

自動二輪車に搭載した 145MHz 帯モノポールアンテナの放射特性と SAR の解析

M2017SC005 加藤隆介

指導教員：奥村康行

1 はじめに

本研究はアマチュア無線を使用した 145MHz 帯車車間通信を仮定し、自動二輪車に接地されたモノポールアンテナの電磁界解析を行った。ここで図 1 に、アンテナの使用状況を示す。これまで、移動体通信で使用されるアンテナの研究対象としては、主として自動車に取り上げられ、参考文献 [1] など、多くの研究報告がある。対して、自動二輪車の研究報告は少なく、本研究の使用状況においては、他の研究報告例はない。また、自動車は人体が金属のボディで遮蔽されているのに対し、自動二輪車は人体が遮蔽されておらず、むき出しの状態である。よって、人体とアンテナの相互作用を考慮しなければならず、人体を含んだ電磁界解析が必用であるといえる。

本研究は、自動二輪車のフレームに接地されたモノポールアンテナと人体との相互作用の観点から動作原理の解明を目的とする。したがって、より一般的なモデルとして議論をするため、車種によって異なる複雑なフレーム形状をそのままモデル化することを避け、簡素化したモデルで解析を行った。最後に、等価回路を用いた理論式から電源の有能電力の内訳を示し、SAR 解析を行った。

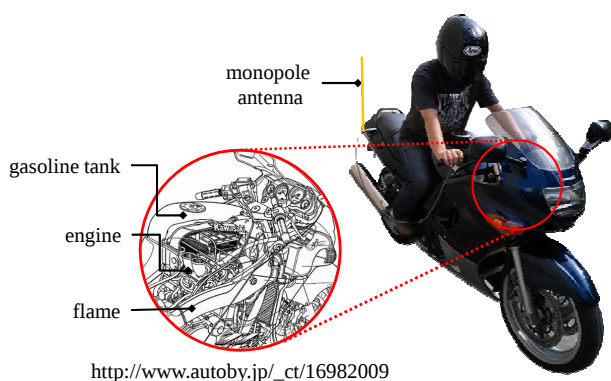


図 1 アンテナの使用状況と実車の内部構造

2 自動二輪車の簡素電磁界解析モデル

本研究は FDTD 法を用いてシミュレーションを行った。まず始めに、自動二輪車のフレームを大きく簡素化したモデルを提案する。この簡素化の意図は、フレームに接地されたモノポールアンテナの基本的な動作原理の究明である。また、自動二輪車は数千以上もの部品から構築されており、実車を完全にモデル化することは困難を極める。さらに、アンテナ素子によって励振される放射電流がアンテナ素子周辺に存在する電子制御部品やその他

のパーツに流れ、アンテナ素子上の電流と結合して一つの電磁気的な系、すなわちアンテナ系を構成する可能性がある。以上の点から、複雑な実車モデルを使用することを避け、エンジンやマフラー等のパーツ、またフレームの曲線を考慮せずシンプルな直方体状のモデルで考察する。図 2 に解析する簡素モデルを示す。ここで、簡素フレームの上面側部にアンテナ基台を設け、フレームの端部からアンテナを接地する位置までの距離を接地位置 $d[\text{m}]$ と定義する。接地位置 $d[\text{m}]$ はフレームに沿って y 軸方向に、 $d = 0.01\text{m}, 0.1\text{m}, \dots, 0.4\text{m}, 0.5\text{m}$ である。この接地位置 $d[\text{m}]$ は簡素フレーム端部を $y = 0$ としたとき、給電点の y 座標を基に決定した。したがって、接地位置 $d[\text{m}]$ が $d = 0.01\text{m}$ から定義されているのは基台の幅を考慮したためである。なお、材質はすべてのパーツ (エレメント、基台、フレーム) において、PEC (Perfect Electric Conductor) とし、吸収境界条件は PML7 層である。下方 $x - y$ 平面のみ地面を模擬するため PEC とし、地上高を実車と同等の 0.9m とした。

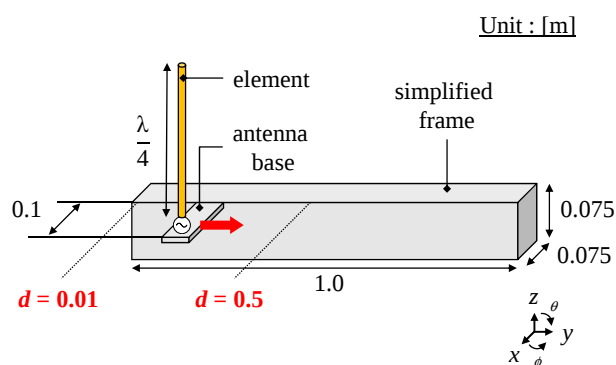


図 2 フレームの簡素モデル

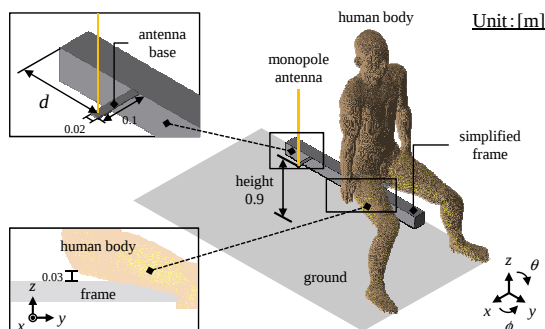
2.1 人体モデル

使用する人体モデルは国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) によって開発された日本の成人男性・女性の平均体型を有したリアル人体モデルである。また、人体モデルの姿勢は姿勢変形ソフトを使用し、自動二輪車乗車時を仮定して着座状態とする。

2.2 簡素モデルと人体モデルの位置関係

図 3 に簡素モデルと人体の位置関係を示す。人体は簡素モデルにおける $d = 0.5\text{m}$ で人体の背面が接するよう配置し、簡素モデルに触れないよう 0.03m 浮かせて配置した。これは人体とフレームが直接的に結合しないものとしたためであり、実車モデル (図 1) の際も、シートを介して人体

がフレームに触れていないためである。以上の解析条件を基に、アンテナの接地位置 $d[\text{m}]$ を変化させたときの諸特性をシミュレーションと実験の双方から解析する。



T. Nagaoka, *et al.* "Development of Realistic High-Resolution Whole-Body Voxel Models of Japanese Adult Male and Female of Average Height and Weight, and Application of Models to Radio-Frequency Electromagnetic-Field Dosimetry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 49, pp. 1-15, 2004.
T. Nagaoka, S. Watanabe, "Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 53, no. 24, pp.7047-7061, 2008.

図3 簡素モデルと人体の位置関係

3 結果

反射係数の結果を図4, 5に示す。なお、この結果は人体なしと人体あり(男性)の場合である。

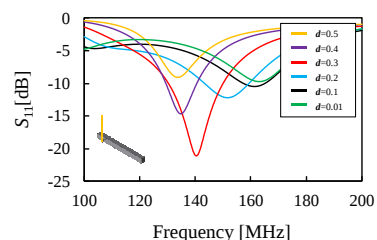
人体なし(図4(a), 4(b))の場合、接地位置 $d[\text{m}]$ が変化することで共振周波数のシフトがみられた。これは、接地位置の変化による電流分布の変化に起因すると考えられる。また、所望の周波数である145MHzで反射係数が最小となるのは、接地位置 $d = 0.3\text{m}$ であり、シミュレーションと実測それぞれ-15.12dB, -17.35dBであった。

人体あり(図5(a), 5(b))の場合も同様に共振周波数のシフトが見られるが、人体なしに比べてアンテナと人体との相対的な距離が近くなる接地位置 $d = 0.4\text{m}$, 0.5m において、シフトする幅(周波数)が大きくなっていることが分かる。これは、アンテナと人体の相互作用によって生じる空間的な電磁結合によるものであり、アンテナから生じる電磁界が人体の表面上に電流分布をもたらし、アンテナの実効長が長くなったからと考えられる。アンテナの基本的な動作原理として、エレメントの長さが長い場合、低い周波数で共振が起きることと関連付けられる。

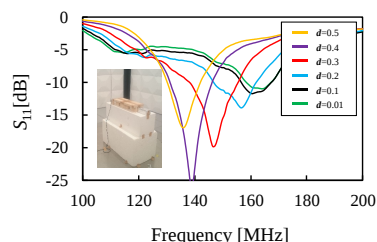
放射指向性の結果を図5に示す。一般に車車間通信における放射指向性は、水平面内指向性において無指向性となることが求められる。対して、カーナビゲーションやETC等の通信で使用されるアンテナは、垂直面内指向性の放射特性が重要となる。したがって、本研究は前者を仮定しているため水平面内指向性のみ解析を行った。

人体なし(図6(a))の場合、放射指向性は無指向性であるのに対し、人体あり(図6(b))の場合、 $\phi = 120^\circ \sim 160^\circ$ 方向の利得が減少している。これは、アンテナから見て人体が存在する方向であり、電波のエネルギーを吸収しているためと考えられる。特に最も顕著に利得の減少が見られたのは 150° 方向である。このとき、シミュレーションと実

測の利得はそれぞれ-4.9dBi, -4.0dBi となった。

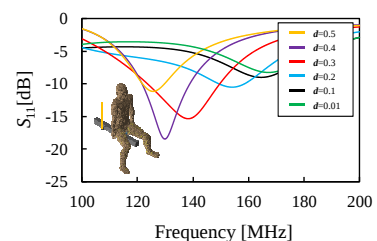


(a) シミュレーション

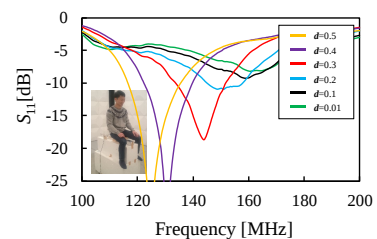


(b) 実測

図4 人体なしの反射係数

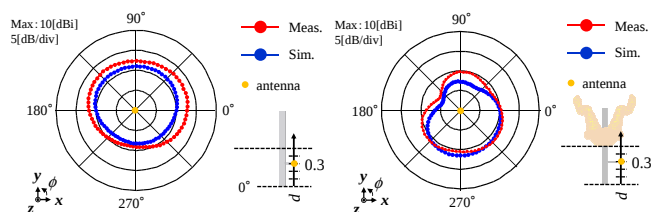


(a) シミュレーション



(b) 実測

図5 人体ありの反射係数



(a) 人体なし

(b) 人体あり

図6 放射指向性

4 等価回路を用いた有能電力の内訳 [2]

3 節において、シミュレーションと実測からアンテナを接地する位置や人体の有無におけるアンテナの諸特性の変化を示した。本節ではその二つの変化によるアンテナ特性の変化を電源の有能電力の内訳を算出することで、さらなる動作原理の究明を試みた。まず、等価回路を用いてアンテナの接地位置 $d[\text{m}]$ における有能電力の内訳について述べるため、図 7 にアンテナの等価回路を示す [3]。

送信機は $V_g[\text{V}]$ の電源で動作し、電源の出力インピーダンスを $Z_g[\Omega]$ とする。入力インピーダンス $Z_{in}[\Omega]$ とすると、アンテナに供給される電力 $P_{in}[\text{W}]$ は

$$P_{in} = \frac{1}{2} \text{Re}(Z_{in} I \cdot I^*) \quad (1)$$

と表される。ここで回路を流れる電流 $I[\text{A}]$ は

$$I = \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \quad (2)$$

であるから、(2) を (1) に代入して (3) を得る。

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ Z_{in} \cdot \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \cdot \frac{V_g^*}{(Z_g + Z_{in})^*} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{|V_g|^2 \cdot \text{Re}(Z_{in})}{|Z_g + Z_{in}|^2} \right\} \\ &= P_{av} S \end{aligned} \quad (3)$$

ここで電源の有能電力を $P_{av}[\text{W}]$ とすると、 S はアンテナへ供給される電力と有能電力の比を表し、共役整合時で $S = 1$ となる。したがって、以下のように定義できる。

$$P_{av} = \frac{|V_g|^2}{8 \text{Re}(Z_g)} \quad (4)$$

$$S = \frac{4 \text{Re}(Z_g) \cdot \text{Re}(Z_{in})}{|Z_g + Z_{in}|^2} \leq 1 \quad (5)$$

次に損失について考慮する。損失の総量 $P_t[\text{W}]$ はアンテナの要素ならびに自動二輪車のフレームを完全導体と仮定すると、人体への吸収電力 $P_h[\text{W}]$ と不整合損 $P_m[\text{W}]$ の和で表される。

$$P_t = P_h + P_m \quad (6)$$

よって、有能電力を基準とした放射効率 η を定義すると、空間に放射される電力を $P_r[\text{W}]$ として (7) を得る。

$$\eta = \frac{P_r}{P_{av}} = \frac{P_{av} - P_t}{P_{av}} \quad (7)$$

FDTD 法により算出された 145MHz における入力インピーダンス $Z_{in}[\Omega]$ と放射電力 $P_r[\text{W}]$ を用いて、式 (3)～(7) に代入し、不整合損 $P_m[\text{W}]$ と人体への吸収電力 $P_h[\text{W}]$ を得る。なお、ここでは出力インピーダンス $Z_g[\Omega]$ を 50Ω 、電源電圧 $V_g[\text{V}]$ を 1V として計算した。

上式により算出した接地位置 $d[\text{m}]$ における人体なしと人体あり (男・女) の有能電力 $P_{av}[\text{W}]$ の内訳を図 8 に示

す。図 8 より、人体なしの場合は人体への吸収電力は 0 となり、内訳が不整合損と放射電力のみとなる。また、図 4 において、反射係数が最小となる接地位置 $d[\text{m}]$ は $d = 0.3\text{m}$ であった。このとき、不整合損は有能電力の 5 % ほどとなることが明らかとなり、より大きなエネルギーがアンテナへ供給されることで、放射に寄与する電力の割合が最大となった。また、男女ともに $d = 0 \sim 0.3\text{m}$ では人体吸収電力が 17～20% であるのに対し、 $d = 0.4\text{m}, 0.5\text{m}$ (アンテナとの相対的距離で 20cm 以内) になると、急激に人体への吸収電力が大きくなることが明らかとなった。

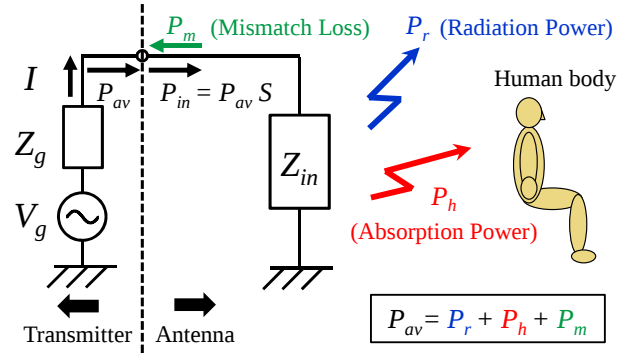


図 7 アンテナの等価回路 [3]

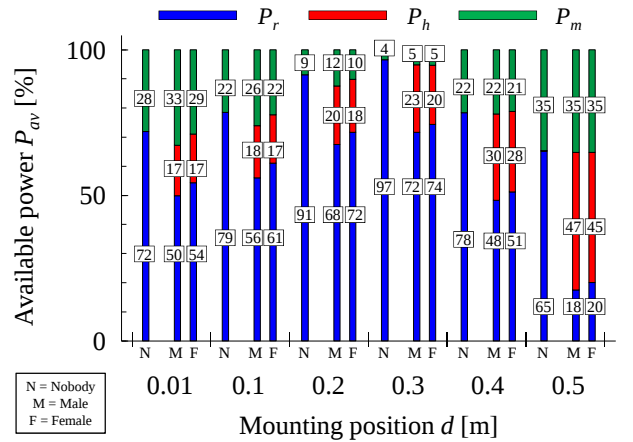


図 8 有能電力の内訳 [3]

次に、タンデム (2 人乗り) モデルについて考察した。ここでは前/後の乗車位置の組み合わせ (男/男, 男/女, 女/男, 女/女) の 4 通りを解析する。後方の人体は、前方の人体から 0.3m 後方に下げ、背面が接地位置 $d = 0.2\text{m}$ に接するように配置した。したがって、タンデムの場合はフレームのスペース上、アンテナを接地できる位置が $d = 0 \sim 0.2\text{m}$ と制限される。1 人乗りの結果と同様、アンテナの接地位置 $d[\text{m}]$ における有能電力の内訳を図 9 に示す。図 9 より、人体への吸収電力 P_h はすべての接地位置 $d = 0\text{m}, 0.1\text{m}, 0.2\text{m}$ において女/男の場合で最大、男/女の場合で最小となることが明らかとなった。

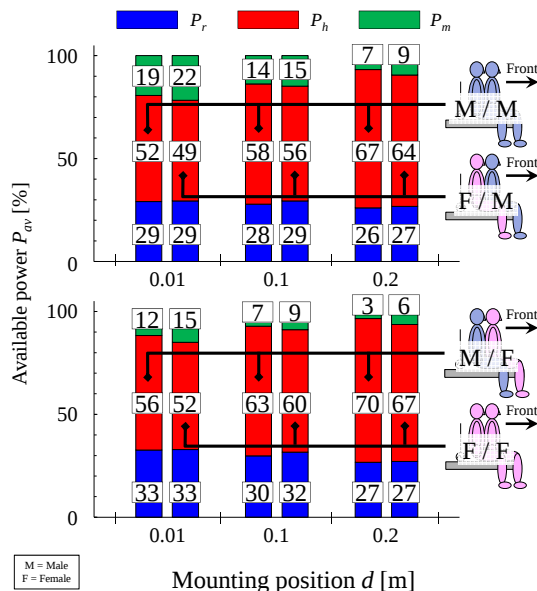


図9 有能電力の内訳 (タンデム)[3]

5 SAR 解析

本節では、接地位置 d [m] における男女人体モデルの局所 10g 平均 SAR の解析を行った。SAR (Specific Absorption Rate [W/kg]) とは生体が約 100kHz 以上の周波数の電磁波にばく露した場合、吸収された電磁波エネルギーによる熱作用を定量的に評価する値として定義される。図 10 に結果を示す。ここで、入力電力は実験において使用したアマチュア無線ハンディ・トランシーバ (株式会社八重洲無線, FT-60) の最大出力である 5W で規格化した。図 10 よりアンテナが人体に近づくにつれ、SAR 値は単調に増加するのではなく、アンテナ接地位置 $d = 0.3$ m で最小となり、 $d = 0.5$ m で最大となった。これはフレーム近傍の電界分布に起因するものと考えられる。 $d = 0.4$ m からの SAR が急激に上昇している原因は、エレメントからの電界がフレーム上の電界より支配的になるためと考えられる。なお、電波防護指針 [4] の一般環境指針値は 2W/kg であり、すべての接地箇所では指針値を下回ることを確認した。

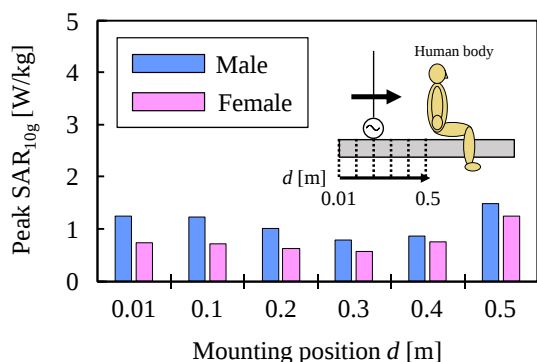


図10 局所 10g 平均 SAR[3]

6 まとめ

自動二輪車に搭載された 145MHz 帯モノポールアンテナについて、人体を考慮した電磁界解析を行った。まず、人体を考慮した反射係数と放射指向性の解析を行った後、理論式を用いて有能電力の内訳を示した。

反射係数の結果では、アンテナを接地する位置によって共振周波数のシフトがみられた。具体的には接地位置 $d = 0.3$ m において、反射係数が最小となることから、提案した簡素モデルにおけるアンテナの最適配置といえる。接地位置によっては、所望の周波数において反射係数が最大で 11dB ほど変化することが明らかとなった。

放射指向性の結果では、接地位置 $d = 0.3$ m におけるアンテナの指向性を示し、人体の有無による利得の差異を明らかにした。人体ありの場合、アンテナからみて人体が存在する方向 ($\phi = 120^\circ \sim 160^\circ$) において、利得の減少がみられた。最も顕著に利得の減少がみられた $\phi = 150^\circ$ では、人体なしの場合と比べて、最大 6.7dB の差が実測された。

理論式を用いた有能電力の内訳の結果より、人体がない場合、接地位置 d [m] による不整合損の変化で、放射効率が最大 97% ($d = 0.3$ m)、最小 65% ($d = 0.5$ m) となった。1 人乗りの場合、人体への吸収電力がアンテナに近づくほど大きくなり、アンテナと人体の距離が 0.2m ほどで急激に上昇し、放射効率の著しい低下がみられた。2 人乗り (タンデム) の場合、人体への吸収電力 P_h は全ての接地位置 $d = 0$ m, 0.1m, 0.2m において女/男の場合で最大、男/女の場合で最小となることが明らかとなった。

最後に SAR 解析を行った。その結果、全ての接地位置 d [m] において SAR 値は指針値を下回ることを確認し、男性の方が平均して 0.40W/kg 女性よりも高くなることが明らかとなった。加えて、アンテナが人体に近づくにつれ、SAR 値は単調に増加するのではなく、アンテナ接地位置 $d = 0.3$ m で最小となることを明らかにした。

今後の課題として、他周波数での解析が挙げられる。

参考文献

- [1] K. Nishikawa, "Land Vehicle Antennas," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no.3, Mar. 2003.
- [2] 小川晃一, 小柳芳雄, 伊藤公一, "人体腹部に近接した 150MHz 帯ノーマルモードヘリカルアンテナの実効放射効率の解析と効率改善に関する検討," 信学論 (B), vol. J84-B, no.5, pp.902-911, May 2001.
- [3] 加藤隆介, 藤井勝之, 奥村康行, "ホイップアンテナを搭載した自動二輪車の簡素電磁界解析モデルの提案と SAR 評価," 映像学技報, vol. 45, no. 5, pp. 21-24, Feb. 2018.
- [4] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)," Health Phys., 74, 4, pp.492-522, Apr. 1988.