

折り返しダイポールアンテナによる 人体への熱作用の低減および広帯域化に関する研究

2012SE031 橋口弘明 2012SE280 山岸竜之介 2012SE288 安井元規

指導教員：奥村康行

1 はじめに

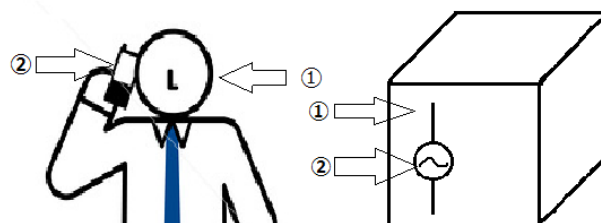
技術革新により、音声・データなどの通信を可能とする製品が次々と生まれ、そういった通信機器は世界中の至る所で日常的に使われるようになった。中でも通信機器は日本の人工約 1 億 3000 万人に対し、携帯電話契約数は約 1 億 5000 万 [1] とされており、誰もが所持しているにもかかわらずの普及率である。こうした、移動通信端末は技術革新と共に徐々に普及率を延ばしていったが、その一方で移動通信端末に搭載されるアンテナの用途、設計・開発はより複雑になっていった。端末の小型化に伴い、搭載できるアンテナのサイズは量が制限されたために、一つのアンテナで多くの周波数に対応するなどの、アンテナの性能・効率の向上と電波防護指針に関する安全基準への対応という課題も加わったためである。この 2 点が、アンテナ開発では重要性を増してきている。また、アンテナと人体は共に影響を与えるということも分かっているため、相互作用の低減を考慮する必要も存在している。

2 課題

本論文では、シミュレーション及び実測を通して、無線通信が用いられる場面において、発生するアンテナと人体の相互作用のひとつである熱作用の低減 (SAR の低減) を考慮しつつ広帯域となるアンテナを提案することが課題である。本研究では先行研究 [2][3] 同様、図 1 のように移動通信端末を半波長ダイポールアンテナ、人体頭部を脳等価ファントム (人間の脳とほぼ同じ電気定数をもつ、1 辺 200mm の立方体) に置き換え、モデル化を行なう (半波長ダイポールアンテナは多種多様なアンテナの中でも基本的なアンテナという位置づけである)。先行研究 [3] では半波長ダイポールアンテナに反射板を配置して、熱作用 (SAR) の低減を行い、そこから給電線路との整合をとるため半波長ダイポールアンテナの代わりに折り返しダイポールアンテナを提案している。先行研究 [2] では先行研究 [3] を基として折り返しダイポールアンテナの 2 次線を太くしていくことで広帯域化を目指したが、逆に狭帯域化する結果となっている。そこで本研究では折り返しダイポールアンテナの 1 次線を太くしていくこと、2 次線を細くしていくことで先行研究 [2] でできなかった広帯域化を目指す。アンテナの周波数帯は先行研究 [2] 同様、2.45GHz を想定し、アンテナのエレメント長は 52mm とした。

また、先行研究 [2][3] で行なわれている反射板を配置した場合のシミュレーションを確認する (シミュレーションではアンテナの帯域などが反射係数 S_{11} を用いて表され

る)。詳細については 3 章で触れる。



①人体頭部→脳等価ファントム
②携帯電話→半波長ダイポールアンテナ

図 1 アンテナと人体の相互作用のモデル化

3 局所 SAR の低減法と解決策

近年の携帯電話では、LTE や 4G 回線などの高周波帯を利用した通信が主流になりつつある。この帯域では低周波帯に比べ、人体組織への導電率が高くなるため、電磁波エネルギーの人体への吸収による熱作用が顕著に発生することが分かっている [2]。この熱作用は、比吸収率と言い、SAR (Specific Absorption Rate) を用いて表される。また、アンテナの小形化に伴い、よりエネルギーが局所に集中するため、局所 SAR を用いて定義される。局所 SAR は任意の人体組織の 1g または 10g あたりで計測される。数式で表すと

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} [\text{W/kg}] \quad (1)$$

となる。上記の式において、 E は電界の振幅 (実効値) [V/m]、 σ は成体組織の導電率 [S/m]、 ρ は生体組織の密度 [kg/m^3] を表している [3]。SAR の規制値は国によっても異なるが、日本の場合は 2W/kg 以下までとされている [3]。図 1 のモデルに反射板を設置し、反射板付き半波長ダイポールアンテナとすることで、脳等価ファントム表面の局所 SAR の低減が可能だということが先行研究 [3] より分かっている。しかし、この手法を用いることで、狭帯域化する問題が生じる。また、ダイポールアンテナに反射板を設置するとアンテナのインピーダンスが低下し整合がとりにくくなる [3] ため、半波長ダイポールアンテナの応用系である半波長折り返しダイポールアンテナに反射板を付けた、反射板付き折り返しダイポールアンテナを提案し [3]、実験を行なっていく。半波長折り返しダイポールアンテナは整合性がとりやすい [3] という性質があるためである。狭帯域を解決するために、反射板を考慮にいれつつ

半波長折り返しダイポールアンテナのエレメント（銅線）の太さを調整し、できるだけ広帯域にできる条件を探していく。

3.1 局所 SAR に関するシミュレーション及び実測の条件

図 2 に、シミュレーションのモデルを示す。半波長ダイポールアンテナと脳等価ファントム表面との距離を 15mm とする。素子長（銅線）52mm(0.42 λ) の半波長ダイポールアンテナから 5mm 離れた位置に、素子長 L 、幅 10mm の反射板を平行に配置する。脳等価ファントムのモデルとして 1 辺 200mm の立方体（比誘電率 $\epsilon_\lambda = 42.5$ 、導電率 $\sigma = 1.51\text{S/m}$ 、密度 $\rho = 1030\text{kg/m}^3$ [3]）をもちいる [8]。反射板の素子長 L は用いるアンテナの素子長に対応している。52mm(0.42 λ) の場合、 $L=52\text{mm}(0.42\lambda)$ となる。

このモデルのシミュレーション行なっていくが、先行研究 [3] より半波長ダイポールアンテナでは反射板を配置した場合に整合をとることが困難 [6] になるため半波長折り返しダイポールアンテナを提案し [3]、それ以外の条件を同じにしてシミュレーション行なう。そのモデルを図 3 に示す。またシミュレーションを行なう際、変更する条件はアンテナの 1 次線、2 次線の素子（銅線）の太さを変更していく。それぞれの太さを調整することで、インピーダンスが変化し、計算上ではあるが広帯域化することができる。これについては、4 章で触れる。

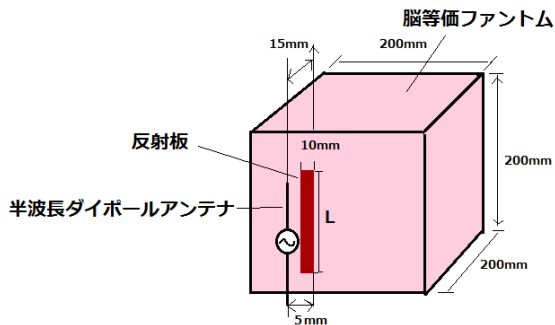


図 2 反射板配置によるシミュレーションモデル 1

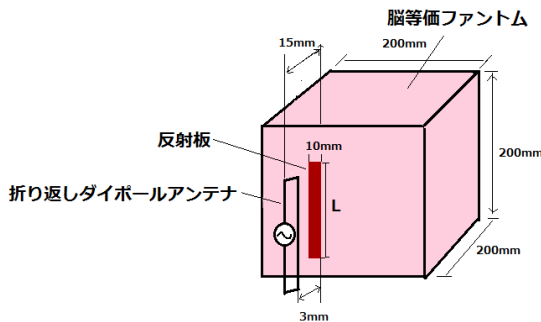


図 3 反射板配置によるシミュレーションモデル 2

4 太さの異なる折り返しダイポールアンテナの広帯域化手法

図 4 は、人体頭部モデル近接時の半波長ダイポールアンテナと反射板付き折り返しダイポールアンテナの反射係数 S_{11} のグラフである。一般的に反射係数 -10dB 以下であれば伝達電力 90% 以上になると言われている [6]。図のように半波長ダイポールアンテナの S_{11} の値が -10dB 以下は 24.9%。反射板付き折り返しダイポールアンテナの S_{11} の値が -10dB 以下は 6.9% と狭くなる。ここで折り返しダイポールアンテナの素子の太さを変えることにより、step up ratio を調整し、給電線路とのインピーダンス整合を取ることで、アンテナの広帯域化を図る。

折り返しダイポールアンテナのインピーダンス Z は、次式で表すことができる。

$$Z = \frac{1}{v_i^2} Z_r \quad (2)$$

上記の式において、 Z_r はダイポールアンテナの入力インピーダンス [] である。 $1/v_i^2$ は、step up ratio(ステップ・アップ・レシオ) とよばれ、1 次線、2 次線の太さが等しい場合 4 となり、半波長ダイポールアンテナの 4 倍のインピーダンスをもつことがわかる。これによりインピーダンスの調節することが可能である [10]。

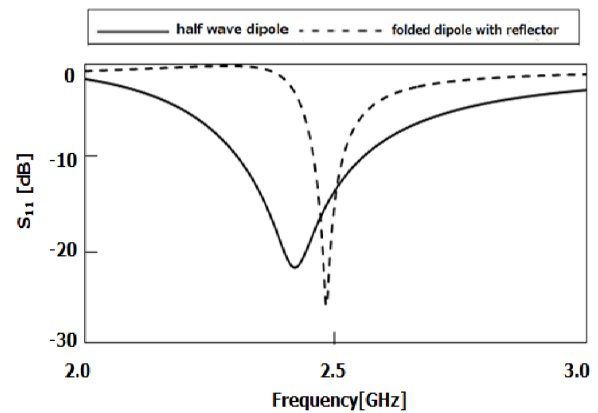


図 4 アンテナの狭帯域化

5 シミュレーション条件

シミュレーションで用いた解析モデルは図 3 である。1 次線に対して 2 次線を細くしたデータと 2 次線に対して 1 次線を太くしたデータを計測したが予稿では、2 次線に対して 1 次線を太くしたデータ載せる。今回はアンテナの素子長 52mm の 2 つの銅線の間隔は 9mm となっている。アンテナと人体頭部モデル表面の距離は 15mm、アンテナの 2 つの銅線のうち、2 次線から 3mm 離れた位置に、素子長 67mm、幅 10mm の反射板を配置している。給電点を含む 1 次線から折り返し部分までを 1mm、2mm、3mm と太くしていき 2 次線の直径を 1mm で固定した時の反射係数

S_{11} を測定する。周波数は、2.45GHz を想定し、測定範囲は 2GHz から 3GHz としている。

6 シミュレーション結果

図 5 はシミュレーション結果を示したグラフである。1 次線 3mm, 2 次線 1mm が最も広帯域となった。2GHz から 3GHz において 1 次線 1mm, 2 次線 1mm の場合、 S_{11} が -10dB 以下約 6.9%, 1 次線 2mm, 2 次線 1mm の場合、 S_{11} が -10dB 以下約 10%, 1 次線 3mm, 2 次線 1mm の場合、 S_{11} が -10dB 以下約 13.4% となった。よってシミュレーション結果から折り返しダイポールアンテナの 2 次線に対して 1 次線を太くしていくと最大で、6.5% 広帯域となることが確認できた。

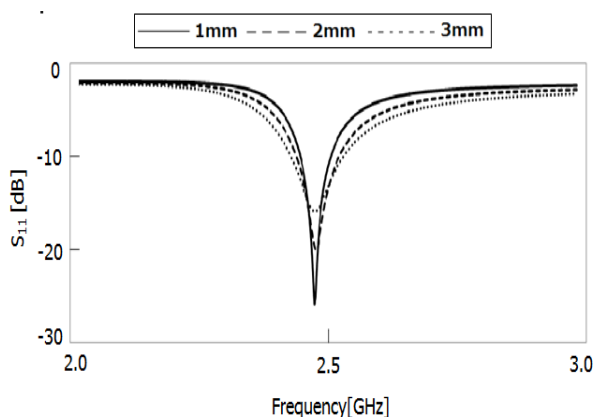


図 5 シミュレーション結果

7 人体等価モデルの組成

シミュレーションと同条件の実験を行うため、人体頭部モデルを作成する。本論文では、2.45GHz 用の脳等価ファントムを自作する。ファントムの材料として、脱イオン水、形状保持および水分の分離を防ぐ寒天、比誘電率、導電率を調整するポリエチレン粉末、塩化ナトリウム、増粘剤として TX-151、保存用としてアジ化ナトリウムを使用した。下の表 1 はファントムの組成である。

表 1 脳等価ファントムの分量

原料	量 (g)
脱イオン水	8437.5
寒天	261.5
塩化ナトリウム	53.7
アジ化ナトリウム	5.0
増粘剤 (TX-151)	142.7
ポリエチレン粉末	1370.2

7.1 脳等価ファントムの作成

図 6 は、脳等価ファントムの完成図である。作成手順として鍋に脱イオン水、塩化ナトリウム、アジ化ナトリウム、寒天を入れ均一に混ぜる。調理器でファントムを焦がさな

いようにヘラで数時間加熱する。加熱中のファントムを空气中で少量感想させ凝固したら加熱を止める。TX-151 をふるいにかけながら、数回に分けて手早くかき混ぜ、型に流し一晩冷却する。実験の手順として、使用するアンテナは、1 次線の太さが 1mm, 2mm, 3mm と異なる 3 本の折り返しダイポールアンテナ、反射板としては銅板を使用した。人体モデルは前節で示した脳等価ファントム。反射板やアンテナを固定する土台は、不導体で構成した。この実験ではネットワークアナライザを測定器として反射係数 S_{11} を測定する。

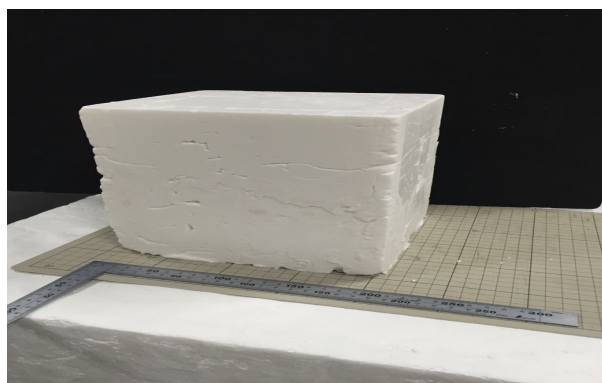


図 6 脳等価ファントム

8 折り返しダイポールアンテナの自作

同様に実験を行うため、太さの異なる折り返しダイポールアンテナの作成する手順を示す。図 7 は完成した折り返しダイポールアンテナである。使う材料は、太さの異なる銅線 3 本（本研究では、1mm, 2mm, 3mm）、セミリジッドケーブル、オス型 SMA コネクタ、糸のこぎり、研磨材、ニッパー、はんだを使用する。糸のこぎり で 10cm に切断したセミリジッドケーブルを 3 本用意し研磨材で磨く。切断したケーブルの先端から 20mm ほど外胴体と誘導体を取り除く、片方のケーブルの先端の内導体とオス型 SMA コネクタを、もう片方に 1 次線として 1mm, 2mm, 3mm の銅線をはんだ付けする。そしてはんだ付けしたアンテナの 2 次線に 1mm の銅線をはんだ付けする。



図 7 3 本の折り返しダイポールアンテナ

9 実験構成および測定方法

図8は、実際の実験風景である。測定器はネットワークアナライザを用いた。反射板として幅10mm、長さ67mmの銅板を使用した、折り返しダイポールアンテナと反射板を固定するために不導体である発砲スチロールを治具として用いた。配置は、シミュレーション条件と同じアンテナの2次線から反射板を3mm、アンテナから脳等価ファントムまでを15mmとした。この実験ではアンテナの反射係数 S_{11} を測定する。

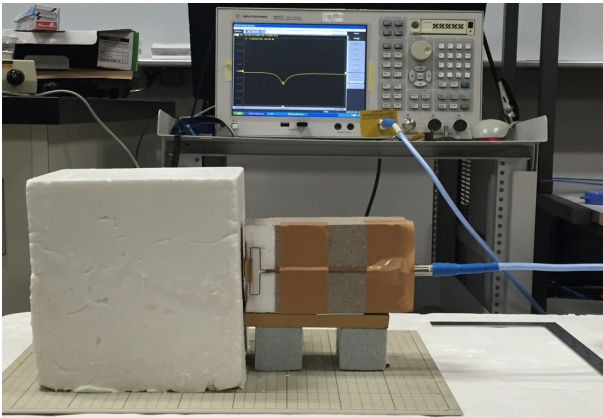


図8 実験風景

10 実験結果

図9は、実験結果を示したグラフである。2GHzから3GHzにおいて1次線3mm、2次線1mmの場合 S_{11} の値が-10dB以下は、およそ15.8%、1次線2mm、2次線1mmの場合 S_{11} の値が-10dB以下は、およそ12%、1次線1mm、2次線1mmの場合 S_{11} の値が-10dB以下は、約8%となった。この結果から2次線にたいして1次線を太くしていくと最大で7.8%広帯域になることが確認でき、シミュレーションと実験では S_{11} の値に誤差はあるが同じ傾向になったため実験結果の有効性を示すことができた。

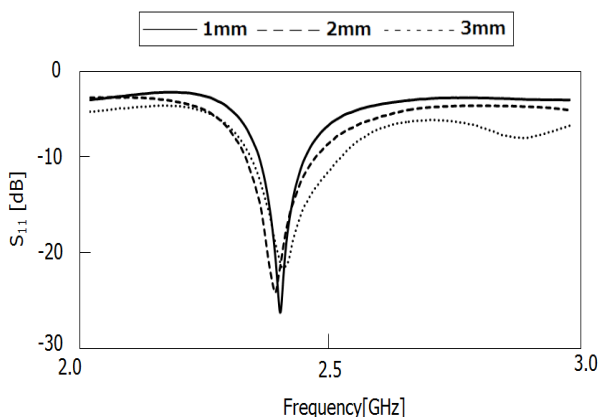


図9 実験結果

11 まとめと今後の課題

本研究は、携帯電話を使用する際、先行研究[2][3]より半波長ダイポールアンテナに反射板を配置した反射板付きダイポールアンテナではインピーダンスが急激に低下し、給電線路とのインピーダンス整合がとれなくなることがわかっているため、先行研究[2][3]同様、半波長ダイポールアンテナの代わりに折り返しダイポールアンテナを提案し、熱作用の低減および広帯域化することを目標とした。第1章では、現代の携帯電話端末に搭載されるアンテナの小型化に伴い、アンテナ設計の複雑化について説明した。第2章では本研究の課題、第3章ではSARの低減方法、第4章以降では、幅広い周波数帯で使えるようにするため、折り返しダイポールアンテナのstep up ratioを利用して2次線を1mmとしたときに、1次線の太さを1mm、2mm、3mmと変化させていったとき、3mmのとき最大で2GHzから3GHzの間で-10dB以下が約15.8%となり2次線に対して1次線を太くしていくことで7.8%広帯域になることが、確認できた。今後の課題として実用化を考えて、さらに熱作用を減らし、広帯域となるよう考えていくことが課題である。

参考文献

- [1] 総務省, “電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成26年度第4四半期 (3月末))” http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000092.html (accessed sep. 18, 2015).
- [2] 神原拓馬, “人体近傍に配置された2線式折り返しダイポールアンテナの広帯域化に関する研究”, 2013年度南山大学大学院修士論文, jan.2014.
- [3] 岡野由樹, 河井寛記, 小柳芳雄, 吉村博幸, 伊藤公一, “反射板付き折り返しダイポールアンテナを用いた局所SARの低減に関する検討”, 信学技報, A・P2001-159. December 2001.
- [4] C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design,” Wiley-interscience, 2005.
- [5] A. Z. Elsherbeni, P. Nayeri and C. J. Reddy, “Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software”, Scitech Pub Inc, 2014.
- [6] 石井望, “アンテナ基本測定法,” コロナ社, 東京, 2011.
- [7] 電子情報通信学会, “アンテナ工学ハンドブック,” オーム社, 1980.
- [8] 伊藤公一, 古屋克己, 岡野好信, 浜田リラ, “マイクロ波帯における生体等価ファントムの開発とその特性” 信学論 (B-II), vol.81-B-II, no.12, pp.1126-1135, Dec.1998.
- [9] 平沢一紘, “アンテナの特性と解法基礎技術”, 日刊工業新聞社, 2011.
- [10] 狩原真彦, “空中線形・電波伝送の研究 [上]”, 近代科学社, 1973.