度)で良いことも確認された。

なお、手掌と足底以外の部位については皮膚の厚さが具体的に記されている資料を見つけることができなかったため、評価を行っていないが、皮膚の厚さがわかれば、その部位でも同様の実験を行い、更なる正当性の確認を行いたい。

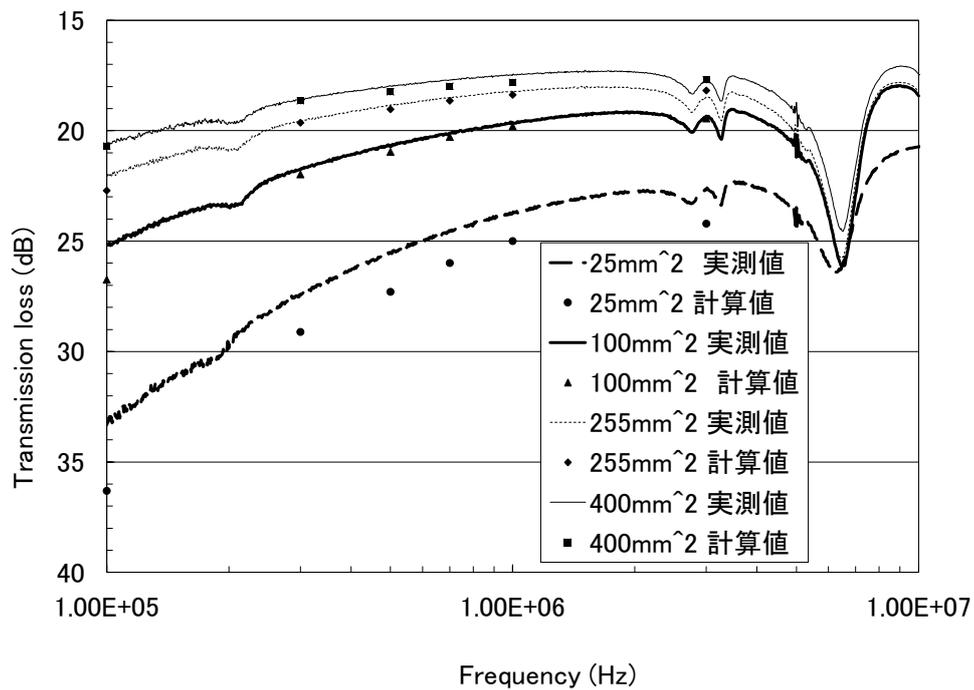


図 3.31 開口面積を変化させた場合の伝送損失測定結果

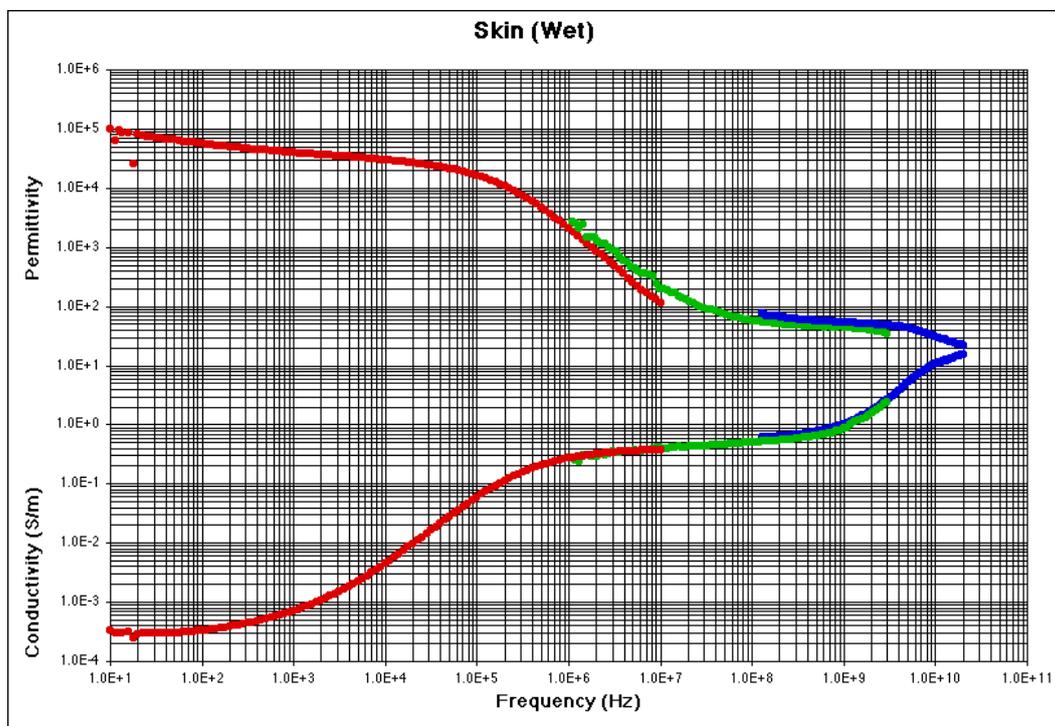


図 3.32 皮膚の誘電率と導電率[18](*)

*1:<http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/AppendixA.html> より引用

3.7 模擬人体（ファントム）の製作と評価

3.7.1 模擬人体（ファントム）

2.3.1 節で述べたように、人体の電気的特性は常に変化し、再現性に乏しい。そのため、人体通信の実験にはファントムと呼ばれる疑似人体がよく用いられている。しかし、ファントムは人体と等価であるとみなすことができる周波数が限定的であり、本研究で提案するような広帯域の信号を送信する実験には利用できない可能性がある。そこで、本研究では、千葉大学伊藤研究室で開発されたファントム[38]を試作し、その特性を評価した。

3.7.2 ファントムの選定

文献調査の結果、千葉大学において人体通信の研究のために開発されたファントム[38]が、本研究で必要とされるファントムに利用用途に近いことが判明した。そのため、本研究には千葉大学方式（ポリエチレン粉末と塩化ナトリウムによって電気的特性を制御する方式）の寒天ファントムを採用することとした。千葉大学方式のファントムは、製作時、固まるまでの間は型に入れて形状を保持する必要があるが、それ以降は型に入れなくても形状を自己保持することが出来るものである。ファントムの形状は、平均的な日本人の大きさを考え、50mm×50mm×450mmとし、型は取り出し時にファントムが欠ける可能性を考慮して、内寸が70mm×70mm×470mmとなるようにアクリル板で自作した。自作した型の外観を図3.36に示す。

3.7.3 ファントムの製作

表3.3に、ファントムの材料とその必要量を示す。

表 3.3 ファントムの材料

薬品名	必要量(g)
イオン交換水	3375.0
寒天	104.6
塩化ナトリウム	39.2
デヒドロ酸ナトリウム	2.0
TX-151(増粘剤)	84.4
ポリエチレン粉末	337.5

次に、ファントムの製造方法を示す。

1. イオン交換水に塩化ナトリウムとデヒドロ酸ナトリウムを加え加熱する。

2. 塩化ナトリウムとデヒドロ酸ナトリウムが完全に溶けたことを確認後、寒天とTX-151を加え完全に溶かす.
3. ポリエチレン粉末を篩でふるいながら加え、かたまりが残らないように攪拌する.
4. 型に流し入れて冷却する.
5. 包丁などを用いて整形する.



図 3.33 製作した型 (アクリル製)



図 3.34 完成したファントム (整形前)

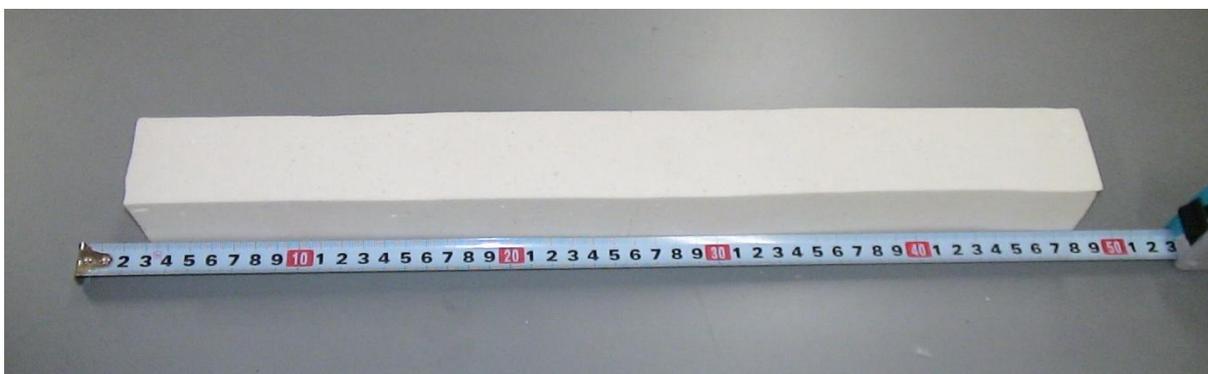


図 3.35 完成したファントム (整形後)

3.7.4 電気的特性の評価（带状電極）

製作したファントムの伝搬損失を，3.1.3.2 節と同様の方法で測定し，生体との比較を行った．その結果を図 3.36 に示す．

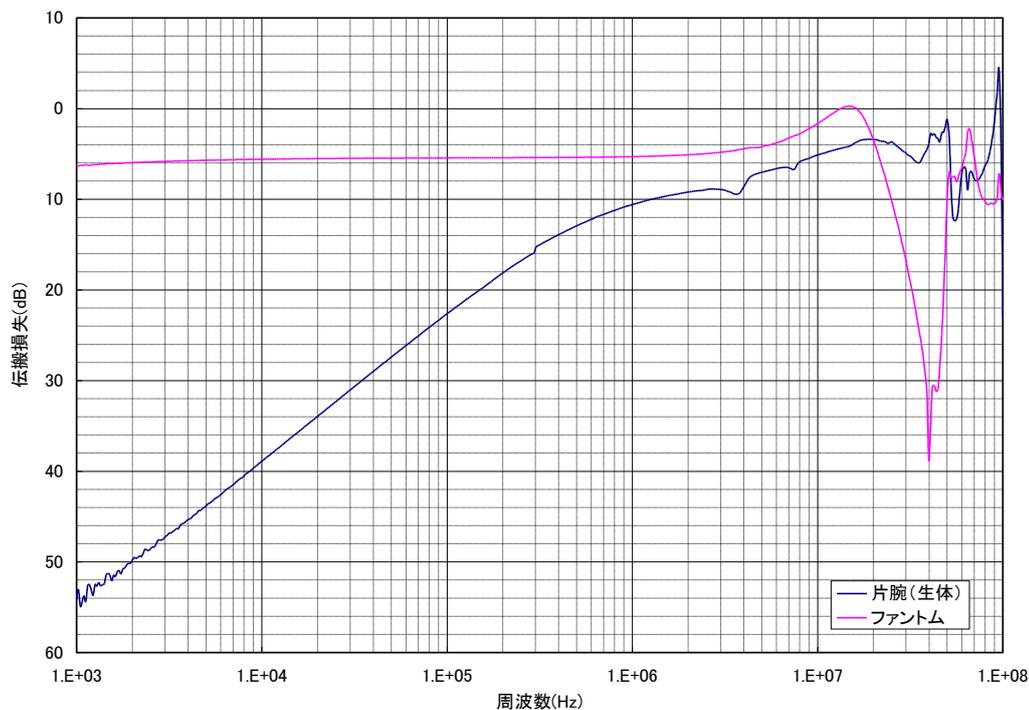


図 3.36 ファントムと人体の伝搬損失の比較

図 3.35 より，今回製作したファントムの特性は 1MHz～13MHz の範囲で人間の特性と似た特性を示していることが確認でき，利用できる周波数が限定的であるが，人体と特性の似たファントムの製作に成功した．しかし，1MHz 以下の部分や 13MHz 以上の部分には大きな違いがあることも確認できる．その原因としては，参考とした研究では 10MHz を中心とした狭帯域の信号を対象としていることが考えられ，

- ・ 塩化ナトリウムの量を減らして伝搬損失を大きくする
- ・ 1MHz 以下の部分の特性が生体に近くなるような物質を模索する

などの改良を施し，人体に近づけることが今後の課題として残った．また，人体は筋肉，皮膚，骨など，複数の異なる電気的特性を有する物質によって構成されており，その構造が伝送特性に影響を与えていることも考えられるが，そのためには各部位の電気的特性を再現したファントムが必要である．

第4章

近距離無線電力・情報同時伝送

4.1 従来技術の問題点

従来技術については、2.4節、と2.5節で紹介しているため、その部分については、ここでは割愛する。

携帯電話に代表されるような携帯型機器は屋外で利用されることも多いため、防水性は重要な付加機能の一つであるが、有線接続方式では充電用コネクタのために開口を設けなければならず、高い防水性を確保することが難しかった。そこで、筐体にコネクタを設ける必要がなく、かつ、それらを手軽に充電する手法として、ワイヤレス充電の研究が盛んに行われている。従来は機器ごとに専用の充電器が必要であったが、標準化が進められ[40]、それに準拠した充電器や対応機器が販売されるようになり、利用者の利便性が向上した。

しかし、通信機器は、ソフトウェアの更新の有無や内部に保存されているデータの同期などでユーザーが意図しないところで通信を行うことがある。それは、ユーザーが就寝中に機器を充電している時も例外ではなく、むしろ電源の制約が大幅に緩和されるため充電中に更新の確認や大容量データの同期を行うことが多い。家庭や職場に通信回線があり、机の上にネットワークハブがあったとしても、それらの通信は無線経由の公衆回線網や無線LANなどで行われるため電波資源の無駄が多い。そこで、本研究では家庭や職場内で機器を充電する際、無線で電力を送信し、かつ、従来のように広範囲にエネルギーを放出せず無線で情報通信を行える方法の検討を行った。

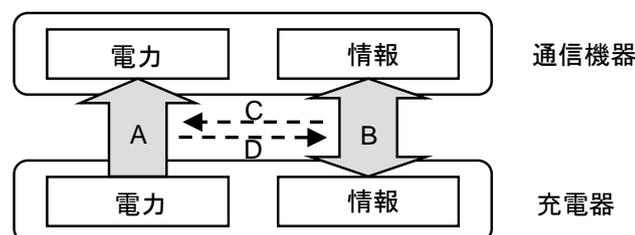
4.2 提案手法

従来技術の問題点を解決するため、本研究では、電力と情報をそれぞれ、コイルを用いた磁界結合と平板電極を用いた電界結合によって伝送する方式を提案する。この方法は、無線 LAN (IEEE802.11) や ZigBee[21], Bluetooth[22]などの無線方式と比較し、

- RF に変調する回路が不要である
- RF 回路の省略によって省電力化が期待できる
- 変調方式に依存しない
- 通信範囲が狭く、秘匿性が高い

などの点で優位であると考えられる。さらに、電力伝送用のコイルに情報を重畳しないため、単一周波数で電力を伝送でき、共振回路を付加することができることから伝送効率の高効率化が期待できる。さらに、コイルの駆動周波数を情報伝送と関係なく設定できるため、コイル径や駆動回路の構成に合わせる事が可能であり、駆動回路の簡略化や低コスト化が期待できる方形波でコイルを駆動することも可能である。本研究で提案する方式の概略図と基本構成を図 4.1 及び図 4.2 に示す。なお、図 4.2 に示す電極の形状については 4.3.2 節で具体的に述べる。

本研究では、提案する装置を携帯電話とその充電器に組み込んで使用することを想定し、図 4.3 および、表 4.1 に示す従来型の磁界結合型非接触電力伝送を基準として検討を行った。コイル間に挿入する材質は、携帯電話の筐体などによく利用されている ABS 樹脂板を用い 1mm 厚のものを 4 枚重ねた構造とすることで、板の間に情報電極を挿入することができるようになっている。また、フェライトは、コイルの中心を貫く磁束を周囲に逃がすために配置されており、これは、携帯型の機器に組み込む際、バッテリーや回路基板などの金属を近くに配置しても電磁誘導を生じさせないようにするためのものである。



- A: 磁界結合を用いた電力伝送
 B: 電界結合を用いた情報通信
 C: 電力伝送への影響(効率の低下)
 D: 情報通信への干渉

図 4.1 提案方式の概要図

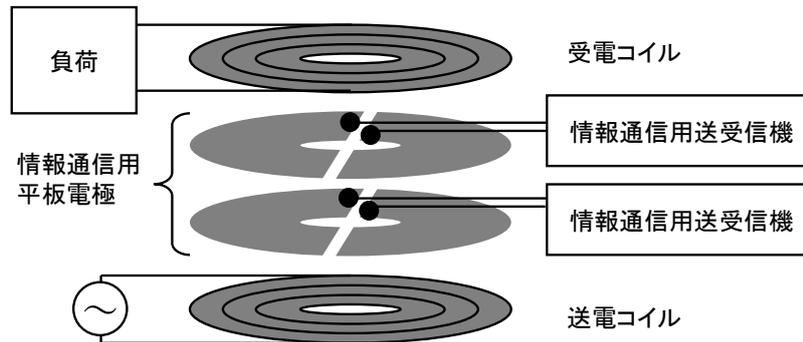


図 4.2 提案方式の基本構成

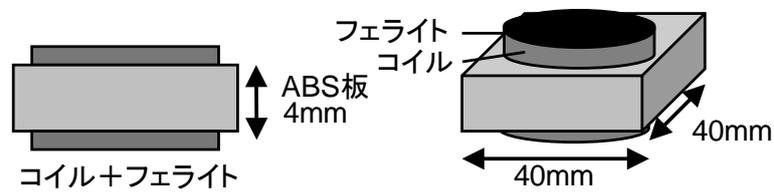


図 4.3 基準とした磁界結合型電力伝送の条件

表 4.1 磁界結合型電力伝送の条件

	送電側	受電側
コイル外径[mm]	43	45
コイル内径[mm]	15	10
巻数	20	15
フェライトのサイズ[mm]	42x42x3	φ 50x1

4.3 磁界結合型電力伝送

4.3.1 共振回路による伝送効率の改善

従来の電力に情報を重畳する方法では、広帯域の信号を送送するため、コイルの Q 値を小さくするなどして周波数特性を広い範囲でなるべく均一にする必要があり、電力伝送効率と情報通信レートはトレードオフの関係にあった。しかし、提案方式では、電力と情報を別な手段で送送するため、電力は単一周波数で送送することが可能である。したがって、共振回路を付加して Q 値を高くすることができ、電力伝送効率の改善が期待できる。図 4.3 および、表 4.1 に示す条件で電力伝送効率を測定した結果とコイルにコンデンサを並列に付加して共振回路を構成した場合の伝送損失の比較を図 4.4 に示す。

図 4.4 より、コイルに共振回路を付加することで、伝送損失が約 3dB 改善され、1dB 程度となっていることが確認できる。このことから、情報と電力の送送を分離し、磁界結合を電力送送に特化させることの優位性が確認できた。

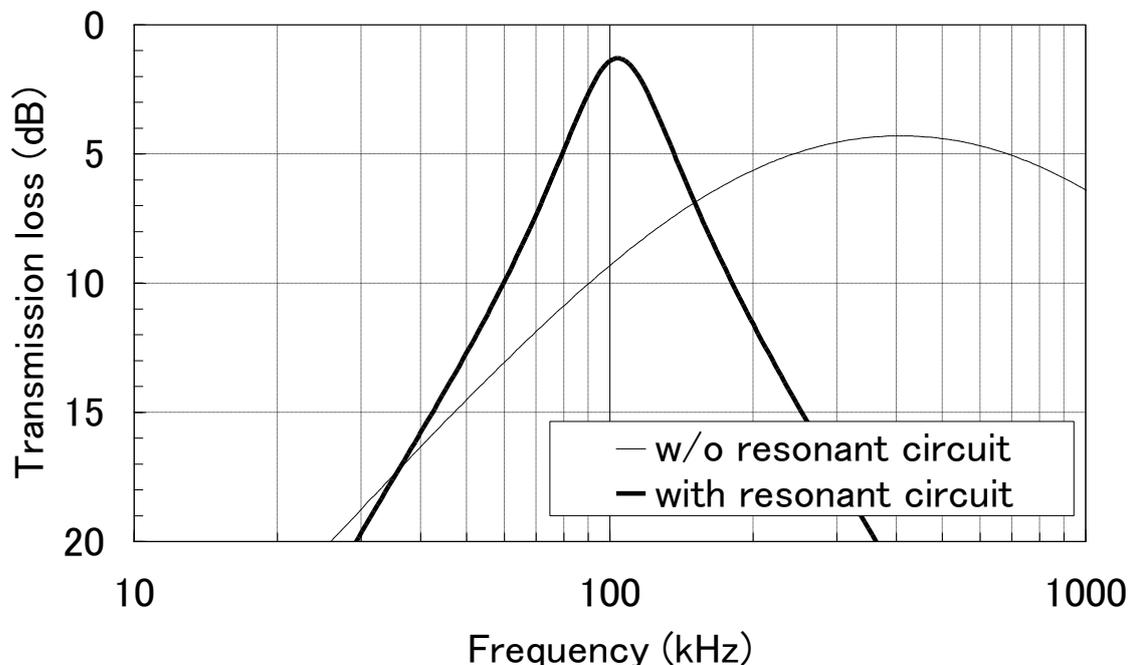


図 4.4 共振回路の有無による電力送送特性の違い

4.3.2 情報電極挿入の影響

電力送送の効率を改善するため、磁界結合を電力送送に特化させたことにより、情報は別の経路で送送する必要が生じる。極近距離における情報送送手段として、電波や赤外線を用いる方法などいくつかの方法が考えられるが、磁界結合による電力送送の送送可能距離が数 mm 程度であることから、比較的容易に広帯域を確保でき、かつ、通信範囲が制御

しやすく、磁界結合との干渉が少ない方式として、平板電極による電界結合によって情報を伝送する方式を採用した。電力伝送用のコイルと、情報伝送用の平板電極は離れた場所に設置することが可能だが、物理的なスペースの制約を受けやすい携帯型情報機器への組み込みを考慮すると、追加される情報電極は電力伝送用のコイルと重ねて配置できれば、電極体積の増加を非常に小さく抑えることができ望ましい。しかし、交流磁界中に導体を挿入すると、渦電流や誘導電流によって導体が発熱する。これは誘導加熱と呼ばれる現象であり、この現象を積極的に利用しているもののひとつに IH 調理器がある。電力伝送を行うコイルの間に金属性の電極を挿入した場合、同様の現象が生じ、電力伝送効率は著しく低下する。そこで、誘導電流が流れないように、金属板の形状を図 4.5 に示すような形状にすることを考案した。図 4.5 に示す電極には次に示す工夫が施してある。

- a) 渦電流の発生を防ぐため、コイルの内径以上の穴を設けリング状にした
- b) リング状の金属板に中心軸を一周する誘導電流が流れないように、リングを切断した
- c) 送信側と受信側のそれぞれで閉回路を構成できるように、同一面に 2 つの電極を配置した

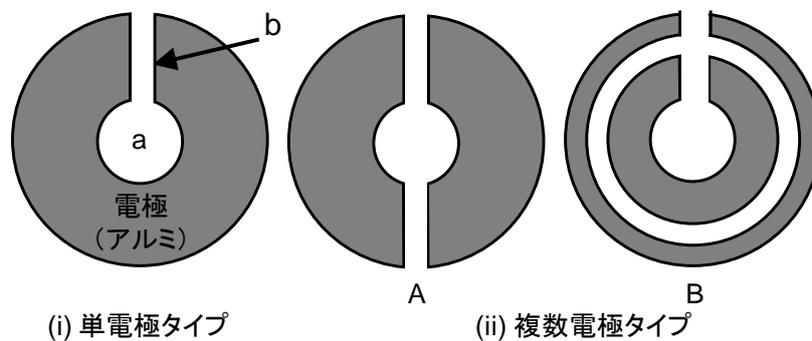


図 4.5 電極の形状

この工夫の効果を確認するため、図 4.6 に示す条件において、電力伝送効率の測定を行った。その結果を図 4.7 に示す。なお、実験では、2 ポートのネットワークアナライザを利用して伝送特性を測定したため、測定器内部で GND が共通となってしまうことから、図 4.5(i) に示す形状の電極を用いた。しかし、実際にこの電極を利用する場面では、GND が非共通の場合が多いことが想定され、図 4.5(ii) に示すように最低 2 つの電極を備える必要がある。上述の条件 a と b を満たしていれば図 4.5(ii) に示す 2 種類の電極のように、極数や形状は電力伝送特性に対して大きな影響を与えない。ただし、電極面積を小さくすると、情報電極間の電界結合が弱くなり、情報伝送に影響が生じる点については配慮が必要である。

図 4.5(ii-A)に示す電極は、電極面積が大きいが、コイルの中心を回転軸とした回転方向のズレや、水平方向の位置ズレに対する耐性が弱く、ホルダー型の充電器のように、給電側と受電側の位置ズレが起こらない場合に適している。図 4.5(ii-B)に示す電極は、回転方向のズレに対する耐性を持たせるように改良した形状の例である。

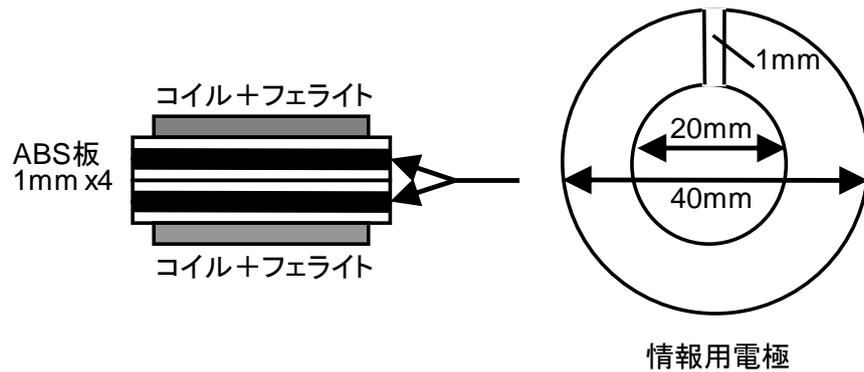


図 4.6 電極の大きさ

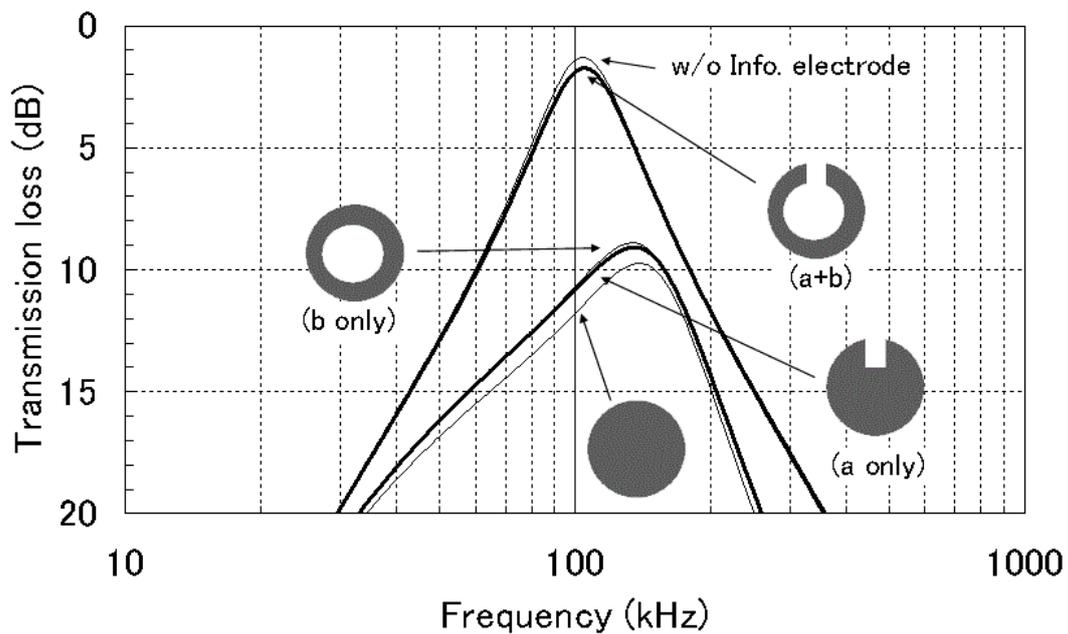


図 4.7 情報電極の形状が電力伝送損失に与える影響

図 4.7 より, a または b のような電力伝送時の磁束変化に対する渦電流を遮断できない構造では, 最大 10dB 程度の損失をもたらすが, a と b の加工を行い, 渦電流を遮断すれば, その損失を 1dB 以下に抑えることができることが分かる. また, 電極を挿入した状態の損失は, 共振回路を設けない場合の電力伝送と比べ, 約 3dB ほど改善している. 電力に情報を重畳する場合, スペクトルの広がりや変調方式そのものによって, 伝送効率はさらに低下することが予想されるが, 仮にそれが生じないとしても, 提案手法のほうがコイルのみで情報と電力を伝送する場合より効率よく電力を伝送できることが確認できた. これによって提案方式の優位性が確認できた.

4.4 電界結合型情報伝送

4.4.1 情報伝送特性

提案方法における情報伝送は、情報送受信電極に設けられた平板電極を用いて平行平板コンデンサを構築するものであり、その等価回路は、図 4.8 に示すように送信回路と受信回路の間にカップリングコンデンサ Z_{C1} 、 Z_{C2} を挿入したことに等しくなる。

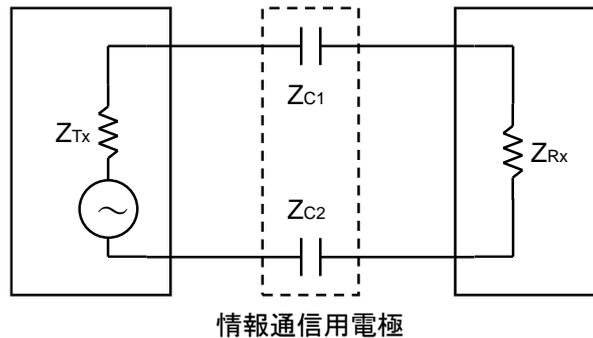


図 4.8 情報伝送系の等価回路

実際の使用環境では、送受信機の GND は非共通であることが多いと考えられるが、そのような環境下でも 2 組の平板コンデンサを構成するよう電極の構造を工夫すれば、送受信機間に閉回路を構成できる。2 組のコンデンサを形成するための電極構造の例を図 4.5(ii) に示す。ここで、電極によって形成される 2 組のコンデンサのインピーダンスをそれぞれ Z_{C1} 、 Z_{C2} 、受信機の入力インピーダンスを Z_{Rx} とすると、電圧低下率 Loss は

$$Loss = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{Rx}}{Z_{C1} + Z_{C2} + Z_{Rx}} \right| \quad (4.1)$$

として表現できると考えられる。この等価回路の妥当性を評価するため、図 4.9 に示す測定条件で情報電極間の伝送特性を測定した。

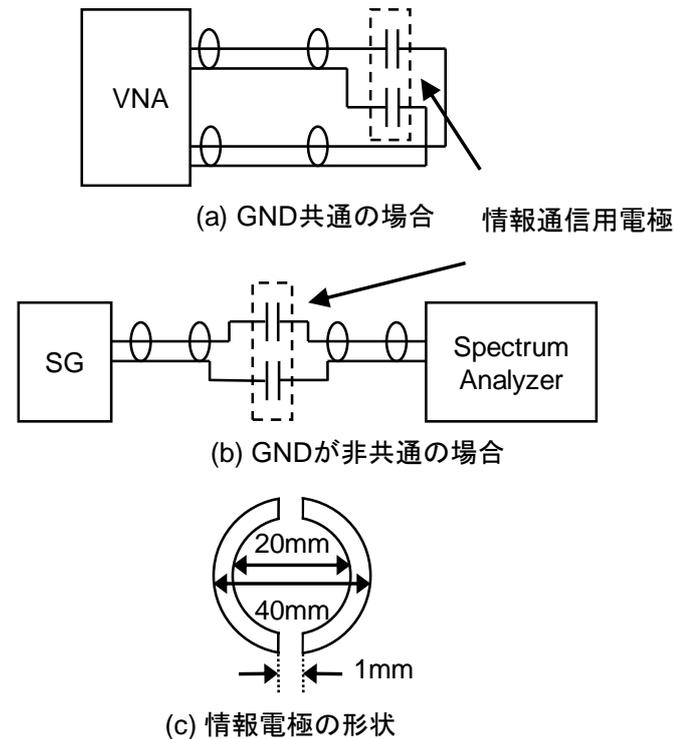


図 4.9 測定条件

図 4.9 に示す測定条件のうち、測定条件(a)では、ネットワークアナライザを介して GND が共通となっていることから $Z_{c2}=0$ である。測定条件(b)では、建物内の配線との結合を防ぐため、SG とスペクトラムアナライザはそれぞれ発電機と測定器に内蔵された「バッテリー」によって駆動し、GND が非共通の場合の特性を測定した。なお、 $Z_{Tx} = Z_{Rx} = 50\Omega$ であり、情報電極によって構成されるカップリングコンデンサの容量は 9pF (実測値)である。なお、電極部は図 4.6 に示す構造のうち、情報電極部分のみを図 4.9(c)に示すものと差し替えた。

GND が共通の場合と非共通の場合の情報電極間の伝送特性を図 4.10 に示す。図 4.10 に示す結果から、GND が共通の場合、計算値と実測値が周波数 $300\text{kHz}\sim 20\text{MHz}$ の範囲で良く一致していることが確認でき、等価回路の妥当性が確認できた。GND 非共通の場合、GND 電極によって閉回路が構成され、GND 共通のときより損失が増加するものの、情報の伝送は同様に可能であることが確認できた。GND が非共通の場合、計算値と実測値の間に系統的な乖離が見られるが、測定器の筐体間など、意図しない部分で 5pF 程度の結合が生じてしまった影響であると思われる。この点については、電源を分離するなどの対策を行ったが、今後、実験方法についてさらに検討が必要であると考えており、今後の課題としたい。

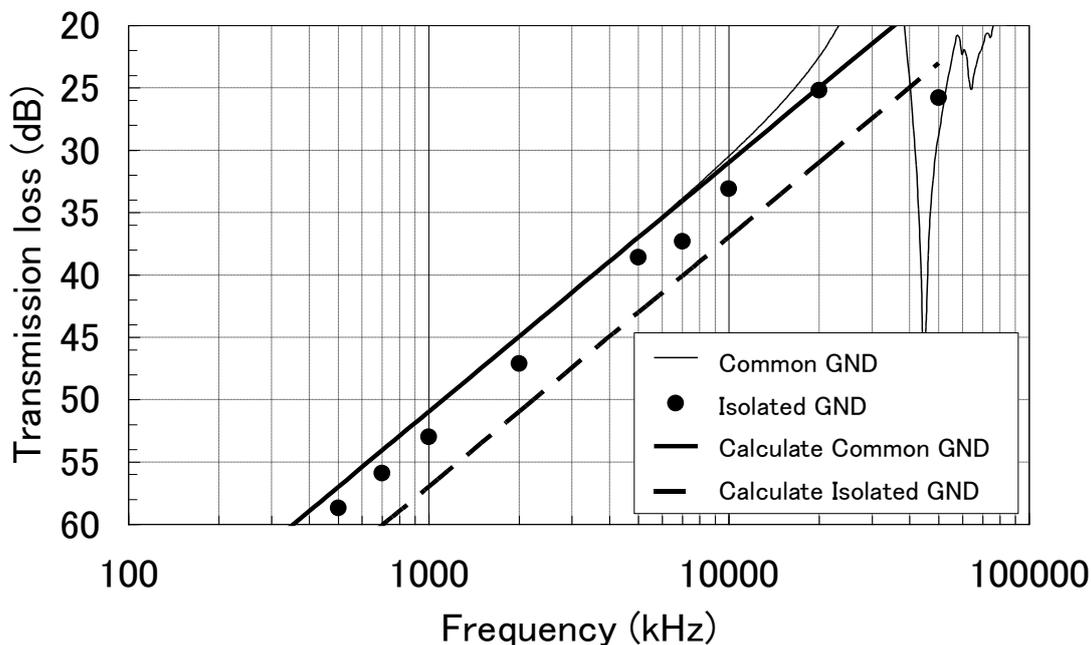


図 4.10 情報電極間の伝送損失

4.4.2 受信機の入力インピーダンスの影響

式(4.1)に注目すると、電圧低下を小さくするためには情報電極によって形成されるカップリングコンデンサの静電容量を大きくするか受信機の入力インピーダンスを大きくする必要がある。しかし、静電容量を大きくするには、電極面積を大きくするか、伝送距離を短くするまたは誘電率を高くするかのいずれかが必要であり、携帯型の機器に組み込むことを考えると、電極面積の増大することは難しい。また、伝送距離や誘電率は筐体の機械的な設計に依存するため、これらのパラメータも変更は難しい。したがって、伝送損失を改善するために有効な手段は、受信機の入力インピーダンスを大きくすることであると考えられる。そこで、スペクトラムアナライザの入力インピーダンスを 50Ω とした場合と、 $100k\Omega$ とした場合について、図 4.11 に示す測定条件で伝送損失を測定した。なお、 $100k\Omega$ を選定した理由は、スペクトラムアナライザの入力インピーダンスが 50Ω と $100k\Omega$ で選択できるようになっていたためである。

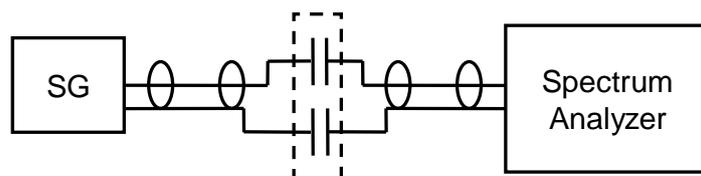


図 11 測定条件

スペクトラムアナライザの入力インピーダンスを変化させた場合の周波数特性の変化を図 4.12 に示す。なお、電極は図 4.9(C)に示す形状のものを用いた。図 4.12 より、受信機の入力インピーダンスを高くすると、伝送損失を低く抑えられることが確認できた。

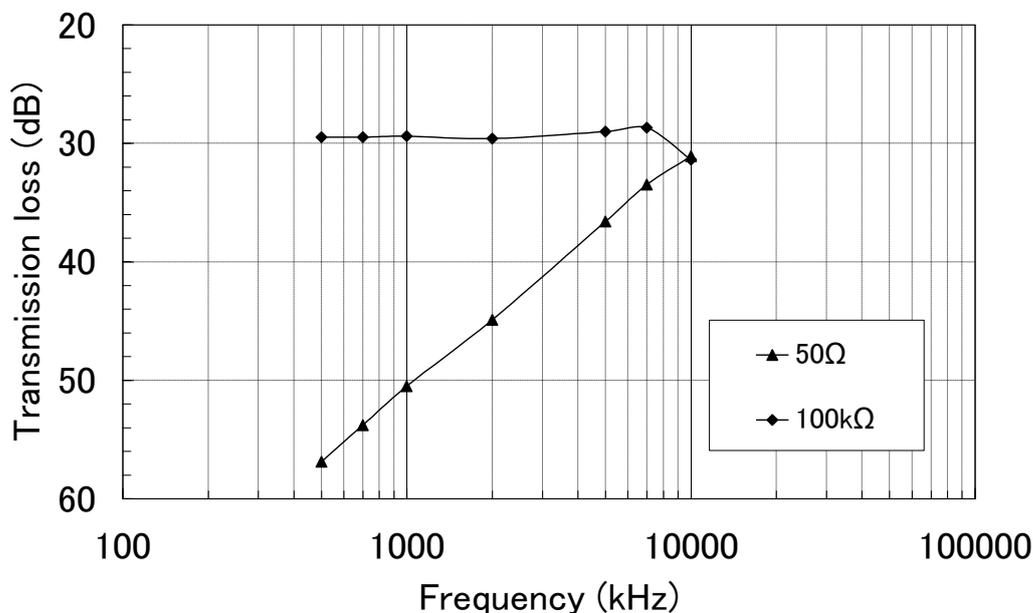


図 4.12 入力インピーダンスに対する周波数特性の変化

図 4.12 より、受信機の入力インピーダンスが高いほうが周波数特性に優れていることが確認できたが、入力インピーダンスが高い場合、熱雑音や電灯線などからの外来雑音の影響を受けやすくなることが予想される。この点については、その評価法を含め今後の課題としたい。

4.4.3 電力伝送と情報伝送の干渉

一般に、電力伝送で扱う電力は、情報伝送で扱う電力に比べ 20dB 以上大きいため、従来の無線を用いた情報伝送では、電力伝送が情報伝送に対して干渉源となる可能性がある。また、コイルを駆動する方法としては、パワーMOS FET などのスイッチング素子を用いて方形波で駆動するほうが、回路構成や効率の面で有利であるが、高調波が発生し、干渉を受けるリスクが高くなってしまふ。その対策として、コイルを駆動する周波数と情報伝送の周波数を大きく離すか急峻なフィルタを挿入する必要があるが、情報伝送装置を複雑化させる要因の一つとなっていた。提案手法では、電力伝送用コイルによって生じる電界の向きが情報伝送に用いる電界と直交しているため、電力伝送が情報伝送に与える干渉は非常に少ないものと考えられる。また、電力伝送コイルに共振回路を付加することができる

め、放射される高調波成分を抑制する事が可能である。これらを確認するため、図 4.6 に示す測定条件において、電力送信コイルと情報受信電極間の伝送特性をネットワークアナライザを用いて測定した結果を図 4.13 に示す。なお、ネットワークアナライザの入出力インピーダンスは 50Ω である。

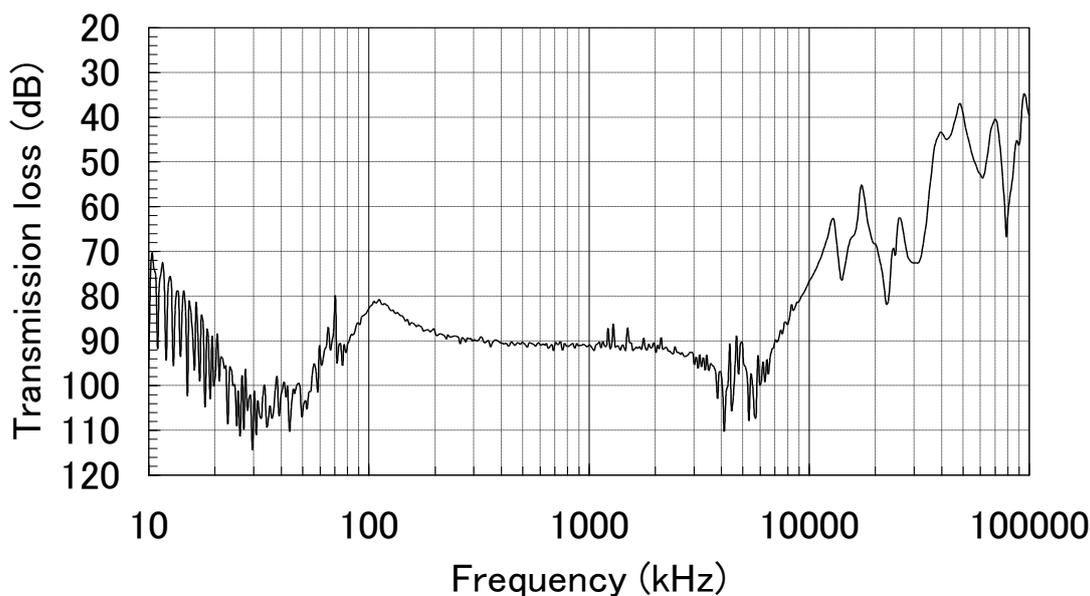


図 4.13 電力送信コイルが情報受信電極に与える干渉

図 4.13 より、送電コイル-情報受信電極間には $80\sim 90\text{dB}$ 程度の分離度があることが確認できた。従って、提案する方式は、従来のコイルのみを用いる方法に比べ、フィルタ回路を数段分省略できるなどのメリットがあることが確認できた。

4.4.4 干渉の軽減

雑音軽減の方法として、従来から良く用いられる方法の一つに静電シールドがある。静電シールドは、ノイズの影響を受けやすい回路の周囲を基準電位に接続された金属板で囲い外来のノイズを遮断するものである。本研究で提案する電極は、ノイズ減となりえるコイルと平板電極の距離が近いことから、図 4.6 に示す実験系において、送受電コイルと ABS 板の間に情報通信用の電極を追加し、それを GND 電位に接続してシールド電極とした場合と解放とした場合でシールド電極を追加した場合の効果を調査した。その結果を図 4.14 に示す。また、シールド電極の有無が情報通信に与える影響について調査した結果を図 4.15 に示す。

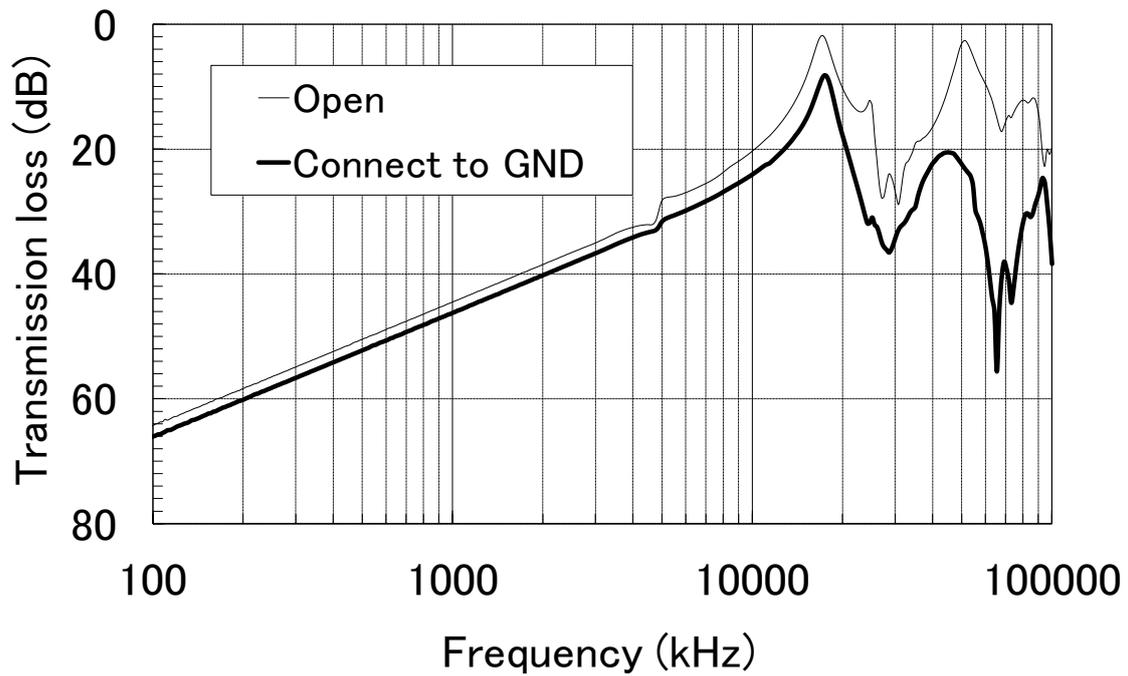


図 4.14 シールド電極による干渉軽減効果

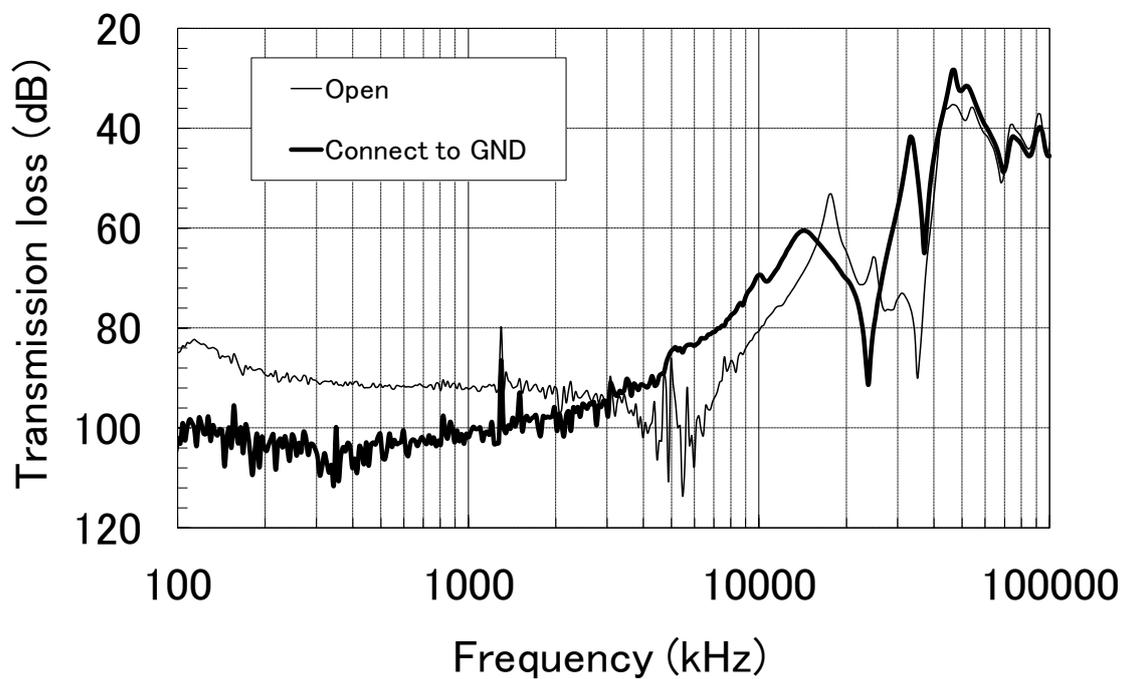


図 4.15 シールド電極が情報伝送に与える影響

図 4.14 より、3MHz 以下の周波数領域においては、シールド電極を挿入することによって、電力伝送用のコイルから発生する電界が情報通信に与える影響を軽減できることが確

認できる。また、図 4.15 より、シールド電極を追加した場合、情報伝送において 2dB 程度伝送損失が増加することも確認できた。これは、受信側の情報通信電極とシールド電極間に寄生容量が生じたためと考えられる。しかし、干渉の軽減効果に比べると軽微であることから、シールド電極の追加は、コイルと電極間の干渉軽減に有効な手段であることが分かった。

4.5 電力情報同時伝送実験

これまでの実験結果を元に、OFDM 信号と電力を同時に伝送する実験を行った。変調方式として OFDM を採用した理由は、3.5 節と同様、携帯電話に搭載しやすいことと、人体通信と回路を共有できるためである。実験装置の構成と条件をそれぞれ図 4.16～4.17 および表 4.2～4.3 に示す。

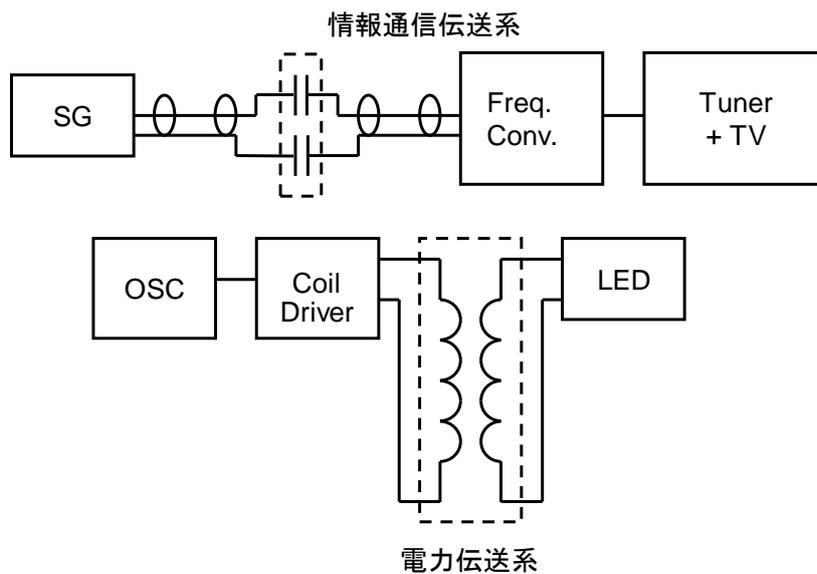


図 4.16 実験系の構成

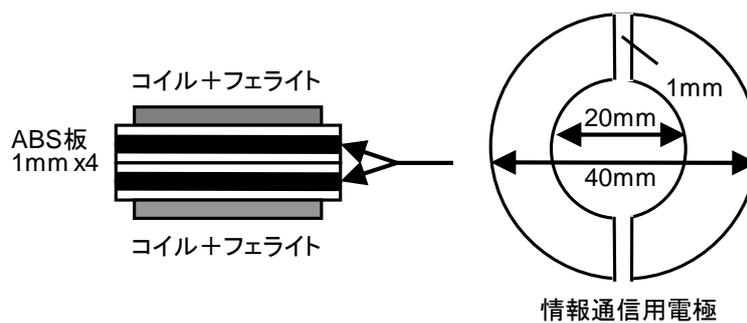


図 4.17 電極の寸法

表 4.2 情報伝送で伝送する信号 (ISDB-T 規格)

帯域幅	5.6MHz
サブキャリア数	5617
シンボル長	1.008ms
ガードインターバル	3/4
変調方式	OFDM with 64QAM
情報レート	16.8Mbps

表 4.3 伝送条件

電力伝送	周波数	100kHz 正弦波
	電力 (受信端)	1W
情報伝送	周波数	300k-6MHz
	変調方式	OFDM with 64QAM
	出力レベル (送信端)	3Vp-p

本実験系は、図 4.16 に示すとおり、シグナルジェネレータ内にあらかじめ保存されている ISDB-T 規格の OFDM 信号を図 4.18 に示す情報電極を介して伝送し、市販の地上波デジタル放送用チューナーで復調できるように周波数変換する情報伝送系と、電力伝送用コイル駆動回路を付加した方形波発振器の出力を伝送し、受電側に接続された LED を駆動する電力伝送系の 2 つの系から構成されている。なお、電力伝送系のコイルには約 100kHz 付近で共振するよう共振回路を付加した。また、本実験系は、スマートフォンを充電しながらデータの同期などの高速情報通信を行うことを想定したものであるが、コイル駆動回路の制約から伝送電力は 1W となっている。

伝送実験の結果、図 4.19 に示すように高精細動画像の伝送(画像表示は割愛：画面上の伝送特性表示のみを示す)と LED への給電を同時に行うことに成功した。このときの情報伝送側の SN 比は 20dB 程度であった。

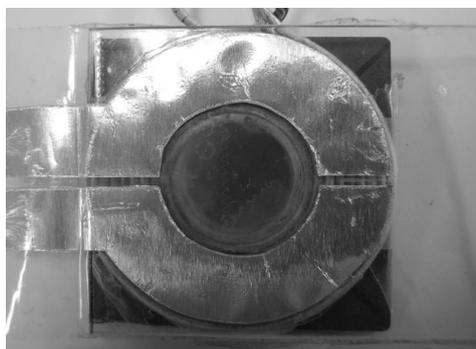


図 4.18 電極の外観 (送電用コイルと情報電極)

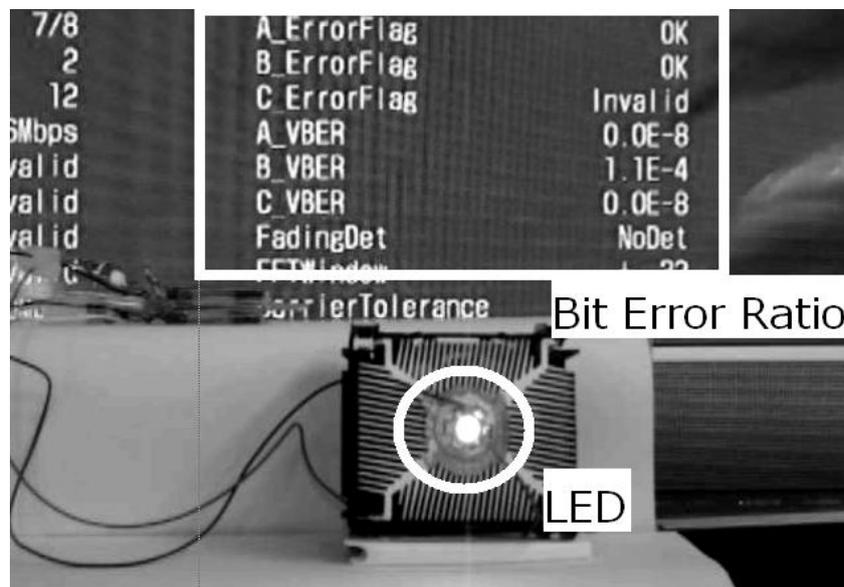


図 4.19 実験風景

以上のことから、情報伝送用の電極の形状を工夫することで、磁界結合用のコイルの間に情報伝送用の平板電極を配置することが可能であることが確認できた。また、人体通信と同じ変調方式を利用できることから、物理的な制約の多いスマートフォンなどの機器に組み込む際にも有利であると言える。ただし、実験装置の制約から伝送電力が $1W$ と少ないため、コイル駆動回路を改良し、伝送電力を大きくした場合について検討することが今後の課題である。

4.6 位置ズレに対する検討

磁界結合による電力伝送では、送電コイルと受電コイルの中心がズレると電力伝送効率が著しく低下することが知られており[41]、磁石などを用いて中心位置にズレが生じないように工夫が施されている製品もある[40]。そのような工夫が施された状態においても、回転方向の位置ズレは生じてしまう。4.3.2 節において、回転方向のズレに対する耐性を備えた電極の形状として図 4.5(B)を示したが、その効果について実験による検討を行った。実験は、図 4.6 及び図 4.17 に示す電極を用い、コイルの中心が一致した状態で情報電極を回転させた。その時の伝送損失の変化を図 4.20 に示す。なお、伝送損失は回転方向のズレがない状態(0deg)を 0dB としてある。図 4.20 より、図 4.5(A)に示す形状の電極では、回転方向のズレに対して約 30dB の範囲で伝送損失が増加するが、図 4.5(B) に示す形状の電極では 1dB 程度の変化に抑えられていることが確認できる。また、磁界結合による電力伝送はその原理上、回転方向に対するズレの影響を受けないことから、従来から用いられている中心位

置のズレ防止対策に加え、電極形状を図 4.5(b)に示すようにすることで、位置ズレに対する対策を行うことができると考えられる。

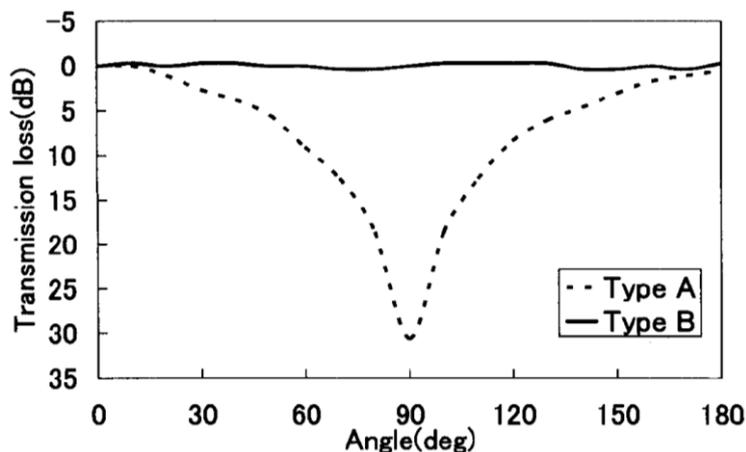


図 4.20 回転方向のズレに対する伝送損失の変化（情報伝送）

本研究では、磁界結合による電力伝送用に円形コイルを用いたが、コイルの形状は必ずしも円形である必要はなく、給電コイルによって生じる磁束が効率的に受電コイルの中を貫く形状であればよい。円形コイルの場合、回転方向のズレが生じて受電コイルを貫く磁束に変化はないが、矩形コイルなどの場合は、その量が変化するため電力伝送効率も変化する。50mm×80mmの20回巻き矩形コイルをコイルの中心を中心として回転させた場合の伝送損失の変化を図 4.21 に示す。図 4.21 は図 4.20 と同様に回転方向のズレがない状態(0deg)の損失を 0dB としている。図 4.21 より、コイルの回転角度が 90 度となった場合、8.5dB 程度の損失が増加することが分かる。したがって、円形以外の形状のコイルを用いる場合、回転方向のズレが生じないような工夫が必要であり、回転方向のズレが生じる場合には円形コイルが適していることが分かった。

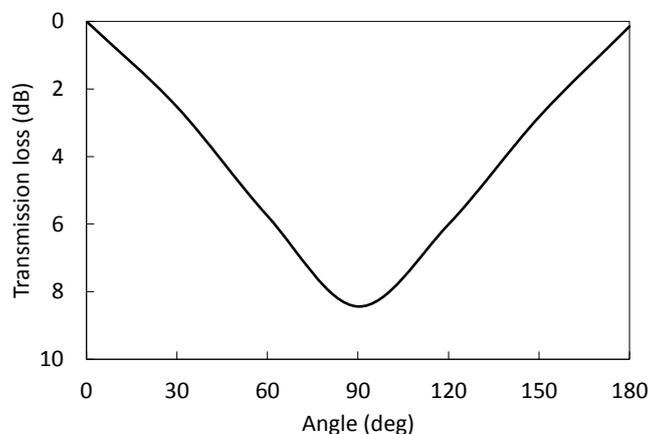


図 4.21 回転方向のズレに対する伝送損失の変化（電力伝送）

第5章

結論

本研究では、電波資源を有効に利用しつつ利便性を損なうことなく PAN を構築するための手段として情報の伝送路に人体を用いる人体通信と電力と情報を同時に効率よく伝送するための手段について検討を行った。

人体通信についてはまずはじめに、人体のもつ電気的特性を調査した。その結果、数十 MHz より高い周波数では、エネルギーは空間を伝搬してしまうことや、周波数が低いほど伝搬損失が大きいこと、エネルギーは電流として人体を伝搬していることなどが分かった。また、伝送特性は、電極を接触させる部位の皮膚の状態や電極面積の影響が大きいこともわかった。そのため、周波数特性が劣悪でもその影響を受けにくい OFDM 変調方式を用いて情報を伝送する実験を行ったところ、2 チャンネル分の地上波デジタル放送ハイビジョン放送の Low IF 信号を伝送することができた。本研究では帯域幅 12MHz で 32Mbps と高速なビットレートでの伝送実験に成功した。これは地上デジタル放送と同様の方式を用いれば、アナログテレビ放送と同等品質の映像と音声を 6 つ同時に伝送することが可能であることを意味しており、したがって、ウェアラブルコンピュータと HMD (装着型ディスプレイ) 間の接続などにも十分に使用でき、映像をステレオ化した場合にも、ハイビジョン放送と同様の高品質映像で実現できることが証明された。今後の課題としては

- 2つの PAN が接続された場合の混信対策
- より広い周波数帯域で使用できるファントムの開発
- 帰路の工夫と帰路を含めた総合伝送特性の評価
- 人体通信に適した伝送方式の見極めと定量的比較評価
- キラーアプリケーションの開拓

などが残っている。

次に、電力情報同時伝送については、電界結合と磁界結合を利用して電力と情報を同時に伝送する方法を考案した。従来は、磁界結合用のコイルと情報伝送用の平板電極を重ねて配置することは難しかったが、平板電極の形状を工夫することで、電力伝送に大きな影響を与えず情報伝送を行うことができることが分かった。また、電力伝送と情報伝送を分離したことにより、電力伝送用のコイルに共振回路を付加して伝送条件を最適化することができ、従来方式に比べ伝送効率を向上させることにも成功した。最後に、1W の電力伝送

と OFDM によって変調された約 17Mbps の情報を同時に伝送する実験を実施し、電力と情報の同時伝送に成功した。これにより、提案手法の有効性が確認された。今後の課題として、より大きな電力を伝送できるよう実験装置を改良するとともに、位置的に自由度の高い電極形状・配置の検討が挙げられる。

これらの結果から、ユーザーが機器を携帯して利用している時と自宅や職場で充電している時の両面で無線を使わない新たな近距離通信手段を提案することができた。さらに、提案する 2 つの方式は、OFDM 変調器を無線 LAN などと共用することも可能であり、物理的制約の多い携帯型通信機器に適した方式であると考えている。

謝辞

本研究において、日頃から多大なるご指導、助言を与えてくださった電気通信大学唐沢好男教授ならびに谷口哲樹博士、FDTD法によるシミュレーションを行っていただき、さまざまな助言をいただいたKDDI研究所の前山利幸博士（現、拓殖大学）に深く感謝の意を表します。

また、本研究を進めるにあたり、ご協力をいただきました唐沢研究室の皆様にも深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 総務省電波利用ホームページ,
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>,
2014年5月23日最終閲覧.
- [2] T. G. Zimmerman, "Personal area networks (PAN):near-field intra-body communication," Master of science in media arts and sciences, MIT Media Lab., 1995.
- [3] 土井謙之, 西村篤久, “人体を伝送路とする高信頼性通信方式,” 松下電工技報, vol.53, no.3, pp.72-77, 2005.
- [4] 松下電工株式会社プレスリリース, <http://www.mew.co.jp/press/0409/0409-3.htm>,
2006年3月10日最終閲覧.
- [5] Wearable key project web site,
http://www.csl.sony.co.jp/IL/projects/wearable_key/contents.html, 2006年2月24日最終閲覧.
- [6] M. Shinagawa, M. Fukumoto, K. Ochiai, and H. Kyuragi, “A near-field-sensing transceiver for intrabody communication based on the electrooptic effect," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.53, no.6, pp.1533-1538, 2004.
- [7] M. Shinagawa, T. Nagatsuma, K. Ohno, and Y. Jin, "A real-time electro-optic handy probe using a continuous-wave laser," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.50, no.5, pp.1076-1080, 2001.
- [8] K. Partridge, B. Dahlquist, A. Veiseh, A. Cain, A. Foreman, J. Goldberg, and G. Borriello, “Empirical measurements of intrabody communication performance under varied physical configurations,” Proc. ACM UIST, pp. 183-190, 2001.
- [9] 藤井勝之, 伊藤公一, 田島茂, “人体を伝送路として利用したウェアラブル送受信機の信号伝送状況の計算モデルに関する検討,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J87-B, no.9, pp.1383-1390, 2004.
- [10] 藤井勝之, 高橋応明, 伊藤公一, “人体を伝送路として利用したウェアラブル機器のリアルな全身モデルを用いた信号伝送状況の解析,” 2006年電子情報通信学会総合大会, B-1-110, p.110, 2006.
- [11] 峰須賀啓介, 中田杏里, 武田輝人, 柴建次, 佐々木健, 保坂寛, 板生清, “人体を伝送路とした情報通信デバイスの開発,” 日本時計学会誌, vol.46, no.2, pp.53-64, 2002.
- [12] 保坂寛, “人体を伝送路とする通信技術,” 日本機械学会誌, vol.105, no.1008, p.760, 2001.

- [13] 根日屋英之, “人体通信の最新技術,” 電波技術協会報, no.272, pp.24-27, 2010.
- [14] 沢田浩和, 高田潤一, S. T. Choi, K. Y. Yazhandooost, 河野隆二, “Body area network チャンネルモデルの検討,” 電子情報通信学会総合大会, BS-9-3, 2007.
- [15] B. Nivi, R. Post, and N. Gershenfeld, “Passive wearable electrostatic tags:the bodytag,” Diss. MIT Media Lab, 1997.
- [16] E. R. Post, M. Reynolds, M. Gray, J. Paradiso, and N. Gershenfeld, “Intrabody buses for data and power”, Proc. of ISWC'97, pp.52-55, 1997.
- [17] H. Kanai, I. Chatterjee, and O. P. Gandhi, “Human body impedance for electromagnetic hazard analysis in the VLF to MF band,” IEEE Trans. MTT, vol.32, no.8, pp.763-772, 1984.
- [18] <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html>, 2013年2月21日最終閲覧.
- [19] 国民生活センター報道発表資料, <http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20140220.pdf>, 2014年4月10日最終閲覧.
- [20] 鄭立, “ワイヤレスセンサーネットワークの標準化,” 計測と制御, vol.44, no.6, pp.384-389, 2005.
- [21] ZigBee SIG ジャパン web site, http://www.zbsigj.org/about_ZigBee, 2014年3月15日最終閲覧.
- [22] Bluetooth ワーキンググループ, <https://www.bluetooth.org/ja-jp>, 2014年3月19日最終閲覧.
- [23] 山崎武, “人体 impedance の臨床的研究(V) 低周波における人体の電氣的諸特性について,” 日本医学放射線学会雑誌, vol.18, no.7, pp.1008-1017, 1958.
- [24] P. S. Hall, Y. Hao, “Antennas and propagation for body-centric wireless communications,” Artech house, 2006.
- [25] 秋元守, 飯塚正孝, “負荷変調を適用した磁界共鳴型無線電力伝送技術とその適用,” NTT 技術ジャーナル, vol.25, no.7, pp.38-41, 2013.
- [26] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” Science, vol.317, no.5834, pp.83-86, 2007.
- [27] 井坂篤, 柳生博之, “非接触給電技術とその適応事例,” ワイヤレス給電 非接触充電と無線電力伝送のすべて 2010, 日経 PB 社, pp.86-95, 2010.
- [28] 森田智生, 早乙女英夫, 斉藤制海, 佐藤正典, 小林和人, “超音波を利用した生体内システムへの電力供給に関する研究,” 電子情報通信学会技報, US89-57, pp.1-5,1998.
- [29] 居村岳広, 内田利之, 堀洋一, “非接触電力伝送における電磁誘導と電磁界結合の統一的解釈,” 電気学会自動車研究会, VT-09-007, pp.35-40, 2009.

- [30] M. Soljagic, A. Karalis, J. Joannopoulos, A. Kurs, R. Moffatt, and P. Fisher (野澤哲生訳), “電力を 無線伝送する技術を開発 実験で 60W の電球を点灯,” 日経エレクトロニクス, 日経 PB 社, pp.117-128, 2007.
- [31] 村田製作所製品情報,
http://www.murata.co.jp/products/wireless_power/tech_intro/index.html,
2014 年 4 月 28 日最終閲覧.
- [32] 増田満, 楠正弘, 小原大輝, 中山裕次郎, 濱田浩樹, 根上昭一, “電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム,” 電子情報通信学会技報, WPT2013-20 , pp.15-19, 2013.
- [33] 電波防護, http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-38v2_0.pdf,
2009 年 3 月 2 日最終閲覧.
- [34] 原和輝, “人体通信の伝送方式に関する研究,” 電気通信大学大学院電気通信学研究科平成 21 年度修士論文, 2010.
- [35] 竹本淳, “地上デジタル放送移動体受信特性評価用トータルレコーディングシステムに関する研究,” 電気通信大学大学院電気通信学研究科平成 18 年度修士論文, 2007.
- [36] 高橋応明, “人体を伝送路とした無線通信,” 2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-11, p.11, 2006.
- [37] K. Fujii, M. Takahashi, K. Ito, K. Hachisuka, T. Terauchi, Y. Kishi, K. Sasaki, and K. Ito, “Study on the transmission mechanism for wearable device using the human body as a transmission channel,” IEICE Trans., vol.E88-B, no.6, pp.2401-2410, 2005.
- [38] 千葉大学都市環境システム学科伊藤研究室, “高含水組織用生体等価ファントム(製作の手引きおよび特性) Ver.1.0,
<http://www.ap.tu.chiba-u.jp/contents/research/phantom/>,
2005 年 10 月 4 日最終閲覧.
- [39] N. Cho, J. Yoo, S. Song, J. Lee, S. Jeon, and H. Yoo, “The human body characteristics as a signal transmission medium for intrabody communication,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech, vol.55, no.5, pp.1080-1086, 2007.
- [40] 金井考之, 金井康通, 野村直児, “置くだけで充電可能な WPC 方式ワイヤレス充電ケータイ,” NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, vol.18 , no.4 ,pp.58-60, 2011.
- [41] 村田製作所製品情報(ワイヤレス電力伝送モジュール),
http://www.murata.co.jp/products/wireless_power/feature/,
2014 年 4 月 28 日最終閲覧.

関連論文

- [1] 高崎和之, 原和輝, 前山利幸, 唐沢好男, “人体を伝送路として利用する通信における伝送特性の実験的検討,” 数理科学会論文集, vol.13 no.1, pp.21-26, 2012.
[第 3 章に関連]
- [2] 高崎和之, 唐沢好男, “小型高効率な非接触型電力・情報同時伝送方式,” 電子情報通信学会論文誌. B, vol.J94-B, no.10, pp.1389-1396, 2011. [第 4 章に関連]