

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760257

研究課題名（和文） 電波ばく露による人体全身平均 SAR の簡易評価手法の構築

研究課題名（英文） Development of Simple Whole-body Averaged SAR Estimation Scheme

研究代表者

平田 晃正 (HIRATA AKIMASA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00335374

研究成果の概要（和文）：電波の生体影響に関心が高まっていることから、人体に電波を照射した際に体内に吸収される電力量を評価、推定する技術の開発が望まれている。一方、ヒトの体形の個体差するため、それを加味した上で人体に吸収される電力量のばらつきについて定量化する必要があった。本研究では、人体がアンテナと類した振る舞いを行う共振周波数帯において、アンテナ理論に基づき体内に吸収される電力量を推定する定式化を示した。また、その定式化に基づき、現実環境下で簡易に吸収電力量を推定する方法についても示した。

研究成果の概要（英文）：There has been increasing public concern about adverse health effect due to radio-frequency wave. It is essential to develop an estimation scheme of electromagnetic power absorbed in the human body model. On the other hand, it is difficult to investigate the variability of power absorption in the human body, which is attributed to the morphological difference. In this paper, we proposed a formula to estimate the power absorption in the human body based on an antenna theory. Then, the measurement procedure for estimating power absorption is presented, which is useful for actual electromagnetic environment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：電磁環境工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：マイクロ波ばく露、比吸収率、大規模電磁界解析、共振周波数、吸収電力推定

## 1. 研究開始当初の背景

多目的の電波利用が家庭の内外において急増する一方、微弱電波の人体影響が懸念されている。人体における電磁エネルギー吸収は、単位質量あたりに吸収される電力量、即ち SAR (Specific Absorption Rate : 比吸収率) で評価される。電波の人体影響は、全身ばく露で生ずる体内深部の温度上昇で評価され、その熱源となる全身平均 SAR で世界各国の電波ばく露に対する安全指針が構築されて

いる。

全身平均 SAR は、同じ強さの電波ばく露でも周波数によって異なり、しかも特定の周波数で最大に達することが知られている（この周波数は「共振周波数」と呼ばれる）。このような電波に対する人体の「共振現象」は、自由空間においては身長が約 0.4 波長に相当する周波数で生ずるとされ、成人の共振周波数は 70MHz 前後になる。国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) あるいは米国電気電

子学会 (IEEE) の電波安全指針においては、この共振周波数での全身平均 SAR に安全率 (一般環境では 50 倍) を考慮した基本制限を決定し、これを超えない自由空間電力密度或いは電磁界強度を参考レベルとしている。

従来、人体全身平均 SAR については、実測が困難であるため、球モデル、ブロックモデルなどの人体を簡易化したモデルを用いて計算されてきたが、計算環境の発達した最近では精巧な解剖学的人体全身数値モデルに対して FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法による計算推定が試みられるようになった。我が国では、情報通信研究機構により成人男女モデルが構築されており、頻用されている。このような研究の成果として、簡易モデルは電力吸収の観点から必ずしも過大な見積もりを与えるわけではなく、また、体形による影響などを十分検討した例はない。この要因としては、人体の組織構成を考慮にいたした数値モデルの構築には多大な費用と時間を費やすことが挙げられ、上記評価のためのブレイクスルーが求められている。

全身平均 SAR が最大となる条件において推定方法を確立し、モデルを複数構築することなく、また、大規模解析を実施することなく、体型差に伴う全身平均 SAR のばらつき評価が可能になれば、電波防護指針における基礎指針と管理指針の関係を検討する上で意義深いと考える。

## 2. 研究の目的

自由空間および導体平面上に直立する人体の全身平均 SAR 推定を目的とし、ダイポール/モノポールアンテナとの類似性に基づき体内に吸収される電力量を推定するための定式化を提案する。まず、自由空間中および導体平板上に設置した損失性誘電体媒質からなる均質直方体モデルに対して電波を照射する状況をシミュレートし、対象とする周波数領域において人体がアンテナと同様の振る舞いをするかに関する基礎検討を行う。次に、得られた知見を人体モデルへ適用し、全身平均 SAR の推定式を提案、その有効性と不確定性について検討する。更に、推定式に基づき、異なる体型を有する人体における全身平均 SAR のばらつきについて明らかにする。

以上の成果に基づき、現実環境下において全身平均 SAR を実験的に推定可能な手法について考察する。

## 3. 研究の方法

### 3. 1. 人体モデル

数値解析には、22 歳成人男女モデルおよび 7 歳、5 歳、3 歳の小児に相当する日本人の解剖学的数値人体モデルを用いた。数値人体モデルは、皮膚、筋肉、脂肪、骨、脳、心臓、

血管など 51 種類の組織で構成されており、2mm の分解能を有する。

### 3. 2. アンテナと人体の類似性の検討

本研究では、人体が自由空間中に配置された場合および接地された場合の二種類を考える。ここでは、ダイポールアンテナについて述べるが、定式化についてはモノポールアンテナについても同一となる。

アンテナ長  $L$ [m] の  $1/4$  波長モノポールアンテナの電流分布を  $I_z$ [A] とし、最大振幅を  $I_0$ [A] としたとき、電流分布の振幅が  $I_0$  で一様な電流素子に換算した長さ  $L_e$ [m] をアンテナの実効長とする。実効長の導出式は

$$L_e = \frac{1}{I_0} \int_0^L I_z dz \quad (1)$$

で与えられる。アンテナの長さ  $L$ [m] の  $1/4$  波長ダイポールアンテナの実効長  $L_e$ [m] は以下の式で与えられる。

$$L_e = \frac{\lambda}{2\pi} = 0.636L \quad (2)$$

入射電力密度  $S$ [W/m<sup>2</sup>] と実効長  $L_e$  からアンテナの開放電圧  $V_0$ [V] が以下のように求まる。

$$V_0 = \sqrt{120\pi S} L_e \quad (3)$$

つまり、アンテナの開放電圧と受信電力には比例関係があるため、半波長モノポールアンテナでは入射電力密度とアンテナの実効長から受信電力が求められることとなる。ダイポールアンテナと人体モデルの類似性が成立すれば、人体モデルの足首に誘導される電流より、体内に吸収される電力が推定できることとなる。

## 4. 研究成果

電波を人体に照射した場合の電力吸収量を決定づける要因として、共振周波数帯および GHz 帯において、それぞれ、組織の電気定数、体表面積との推察があった。ここで、周波数帯により、人体電磁吸収分布は全く異なることが示されていた。上記の推察を定量的に確認するために、日本人、特に子供モデルに対して検討を行い、成人でも子供においても電力吸収を決定づける要因は変化せず、周波数による影響が支配的であることを数値実験により示した。

また、共振周波数帯における人体吸収機構は、ダイポールアンテナとの類似性より決定づけられるとした論文もある。その理論が不均質な人体モデルに適用できるのであれば、与えられた身長に対して全身平均 SAR が最大となる周波数、つまり共振周波数は一義的に定義できるはずであるが、実際は異なり、その要因は人体の形状によるものと考えられる。そこで、情報通信研究機構と共同で日本人モデルを縮小あるいは拡大することに

より、複数のモデルを作成し、そのモデルに対して上記のアンテナ理論の適用性について議論した。図1より、電流分布は、モデルの上下端で振幅の節、腹部で腹となり、半波長モノポールアンテナの共振時における電流分布と類似していることが確認できる。式(1)より、アンテナ実効長を計算したところ、その係数は0.657であり、ダイポールアンテナの値である0.636と近い値となった。また、複数の人体モデルに対して得られた結果に最小二乗法を適用したときの決定係数は0.999であり、異なるモデルでも同様のアンテナとして振る舞うことが確認された。また、同様の検討を金属平板上に直立する人体モデルに対しても実施し、人体は1/4波長モノポールアンテナとして振る舞うことが分かった。

上記の知見を基に、共振周波数帯においてはアンテナ理論を基に人体の身長および体重をパラメータとして、全身平均SARを適用する方法について提案した。なお、この提案に基づき、人体がアンテナとみなすことができれば、人体に吸収される電力は身長により近似的に見積もれる。雑誌論文成果②および③より、自由空間および完全導体平板上における全身平均SARは、以下の式で表わすことができることを示した。

$$WBSAR_{free} \cong 0.752 \frac{S \cdot H^2}{W} \quad (4)$$

$$WBSAR_{ground} \cong 0.796 \frac{S \cdot H^2}{W} \quad (5)$$

ここで、 $S$ は入射電力密度、 $H$ は人体モデルの高さ、 $W$ は人体モデルの体重である。これらの式より、推定した吸収電力の不確定性は、ボディマス指数( $WH^2$ )をもちいれば議論可能であることもわかった。本推定法とFDTD解析により得られた値を対比することにより妥当性を示すとともに、日本人に加えて欧米人モデルを対象とし、推定値のばらつきを調べた。自由空間中では全身平均SARを最大9.8%の差異で推定できるのに対して、完全導体に直立している場合には20.4%の差異が生ずることが分かった。

そこで、推定式に体脂肪率による影響を考慮するために、式(4)に対応して、体脂肪の影響を考慮するための係数 $F(p)$ を考慮に入れ、推定式を提案した。

$$WBSAR = 0.752F(p)S_{inc}H^2/W. \quad (6)$$

$$F(p) = -4 \times 10^{-5} p^2 - 0.0017p + 1.044 \quad (7)$$

この式を導入した場合、推定式およびFDTD

法で得られた全身平均SARの差異は3.4% (欧州人男性モデル)まで低減した。表1は一例として、日本人モデルに対する結果のみを示している。

そこで、式(7)を用いて、日本人の平均BMIのばらつきを参照誌、全身平均SARのばらつきについて考察した。図2に参考レベルの電磁界強度で電磁波を人体モデルに照射した際の全身平均SARのばらつきについて示す。図2より、全身平均SARは体型差により30%程度のばらつきがあること、また子供モデルでは基本制限である0.08W/kgを超える可能性があることも示唆された。

一方、式(4)および(5)の係数の差異について着目すると、人体が接地していた場合の方が自由空間中のものに比べて大きい。ここで、完全導体に直立する場合に近似したモノポールアンテナの放射抵抗は $52\Omega$ である一方、真空中に直立する場合のダイポールアンテナの放射抵抗は $73.2\Omega$ である。また、両者の実効長が等しいため、開放電圧が等しくなることから、吸収電力はモノポールアンテナの方がダイポールアンテナに比べて40%程度大きくなるはずである。一方、(4)、(5)の比較により、完全導体平面上に直立した場合の方が自由空間中に直立した場合に比べ高々5.9%大きい程度であった。ここでは詳細は占めないが、足首付近において水平断面の導電率が小さくなり、電流が流れにくくなるためであり、足首におけるモデルの不均一性が人体の全身平均SARに大きく影響を与える点は特筆に値する。

式(4)と(5)の比較より、全身平均 SAR が最大となるのは、人体モデルが完全導体平面上に直立している場合であることが確認できる。従って、現実環境において人体が完全導体平面上に直立した場合に全身平均 SAR を簡易に、かつ安全側に評価できれば有用と言える。先に示したように接地人体モデルは1/4波長モノポールアンテナとして振る舞うことから、アンテナのインピーダンスを事前に推定することができれば、吸収電力を推定できるはずである。また、文献①に示す通り、人体モデルのインピーダンスは均質化した人体モデルのものは高く、後者が安全側の評価を与えることとなる。そこで、先に情報通信研究機構のグループが提案している足首電流評価用等価アンテナを用い、その誘導電流分布より全身平均 SAR を推定することを考える。ここで、足首電流評価用等価アンテナは、人体と同じ高さを有し、その底面は人体モデルの断面積よりも小さい正方形(一辺4-5cm程度)のプラスチック容器に電気的に生体組織とみなせる液体を充填したものであり、軽量である点に特徴を有する。そこで、液剤の導電率を調整することにより、人体と同等の足首電流となるようにする。その結果、等価液剤の導電率は5.2 S/mであればよいことが分かった。

日本人成人男性モデル、均質化した男性モデル、および等価アンテナモデルの正面より電波を照射した場合に誘導される電流を図3に示す。図より、等価アンテナモデルと均質化した男性モデルの足首における誘導電流量はほぼ一致していること、また、その値は不均質モデルに対して得られた結果より安全側の評価となっていることが確認され、提案の有効性が確認できた。

今後の課題として、より多くの人体モデルに対して検討を行い、得られた解析結果の有効性を確認すること、および実験的検討が挙げられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① K. Yanase and A. Hirata, "Effective resistance of grounded humans for whole-body averaged SAR estimation at resonance frequencies," *Progress in Electromagnetic Research B*, 査読有, 2011, vol. 35, pp.15-27.
- ② 梁瀬和哉, 平田晃正, 藤原修, 長岡智明, 渡辺聡一, "遠方界ばく露に対する完全導体平面上に直立した人体の全身平均 SAR 推定," 電子情報通信学会論文誌(C), 査読有, 2011, vol.94-B, no.2, pp.226-233.
- ③ A. Hirata, O. Fujiwara, T. Nagaoka, and S. Watanabe, Estimation of whole-body average SAR in human models due to

plane-wave exposure at resonance frequency, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 査読有, 2010, vol.52, no.1, pp.41-48, 2010.

〔学会発表〕(計6件)

- ① A. Hirata, K. Yanase, O. Fujiwara, T. Nagaoka, and S. Watanabe, "Estimation of whole-body averaged SAR of grounded human at resonance frequency from ankle current of simplified phantom," 査読有, *EMC Europe, O\_Tu\_D1\_2*, 2010年9月15日(ポーランド・ブラツラフ).
- ② 平田晃正, "マイクロ波ばく露による人体内吸収電力・温度上昇解析手法," 電子情報通信学会マイクロ波シミュレータ研究会, 2009年12月4日(青山学院大学).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

平田 晃正 (HIRATA AKIMASA )  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 00335374