

携帯電話の電磁界による頭部内のホットスポット形成と SAR の FDTD 解析

藤原 修[†] 王 建青[†] 牛本 卓二[†] 野島 俊雄^{††}

FDTD Analysis for Formulation of Hot Spot and SAR in Human Head Exposed to Electromagnetic Fields by Portable Telephone

Osamu FUJIWARA[†], Jianqing WANG[†], Takuji USHIMOTO[†], and Toshio NOJIMA^{††}

あらまし 本論文では、携帯電話によるホットスポット形成の有無を明らかにするために、筆者らの製作になる成人、小児、幼児サイズの3種類の実形状不均質頭部モデル(以下、リアルモデルと呼ぶ)と、対照モデルとしてそれらのおおきさに対応した均質球モデルを用い、携帯電話による頭部内 SAR を平面波曝露の場合と併せて FDTD 解析した。その結果、携帯電話の実使用状態ではリアルモデルでも均質球モデルでもサイズの大小にかかわらず局所ピーク SAR は表面上で生じ、内部にはホットスポットは形成されないことがわかった。一方、携帯電話を頭部から 9.75 cm 離れた状態では幼児サイズのリアルモデル及び均質球の両モデルにおいてホットスポットが現れることが判明し、このことは平面波曝露で顕著に確認できた。しかし、これらのホットスポット値は、携帯電話の実使用状態で頭部表面上に生ずるピーク SAR 値に比して十分小さく、例えば幼児サイズの首まで含めたリアルモデルでのホットスポット値は 900 MHz では 1g 平均で 41%以下、10g 平均では 36%以下、1.5 GHz では 1g 平均で 16%以下、10g 平均では 11%以下、であることがわかった。

キーワード 携帯電話, ホットスポット, ドシメトリ, 不均質頭部モデル, FDTD 計算。

1. ま え が き

携帯電話の爆発的な普及に伴い、発射電波と人体との関係について、より詳細な議論が求められている。最近では、携帯電話使用者が低年齢層まで普及するに及んで携帯電話使用者のホットスポット形成問題が懸案事項として再びクローズアップされている。

一般にホットスポットとは、電波を浴びた人体の頭部内部において生ずる吸収電力の高い領域をいう。これは、平面波を照射した頭部の均質球モデルに対して Kritikos と Schwan が理論計算で初めて見出した現象であり、例えば、半径 10 cm の球モデルにはホットスポットは起きないが、半径 5 cm では 250 MHz から 2,800 MHz にわたる広い周波数範囲においてホットスポットが内部に生じることが彼らは報告している [1]。

更に彼らは、平面波照射の均質球モデルに対してホットスポットを詳細に解析し、半径 0.1 cm から 8 cm の球モデルに対して 300 MHz から 12,000 MHz の周波数範囲でしかホットスポットは形成されないことを明らかにしている。また、小林らは、均質球モデルを半波長ダイポールアンテナの近傍電磁界に曝した場合のホットスポットをアンテナ距離との関係において解析し、この場合の形成条件を求めている [2]。その結果を、遠方電磁界に対する Kritikos と Schwan のホットスポット形成条件と併せて図 1 に示す。この図によると、例えば、周波数が 1.5 GHz では、半波長アンテナを頭部から 10 cm 程度離せば球半径が 1~5.5 cm の範囲においてホットスポットが生じることがわかる。

一方、現実の頭部に対しては、そのサイズや周波数がホットスポット形成条件を仮に満たすとしても頭部形状や内部組織の複雑さから電磁吸収エネルギーは分散され、それゆえに遠方界や近傍界に対してもホットスポットは形成されないであろうとの認識がある [3]。実際、Gandhi らは 835 MHz と 1.9 GHz の携帯電話使用時の 10 歳と 5 歳児に相当する実形状不均質頭部

[†]名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市 Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††}NTT 移動通信網株式会社, 横須賀市 NTT Mobile Communications Network Inc, Yokosuka-shi, 239-8536 Japan

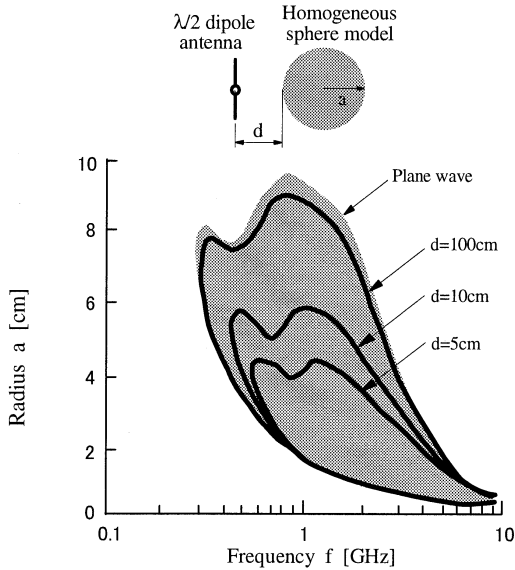


図1 均質球モデルのホットスポット生成条件
Fig. 1 The occurrence condition of Hot Spot in homogeneous sphere models.

モデル(以下,リアルモデルと呼ぶ)に対して SAR を計算し,実使用状態では局所 SAR のピーク値は頭部表面で生じ,内部にはホットスポットは現れないことを報告している [4].

しかしながら,頭部の均質球モデルに対しては平面波や半波長ダイポールでもホットスポットを生じる場合が歴然と存在しているので,携帯電話の使用状態によっては頭部リアルモデル内部にもホットスポットが形成される可能性は否定できない.例えば,実生活における携帯電話の使用形態を考えると,電車内で乗客が使用する携帯電話や幼児を抱えた人が使用する携帯電話に対しては,間近の乗客や幼児の頭部とアンテナまでの距離は 10 cm 程度に離れる状況が十分に想定され,この場合には頭部内にホットスポットを生ずるおそれがある.

本論文では,筆者らの製作になる成人,小児,幼児サイズの頭部リアルモデルとそれらのおおきさに対応した均質球モデルとに対して,携帯電話による SAR を平面波曝露による場合と併せて計算することでホットスポット形成の有無とスポット値とを明らかにする.

2. 計算方法

2.1 頭部モデル

人体頭部の計算モデルとしては,リアルモデルと均

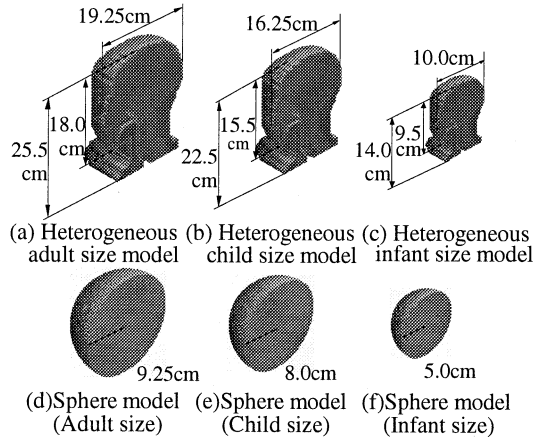


図2 頭部モデル

Fig. 2 The heterogeneous head models and homogeneous sphere models for adult, child and infant heads.

質球モデルとを用いた.リアルモデルは,標準的な日本人成人男性の頭部解剖図を参考にして筆者らのグループが製作した成人モデル [5] と,それから日本人頭部の平均頭圍发育曲線 [6] を参考に縮減・作成した小児及び幼児モデル [7] を使用した.結果として,成人モデルは,首から下の部位を除けば,半径 9.25 cm の球体とほぼ同体積となり,小児と幼児モデルはそれぞれ半径 8 cm, 5 cm の球体と同体積となったので,これらの均質球をリアルモデルの対照モデルとした.以上の頭部モデルの外観と寸法を図 2 に示す.図の頭部モデルは,いずれも 1 辺が $\delta = 2.5 \text{ mm}$ の微小な格子状の立方セルからなり,成人サイズは 271,928 セル,小児は 188,018 セル,幼児は 44,892 セルからそれぞれ構築されている.なお,頭部モデルを構成する組織は,骨,脳,筋肉,眼球,脂肪,皮膚の 6 種類であり,これらの組織ごとの構成セル数と電気定数 [8] を幼児モデルについてまとめたものを表 1 に示す.ただし,成人,小児サイズのリアルモデルにおける組織の電気定数は幼児モデルのそれと同じとした.また,均質球モデルの電気定数については脳組織のそれと同じとした.

2.2 FDTD 計算

携帯電話の使用周波数は 900 MHz と 1.5 GHz とし,アンテナ入力電力はそれぞれ 0.6 W, 0.27 W とした.0.6 W は我が国のアナログ携帯電話の,また 0.27 W はデジタル携帯電話(PDC-personal digital cellular-フルレート音声コーデック)の最大出力

表 1 幼児モデルの頭部組織の構成セル数と電気定数

Table 1 The number of cells and electrical properties in each tissue of infant head model.

	Tissue type	Number of cubic cells	Frequency			
			900MHz		1.5GHz	
			ϵ_r	σ [S/m]	ϵ_r	σ [S/m]
Heterogeneous model (Infant)	Brain	15,590	44.1	0.89	42.8	1.08
	Bone	10,926	17.4	0.19	16.1	0.32
	Muscle	9,832	51.8	1.11	50.2	1.39
	Eyeball	124	74.3	1.97	73.9	2.21
	Fat	214	10.0	0.17	9.7	0.20
	Skin	8,216	39.5	0.69	39.1	0.86
	Total	44,892				
Homogeneous sphere model (Infant)	Brain	34,049	44.1	0.89	42.8	1.08

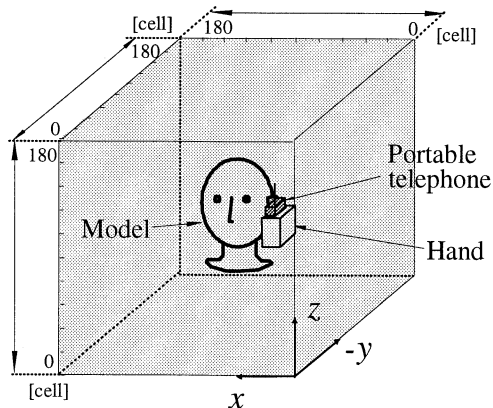


図 3 FDTD 計算領域とモデル配置

Fig. 3 FDTD computation region and model configuration.

(1秒平均)である。人体頭部内の SAR は時間領域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method; 以下 FD-TD 法と呼ぶ) で計算した。図 3 は FDTD 計算領域とモデル配置を示す。ただし、図の x, y, z 軸の目盛はセル数で表している。計算領域として、 x, y, z 軸方向にそれぞれ 180 セルとり、領域内の格子総数を $180 \times 180 \times 180 = 5,832,000$ セルとした。なお、計算領域の境界面においては、反射波をなくすために、Mur の 2 次吸収境界条件 [9] を適用した。図 3 の領域内のほぼ中心に図 2 に示した頭部モデルと携帯電話とを配置した。携帯電話は、 $12 \text{ cm} \times 4.25 \text{ cm} \times 2.25 \text{ cm}$ の金属ボックスとその上部前方に設置した $\lambda/4$ モノポールアンテナ (直径: 2.5 mm) から構成した。携帯電話を握る手は、簡単のために、電話機の三方を囲む格好とし、幅 8 cm 、厚さ 2 cm の $2/3$ 筋肉等価媒質で構成した。なお、均質球モデルの場合は手は考慮しなかった。

携帯電話と頭部との配置関係は、実使用状態の場合はアンテナと頭部との距離を 1.75 cm とした。なお、図 1 によれば球半径が 5 cm ならば、 900 MHz または 1.5 GHz の半波長ダイポールアンテナで均質球モデル内部にホットスポットを生じる条件は、アンテナと球表面との距離は約 8 cm 以上となるので、このホットスポット形成条件を考慮し、本論文では携帯電話のアンテナを頭部表面から 9.75 cm 離れた場合の計算を行った。ただし、このときの計算領域は、 x 軸方向に 220 セル、 y, z 軸方向にそれぞれ 180 セルとり、領域内の格子総数を $220 \times 180 \times 180 = 7,128,000$ セルとした。

平面波による FDTD 計算では、入射マイクロ波は x 軸正方向に伝搬する 900 MHz 及び 1.5 GHz マイクロ波とし、入射電力密度は電気通信技術審議会による電波防護指針 [3] の一般人に適用されるレベル (900 MHz : 0.6 mW/cm^2 , 1.5 GHz : 1.0 mW/cm^2) とした。

時間ステップ間隔は立方格子の大きさで解の安定条件から 4.81 ps とし、計算領域内の電磁界が定常状態に達するまでに 7 周期必要であった。なお、頭部リアルモデル内の各セルにおける SAR 値は 7 周期目の電界最大値を用いて以下のようにして求めた。すなわち、直交座標系の位置 $(i\delta, j\delta, k\delta)$ における最大電界の x, y, z 成分をそれぞれ $E_x(i, j, k), E_y(i, j, k), E_z(i, j, k)$ と表すものとすれば、 $\text{SAR}(i, j, k)$ は、

$$\begin{aligned} \text{SAR}(i, j, k) &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma(i, j, k)}{\rho(i, j, k)} \cdot [|E_x(i, j, k)|^2 + |E_y(i, j, k)|^2 \\ &\quad + |E_z(i, j, k)|^2] \end{aligned} \quad (1)$$

となり、これから SAR 値を計算した。ここで、 $\sigma(i, j, k)$ 、 $\rho(i, j, k)$ はそれぞれ位置 $(i\delta, j\delta, k\delta)$ における組織の導電率、密度である。

3. 計算結果と考察

図 4 は、成人と幼児の均質球モデル及びリアルモデルのアンテナ給電点を通る水平断面上の 900 MHz での SAR 空間分布 (1セル当りの SAR 値で表示) を示す。図から、携帯電話の実使用状態 (頭部モデルとアンテナとの距離: $d = 1.75 \text{ cm}$) では、モデルの種類

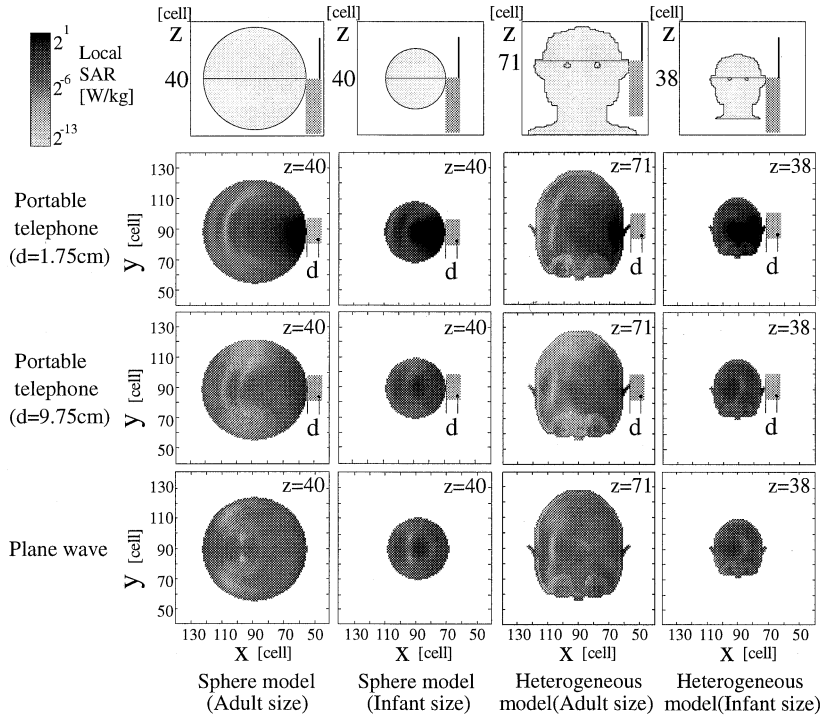


図4 成人と幼児の均質球モデルとリアルモデルのアンテナ給電点を通る水平断面上の SAR 空間分布 (frequency: 900 MHz)

Fig.4 Spatial distributions of SARs in the homogeneous sphere models and the heterogeneous models for adult and infant (frequency: 900 MHz).

にかかわらずアンテナ付近の頭部表面上での SAR 値が高く、そこから内部に入るに従って SAR は減少していることがわかる。携帯電話をモデルから遠ざけた状態 (頭部モデルとアンテナとの距離: $d = 9.75 \text{ cm}$) では、いずれのモデルにおいても頭部内部の SAR 値が増加しており、その空間分布は平面波によるそれと類似していることがわかる。また、幼児サイズの頭部モデルのほうが成人サイズよりも SAR 値の高い領域が深部にまで入り込んでいるが、これは、幼児サイズのほうがアンテナ長に対するモデルの大きさの比が小さいので、結果として、幼児モデルでは全頭曝露に近い状態になったことによるものと考えられる。

図5は、成人と幼児の均質球モデル及びリアルモデルのアンテナ給電点を通る水平断面上の x 方向における SAR 空間分布 (1 セル当りの SAR 値で表示) を示す。ただし、横軸の原点 ($x = 0$) は携帯電話側 (平面波照射側) の頭部表面としている。また、右図の網掛け領域は耳の存在領域を示す。図から、成人サイズにおいては携帯電話でも平面波曝露でもピーク SAR は

リアルモデルで耳の付け根、均質球では表面でそれぞれ生じ、いずれのモデルでもホットスポットは形成されていないことがわかる。一方、幼児サイズにおいては、均質球モデルでも携帯電話の実使用状態でピーク SAR は表面で生じ、内部にホットスポットは形成されていないのに対し、平面波曝露では顕著なホットスポットが内部に生じていることがわかる。携帯電話を球モデルから 9.75 cm 離れた状態 ($d = 9.75 \text{ cm}$) では内部に表面吸収値の 900 MHz で約 3.5 倍、 1.5 GHz では約 2.2 倍に達するホットスポットが形成され、SAR 分布が平面波曝露のそれに類似していることがわかる。幼児サイズのリアルモデルで携帯電話を頭部から 9.75 cm 離れた場合には、均質球モデルほど顕著ではないが頭部内部に表面吸収値の 900 MHz で約 2.3 倍、 1.5 GHz で約 1.1 倍に達するホットスポットが生じ、ともに平面波曝露のそれに類似していることがわかる。以上の結果は、ホットスポットは平面波曝露で対称構造の球モデルのほうが生じやすく、近傍界曝露の非対称構造のリアルモデルでは生じにくいという、従来認

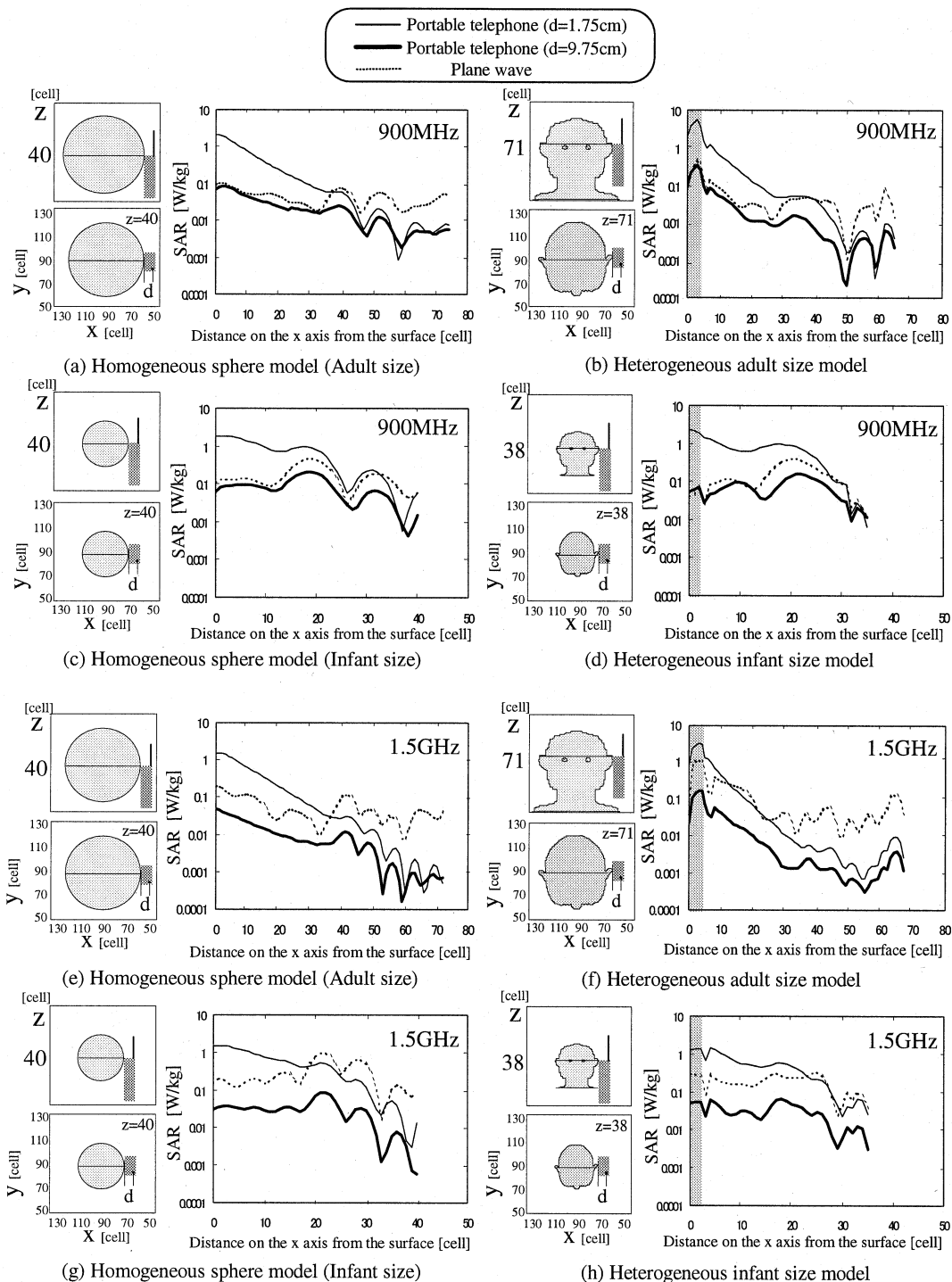


図 5 成人と幼児の均質球モデルとリアルモデルのアンテナ給電点を通る x 方向における水平断面上の SAR 空間分布

Fig. 5 Spatial SAR distributions on the x axis in the homogeneous sphere models and the heterogeneous models for adult and infant.

表2 頭部モデルにおける 1g 及び 10g 平均局所ピーク SAR
Table 2 One-gram localized peak SARs and ten-gram localized peak SARs in the head models.

		900MHz			1.5GHz				
		Adult	Child	Infant	Adult	Child	Infant		
One-gram Peak SAR [W/kg]	Portable telephone (d=1.75cm)	Heterogeneous model	1.754 (root of ear)	1.676 (root of ear)	1.698 (root of ear)	1.113 (root of ear)	1.321 (root of ear)	1.567 (root of ear)	
		Sphere model	2.635	2.467	2.463	2.425	2.428	2.415	
	Plane wave	Heterogeneous model	0.142 (root of ear)	0.308 (cheek)	0.691 (inside mouth)	0.115 (root of ear)	0.112 (inside neck)	0.245 (inside neck)	
		Sphere model	0.124	0.126	0.182 (inside sphere)	0.056	0.053	0.174 (without neck) 0.054 (inside mouth)	
	Plane wave	Heterogeneous model	0.181 (root of ear)	0.533 (cheek)	0.610 (inside mouth)	0.483 (root of ear)	0.491 (root of ear)	1.108 (inside neck)	
		Sphere model	0.125	0.112	0.464 (inside sphere)	0.225	0.198	0.685 (without neck) 0.990 (inside sphere)	
	Ten-gram Peak SAR [W/kg]	Portable telephone (d=1.75cm)	Heterogeneous model	0.962 (root of ear)	0.973 (root of ear)	1.216 (root of ear)	0.576 (root of ear)	0.649 (root of ear)	1.115 (root of ear)
			Sphere model	1.721	1.598	1.619	1.495	1.480	1.358
		Plane wave	Heterogeneous model	0.077 (root of ear)	0.186 (cheek)	0.433 (inside mouth)	0.042 (root of ear)	0.052 (inside neck)	0.121 (inside neck)
			Sphere model	0.099	0.100	0.139 (inside sphere)	0.040	0.039	0.071 (without neck) 0.041 (inside mouth)
Plane wave		Heterogeneous model	0.109 (root of ear)	0.272 (cheek)	0.412 (inside mouth)	0.268 (root of ear)	0.282 (root of ear)	0.669 (inside neck)	
		Sphere model	0.100	0.086	0.332 (inside sphere)	0.165	0.149	0.360 (without neck) 0.556 (inside mouth)	

識 [3] を裏付けるものである。また図 5 で明らかなように、ホットスポットでの SAR 値は、球モデルでもリアルモデルでも携帯電話の実使用状態で生ずる、頭部表面でのピーク SAR 値を大きく下回っていることがわかる。

成人、小児、幼児の各頭部モデルにおける 1g 及び 10g 平均局所ピーク SAR を表 2 にまとめて示す。表中の括弧内は局所ピーク SAR の組織部位、網掛け数値はホットスポットでの SAR 値をそれぞれ示す。表から、携帯電話の実使用状態ではリアルモデルにおける局所ピーク SAR は、サイズにかかわらず耳の付け根で生じているのに対し、携帯電話を頭部から 9.75 cm 離れた状態では、頭部サイズとともに SAR のピーク位置が変わり、幼児モデルでの局所ピーク SAR は、900 MHz で口腔内、1.5 GHz では首内部の筋肉組織（首なしモデルでは口腔内）で生じていることがわかる。後者の傾向は平面波曝露の場合と同じである。ただし、900 MHz において携帯電話を頭部から 9.75 cm 離れた状態での幼児モデルにおけるホット

スポットの 1g (10g) ピーク SAR 値は 0.691 W/kg (0.433 W/kg) であるが、携帯電話の実使用状態で頭部表面で生ずる値-1.698 W/kg (1.216 W/kg)-に比べれば約 41% (36%) 以下である。1.5 GHz では携帯電話を頭部から 9.75 cm 離れた状態でのホットスポットの 1g ピーク SAR 値は 0.245 W/kg (首なしモデルでは 0.174 W/kg) であるが、携帯電話の実使用状態で頭部表面で生ずるそれ (1.567 W/kg) に比べれば約 16% (首なしモデルでは 11%) 以下である。10g ピーク SAR についても、1g ピーク SAR の場合と同様に、頭部内部で生ずるホットスポット値 (0.121 W/kg、首なしモデルでは 0.071 W/kg) は、携帯電話の実使用状態で頭部表面に生ずる値 (1.115 W/kg) の約 11% (首なしモデルでは 6%) 以下である。

4. む す び

本論文では、我が国の携帯電話の使用周波数 (900 MHz 及び 1.5 GHz) において携帯電話による頭部内 SAR を、筆者らの製作になる成人、小児、幼児

相当の 3 種類の頭部リアルモデルと、それらの大きさに対応した均質球モデルとに対して計算し、平面波による場合と比較した。その結果、携帯電話の実使用状態ではリアルモデルでも均質球モデルでも局所ピーク SAR 値は表面上で生じ、ホットスポットは形成されないのに対し、携帯電話を 9.75 cm 離れた状態では幼児サイズの両モデルでホットスポットが現れることがわかった。後者の結果は、平面波曝露で幼児サイズのリアルモデルと均質球モデルとに対して、いっそうはつきりとしたホットスポットの形成が確認できた。これらのホットスポットの値は、いずれも携帯電話の実使用状態で頭部表面上に生ずる局所ピーク SAR 値よりも十分低く、これらの値と比較して、例えば幼児サイズの首まで含めたリアルモデルでのホットスポット値は 900 MHz では 1g 平均で 41% 以下、10g 平均では 36% 以下、1.5 GHz では 1g 平均で 16% 以下、10g 平均では 11% 以下、であることがわかった。

なお、携帯電話の実使用状態での局所ピーク SAR はリアルモデルよりも球モデルのほうが大きいのに対し、平面波曝露では逆の結果になっている。この知見は、最悪ケースのドシメトリ評価には近傍界曝露では均質球モデル、遠方界曝露にはリアルモデルを用いることが適切であることを示唆するが、このことの妥当性の検討が今後に残された課題となる。

文 献

- [1] H.N. Kritikos and H.P. Schwan, "Hot spots generated in conducting spheres by electromagnetic waves and biological implications," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.BME-19, no.1, pp.53-58, 1972.
- [2] T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada, and S. Uebayashi, "Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-41, pp.136-140, 1993.
- [3] 郵政省電気通信技術審議会答申：諮問第 89 号，電波利用における人体防護の在り方，April 1997.
- [4] O.P. Gandhi, G. Lazzi, and C.M. Furse, "Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-44, no.10, pp.1884-1896, Oct. 1996.
- [5] O. Fujiwara and A. Kato, "Computation of SAR inside Eyeball for 1.5-GHz Microwave Exposure Using Finite-Difference Time-Domain Technique," IEICE Trans. Commun, vol.E77-B, no.6, pp.732-737, June 1994.
- [6] 山田博是，小児頭部 CT 診断，p.79, 医学書院，1981.
- [7] 谷野正明，王 建青，藤原 修，“成人と幼児の頭部を対象

とした 1.5 GHz マイクロ波による上昇温度の FDTD 計算” 信学論(B-II), vol.J81-B-II, no.12, pp.1136-1144, Dec. 1998.

- [8] Dielectric Database, Microwave Consultants Ltd, 1994.
- [9] A. Taflove, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, MA, 1995.

(平成 11 年 3 月 8 日受付，7 月 12 日再受付)



藤原 修 (正員)

昭 46 名工大・工・電子卒。昭 48 名大大学院修士課程了。同年(株)日立製作所中央研究所入所。昭 51 同所退職。昭 55 名大大学院博士後期課程了。名大工学部助手，講師を経て，昭 60・4 月名大工学部助教授。現在，同電気情報教授。平 3~4 スイス連邦工科大客員教授。放電雑音，生体電磁環境，環境電磁工学に関する研究に従事。工博。電気学会，IEEE 各会員。



王 建青 (正員)

昭 59 北京理工大・電子卒。平 3 東北大大学院博士課程了。東北大・工・助手(株)ソフィアシステムズを経て，現在，名工大・工・助手。環境電磁工学，無線通信に関する研究に従事。工博。



牛本 卓二 (学生員)

平 10 名工大・工・電気情報卒。現在，同大学院博士前期課程在学中。生体電磁環境工学に関する研究に従事。



野島 俊雄 (正員)

昭 47 埼玉大・工・電気卒。昭 49 北大学院修士課程了。同年日本電信電話公社入社。以来，電気通信研究所にて 6 GHz 帯 SSB 等のマイクロ波中継装置の開発，移動通信用無線回路技術，EMC 等の研究に従事。現在，TNT 移動通信網(株)ワイヤレス研究所主席研究員。工博。IEEE 会員。