

# 多層媒質内点波源による電界分布の 周波数依存性に関する研究

2004MT019 濱本健太 2004MT025 平野勝義  
指導教員 稲垣直樹

## 1 はじめに

近年、人体通信の研究が盛んに行われている。人体通信とは、人体を伝送路とするボディエリアネットワーク構成技術であり、人から人、人から物へと触れることで伝送路を構成し情報伝達を可能とする。人体通信には、身に着ける機器（ウェアラブル機器）[1]を中心とする場合と、体内埋め込み機器（インプラント機器）[2]までも接続対象に含める場合の二つがある。インプラントとは人体内部に、人工機器を永久的に埋め込む技術である。本研究では、インプラントによる人体通信の実現に向け、人体多層媒質内部に点波源を設置して、周波数依存性を検討する。数値解析には、FDTD（Finite Difference Time Domain）法[3]を用いた。人体はおおまかに、皮膚層、皮下組織、筋肉、骨、脳の5つに分類される。これらを、基礎モデルとしての無限平面モデル、腕部を想定した円柱モデル、そして頭部を想定した球モデルの3つのモデルにおいて層状に分布させ、電界分布の周波数依存性を検討していく。

## 2 無限平面モデル

### 2.1 解析モデル

皮膚構造[4]は外皮から、表皮、真皮、皮下組織の順に構成されており、表皮は薄く0.1～0.2mmほどである。本研究では、簡易化のため表皮を除くこととする。真皮は2mm、皮下組織は4mmとした。真皮は毛細血管や知覚神経終末板などの重要な器官を内蔵しているため、インプラントブルデバイスを埋め込むには適さない。また、筋肉や脳、骨といった神経や血管が密集しているところも血管への圧迫や異物感があると考えられるので、脂肪組織が充実している皮下組織にインプラントブルデバイスを埋め込むことを想定し、給電点を挿入する深さを4mm、皮下組織内部に設置する。男性の上腕筋組織厚はおよそ30～33mmであり、本モデルでは30mmとした。上腕骨は中央の半径でおよそ17～22mmであり、本モデルでは18mmとした。図1は本研究に用いた解析モデルを示している。

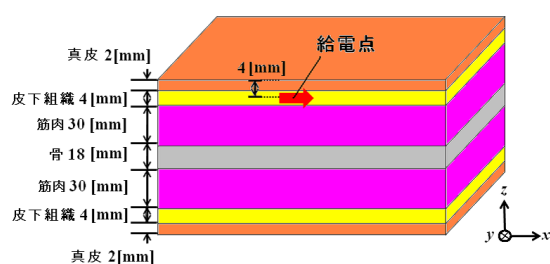


図1 人体多層媒質を模擬した無限平面解析モデル

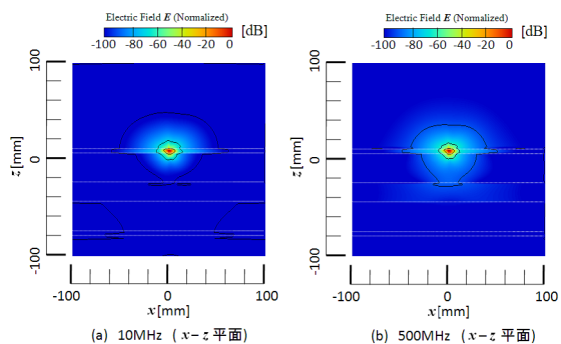


図2 人体多層媒質を模擬した無限平面の電界強度分布 ( $x-z$ 平面 10MHz と 500MHz)

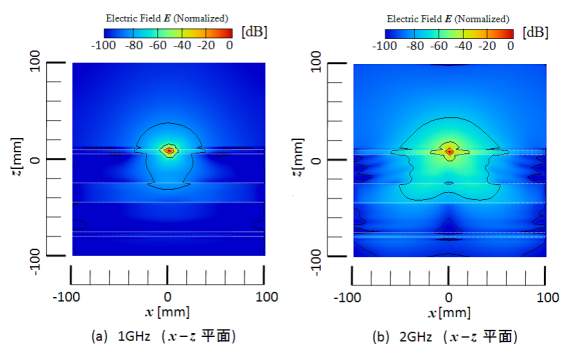


図3 人体多層媒質を模擬した無限平面の電界強度分布 ( $x-z$ 平面 1GHz と 2GHz)

## 2.2 FDTD 法による電界強度の計算

FDTD 法を用いた無限平面モデルに点波源を挿入した状態のモデル化を検討する．無限平面モデルの解析領域は、 $200 \times 200 \times 200\text{mm}^3$  であり、図 1 に示すように解析モデルの中央深さ 4mm の箇所にも  $x$  軸方向に 2mm の間隔で  $3V_{p-p}$ 、10MHz ~ 2GHz の正弦波電圧を給電する．

## 2.3 電界強度分布

10MHz と 500MHz の電界強度分布を図 2 に示す．電界強度分布の観測面は  $x-z$  平面 ( $y = 0\text{mm}$ ) とし、 $1500 \text{ V/m}$  を 0dB として規格化した．10MHz ~ 500MHz の周波数帯は似たような結果となり、どちらも点波源を挿入した皮下組織層 ( $z = +12\text{mm}$ ) に沿って分布していることがわかる (-60dB ~ -80dB)．図 2(a) の 10MHz の電界強度分布は人体媒質層 ( $z = +16\text{mm}$ ) から上方に放射されており、筋肉媒質層内 ( $z = +10\text{mm}$ ) への電界強度は上方への放射に比べて電界強度が低いことがわかる．一方、図 2(b) の 500MHz の電界は、筋肉媒質内 ( $z = +10\text{mm}$  以下) への放射がある (-60dB ~ -80dB)．

次に 1GHz と 2GHz の電界強度分布を図 3 に示す．図 3(a) の 1GHz は 500MHz と電界強度分布は似ている．しかし、筋肉媒質のみでなく骨まで電界が放射されている (-60dB ~ -80dB)．さらに図 3(b) の 2GHz の電界強度分布は人体媒質層 ( $z = +16\text{mm}$ ) から上方への放射が最も大きく  $z$  軸方向に 40mm まで -40dB ~ -60dB ある．また、皮下組織層 ( $z = +12\text{mm}$ ) に沿う電界の範囲が広く、 $\pm 60\text{mm}$  まで -40dB ~ -60dB の電界強度がある．

## 3 円柱 (腕部) モデル

### 3.1 解析モデル

円柱モデルは  $x-z$  平面を無限延長とし  $y-z$  平面を円構造にして円柱モデルを作成した．図 4 は本研究の解析モデルを示している．

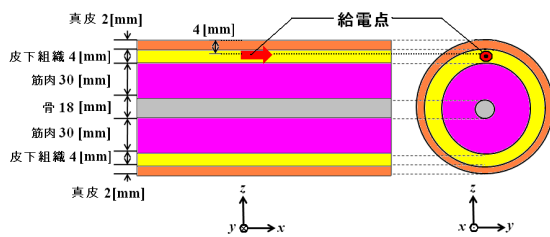


図 4 人体多層媒質を模擬した円柱の解析モデル

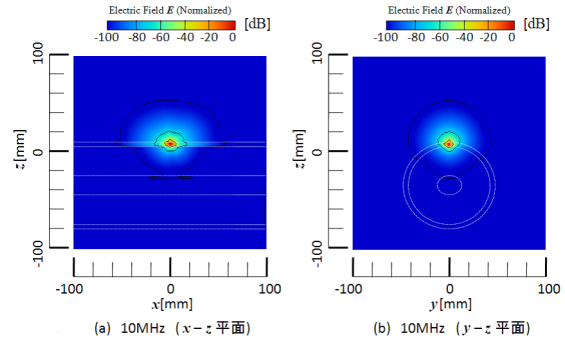


図 5 人体多層媒質を模擬した円柱の電界強度分布 ( $x-z$  平面と  $y-z$  平面 10MHz)

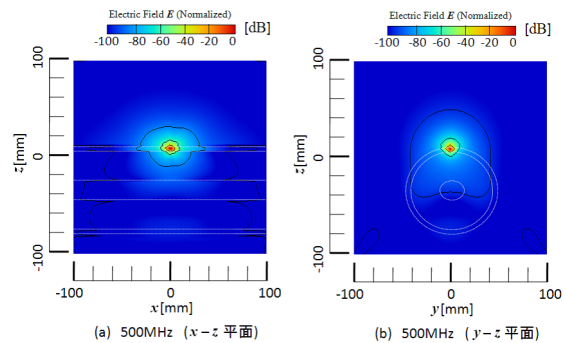


図 6 人体多層媒質を模擬した円柱の電界強度分布 ( $x-z$  平面と  $y-z$  平面 500MHz)

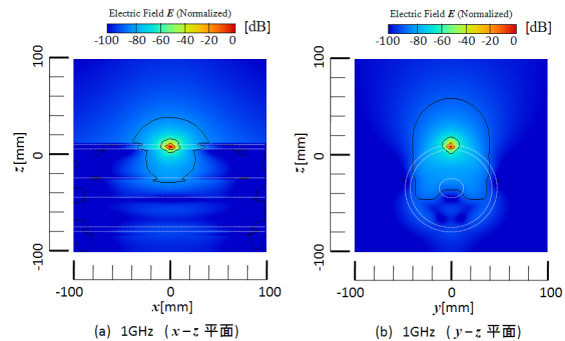


図 7 人体多層媒質を模擬した円柱の電界強度分布 ( $x-z$  平面と  $y-z$  平面 1GHz)

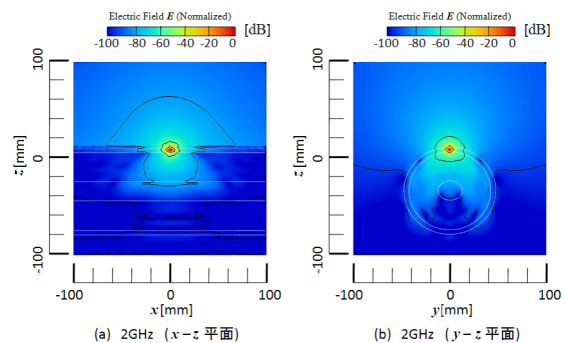


図 8 人体多層媒質を模擬した円柱の電界強度分布 ( $x-z$  平面と  $y-z$  平面 2GHz)

### 3.2 FDTD 法による電界強度の計算

FDTD 法を用いた円柱モデルに点波源を挿入した状態のモデル化を検討する．図 4 に示すように解析モデルの中央深さ 4mm の箇所へ  $x$  軸方向に 2mm の間隔で  $3V_{p-p}$ , 10MHz ~ 2GHz の正弦波電圧を給電する．

### 3.3 電界強度分布

10MHz と 500MHz の電界強度分布を図 5, 図 6 に示す．電界強度分布の観測面は  $x-z$  平面 ( $y = 0\text{mm}$ ) と  $y-z$  平面 ( $x = 0\text{mm}$ ) とし, 1500 v/m を 0dB として規格化した． $x-z$  平面の電界強度分布における 10MHz ~ 500MHz の周波数帯は両者とも無限平面モデルと似た結果となっている．皮下組織と他の媒質を比較すると, 皮下組織層 ( $z = +12\text{mm}$ ) の電界強度分布はおよそ  $x$  軸方向に  $\pm 5\text{mm}$  ほど伸びている．一方,  $y-z$  平面の電界強度分布図は, 円柱モデルの皮下組織層 ( $z = +12\text{mm}$ ) に沿う電界は他の媒質層との違いが見られないことが確認できる．次に 1GHz と 2GHz の電界強度分布を図 7, 図 8 に示す．1GHz は 500MHz の電界強度分布と酷似しており, さらに -60dB ~ -80dB の分布が 500MHz に比べて広がっている．筋肉と骨の層まで -60dB ~ -80dB の電界強度が広く表れている．最後に 2GHz では  $z$  軸方向へ自由空間への放射範囲が最も広い．また,  $y-z$  平面において皮下組織層 ( $z = +12\text{mm}$ ) に沿う電界が表れており, 給電点 ( $z = +12\text{mm}$ ) から -80mm 付近まで伸びている．

## 4 球 (頭部) モデル

### 4.1 解析モデル

球モデルも真皮は 2mm, 皮下組織は 4mm とした．頭蓋骨は脳頭蓋と顔面頭蓋に分けられるが, 顔面頭蓋は呼吸器, 消化器官と筋肉が付いておりインプラントデバイス挿入する箇所としては難しい．そこで脳頭蓋側に挿入する場合を検討する．頭蓋の計測値は, 最大長, 最大幅, 最大高から算出し, 最大長は 178.9mm, 最大幅は 140.3mm, 最大高は 138.1mm である．また, 脳を球にモデル化するため頭蓋骨の半径は 84mm, 厚さ 16mm とした．脳の大半は終脳 (大脳) が占めている．よって, 脳の誘電率は終脳を用いる．脳の直径は 68mm とした．図 9 は本研究の解析モデルを示している．

### 4.2 FDTD 法による電界強度の計算

FDTD 法を用いた球 (頭部) モデルに点波源を挿入した状態のモデル化を検討する．解析領域は,  $300 \times 300 \times 300\text{mm}^3$  である．図 9 に示すように皮下組織の中央深さ 4mm の箇所へ  $x$  軸方向に 2mm の間隔で  $3V_{p-p}$ , 10MHz~2GHz の正弦波電圧を給電する．

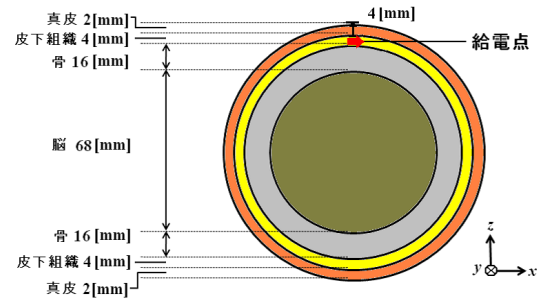


図 9 人体多層媒質を模擬した球の解析モデル

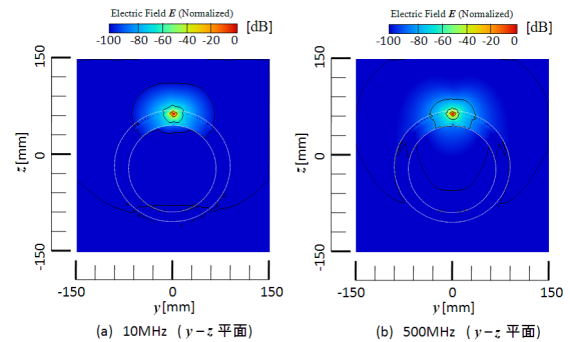


図 10 人体多層媒質を模擬した球の電界強度分布 ( $y-z$  平面 10MHz と 500MHz)

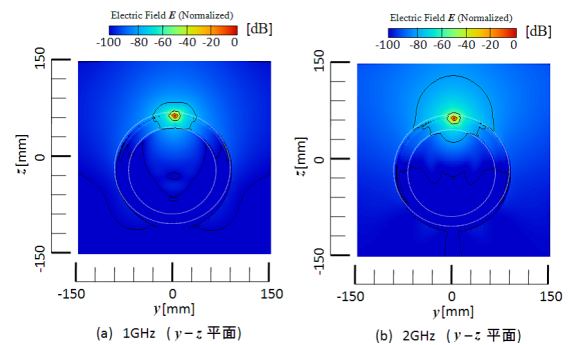


図 11 人体多層媒質を模擬した球の電界強度分布 ( $y-z$  平面 1GHz と 2GHz)

### 4.3 電界強度分布

10MHz と 500MHz の電界強度分布を図 10 に示す．電界強度分布の観測面は  $y-z$  平面 ( $x = 0\text{mm}$ ) とし, 1500 v/m を 0dB として規格化した．図 10 (a) の 10MHz は自由空間上方 ( $z = +72\text{mm}$ ) への放射および皮下組織と骨の多層に -60dB ~ -80dB の電界強度分布が広がっている．脳への電界は -80dB 以下であり, ほとんど電界強度分布はみられない．一方図 10 (b) の 500MHz は 10MHz ほど自由空間上方 ( $z = +72\text{mm}$ ) と皮下組織と骨の層に電界強度分布は広がっていない．次に 1GHz と 2GHz の電界強度分布を図 11 に示す．図 11 (a) の 1GHz は 500MHz と酷似した電界分布図

となっている．図 11 (b) の 2GHz の電界分布図は自由空間上方 ( $z = +72\text{mm}$ ) への放射が他の周波数帯に比べ最も広く分布している ( $-60\text{dB} \sim -80\text{dB}$ )．

## 5 電界強度分布の検討

本研究では 10MHz ~ 2GHz までの周波数帯を無限平面モデル，円柱（腕部）モデル，球（頭部）モデルにおいて，FDTD 法を用いて解析した．各モデルで皮下組織層の電界強度が強い傾向が確認できた．そこで，皮下組織と筋肉の導電率および比誘電率と電界の関係を検討する．

### 5.1 誘電体における電界強度

図 12, 13 は真皮と皮下組織と筋肉の比誘電率と導電率をグラフにしたものである．媒質の中を流れる電流は変位電流と伝導電流から成る．伝導電流は電界に比例し，この比例定数は導電率  $\sigma$  である． $\sigma$  の大きさは金属では約  $10^7 \text{ S/m}$ ，半導体では  $10^{-8} \sim 10 \text{ S/m}$ ，絶縁体ではこれより小さい．人体媒質の導電率は高周波数ほど，変位電流の伝導電流に対する比が大きい [5]．図 12 のグラフを見ると筋肉と真皮の導電率は皮下組織の導電率に比べて高く，高周波数になるほど金属の導電率に近づく．高周波数になるにつれ筋肉と真皮は金属の導電率に近づくことは，電気的に見て皮下組織層は金属層に挟まれている状態に近づくことになる．

また図 13 のグラフを見ると皮下組織の比誘電率が低い値となっている．他の誘電体の比誘電率は，ポリエチレンが 2.3，アルミナが 8.5，ゴムが 2 ~ 3.5 である．高い導電率に挟まれた，低い比誘電率をもつ皮下組織層は構造として同軸給電線の構造に似ている．この導電率と比誘電率と人体多層媒質層によって，皮下組織層に電界強度が強くなる広がったと考えられる．

### むすび

本研究では人体多層媒質内に給電点を設置し，10MHz ~ 2GHz の正弦波電圧を励振させた．また，人体多層媒質は無限平面モデル，円柱（腕部）モデル，球（頭部）モデルの 3 種で解析し，数値解析には FDTD 法を用いて電界解析を行った．高周波数になるにつれて電界強度分布が広がること，皮下組織層に沿った電界分布が広がることの 2 点が確認できた．

今後の課題として，電界分布だけでなく磁界分布，電流分布，ポインティングベクトル，入力インピーダンスを含めた総合的な観点から周波数依存性を検討する．また，SAR (Specific Absorption Rate) 評価を用いた設計，超小型化デバイスの設計が今後の課題に挙げられる．

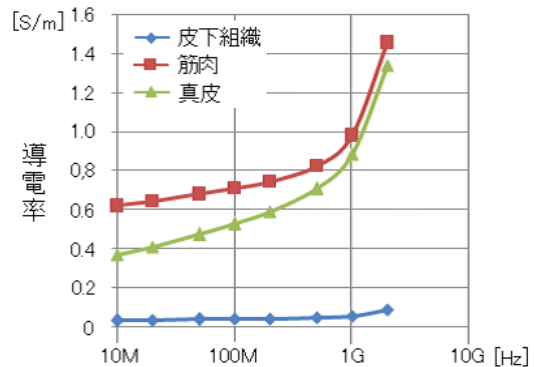


図 12 人体組織における導電率の周波数依存性

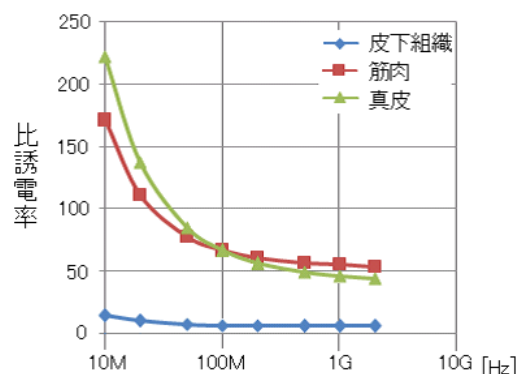


図 13 人体組織における比誘電率の周波数依存性

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，丁寧なご指導と数々のご意見を賜りました本学，稲垣直樹教授，有益な助言，多大のご配慮とご協力を頂きました藤井勝之講師に深く感謝いたします．

## 参考文献

- [1] 藤井勝之：ウェアラブル機器の電磁界伝送モデルに関する研究，千葉大学自然科学研究科 2005 年度博士論文（2005）．
- [2] 関卓也：アクティブインプラントデバイスの基礎的検討，南山大学数理情報学部 2007 年度卒業論文（2007）．
- [3] 宇野亨：FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析，コロナ社（1998.3）．
- [4] 鈴木隆雄：日本人のからだ-健康・身体データ集-，朝倉書店（1996.4）．
- [5] 稲垣直樹：電気・電子学生のための電磁波工学，丸善株式会社（1980.9）．