

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

2019 年度

修士論文

二者間の人体通信の伝送特性解析と評価

2020 年 2 月 4 日提出

指導教員 佐々木 健 教授 印

学籍番号 47186720

夏木 晨洋

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 人体通信.....	3
1.2.1 人体通信の原理.....	3
1.2.2 人体通信の利用形態による分類.....	3
1.2.3 人体通信の規格.....	5
1.3 研究目的.....	6
1.4 本論文の構成.....	7
第2章 二者間の人体通信における電極接触条件と伝送特性の関係.....	9
2.1 はじめに.....	10
2.2 電磁界解析による伝送特性の評価.....	11
2.2.1 本研究で用いる人体モデル.....	11
2.2.2 ウェアラブル型送受信機と電極接触条件.....	13
2.2.3 解析手法とシミュレーション条件.....	15
2.3 電極接触条件による受信電圧と伝送特性.....	16
2.4 電極接触条件と伝送効率.....	17
2.5 電極接触条件と電界強度分布.....	19
2.6 電極接触条件と電界ベクトル分布.....	21
2.7 まとめ.....	25
第3章 伝送特性に影響を及ぼす要因と電極接触条件の関係.....	27
3.1 はじめに.....	28
3.2 送受信機の装着箇所による影響.....	29
3.2.1 電極接触条件と装着箇所による伝送特性.....	29

3.3 回路基板の面積による影響	31
3.3.1 回路基板の面積と電界強度分布	32
3.3.2 回路基板の面積と電界ベクトル分布	33
3.3.3 回路基板の面積と伝送特性	35
3.4 胴体間の距離による影響	37
3.4.2 胴体間の距離を変化させた人体モデル	37
3.4.2 胴体間の距離と電界強度分布	38
3.4.3 胴体間の距離と伝送特性	40
3.5 送受信機間の距離による影響	41
3.5.1 送受信機間の距離と電界強度分布	42
3.5.3 送受信機間の距離と伝送特性	46
3.6 握手をする手の表面の接触面積による影響	48
3.6.1 手の表面の接触面積と電界強度分布	49
3.6.2 手の表面の接触面積と伝送特性	53
3.6.3 手の表面の接触面積と腕内部を流れる電流	54
3.7 まとめ	56
第4章 二者間の人体通信における信号伝送経路	57
4.1 はじめに	58
4.2 送信機電極接触条件による信号伝送経路	59
4.3 受信機電極接触条件による信号伝送経路	62
4.4 電極接触条件による信号伝送モデル	66
4.4.1 1 電極型送信機における信号伝送モデル	66
4.4.2 2 電極型送信機における信号伝送モデル	68
4.5 まとめ	71
第5章 結論	73
5.1 本研究で明らかになった学術的知見	74
5.2 今後の展望	76
参考文献	77
謝辞	80

第1章 序論

1.1 研究背景	2
1.2 人体通信	3
1.2.1 人体通信の原理	3
1.2.2 人体通信の利用形態による分類	3
1.2.3 人体通信の規格	5
1.3 研究目的	6
1.4 本論文の構成	7

1.1 研究背景

近年、情報通信機器の小型化や高性能化により、スマートウォッチに代表されるウェアラブル機器をユーザーが装着し日常において利用することが一般的となった。このウェアラブル機器は、血圧、心拍数などの生体情報を記録したり、スマートフォンと連動することで通知を確認したりすることができ、複数のウェアラブル機器間での連携や、他の通信媒体との連動によりその利便性を高めることができる。このような人体周囲での無線通信によるネットワークを WBAN(Wireless Body Area Network)と呼び[1],[2]、他の通信方式には、無線 LAN, Bluetooth, ZigBee, RFID(Radio Frequency Identification)などがある。無線 LAN や Bluetooth などの無線通信においては 2.4GHz 帯に代表されるように、極超短波(UHF)帯 (300MHz~3GHz) を使用しているが、一般に周波数が高くなるほど人体に吸収される電磁波のエネルギーは大きくなり人体が通信の障害となってしまう。高周波信号における通信において障害となる人体を逆に通信の媒体として利用する人体通信と呼ばれる無線通信方式が考えられており、1996 年に Zimmerman が携帯電話や携帯情報端末間で情報を共有するための新たな通信方法としてはじめて提唱した[3]。図 1-1 からわかるように人体通信は非常に短い通信距離と低消費電力が他の無線通信方式と比べた際の特徴といえ、充電回数の低減などが課題であるウェアラブル機器に人体通信は有用であると考えられる。また、最大の特徴として通信機器と人体や人体間の接触によって通信が発生するため、自然な動作の中で通信を行うことができ、日常における電子マネーでの会計や入退室管理システムだけでなく医療分野における安全管理システムなど様々な分野での応用が考えられる[4],[5],[6]。実際に、2019 年にパナソニック(株)が開発した人体通信技術によるコミュニケーション支援サービス「HiT」が提供されるなど[7]、次世代の通信手段として人体通信のますますの発展が期待される。

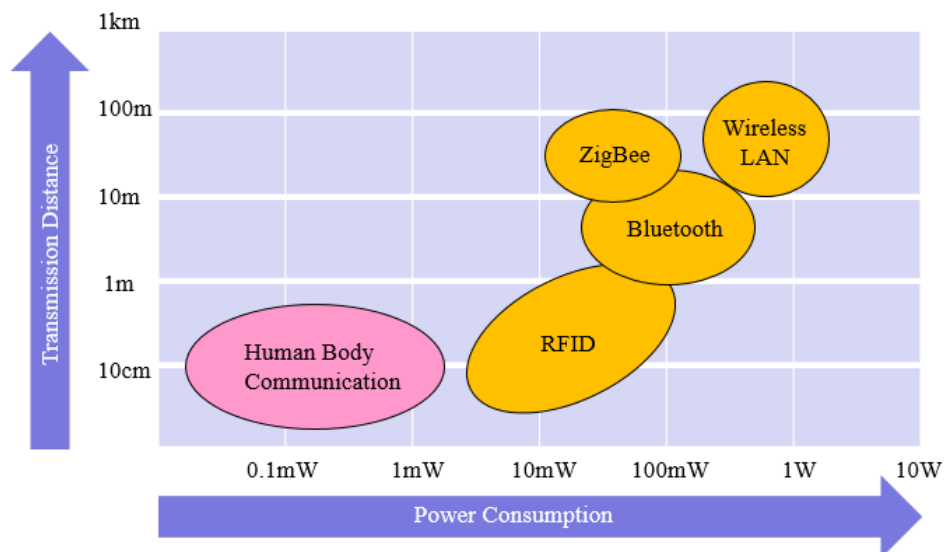


図 1-1 人体通信とその他の無線通信の比較 (消費電力-通信距離)

1.2 人体通信

1.2.1 人体通信の原理

人体通信は、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、人体周囲に形成される近接場電界が通信に寄与するとされる[8]。人体は誘電体としての性質と導電体としての性質を併せ持ち、印加する信号の周波数によってその性質は変化するため、体に高周波信号が励振された場合、導電率が高くなり、人体表面に高周波電流が流れる[9]。また数百 kHz～数十 MHz の信号を人体に印加した場合、人体周囲に準静電界と呼ばれる近接場電界が生じ、遠方への放射電磁界に比べ支配的となる[10],[11]。準静電界の電界強度は距離の三乗に反比例して減衰するため、人体近傍のごく限られた空間にのみ電界が分布するといえる[12]。このように通信距離が限定されるという特徴から、人体通信は他の無線通信と比べ外部への電磁界の漏洩が少なく低消費電力で、秘匿性の高い通信を行うことができ、ウェアラブル機器への応用が期待されている[13],[14]。また、人体が触れる、近接するなどの動作で通信のトリガーが発生するため、自然な動きで通信を行うことができ、WBAN における優れたヒューマンインターフェースとして期待できる。

1.2.2 人体通信の利用形態による分類

人体通信は図 1-2 に示すように大きく分けて以下の 3 つの利用形態に分類できる[15]。

- (a) 一人のユーザーが装着したウェアラブル機器間での通信
- (b) ウェアラブル機器を装着した二者間での通信
- (c) ユーザーが装着したウェアラブル機器と据置型機器間の通信

(a)の一人のユーザーが装着したウェアラブル機器間での通信は、ユーザーに装着したウェアラブル機器で脈拍や心拍などの生体情報を取得し、スマートフォンなど他の端末に情報を集約するヘルスケアネットワークやワイヤレスのヘッドフォンなどへの応用が考えられる[16]。(b)のウェアラブル機器を装着した二者間での通信は、握手による名刺データなどの個人情報の交換や音楽データの共有、医療現場での応用が考えられる[17],[18]。(c)のユーザーが装着したウェアラブル機器と据置型機器間の通信では、ウェアラブル機器を身に着けたユーザーが IC カードをタッチする代わりに手をかざすことで通過できる自動改札や個人認証による安全管理システムなどへの応用が考えられ、これまでウェアラブル機器と据置型機器間での人体通信特性に関する研究が多くなされてきた[19],[20]。

本研究では(b)のウェアラブル機器を装着した二者間での通信を焦点に当て、腕時計型ウェアラブル送受信機を手首に装着し、握手による利用状況を想定した場合について考えていくことにする。

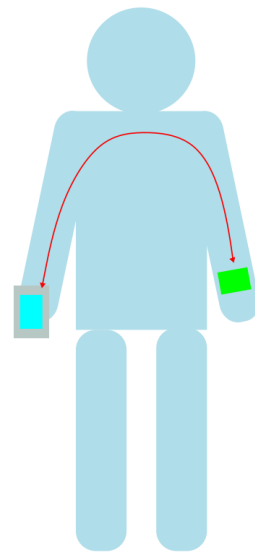


図 1-2(a) 一人のユーザーが装着したウェアラブル機器間での通信

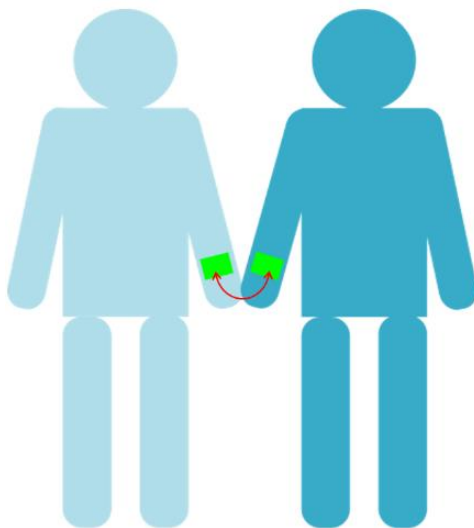


図 1-2(b) ウェアラブル機器を装着した二者間での通信

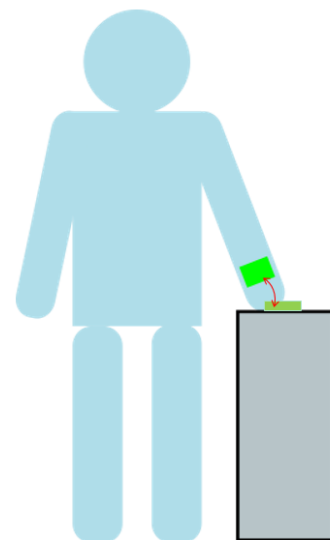


図 1-2(c) ユーザーが装着したウェアラブル機器と据置型機器間の通信

1.2.3 人体通信の規格

人体通信の規格は 2012 年 2 月，国際標準規格である IEEE 802.15.6 が正式に承認，発行された．IEEE 802.15.6 は医療分野やヘルスケア分野を対象とした WBAN に関する規格であり，UHF 狭帯域通信，広帯域通信，人体通信の三つの物理層で構成される[21]．人体通信は電界通信技術を用いた通信方式であるとされ，中心周波数は 21MHz，伝送速度は 164kbps～1.3Mbps と規定されている．表 1 に各物理層の概容を示す．

表 1 IEEE 802.15.6 の主要三規格の物理層 (PHY)

	IEEE 802.15.6		
	UHF 帯狭帯域通信	広帯域通信	人体通信
物理層	NB-PHY	UWB-PHY	HBC-PHY
周波数帯	402MHz~2.4GHz	3.1~10.6GHz	21MHz
通信距離	2m 程度		
変調方式	BPSK, QPSK, QMSK など		
通信速度	1~10Mbps		
消費電力	電源電圧 3V にて 10mA 以下		

1.3 研究目的

Zimmerman による研究報告が発表されてから今日に至るまで、人体通信の伝送特性の実験的検討や、周波数特性、伝送特性を良好にする電極構造の検討に関する研究など、様々なアプローチから人体通信に関する研究が行われてきた[22],[23],[24]。過去の研究においては、ネットワークアナライザ等を使用し人体通信の伝送特性を実験から検討している例がある[25],[26],[27]。しかし、この測定方法では、回路のグラウンド電位が商用電源のアースに接続されることで安定し、機器の利用状況が異なる測定条件が得られてしまい、実際に知りたい人体通信の伝送特性とは異なる結果が得られてしまうことが知られている。特に、二者間における人体通信では人体上のウェアラブル機器はバッテリー駆動であり、回路グラウンドは設置されず電氣的に浮いた状態となるためその影響は顕著となる。そのため、ウェアラブル機器と設置された据置型機器間の通信においては、受信側に設置された測定器が使用でき、正確な人体通信の伝送特性を測定できるのに対し、二者間の人体通信の伝送特性を実験から正確に検討することは難しく、その詳細な伝送メカニズムは明らかになっていないことが多い。また、人体通信の通信に寄与する電流や電界を実験から測定するのは困難であるため、人体をモデル化して通信時の電界や電流の様子を電磁界解析から検討することにより、その伝送メカニズムを明らかにする必要性があり、これによって二者間の人体通信における実際の機器設計の指針を立てることができると考えられる[28]。

そこで本研究では、人体通信の利用形態のうちウェアラブル機器を装着した二者間の通信に着目し、腕時計型ウェアラブル送受信を握手する手首に着け、お互いの体が向き合った状態で握手をする場合の利用状況について想定した解析モデルを作成し電磁界解析を行った。解析結果を比較することで、電極接触条件によって伝送特性に現れる差異を、信号伝送経路から検討し、二者間における人体通信の電極接触条件と伝送特性の関係について明らかにすることを目的とする。また、二者間の人体通信の伝送特性に影響を与える要因とその評価を電極接触条件ごとについて行うことで、通信に寄与する主要となる信号伝送路の範囲について調べ信号伝送モデルを提示し、実際に機器設計をする際の電極接触条件などについての指針と二者間の人体通信における適切な利用形態を示すことを目的とする。

1.4 本論文の構成

第1章では、人体を信号の伝送路として利用する人体通信についての原理を述べ、他の無線通信方式と比較することでその特徴や利点を説明した。また、人体通信の利用形態による分類と国際規格について説明し、本研究で対象とする利用形態について述べた。さらに二者間における人体通信の電磁界解析による通信メカニズムの解明の必要性を述べ、本研究の目的を説明した。

第2章では、本論文のテーマである二者間の人体通信における電極接触条件と伝送特性の関係を調べるために電磁界解析による手法を用いることを説明する。二者間の人体通信で最も想定される利用状況を模した人体モデルと双方向通信を考慮した送受信機のモデルを作成し、電極接触条件による伝送特性を検討するシミュレーション条件とその結果について述べる。

第3章では、二者間の人体通信において様々な条件を変更しシミュレーションを行うことで、二者間における人体通信の伝送特性に影響を与える要因およびその要因が伝送特性に与える影響の大きさについて評価する。この結果から実際に機器設計するにあたっての適切な電極接触条件や利用形態について示す。

第4章では第2章、第3章で得られた伝送特性や電界強度分布、また電界ベクトル分布についての結果から、ウェアラブル型送受信機の電極接触条件によって伝送特性に現れる差異について信号伝送経路を検討することによって説明し、二者間の人体通信における信号伝送モデルを示す。

第5章では、本研究によって得られた学術的知見をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

本論文は以上の内容で構成される。

第 2 章 二者間の人体通信における電極接触条件と伝送特性の関係

2.1 はじめに	10
2.2 電磁界解析による伝送特性の評価	11
2.2.1 本研究で用いる人体モデル	11
2.2.2 ウェアラブル型送受信機と電極接触条件	13
2.2.3 解析手法とシミュレーション条件	15
2.3 電極接触条件による受信電圧と伝送特性	17
2.4 電極接触条件と伝送効率	18
2.5 電極接触条件と電界強度分布	20
2.6 電極接触条件と電界ベクトル分布	23
2.7 まとめ	27

2.1 はじめに

前章で、二者間における人体通信の通信メカニズムを検討する上で電磁界解析が必要であることを述べた。本章では、二者間における人体通信の利用方法において、握手をする手首にウェアラブル型送受信機を装着した場合を想定した通信モデルを作成し、本研究で用いる電磁界解析の手法とシミュレーション条件について述べる。電極接触条件と伝送特性の関係の結果と考察について述べる。

2.2 電磁界解析による伝送特性の評価

2.2.1 本研究で用いる人体モデル

二者間の人体通信において最も想定される利用方法は、手首にウェアラブル機器を装着し、握手によって通信することである。図 2-1 に本研究で用いた電磁界解析モデルの全体像を示す。人体モデルは日本人成人男性の平均的な体型を考慮し[29]、円筒ブロックの組み合わせで表現した簡易人体モデルを用いる。腕モデルのみ、平板電極を完全に接触させるため、円柱表面から直径の 10% の位置をカットし、幅 36mm の平坦部を有する構造とした。人体モデルは印加する信号周波数 21MHz での筋肉の電気定数 (比誘電率 $\epsilon_r=108$, 導電率 $\sigma=0.64$ S/m) をもつ均一なモデルとし[30]、握手する手の接触面のみ皮膚の電気定数 (比誘電率 $\epsilon_r=201$, 導電率 $\sigma=0.26$ S/m) を用いた。図 2-2 は握手をしている手首に送受信機を装着した腕部付近の拡大図を示しており、送受信機は握手をしている接触面からそれぞれ 100mm の位置に配置した。また、図 2-3 に人体モデルの詳細な寸法について示す。

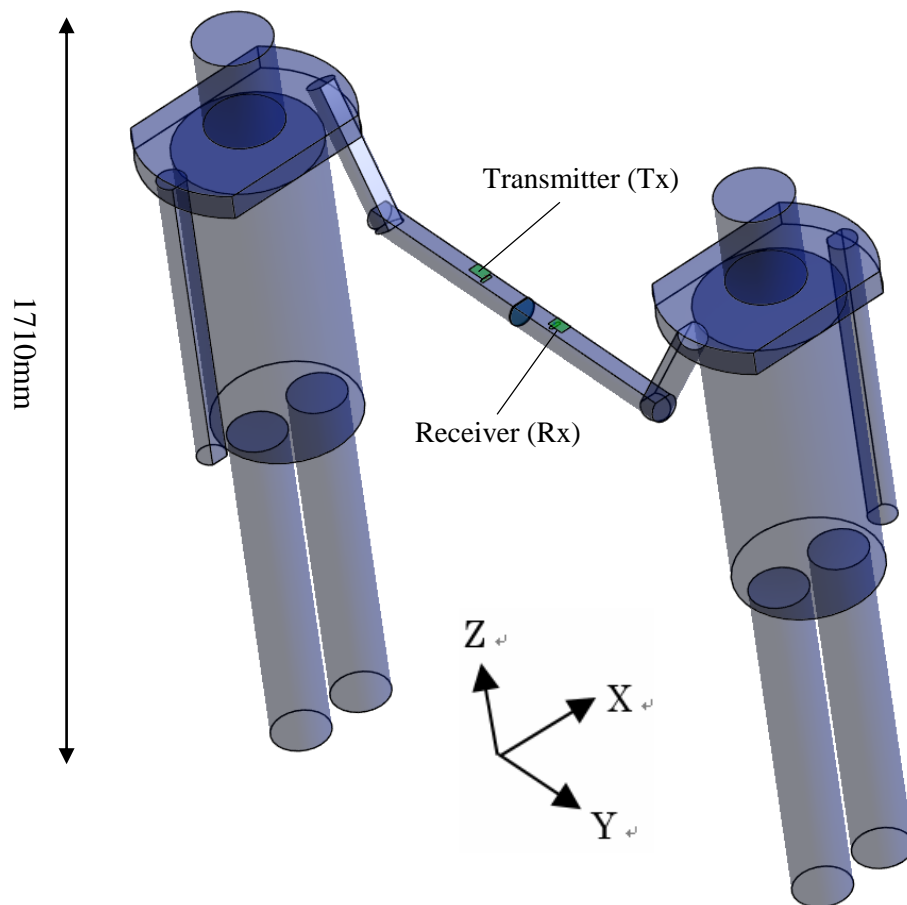


図 2-1 二者間の人体通信による握手モデルの全体像

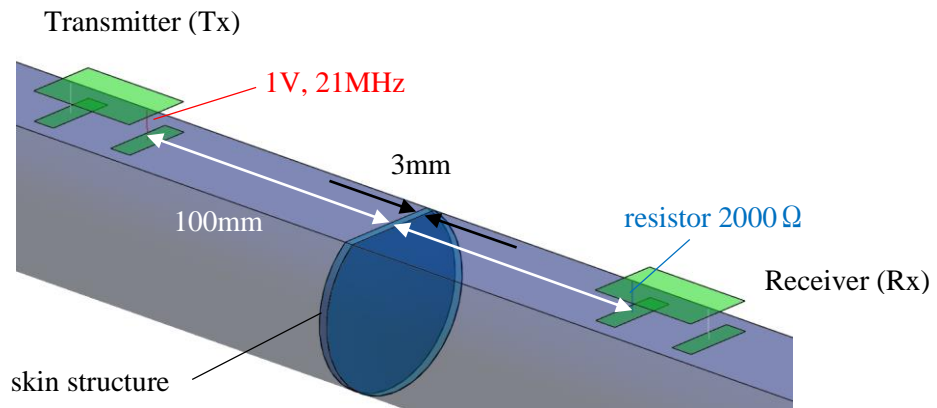


図 2-2 送受信機を装着した腕部付近の拡大図

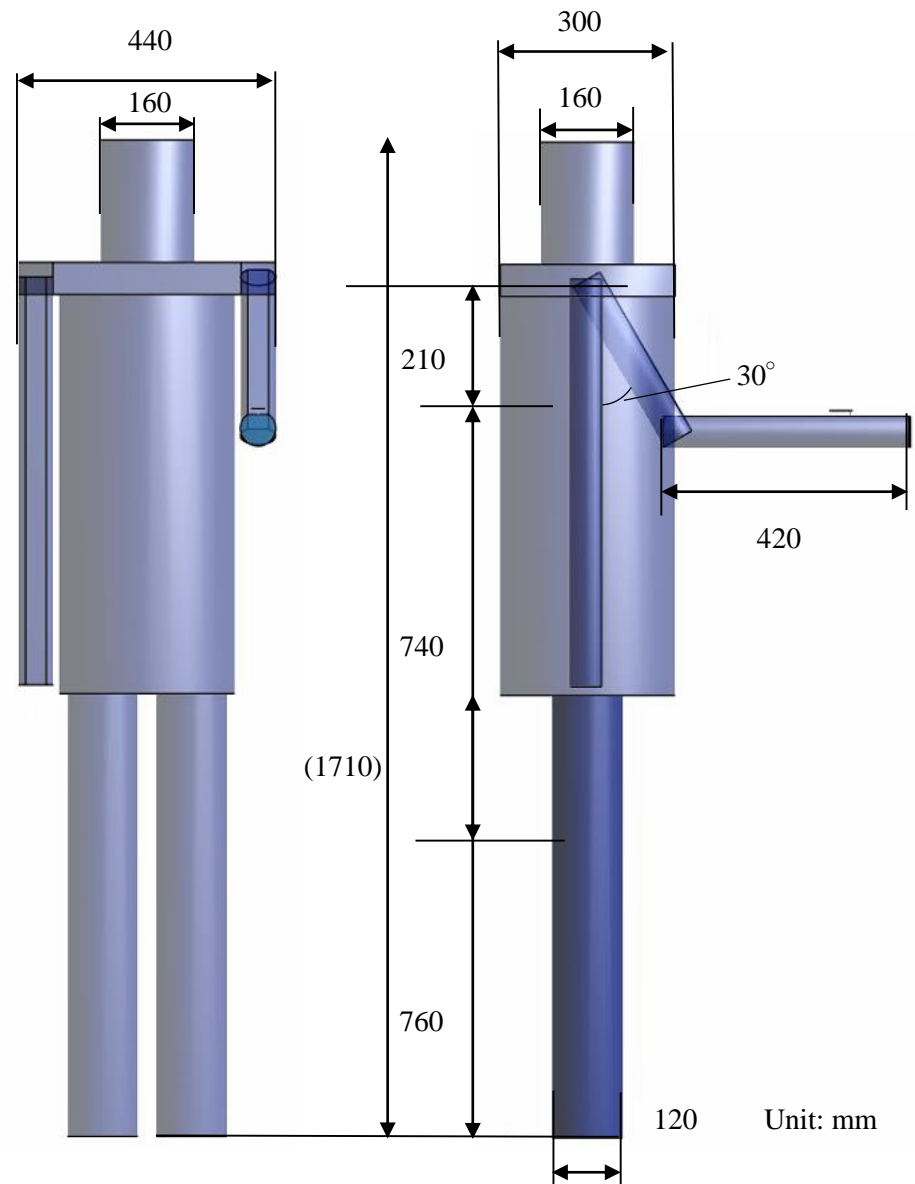


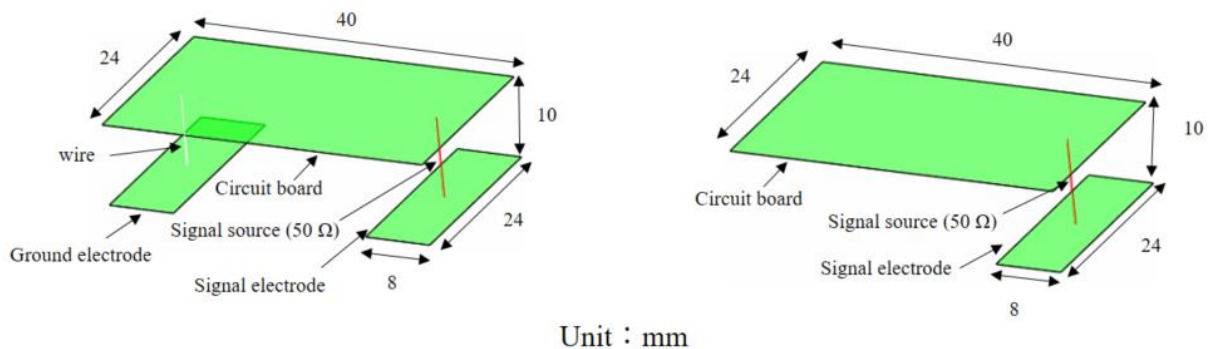
図 2-3 人体モデルの詳細寸法

2.2.2 ウェアラブル型送受信機と電極接触条件

握手をしている手首に装着するウェアラブル型送信機を図 2-4 のようにモデル化した。送信機は回路基板を模した導体板と人体に接触させる電極，それらをつなぐ導線，信号を印加する信号源からなる。信号を印加する電極を信号電極と呼び，もう一方の導線につながれた電極をグラウンド電極と呼ぶことにする。回路基板は $24\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ，信号電極とグラウンド電極は $8\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ の寸法とし，回路基板と電極の間は 10 mm である。信号源には内部抵抗 $50\ \Omega$ をもつ振幅 1 V の正弦波を用い，各形状での回路基板，電極，導線は金属と見なし，電気抵抗を持たない完全導体としてモデル化した。人体に接触させる電極の枚数が図 2-4(a)のように信号電極とグラウンド電極の 2 枚から構成される場合を 2 電極型送信機(2-EL Tx)，図 2-4(b)のようにグラウンド電極と導線を取り除いた 1 枚の信号電極から構成される場合を 1 電極型送信機(1-EL Tx)と呼ぶこととする。

受信機は双方向通信を考慮して送信機モデルと同じ寸法の構造とし，その構造を図 2-5 に示す。送信機における信号源の代わりに抵抗 $2000\ \Omega$ を挿入し，通信時この抵抗にかかる電圧を受信電圧とする。また，この抵抗がつながれている電極を受信電極と呼び，図 2-5(c)のように受信電極とグラウンド電極の 2 枚から構成される場合を 2 電極型受信機，図 2-5 (d)のようにグラウンド電極と導線を取り除いた 1 枚の受信電極から構成される場合を 1 電極型受信機と呼ぶこととする。

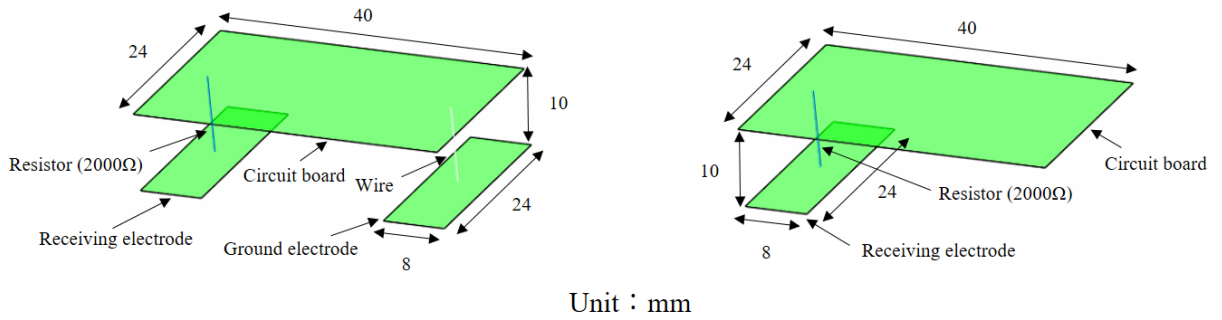
なお，簡潔に記すため，以下においては送信機を Tx，受信機を Rx とし，送受信機の電極接触条件については図 2-4,2-5 に表記しているように 1 電極型を 1-EL，2 電極型を 2-EL と記述する場合がある。



(a) 2 電極型送信機 (2-EL Tx)

(b) 1 電極型送信機 (1-EL Tx)

図 2-4 送信機モデルの形状と寸法 (Tx)



(c) 2 電極型受信機 (2-EL Rx)

(d) 1 電極型受信機 (1-EL Rx)

図 2-5 受信機モデルの形状と寸法 (Rx)

2.2.3 解析手法とシミュレーション条件

人体通信に用いられる周波数は数十 MHz 程度が一般的であり、本研究で用いる 21MHz の信号を用いる際、電磁波の波長は 15m 程度となり、一般的なウェアラブル機器による通信距離と比べ非常に大きくなる。このような高周波を用いる近距離での無線通信では近傍の電界が複雑に伝播し伝送に寄与するため、詳細な電磁場を解析できる計算手法が必要となる。そこで本研究では、電磁場解析の手法の一つである時間領域差分法(Finite Difference Time Domain Method:以下 FDTD 法)を用いてシミュレーションを行った。FDTD 法は解析領域全体をセルと呼ばれる微小直方体に分割し、各セルに対して電磁界現象の支配方程式であるマクスウェル方程式を差分化して、時間領域で解く手法である [31]。着目する部分ごとの精度をセルの大きさを調整することで設定し、各電気定数をパラメータとして設定することで人体などの誘電体を表現できるため、人体通信の解析に適した手法であるといえる。本研究では SPEAG 社の電磁界解析ソフトウェア「SEM CAD X」を用いて FDTD 法による解析を行い、人体通信の国際標準規格である IEEE 802.15.6 に規定された中心周波数である 21MHz の信号源を用いる。

FDTD 法では作成するモデルの複雑さやボクセルの精度によって計算時間が大きく左右されるため、定性的な研究の段階においてはより単純なモデルを使用し計算時間を短縮できる方が望ましい。過去の研究においては皮膚、脂肪、筋肉の三組織を有する多層円柱腕モデルや詳細腕部モデル、また筋肉のみの均一モデルを用い送信機電極の入力インピーダンスや電界分布を比較した研究が行われており、電氣的経路や定性的な変化の検討を行う上では解析モデルの簡略化が可能であることが示されている[32]。そこで本研究では図 2-1 に示す筋肉のみの均一モデルを用いて二者間における電極接触条件と伝送特性の関係について検討していくことにする。

解析領域は解析モデル(図 2-1)から吸収境界まで 50mm となる空間に設定し、境界条件は Berenger によって提案された PML(Perfectly matched Layer)法を用いた。また、セルの大きさは送受信機において 1 mm、送受信機から離れるにつれその精度を粗くし、送信機が配置された両腕部で最大 10 mm、人体モデル全体では最大 100 mm となるように設定した。これは、人体モデルに全体において最大 10mm に設定した際にも受信電圧の値に同様の結果が見られたことや、先行研究におけるメッシュ依存性の検討[22]から、計算時間の簡略化のため人体モデル全体で最大 100mm に設定した場合も正しい精度の計算結果が得られることを示している。また、筋肉による単純均一構造の人体モデルと据置型機器間との人体通信におけるシミュレーションと実験による比較から、定性的な変化の検討においてはモデルの妥当性が示されており[28]、本研究で用いる人体モデルによる二者間のシミュレーションにおいても同様の妥当性が得られると考えられる。よって、この条件の下、送信機の電極接触条件と受信機の電極接触条件を変え計 4 種類について、FDTD 法によるシミュレーションを行った。

2.3 電極接触条件による受信電圧と伝送特性

表 2-1 に各電極接触条件と受信電圧の関係について示す。

表 2-1 電極接触条件と受信電圧

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	0.63 mV	3.89 mV
2-EL Rx	0.28 mV	2.97 mV

2 電極型送信機を用いた方が 1 電極型送信機を用いるよりも約 6 から 10 倍程度の受信電圧が得られることが解析結果からわかった。また、2 電極型受信機よりも 1 電極型受信機を用いた方が約 1.3 から 2.3 倍程度受信電圧が大きくなり送信機には 2 電極型を、受信機には 1 電極型を用いると大きな受信信号が得られることが確認できる。

表 2-2 に、2.2.3 節で述べたシミュレーション条件における伝送特性 G を示す。伝送特性 G は、送信機に信号を印加する回路基板と信号電極間の電圧 V_{in} と受信機の抵抗にかかる電圧 V_{out} を用いて以下の(1)式で定義する。

$$G = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

表 2-2 電極接触条件と伝送特性 G

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	-64.0 dB	-43.9 dB
2-EL Rx	-71.1 dB	-46.2 dB

伝送特性 G は 1 電極型送信機より 2 電極型送信機の方が、伝送特性 G が 20~25dB 程度大きくなり、得られる受信電圧が約 10 倍大きくなることがわかった。また、2 電極型受信機よりも 1 電極型受信機の方が、伝送特性 G が 2~7dB 程度大きくなり、効率よく信号を伝送できていることがわかる。よって、送信機には 2 電極型を、受信機には 1 電極型を用いた方が大きな伝送特性が得られる。

過去の研究においては実験から二者間の握手における伝送特性を検討している例がある[33]。この研究においては 2 電極型送信機および 2 電極型受信機を用い、本研究で用いた送受信機モデルの寸法とは多少異なる値で実験を行い、その伝送特性は-44dB という結果が報告されている。表 2-2 の結果 (-46.2dB) と比較するとその差は約 2dB となっており、本研究で用いたモデルでの電極接触条件による伝送特性の解析結果は定性的な検討を行う上では十分妥当なモデルである。

2.4 電極接触条件と伝送効率

送信機と受信機で消費される電力について解析結果によって得られる値から伝送効率を求め、二者間の人体通信において最も省電力で扱える電極接触条件について評価する。表 2-3 に電極接触条件と送信電力 P_t の関係を、表 2-4 に電極接触条件と受信電力 P_r の関係を示す。また、表 4 に電極接触条件と伝送効率の結果について示す。なお、送信機の信号源から見た外部要素全体をまとめたインピーダンスで消費される電力を送信電力 P_t 、受信機の受信抵抗で消費される電力を受信電力 P_r とし、伝送効率 P を以下の(2)式で定義する。

$$P = 10 \log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

伝送効率 P の値が大きくなるほど少ない送信電力で大きな受信電力を得られるため、伝送効率が良い。

表 2-3 電極接触条件と送信電力 P_t

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	0.15 mW	2.40 mW
2-EL Rx	0.15 mW	2.40 mW

表 2-4 電極接触条件と受信電力 P_r

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	9.9×10^{-11} W	3.8×10^{-9} W
2-EL Rx	1.9×10^{-11} W	2.2×10^{-9} W

表 2-3 から、送信電力 P_t は送信機の電極数によって決まり、2 電極型送信機を用いると 1 電極型送信機を用いたときに比べ、16 倍程度大きな電力を消費していることが確認できる。これは、2 電極型送信機を用いると人体に接触した信号電極とグラウンド電極間の人体のインピーダンスが存在するため、余分な電力を消費してしまうことによる結果が生じたと考えられる。1 電極型送信機を用いると人体内部のインピーダンスで消費される余分な経路が存在しないため、送信電力を抑えることができると考えられる。次に表 2-4 から、1 電極型送信機よりも 2 電極型送信機を用いた方が受信電力 P_r が約 40 から 115 倍ほど大きくなり、2 電極型送信機を用いた方がより大きな信号を得られることがわかる。これは、1 電極型送信機を用いると送信機から送られる信号が受信機にまで十分に伝わらず、通信に寄与しない範囲が大きく信号がロスする割合が 2 電極型送信機に比べ大きいことが推測される。また、受信電極に着目すると、2 電極型受信機よりも

1 電極型受信機を用いた方が受信電力 P_r が約 1.7 から 5 倍ほど大きくなり 1 電極型受信機を用いた方が大きな信号を得られることが確認できる。これは、受信機の電極数の差異による信号伝送経路の違いなどが寄与していることが考えられる。

表 2-5 電極接触条件と伝送効率 P

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	-61.8 dB	-58.0 dB
2-EL Rx	-69.0 dB	-60.4 dB

表 2-5 から、電極接触条件による伝送効率 P は 2 電極型送信機および 1 電極型受信機を人体に接触させる条件において最も大きくなり、1 電極型送信機および 2 電極型受信機を人体に接触させる接触条件において最も伝送効率が小さくなった。電力の差が最大 11dB 程度と約 10 倍の電力差が発生するため、電極接触条件による伝送効率への影響は非常に大きいものといえる。先ほど、1 電極型送信機を用いた方が送信電力を抑えられると考察したが、受信電力がとても小さいため、結果として 2 電極型送信機は無駄な電力消費があってもその分大きな受信電力が得られ伝送効率が大きくなるという結果が得られた。よって、二者間の人体通信における電極接触条件は送信機に 2 電極を、受信機に 1 電極を用いると最も低消費電力となる。

2.5 電極接触条件と電界強度分布

送信機の電極接触条件による電界分布の差異の結果を人体モデルの側面から見たものを図に示す。受信電極数による二者間全体の電界分布に大きな変化が見られなかったため1電極受信機の結果についてのみ示している。同図(a)は、1電極型送信機を用いた場合、(b)は、2電極型送信機を用いた場合を示している。電界観測面は、ウェアラブル型送受信機の電極の中央、および、人体腕部の中央を通るYZ面における電界分布を表しており、1V/mを0dBとして規格化した。

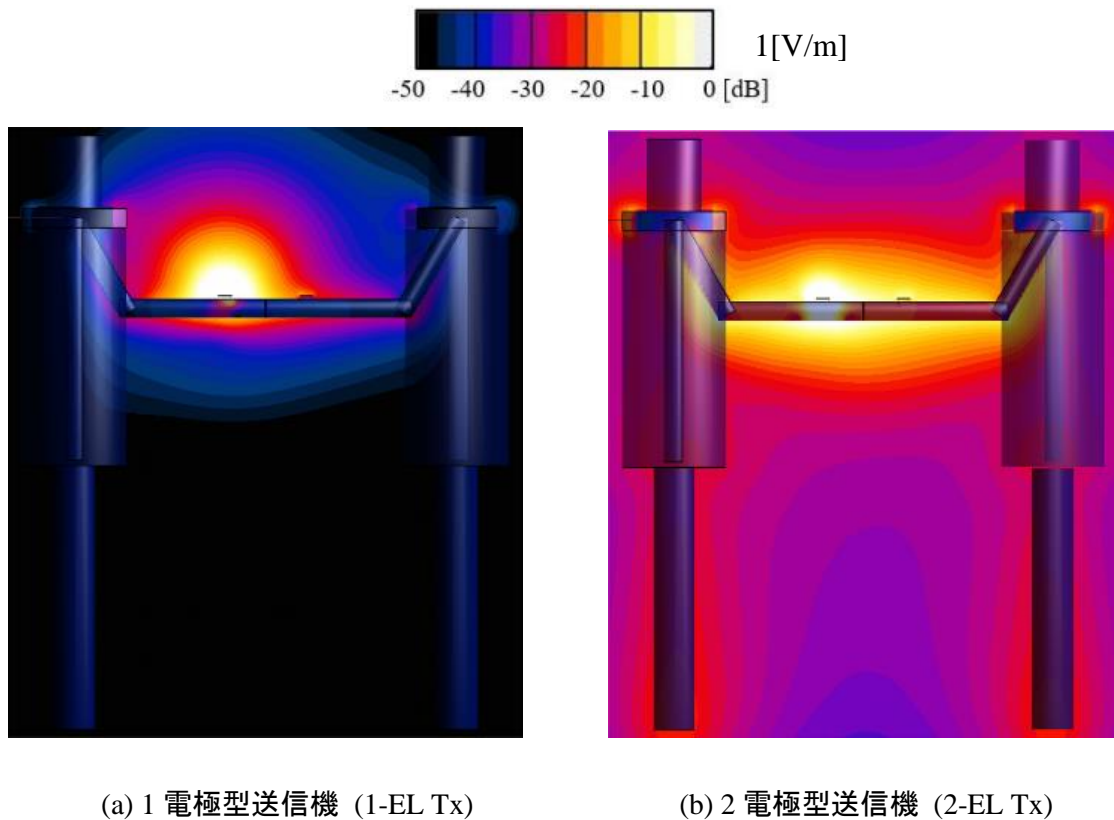


図 2-6 送信機電極接触条件と側面から見た電界強度分布

図 2-6 からわかるとおり, (a) 1 電極型送信機を用いた場合, 送信機を装着した腕部の上側に局所的に電界が分布し腕部の内部と下部にはほとんど分布しておらず, 受信機にまで電界があまり浸透していないのに対し, (b) 2 電極型送信機を用いた場合では送受信機の上下の両側に腕部に沿った方向(Y 軸)に電界が分布し, 受信機および体全体にまで電界が強く分布していることが分かり, 送信機電極接触条件による電界分布の相違が見て取れ, 伝送特性の差が生まれる要因となることがわかる. 特に, (a) 1 電極型送信機を用いた場合は握手をしている腕部下部の胴体間の空間に-50dB 以上の電界が見られない一方, (b) 2 電極型送信機を用いた場合では-20 から-30dB 程度の強い電界が見られ, 送信機の電極接触条件による電界分布の差異が大きく現れることがわかった.

次に, 送信機の電極接触条件による電界分布の差異の結果を人体モデルの上側から見たものを図 2-7 に示す. 先ほどと同様に受信電極数による電界分布に大きな変化が見られなかったため 1 電極受信機の結果についてのみ示す. 同図(a)は 1 電極型送信機を用いた場合, (b)は 2 電極型送信機を用いた場合を示している. 電界観測面は, 人体腕部の中央を通る XY 面における電界分布を表しており, 1 V/m を 0dB として規格化した.

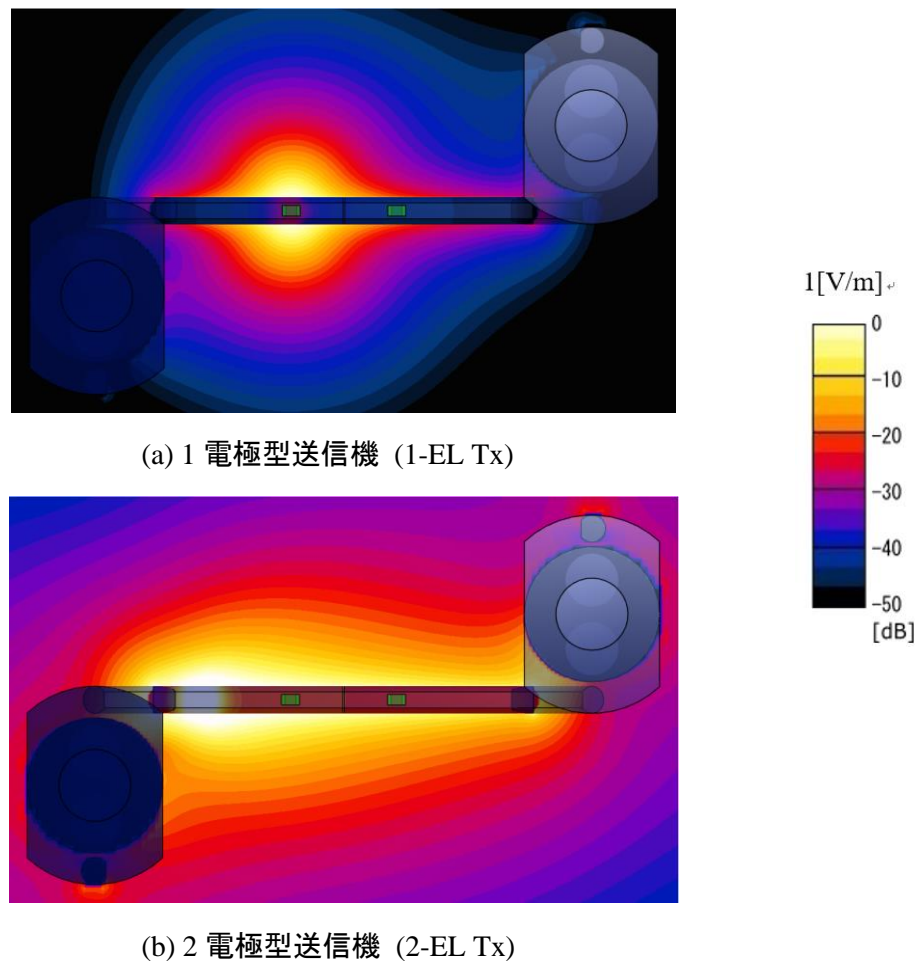
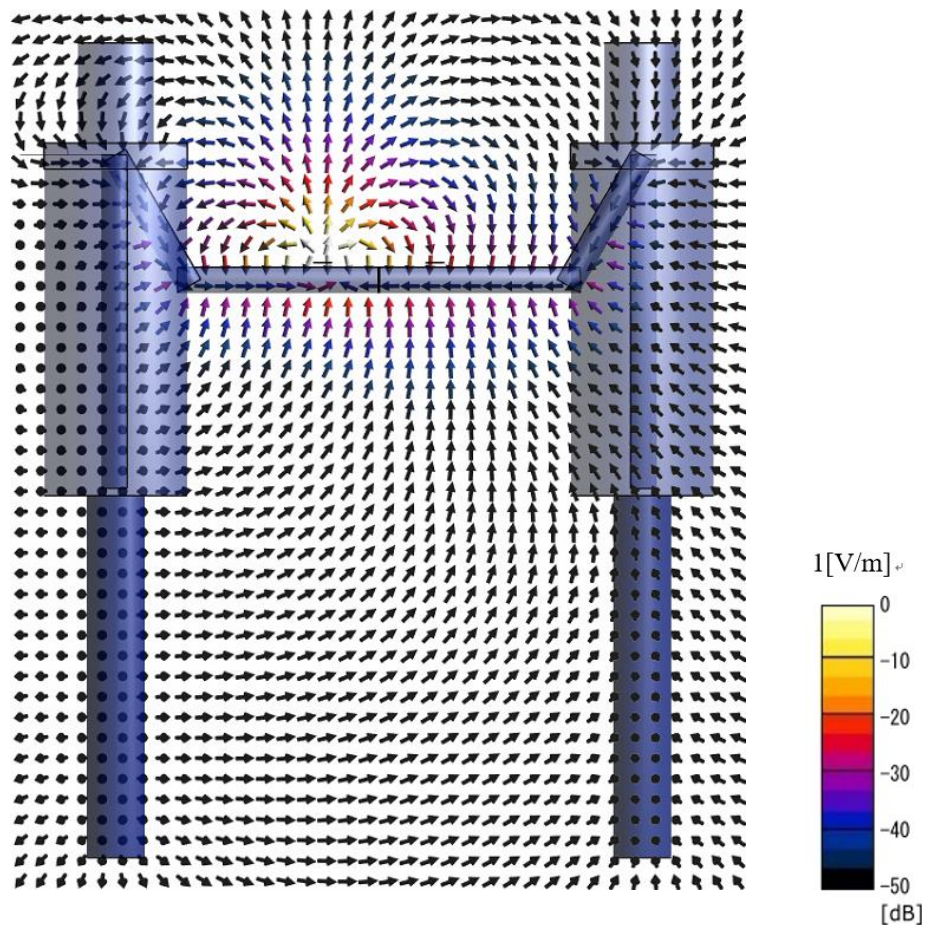


図 2-7 送信機電極接触条件と上側から見た電界強度分布

図 2-7 から, (a) 1 電極型送信機を用いた場合, 送信機を中心として対称に分布する円形の電界分布が見られ, その強さは二者間の体全身までは及ばない狭い範囲に-30dB 程度分布しており受信機まであまり電界が浸透していないことが確認できる. また, 腕内部の電界に着目するとその強さは-40dB 以上と小さいため, 1 電極型送信機を用いた場合は腕内部による信号伝送経路は通信にほとんど寄与しないと考えられる. それに対し, (b) 2 電極型送信機を用いた場合は, 腕部の方向(Y 軸)に沿った 0dB から-20dB 程度の強い電界が広く分布しており二者の人体モデルの体を含む全体の範囲においては-35dB 程度まで分布していることが確認できる. また, 腕内部の電界に着目すると-30dB 程度までの比較的強い電界が見られ, 特に送信機を装着している前腕部の肘に近い付近においては 0dB から-10dB 程度の強い電界が分布しており, 2 電極型送信機を用いた場合の腕内部を通る電流は通信に大きく寄与することが考えられ, これらの違いが伝送特性に影響を与えると推測できる.

2.6 電極接触条件と電界ベクトル分布

2.5 節において送信機電極接触条件による電界強度分布を示し、送信機の電極数によって電界強度の大きさと形状が異なることがわかった。しかし 二者間の人体通信の伝送メカニズムを明らかにするためには電界強度の絶対値のみではなく、向きも考慮し、電気的な流れを検討していく必要がある。電界ベクトルの結果は電界分布と同様、受信電極数による変化がほとんど見られなかったため 1 電極型受信機の結果についてのみ示している。図 2-8 (a), (b)は、それぞれ 1 電極型送信機を用いた場合の二者間の体を含む全体像と送受信機を含む腕部周辺の範囲での電界ベクトル分布を側面から見た図であり、図 2-8 (c)は上面から見た腕部周辺の電界ベクトルを示している。すべて受信電圧が最大となる時点を表示しており、矢印の方向がその空間での電界のベクトルを示し、矢印の色が電界の強さを示している。また、 1 V/m を 0 dB として規格化した。図 2-8(a), (b)は電極の中央、および、人体腕部の中央を通る YZ 面を、図 2-8(c)は腕部中央を通る XY 面を観測面とした。



(a) 二者間の体を含む全体像

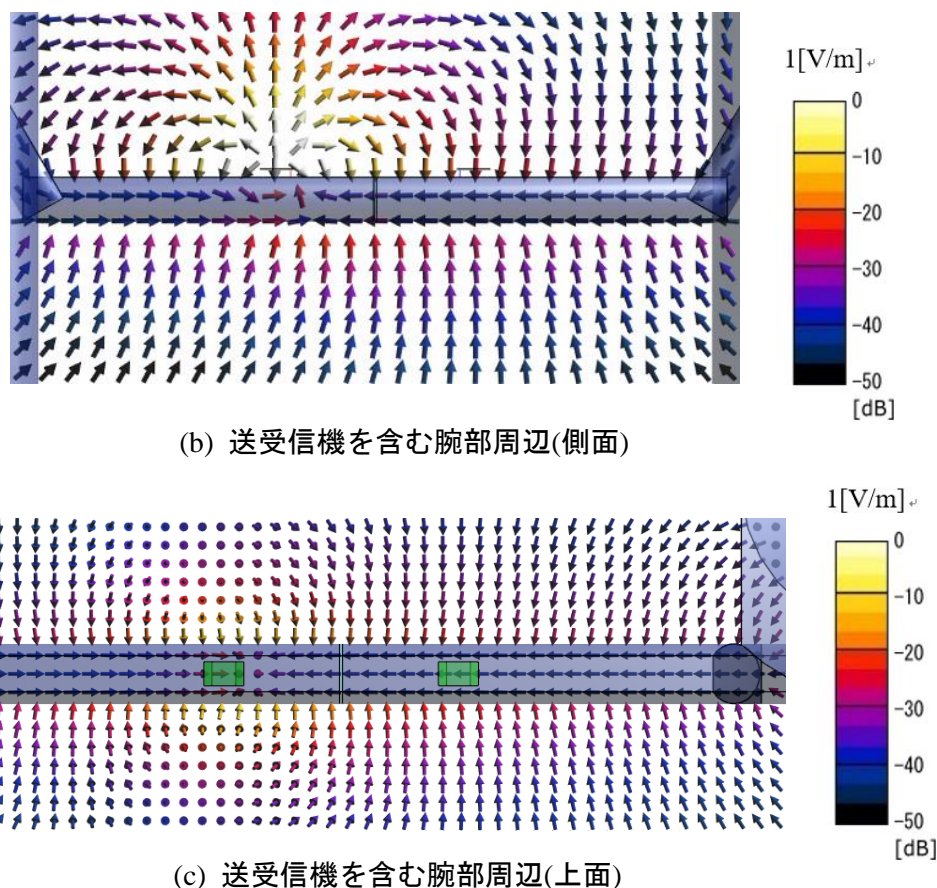
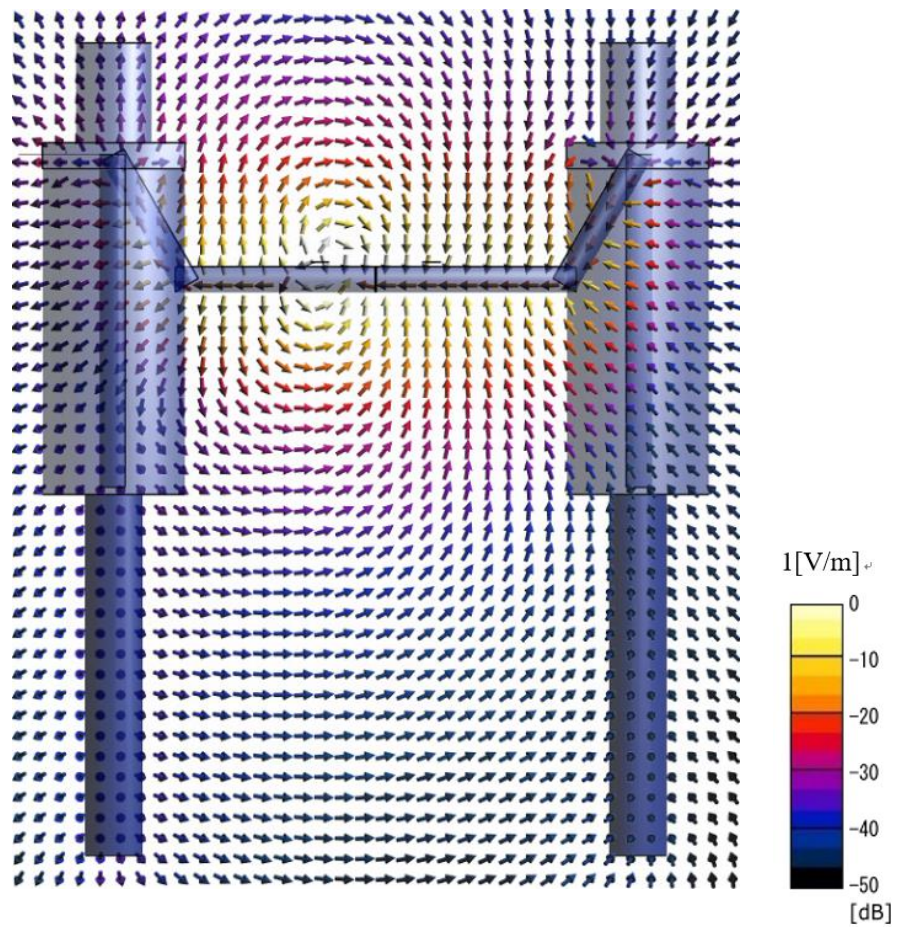


図 2-8 1 電極型送信機における電界ベクトル分布

図 2-8(a)から 1 電極型送信機を用いた場合、送信機回路基板を起点として上部の空間を中心とする対称的な方向の強い電界ベクトルが見られ、送信機を装着した腕部周辺において局所的な分布を形成してことがわかる。図 2-8 (b)の送受信機を含む腕部周辺の空間に着目すると、腕の表面や送信機の回路基板から腕部上部の空間を通り受信機の回路基板に向かう電界の向きが見られ、容量性の結合が確認された。図 2-8 (c)においても送信機から前腕部表面に向かう電界が上下対称に見られ送信機から受信機や腕部表面への容量性結合が見られた。また、図 2-8 (b),(c)から、腕内部での電界の向きは腕部に並行に沿った送信機のグラウンド電極に戻る向きであり、その強さは空間を伝わる電界に比べて非常に微弱であるため、通信に寄与する割合は非常に小さいと考えられる。よって、1 電極型送信機では腕部表面と手首に装着した送受信機間の上部の空間を介する容量性結合が二者間の通信において主要の信号伝送経路を形成していると考えられ、その範囲は送受信機を含む腕部周辺の局所的な範囲に限られると考えられる。

次に、2 電極型送信機を用いた場合について 1 電極型受信機と同様に電界ベクトルの様子を図示した。図 2-9 (a), (b)に、それぞれ 2 電極型送信機を用いた場合の二者間の体を含む全体像と送受信機を含む腕部周辺の範囲での電界ベクトル分布を側面から見た図を、図 2-9 (c)に上面から見た腕部周辺の電界ベクトルを示す。すべて受信電圧が最大となる時点を表示しており、規格化に用いる値や観測面は 1 電極型送信機と同様である。



(a) 二者間の体を含む全体像

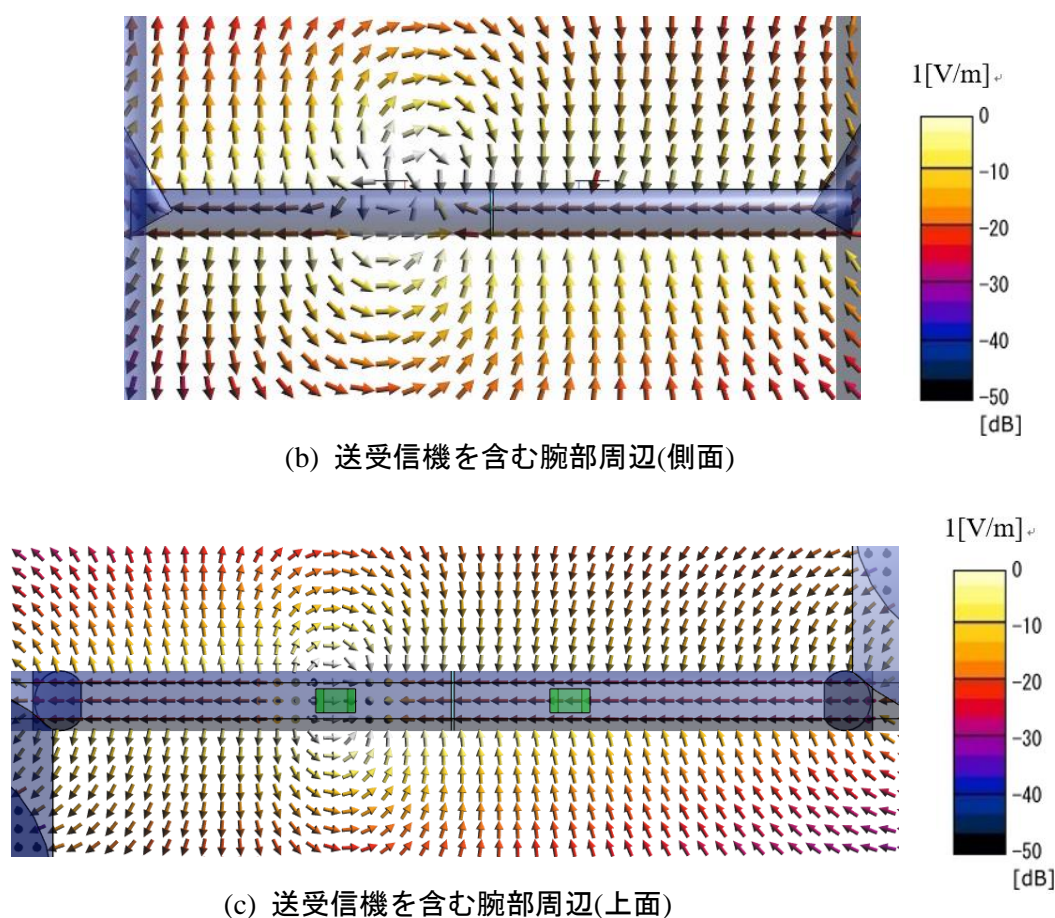


図 2-9 2 電極型送信機における電界ベクトル分布

図 2-9(a)から 2 電極型送信機を用いた場合は、送信機から受信機に向かう一方向の電界のベクトルが腕部の上下の空間に対称に見られ、1 電極型送信機を用いた時よりも広い範囲に分布していることが分かる。図 2-9(b)の腕内部の電界ベクトルに注目すると、腕内部では受信機から送信機の方に向かう一方向の電界が見られ、その電界の強さは図 2-8(b)の 1 電極型送信機を用いた時に比べると大きいため、腕内部を通る経路が二者間の通信に大きく影響することが推測される。図 2-9(c)から、送信機から受信機側の前腕部表面の空間に向かう電界ベクトルが上下対称に見られるだけでなく、受信機を装着している人体の胴体やその周辺の空間から前腕部表面に向かう強い電界が見られ広い範囲での容量性結合を形成していることが確認できる。このように 2 電極型送信機を用いると、1 電極型送信機で見られた送受信機間の空間を介する容量性結合に加え、腕部下部の胴体間の空間を介する容量性結合、また、胴体やその周囲の空間から腕部表面に向かう容量性結合、更に腕内部を通り送信機の信号電極に戻るループ構造(送信機-空間の容量性結合-受信機-前腕部内部-送信機)が形成されることが図 2-9 から確認でき、1 電極型送信機よりも大局的な範囲が通信に寄与することが考えられる。

2.7 まとめ

二者間の人体通信における伝送特性を評価するため、握手による利用方法を想定した通信モデルを作成し、電極接触条件を変えた4種類のパターンについて電磁界解析を行った。解析結果から伝送特性や伝送効率、また、電界分布と電界ベクトル分布について示し、電極接触条件によってそれらに現れる差異を比較し考察を行った。

伝送特性による比較から、送信機については1電極型よりも2電極型を用いた方が20～25dB程度、受信機については1電極型よりも2電極型を用いた方が2～7dB程度伝送特性が良好となることがわかり、2電極型送信機および1電極型受信機を用いると最も大きな伝送特性が得られることが確認された。伝送効率についても同様の結果が得られ、2電極型送信機は無駄な電力消費があってもその分受信電力が得られるため2電極型送信機を用いたとき最も伝送効率が大きくなることがわかった。

電界強度分布の比較から、1電極型送信機では送信機を装着した腕部の上側に局所的に分布し、受信機にまで電界があまり浸透していないのに対し、2電極型送信機を用いた場合では送受信機の上下の両側に腕部に沿った方向に分布し、受信機および体全体にまで電界が強く分布していることが確認された。また、受信機の電極接触条件による電界強度分布の差異はほとんど見られなかったため、分布の形状や電界の強さは送信機の電極数に依存することがわかる。

電界ベクトル分布の比較から、1電極送信機を用いた場合は送信機から受信機に向かう強い電界ベクトルが腕部上部の空間にのみ見られ、局所的な範囲が通信に寄与するのに対し、2電極送信機を用いた場合は送信機から受信機に向かう強い電界ベクトルが腕部上だけでなく下部の胴体間の空間にも見られた。さらに腕内部を通して送信機に戻る強い電界が見られループ構造を形成することが確認され、2電極型送信機を用いると腕部を含む大局的な範囲が通信に寄与すると考えられる。

第 3 章 伝送特性に影響を及ぼす

要因と電極接触条件の関係

3.1 はじめに	28
3.2 送受信機の装着箇所による影響	29
3.2.1 電極接触条件と装着箇所による伝送特性	29
3.3 回路基板の面積による影響	31
3.3.1 回路基板の面積と電界強度分布	32
3.3.2 回路基板の面積と電界ベクトル分布	33
3.3.3 回路基板の面積と伝送特性	35
3.4 胴体間の距離による影響	37
3.3.2 胴体間の距離を変化させた人体モデル	37
3.3.2 胴体間の距離と電界強度分布	38
3.3.3 胴体間の距離と伝送特性	40
3.5 送受信機間の距離による影響	41
3.4.1 送受信機間の距離と電界強度分布	42
3.5.3 送受信機間の距離と伝送特性	46
3.6 握手をする手の表面の接触面積による影響	48
3.6.1 手の表面の接触面積と電界強度分布	49
3.6.2 手の表面の接触面積と伝送特性	53
3.6.3 手の表面の接触面積と腕内部を流れる電流	54
3.7 まとめ	56

3.1 はじめに

前章で握手をする手首に送受信機を装着した場合における条件の下で伝送特性や電界分布、電界ベクトル分布などについて検討を行った。本章では、二者間における人体通信の伝送特性に影響を与える要因およびその要因と電極接触条件の関係について調べる。前章におけるシミュレーション条件を基に送受信機の装着箇所、回路基板の面積、胴体間の距離、送受信機間の距離、握手する手の表面の接触面積による影響などを電界分布や伝送特性などから評価した。これらの結果から実際に機器設計するにあたっての適切な電極接触条件や利用形態について検討を行う。

3.2 送受信機の装着箇所による影響

実際の利用においてはウェアラブル機器を左右どちらの腕の手首に装着しているかは利き腕などの関係により個人によって異なることが考えられる。そのため、握手をしたときの送受信機の装着箇所は左手で握手をする場合を考えると、図 3-1 に示すように左手首に送信機-右手首に受信機(B-D)、左手首に送信機-左手首に受信機(B-C)、右手首に送信機-左手首に受信機(A-C)、右手首に送信機-右手首に受信機(A-D)の計 4 つのパターンが考えられ、前章で対象とした左手首に送信機-左手首に受信機(B-C)以外の装着箇所においても、伝送特性を調べる必要がある。

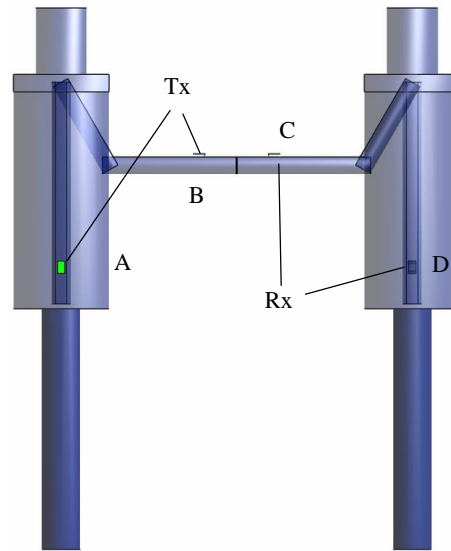


図 3-1 二者間の人体通信における送受信機の装着箇所

3.2.1 電極接触条件と装着箇所による伝送特性

各電極接触条件における装着箇所と伝送特性の関係を表 3-1 に示す。

表 3-1 各電極接触条件における装着箇所と伝送特性の関係

		A-C	A-D	B-C	B-D
1-EL Tx	1-Rx	-88.7 dB	-104.8 dB	-63.9 dB	-89.2 dB
	2-Rx	-89.2 dB	-139.2 dB	-71.1 dB	-119.9 dB
2-EL Tx	1-Rx	-97.3 dB	-111.7 dB	-43.4 dB	-61.7 dB
	2-Rx	-95.6 dB	-118.0 dB	-45.9 dB	-91.1 dB

装着箇所によって伝送特性を比較すると、送受信機間の距離が最も近くなる握手をしている手首に装着した B-C の場合においてどの電極接触条件においても伝送特性が最大となり、送受信距離が最も遠い A-D の伝送特性と比較すると 40dB から 70dB 程度の差が生じる。B-C 以外の装着箇所においては伝送特性がほとんど -80dB 以上となり、送信機から送られた信号は受信機にほとんど伝わらず伝送特性が著しく減少していることがわかり、送信機と受信機との空間を含めた距離が伝送特性に大きく関与していることが推測される。

以上の結果から、握手をしている手首に送受信機を装着する以外の装着箇所に送受信機を配置するといずれも伝送特性が大きく得られず、実際に利用する際十分な受信信号が得られず通信が行えないため、二者間の人体通信においての適切な利用形態はお互いが握手をしている手首に送受信機を装着した場合であることがわかる。

3.3 回路基板の面積による影響

送受信機の回路基板は信号を送るアンテナと信号を受信するグラウンドとしての機能を果たすため、回路基板の面積は伝送特性に影響を及ぼすと考えられる。送受信機を握手している手首に装着した時の握手モデル(図 2-1)において、回路基板の面積を変化させたときの 4 種類の電極接触条件ごとの伝送特性を評価するため、図 2-4、2-5 で示したウェアラブル型送受信機における回路基板の各辺の寸法を等間隔(縦 6mm, 横 10mm)で大きくし、最大 2 倍まで変化させ下の(i)から (v)に示す計 5 パターンの送受信機モデルを作成した。それらの概形について図 3-2 に示す。

- (i) $24 \times 40\text{mm}$ (960mm^2)
- (ii) $30 \times 50\text{mm}$ (1500mm^2)
- (iii) $36 \times 60\text{mm}$ (2160mm^2)
- (iv) $42 \times 70\text{mm}$ (2940mm^2)
- (v) $48 \times 80\text{mm}$ (3840mm^2)

なお、(i) の $24 \times 40\text{mm}$ は腕時計サイズ、各辺の寸法を 2 倍にした(v)の $48 \times 80\text{mm}$ は一般名刺サイズの各辺を約 10mm 小さくした程度の大きさであることをイメージするとよい。

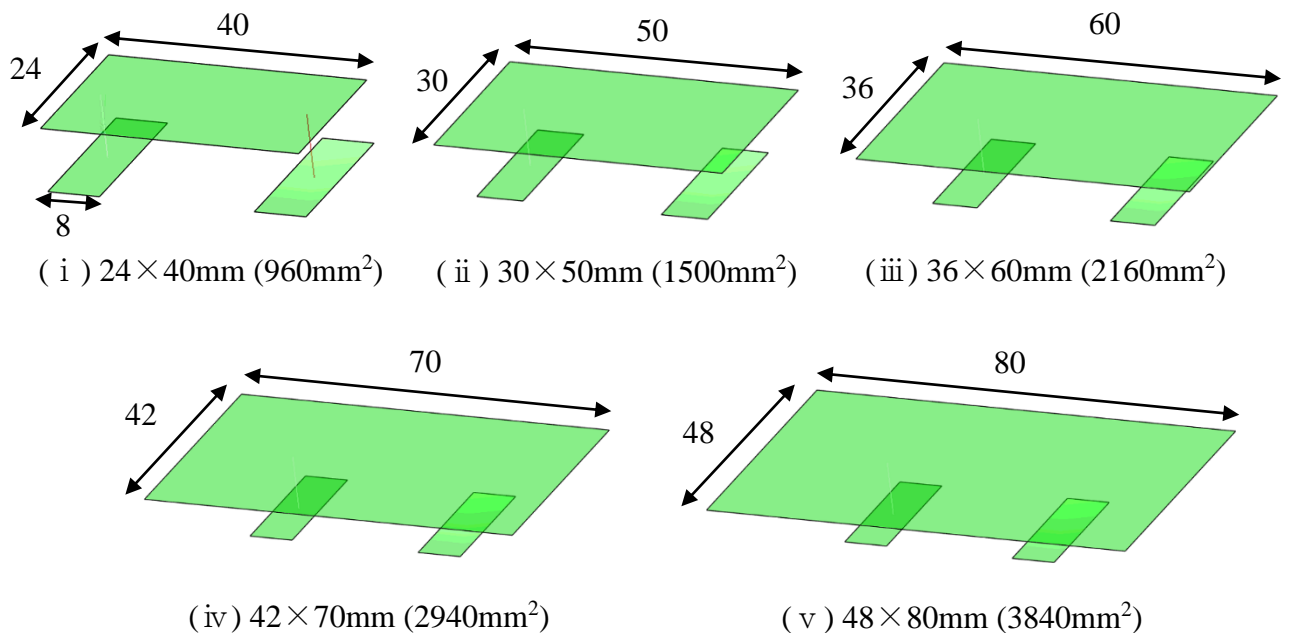


図 3-2 回路基板の各寸法と面積

3.3.1 回路基板の面積と電界強度分布

回路基板の面積が最小と最大のときの電界強度分布図に着目し、その全体の形状を比較すれば面積による影響がどの程度現れたかわかるといえる。

図 3-3 に 1 電極送信機を用いた場合の回路基板の面積が最小の(i) $24 \times 40\text{mm}$ (960mm^2)と最大の(v) $48 \times 80\text{mm}$ (3840mm^2)での電界強度分布の差異の結果を示す。受信機電極数による全体の分布の形状の差異はほとんど見られなかったため 1 電極型受信機の結果のみを示しており、電界観測面は、ウェアラブル型送受信機の電極の中央、および、人体腕部の中央を通る YZ 面である。また、 1V/m を 0dB として規格化した。

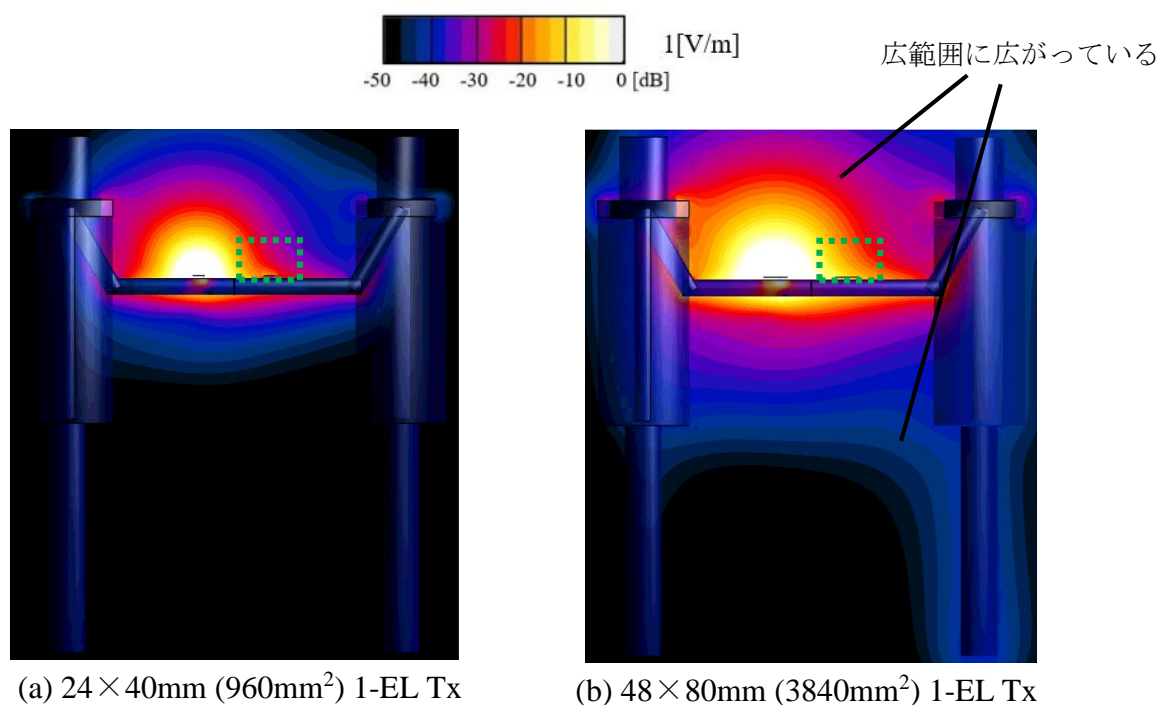


図 3-3 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

図 3-3 (a), (b)を比較すると回路基板の面積が(a) 960mm^2 の 4 倍である(b) 3840mm^2 を用いた方がより広範囲に電界が強く分布していることがわかり、受信機に着目すると 0dB から -10dB 程度の電界が浸透していることが確認でき、伝送特性が増大することが推測される。

次に、2電極型送信機を用いた場合についても同様に図示した結果を図 3-4 に示す。

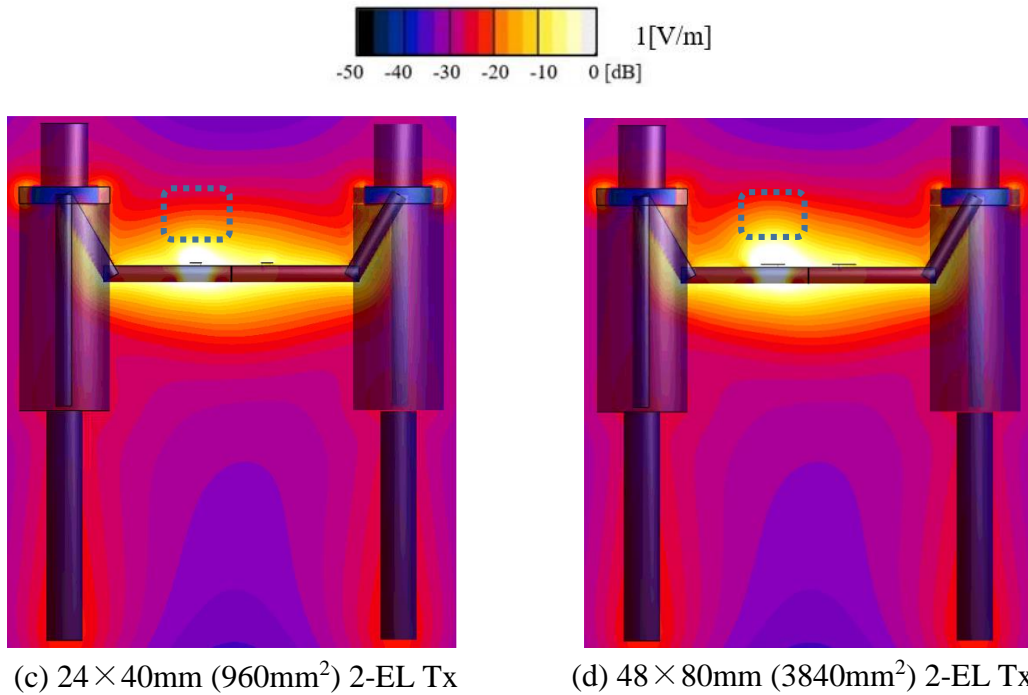


図 3-4 2電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

図 3-4(c), (d)を比較すると、回路基板の面積が大きい(d) 3840mm^2 の方が送信機上部の電界の分布の広がりが少し見られる以外、大きな変化は見られず、図 3-3 の 1電極型送信機に比べると全体から見た分布の変化はとても小さいことがわかる。この結果から、電界分布の形状は送信機電極数によってほとんど決まり、回路基板の面積による影響は2電極型送信機よりも1電極型送信機を用いた場合の方が大きいことがわかる。

3.3.2 回路基板の面積と電界ベクトル分布

3.3.1 節で電界分布について調べ、回路面積の増加による電界分布の広がり方が1電極送信機において顕著であることが確認された。本節では、図 3-3, 3-4 における電界に分布について向きも考慮したベクトル分布からも検討を行う。

まず、3.3.1 節の図 3-3 に示す電界強度分布における最大受信電圧時の電界ベクトルについて、送受信機含む腕部周辺を拡大して表示したものを図 3-5 に示す。

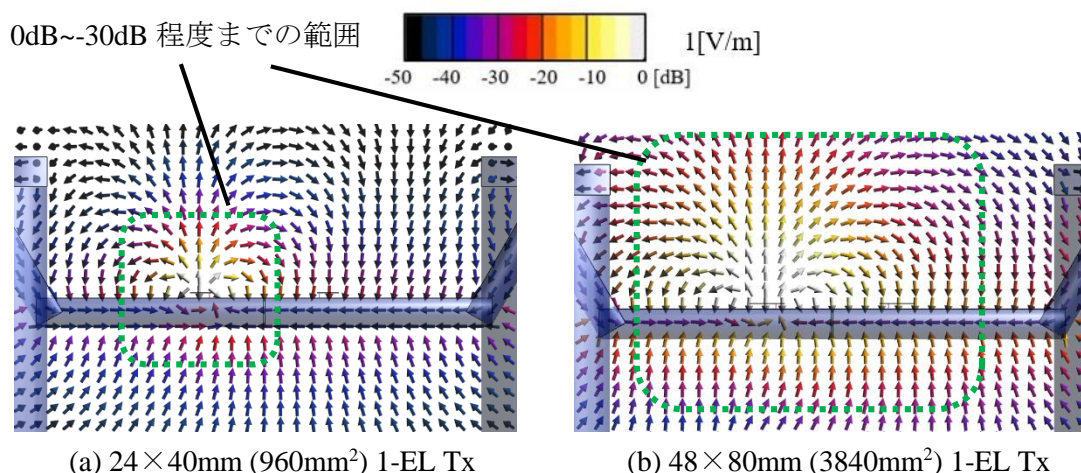


図 3-5 1 電極型送信機を用いた場合の電界ベクトル分布

図 3-4(a), (b)を比較すると、送信機上部から対称的に放出された電界は回路基板の面積の増大により、その強さと範囲が大きくなっていることがわかる。特に、受信機を装着した腕部表面や上腕部にまでその電界ベクトルが見られ、腕内部にも見られる電界の強さが大きくなっているため、回路基板の面積の大きさによる電界ベクトル分布への影響が顕著に現れているといえる。

次に、3.3.1 節の図 3-4 に示す電界強度分布における最大受信電圧時の電界ベクトルについて、送受信機含む腕部周辺を拡大して表示したものを図 3-6 に示す。

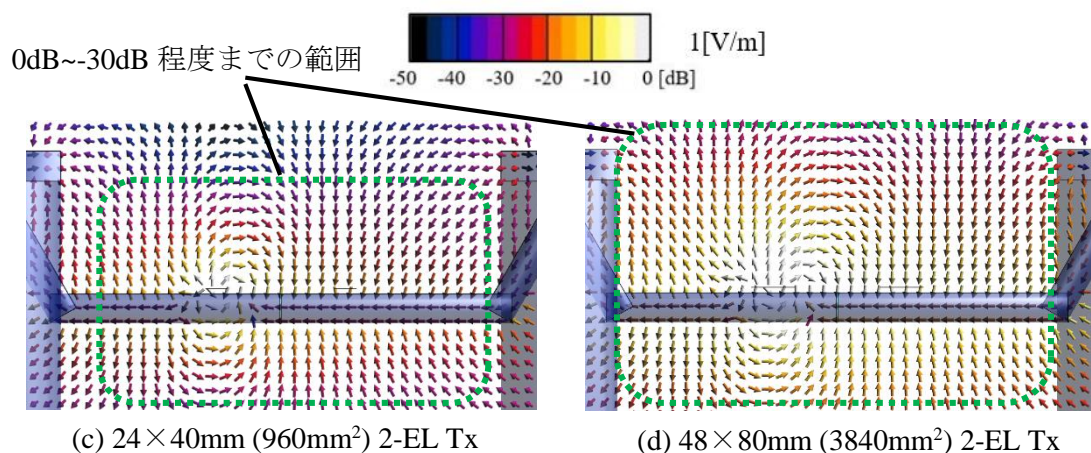


図 3-6 2 電極型送信機を用いた場合の電界ベクトル分布

2 電極型送信機を用いた場合は、1 電極型送信機を用いたときと同様にその強さと範囲は大きくなっていることが同図(c), (d)から読み取れるが、その変化の割合は点線の枠線で囲んだ 0dB から-30dB 程度までの範囲を比較すると 1 電極型送信機を用いたときと比べると小さいといえるため、回路基板の面積の増大による送信機電極接触条件への影響は 1 電極型の方が大きいと考えられる

3.3.3 回路基板の面積と伝送特性

表 3-2 に 1 電極型送信機を用いたときの送受信機間の距離と伝送特性の関係を、表 3-3 に 2 電極型送信機を用いたときの送受信機間の距離と伝送特性の関係を示す。また、4 種類の各電極接触条件における回路基板の面積と伝送特性の関係を表したグラフを図 3-7 に示す。

表 3-2 1 電極型送信機を用いたときの回路基板の面積と伝送特性の関係

	(i) 960mm ²	(ii) 1500mm ²	(iii) 2160mm ²	(iv) 2940mm ²	(v) 3840mm ²
1-EL Rx	-64.0 dB	-59.0 dB	-55.0 dB	-51.7 dB	-48.8 dB
2-EL Rx	-71.1 dB	-68.2 dB	-65.5 dB	-63.1 dB	-60.9 dB

表 3-3 2 電極型送信機を用いたときの回路基板の面積と伝送特性の関係

	(i) 960mm ²	(ii) 1500mm ²	(iii) 2160mm ²	(iv) 2940mm ²	(v) 3840mm ²
1-EL Rx	-43.9 dB	-41.7 dB	-40.1 dB	-38.9 dB	-37.8 dB
2-EL Rx	-46.2 dB	-46.1 dB	-46.1 dB	-45.9 dB	-45.8 dB

1 電極型受信機を用いた場合、回路基板の面積が大きくなるにつれて伝送特性は送信機の電極数によらず単調に増加することがわかる。1 電極型送信機と 2 電極型送信機で比較したとき、(i) 24×40mm (960mm²)と (v) 48×80mm (3840mm²)の伝送特性に着目すると、1 電極型送信機を用いた場合は 15.2dB、2 電極送信機を用いた場合は 6.1dB 伝送特性が増大することから、1 電極型送信機の方が回路基板の面積の影響を大きく受けることがわかった。また、2 電極型受信機を用いた場合の伝送特性は 1 電極型受信機と同様に回路基板の面積の増加とともに増大するが、1 電極型送信機では最大 10.2dB、2 電極型送信機では最大 0.4dB 程度しか増大せず、その変化の大きさは 1 電極型受信機と比べて小さいことがわかる。

これらの結果から、4 種類の電極接触条件における回路基板の面積と伝送特性の関係についての考察を行う。まず、送信機の電極接触条件による伝送特性の差異について考える。1 電極型送信機を用いる場合は 3.3 節での結果と合わせて考えたとき、送受信機間の空間を介する容量性結合による経路が主な信号伝送経路と考えられるため、回路基板の面積によって受信電圧や伝送特性に現れる影響が 2 電極型送信機と比較した際大きくなったと考えられる。2 電極型送信機を用いた場合は、送受信機間の空間を介する

容量性結合よりも、腕内部を通る電流が主要の伝送経路であると考えられるため、回路基板の面積による影響が現れにくくなり、伝送特性の変化が少なくなったと推測される。

次に、受信機の電極接触条件について考える。1 電極受信機と 2 電極受信機の大きな差異は、人体通信の通信系のグラウンドとして機能する受信機の回路基板が浮いているか、人体に接触しているかの違いである。1 電極受信機は回路基板と受信電極にのみによる構造のため、回路基板が浮遊グラウンドとして信号を受けとり、回路基板の面積による影響を受けやすいのに対し、2 電極型受信機は回路基板と導線につながれたグラウンド電極によって人体に接触しているため、回路基板を含む体全体を体幹とする範囲をグラウンドとみなせ、回路基板の面積による影響が非常に小さくなったと考えられる。

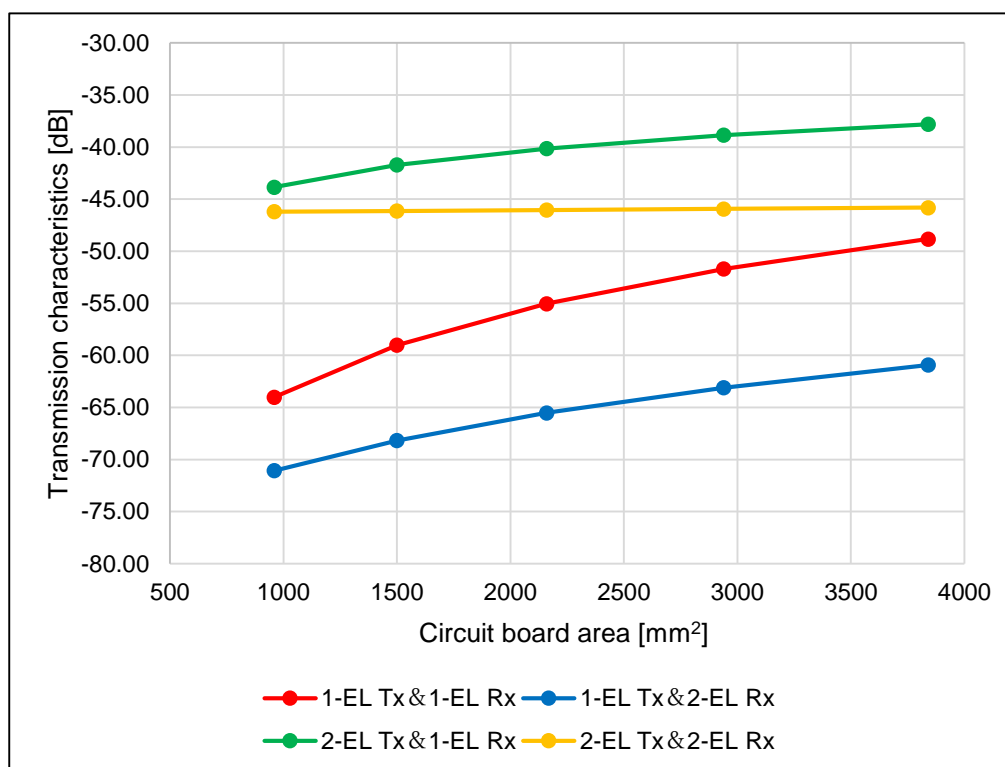


図 3-7 各電極接触条件における回路基板の面積と伝送特性の関係

3.4 胴体間の距離による影響

2章において、送信機電極接触条件による電界分布やベクトル分布を比較した際、1 電極型送信機では腕部上部の送受信機間の容量性結合、2 電極型送信機ではそれに加え腕部下部の胴体間の容量性結合が確認され、通信に寄与することがわかった。本節では、電極接触条件によって腕部下部の胴体間に見られる容量性結合が、胴体間の距離の変化によって伝送特性にどの程度影響を及ぼすか評価することを目的とする。

3.3.2 胴体間の距離を変化させた人体モデル

胴体間の距離による電極接触条件と伝送特性の関係を評価するため、図3-8のように、送受信機間の距離を一定に保ち、肩から肘にかけての上腕部の角度(Z 軸とのなす角)を0 から 90° まで 30° ずつ変化させることで胴体間の距離を変え、計 4 パターンのモデルを作成した。

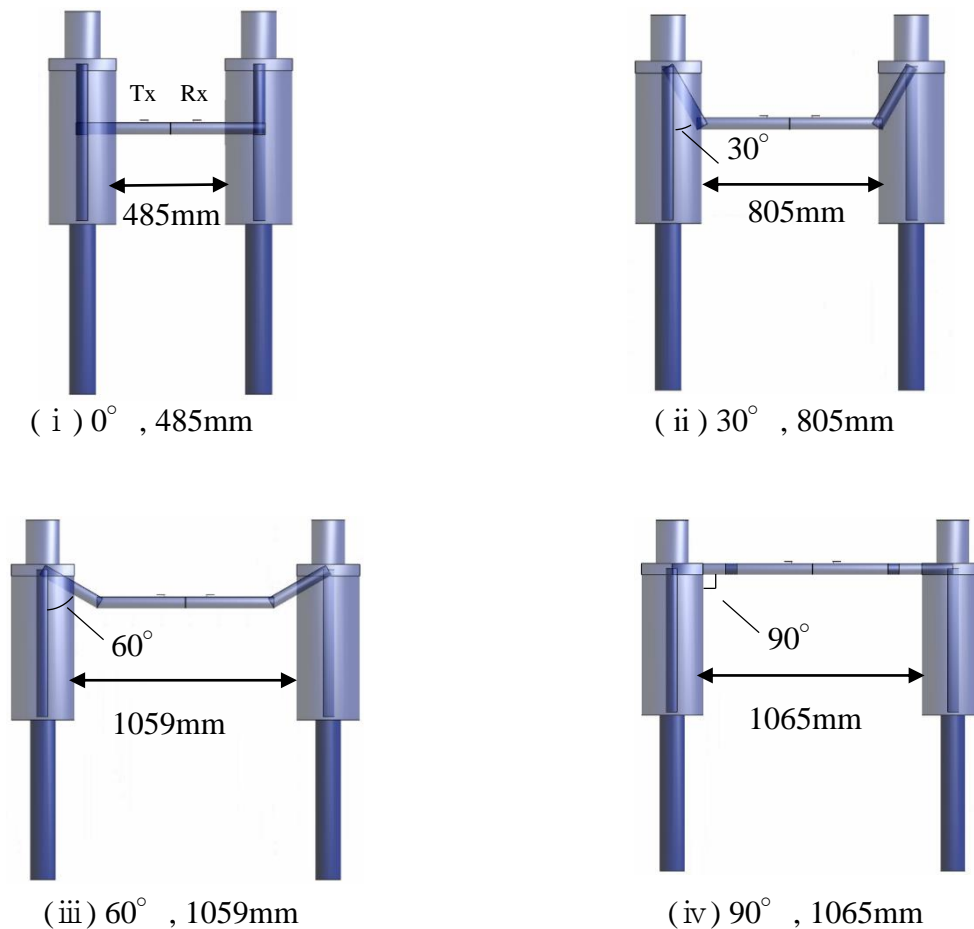
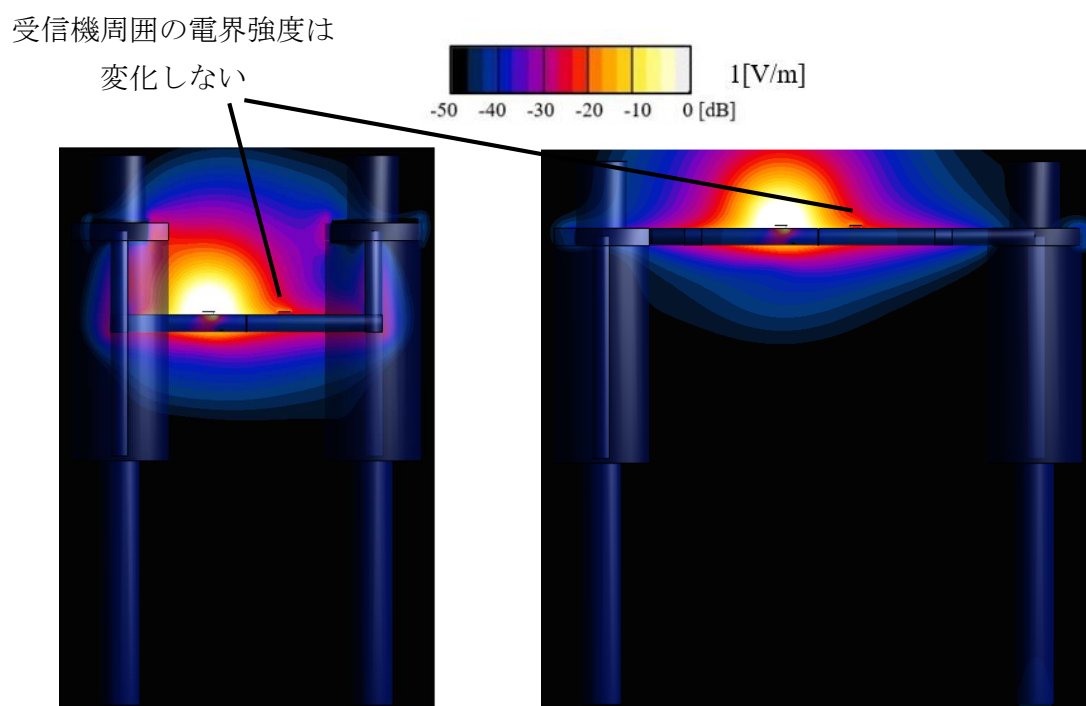


図 3-8 胴体間の距離を変化させた人体モデル

3.3.2 胴体間の距離と電界強度分布

胴体間の距離による伝送特性の影響を、胴体間の距離が最小と最大の人体モデルにおける電界分布を代表して比較を行うことで調べた。

まず、1電極型送信機を用いた場合の胴体間の距離が485mmと1065mmの電界分布を図3-7に示す。結果はすべて1電極受信機のみについて示しており、電界観測面はウェアラブル型送受信機の電極の中央、および、人体腕部の中央を通るYZ面における電界分布を表しており、1V/mを0dBとして規格化した。

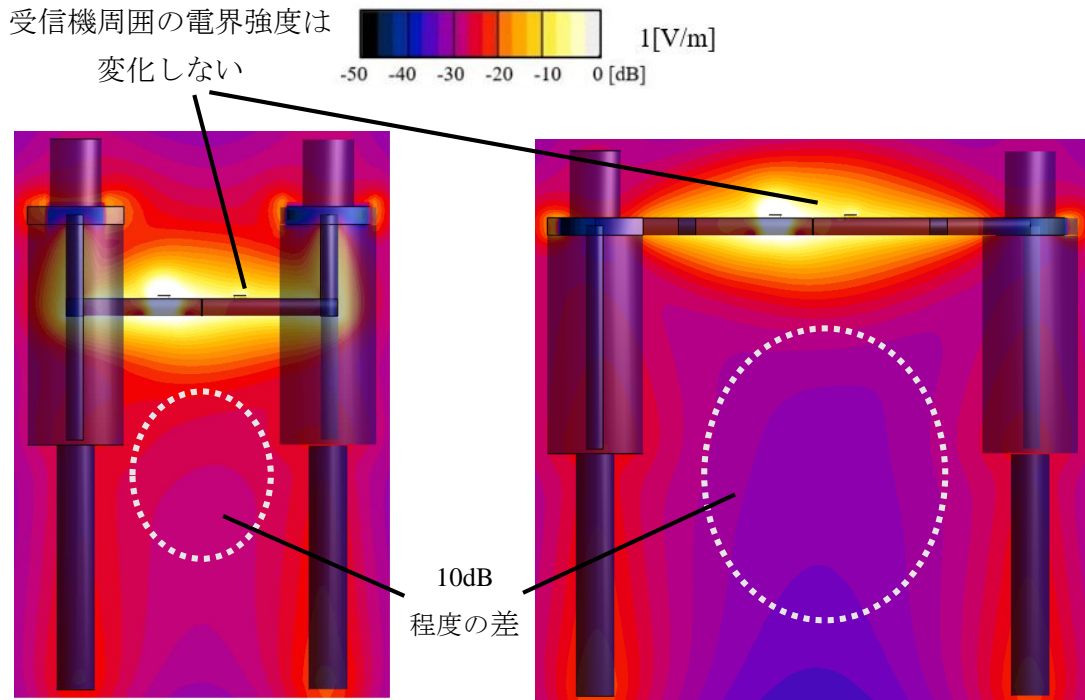


(a)胴体間の距離が485mmの人体モデル (b)胴体間の距離が1065mmの人体モデル

図3-9 1電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

胴体間の距離が最小(485mm)と最大(1065mm)における電界分布のみ示したが、胴体間の距離がそれらの中間の(ii)805mmと(iii)1059mmにおいても同様の電界の形状が得られた。図3-9から、胴体間の距離によらず、1電極型送信機を用いた場合の電界の分布の大まかな形状は上腕部周辺以外変化しないことがわかる。受信機周囲に着目すると、その電界強度はほとんど変化しないため、胴体間の距離による影響は非常に小さくなると考えられる。

次に, 1 電極型送信機を用いた場合の胴体間の距離が 485mm と 1065mm の電界分布を図 3-10 に示す.



(a) 胴体間の距離が 485mm の人体モデル (b) 胴体間の距離が 1065mm の人体モデル

図 3-10 2 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

図 3-10 から, 胴体間の距離によらず, 1 電極型送信機を用いた場合と同様に電界分布の大まかな形状は変化しないことが読み取れる. 電界分布を細かく見たときの差異としては, 送信機から遠ざかるほど (iv) 1065mm の人体モデルの方が電界の分布の範囲が少し小さくなり, 特に, 肩から肘にかけての上腕部に分布する電界の強さが (i) 485mm における人体モデルの方が 10dB 程度大きい. また, 二者間の胴体から足上部にかけての間の空間において 10dB 程度の差が見られる. しかし, 今回のシミュレーションにおいては受信機が送信機にある程度近い位置にあるため, 受信機周囲の電界強度の差があまり見られず, 胴体間の距離による影響はあまり受けないと考えられるが, 受信機が送信機から離れた上腕部の位置や, 前腕部の肘に近い位置に配置されていた場合, 電界強度がある程度異なるため, 胴体間の距離による影響を少し受けるということが予想される.

以上から, 電界強度分布比較すると, 送信機電極数によらず, 前腕部とその周囲の局所的な空間における電界強度の変化はとて小さいため, 送受信機間の距離が近い位置に配置してある今回のようなケースにおいては胴体間の距離による伝送特性への影響はほとんど現れないと考えられる.

3.3.3 胴体間の距離と伝送特性

各電極接触条件における胴体間の距離と伝送特性の関係を表 3-4 に示す.

表 3-4 各電極接触条件における胴体間の距離と伝送特性の関係

		485mm	805mm	1059mm	1065mm
1-EL Tx	1-EL Rx	-64.6 dB	-64.0 dB	-63.9 dB	-63.9 dB
	2-EL Rx	-71.1 dB	-71.1 dB	-71.4 dB	-71.1 dB
2-EL Tx	1-EL Rx	-43.7 dB	-43.9 dB	-44.0 dB	-43.8 dB
	2-EL Rx	-45.8 dB	-46.3 dB	-46.0 dB	-45.1 dB

送受信機どちらの電極接触条件においても、伝送特性の変化は胴体間の距離が最大 580mm 変化するのにも関わらず 1 dB 未満となっており、胴体間の距離による影響は非常に小さく、無視できるものといえる。伝送特性の値が胴体間の距離ごとに、ごくわずかに変化するのは図に示すモデルが厳密に胴体間の距離のみを変化させたモデルを実現できておらず、あくまでも定性的な変化を見るため作成したものであるため、送受信機間の距離を一定に保っている条件を考慮した場合、上記の結果は胴体間の距離による影響を十分に検討していると考えられる。

3.5 送受信機間の距離による影響

送受信機を握手している手首に装着した時の握手モデル(図 2-1)において、ウェアラブル型送受信機間の距離を変化させたときの 4 種類の電極接触条件における伝送特性とその影響を評価するため、送受信機間の距離を図 3-11 に示すように、皮膚構造を除いた握手をしている接触面からの信号源と抵抗までの距離を d とし、この距離 d の間隔を 50mm ごとに離して送受信機間の距離を変化させることで、伝送特性や電界分布に現れる影響を評価する。なお、図 3-12 に示すように $d=100\text{mm}$ は 2.2.3 節の条件における腕時計を着ける手首の位置に、 $d=300\text{mm}$ は肘の付近の位置に相当する。

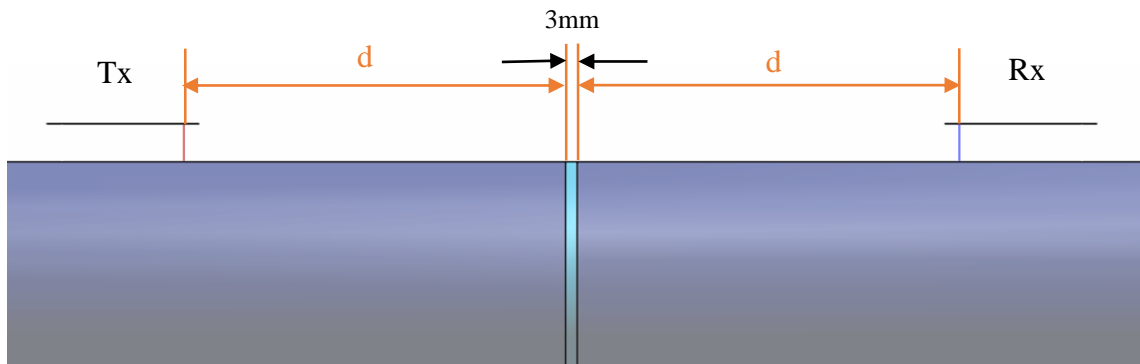


図 3-11 送受信機間の距離 d

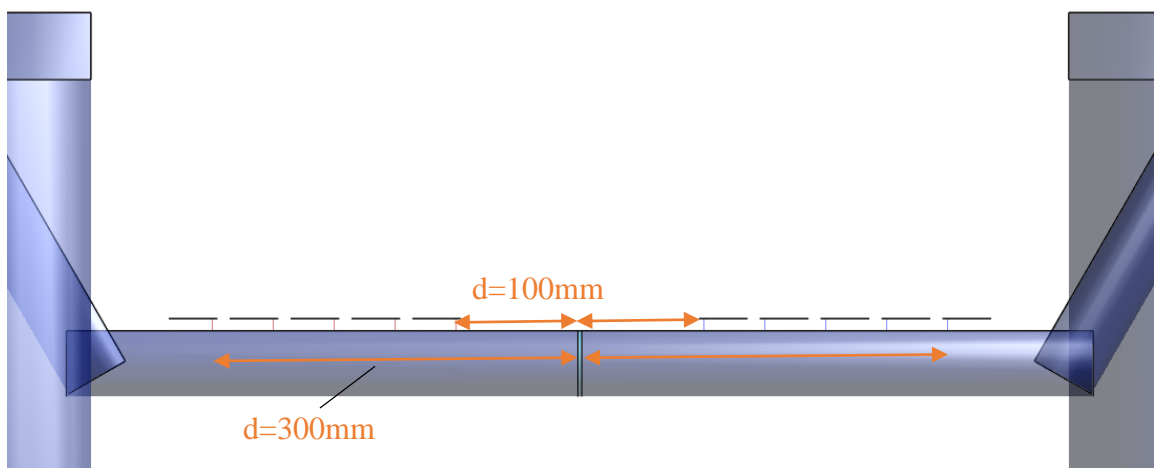


図 3-12 送受信機間の距離と装着位置

3.4.1 送受信機間の距離と電界強度分布

1 電極型送信機を用いた場合の $d=100, 200, 300\text{mm}$ における電界強度分布を側面(YZ面)と上面(XY面)から見たものをそれぞれ図 3-13 から 3-15 に示す。電界観測面や規格化に用いた値は 2.5 節と同様である。

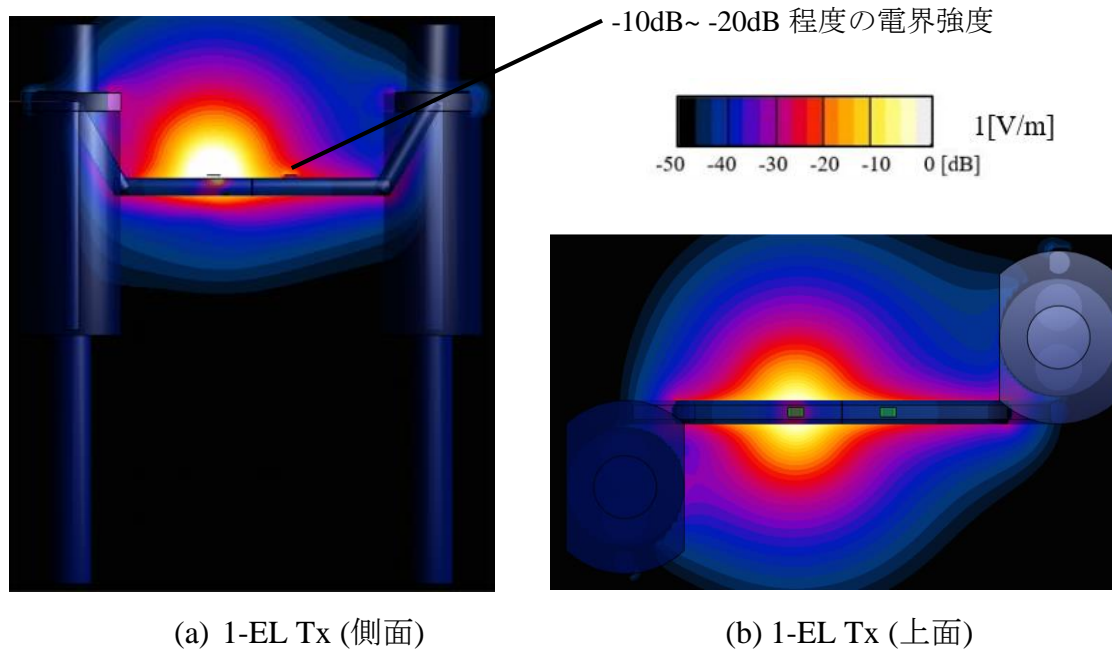


図 3-13 $d=100\text{mm}$ における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布(再掲)

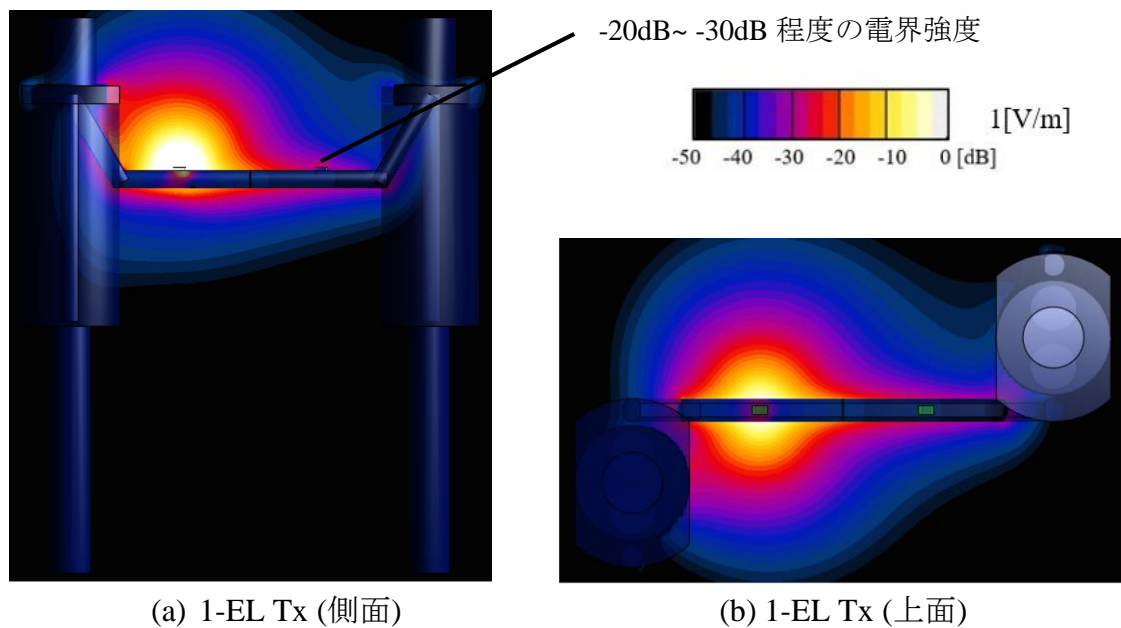


図 3-14 $d=200\text{mm}$ における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

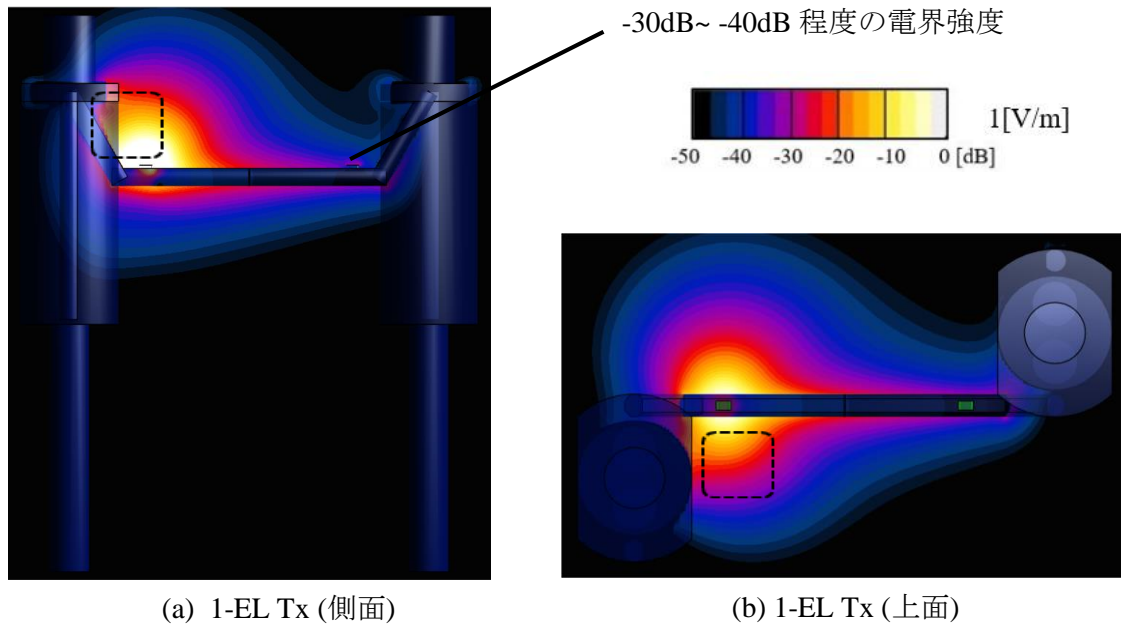


図 3-15 d=300mm における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

1 電極型送信機を用いた場合は、図 3-13~3-15 の電界分布からわかるように送受信機間の距離が遠くなるほど送信機の上部に局所的に分布する電界が上腕部に寄り、受信機まで届く電界の強さが小さくなるため受信信号は大きく減少することが予想される。これは図 3-13(a)から受信機周辺の電界強度は-10dB から-20dB 程度分布しているのに対し、図 3-15(a)では-30dB から-40dB 程度しか分布していないことから確認できる。二者の人体モデルの前腕部周辺にのみ局所的に電界が分布することから、1 電極型送信機を用いる場合は送受信機間の距離の影響を大きく受けることが推測される。また、0dB から-20dB 程度までの強い電界が図 3-15(a)においては送信機上部から上腕部にかけての空間の範囲に、同図(b)においては送信機から胴体にかけての空間の範囲に分布していることが確認でき(黒で囲った点線枠)、送信機が上腕部や胴体などの体の一部に近い位置に配置された場合、誘電体である体の一部との距離が近くなることで両者の間の空間の容量性結合が強まることがわかった。

次に、2電極型送信機を用いた場合の $d=100, 200, 300\text{mm}$ における電界強度分布を側面(YZ面)と上面(XY面)から見たものをそれぞれ図3-16から図3-18に示す。電界観測面や規格化に用いた値は1電極型送信機を用いた場合と同様である。

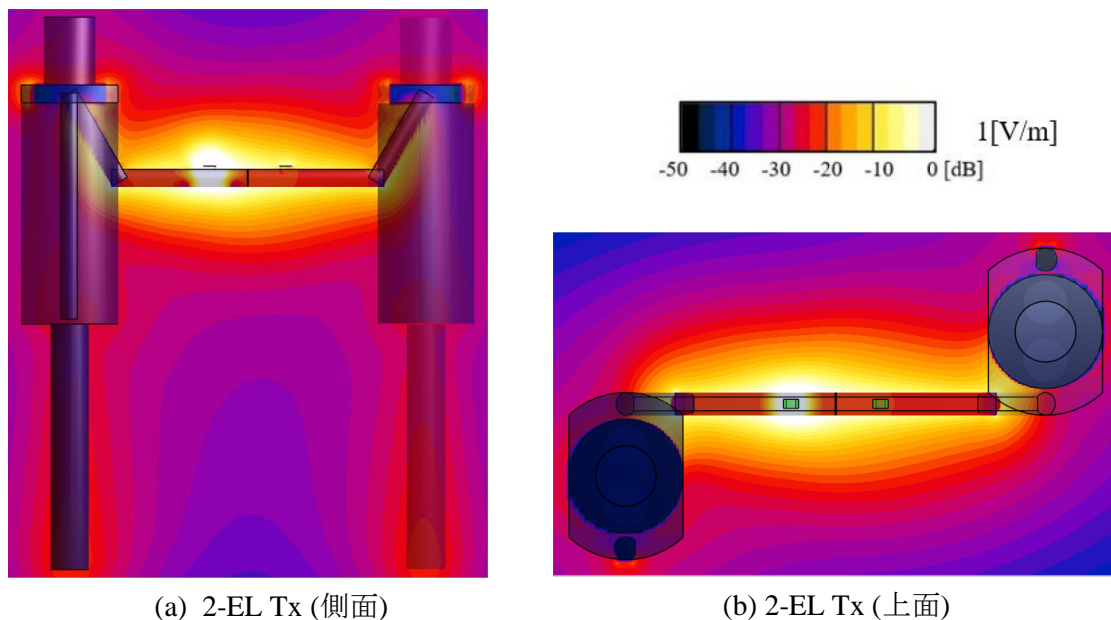


図3-16 $d=100\text{mm}$ における2電極型送信機を用いた場合の電界強度分布(再掲)

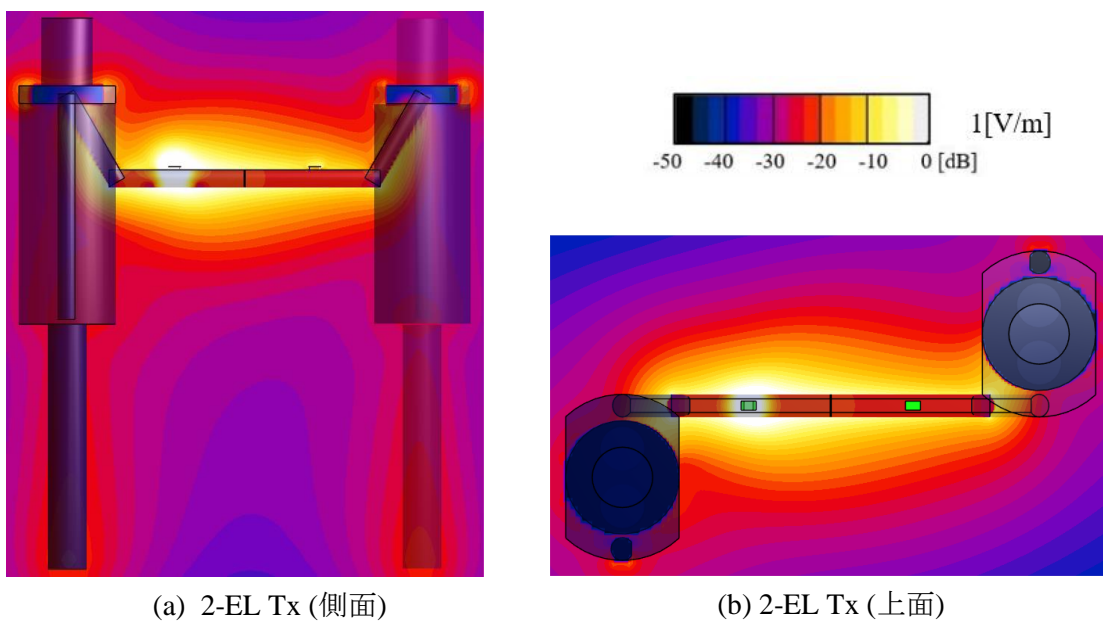


図3-17 $d=200\text{mm}$ における2電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

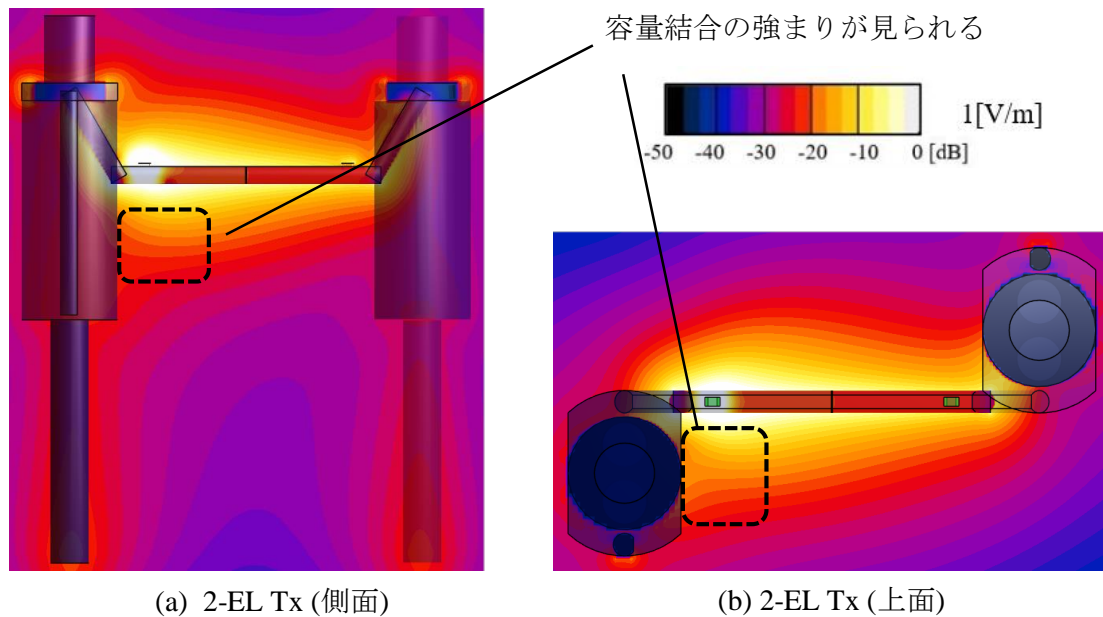


図 3-18 $d=300\text{mm}$ における 2 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

図 3-20~3-22 から、2 電極型送信機を用いた場合は、送受信機間の距離に関わらず電界が前腕部に沿って(Y 軸)広い範囲に分布しているため距離による影響を大きく受けないことが推測される。これは受信機周辺に -20dB 程度の強い電界が常に分布していることから確認できる。また、二者の人体モデルの体全体に分布する電界は大きな変化がほとんど見られないことから、2 電極型送信機を用いる場合は送受信機間の距離の影響をあまり受けず 1 電極型送信機を用いるよりも安定した信号を受信できると考えられる。送受信機間の距離が最も大きくなる $d=300\text{mm}$ において、1 電極型送信機を用いたときの考察でも述べたように送信機と上腕部や胴体間の空間の容量性結合が強まっていることが図 3-18 から確認できる。

3.5.3 送受信機間の距離と伝送特性

表 3-5 に 1 電極型送信機を用いたときの送受信機間の距離と伝送特性の関係を、表 3-6 に 2 電極型送信機を用いたときの送受信機間の距離と伝送特性の関係を示す。また、4 種類の電極接触条件における送受信機間の距離と伝送特性の関係を表したグラフを図 3-19 に示す。

表 3-5 1 電極送信機を用いた場合の送受信機間の距離と伝送特性

d [mm]	1-EL Rx	2-EL Rx
100	-64.0 dB	-71.0 dB
150	-68.9 dB	-72.8 dB
200	-72.0 dB	-74.0 dB
250	-74.4 dB	-74.9 dB
300	-76.5 dB	-75.9 dB

表 3-6 2 電極送信機を用いた場合の送受信機間の距離と伝送特性

d [mm]	1-EL Rx	2-EL Rx
100	-43.9 dB	-46.2 dB
150	-45.4 dB	-46.6 dB
200	-46.6 dB	-47.0 dB
250	-47.6 dB	-47.3 dB
300	-48.6 dB	-47.5 dB

送信機間の距離が離れるにつれ伝送特性は単調に減少することが確認された。2 電極型送信機-1 電極型受信機では最大 4.7dB, 2 電極型送信機-2 電極型受信機では最大 1.3dB 程度しか減少しないのに対し、1 電極型送信機-1 電極型送信機では最大 12.5dB, 1 電極型送信機-2 電極型受信機では最大 4.9dB 減少することから、2 電極型送信機よりも 1 電極型送信機の方が送受信機間の距離による影響を大きく受けることがわかる。この結果は、1 電極型送信機を用いた場合は 2.5 節で考察したように、送受信機間の空間の容量性結合による通信経路を形成するため、送受信機間の空間が離れてしまうことによる影響を大きく受けたと考えられる。それに対し、2 電極型送信機を用いた場合は送受信機間の空間を介する容量性結合よりも、腕内部を通る微弱な電流による経路が支配的であるため、送受信機間の距離による影響を受けにくくなったと考えられる。また、受信機の電極数による比較から、送信機の電極数によらず距離がある一定以上離れた時、伝

送特性の逆転が確認された。1電極型送信機では $d=275\text{mm}$ 、2電極型送信機では $d=225\text{mm}$ 付近で受信機電極数による伝送特性の逆転が見られる。これは、3.2節で考察したように、2電極受信機を用いると、受信機側でグラウンドとして機能する回路基板が、導線とグラウンド電極を介して人体につながっているため、回路基板のみならず人体の体幹を含む大きなグラウンドを形成し、安定した伝送特性が得られるため、送受信機間の距離による影響が小さくなり逆転が起こったと考えられる。

以上の結果から、送受信機の距離による影響を受けにくい2電極型送信機を用いると安定した通信を行えることがわかった。また、最も大きな伝送特性が得られるのは腕時計を装着する手首の位置に送受信機を配置し2電極型送信機-1電極型受信機を用いた場合であるが、送受信機が離れた場合を考慮すると2電極型受信機を用いれば最大1.3dB程度($d=100\text{mm}$ と 300mm を比較したとき)しか伝送特性の変化が見られないため、安定した信号を受信することを視野に入れて機器設計を行う際には2電極型受信機を用いた方がよい。

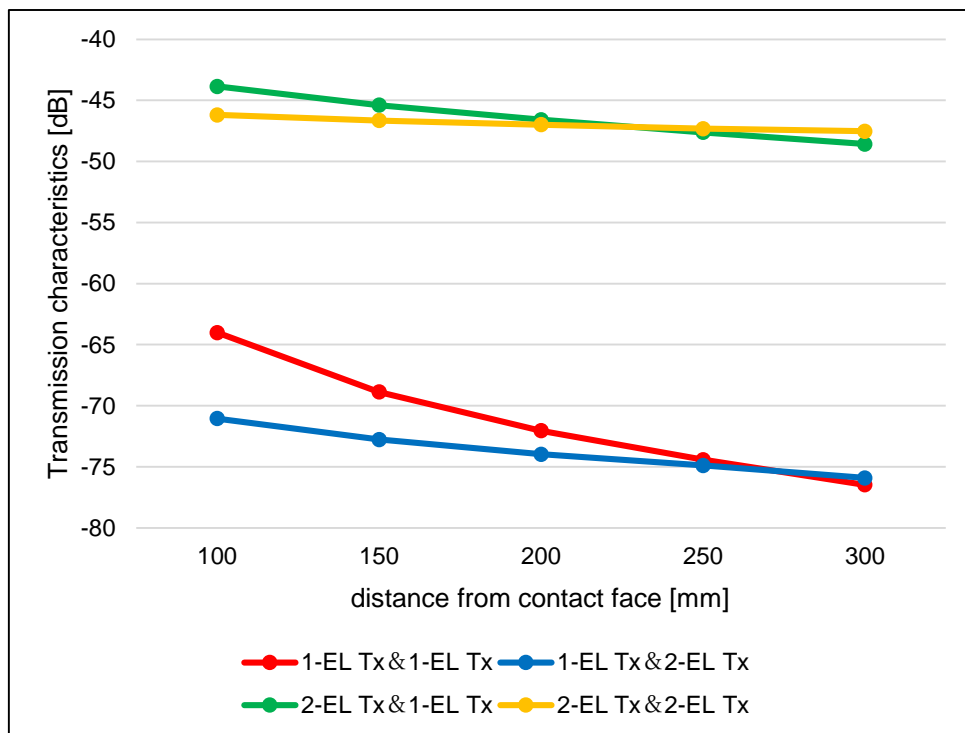


図 3-19 各電極接触条件における送受信機間の距離と伝送特性の関係

3.6 握手をする手の表面の接触面積による影響

2章において、1 電極型送信機では腕部上部の送受信機間の容量性結合、2 電極型送信機ではそれに加え腕内部に流れる電流が通信に寄与することがわかった。そのため、接触面を介して腕内部に流れる電流は握手をする手の表面の接触面積と関係性があると考えられる。本節では、握手をする手の表面の接触面積によって電極接触条件ごとにどの程度伝送特性に影響を与えるか定量的に評価することを目的とする。図 3-20 に示すように、指の本数を増やすことによって接触させる面積を変化させ、これを再現してモデル化したものを図 3-21 に示す。指を模した円筒モデル (直径 ϕ 10mm, 長さ 70mm) の、直径 ϕ を 10mm ごとに最大 50mm まで大きくすることによって指の本数を増やす条件を再現する。 $\phi=10\text{mm}$ は 1 本の指同士を、 $\phi=50\text{mm}$ は握手を表している。また、以下の節においては接触面積の変化を接触面の直径 ϕ の大きさの変化で表す。

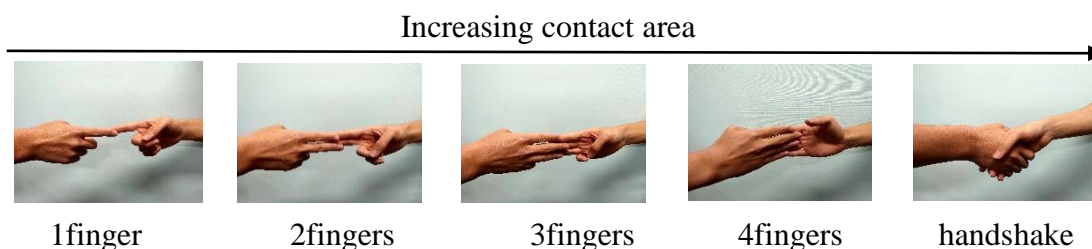


図 3-20 指の本数による接触面積の変化

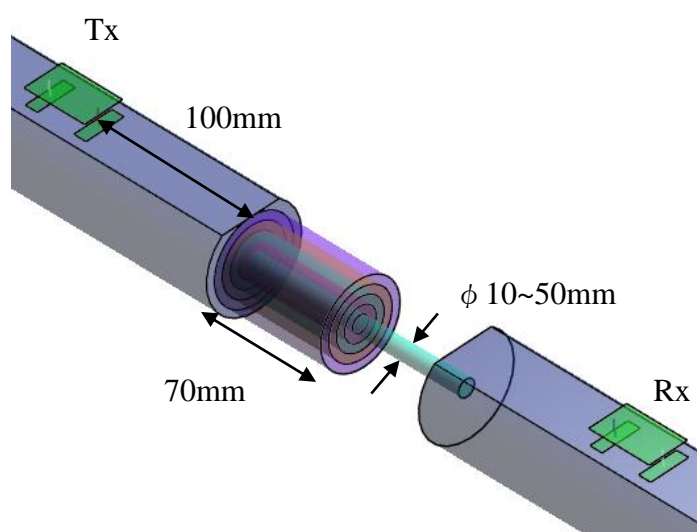


図 3-21 接触面積を変化させた人体モデル(拡大図)

3.6.1 手の表面の接触面積と電界強度分布

接触面積が最小, 中間, 最大となる点を代表して比較することにより手の表面の接触面積によって電界分布に現れる変化を調べた.

まず, 1 電極型送信機を用いた場合の接触面の直径 $\phi = 10\text{mm}$, 30mm , 50mm における電界強度分布を側面(YZ 面)から見たものと送受信機を含む腕部周辺について拡大した図を図 3-22 から図 3-24 に示す. 電界観測面や規格化に用いた値は 2.4 節と同様である.

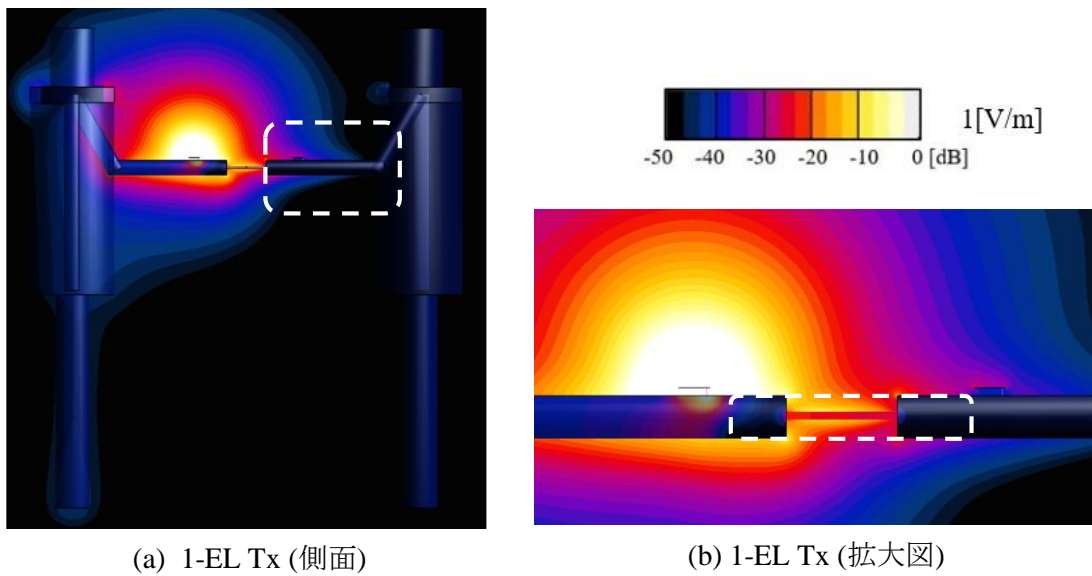


図 3-22 $\phi = 10\text{mm}$ における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

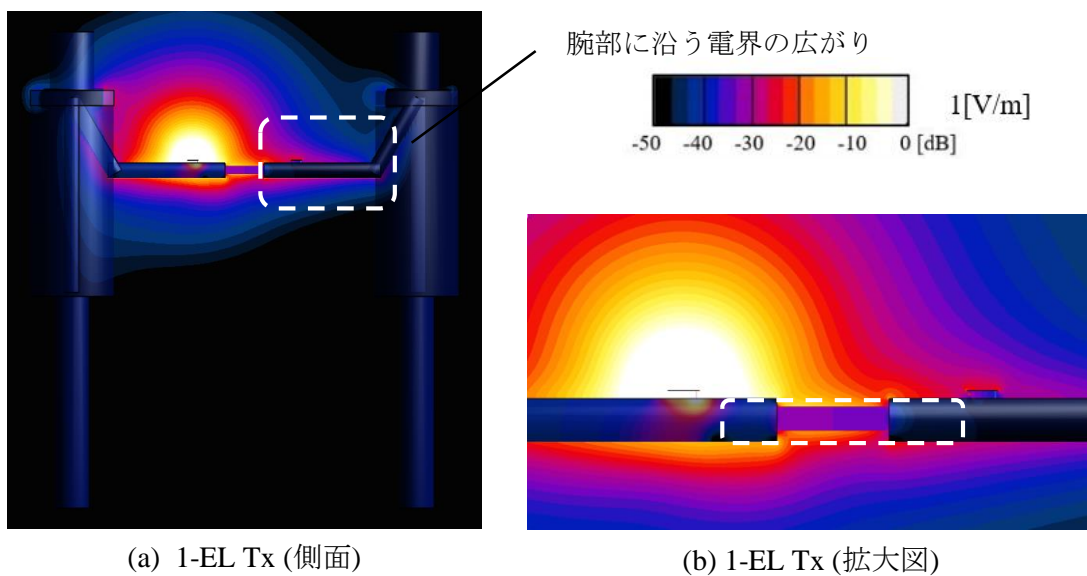


図 3-23 $\phi = 30\text{mm}$ における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

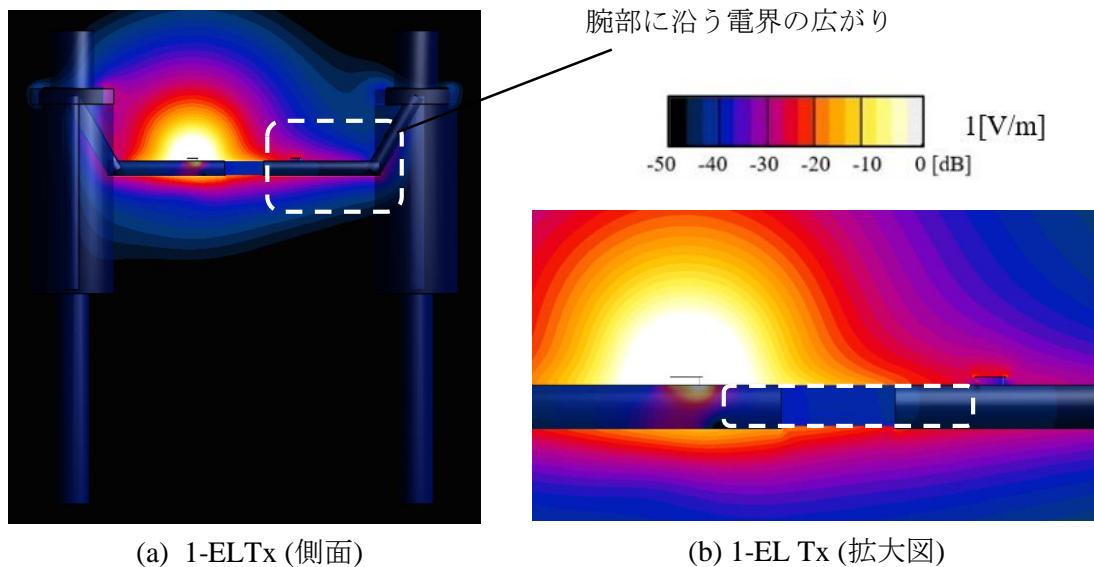


図 3-24 $\phi=50\text{mm}$ における 1 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

1 電極型送信機を用いた場合は、図 3-22~3-24 の側面から見た体全体を含む電界分布からわかるように直径 ϕ が大きくなり接触面積が増えるほど受信機を装着している前腕部の肘に近い範囲まで電界が浸透することがわかる。特に、接触面積が最も小さい $\phi=10\text{mm}$ においては-35dB 程度の電界が手部から受信機にかけての範囲にしか分布しないのに対し、 $\phi=30\text{mm}$ や 50mm では上腕部に近い範囲までにその分布が広がっている。また、(b)の拡大図による比較から、指内部の電界に着目すると $\phi=10\text{mm}$ では-20dB 程度、 $\phi=30\text{mm}$ では-30dB 程度、 $\phi=50\text{mm}$ では-40dB 程度の強さの電界が見られたが、腕内部にまではその強さの電界が浸透しておらず、接触面を通過して腕内部を流れる電流は非常に微弱であることがわかる。しかし、接触面積が大きいほど腕部の長さ方向に電界が広がることを確認できるため、1 電極型送信機においては受信機に伝わる信号は接触面積が大きくなるほど増大すると考えられる。

3.6 握手をする手の表面の接触面積による影響

次に、2電極型送信機を用いた場合の接触面の直径 $\phi=10\text{mm}$, 30mm , 50mm における電界強度分布を側面(YZ 面)から見たものと送受信機を含む腕部周辺について拡大した図をそれぞれ図 3-25 から図 3-27 に示す。電界観測面や規格化に用いた値は 1 電極型送信機を用いた場合と同様である。

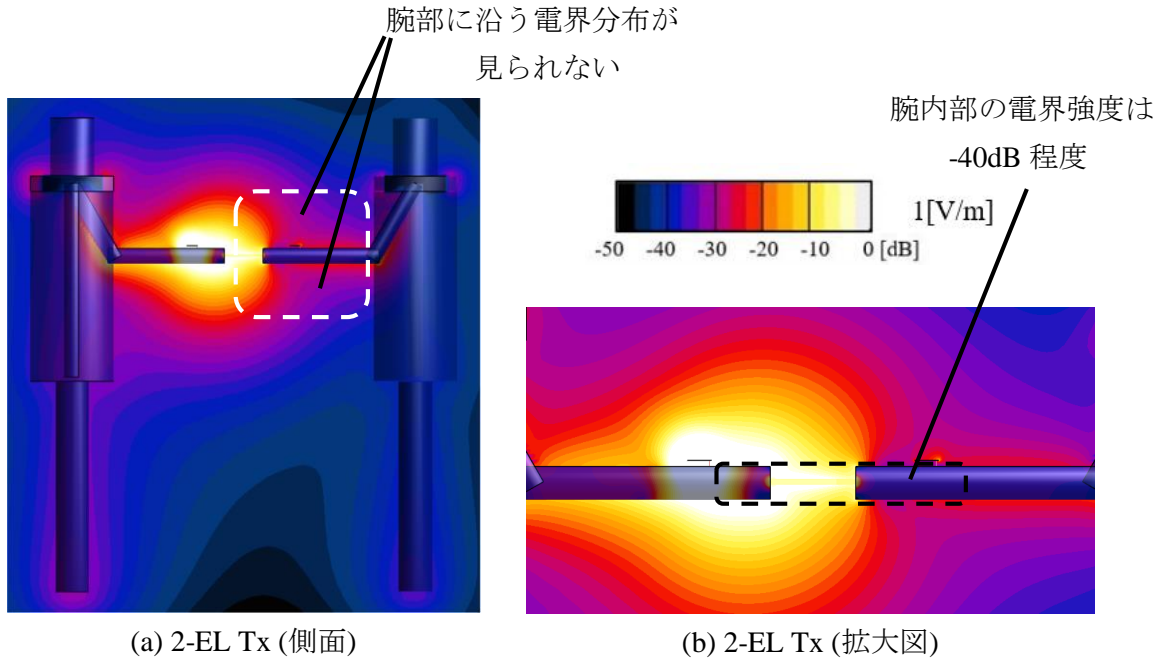


図 3-25 $\phi=10\text{mm}$ における 2 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

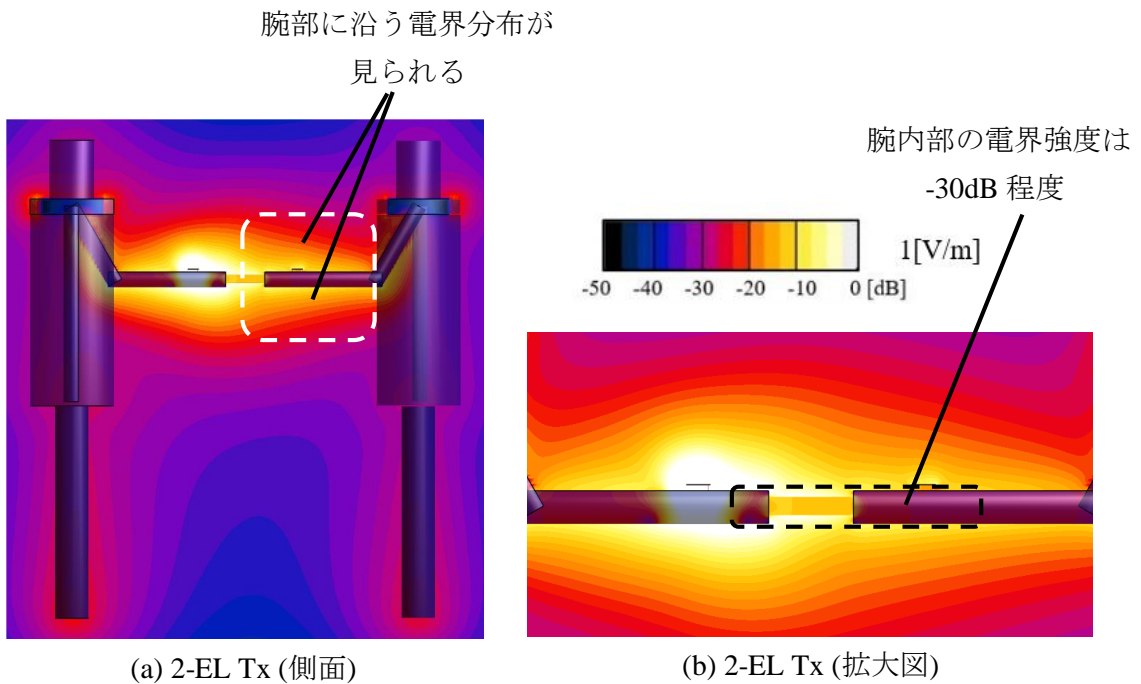


図 3-26 $\phi=30\text{mm}$ における 2 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

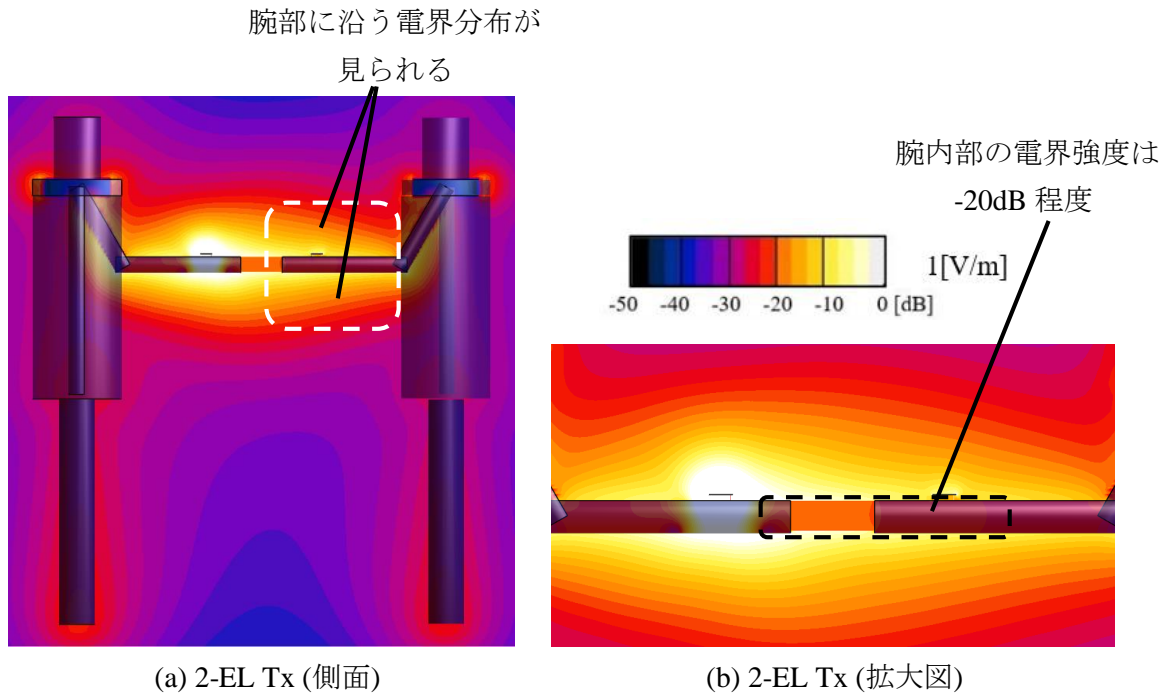


図 3-27 $\phi=50\text{mm}$ における 2 電極型送信機を用いた場合の電界強度分布

図 3-25～3-27(a)側面図から、2 電極型送信機を用いた場合は、接触面積が大きくなるにつれて二者間の体全体に電界が広く分布する傾向が見られる。 $\phi=10\text{mm}$ においては、送信機から腕部上下に対称的に広がる 0dB から -20dB 程度の電界が受信機まで浸透せず、受信機の手前の接触面付近にまでしか分布していない。また、-30dB 程度の強さの電界は受信機を装着している人体の上腕部までにしか分布せず、接触面積が小さいことによる影響が電界分布に現れていることが確認できる。 $\phi=30\text{mm}$ や 50mm においては、送信機から広がる 0dB から -20dB 程度の電界が接触面積の増大によって腕部の長さ方向に広がり、受信機を装着した腕部の上下の空間にまで広く分布していることが読み取れる(白の点線枠)。このことから、握手をしている手首に送受信機を装着している場合、送信機から受信機にできるだけ大きな信号を伝達させるには信号が伝わる方向において接触面をできるだけ大きくとる必要があると考えられる。また、送受信機を含む腕部周辺の拡大図から、接触面積が大きくなるほど腕内部にまで電界が浸透していることが確認できる(黒の点線枠)。 $\phi=10\text{mm}$ において受信機直下の腕内部周辺に -40dB 程度の電界が分布しているのに対し、 $\phi=30\text{mm}$ 、 50mm においてはそれぞれ -30、-20dB 程度の電界が分布しており、接触面積が大きくなったことにより 10dB ごとに電界強度が増大した。よって、1 電極型送信機を用いた場合よりも全体における電界分布や腕内部の分布が大きく変化していることが確認できるため、2 電極型送信機は接触面の面積変化による影響を 1 電極型送信機よりも大きく受けることが考えられる。

3.6.2 手の表面の接触面積と伝送特性

1 電極送信機を用いた場合の接触面積と伝送特性の関係を表 3-7 に、2 電極送信機を用いた場合の接触面積と伝送特性の関係を表 3-8 に示す。また、4 種類の各電極接触条件における接触面積と伝送特性の関係を表したグラフを図 3-28 に示す。

表 3-7 1 電極送信機を用いた場合の接触面の直径(接触面積)と伝送特性

	ϕ 10mm	ϕ 20mm	ϕ 30mm	ϕ 40mm	ϕ 50mm
1-EL Rx	-76.2 dB	-72.5 dB	-70.7 dB	-69.8 dB	-69.5 dB
2-EL Rx	-80.1 dB	-75.1 dB	-73.0 dB	-72.1 dB	-71.7 dB

表 3-8 2 電極送信機を用いた場合の接触面の直径(接触面積)と伝送特性

	ϕ 10mm	ϕ 20mm	ϕ 30mm	ϕ 40mm	ϕ 50mm
1-EL Rx	-63.5 dB	-52.0 dB	-48.3 dB	-46.8 dB	-46.2 dB
2-EL Rx	-60.0 dB	-52.3 dB	-49.5 dB	-48.3 dB	-47.7 dB

接触面が最小の $\phi=10\text{mm}$ と最大の $\phi=50\text{mm}$ において伝送特性の差を比較すると、1 電極型送信機では 6.7dB から 8.4dB、2 電極型送信機では 12.3dB から 17.3dB の差が見られ、接触面積による影響は 2 電極型送信機の方が大きいため接触面と腕内部を通る電流が通信に大きく寄与していることが推測される。また、1 電極送信機よりも 2 電極送信機を用いた方が約 13dB から 23dB 伝送特性が増大することが確認された。

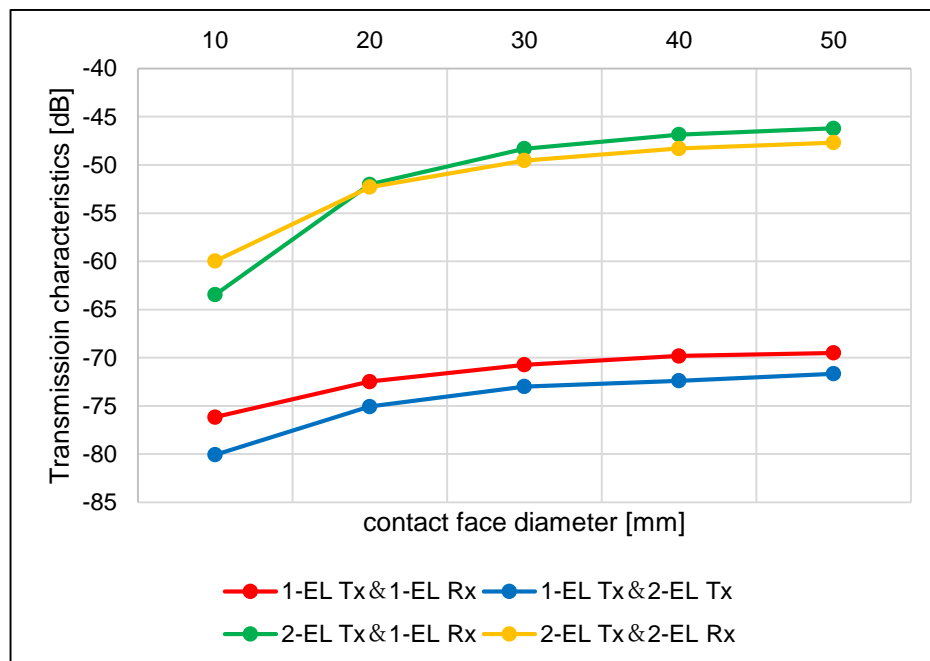


図 3-28 各電極接触条件における接触面積と伝送特性の関係

3.6.3 手の表面の接触面積と腕内部を流れる電流

接触面積の増減による腕内部を流れる電流量の変化について電極接触条件ごとに定量的に調べるため、図3-29の赤色で示す箇所に円形のセンサーを取り付け、各接触面の断面を通る電流量と、送信機を装着した前腕部の断面(Tx 側)、受信機を装着した前腕部の断面(Rx 側)を通る電流量を求めた。受信電極数による断面を通る電流量の変化はほとんど見られなかったため1電極受信機の結果について表3-9に示す。また、表3-9をグラフにして表したものを図3-30に示す。

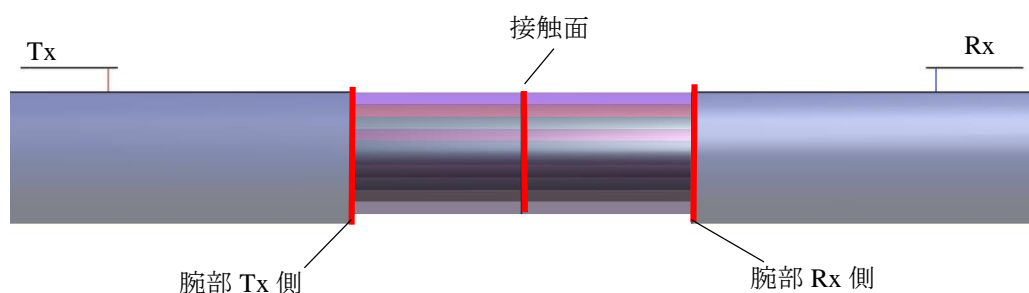


図3-29 接触面と腕部の断面を通る電流を計測するセンサーの位置

表3-9 送信機電極数による接触面の直径(接触面積)と腕内部を通る電流量

		φ 10mm	φ 20mm	φ 30mm	φ 40mm	φ 50mm
1-EL Tx	接触面	3.2 μA	8.5 μA	12.0 μA	14.2 μA	15.3 μA
	腕部 Tx 側	5.5 μA	11.1 μA	14.9 μA	17.3 μA	18.7 μA
	腕部 Rx 側	2.9 μA	8.1 μA	11.3 μA	13.1 μA	14.0 μA
2-EL Tx	接触面	32.6 μA	86.2 μA	122.8 μA	143.9 μA	156.3 μA
	腕部 Tx 側	42.5 μA	97.7 μA	134.0 μA	155.1 μA	167.4 μA
	腕部 Rx 側	35.9 μA	90.2 μA	124.3 μA	143.1 μA	153.2 μA

接触面や腕内部の断面を通る電流量は、1電極型送信機より2電極型送信機を用いた方が8から10倍程度の電流量が得られ、2.5節や2.6節で考察した2電極型送信機を用いた場合の腕内部を流れる電流による伝送特性への影響を定量的に説明した。1電極型送信機を用いたときに流れる電流量は接触面の直径がφ10mmからφ50mmに増え接触面積が25倍に増加しても約12~13μA程度しか電流量が変化せず、接触面積による影響は非常に小さく、腕内部を通る微弱な電流による経路は通信に寄与しないことが考えられる。2電極型送信機を用いた場合は面積が25倍に増加したとき、電流量が約117~124μA程度増加し接触面積による影響を大きく受けることが図3-39グラフの傾

きからもわかる。これらの結果は 1 電極型送信機は空間による容量性結合を、2 電極型送信機は腕内部を流れる電流による経路をメインとする伝送経路を形成することを裏付けている。また、送信機の信号源から流出する電流量については、1 電極型送信機では約 0.3mA、2 電極型送信機では約 7.9mA であることが解析結果からわかっているため、2 電極型送信機を用いた方が大きな電流を供給できることがわかり、これによって腕内部に流れる電流量も 1 電極型より 2 電極型送信機の方が大きく伝送特性に影響を与えらる。

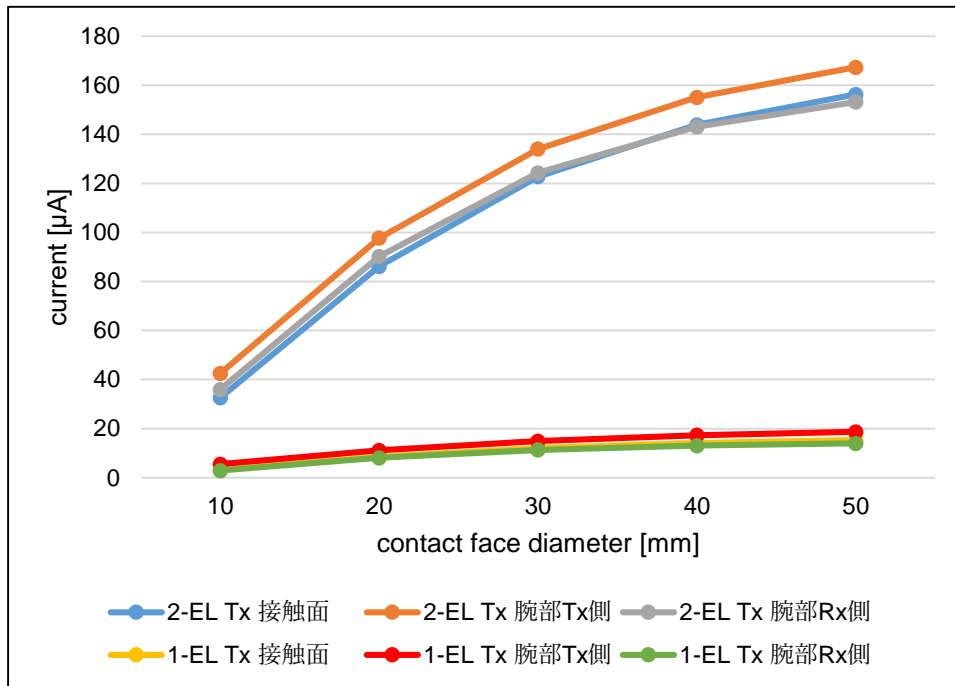


図 3-30 各接触面積による接触面と腕部の断面を通る電流量

3.7 まとめ

本章では、二者間における人体通信の伝送特性に影響を与える要因について解析モデルを変化させることで電極接触条件ごとに評価した。

装着箇所による影響を調べた結果、二者間の人体通信においては、握手をしている手首に送受信機を装着する以外の利用状況では伝送特性が 40dB から 70dB 減少し、送信機からの信号を十分に受信できず通信を行えないことがわかり、二者間において人体通信技術を利用した通信を行う際には握手をしている手首にウェアラブル機器を装着する必要があることがわかった。

回路基板の面積による影響を調べた結果、1 電極型送信機を用いた方が回路基板の面積による伝送特性の影響を大きく受けることがわかり、腕時計サイズの回路基板の面積の 4 倍である名刺サイズの回路基板を用いると伝送特性が 10dB から 15dB 程度増大することがわかった。受信電極に着目したとき、2 電極型受信機を用いた方が回路基板の面積による影響を受けにくいことがわかり、体を含めた人体を体幹とするグラウンドを形成するため通信が安定することがわかった。日常生活における利便さを考えたとき、個人の腕に合う適切なサイズの回路基板を用いた方がよいため、回路基板はあまり大きな構造をとれず、安定した通信も考慮に入れて実用化する場合、2 電極型送信機-2 電極型受信機の電極構造を採用した方がよいと考えられる。

胴体間の距離による影響を調べた結果、伝送特性や電界分布、電界ベクトル分布などによる比較から電極接触条件によらずほとんど影響を受けないことがわかり、送受信機を装着した腕部周辺を含む限られた範囲のみが通信に寄与していると考えられる。

送受信機間の距離による影響を調べた結果、1 電極型送信機-1 電極型送信機では最大 12.5dB、1 電極型送信機-2 電極型受信機では最大 4.9dB の伝送特性の減少が見られ、2 電極型送信機と比較すると 1 電極型送信機の方が送受信機間の距離による影響を大きく受けることがわかった。また、受信電極数に着目すると、2 電極型受信機を用いた場合送受信機の距離が最も離れた肘に近い位置にあったとしても伝送特性が最大 1.3dB しか変動しないため距離に寄らず安定した通信を行えることがわかった。

握手をする手の表面の接触面積による影響を調べた結果、直径が最小となる $\phi=10\text{mm}$ と最大となる $\phi=50\text{mm}$ において伝送特性の差を比較すると、1 電極型送信機では最大 8.4dB、2 電極型送信機では最大 17.3dB の差が見られ、接触面積による影響は 2 電極型送信機の方が大きいことがわかった。また、接触面や腕部断面を流れる電流量について比較した結果、直径が $\phi=10\text{mm}$ から $\phi=50\text{mm}$ に増え接触面積が 25 倍に増加しても 1 電極型送信機では約 $12\sim 13\ \mu\text{A}$ 程度しか電流量が変化しないのに対し、2 電極型送信機では電流量が約 $117\sim 123\ \mu\text{A}$ 程度増加し接触面積による影響を大きく受けることがわかり、腕内部を流れる電流が主要の通信経路であることを定量的に説明した。

第 4 章 二者間の人体通信における信号伝送経路

4.1 はじめに	58
4.2 送信機電極接触条件による信号伝送経路	59
4.3 受信機電極接触条件による信号伝送経路	62
4.4 電極接触条件による信号伝送モデル	66
4.4.1 1 電極型送信機における信号伝送モデル	66
4.4.2 2 電極型送信機における信号伝送モデル	68
4.5 まとめ	71

4.1 はじめに

本章では、第2章、第3章の解析結果で得られた電界強度分布や電界ベクトル分布、また伝送特性解析結果などをもとに、二者間の人体通信における信号伝送経路について検討する。

まず、送信機の電極接触条件による信号伝送経路について検討し、1電極型送信機と2電極送信機それぞれを用いた場合での通信経路を検討する。次に、受信機の電極接触条件によって伝送特性に現れる差異を、受信機に着目した電界強度分布などから、信号伝送モデルによって説明する。最後に、送受信機の電極接触条件両方を考慮した信号伝送モデルを示し、電極接触条件による信号伝送経路の違いが伝送特性の差異を生むことを説明し二者間の人体通信メカニズムについて示す。

4.2 送信機電極接触条件による信号伝送経路

これまでの解析結果のうち、電界強度分布と電界ベクトル分布の結果から電界の繋がりに着目することで通信の主要となる信号伝送経路について検討することができる。図 4-1(a)に電界ベクトル分布をもとに 1 電極型送信機を用いた場合の大まかな信号伝送方向を矢印で示し、図 4-1(b)に通信に寄与される範囲における信号伝送経路を示す。また、これまでの結果から、受信機の電極数による電界強度分布やベクトル分布の変化はほとんど見られなかったため、送信機電極接触条件による大まかな信号伝送経路は受信機接触条件によらず同じ経路を形成する。

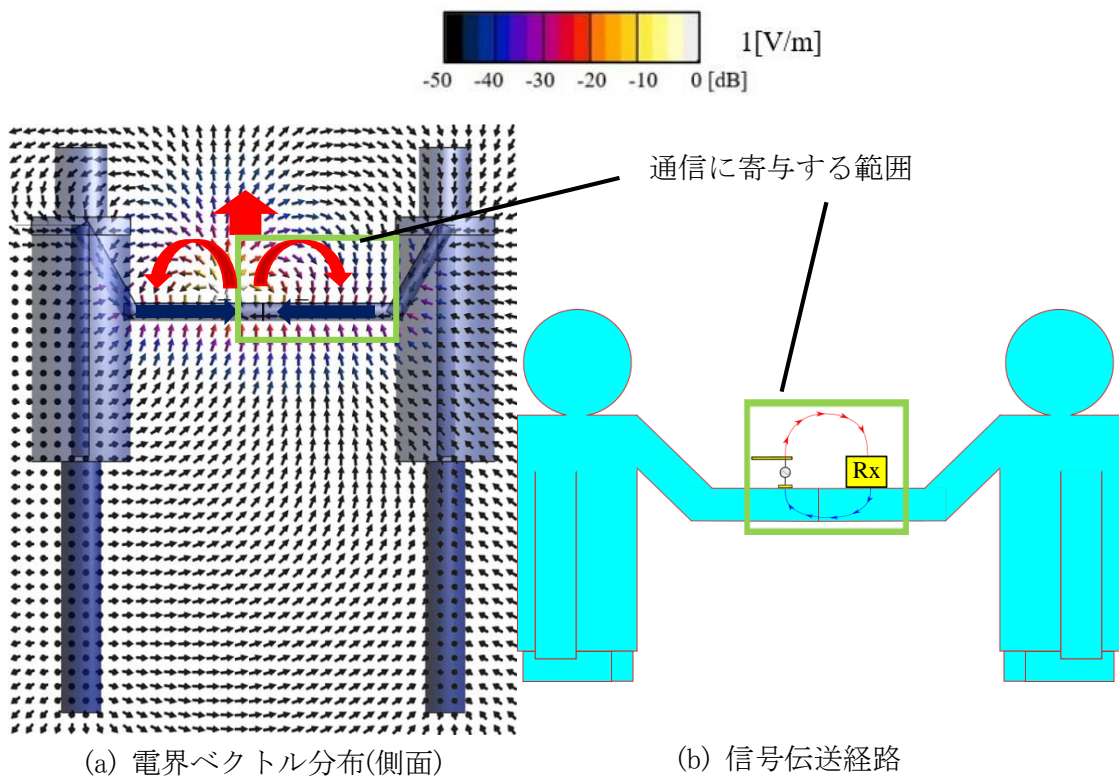


図 4-1 1 電極型送信機を用いた場合の信号伝送経路

図(a)から、1 電極型送信機を用いた場合の電界は送信機上部の空間から左右対称に放出され、受信機や受信機を装着した腕部表面向かったあと腕内部を通り送信機のグラウンド電極に戻ることがわかる。この電界の一連の繋がりは空間中では容量性結合、腕内部では電流の流れを示しており、通信の主要の経路となる受信機を含む範囲における伝送経路を考えると 1 電極型送信機は「送信機-送受信機間の空間の容量性結合(上部のみ)-受信機-腕内部を流れる電流-送信機」による腕部周辺における局所的なループ構造を形成すると考えられる。送信機から対称的に放出された一部の電界が受信機に向かい、残りの上部と反対側の方向に向かう電界は二者間の通信に寄与しないため、1

電極型送信機では信号のロスが大きく伝送特性の減少の要因となることが考えられる。また、3章で様々な要因による影響を調べ電界分布について調べたがその分布の形状はほとんど変化しなかったため、上記で示した伝送経路は常に形成されていると考えられる。

次に、図4-2(a)に電界ベクトル分布をもとに2電極型送信機を用いた場合の大まかな信号伝送方向を矢印で示し、図4-2(b)に通信に寄与される範囲においての信号伝送経路を示す。1電極型送信機と同様に受信機の電極数による電界強度分布やベクトル分布の変化はほとんど見られなかったため、送信機電極接触条件による大まかな信号伝送経路は受信機接触条件によらず同じ経路を形成する。

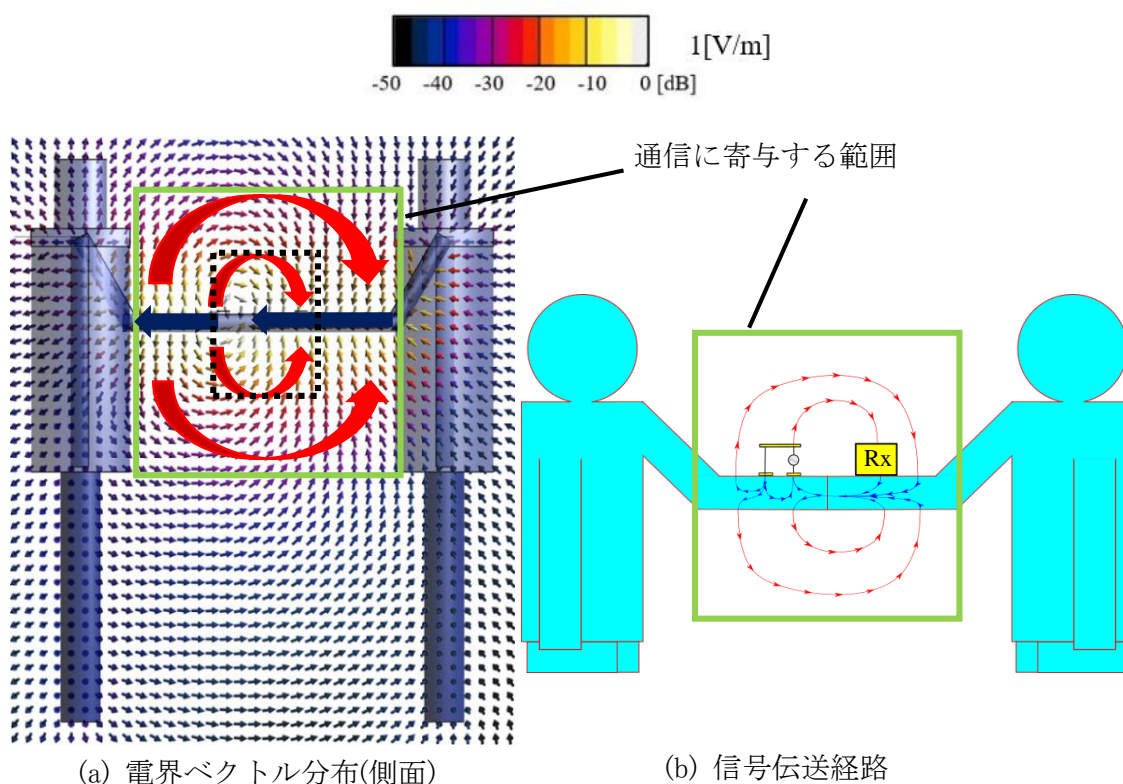


図4-2 2電極型送信機を用いた場合の信号伝送経路

図4-2(b)から、2電極型送信機を用いた場合の電界は、送信機から上下の空間に対称に放出され、受信機や受信機を装着した腕部表面に向かったあと腕内部を通り送信機に戻るのに加え(黒い点線枠内)、送信機から腕内部を通り空間介して受信機を装着した肘に近い腕部表面に向かったあと腕内部を通り送信機に戻る大局的な経路(緑の枠線と黒の点線枠の間)が形成されることがわかる。これらは受信機を含んだ経路となっており1電極型送信機と同様に信号伝送経路を考えると、「送信機-送受信機間の空間の容量性結合(上下部)-受信機-腕内部を流れる電流-送信機」の送受信機を含む狭い範囲に加え、

「送信機-腕内部を流れる電流-空間の容量性結合-腕部表面とその内部を流れる電流-送信機」という大局的なループ構造を形成し広い範囲が通信に寄与することがわかり、1 電極型送信機と比較した際の無駄な信号のロスが少なく伝送特性が向上すると考えられる。また、1 電極型送信機と同様に 3 章で様々な要因による影響を電界分布や電界ベクトル分布から調べたがその分布の形状はほとんど変化しなかったため、上記で示した伝送経路は常に形成されていると考えられる。

4.3 受信機電極接触条件による信号伝送経路

第2章と第3章における解析結果から、受信機の電極接触条件は、通信系全体から見た電界強度や電界ベクトルの形状や分布に大きな影響を与えないということが確認され、二者間における人体通信では送信機の電極接触条件が支配的であることがわかった。しかし、受信電極数の違いによる伝送特性の差異は表 2-1 から多少なりとも見られるため、その差異を説明するためにも受信機に着目した電界分布や電界ベクトル分布について詳細に調べ、受信機における信号伝送経路について検討する。

図 4-3 に 1 電極型送信機を用いた場合の受信電極数の違いによる受信機周辺の電界強度分布の比較図を示す。

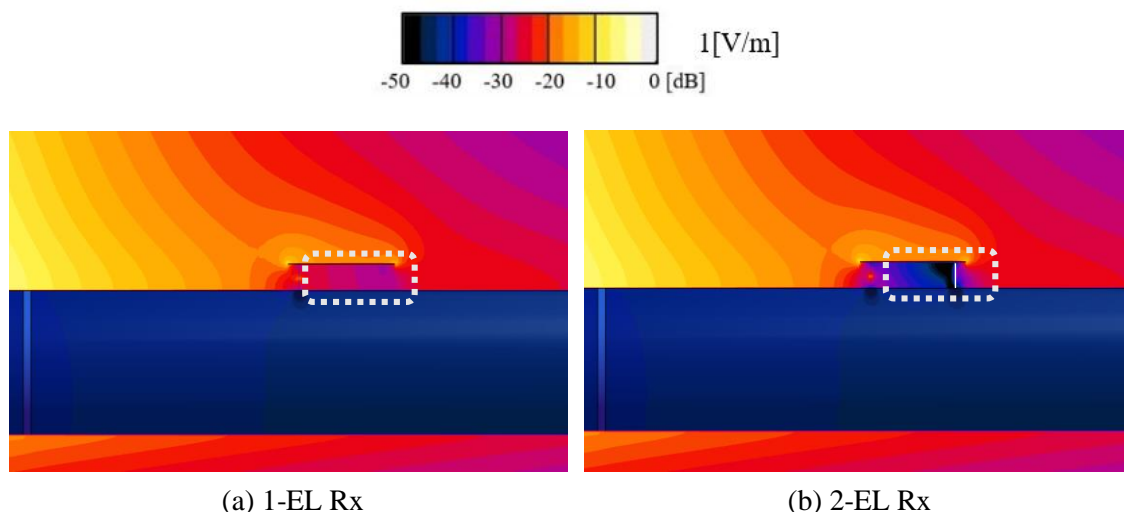


図 4-3 1 電極型送信機を用いた場合の受信機周辺の電界強度分布(拡大図)

図から、受信機の上下左右の周辺における電界分布はほとんど変化しないことがわかるが、回路基板とグラウンド電極間の空間(白の点線枠)に着目すると、(a) 1 電極型受信機では-20dB から-30dB 程度の電界の強さが見られるのに対し、図(b) 2 電極型受信機では-40dB から-50dB 程度しか見られず、20dB 程度電界強度が減少していることが確認された。

次に、図 4-4 に 2 電極型送信機を用いた場合の受信電極数の違いによる受信機周辺の電界強度分布の比較図を示す。

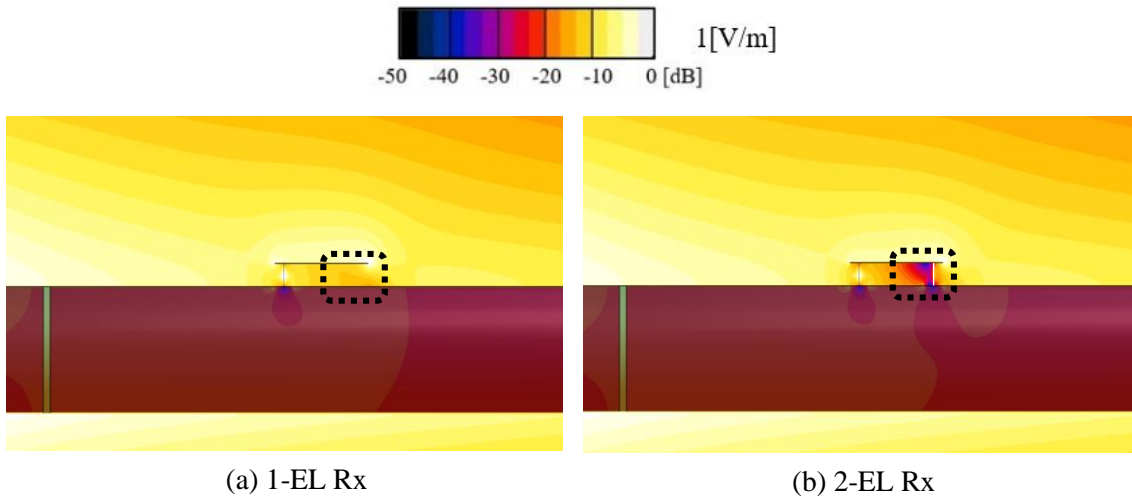


図 4-4 2 電極型送信機を用いた場合の受信機周辺の電界強度分布(拡大図)

2 電極型送信機を用いた場合でも、回路基板とグラウンド電極間の空間(黒の点線枠)に変化が見られ、(a) 1 電極型受信機では 0dB から-10dB 程度、図(b) 2 電極型受信機では -20dB から-30dB 程度の電界強度が分布し 20dB 程度の差が確認された。それ以外の空間においては 1 電極型送信機と同様に変化が見られなかった。

以上から、2 電極型受信機を用いると、回路基板とグラウンド電極が導線によってつながれているため等電位となり、回路基板と人体の腕部間に大きな電位差が得られなくなり電界強度が減少したと考えられ、この分布の差異が 2.3 節での伝送特性の差を生む要因になったと考えられる。

次に電界ベクトル分布からも電界の繋がりを詳細に調べた。図 4-5 に 1 電極型送信機を用いた場合の受信電極数の違いによる受信機周辺の電界ベクトル分布の比較図を示す。

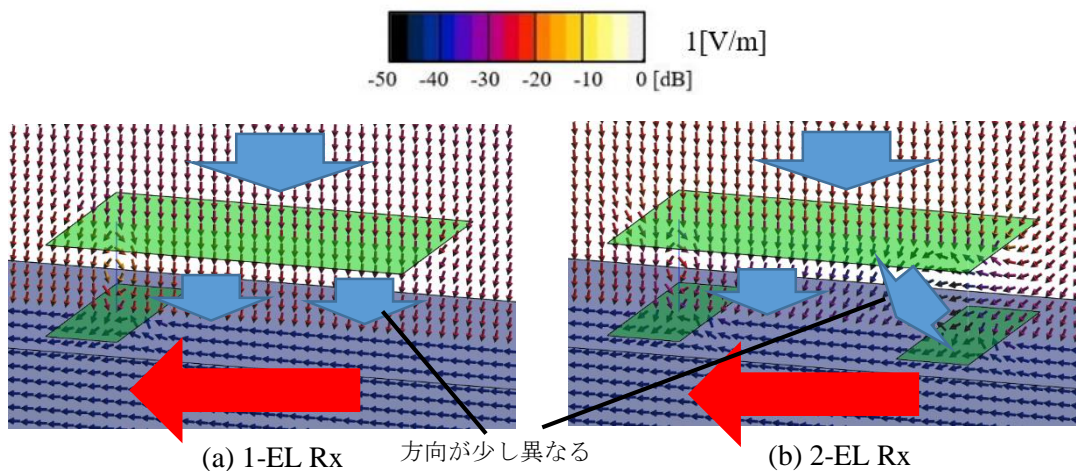


図 4-5 1 電極型送信機を用いた場合の受信機周辺の電界ベクトル分布(拡大図)

図4-5から、どちらの場合においてもその信号伝送経路は受信機上部の空間から回路基板と電極間の空間を伝わり腕部表面に向かう容量性結合と送信機のグラウンド電極に戻る方向である腕内部を流れる電流から成ることがわかった。1電極送信機では腕内部における電界の強さが-40dB以上と弱いため、空間を伝わるキャパシタによる容量成分による経路の方が腕内部のインピーダンスを流れる電流による経路よりも支配的であると考えられる。

次に、図4-6に2電極型送信機を用いた場合の受信電極数の違いによる受信機周辺の電界ベクトル分布の比較図を示す。

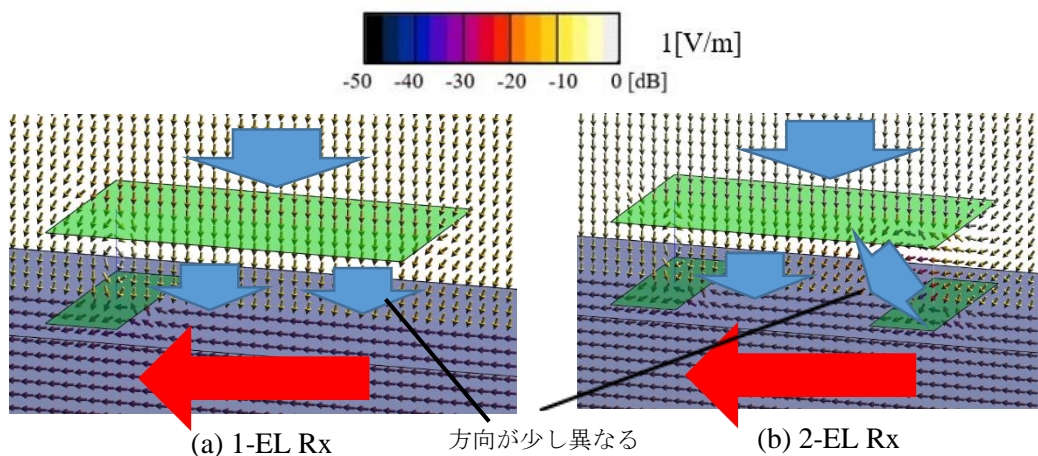


図4-6 2電極型送信機を用いた場合の受信機周辺の電界ベクトル分布(拡大図)

図4-6から、2電極型送信機においても1電極型送信機と同様の信号伝送経路を形成することがわかる。2電極送信機では腕内部における電界の強さが-30dB程度と1電極型送信機と比較した際大きいいため腕内部のインピーダンスを流れる電流による経路は通信に寄与すると考えられる。

以上の結果から、受信電極接触条件によって伝送特性に現れる差異について、図 4-7 に示すモデルに基づいて説明する。

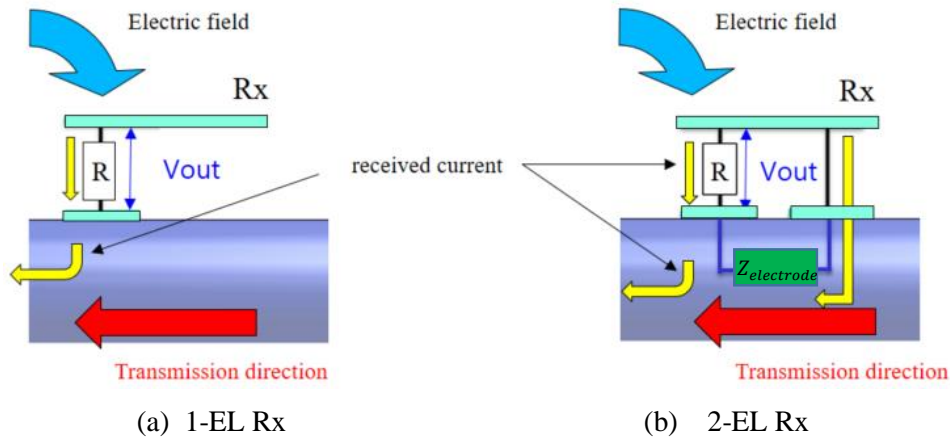


図 4-7 受信機電極接触条件による信号伝送経路

受信電極接触条件によって伝送特性に差異が現れる理由は、図 4-7 に示すように、受信機上部に分布している電界から回路基板に流出入する信号の経路が受信機の電極接触数によって変化するためだと考えられる。(a)の1電極型受信機では、受信機のグラウンド電極が存在しないため、「回路基板-抵抗 R-腕内部-送信機」に向かう1つの経路が形成されるのに対し、(b)の二電極型受信機では、それに加え「回路基板-受信機電極間の腕内部インピーダンス $Z_{electrode}$ -送信機」という新たな経路が形成されると考えられる。このため、2電極型受信機では電極間で無駄な電流が流れ、図の結果からもわかるように回路基板と電極間に大きな電位差が得られず、抵抗 R 間にかかる電位差が小さくなってしまい、1電極受信機よりも得られる電圧が小さくなると考えられる。2電極型受信機は、人体に接触している2電極間のインピーダンスが小さいため受信機の入力インピーダンスを大きくとることができないのに対し、1電極型受信機は一方の電極が浮いていることと同義なため、入力インピーダンスが大きくなり大きな受信電圧が得られたとも説明できる。また、3章における様々な要因による影響の評価や伝送特性の解析結果から2電極型受信機は回路基板の面積による影響や、送受信機間の距離による影響を大きく受けないことがわかっている。これは受信機抵抗で得られる信号が、1電極型受信機は主に回路基板のみが信号の受け皿となり抵抗に流出入するのに対し、2電極型受信機は回路基板と腕部表面を含む体の体幹がグラウンドとして機能し信号をより安定して受け取れるため影響が小さくなったと考えられる。

4.4 電極接触条件による信号伝送モデル

4.2, 4.3 節で得られた結果を踏まえ、本節では二者間における信号伝送経路についてキャパシタや抵抗などの要素を含んだ伝送モデルを考える。

4.3 節において受信機の電極接触条件による信号伝送経路を示したが、受信機の電極数による伝送特性の差異は表 2-1 や 3 章においての結果から送信機の電極数の違いによる差異と比較した際とても小さいといえ、また、電界分布やベクトル分布についても全体から見た変化が非常小さいため、二者間における人体通信の信号伝送路を考えた際の電極接触条件による経路の差異は送信機の接触条件のみに注目すればよい。よって、以下においては受信機の電極接触条件は考慮せず送信機についてのみ着目した信号伝送モデルを示す。

4.4.1 1 電極型送信機における信号伝送モデル

4.2 節図 4-1(b)の通信経路を考慮したキャパシタやインピーダンスの要素を含めた信号伝送モデルを図に示す。また、各要素の構成を以下に示す。

- Z_{TX_out} : 送信機の実出力インピーダンス
- $Z_{contact}$: 握手する手の接触部分のインピーダンス
- $Z_{arm(Tx)}$: 送信機を装着した側の腕部内のインピーダンス
- $Z_{arm(Rx)}$: 受信機を装着した側の腕部内のインピーダンス
- C_{Tx-Rx} : 送受信機間の空間における容量結合インピーダンス
- C_{arm-Tx} : 腕部表面と送信機間の空間における容量結合インピーダンス
- C_{arm-Rx} : 腕部表面と受信機間の空間における容量結合インピーダンス

なお、電極と人体皮膚の接触部分にもインピーダンスが存在するが、本研究ではその影響を考慮した解析を行っていないので、省略する。また、 $Z_{contact}$, $Z_{arm(Tx)}$, $Z_{arm(Rx)}$ は人体中のインピーダンスまたは接触インピーダンスであり RC の並列回路で表現され、 C_{Tx_Rx} , C_{arm-Tx} , C_{arm-Rx} は空間中の容量結合インピーダンスでありキャパシタと等価である。

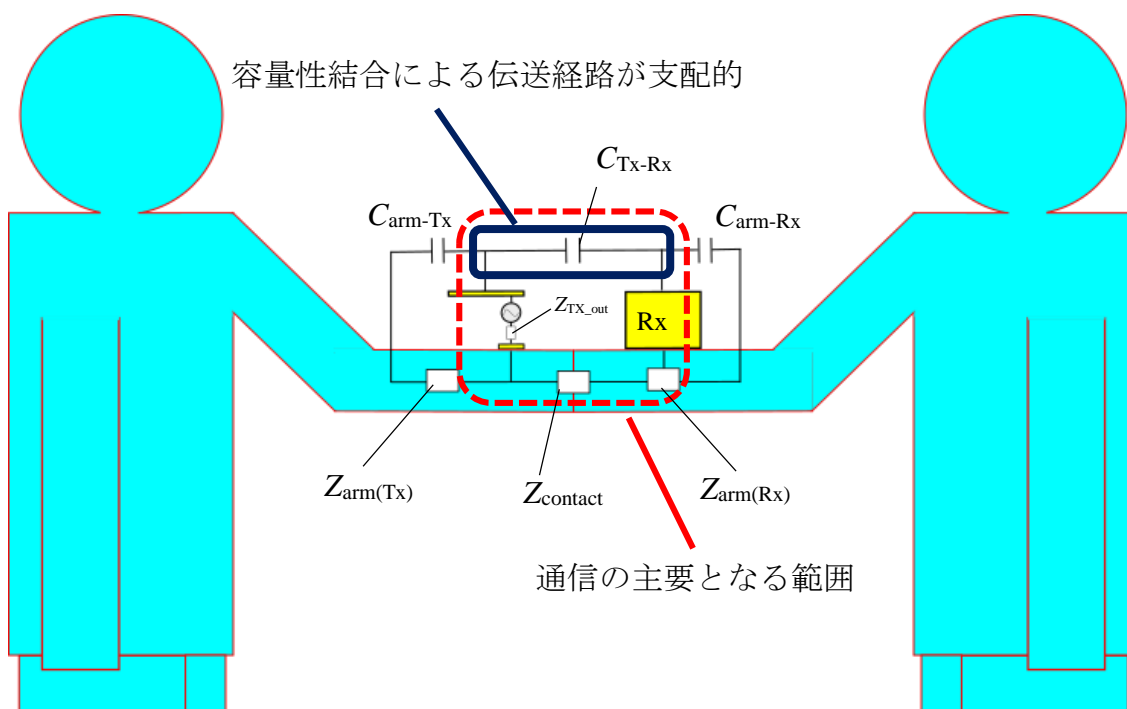


図 4-8 1 電極型送信機を用いた場合の信号伝送モデル

図4-8において主要の信号伝送経路となる範囲を赤い点線で示した.3章における様々な要因による影響の評価や伝送特性の解析結果から以下の結果がわかっている.

- ・腕内部を流れる電流量は小さく、接触面積による影響は小さい
- ・送受信機間の距離の影響を大きく受ける
- ・回路基板の面積による影響を大きく受ける

これらの結果と図 4-8 に示す伝送モデルを併せて考えたとき、主要の信号伝送路を形成する範囲において腕内部のインピーダンス $Z_{arm(Tx)}$, $Z_{arm(Rx)}$ や接触インピーダンス $Z_{contact}$ を流れる電流による経路よりも、 C_{Tx-Rx} の送受信機間の空間を伝わる容量性結合による伝送経路が支配的であるとき、上記の結果を説明することができる. 各要素のパラメータ値について検討する際、それぞれの具体的な数値は算出できないが、送信機の信号源から見た腕部や空間を含むすべての経路を考慮したインピーダンスすなわち送受信機を含む通信系を回路とみなしたときの入力インピーダンス Z_{in} の値は解析結果から確認することができ、これは図 4-8 における主要の伝送経路において腕内部のインピーダンスと空間の容量成分のパラメータ両方を含む情報であるといえる. 表 4-1 に 1 電極型送信機の入力インピーダンスの値を示す.

表 4-1 1 電極型送信機の入力インピーダンスの値

	$Z_{in}(\text{実部}) [\Omega]$	$Z_{in}(\text{虚部}) [\Omega]$	$ Z_{in} [\Omega]$
1-EL Tx	29.9	-33.2×10^2	33.2×10^2

表 4-1 の結果から、入力インピーダンスの虚部の値は実部に比べて約 110 倍程度大きくなった。これは 1 電極型送信機を用いた場合の主要な信号伝送経路は腕内部を流れるインピーダンスよりも空中の電界を経由する容量性結合による経路の割合が大きいことを表しており、導電性をもつ人体を通る割合は小さくなるため 1 電極型送信機は伝送効率が低下し伝送特性が大きく得られないことがわかる。

4.4.2 2 電極型送信機における信号伝送モデル

4.2 節図 4-2(b)の通信経路を考慮したキャパシタやインピーダンスの要素を含めた信号伝送モデルを図に示す。各要素の構成を以下に示す。

- Z_{TX_out} : 送信機出力インピーダンス
- $Z_{electrode}$: 送信機 2 電極間の腕部中のインピーダンス
- $Z_{arm(Tx)}$: 送信機を装着した側の腕部内のインピーダンス
- $Z_{arm(Rx)}$: 受信機を装着した側の腕部内のインピーダンス
- $Z_{up\ limb}$: 上腕部中のインピーダンス
- Z_{body} : 胴体中のインピーダンス
- C_{Tx-Rx} : 送受信機間の空間における容量結合インピーダンス
- $C_{arm-air}$: 二者間の腕部表面とその間の空間における容量結合インピーダンス
- $C_{body-body}$: 二者間の胴体間の空間における容量結合インピーダンス

$Z_{contact}$, $Z_{arm(Tx)}$, $Z_{arm(Rx)}$, $Z_{up\ limb}$, Z_{body} は人体中のインピーダンスまたは接触インピーダンスであり RC の並列回路で表現され、 C_{Tx_Rx} , $C_{arm-air}$, $C_{body-body}$ は空間中の容量結合インピーダンスでありキャパシタと等価である。

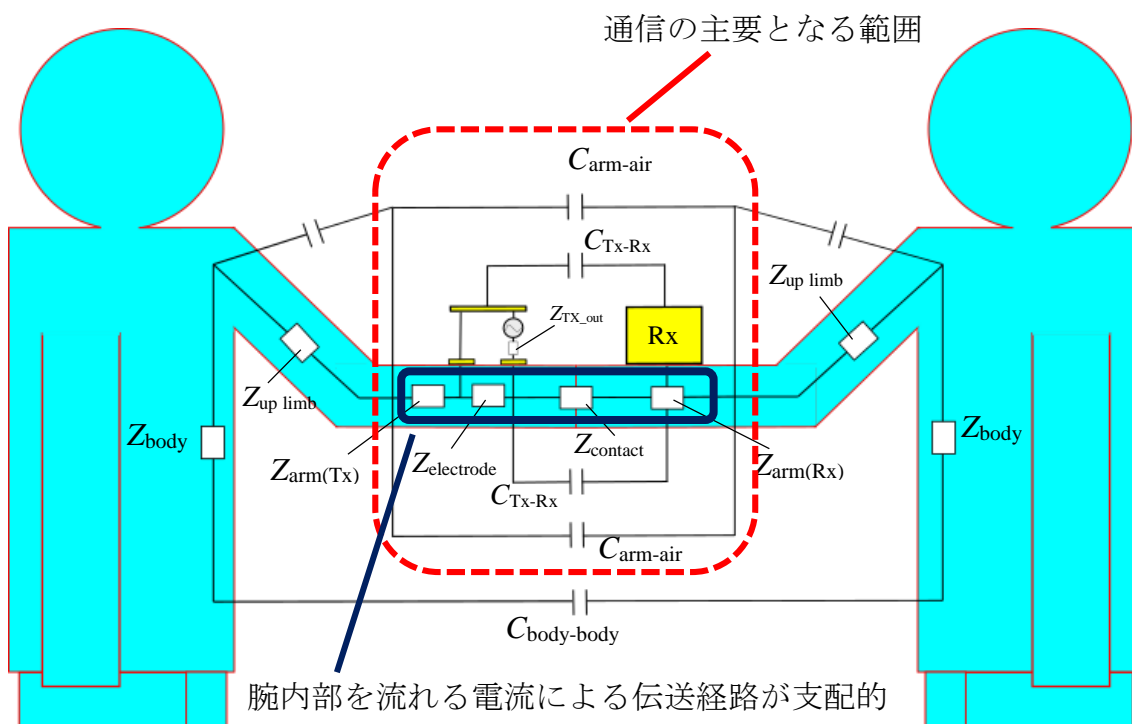


図 4-9 2 電極型送信機を用いた場合の信号伝送モデル

図 4-9 において主要の信号伝送経路となる範囲を赤い点線で示した. 3 章における様々な要因による影響の評価や伝送特性の解析結果から以下の結果がわかっている.

- ・腕内部を流れる電流量は大きく, 接触面積による影響は大きい
- ・送受信機間の距離の影響を受けにくい
- ・回路基板の面積による影響を受けにくい
- ・胴体間距離による影響をほとんど受けない

これらの結果と図 4-9 に示す伝送モデルを併せて考えたとき, 主要の信号伝送路となる範囲において C_{Tx-Rx} の送受信機間の空間を伝わる容量性結合による伝送経路よりも腕内部のインピーダンス $Z_{arm(Tx)}$, $Z_{arm(Rx)}$, $Z_{electrode}$ や接触インピーダンス $Z_{contact}$ を流れる電流による伝送経路が支配的であるとき上記の結果を説明することができる. 胴体間の距離による影響を受けないということは, 胴体間の空間の容量性結合 $C_{body-body}$ による経路の影響はほとんど無視でき, 赤の点線枠外に示す範囲は通信に寄与しないことを示している. また, 1 電極型送信機を用いた場合と同様に各要素のパラメータ値について検討する際, それぞれの具体的な数値は算出できないため, 入力インピーダンス Z_{in} から主要の伝送経路を構成するパラメータの要素の検討しどの範囲が通信に大きく寄与するか調べた. 表 4-2 に 2 電極型送信機の入力インピーダンスの値を示す.

表 4-2 2 電極型送信機の入力インピーダンスの値

	Z_{in} (実部) [Ω]	Z_{in} (虚部) [Ω]	$ Z_{in} $ [Ω]
2-EL Tx	75.6	-11.8	76.5

表 4-2 の結果から、入力インピーダンスの虚部の値が実部に比べて約 0.16 倍となり、これは 2 電極型送信機を用いた場合の主要な信号伝送経路は空中の電界を経由する容量性結合よりも腕内部を流れるインピーダンスによる経路の割合が大きいことを表している。2 電極送信機を用いた場合は送受信機間の空間の容量結合 C_{Tx-Rx} に加え $C_{arm-air}$ による経路も加わるがこれらの影響は小さいといえ、導電性を持つ腕内部を通る割合が 1 電極型送信機に比べ大きくなるため、経路全体のインピーダンスが小さくなり実部も大きくなったと考えられる。

以上の結果と考察から信号伝送系の差異が伝送特性に及ぼす影響について考える。二者間の人体通信を送信機と送信機信号源から見た腕部と空間を含む入力インピーダンス Z_{in} (通信に寄与する範囲におけるパラメータ情報を含む)のみから構成される回路とみなすと、表 4-1, 表 4-2 から、入力インピーダンス $|Z_{in}|$ の値は 1 電極型送信機の方が 2 電極型送信機よりも大きいため、送信機から給電される電流量は小さくなると考えられる。解析結果から確認したところ、1 電極型では約 0.3mA 程度、2 電極型では 7.9mA 程度であった。また、受信機抵抗に流れる電流を調べたところ、1 電極型では約 0.32 μA 、2 電極型では約 1.94 μA 程度となり、給電される電流に対する受信電流の割合は 2 電極型送信機(約 0.02%)よりも 1 電極型送信機(約 0.42%)の方が大きい、入力インピーダンス $|Z_{in}|$ は 1 電極型送信機が 2 電極型送信機の約 44 倍とその差が大きくなるため、送信機から受信抵抗に供給される電流は二電極型送信機の方が結果として大きくなる。よって受信電圧に着目して伝送特性を比較した際、二電極型送受信機を用いた方が大きな受信電圧が得られ、伝送特性が良好となる。

4.5 まとめ

本章では、これまでの章の電磁界解析の結果から、二者間の人体通信における信号伝送経路を提示した..

受信機の電極接触条件による伝送特性の差異は送信機と比較した際とても小さく、その微小な差異を、1 電極型受信機では「回路基板-抵抗 R -腕内部-送信機」という経路を形成するのに対し、2 電極型ではそれに加え「回路基板-受信機電極間の腕内部インピーダンス $Z_{electrode}$ -送信機」という新たな経路が形成される違いによるものであることを示した.

1 電極型送信機を用いた場合は、「送信機-送受信機間の空間の容量性結合(上部のみ)-受信機-腕内部を流れる電流-送信機」の狭い範囲のループ構造による信号伝送経路を形成し、送信機信号源から見た入力インピーダンスによる検討から、送受信機間の容量性結合による経路が主要な通信経路であることがわかった.

2 電極型送信機を用いた場合は、1 電極型送信機で見られた送受信機を含む狭い範囲のループ構造に加え、「送信機-腕内部を流れる電流-空間の容量性結合-腕部表面とその内部を流れる電流-送信機」という大局的なループ構造が見られ、広い範囲を含む信号伝送経路を形成するがわかり、送信機信号源から見た入力インピーダンスによる検討から、腕内部のインピーダンスを流れる電流による経路が主要な通信経路であることがわかった.

第 5 章 結論

5.1 本研究で明らかになった学術的知見	74
5.2 今後の展望	76

5.1 本研究で明らかになった学術的知見

本研究では、握手をする手首に送受信機を装着した場合における二者間の人体通信に着目し、電極接触条件と伝送特性の関係や二者間の人体通信に影響を及ぼす要因について電極接触条件ごとに調べ、その伝送特性解析と評価から信号伝送経路を解析した。

伝送特性による評価から、2電極型送信機を用いた方が1電極型送信機を用いるよりも20~25dB程度良好な伝送特性が得られ、受信機の電極接触条件による伝送特性の差と比較するととても大きいことがわかった。

受信機の電極接触条件による伝送特性の差異は送信機と比較した際とても小さく、通信系全体で見たときの信号伝送路に与える影響は送信機の電極接触条件が支配的であることがわかった。

1電極型送信機を用いた場合は、「送信機-送受信機間の空間の容量性結合(上部のみ)-受信機-腕内部を流れる電流-送信機」の狭い範囲のループ構造による信号伝送経路を形成するのに対し、2電極型送信機を用いた場合は、1電極型送信機で見られた送受信機を含む狭い範囲のループ構造に加え、「送信機-腕内部を流れる電流-空間の容量性結合-腕部表面とその内部を流れる電流-送信機」という大局的なループ構造が見られ、広い範囲を含む信号伝送経路を形成することがわかった。

二者間の人体通信に影響を及ぼす要因とその評価を電極接触条件ごとに解析したところ以下に示す結果が得られた。

- ・送受信機の装着箇所による影響を調べたところ、握手をしている手首に送受信機を装着する以外の利用状況では送信機からの信号を十分に得られなかった。
- ・回路基板の面積による影響を調べた結果、送信機の接触条件については1電極型よりも2電極型の方が大きな影響を受けることがわかった。受信機の電極接触条件については、2電極型を用いると伝送特性の変化が小さくなり、回路基板の面積による影響を受けにくいことがわかった。
- ・胴体間の距離による影響を調べた結果、伝送特性や電界分布、電界ベクトル分布などによる比較から電極接触条件によらずほとんど影響を受けないことがわかり、送受信機を装着した腕部周辺を含む限られた範囲のみが通信に寄与していることがわかった。
- ・握手をする手の表面の接触面積による影響を調べた結果、接触面積による影響は2電極型送信機の方が大きいことがわかった。また、接触面や腕部断面を流れる電流量について比較した結果、2電極型送信機は腕内部を流れる電流量が大きく接触面積による影響を大きく受けることがわかった。

以上の結果から、二者間において人体通信を行う際の特性と適切な電極接触条件や利用形態についてまとめる。

- ・握手をする腕の手首に送受信機を装着する以外の装着箇所においては十分な伝送特性が得られず通信を行うことができないため、二者間においてのウェアラブル機器の適切な装着位置は、握手をしているお互いの腕の手首である。

- ・電極接触条件を考慮した際の伝送特性は送信機電極条件によって支配的となり、1 電極型送信機よりも2 電極型を用いた方が良好となるため、送信側の人体には2 電極型送信機を採用するとよい。

- ・2 電極型送信機を用いると腕部内を流れる電流による経路が主要な伝送経路となるため、握手をする手を介して導電性を持つ人体内部を通る経路の割合が大きくなることによって伝送特性が増大し、二者の人体を利用することの利点が見られた。

- ・受信機の電極接触条件による伝送特性の評価から、1 電極型送信機を用いた方が 2dB ~7dB 程度良好となることがわかったが、送受信機間の距離や、回路基板の面積、接触面積による影響を考慮した際、2 電極型送信機を用いた方が伝送特性の変化が少なく安定した通信を行えることが確認された。2dB~7dB 程度の減少分は受信回路の増幅率を増大させるなどの対応で補うことができるため、受信側の人体には2 電極型送信機を採用するとよい。

- ・2 電極型受信機を用いると、回路基板を含む受信側の人体を体幹とする範囲がグラウンドとして機能し、伝送特性の変動が少なく安定した通信を行うことができると考えられ、二者の人体を利用する利点が見られた。

本研究では、電磁界解析から二者間の人体通信の信号伝送路について検討し1 電極型送信機と2 電極型送信機をそれぞれ用いた場合の主要となる伝送経路について示した。信号伝送経路の違いを示したことにより、電極接触条件による伝送特性に生まれる差異を説明し、実際に二者間において人体通信を利用する際の電極構造の指針や適切な利形態を示した。

5.2 今後の展望

本研究では、電磁界解析から二者間における人体通信の伝送特性解析と評価を行い、電極接触条件による信号伝送モデルを考え、人体通信用機器の設計に有用な情報を示した。これらの検討は人体や送受信機のモデルに関して筋肉モデルによる簡略化を行っているため、実際の二者間の通信をどの程度正確に表しているか受信電圧などの観点から実験的検証を行う必要がある。また、より効率的に通信を行えるための更なる詳細な電極構造と伝送特性への影響を調べ、その通信メカニズムを解明し具体的な機器設計指針を示す必要がある。

参考文献

- [1] M. Patel and J. Wang, "Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 80–88, 2010.
- [2] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless body area networks: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, 2014.
- [3] T. G. Zimmerman, "Personal area networks: Near-field intrabody communication," *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 609–617, 1996.
- [4] "医療ヘルスケアのためのボディエリア ネットワーク," no. 271, pp. 53–60, 2013.
- [5] P. Sundaravadivel, S. P. Mohanty, E. Kougianos, V. P. Yanambaka, and H. Thapliyal, "Exploring human body communications for IoT enabled ambulatory health monitoring systems," *Proc. - 2016 IEEE Int. Symp. Nanoelectron. Inf. Syst. iNIS 2016*, pp. 17–22, 2017.
- [6] S. S. Gajare and A. Kulkarni, "Intra-body communication in biomedical applications," *2016 Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun. ICCPEIC 2016*, pp. 33–36, 2016.
- [7] PR TIMES: <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000020.000024667.html>
- [8] N. Haga, K. Saito, M. Takahashi, and K. Ito, "Equivalent circuit of intrabody communication channels inducing conduction currents inside the human body," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 5, pp. 2807–2816, 2013.
- [9] K. Hachisuka, T. Takeda, Y. Terauchi, K. Sasaki, H. Hosaka, and K. Itao, "Intra-body data transmission for the personal area network," *Microsyst. Technol.*, vol. 11, no. 8–10, pp. 1020–1027, 2005.
- [10] K. Takiguchi, H. Koyano, and K. Kouno, "Consideration about novel proximity sensing technique applying quasi electric field enerated by multipole electrodes structure," *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions Japan Soc. Mech. Eng. Part C*, vol. 77, no. 778, pp. 2310–2322, 2011.
- [11] J. Bae, H. Cho, K. Song, H. Lee, and H. J. Yoo, "The signal transmission mechanism on the surface of human body for body channel communication," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 3 PART 1, pp. 582–593, 2012.
- [12] D. Muramatsu, N. Arai, and K. Sasaki, "Transmission characteristics of wearable transmitter and stationary receiver through human body," *2016 Int. Conf. Electron. Packag. ICEP 2016*, pp. 31–34, 2016.
- [13] S. Maity, D. Das, and S. Sen, "Wearable health monitoring using capacitive voltage-mode Human Body Communication," *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, pp. 1–4, 2017.
- [14] M. Technique, F. O. R. Transmission, C. Between, W. Devices, and O. F. I. Communication, "人体通信ウェアラブル端末間の 伝送特性計測技術に関する研究 MEASUREMENT TECHNIQUE FOR TRANSMISSION CHAEACTERISTICS BETWEEN."
- [15] M. Sinagawa, "人の体を伝送路とする通信技術," vol. 3, no. c, 2009.
- [16] B. Kibret, M. H. Seyedi, D. T. H. Lai, and M. Faulkner, "Investigation of galvanic-coupled intrabody communication using the human body circuit model," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 1196–1206, 2014.
- [17] D. Muramatsu, F. Koshiji, K. Koshiji, and K. Sasaki, "Transmission characteristics of wearable devices between two human bodies," *1st IEEE Glob. Conf. Consum. Electron. 2012, GCCE 2012*, no. C, pp. 360–361, 2012.
- [18] R. Takeuchi *et al.*, "Analytical modelling of near-field coupling communication between persons equipped with wearable terminals through handshaking," *BodyNets Int. Conf. Body Area Networks*, vol. 1, 2016.
- [19] W. Type, "据え置き型機器とウェアラブル機器間の人体通信における 大地グラウンドを含む電磁界解析," vol. 1, no. c, pp. 192–195.
- [20] D. Muramatsu, F. Koshiji, K. Koshiji, and K. Sasaki, "Human body communication between fingertip and wrist using stationary and wearable devices," *2014 IEEE 3rd Glob. Conf. Consum. Electron. GCCE 2014*, pp. 18–19, 2014.
- [21] IEEE Standards Association, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks*, no. February. 2012.
- [22] K. Fujii, M. Takahashi, and K. Ito, "Electric field distributions of wearable devices using the human body as a transmission channel," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 7, pp.

-
- 2080–2087, 2007.
- [23] H. B. Communication, “人体通信における電極接触条件と伝送特性の電磁界解析,” pp. 853–854, 2000.
- [24] K. Kagimoto, “人体通信における送信電極性能向上の検討 Study of Performance Improvement of Transmitter Electrode in Human Body Communication,” 第 26 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, vol. 1, pp. 205–206, 2012.
- [25] I. W. Ibrahim, M. M. M. Aruwa, A. H. A. Razak, and A. Ahmad, “Investigation of Knee Flexion Angle Influences on Intra-Body Communication ’ s (IBC) Signal Attenuation,” vol. 9, no. 2, pp. 424–430, 2018.
- [26] K. Fujii, K. Ito, and S. Tajima, “A study on the modeling of communication system using human body as transmission channel,” *Kyokai Joho Imeji Zasshi/Journal Inst. Image Inf. Telev. Eng.*, vol. 56, no. 11, pp. 1845–1849, 2002.
- [27] K. Hachisuka, Y. Kishi, Y. Hayashi, and K. Sasaki, “人体内通信における信号伝送モデルの提案および実験的検証,” *エレクトロニクス実装学会誌*, vol. 10, no. 6, 2007.
- [28] K. Yamamoto, Y. Nishida, K. Sasaki, D. Muramatsu, and F. Koshiji, “Electromagnetic field analysis of signal transmission path and electrode contact conditions in human body communication,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, 2018.
- [29] 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン工学研究センター 人体寸法データベース (<https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/data/list.html>)
- [30] International Federation of Automatic Control (IFAC)website (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>)
- [31] F. Yong, G. Yunjian, and S. Quanjun, “A human identification method based on dynamic plantar pressure distribution,” *Inf. Autom. (ICIA), 2011 IEEE Int. Conf.*, no. June, pp. 329–332, 2011.
- [32] 村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, and 佐々木健, “多層円柱腕モデルを用いた人体通信用電極の入力インピーダンス解析,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J-98B, no. 5, pp. 448–450, 2015.
- [33] K. Sasaki, N. Arai, D. Muramatsu, and F. Koshiji, “Evaluation of Ground Loop Through the Floor in Human Body Communication,” *Int. J. Wirel. Inf. Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 78–90, 2017.

謝辞

本研究は、指導教員である東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 佐々木健 教授のご指導のもと行いました。佐々木先生には研究とはどういったものであるかといった研究の根本部分から、研究の進め方や取り組み方について教えていただき、人体通信の研究を進める中で、先生の助言や先生との議論は非常に糧になっていたと感じます。心より感謝申し上げます。

佐々木研究室の先輩、同期、後輩の皆様には、研究室生活を送る中で大変お世話になりました。人体通信のテーマに取り組んだ方々からは、知識の面でも発想の面でも私に足りない部分を学ばせていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。特に、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 修士2年 山本健太郎 君には電磁界シミュレーションの使い方や、人体通信に関しての議論を共に行い、研究内容への理解をより一層深めることができました。感謝いたします。