

On-Body Channel 人体通信における 伝送メカニズムに関する研究

M2008MM011 平野勝義

指導教員：稲垣直樹

1 はじめに

近年、携帯情報端末機器を持ち運び、いつでもどこでも情報のやりとりが行われるユビキタスネットワーク社会が進捗している。情報通信分野において、電子機器は小型軽量化が進み、将来小型のコンピュータを身につけることができると予想される。その一例として人体を伝送路として利用する人体通信という概念が提案されている [1]。人体通信の一つの On-Body Channel 伝送方式は、電極のついたウェアラブルデバイスを人体に接触させ、人体表面を伝送路とする方式である。

本研究は On-Body Channel を用いる人体通信の伝送メカニズムの解明と人体に装着する送受信機構造の最適設計を試みたものである。人体腕部に装着したウェアラブルデバイスの電磁波特性、特に人体腕部に接触する電極をアンテナとした場合の入力インピーダンスを数値解析により詳しく検討する。人体の簡易腕部モデルを作成し、電極入力インピーダンスが 50Ω になるよう設計する。送受信機間の電力伝送効率が最もよくなる受信機を検討し、最後に人体腕部のリアルモデルを用いて、電界分布図と電力伝送効率の特性から On-Body Channel 人体通信の伝送メカニズムの解明を行う。

2 円形電極に対する接地抵抗理論

2.1 静電界と定常電流の場の類似性

静電界と定常電流の場の中に成り立つ類似性 [2][3] から、電極の抵抗体内の抵抗 R は同一形状の電極が誘電体内にある場合の静電容量 C と次の関係にある。

$$RC = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (1)$$

ここに、 ε は誘電体の誘電率であり σ は抵抗体の導電率である。式 (1) は媒質が半空間を占める場合にも成り立つ。この関係を利用して On-Body Channel 人体通信のウェアラブルデバイスの電極の接地抵抗を求める。

2.2 円形板電極における接地抵抗

図 1 に示す円形電極のモデルを解析する。円形電極の半径を a として、楕円座標系 [4] を用いて考察する。なお半無限媒質の電気定数は自作生体等価ファントムと等しい、 $\varepsilon_r = 81$ 、 $\sigma = 0.62 \text{ S/m}$ である。まず、円形電極に電荷 q を与えた時の電位分布を求める。円形電極のスカラーポテンシャルは楕円座標系のパラメータ ξ を用いて $\phi(\xi)$ とする。 a, c は楕円座標系のパラメータである。 ξ 軸上のスカラーポテンシャルは次の関係にある。

$$\phi(\xi) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_r\sqrt{a^2 - c^2}} \arctan \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}} \quad (2)$$

式 (2) では半径 a の偏平楕円体であるため、 $c = 0$ の条件を加えると電極は半径 a の円板となる。静電容量は電荷と電位の比例定数であり、孤立導体の静電容量は、一導体系と二導体系の 2 番目の導体が無限に離れた場合に相当するので静電容量は次の関係にある。

$$C = \frac{q}{\phi(0) - \phi(\infty)} \quad (3)$$

式 (2) と式 (3) により静電容量 C は $8\varepsilon a$ と求められ、式 (1) に代入すると、接地抵抗は次の関係にある。

$$R = \frac{1}{8\sigma a} \quad (4)$$

なお、半無限媒質では接地抵抗は 2 倍となり、2 電極では単一電極の重ね合わせにより十分離れた場合、さらに 2 倍となる。周波数 10MHz のとき、半径 10mm の 2 電極円板送信機を導電率 $\sigma = 0.62 \text{ S/m}$ の半無限媒質に接地し、電極間距離を十分大きくした時の接地抵抗は $R = 81.06\Omega$ となる。

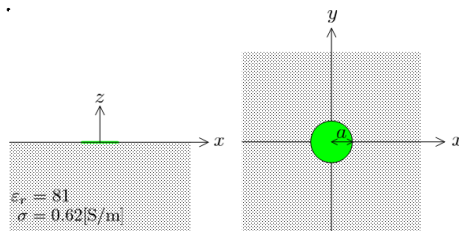


図 1 半無限平面に接地した 2 電極円板構造の解析モデル

3 送信機の電極入力インピーダンス特性

3.1 送信機 2 電極の距離に対する入力インピーダンス特性

図 2 に解析モデルを示す。解析には 3 次元電磁界解析シミュレータ FEKO を用いた。このモデルは長方形型の回路構造に接続された円板電極 2 つ、信号電極 (Signal electrode) とグラウンド電極 (Ground electrode) を半無限媒質に接地したモデルである。回路の中心部に周波数 10MHz の正弦波電圧を給電している。半無限媒質の電気定数は、 $\varepsilon_r = 81$ 、 $\sigma = 0.62 \text{ S/m}$ である。送信機の寸法は、電極間距離 $d = 30\text{mm}$ 、電極板半径 $r = 10\text{mm}$ 、回路と電極の間隔 $h = 10\text{mm}$ とし、電極間距離 d を 30mm から 200mm まで変化させ抵抗を求めた。図 3 は電極間距離 d を変化させたときの電極抵抗の変化を示す。電極間距離 d を大きくすると電極抵抗は式 (4) の理論値 (81.06Ω) に漸近する。電極間距離が小さいときは電極における電流密度は他電極に近い部分で大きくなり、全体の抵抗値は小さくなることがわかった。

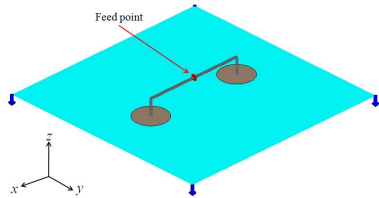


図 2 半無限平面に接地した 2 電極円板構造の解析モデル

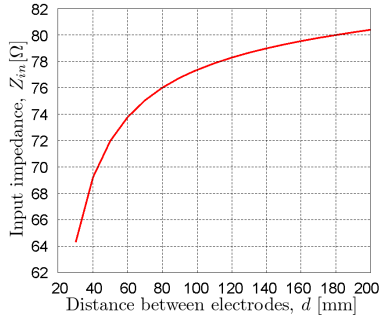


図 3 送信機の電極間距離を変化させた時の電極抵抗

3.2 電極入力インピーダンスの形状依存性

電極間の回路インピーダンスは 50Ω であるとして、送信機の入力インピーダンスが 50Ω になるよう設計する。図 4 は四角柱に指先を含む腕部モデルの解析モデルを示す。図 5 は簡易腕部モデルに装着する各電極板の寸法を示し、electrode space は 2 電極面積と電極間の面積を合わせた送信機の総面積を表わしている。表 1 は電極板構造が円板と正方形および長方形の入力インピーダンスを示す。円板電極は半径 $r = 11.2\text{mm}$ 、回路と電極の間隔 $h = 10\text{mm}$ 、電極間距離 $d = 25\text{mm}$ の時、入力インピーダンス Z_{in} は $51.25 - j1.603$ となる。また、等面積で正方形電極にした場合、電極幅 $a = 20.0\text{mm}$ 、回路と電極の間隔 $h = 10\text{mm}$ 、電極間距離 $d = 25\text{mm}$ の時、 $Z_{in} = 48.95 - j1.413$ となる。次に、腕時計サイズの $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ を想定した、電極間距離 $d = 20\text{mm}$ 、電極形状を $14.0\text{mm} \times 24.65\text{mm}$ の長方形板電極にした時、 $Z_{in} = 50.01 - j1.784$ と 50Ω の入力インピーダンスが得られる。この時、electrode space は 8.38cm^2 である。長方形板電極にすることで入力インピーダンスを 50Ω にすることができ、かつ小型化を可能にする。

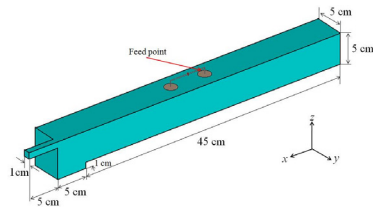


図 4 指先を含む腕部モデル

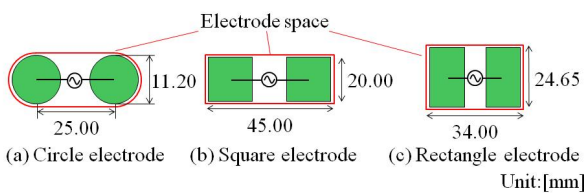


図 5 入力インピーダンスが約 50Ω となる 3 種の電極板解析モデル

表 1 図 5 の電極形状における入力インピーダンス

電極板形状	入力インピーダンス $[\Omega]$
円板	$51.25 - j1.603$
正方形板	$48.95 - j1.413$
長方形板	$50.01 - j1.784$

4 電界分布の媒質形状依存性

図 6, 7 は図 4 における指先を含む腕部モデルの xy 面と zx 面の電界分布図である。送信機は円形板電極 (半径 $r = 10\text{mm}$)、電極間距離 $d = 300\text{mm}$ を用い、簡易腕部モデルの中央部に装着した。媒質の形状変化における電界分布を検討した。電界は空間より媒質に沿って分布している。送信機を 2 電極構造のアンテナとみなすと空間に電磁波を送出していないことがわかる。また、指先以外にも角となる部分は多いが、指先は他の部分より細いため電界が強くなっている。このことから、電界は電荷に比例するため、電極アンテナを人体に接触させた時、人体表面を電界が覆い、尖った形状に電荷が集中していることがわかる。よって、送信機から電力を受信する際には、電荷が集中している指先に設置させるのが効率がよいと推測される。

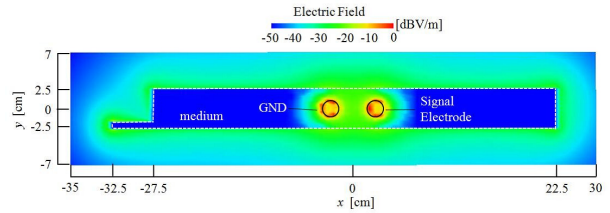


図 6 電界強度分布, xy 面内 ($z = 0$)

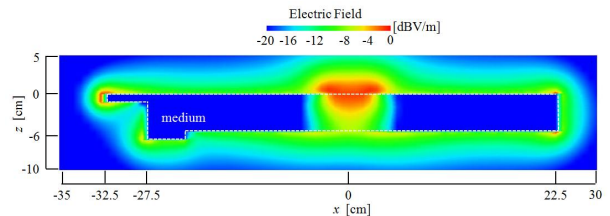


図 7 電界強度分布, zx 面内 ($y = -2.25$)

5 コンデンサ構造受信機における電極および回路構造の最適化

5.1 受信機電極板の面積に対する電力伝送効率特性

図 8, 9 は簡易腕部モデルの指先に受信機を接触させた解析モデルである。送信機の寸法は電極幅 $a = 14\text{mm}$ 、 $b = 24.65\text{mm}$ 、回路と電極間隔 $h = 10\text{mm}$ 、電極間距離 $d = 20\text{mm}$ とし、周波数 10MHz で 1V を給電している。受信機の寸法は電極 $S1$ を無限平面とし、電極 $S2$ の一辺 $L_{S2} = 10\text{mm}$ 、2 電極間距離 $w_d = 10\text{mm}$ 、指先と電極 $S2$ 間隔 $f_d = 0\text{mm}$ とした。送信機には 50Ω のポートインピーダンスを装荷させた。受信機のポートインピーダンスは $1\text{k}\Omega$ を装荷した時、何も装荷していない時に比べ電力伝送効率がよくなった。しかし、 $2\text{k}\Omega$ 以上のハイインピーダンスでは電力伝送効率は減少していった。そこで、受信機にはリアクタンスを装荷せず、 w_d の中央に 500Ω のポートインピーダンスのみを装荷させた。 L_{S2} を 10mm

から 300mm まで変化させた時の電力伝送効率 S_{21} を求めた．図 10 は電極 S2 を変化させた時の電力伝送効率のグラフである．S2 は $L_{S2} = 10\text{mm}$ 時の S_{21} が最も良く， $S_{21} = -37.95\text{dB}$ であった．図 11, 12 は電極 S2 が 10mm, 300mm 時の zx 平面における電界強度分布図である．受信電極 S2 が大きくなると，他電極つまり無限平面板に電気力線が回り込みづらくなっている．そのため，受信機のポートにおいて電力が弱まったのではないかと考えられる． $L_{S2} = 10\text{mm}$ においてはこの現象が起こりにくく最も電力伝送効率が悪くなった．また， $L_{S2} = 300\text{mm}$ の電界分布図において媒質に強い電界があらわれている．これは，電極 S2 が小さい時に比べ，電極板の反射が大きくなり，定在波が生じていると考えられる．

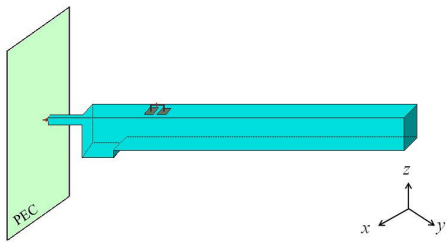


図 8 送受信機を装着した簡易モデルの 3 次元解析モデル

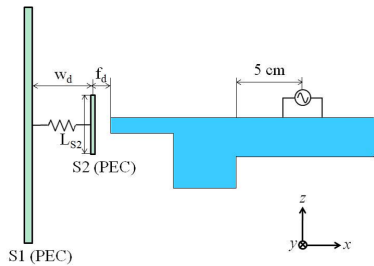


図 9 送受信機を装着した簡易モデルの 2 次元解析モデル

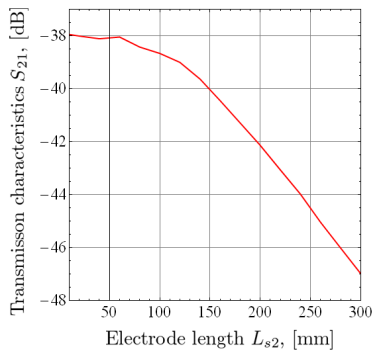


図 10 電極 S2 の L_{S2} を変化させた時の電力伝送効率

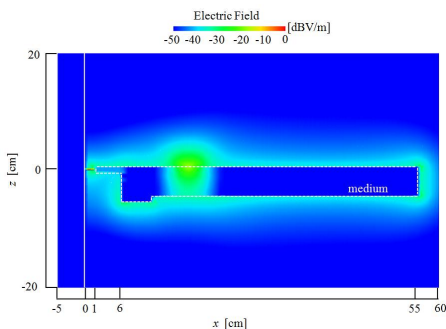


図 11 電界強度分布， zx 面内 ($y = 0$) ($L_{S2} = 10\text{mm}$)

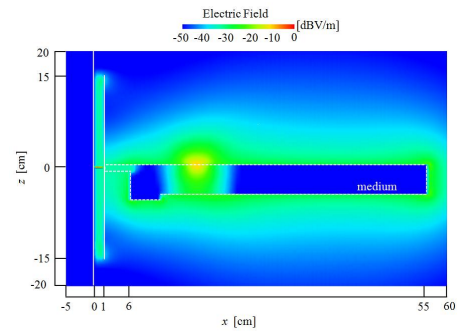


図 12 電界強度分布， zx 面内 ($y = 0$) ($L_{S2} = 300\text{mm}$)

5.2 受信機電極板間の距離に対する電力伝送効率特性

受信機において指先と接触する電極 S2 を小さくすることで電力伝送効率を上げることができる．そこで受信機の 2 電極間距離 w_d を変化させ，電力伝送効率の変異を検討する．図 9 の解析モデルにおいて，2 電極間距離 w_d を 10mm から 300mm まで変化させた．図 13 は電極 S2 = 10mm における w_d と S_{21} のグラフである． w_d が長くなるにつれ S_{21} がよくなり， $w_d = 100\text{mm}$ の時最大値をとり -37.82dB となる． $w_d = 100\text{mm}$ 以後減少していき一時増加するものの，全体としては約 0.2dB の範囲であり，2 電極間距離による影響はごくわずかである．

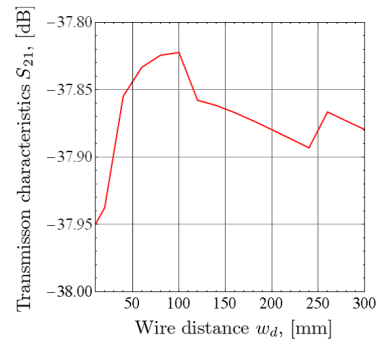


図 13 2 電極間距離 w_d を変化させた時の電力伝送効率

5.3 受信機に装荷するインピーダンスの最適化

設計した受信機構造に装荷するインピーダンスの最適化のために，共役影像アドミタンスの概念を導入した．

5.3.1 最適インピーダンスを装荷した受信機の解析

電極入力インピーダンス 50Ω の長方形板電極構造送信機とコンデンサ型受信機構造の装荷リアクタンス $X_s[\Omega]$ ， $X_r[\Omega]$ ，およびポートインピーダンス $r_s[\Omega]$ ， $r_r[\Omega]$ を最大電力供給の条件 [5][6] により算出した．結果を表 2 に示す．送信機のポートインピーダンスは 50Ω にすることができた．また，装荷リアクタンスにおいては 1.77661Ω と微小であった．受信機において最大電力供給の条件で算出した装荷リアクタンスとポートインピーダンスで S_{21} を算出し，同条件のもとで解析を行った．その結果，ポートインピーダンス 500Ω のみの電力伝送効率は -37.82dB ，最大電力供給条件時の解析値は -34.84dB となり，約 3dB よくなった．また，最大電力供給条件時の理論値は -34.85dB となり解析値と一致した．先行研究 [7] はポートインピーダンスを $2\text{k}\Omega$ を装荷し，電力伝送効率は -49.3dB であった．本研究では 14.46dB だけ改善できた．

表 2 送受信機のポートインピーダンスと
装荷リアクタンス

	インピーダンス [Ω]	リアクタンス [Ω]
送信機	49.9759	1.77661
受信機	840.063	1240.69

6 腕部リアルモデルによる解析

これまで設計した送信機と受信機を腕部リアルモデルを用いて、電力伝送効率を求める。送信機は電極入力インピーダンス 50Ω の長方形電極板を用い、受信機は $L_{S2} = 10\text{mm}$, $W_d = 100\text{mm}$, ポートインピーダンス $840.063 + j1240.69\Omega$ を用いた。リアルモデルの指先と受信機は接触している。図 14 は腕部リアルモデルと送信機の解析モデルである。リアルモデルの電気定数は $\epsilon_r = 81$, $\sigma = 0.62\text{S/m}$ とする。腕部リアルモデルの電極入力インピーダンスは $Z_{in} = 54.343 - j2.429\Omega$ であった。送信機を装着した腕部は簡易腕部モデルより細くなっているため、媒質の形状効果により電極入力インピーダンスが上がったのではないかと考えられる。

図 15, 16 はリアルモデルにおける xy , zx 平面の電界強度分布図である。受信機に接触している指先から受信機のポートに向けて強い電界が生じているのがわかる。表 3 は簡易腕部モデルと腕部リアルモデルの電力伝送効率を示す。腕部リアルモデルでは簡易モデルよりも高い電力伝送効率を得た。これは簡易モデルより指の数が多く、電流はより指先に流れやすくなったと考えられる。そのため、指先尖端の電流密度は簡易モデル時に比べ高くなり、電力伝送効率が向上したと考えられる。

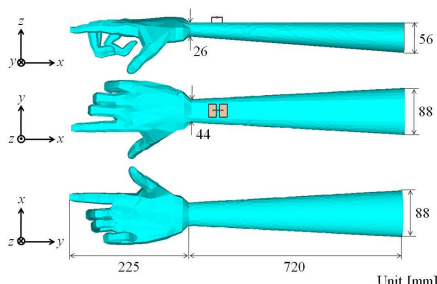


図 14 送信機を装着した腕部リアルモデルの解析モデル

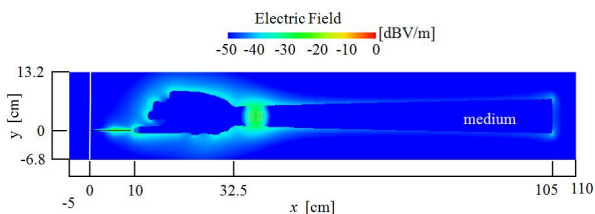


図 15 電界強度分布, xy 面内 ($z = 0$)

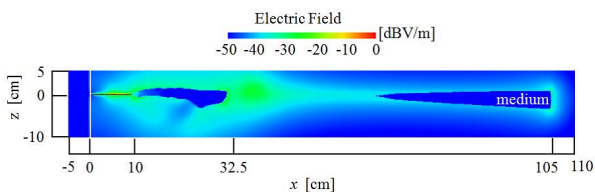


図 16 電界強度分布, zx 面内 ($y = 0$)

表 3 簡易モデルとリアルモデルの電力伝送効率比較

簡易モデル の解析値 [dB]	腕部リアルモデル の解析値 [dB]
-34.84	-28.95

7 むすび

本稿では、はじめに 2 電極ウェアラブルデバイスの入力インピーダンスを接地抵抗理論により説明した。半無限媒質上に 2 電極構造ウェアラブルデバイスの電極間距離を十分にとったとき、接地抵抗の理論値に近づくことが明らかとなった。これに基づき、ウェアラブルデバイスを人体腕部の手首部分に装着すると想定し、 50Ω 系の小型送信機の設計を行った。また、媒質の形状効果によって電荷が集中しやすい場所があり、特に尖端に集中することがわかった。

指先の尖端に集中した電力を効率よく受信するデバイスの検討をした。その結果、受信機はコンデンサ構造において指と接触する電極板を小さくし、他電極を半無限平面板、電極板間距離を 100mm にすることで最もよい電力伝送効率を得た。受信機のポートインピーダンスおよび装荷リアクタンスは最大電力供給の条件を用いた。これにより、設計した受信機構造において $840.063 + j1240.69\Omega$ を装荷したとき、 -34.84dB が得られ、先行研究 [7] と比較して 12.26dB だけ改善できた。

最後に、以上の検討から得られた送受信機の設計をもとに、人体腕部リアルモデルを用いて解析を行った。媒質の形状効果により簡易腕部モデルに比べ尖端部分が多いリアルモデルにおいては、電力伝送効率は -28.95dB となった。

参考文献

- [1] 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電極構造に対する受信特性,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 27, No. 17, pp. 29–32, Mar., 2003.
- [2] 電気学会編: “電気磁気学,” 電気学会, pp.153–155, 1997.
- [3] 稲垣直樹: “電磁気学,” コロナ社, pp.106–107, May, 1999.
- [4] J. A. Stratton: “Electromagnetic Theory,” McGraw-hill, pp.207–209, 1941.
- [5] S. Roberts: “Conjugate-Image Impedance,” Proc. IRE, Vol. 34, No. 4, pp.198–204, Apr., 1946.
- [6] 丸地智博, 稲垣直樹, 藤井勝之: “誘導電界を用いた新しい無線接続方式,” 信学技報, Vol. 109, No. 183, AP2009-84, pp.29–34, Sep., 2009.
- [7] 越地福朗, 佐々木健: “人体内通信におけるウェアラブル送信機の電極構造によるインピーダンス整合と電極設計,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 12, No. 3, pp.221–232, Mar., 2009.