

人体を素子として利用した VHF 帯アンテナの特性評価

M2022SC005 兼松 凌基

指導教員：藤井 勝之

1 はじめに

組織構造の狭い部分の局所ピーク SAR(比吸収率: Specific Absorption Rate)が ANSI (米国国家規格協会: American National Standards Institute)が推奨している値より高くなる可能性を指摘し、電波防護指針の観点から評価を行うことを目的とした研究がある[1, 2]. その研究の中で 10MHz から 100MHz の周波数において、電磁波に曝露された導体板上に直立している身長 1.75m の人体は 40MHz で電流分布が最大となり、10.4mA/(V/m)となることがわかっている. この現象を逆手に取り、著者らは人体をアンテナとして利用できる可能性があると考え. 人体を使うことで、HF 帯や VHF 帯で使用されるアンテナのように、体長と比して長い金属の素子を持ち運ぶ必要がなく、設置場所の自由度も高い. さらに、人体は誘電体であるため、小型アンテナとして利用でき、姿勢を変化させることで共振周波数を変化させることも可能である. しかし人体をアンテナエレメントとして利用した際の諸特性を評価した論文は著者らが調べた限り見当たらない.

そこで本研究では、大地と人体間に給電をし、人体を用いたときの放射効率や人体近傍における電界強度分布、垂直面と水平面の指向性から人体をアンテナエレメントとして利用できる可能性について検討を行う. 放射効率の測定には、スタイロフォーム材で組み立てた立方体の内側にアルミニウム箔を貼り付け Wheeler Cap を自作した. この Wheeler Cap を用いて放射効率を実測により評価し、人体を含めたアンテナの放射効率の測定が可能であることを示す. また SAR の評価を行い、本研究で提案するアンテナが人体に供給できる最大の電力を示す.

2 シミュレーションのモデル

人体を素子として利用したアンテナの諸特性を解析するために文献[3]を参考にして図 1 のようなモデルを用いる. 人体モデルには NICT の日本人成人男性の数値人体モデル[4]を用いた. この人体モデルの両足に同相で電流を分布させるために、平板の上に直立の姿勢を取って配置している. 足元の平板は $300 \times 450\text{mm}^2$ の平板 2 枚を用いて、65MHz から 85MHz の範囲で正弦波電圧 1V をこの平板間に給電する. また、人体モデルの足の裏と、平板の間と平板と底面の間をともに 10mm とした. 自由空間上を想定し、境界条件は底面のみ PEC とし、底面以外の境界条件は PML15 層として解析を行った. このモデルは FDTD(Finite Difference Times-Domain)法のシ

ミュレータである XFDTD(ver.7.9.2.3)を用いて解析を行う.

実測で使用する人体を素子としたアンテナを図 2 に示す. 厚さ 0.3mm の銅板を使用し、図 1 に示すように銅板 2 枚を配置するために、地板-銅板間、銅板-銅板間、銅板-人体間にそれぞれ 10mm の発泡スチロールを挟んでいる.

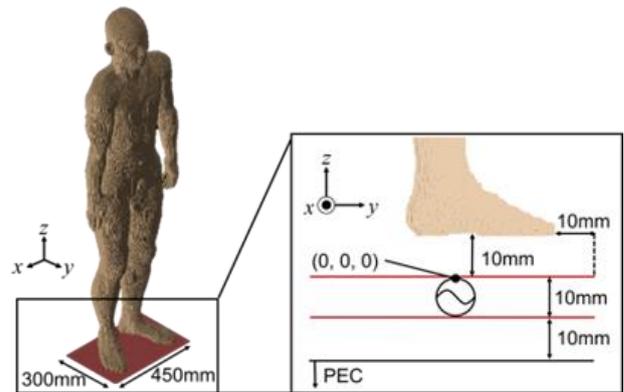


図 1 人体を素子として利用したアンテナの全体図

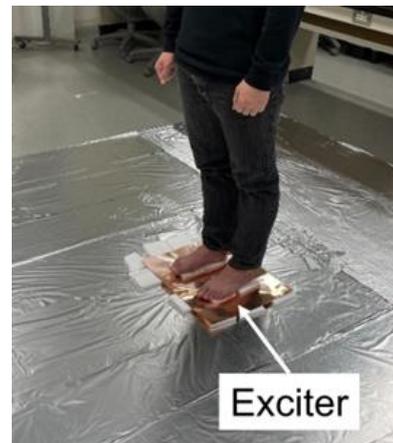


図 2 自作した人体を素子として利用したアンテナ

3 電界強度分布

図 3 に人体をアンテナエレメントとしたときの電界強度分布を示す[5]. 図 3 で示している電界強度分布は 70MHz のときであり、電界強度分布はそれぞれの最大値で規格化している. 人体をアンテナエレメントにすることによって、図 4 のようにモノポールアンテナと同様の近傍界電界が形成されることがわかる. したがって、人体はモノポールアンテナの素子に似た振る舞いをするといえる. これは 70MHz における人体の筋肉のロスタンジェントが 2.5115 [6]であり、人体が導体に近い振る舞いをするためであると考えられる.

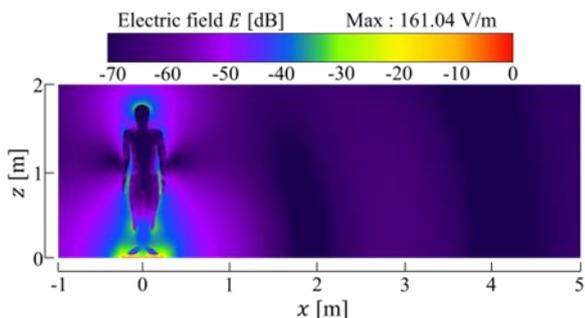


図3 人体をアンテナ素子として利用したアンテナの電界強度分布 [5]

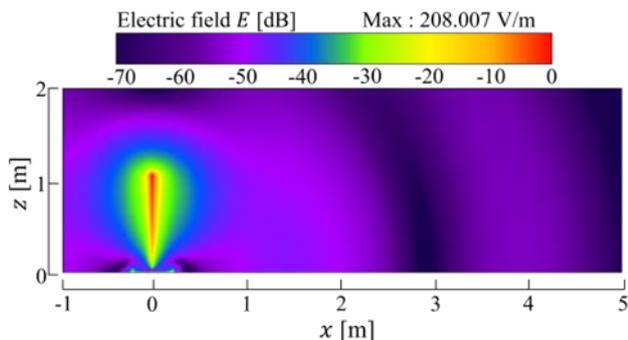


図4 モノポールアンテナの電界強度分布 [5]

4 放射効率の測定

本節では、スタイロフォーム材の内側にアルミニウムを貼り付けた Wheeler Cap を用いて、人体を素子として利用したアンテナの放射効率の測定が可能であることを示す。まず 4.1 節で測定方法と自作した Wheeler cap について述べる。次に 4.2 節では、測定による結果について述べ、人体を含めたアンテナが Wheeler 法によって測定可能であるか調べる。

4.1. 解析モデル

シミュレーションによる放射効率の解析は図 5 に示すモデルを用いて行う。Wheeler cap の大きさは半径 $\lambda_0/2\pi \approx 0.94\text{m}$ のラジアン球面を十分にみたしている $2.07 \times 2.07 \times 2.07\text{m}^3$ である。実測で使用した Wheeler cap を図 6 に示す。作製した Wheeler Cap は実測の際の持ち運びの都合上軽いスタイロフォーム材を使用し、内側に厚さ $10\mu\text{m}$ のアルミニウム箔を貼り付けている[7]。人体を利用したアンテナを Wheeler Cap で覆った状態の反射係数の振幅 $|\Gamma_f|$ と覆っていない状態の反射係数の振幅 $|\Gamma_s|$ を測定し、次の評価式で放射効率 η^Γ を求める[8]。

$$\eta^\Gamma = 1 - \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_f|^2} \quad (1)$$

また、アンテナとシールド間の共振を考慮する必要がある。今回使用したアンテナとシールド間の距離 $\lambda_g/2$ は 1.035m であり、 70MHz の波長 λ は約 4.285m である。そのため、アンテナとシールド間の距離 $\lambda_g/2$ は 70MHz の

波長の自然数倍ではない。したがって、この Wheeler cap におけるアンテナとシールド間の共振は考慮しなくてよい。

実際の測定は建物による影響をなくすために南山大学神学会のグラウンドで、風による影響をなくすため無風状態の時に行った。

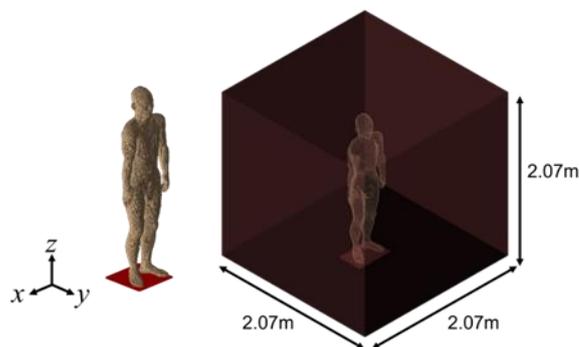


図5 放射効率解析のモデル [7]

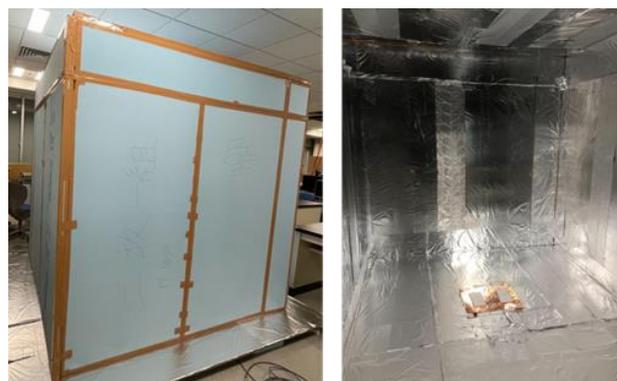


図6 自作した Wheeler Cap [7]

4.2. 結果

シミュレーションと実測による放射効率の結果の比較を図 7 に示す。65MHz から 80MHz の測定結果はシミュレーションと概ね一致している。放射効率は 75MHz で最も良くなり、約 53% という結果が示された。しかし、85MHz 以降の結果がシミュレーションと一致していないのは、実測の際に Wheeler Cap の各辺の位置が給電部から等しい距離で配置されていないことや、Wheeler Cap の内側

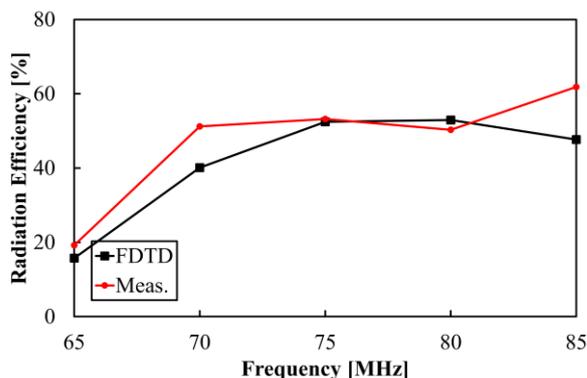


図7 放射効率の測定結果

に貼り付けたアルミニウム箔の隙間によって、測定結果に影響がでたものと考えられる。しかし、シミュレーションの結果と概ね一致していることから、人体を含めたアンテナの放射効率の測定は可能であるといえる。

5 利得の測定

本節では、人体を利用したアンテナの利得の測定について述べる。5.1 節では、人体を利用したアンテナの測定方法について説明する。5.2 節では、シミュレーションと実測の結果を示し、モノポールアンテナの利得の結果と比較する。

5.1. 測定方法

3 アンテナ法より利得の測定を行う。アンテナ 1 として $350 \times 450\text{mm}^2$ のモノポールアンテナを使用し、アンテナ 2 として $350 \times 400\text{mm}^2$ のモノポールアンテナを使用し、アンテナ 3 として人体を利用したアンテナを使用する。アンテナ 1 と 2 の組み合わせ、アンテナ 1 と 3 の組み合わせ、アンテナ 2 と 3 の組み合わせで対向させ、それぞれの $|S_{ii}|$ と $|S_{ij}|$ を測定する。ただし、 i, j は $i \neq j$ を満たす 1, 2, 3 のいずれかとする[9]。

測定の手順を図 8 を例に説明する。測定には Nano VNA を使用し、アンテナ 1 を送信アンテナとし、アンテナ 2 とする。アンテナの偏波面を一致させ、距離は遠方界条件 $r \geq 2D^2/\lambda_0$ を十分に満たし、受信電力が最大となった 4m 離して測定を行う。この時の $|S_{21}|$ を測定し、回転台とポジションコントローラーを用いて、 0° から 360° まで 5° ずつ計 72 回の測定を行う。同様の実験をアンテナ 1 と 3、アンテナ 2 と 3 の組み合わせのときにも行い、各アンテナの利得を求める。

測定は建物による影響をなくすために南山大学神言神学会のグラウンドで、風による影響をなくすために無風時に行った。

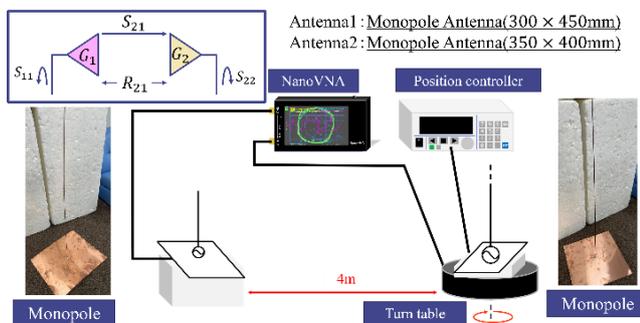
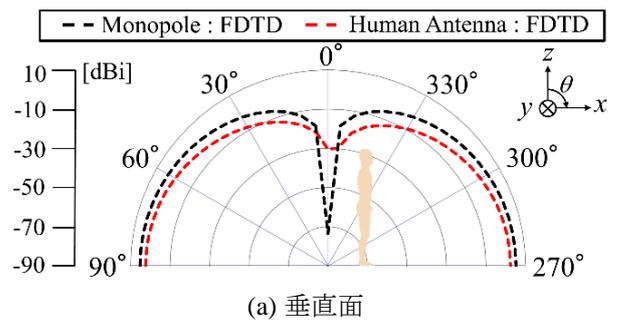


図 8 利得測定図

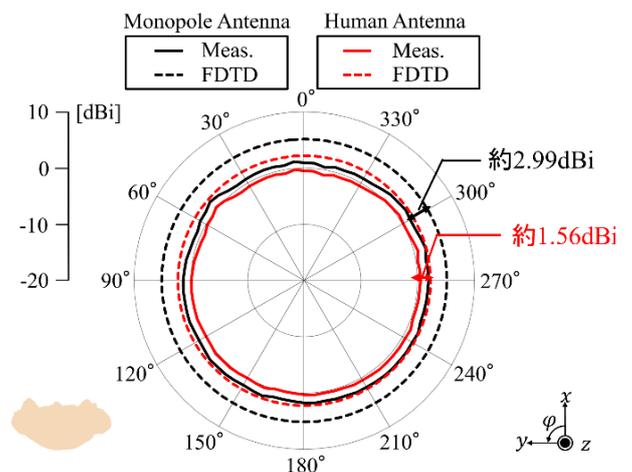
5.2. 結果

測定結果を図 9 に示す。図 9(a)は垂直面の結果であり、図 9(b)は水平面の結果である。垂直面の結果はアンテナの素子を地面に対して平行に配置しなければならず、

実際の測定が難しいため、シミュレーションの結果のみを示す。



(a) 垂直面



(b) 水平面

図 9 モノポールアンテナと人体を素子として利用したアンテナの放射指向性の比較

図 9(a)より垂直面において、人体を利用したアンテナの指向性はモノポールアンテナが形成する 8 の字型に近い形が得られている。また図 9(b)より水平面において、人体を利用したアンテナの指向性は利得の最大値と最小値の差が 5dBi 以内であり、無指向性である。モノポールアンテナの水平面の指向性は無指向性であり、人体を利用したアンテナもモノポールアンテナと似たような指向性が得られたといえる。

またシミュレーションにおける利得の最大値は、モノポールアンテナが約 5.14dBi であり、人体を利用したアンテナは約 2.26dBi である。実測時における利得の最大値は、モノポールアンテナが約 2.14dBi であり、人体を利用したアンテナは約 0.70dBi である。シミュレーションと実測の利得の差は、モノポールアンテナのときは約 2.99dBi、人体を利用したアンテナのときは約 1.56dBi である。今回使用したモノポールアンテナや人体を利用したアンテナの作製精度によってシミュレーション時の結果と差が生じたものの、実測時における人体を利用したアンテナの利得は約 0.7dBi となった。

6 SAR 評価

本研究で使用するアンテナは人体を用いたアンテナであるため、人体が電磁波に曝されることになる。ゆえに電磁波曝露量を評価するために、次の式で定義される SAR を評価する必要がある。

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

ここで、 E [V/m]: 電界強度, ρ [kg/m³]: 生体の密度, σ [S/m]: 生体の導電率とする[9].

本研究のアンテナは 70MHz の周波数帯を使用している。この 70MHz の周波数帯はラジオ放送や公共業務の移動・固定運用などに用いられる周波数帯であり[10], アマチュア無線などで使用することができない周波数帯であるため、一般的な利用を考えると曝露特性は職業的曝露ではなく、公衆の曝露から評価を行う。公衆の曝露における最大局所 SAR が 4W/kg であり、人体を利用したアンテナにおける最大局所 SAR が 4W/kg 以下になる部位は足首である。また、この時の最大の入力電力は 1.556W である。したがって、本研究のアンテナにおいて、約 1.5W までであれば、このアンテナに電力を供給することが可能である。

7 おわりに

本論文では、数 10MHz で人体が共振する現象を利用し、人体をアンテナとして利用できる可能性の検討を行った。解析手法は数値電磁解析手法の一つである FDTD 法を用いて、平板電極の上に人体モデルを配置し、人体をアンテナ素子としたときの電界強度分布を調べた。人体が含まれることで人体が素子として働き、モノポールアンテナに類似した電界分布が形成されることを確認した。次に放射効率の測定を行った。放射効率の結果は 60MHz から 80MHz でシミュレーションの結果と概ね一致した。放射効率は 75MHz で最もよくなり、約 53% という結果が示された。しかし、85MHz 以降の結果がシミュレーションと異なる結果が得られたが、人体を含めたアンテナの放射効率の測定は可能であることは明らかとなった。また、垂直面と水平面の指向性と利得について調べた。指向性は垂直面と水平面ともにモノポールアンテナの指向性と近い指向性が示された。人体を利用したアンテナの利得はシミュレーションのときに約 2.26dBi であり、実測のときに約 0.7dBi となった。最後に SAR から人体に供給できる電力の最大値は約 1.5W まで可能であること示された。

現在の問題点として、今回のアンテナの整合が取れていないという点が挙げられる。今後の課題は本研究で利用したアンテナに整合回路を用いて整合をとることや、人体の特性モード解析を行い、その電流分布を解析することで、本研究で提案した形状ではない整合の取れた人体

を含めたアンテナを作り、諸特性の評価を行っていくことである。

参考文献

- [1] P. J. Dimbylow: "Finite-difference time-domain calculations absorbed power in the ankle for 10-100 MHz plane wave," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.38, no.5, pp.423-428, May 1991. DOI:10.1109/10.81561
- [2] O. P. Gandhi, J. Y. Chen, and A. Riazi: "Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.BME-33, no.8, pp.757-767, Aug. 1986. DOI: 10.1109/TBME.1986.325899
- [3] S.Igou, A.Fujiwara, M.Taki, "Equivalent Circuit of an Intra-Body Communication Device in Consideration of Human Body Resonance," IEICE B, J95-B, no.9, pp.1090-1097, Sept. 2012.
- [4] 長岡智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡辺聡一, 本間寛之, 鈴木保, 河合光正, 酒本勝之, 小川幸次, 此川公紀, 久保田勝巳, 金鳳洙, 多氣昌生, 山中幸雄, 渡辺敏, "日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発," 生体医工学, vol.40, no.4, pp.239-246, Oct. 2002. DOI: 10.11239/jsmbe1963.40.239
- [5] R. Kanematsu, K. Fujii, Y. Okumura, M. Umehira: "Performance evaluation of antenna using the human body as an element," Proc. 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics, pp. 201-202, Osaka, Japan, Oct. 2022. DOI: 10.1109/GCCE56475.2022.10014323
- [6] IFAC, "Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz," IFAC-CNR, Florence(Italy), 1997-2021, "http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php, accessed May. 21 2022.
- [7] 兼松凌基, 藤井勝之, 奥村康行, 梅比良正弘, "人体を素子として利用した VHF 帯アンテナの放射効率測定用 Wheeler Cap の作製," 映像情報メディア学会技術報告, vol. 47, no. 5, pp. 25-28, Feb. 2023
- [8] N. Ishii, "Radiation Efficiency Measurement for Small Antennas Using a Metallic Shield," IEICE B, vol.J95-B, No.9, pp.1025-1035, Sept. 2012.
- [9] 石井望, "アンテナ基本測定法, コロナ社, 東京, 2011.
- [10] 総務省, "我が国の電波の使用状況," 総務省, Mar. 2023. <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/>, 参照 Jan. 18 2024.