

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006-2008

課題番号：18360136

研究課題名（和文） 遠方界曝露に対する人体全身平均 SAR と温度上昇の定量評価

研究課題名（英文） Evaluation of whole-body averaged SAR and temperature elevation for far-field exposures

研究代表者

藤原 修(FUJIWARA OSAMU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60135316

研究成果の概要：本研究では、遠方より詳細な人体モデルに電波を照射した際に、モデル内に吸収される電力および伴う体内深部の温度上昇を解析することにある。まず、日本人を対象として構築された詳細なモデルに対する全身平均SARの大規模解析を実施した。特に、全身平均SARは、国際非電離放射線防護委員会の定めたガイドラインに対して、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および2GHz付近で極大となることを明らかにした。また、生体熱輸送方程式に改良を加え、体内深部温度上昇の解析が行えるような定式化を構築した。特に、全身平均SARと体内温度上昇の相関について考察を行い、全身平均SARが一定であれば、温度上昇は周波数にほとんど依存しないことを明らかにした。但し、性別およびモデル体形などにより影響を受けることもわかり、その評価が今後の検討課題となる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,100,000	0	5,100,000
2007年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	2,580,000	16,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：(F)電気・電磁環境

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、全身曝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で世界各国の電波曝露に対する安全指針が構築されている。

全身平均SARは、同じ強さの電波曝露で

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)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（例えば、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レベルを

参考レベルとしている。ここで、この基本制限は、動物への電波曝露実験で得られた値を基に、人体に対して補外することにより得られたものであるため、その有効性と限界を検討することが急務となっている。

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。但し、大規模計算で得られた全身平均SARに基づき、体内深部の温度上昇を計算した報告例はない。

2. 研究の目的

本研究では、詳細な人体モデルに遠方より電波を照射し、全身SAR分布を求める。得られたSAR分布を熱源とし、生体熱輸送方程式を解く。得られた結果より、SARと温度上昇の相関を明らかにし、物理的側面から電波防護指針の科学的根拠のさらなる明確化に貢献する。なお、従来の熱輸送モデルでは、体内深部の温度変化を十分考慮することができないため、定式化を改良するものとした。

3. 研究の方法

①リアル人体モデルを用いたSAR解析およびその厳密解との比較

大規模数値計算にもとづく数値解析結果は、人体数値モデルや境界条件を含む計算アルゴリズムの種類・精度に応じて大きく変わる恐れがある。申請代表者らは、先の検討で、FDTD法における解析の問題点を指摘している。この問題は、アンテナ解析など近傍界の解析では大きな問題とならないものの、遠方界の散乱問題に対し、解析対象の共振周波数近辺の周波数成分を持つ電磁波を入射した場合には無視できない可能性が高い。

そこで、(i)数値誤差はどの程度生じるのか、また、(ii)どのような条件下ではその誤差を抑えることができるのか、の二つの問題を解くために、FDTD解析と厳密解の比較を行った。

②リアル人体モデルを用いた温度上昇解析

従来、マイクロ波曝露による温度上昇解析では、Pennesにより提案した生体熱輸送方程式が頻用されている。この方程式は、ハイパーサーミアを行った際の実験を通して定式化されたものである。ここで、ハイパーサーミアとはラジオ波やマイクロ波を使った癌の温熱療法である。つまり、癌細胞のある局所的な電波曝露により加熱し、かつ温度上昇が極めて大きいような例には実用的であろう。

しかしながら、このような経緯で構築された方程式が、中間周波数帯からマイクロ波帯に至る遠方界曝露（全身曝露）に対して有効性が検証されたとは言い難い。具体的な問題点として、以下の2点が挙げられる。

(a). 全身に亘り、血液の温度を摂氏37度で一定としている。

(b). 人体の熱調整系を無視している。

これらの矛盾点を考慮しても、実用上問題ないような定式化の方法について議論した。

4. 研究成果

まず、本研究で提案した体内深部温度上昇の解析手法について示す。熱輸送方程式の一般的な定式化は電波吸収に伴うSARを熱発生源、体内座標を表す位置ベクトルを \mathbf{r} として、

$$\begin{aligned} C(\mathbf{r}) \cdot \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\mathbf{r}) \nabla T) + \\ A(\mathbf{r}, T(\mathbf{r}, t)) + \rho(\mathbf{r}) \cdot SAR(\mathbf{r}) \\ - B(\mathbf{r}, t) \cdot (T(\mathbf{r}, t) - T_b(\mathbf{r}, t)) \end{aligned} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 ρ は組織の密度 [kg/m^3]、 C は比熱 [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]、 T は組織の温度 [$^\circ\text{C}$]、 K は熱伝導率 [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]、 A は代謝熱 [W/m^3]、 B は血流定数 [$\text{W}/\text{m}^3^\circ\text{C}$]、 T_b は血液温度 [$^\circ\text{C}$] (初期値: 37°C) である。式(1)に対する境界条件は、

$$\begin{aligned} -K(\vec{\mathbf{r}}) \frac{\partial T(\vec{\mathbf{r}}, t)}{\partial n} \\ = H \cdot (T_s(\vec{\mathbf{r}}, t) - T_a) + SW(\vec{\mathbf{r}}, T(\vec{\mathbf{r}}, t)) \end{aligned} \quad (2)$$

で与える。ここで、 H は熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$]、 T_s は外気に接する組織温度 [$^\circ\text{C}$]、 T_a は外気の温度 [$^\circ\text{C}$]、 n は体表面の法線方向の単位ベクトルである。(2)式の左辺第2項は発汗効果を示し、従来の熱解析ではこれを無視している場合が多かった。さらに、これらの定式化において従来の報告では、血液温度を $T_b(\mathbf{r}, t) = T_b$ 、つまり時間にも空間にも依存しないと仮定した上で取り扱われてきた。このため、全身曝露のような場合には人体における熱収支が保てない。そこで、本研究では、それを補完するために、血液温度は空間的には一定とするものの、時間的には変化すると仮定し、以下の式で与えられるものとした。

$$T_b(t) = T_{b0} + \int_t \frac{Q_{BT}(t)}{C_B \rho_B V_B} dt \quad (3)$$

$$Q_{BT}(t) = B(\mathbf{r}, t) \cdot (T(\mathbf{r}, t) - T_b(\mathbf{r}, t)) \quad (4)$$

以降の解析では、この手法を用いて得られた結果を示すものとする。

次に、電波を照射した際に詳細な人体モデルにおけるSAR分布について解析を行った。国際的な電波ガイドラインであるICNIRPで定められている入射電力密度に対し

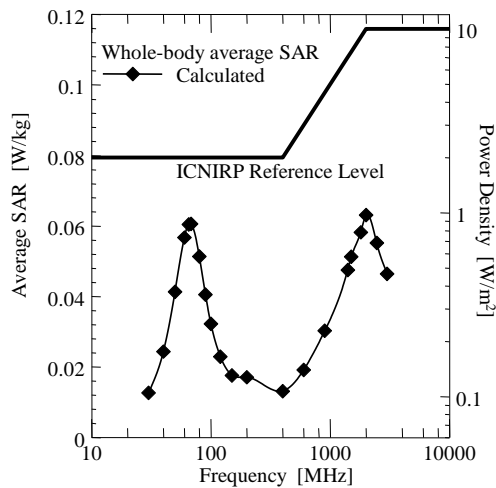


図1 ICNIRP ガイドラインで定められた電力強度に対する全身平均SARの周波数特性

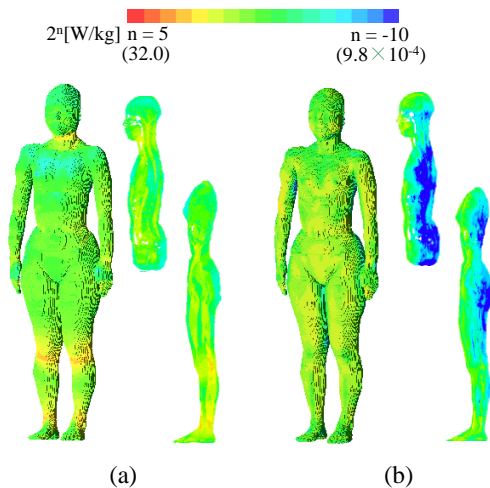


図2 ICNIRP ガイドラインで定められた電力強度に対する全身平均SAR分布(a)共振周波数、(b)2GHz

て全身平均SARが極大となる点を調べた。その結果、2つの周波数帯で極大となることがわかった。1つ目は、人体が共振する周波数帯であり、背景でも述べたとおり、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あった。従来研究は簡易モデルを用いた検討であったが、その有用性を人体の組織構成を考慮にいれた詳細なモデルでも同様であることが確認された。もう一つの周波数帯は、2GHz付近であった。400MHzから2GHzにかけて許容される電力密度が緩和される結果、極大を持つものと推察された。日本人成人男性モデルに対して、両周波数帯での全身平均SARの最大値は、65MHzにおいて0.

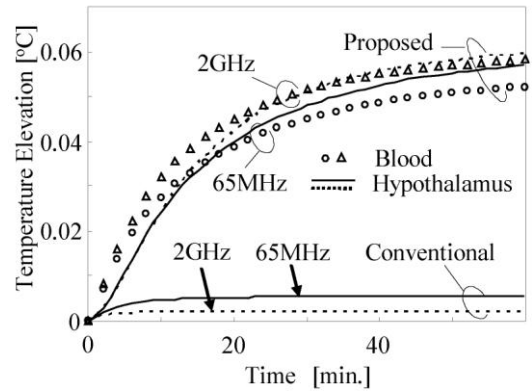


図3 ICNIRP ガイドラインで定められた電力強度に対する体内深部温度上昇(血液および視床下部)

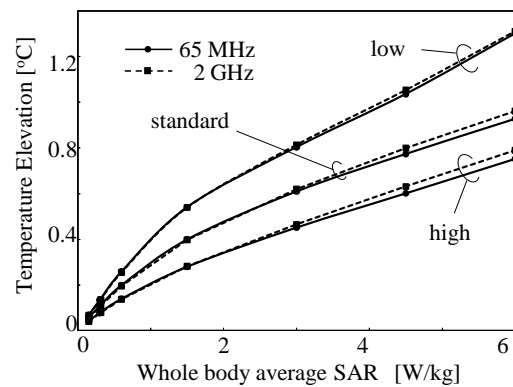


図4 体内深部温度上昇の全身平均 SAR 依存性. 対象周波数は65MHzおよび2GHzとした

061 W/kg、2GHzにおいて0.062 W/kgであった。これらの周波数における全身平均SAR分布を図2に示す。図2より、全身平均SARはほぼ同等であるにもかかわらず、分布は大きく異なることがわかる。これは、共振周波数では、人体はアンテナのように振る舞い人体のSAR分布がほぼ一様であるのに対し、GHz帯では電力吸収は表皮効果により数cm程度となるためである(2GHzで、筋肉組織に対して約15mm)。

図3には、今回用いた定式化によって得られた温度上昇結果を、従来の定式化により得られた結果と併せて示す。なお、対象とする周波数は、図1および2に示したように全身平均SARが極大を有する65MHzと2GHzとした。なお、式(2)で示した汗に関する項は標準的な値を用いるものとした。図より、従来の定式化では、ほとんど深部における体内

温度上昇は観測されないことがわかる。また、今回提案した定式化を用いた場合、時定数は、65MHzで970s(約16分)、2GHzで886s(約15分)となり、ICNIRPでの6分間に比べて3倍近い値となった。なお、電波を6分間照射した際の全身平均SARに対する血液の温度上昇は、0.050~0.059[°C/(W/kg)]であり、周波数や汗腺の有無にはほとんど影響されなかった。このことから、ICNIRPの6分間は、安全サイドの控えめな評価につながるということがわかった。

図4は、体内深部温度上昇の指標として血液温度を用い、その温度上昇の全身平均SAR依存性を調べた。なお、図3までの議論では、式(2)における発汗量として標準的な値を用いていたが、本検討では、汗腺が発達した場合、および発達していない場合の二つの場合をあわせて考え、同様に検討を行った。図4より、全身平均SARと体内深部温度上昇には比例関係はないことがわかる。これは、本文では詳細は示さないものの、式(2)で示した発汗に関する係数は非線形なものを用いているためである。この図より、温度上昇に与える不確定要因として最大のものは、発汗にかかわる係数であることがわかる。今回の発汗の変動度合いは、先に報告された実測データを用いたのみであり、より詳細な検討が必要であろう。また、同図より周波数に伴う差異は、ほとんどないことが確認できる。今回は典型的な例として65MHzおよび2GHzのみの結果を示しているが、他の周波数でも同様であることを確認している。また、性別あるいは年齢により、体形あるいは熱調整系に関わる特性も異なることが予想され、今後の検討項目として挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5件)

1. 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," *Bioelectromagnetics*, vol.28, pp.484-487, 2007.
2. A. Hirata, T. Asano, and O. Fujiwara, "FDTD analysis of body-core temperature elevation in children and adults for whole-body exposure," *Phys. Med. Biol.*, vol.53, pp.5223-5238, 2008.
3. A. Hirata, N. Ito, and O. Fujiwara, "Influence of electromagnetic polarization on whole-body averaged SAR in children for plane-wave exposures," *Physics in Medicine and Biology*, N186-N196, 2009.

[学会発表] (計 13件)

1. A. Hirata, S. Watanabe, O. Fujiwara, M. Kojima, K. Sasaki, T. Shiozawa, "Temperature elevation in the eye of Japanese male and female models for plane wave exposures", 電気学会電磁環境研究会, EMC-06-17, Nov. 2006 (NICT).
2. 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), Sep. 2006.
3. A. Hirata, Y. Nagaya, O. Fujiwara, T. Nagaoka, S. Watanabe, "Correlation between absorption cross section and body surface area of human for far-field exposure at GHz bands," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, TU-PM-41, 2007.
4. A. Hirata, Y. Hiraiwa, O. Fujiwara, T. Nagaoka, S. Watanabe, "Formula for estimating whole-body average SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency," 信学技報, EMC-08-18, Jun. 2008 (北海道大学).

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤原 修(FUJIWARA OSAMU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60135316

(2)研究分担者

平田 晃正(HIRATA AKIMASA)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00335374

塩澤 俊之(SHIOZAWA TOSHIYUKI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：40029210

上村 佳嗣(KAMIMURA YOSHITSUGU)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20233950

(3)連携研究者

なし