

## 研究速報

局所 SAR を用いた人体頭部内温度上昇の推定

森田 匡<sup>†</sup> 平田 晃正<sup>†a)</sup> (正員)塩沢 俊之<sup>†</sup> (正員)

Prediction of Temperature Rise in the Human Head in Terms of Local SAR

Masashi MORITA<sup>†</sup>, Nonmember, Akimasa HIRATA<sup>†a)</sup>,  
and Toshiyuki SHIOZAWA<sup>†</sup>, Regular Members<sup>†</sup> 大阪大学大学院工学研究科, 吹田市Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita-shi,  
565-0871 Japan

a) E-mail: hirata@comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし ダイポールアンテナから発せられた電磁波を曝露した際の、人体頭部内における SAR (比吸収率) と温度上昇について数値解析を行い、900 MHz ~ 2.45 GHz の周波数帯域において、脳内及び頭部における最大温度上昇は、局所 1 g SAR を用いて精度良く推定できることを示す。

キーワード 生体熱輸送方程式, 温度上昇, 比吸収率 (SAR), FDTD 法, ダイポールアンテナ

## 1. ま え が き

近年、電磁波が人体に与える影響に大きな関心が寄せられている。特に、携帯電話端末は人体頭部近傍で用いられるため、そこから発せられる電磁波の人体頭部への影響が注目されている。そのため、各種団体により電磁波吸収量に関する安全基準が定められており、マイクロ波領域での近傍界曝露に対する安全性の指標としては、局所 SAR (比吸収率) が用いられている。このため、頭部内局所 SAR を計算、測定した報告が多数なされてきた [1]。それらの多くは、商用の移動体通信で用いられている 800 ~ 900 MHz, 1.5 GHz, 1.9 GHz の周波数帯を対象としている。一方では、電磁波曝露の直接的影響の一つとして、電磁波吸収による温度上昇があげられている。具体的な温度上昇による影響としては、脳の温度が 3.5°C [2]、皮膚の温度が 10°C [3] 上昇すると物理的損傷を引き起こす、などがあげられている。そのため、解剖学的な人体頭部モデルを用いて、電磁波を吸収した場合に引き起こされる温度上昇を調べた報告がいくつかなされている [4] ~ [9]。主な結果として、頭部内における SAR の分布と温度上昇の分布は比例しないことが示されている。それらの解析では、まず FDTD 法 [10] を用いてモデル内における SAR を計算し、次にそれを熱源として生体熱方程式 [11] を解くことにより温度上昇を求めている。つまり、温度上昇を求めるには上記の 2 ステップ

の計算が必要とされてきた。

そこで本論文では、人体頭部近傍から発せられた電磁波による SAR と温度上昇を計算し、それらの関係を検討することにより、SAR を用いて人体頭部における最大温度上昇を予測する方法について検討することを目的とする。

## 2. モデルと解析手法

本論文で用いる人体頭部モデルは、筆者らが構築したものの [12] に若干の修正を加えたものである。ここで、本論文では、16 mm の厚さのつぶれていない耳翼を考える。また、電磁波源としては半波長ダイポールアンテナを用い、モデルの耳翼の端から 1.2 cm のところに鉛直 (VP) 及び水平 (HP) 方向に配置する。励振周波数は、900 MHz, 1.5, 1.9, 2.15, 2.45 GHz とし、出力電力はすべての周波数で 0.6 W としている。解析手順としては、まず FDTD 法により SAR を計算し、次にそれを熱源として生体熱輸送方程式を解くことにより、各組織の温度上昇を求めた。なお、温度上昇計算は、定常状態に達するまで行った (約 30 分)。

## 3. 解析結果

各周波数でアンテナを垂直及び水平に配置した際の、頭部全体及び脳内における 1 g 平均及び 10 g 平均 SAR の最大値をそれぞれ図 1、図 2 に示す。これらの図より、SAR の最大値は周波数及び偏波に大きく依存していることがわかる。

耳翼、耳翼を除いた頭部及び脳組織での最大温度上昇の計算結果を図 3 に示す。この図からも、頭部内 SAR は周波数や偏波によって値が大きく変化することがわかる。また、図 1 及び図 2 と比較すると、局所平均 SAR の最大値の周波数特性と最大温度上昇は

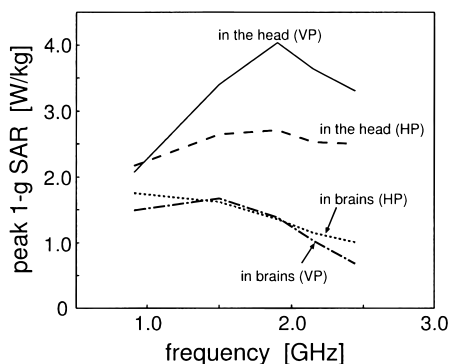


図 1 頭部全体及び脳組織内での 1 g 平均 SAR の最大値  
Fig. 1 Peak 1 g SARs in the whole head and brains.

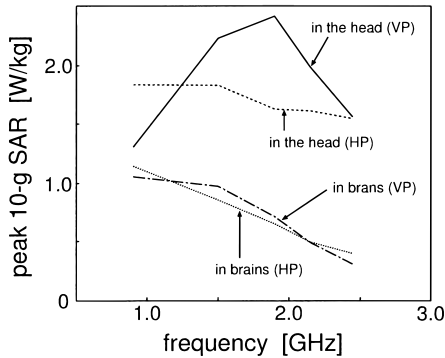


図2 頭部全体及び脳組織内での 10 g 平均 SAR の最大値  
Fig. 2 Peak 10 g SARs in the whole head and brains.

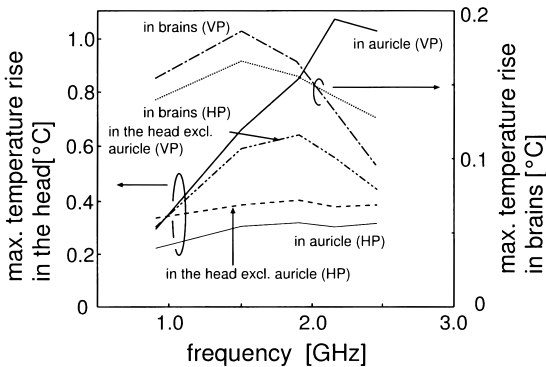


図3 頭部及び脳組織内での温度上昇の最大値  
Fig. 3 Maximum temperature rises in the head and brains.

単純に比例していないが、比較的似た傾向を示していることがわかる。

従来、SAR と温度上昇を関連付けるのは困難であるとされてきた [4], [5], [7], [8]。ただし、同じ周波数で同一の携帯電話を用いた場合、熱ポテンシャルと温度上昇はほぼ比例することも示されている [6]。そこで、最大温度上昇と局所最大 SAR は近似的に下の式で表されると仮定する。

$$\Delta T_{\max} = a \cdot \text{SAR} \quad (1)$$

ここで SAR は、頭部または脳組織での、1 g 平均若しくは 10 g 平均 SAR である。a は全周波数、偏波方向 (計 10 条件) に対する、式 (1) から得られる推定値と計算値の偏差

$$\frac{|\Delta T_{\max} - a \cdot \text{SAR}|}{\Delta T_{\max}} \quad (2)$$

の総和を最小化する値と定義した。

表1 局所平均 SAR を用いた温度上昇推定係数と平均/最大誤差 [単位は%]; (a) 脳組織内, (b) 耳翼を除く頭部, (c) 耳翼を含む頭部

Table 1 Predicted coefficient  $a$  in terms of local SARs and average/maximum errors [in %]; (a) in brains, (b) in the head excluding auricle, and (c) in the head including auricle.

(a)

	$a$	avg. err.	max. err.
$\text{SAR}_{\text{head}, 1 \text{ g}}$	0.0564	18.2	48.4
$\text{SAR}_{\text{head}, 10 \text{ g}}$	0.0836	14.4	41.0
$\text{SAR}_{\text{brain}, 1 \text{ g}}$	0.119	10.9	22.2
$\text{SAR}_{\text{brain}, 10 \text{ g}}$	0.270	22.2	54.8

(b)

	$a$	avg. err.	max. err.
$\text{SAR}_{\text{head}, 1 \text{ g}}$	0.154	4.62	13.3
$\text{SAR}_{\text{head}, 10 \text{ g}}$	0.250	9.51	26.4
$\text{SAR}_{\text{brain}, 1 \text{ g}}$	0.384	31.2	71.0
$\text{SAR}_{\text{brain}, 10 \text{ g}}$	0.902	35.6	68.0

(c)

	$a$	avg. err.	max. err.
$\text{SAR}_{\text{head}, 1 \text{ g}}$	0.195	25.6	59.9
$\text{SAR}_{\text{head}, 10 \text{ g}}$	0.298	36.5	121.7
$\text{SAR}_{\text{brain}, 1 \text{ g}}$	0.996	61.0	86.7
$\text{SAR}_{\text{brain}, 10 \text{ g}}$	0.963	24.5	56.6

本研究において得られた SAR, 温度上昇に対して、傾き  $a$ , 及び近似により生じる誤差を表 1 に示す。この表より、頭部最大 1 g 平均 SAR を用いることにより耳翼を除いた頭部での最大温度上昇を、脳内最大 1 g 平均 SAR を用いることにより脳内最大温度上昇を良い精度で予測できることがわかる (最大 22.2%)。局所平均 SAR はその平均化の方法により大きく変化する [13], [14] ため、この誤差は許容範囲であろう。一方、耳翼を含む場合、局所 SAR を用いて最大温度上昇を予測することは困難である。これは、耳翼付近の構造の複雑さのため、1 g 平均 SAR の計算には耳翼中の SAR を含まないにもかかわらず、最大温度上昇は耳翼中に表れる場合があるためである。

次に、筆者らの計算結果の妥当性と推測の手法の有効性について検討するために、脳組織における最大 1 g 平均 SAR と最大温度上昇の関係を図 4 に示す。また、比較のために、文献 [4], [8] のデータも合わせて示す。この図より、モデルによって係数に差はあるものの、脳組織における最大 1 g 平均 SAR と最大温度上昇はほぼ比例の関係にあることがわかる。特に、本研究の結果と文献 [8] の結果はほぼ一致している。ここで、文献 [8] では、モデルの不均質さ及び熱に関する

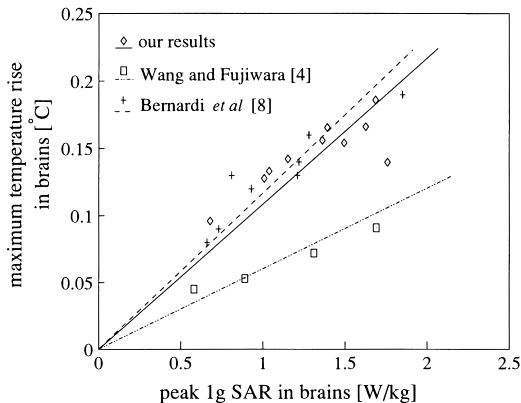


図4 脳組織における最大1g平均SARと最大温度上昇

Fig. 4 Maximum 1g SAR vs. maximum temperature rise in brains.

定数は筆者らのものと比較的近いものを用いている。また、文献[4]のデータにおいても、最大誤差はただか30%程度である。ここで、文献[6]と同様に、熱ポテンシャルを用いて係数 $a$ と、近似による誤差を求めたが、最大誤差の変化はただか数%であった。

#### 4. むすび

本論文では、ダイポールアンテナから発せられる電磁波による人体頭部内での局所SARを用いて、それにより引き起こされる最大温度上昇を精度良く推定する方法を提案し、その誤差を評価した。本研究では、ダイポールアンテナを用いて周波数、偏波方向を変化させたが、文献[8]では900MHz帯において様々な種類のアンテナを対象に解析が行われている。これらのいずれの計算結果に対しても傾きは類似し、誤差も比較的小さいことがわかった。そのため、この推定方法を用いることにより、少なくとも900MHz~2.45GHzの周波数帯においては、SARを用いて最大温度上昇を予測することは十分可能であるといえよう。また、この方法を用いることにより、SAR計算、温度上昇計算と二つのステップに分かれていた従来の手続きが、SAR計算のみに簡易化される。今後の研究課題としては、より多くの媒質定数、熱定数に対して計算を行い、式(1)における係数 $a$ について、より汎用性のある値を導出すること、及びその不確定性を検討することがあげられる。

#### 文 献

- [1] M. Burkhardt and N. Kuster, "Review of exposure assessment for handheld mobile communications

devices and antenna studies for optimized performance," W.R. Stone, Review of Radio Science 1996–1999, chap.34, Oxford Univ. Press, 1999.

- [2] A.C. Guyton and J.E. Hall, Textbook of Medical Physiology, chap.73, W.B. Saunders, Philadelphia, PA, 1996.
- [3] J.D. Hardy, H.G. Wolff, and H. Goodell, Pain Sensations and Reactions, Baltimore, chap.IV and X, Williams & Wilkins, MD, 1952.
- [4] J. Wang and O. Fujiwara, "FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.47, no.8, pp.1528–1534, 1999.
- [5] A. Hirata, T. Katayama, and T. Shiozawa, "Thermal effects in the human head for exposure to EM waves emitted from terminals for mobile satellite services," Proc. of 10th IEEE Int'l Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Comm., G-5-4, Osaka, Japan, Sept. 1999.
- [6] J. Wang, T. Joukou, and O. Fujiwara, "Dependence of antenna output power of temperature rise in human head for portable telephones," Proc. of Asia Pacific Microwave Conference '99, vol.2, pp.481–484, 1999.
- [7] G.M.J. Van Leeuwen et. al., "Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone," Phys. Med. Biol., vol.44, no.10, pp.2367–2379, 1999.
- [8] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. Piuze, "Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular-phone user," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.48, no.7, pp.1118–1126, 2000.
- [9] 藤原 修, 城向剛博, 王 建青, "携帯電話に対する頭部のドジメトリ解析と安全性評価," 信学論(B), vol.J83-B, no.5, pp.720–725, May 2000.
- [10] A. Taflov, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Dedham, MA, 1995.
- [11] H.H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperature in resting forearm," J. Appl. Phys., vol.1, pp.93–122, 1948.
- [12] A. Hirata, S. Matsuyama, and T. Shiozawa, "Temperature rises in the human eye exposed to EM waves in the frequency range 0.6–6 GHz," IEEE Trans. Electromag. Compt., vol.42, no.4, pp.386–393, 2000.
- [13] O.P. Gandhi, G. Lazzi, and C.M. Furse, "Electromagnetic absorption in the human head and neck at 835 and 1900 MHz," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.44, no.10, pp.1884–1887, 1996.
- [14] N. Stevens and L. Martens, "Comparison of averaging procedures for SAR distributions at 900 and 1800 MHz," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.48, no.11, pp.2180–2184, 2000.

(平成13年7月30日受付)