

# 人体の吸収断面積と体表面積の相関性に基づく GHz 帯全身平均 SAR の予測式と不確定性

長屋 義雄<sup>†</sup>      平田 晃正<sup>†</sup>      藤原 修<sup>†</sup>      長岡 智明<sup>††</sup>  
渡辺 聡一<sup>††</sup>

A Formula and Uncertainty of GHz-Band Whole-Body Average SAR Based on the Correlation between Absorption Cross Section and Body Surface Area of Human

Yoshio NAGAYA<sup>†</sup>, Akimasa HIRATA<sup>†</sup>, Osamu FUJIWARA<sup>†</sup>, Tomoaki NAGAOKA<sup>††</sup>, and Soichi WATANABE<sup>††</sup>

あらまし 情報通信研究機構の開発になる日本人の成人男女と 7 歳, 5 歳, 3 歳の男児に相当する解剖学的数値人体モデル (リアルモデル) で FDTD (Finite Difference Time Domain) 法により 2 GHz 遠方界曝露での全身平均 SAR を計算した. その結果, 人体の吸収断面積とモデル体表面積の間には強い相関関係があること, この関係はリアルモデルと同じ形状の均質モデル並びに同じ体表面積をもつ同身長・同体重の直方体均質モデルに対しても保たれるが, 体表面積に対する吸収断面積の回帰係数は, リアル形状の均質モデルが最も小さく, 直方体均質モデルではリアルモデルのそれよりも大きいこと, などが分かった. 得られた知見に基づき, 2 GHz 遠方界曝露の人体に対して曝露界の入射電力密度と人体の身長・体重から計算できる全身平均 SAR の予測式を導出し, これによって日本人の子供と成人に対する全身平均 SAR の不確定性範囲を示した. 更に, リアルモデルに対する吸収断面積と表面積との回帰関係の周波数依存性を調べた結果, 300 MHz から 2 GHz の広帯域にわたって両者には強い相関関係が存在し, モデル体表面積に対する吸収断面積の回帰係数もほぼ一定になることから, この周波数範囲において全身平均 SAR の予測式を適用できることが分かった.

キーワード 吸収断面積, 体表面積, 相関性, GHz 帯全身平均 SAR, 不確定性

## 1. ま え が き

ユビキタスネットワーク社会の到来により, 電波利用が急増する一方, 電波の人体影響に対する関心が高まっている. そもそも電波に対する人体影響は, 体内深部の温度上昇に並行することから, その熱発生源である SAR (Specific Absorption Rate: 比吸収率) の全身平均値, すなわち全身平均 SAR で評価され, これをベースとした電波曝露に対する安全指針が世界各国において構築されている. 総務省電波防護指針では, 10 kHz から 300 GHz までの周波数を対象として, 基

礎指針と管理指針を設け, 基礎指針では, 熱作用のしきい値 (全身平均 SAR: 4 W/kg) を考慮し, 全身平均 SAR が 0.4 W/kg を超えない電波レベル (電力密度など) を管理指針として規定している. 管理指針は, 更に管理環境下と一般環境下の二つに分けられ, 一般環境下では管理環境下に 5 倍の付加的な安全率が設けられている [1].

一方, 全身平均 SAR については, 実測が困難であるため, これまではブロックモデルなどの人体簡易モデルで計算されてきたが [2], [3], 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) 法による大規模計算推定が試みられている [4] ~ [8]. 例えば, 我が国の管理指針レベルの遠方界曝露に対する成人の全身平均 SAR は, 全身共振に伴い 70 MHz 付近で極大となるが, 管理指針の 300 MHz からのレベル緩和のため 1.5 ~ 2 GHz にもう一つの極大をもち, しかもそ

<sup>†</sup> 名古屋工業大学大学院, 名古屋市  
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku,  
Nagoya-shi, 466-8555 Japan

<sup>††</sup> 独立行政法人情報通信研究機構, 小金井市  
National Institute of Information and Communications  
Technology, 4-2-1 Nukii-kitamachi, Koganei-shi, 184-8795  
Japan

の値は前者よりも大きいことが示されている [5], [6]. 更に, 文献 [4] においては, 欧州人成人モデルを相似的に縮減した小児モデルに対して全身平均 SAR を計算し, GHz 帯では成人モデルのそれよりも 20%程度大きな値となることが報告されており, 文献 [5], [6] では日本人成人モデルを統計データに基づき縮減・構築した小児モデルについても同様の結果が得られたとしている.

このようなことから, 子供を含めた人体の GHz 帯全身平均 SAR がどの程度にばらつくかといった不確定性評価は緊要の課題となっはいるものの, 大規模数値計算には多数の要因があるためその検討は容易ではない. Sandrini ら [7] 及び Dimbylow [8] は, 欧州人の成人男女モデルを用いて全身平均 SAR を解析し, GHz 帯での不確定性のパラメータとして皮下脂肪の厚さが重要であることを指摘している. 筆者らは先に, 前述した欧州人の解剖学的人体数値モデルとその体型寸法を参考に作成した直方体モデルの全身平均 SAR を比較することにより, GHz 帯における全身平均 SAR の支配的な決定要因はモデル表面積であることを明らかにした [9], [10].

本論文では, 情報通信研究機構 (NICT: National institute of Information and Communications Technology) の開発になる 22 歳の成人男女 [11] 及び 7 歳, 5 歳, 3 歳の男児モデルに相当する日本人の解剖学的数値人体モデル [12] を対象に, 総務省電波防護指針の一般環境下に適用される 2 GHz 遠方界曝露 (電力密度:  $1 \text{ mW/cm}^2$ ) に対する全身平均 SAR を FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法で計算, 吸収断面積とモデル表面積との相関関係から 2 GHz 帯遠方界曝露に対する全身平均 SAR の予測式を導出し, これによって全身平均 SAR の日本人体型の統計データに基づく不確定性範囲を示す. 更に, 全身平均 SAR

の予測式を適応できる周波数範囲も併せて示す.

## 2. 人体モデルと計算条件

本論文で用いた数値人体モデルは NICT が構築した日本人の成人モデルと小児モデルである. 図 1 にその人体数値モデルを示す. 成人の数値人体モデルは, 日本人の成人男女の平均身長と平均体重に合致した健全なボランティアの MRI データに基づいて開発されている [11]. 一方, 小児モデルにおいては X 線 CT や MRI 画像が倫理上の問題から入手困難なため, 人体寸法の年齢別統計データに基づいて成人男性モデルの各部位ごとに異なる割合で変形・縮小させることで内部構造の崩壊や組織の不連続性を招くことなく開発されている [12]. これらはいずれも 51 種類の生体組織で構成され, 2 mm の空間分解能を有する. 表 1 に各モデルの諸元を示す. ここで, 括弧内は日本人体型の統計値 (平均値  $\pm$  標準偏差) [13] ~ [15] であり, 表から図 1 の数値人体モデルは日本人の平均的な体型である

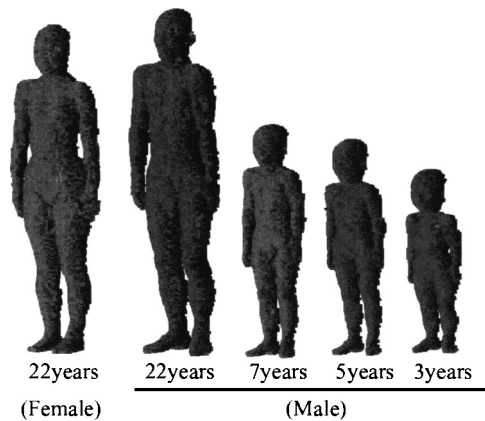


図 1 日本人数値人体モデル

Fig.1 Human body models for Japanese adult and children.

表 1 日本人数値人体モデルの諸元と数値

Table 1 Body parameters and their numerical values for Japanese models.

|                         | Female                    |                           | male                      |                           |                           |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                         | 22years                   | 7years                    | 22years                   | 5years                    | 3years                    |
| $H$ [m]                 | 1.61<br>(1.58 $\pm$ 0.05) | 1.73<br>(1.71 $\pm$ 0.06) | 1.20<br>(1.23 $\pm$ 0.05) | 1.05<br>(1.11 $\pm$ 0.05) | 0.90<br>(0.91 $\pm$ 0.06) |
| $W$ [kg]                | 53<br>(51 $\pm$ 6.8)      | 65<br>(65 $\pm$ 10.0)     | 23<br>(24 $\pm$ 4.3)      | 17<br>(19 $\pm$ 2.8)      | 13<br>(13 $\pm$ 3.0)      |
| $S_M$ [m <sup>2</sup> ] | 2.08                      | 2.45                      | 1.24                      | 0.98                      | 0.79                      |
| $S_H$ [m <sup>2</sup> ] | 1.50                      | 1.73                      | 0.85                      | 0.68                      | 0.58                      |
| $S_H/S_M$               | 0.72                      | 0.71                      | 0.69                      | 0.69                      | 0.73                      |

( ): Mean  $\pm$  Standard deviation for Japanese

$S_M$ : Model surface area  $S_H$ : Human surface area

ことが分かる．なお、 $S_M$  はモデルの表面積、 $S_H$  はモデルと同じ身長・体重の人体の体表面積であり、表中の値  $S_H$  [m<sup>2</sup>] は身長を  $H$  [cm]、体重を  $W$  [kg] として

$$S_H = C \times 10^{-4} \times W^\alpha \times H^\beta \quad (1)$$

という経験式 [16] から計算した ( $C, \alpha, \beta$  は表 2 に示す定数)．一般に人体の体表面積は、身長と体重から推定されることは古くから知られ、同じ体型であれば人種差は小さいとされる [17]．表から、 $S_M$  は身長・体重から計算される  $S_H$  よりも大きい、その程度 ( $S_M/S_H$ ) は年齢と性別にはあまり依存せず、ほとんど一定であることが分かる．

$S_M$  が  $S_H$  よりも大きい理由はモデル表面が立方体セルで離散化されているためであるが、 $S_M/S_H$  の年齢と性別に対する依存性が小さいことは数値人体モデルが日本人の平均的な体型であることを裏づけるものである．なお、この場合の  $S_M$  と  $S_H$  の回帰関係は  $S_M \cong 1.41 \times S_H$  (決定係数  $R^2 = 0.998$ ) と表すことができる．

本論文では自由空間中に直立している人体を想定し、人体正面から垂直偏波の平面波を照射した場合の全身平均 SAR を FDTD 法で解析した．これは、電波防護指針における基礎指針と管理指針値との関係の有効性を検討する上で、最悪の曝露条件でのドシメトリを実

施することが望まれるためである．なお、2 GHz において、人体全身平均 SAR の入射角度依存性を調べたところ、正面からの曝露が最大であることを確認している [18] ため、本論文ではその条件に対する検討を行った．図 2 に計算条件を示す．本計算では、解析領域を二つに分け、内部を全電磁界領域、外部を散乱電磁界領域とし、散乱電磁界領域の外に吸収境界条件として 12 層の Uniaxial-PML を用いている．なお、図 2 に示された領域の大きさは、PML 領域を除いた自由空間中に配置された人体モデルのものであり、モデル表面と吸収境界までの距離は 30 セル (60 mm) で一定としている．人体の電気定数については、成人と小児では異なることが知られ、小児の比誘電率と導電率は成人に比べ若干大きくなるものの、携帯電話に対する局所平均ピーク値については小児の電気定数を用いた結果と成人のそれを用いた場合との差はわずかであるという [19]．それゆえに、本論文では小児モデルの全身平均 SAR の計算に際しては成人の電気定数を適用し、各組織の電気定数は文献 [20] から引用した．

### 3. 吸収断面積と体表面積との相関性

一般環境の指針レベル (周波数: 2 GHz, 電力密度: 1 mW/cm<sup>2</sup>) に対する全身平均 SAR の FDTD 解析結果を図 3 に示す．図から、小児モデルでは成人モデルに比べ全身平均 SAR が高くなっていることが分かる．これは、各モデルの体重と全吸収電力量の比率に起因するものと考えられる．このことを確認するために成人と小児の各モデルに対する全吸収電力量と体重を図 4 に示した．なお、全吸収電力量は FDTD 法で求められた電界成分を用いてジュール損を求め、それを全身にわたって積分することにより求めた．図から

表 2 式 (1) のパラメータの数値  
Table 2 Numerical values of parameters used for Eq. (1).

| Age [years] | C      | $\alpha$ | $\beta$ |
|-------------|--------|----------|---------|
| 0           | 95.68  | 0.473    | 0.655   |
| 1~5         | 381.89 | 0.423    | 0.362   |
| 6~          | 88.83  | 0.444    | 0.663   |

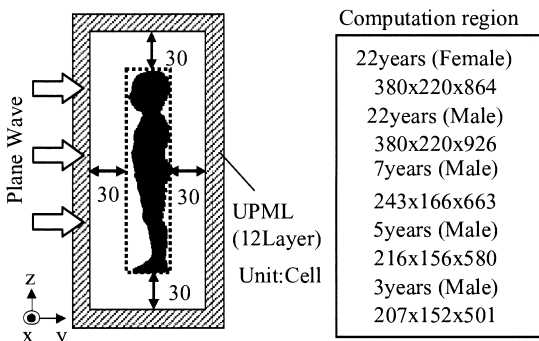


図 2 計算条件

Fig. 2 Computational condition applied in this study.

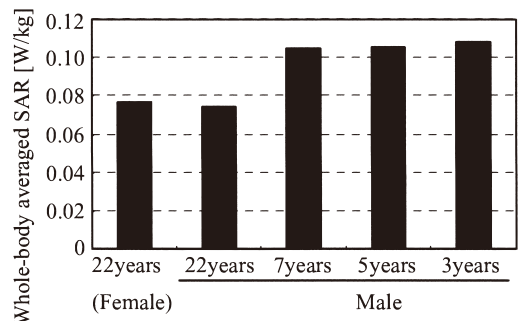


図 3 2 GHz における全身平均 SAR (1.0 mW/cm<sup>2</sup>)  
Fig. 3 Whole-body average SAR in different models at 2 GHz (power density: 1.0 mW/cm<sup>2</sup>).

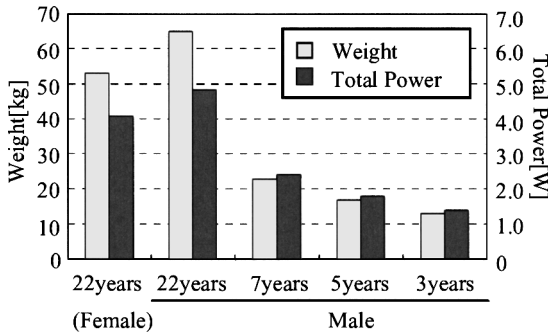


図 4 2GHz における全吸収電力量と体重の関係 (1.0 mW/cm<sup>2</sup>)

Fig. 4 Relationship of total EM power absorption at 2 GHz and weight for different models (power density: 1.0 mW/cm<sup>2</sup>).

全吸収電力量は、年齢とともに増大していることが分かる。これは、GHz 帯における全吸収電力量はモデル表面積が支配的であり [9], [10], 年齢とともに身長と体重が増加し、結果として体表面積も増加することによるものと考えられる。一方、後述するように、全吸収電力量は体表面積に比例することが示せ、体重に対する全吸収電力量の割合、すなわち全身平均 SAR は、式 (1) から  $S_H/W = C \times 10^{-4} \times W^{a-1} \times H^b$  に比例することになる。この量は表 2 の数値を用いれば、例えば、3 歳児、22 歳男子ではそれぞれ 0.045 [m<sup>2</sup>/kg], 0.027 [m<sup>2</sup>/kg] となって年齢とともに減少することが確認できる。これは小児から成人への成長過程で体表面積の増え方よりも体重のそれの方が大きくなることによる。以上のことから小児モデルでは成人モデルに比べ全身平均 SAR が高くなっているものと断定できる [5], [6]。

次に、各モデルの吸収断面積  $S_C$  [m<sup>2</sup>] (入射電力密度に対する全吸収電力量の比) を計算し、モデル表面積  $S_M$  [m<sup>2</sup>] との関係性を求めた。その結果を図 5 に示す。図中の実線は前述の 5 体の日本人数値人体モデルにより得られた計算結果に最小二乗法を適用することで得られた回帰直線を示す。図から、年齢・性別にかかわらず、日本人モデルの吸収断面積とモデル表面積との間には強い相関関係 (決定係数  $R^2: 0.99$ ) が存在し、吸収断面積はモデル表面積にほぼ比例していることが分かる。

上述の吸収断面積とモデル表面積との相関性が形状とモデルの構成組織にどのように依存するかを検討するために、極端なケースとして直方体モデルと図 1 の

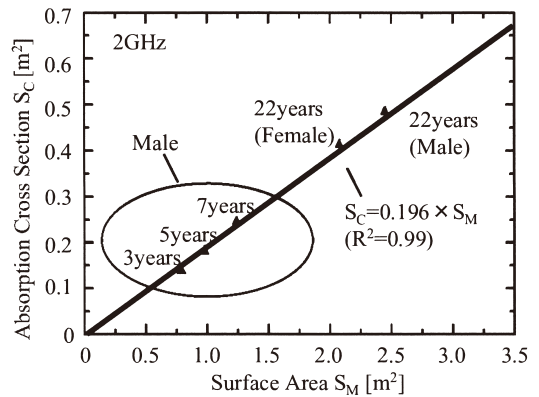


図 5 日本人数値人体モデルに対する体表面積  $S_M$  と 2GHz 吸収断面積  $S_C$  の相関関係

Fig. 5 Correlation between model surface area  $S_M$  and 2 GHz absorption cross section  $S_C$  in anatomically based Japanese models.

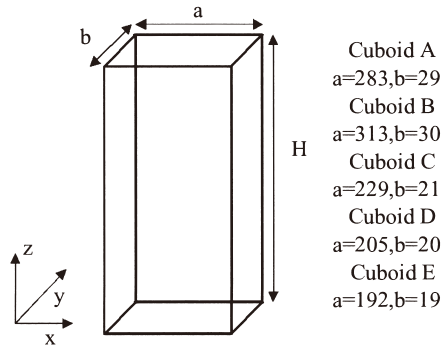


図 6 直方体モデルと寸法

Fig. 6 Cuboids with their dimensions.

日本人数値人体の均質モデルを用いて 2GHz における全身平均 SAR を計算した。図 6 に直方体モデルと寸法を、表 3 にその諸元と数値をそれぞれ示す。この直方体モデルは、年齢・性別ごとの日本人数値人体モデルと同じ身長・体重と同じモデル表面積から作成し、組織はすべて 2/3 筋肉媒質で構成した。人体形状の均質モデルは図 1 に示す人体モデルにおいてすべての構成組織を 2/3 筋肉媒質とした。一般環境の指針レベル (周波数: 2 GHz, 電力密度: 1 mW/cm<sup>2</sup>) に対して計算した吸収断面積とモデル表面積との相関関係を図 7 に示す。図中の太い実線は直方体モデルに対して得られた回帰直線であり、細い実線は均質モデルのそれである。点線は図 5 で求めた回帰直線である ( , については後述する)。

図 7 から、直方体モデル及び均質人体モデルにおい

表 3 直方体モデルの諸元と数値  
Table 3 Height, weight, and surface area and their numerical values of cuboids.

|                         | CuboidA | CuboidB | CuboidC | CuboidD | CuboidE |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| H [m]                   | 1.61    | 1.73    | 1.20    | 1.05    | 0.90    |
| W [kg]                  | 55      | 67      | 24      | 18      | 14      |
| $S_M$ [m <sup>2</sup> ] | 2.08    | 2.45    | 1.24    | 0.98    | 0.79    |

$S_M$ : Model surface area

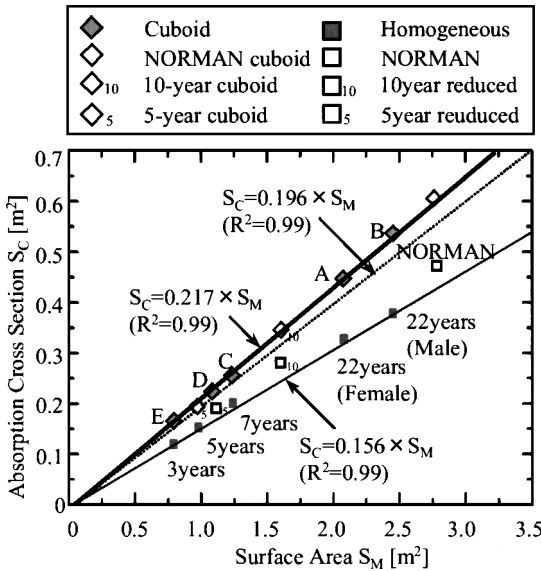


図 7 直方体モデルと均質人体モデルに対するモデル表面積  $S_M$  と 2GHz 吸収断面積  $S_C$  の相関関係

Fig. 7 Correlation between model surface area  $S_M$  and 2GHz absorption cross section  $S_C$  in cuboids and homogeneous anthropomorphic models.

ても、年齢・性別にかかわらず吸収断面積とモデル表面積の間には強い相関関係が存在していることが分かる。また、回帰直線のモデル表面積に対する吸収断面積の傾き（回帰係数）は、図 1 の人体モデル（リアルモデル）と同じ身長・体重と体表面積でも直方体均質モデルが最も大きく、リアル形状の均質モデルでは最小となっていることが分かる。後者の結果は、体表面積だけでなく組織の不均一性も吸収電力に及ぼす影響が大きいことを示す。リアルモデルで均質よりも吸収電力が大きくなる理由は、人体組織の電気定数は組織ごとに異なるため、組織の境界面で反射が生じ、それらの波の重ね合わせにより定在波が生じたものであると考える [10]。直方体均質モデルの回帰係数が最大となることは、同じ体表面積ならばモデル形状が吸収電力に及ぼす影響が最も大きいことを意味し、このこと

から直方体均質モデルが種々の体型の数値人体モデルに対して最大の吸収電力を与えるものと推定できる。なお、図 7 の は、欧州人の成人男性（NORMAN モデル、38 種類組織を 2mm セルの空間分解能で構築）に対して筆者らが求めたモデル表面積と吸収断面積との相関関係であり、 は NORMAN モデルの体型寸法を参考に作成した直方体モデルに対するそれである [10]。  $S_{C10}$  (  $S_{C5}$  ) は NORMAN モデルを相似的に縮減して構築した 10 ( 5 ) 歳児相当の子供モデルに対する相関関係であり、その直方体モデルの場合を  $S_{C10}$  (  $S_{C5}$  ) で示している。NORMAN モデルに対する回帰係数は直方体モデルのそれよりも小さく、この場合の回帰係数は日本人モデルの直方体モデルのそれとほぼ同じであることは興味深い。このことは、人体モデルの形状や構成組織が異なっても、直方体モデルがそれと同じ身長と体重の人体に対して最大の全身平均 SAR を与えることを示唆する。

#### 4. 全身平均 SAR の予測式

本章では前章で述べた人体モデルの吸収断面積  $S_C$  とモデル体表面積  $S_M$  との相関関係から、GHz 帯遠方界曝露に対する人体の全身平均 SAR の予測式を導出する。表 1 から、人体数値モデルの表面積  $S_M$  と同じ身長・体重の人体の体表面積  $S_H$  との間には  $S_M \cong 1.41 \times S_H$  という関係が成立するので、曝露界の入射電力密度を  $P_i$  [W/m<sup>2</sup>] とすれば、体重  $W$  [kg] の人体に対する全身平均 SAR [W/kg] は、

$$\langle SAR \rangle_{Whole-body} = \frac{P_i \times S_C}{W} = \gamma \times \frac{P_i \times S_H}{W} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\gamma$  は人体モデルに固有な係数であり、その数値例を直方体モデルとリアルモデル並びに均質モデルに対して表 4 に示す。式 (2) は、体表面積  $S_H$  [m<sup>2</sup>] が式 (1) から求められるので、曝露界の電力密度  $P_i$  [W/m<sup>2</sup>] が与えられれば、全身平均 SAR は人体の身長  $H$  [cm] と体重  $W$  [kg] から予測できることを示す。図 8 は、一般環境の指針レベル ( $P_i = 10$  W/m<sup>2</sup>) に対する日本人の 2GHz 全身平均 SAR の年齢依存性と不確定性範囲を示す。各モデルに対する FDTD 解析結果を図中の縦棒で、日本人の体寸法に起因する全身平均 SAR の不確定性範囲は同図の各モデルの結果に横棒でそれぞれ示している。ただし、日本人の身体データは、8 か月から 4 歳までの身長と体重の 97 パーセンタイルを文献 [13]、5 歳から 17 歳までは 95 パーセンタイルを文献 [14]、18 歳

表 4 式 (2) の係数  $\gamma$  の数値

Table 4 Numerical values of coefficient  $\gamma$  used for Eq. (2).

|          | Japanese model |             |
|----------|----------------|-------------|
|          | Cuboid model   | Homogeneous |
| $\gamma$ | 0.306          | 0.220       |

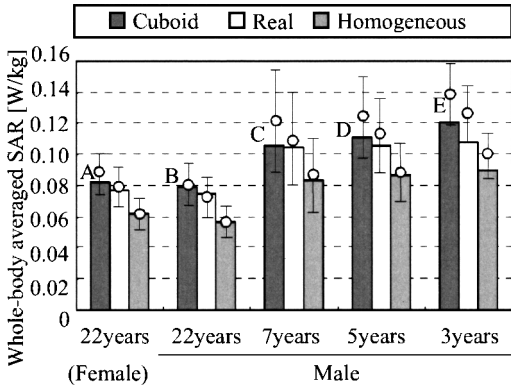


図 8 直方体モデルと均質人体モデルの全身平均 SAR  
Fig. 8 Whole-body average SAR in the cuboids, realistic models, and homogeneous models.

からのそれは文献 [15] からそれぞれ引用し、これらは独立データとして体表面積  $S_H$  のとり得る範囲 (約 90 パーセントイル) を式 (1) から求め、式 (2) から全身平均 SAR の不確定性範囲を計算した。それゆえに図中の各モデルに対する横棒の範囲は約 90 パーセントイルの日本人体型に基づく全身平均 SAR の不確定性範囲を表す。なお、印は 50 パーセントイルの日本人体型に基づく全身平均 SAR である。図 8 から、リアルモデルの全身平均 SAR は、均質モデルのそれよりも大きく、直方体モデルの予測値を超えることはないこと、全身平均 SAR の 50 パーセントイル値に対する不確定性範囲は成人モデルで  $\pm 13 \sim \pm 14\%$  であるが、小児モデルでは 7 歳児で  $\pm 21\%$  (5 歳児は  $\pm 17\%$ 、3 歳児は  $\pm 12\%$ ) と最も大きいこと、などが分かる。

次に、2 GHz で導出した全身平均 SAR の予測式の適用周波数範囲を調べた。子供と成人男女の各リアルモデルに対して、それらの表面積  $S_M$  と吸収断面積  $S_C$  の回帰直線を引き、傾き  $S_C/S_M$  を 30 MHz から 2 GHz にわたって求めた。その結果を決定係数  $R^2$  と併せて図 9 に示す。図から、吸収断面積とモデル表面積との間には 300 MHz から強い相関関係 (決定係数  $R^2: 0.95$  以上) が存在し、 $S_C/S_M$  は 300 ~ 2000 MHz において、わずかに漸減するものの、ほぼ一定の数値 ( $0.209 \pm 0.013$ ) をとること、この周波数領域において

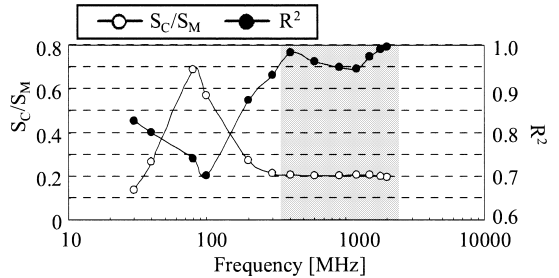


図 9 日本人数値人体モデルのモデル表面積  $S_M$  に対する吸収断面積  $S_C$  の回帰係数  $S_C/S_M$  と決定係数  $R^2$  の周波数依存性

Fig. 9 Frequency dependence of regression coefficient  $S_C/S_M$  and coefficient of determination  $R^2$  for anatomically based Japanese model.

は全身平均 SAR の予測式 (2) が適応可能であること、などが分かる。周波数が高くなるに従い決定係数の値が大きくなるのは、電波の浸透深さによるものと考えられる。また、300 ~ 2000 MHz の範囲において FDTD 計算により求めた全身平均 SAR と予測式より求めた全身平均 SAR との誤差は 3 歳モデルで 20% 以内、それ以外で 10% 以内であることが分かった。なお、2 GHz 曝露と同じく、300 MHz においても全身平均 SAR は正面からの曝露が最大であったことを付記する。

### 5. む す び

携帯電話や無線 LAN 等で利用される GHz 帯の電波の安全性についての関心が高まっている。特に基地局からの曝露は遠方界への全身曝露となるため、曝露時の全身平均 SAR の特性を詳細に明らかにすることが重要となっている。この周波数帯における電波吸収の支配的な要因はモデル表面積であるとの知見 [9], [10] をもとに、本論文では、文献 [11], [12] で開発された日本人リアルモデルに対して、総務省電波防護指針の一般環境下に適用される遠方電磁界曝露での全身平均 SAR を計算し、2 GHz における吸収断面積とモデル表面積との相関関係を求めた。その結果、両者には強い相関関係が存在すること、この関係はリアルモデルと同じ形状の均質モデル、同じ身長・体重と体表面積をもつ直方体均質モデルに対しても確認でき、リアル形状の均質モデルは回帰直線の体表面積に対する吸収断面積の傾きが最も小さく、直方体均質モデルの場合が最も大きいこと、などが分かった。この知見に基づき、実際の人体に対する全身平均 SAR を曝露界の入射電力密度と人体の身長・体重から計算できる予測

式を導出し、これによって日本人の子供と成人に対する全身平均 SAR の体型に基づく不確定性範囲を示した。更に、日本人数値人体モデルに対する吸収断面積と体表面積との回帰関係の周波数依存性を調べた結果、300 MHz から 2 GHz の周波数領域において両者には強い相関関係が存在し、回帰直線のモデル体表面積に対する吸収断面積の傾きもほぼ一定になることが分かった。この結果から、得られた予測式は、300 MHz から 2 GHz の周波数範囲にわたって適用できることが確認できた。

本論文では全身平均 SAR の身長と体重だけに基づく不確定性範囲を検討したが、身長・体重が同じであっても体格（体脂肪分布など）が異なれば全吸収電力量が変わり、それゆえに全身平均 SAR も異なるはずである。このような場合に対して、本論文で導出した全身平均 SAR の予測式がどの程度の不確定性をもって適用できるかが今後の課題となる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）18360136）支援のもとに行われた。

## 文 献

- [1] 郵政省電気通信技術審議会答申，諮問題 38 号，“電気利用における人体利用における人体の防護指針” 1990.
- [2] O.P. Gandhi, “State of the knowledge for electromagnetic absorbed dose in man and animals,” Proc. IEEE, vol.68, pp.24–32, 1980.
- [3] C.H. Durney, “Electromagnetic dosimetry for models of humans and animals: A review of theoretical and numerical techniques,” Proc. IEEE, vol.68, pp.33–40, 1980.
- [4] P.J. Dimbylow, “Fine resolution calculations of SAR in the human body for frequencies up to 3 GHz,” Phys. Med. Biol., vol.47, pp.2835–2846, 2002.
- [5] 長屋義雄，平田晃正，藤原 修，長岡智明，渡辺聡一，“小児数値人体モデルに対する全身平均 SAR の FDTD 計算” 信学技報，EMCJ2006-10, 2006.
- [6] J. Wang, S. Kodera, O. Fujiwara, and S. Watanabe, “FDTD calculation of whole-body average SAR in adult and child models for frequencies from 30 MHz to 3 GHz,” Phys. Med. Biol., vol.51, pp.4119–4127, 2006.
- [7] L. Sandrini, A. Vaccari, C. Malacarne, L. Cristofretti, and R. Pontalti, “RF dosimetry: A comparison between power absorption of female and male numerical models from 0.1 to 4 GHz,” Phys. Med. Biol., vol.49, pp.5185–5201, 2004.
- [8] P.J. Dimbylow, “Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model, NAOMI,” Phys. Med. Biol., vol.50, pp.4053–4063, 2005.
- [9] A. Hirata, S. Kodera, J. Wang, and O. Fujiwara, “Mechanism for double-humped frequency characteristics of whole-body average SAR due to far-field exposure at ICNIRP reference level,” EMC Europe, pp.598–602, Barcelona, Spain, Sept. 2006.
- [10] A. Hirata, S. Kodera, J. Wang, and O. Fujiwara, “Dominant factors influencing whole-body average SAR due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and GHz regions,” to be published in Bioelectromagnetics, vol.28, 2007.
- [11] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki, and Y. Yamanaka, “Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry,” Phys. Med. Biol., vol.49, pp.1–15, 2004.
- [12] 長岡智明，広瀬尚三，福田和生，国枝悦夫，王 建青，藤原修，渡辺聡一，“成人数値人体モデルの変形による小児数値人体モデルの開発” 信学技報，EMCJ2005-26, 2005.
- [13] 厚生労働省雇用均等・児童家庭局，“平成 12 年乳幼児身体発育調査報告書” 2001.
- [14] 文部科学省，“平成 17 年度学校保健統計調査” 2005.
- [15] 人間生活工学研究センター，“日本人の人体計測データ Japanese Body Size Data 1992-1994,” 1997.
- [16] 藤本薫喜，渡辺 孟，湯川幸一，森本和枝，“日本人の体表面積に関する研究” 日衛誌，vol.2, pp.443–450, 1968.
- [17] D. DuBois, “A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known,” Arch Intern Medicine, vol.17, pp.863–871, 1916.
- [18] 平田晃正，藤原 修，長岡智明，渡辺聡一，“平面波曝露に対する人体全身平均 SAR の入射角依存性” 平 18 年東海連大，O-083, Sept. 2006.
- [19] J. Wang, O. Fujiwara, and S. Watanabe, “Approximation of aging effect on dielectric tissue properties for SAR assessment of mobile telephones,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.48, no.2, pp.408–413, 2006.
- [20] C. Gabriel, “Complication of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies” Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037, 1996.

(平成 19 年 6 月 1 日受付，9 月 5 日再受付)



長屋 義雄（学生員）

平 18 名工大・工・電気情報卒。現在，同大学院博士前期課程在学中。環境電磁工学に関する研究に従事。平 18 電気関係学会東海支部連合大会 IEEE 名古屋支部学生奨励賞受賞。



平田 晃正 (正員)

平 8 阪大・工・通信卒。平 12 同大学院博士後期課程了。博士(工学)。平 11 より日本学術振興会特別研究員, 平 12 カナダ・ピクトリア大学訪問研究員。平 13 阪大大学院・助手。平 17 名工大大学院・情報工学専攻助教授。生体電磁気学, アンテナ, フィルタ設計, ミリ波・サブミリ波自由電子レーザー, 計算電磁気学などの研究に従事。平 13 Ericsson Young Scientist Award, Young Scientist Award (at Int'l Symp. on Electromagnetic Theory), 平 16, 19 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 平 18 文部科学大臣表彰若手科学者賞などを受賞。電気学会, IEEE 会員。ICNIRP (非電離放射線防護委員会) Consulting Expert.



渡辺 聡一 (正員)

平 3 都立大・工・電気卒。平 8 同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程了。同年郵政省通信総合研究所(現, 独立行政法人情報通信研究機構)入所。以来, 生体電磁環境に関する研究に従事。工博。現在, 電磁波計測研究センター EMC グループ研究マネージャ。平 8 URSI Young Scientist Award, 平 9 本会論文賞, 平 10 本会学術奨励賞, 平 15 (社)電波産業会第 14 回電波功績賞(総務大臣表彰)各受賞。平 17 より国際非電離放射線防護委員会(International Commission on No-Ionizing Radiation Protection; ICNIRP)第 3 常置委員会(物理・工学)委員。電学会, IEEE, Bioelectromagnetics Society 各会員。



藤原 修 (正員)

昭 46 名工大・工・電子卒。昭 48 名大学院修士課程了。同年(株)日立製作所中央研究所入所。昭 51 同所退職。昭 55 名大学院博士後期課程了。名大工学部助手・講師を経て, 昭 60 名工大・工学部助教授。現在, 同大学院・情報工学専攻教授。平 3~4 スイス連邦工科大学客員教授。放電雑音, 生体電磁環境, 環境電磁気学に関する研究に従事。工博。IEEE 会員。昭 55 電気学会論文賞受賞。平 12 本会論文賞受賞。平 16 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sendai, The Best Paper Award (The Risaburo Sato Award), 平 19 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞。



長岡 智明 (正員)

平 16 北里大大学院医療系研究科博士課程了。同年郵政省通信総合研究所(現, (独)情報通信研究機構)入所。以来, 生体電磁環境, 医用画像解析に関する研究に従事。工博。現在, 電磁波計測研究センター EMC グループ専攻研究員。平 17 The Best Paper Award (The Roberts Prize) of Physics in Medicine and Biology。平 18 本会学術奨励賞受賞。IEEE 会員。