

携帯電話に対する頭部のドシメトリ解析と安全性評価

藤原 修^{†a)} 城向 剛博[†] 王 建青[†]

Dosimetry Analysis and Safety Evaluation of Realistic Head Models for Portable Telephones

Osamu FUJIWARA^{†a)}, Takahiro JOUKOU[†], and Jianqing WANG[†]

あらまし 携帯電話を対象とした局所吸収指針が 1992 年に米国, 1996, 1997 年に欧州, 我が国においてそれぞれ制定されたが, 公衆に対する指針値は前者では 1g 当り 1.6 W/kg 以下, 後者は 10g 当り 2 W/kg 以下とされ, 局所 SAR の評価法が国際間で異なっている. このような背景から本論文では, 筆者らの製作になる頭部リアルモデルを用いて成人から幼児までのサイズの異なる 5 種類のモデルを新たに構成し, 現用の携帯電話による頭部内の SAR と上昇温度を FDTD 法で解析した. その結果, 頭部内のピーク SAR は, 米国制定の評価法 (1g 平均) では 900 MHz でも 1.5 GHz でも指針値 (1.6 W/kg) を超えるのに対し, 欧州, 我が国制定の評価法 (10g 平均) では 900 MHz で指針値 (2 W/kg) 程度であり, 1.5 GHz ではそれを下回ること, しかしピーク上昇温度はアンテナ側の頭部表面で 0.2°C 以下であることなどがわかった. 一方, 頭部深部にある視床下部での上昇温度は頭部サイズが小さいほど増加するが, その値は成人サイズモデルで 0.003°C 以下, 最小の幼児サイズモデルでも 0.05°C 以下であり, 体温調節行動を誘発するしきい値 (0.3°C) を大きく下回ることから, 現用の携帯電話による局所ピーク SAR が米国指針値を超えても熱ストレスの影響はないものと判断できる.

キーワード 携帯電話, 人体影響, 局所吸収指針, 頭部リアルモデル, ドシメトリ

1. ま え が き

携帯電話の爆発的な普及に伴い, その発する電波の人体影響が公衆の間で懸念されている. 無線周波電波に対しては, 人体防護指針 [1]~[3] が米国や我が国をはじめ世界各国において既に制定されており, これらの指針は, 電波の人体影響が主に生体の深部組織における温度上昇によるものとした動物実験の結果に基づき安全基準を定めている. 例えば, 我が国の防護指針では, 遠方界曝露^{はくろ}に対しては, 比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) の全身平均値が 0.4 W/kg 以下となる電波強度を安全レベルと定めている.

携帯電話等による近傍界曝露に関しては, SAR の全身平均値は世界各国の電波安全基準に比べれば極めて低いが, アンテナ付近の電磁界が意外に強く, 電話機の使用形態によっては耳やアンテナに近い頭部表面

での局所 SAR が著しく増加する可能性が指摘されている [4].

このような背景から, 近年, 携帯電話端末を対象とした局所吸収指針が米国 [5], 欧州 [6]・我が国 [7] において相次いで制定され, しかも米国においては政府レベルの強制規格として連邦通信委員会が SAR 値の明記を製造者側で義務づけるようになった. しかしながら, これらの指針は国際間の整合が必ずしもとれておらず, 例えば一般公衆に対しては, 米国は任意組織 1g 当りの局所 SAR を 1.6 W/kg, 欧州・我が国は 10g 当りのそれを 2 W/kg と定めている. この結果, 同一の携帯電話に対して国によっては局所 SAR の評価値が異なり, 安全性評価に国際的な混乱をまねくおそれが生じている.

こうした状況は, 生理学的影響が未解明の局所 SAR を, 携帯電話端末等の近傍電磁界曝露に対する安全性の評価尺度に採用したことでもたらされたものと筆者らは推察する. すなわち, SAR 指針値の生理学的根拠は, 電波を全身に浴びた場合の深部体温上昇に対応する全身平均 SAR だけであって, 局所 SAR には元来なかったのである. 現用基準の最も厳しい局所 SAR 指

[†] 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
a) E-mail: fujiwara@odin.elcom.nitech.ac.jp

針値は、遠方界曝露に対する局所ピーク SAR 値が全身平均値の 20 倍を超えないとの仮定に基づいて定められているにすぎない。

筆者らは、局所 SAR の指針値は体温調節中枢を含む頭部内の上昇温度との関連において決定すべきと考えている。この観点から、外気温を考慮した不均一な温度分布の熱平衡状態にある頭部を対象として、近傍界 [8] に対しては 900 MHz と 1.5 GHz の携帯電話、遠方界 [9],[10] に対しては安全基準レベルの 1.5 GHz マイクロ波による頭部内上昇温度をそれぞれ計算した。

本論文では、筆者らの製作になる成人から幼児までの 5 種類の頭部リアルモデルを用いて携帯電話による頭部内の局所 SAR と上昇温度とを計算し、両者の定量関係から米国や欧州、我が国制定の局所吸収指針に基づく安全性を考察する。

2. 計算方法

2.1 FDTD 法と計算モデル

900 MHz 及び 1.5 GHz の携帯電話使用時の人体頭部内の SAR は時間領域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method, 以下 FD-TD 法と呼ぶ) で計算する。

人体頭部の計算モデルとしては、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 3 次元頭部リアルモデル [11] を使用した。このモデルは首から下の部位を除けば半径 9.25 cm の球モデルとほぼ同体積である。同モデルのセルサイズは 2.5 mm であるが、これを変えずに頭部サイズのみを縮減しうるアルゴリズムにより、サイズの異なる 4 種類の頭部モデル [10] を新たに製作した。ここでは、成人頭部をタイプ A とし、頭部サイズの大きい順からそれぞれタイプ B,C,D,E とする。なお、縮減した頭部サイズは、首から上の部位がそれぞれ半径 8, 7, 6, 5 cm の球モデルとほぼ同体積である。タイプ A とタイプ E の計算モデルを図 1、各頭部モデルの組織ごとのセル数を表 1 に示す。

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、各組織の電気定数は文献 [12] から引用した。これを表 2 に示す。図 2 には、頭部リアルモデルと携帯電話とそれを握る手を配置した計算領域を示す。なお、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。この領域内のほぼ中央

表 1 頭部モデルの組織ごとの構成セル数

Table 1 The number of cells in each tissue of head models.

	A	B	C	D	E
bone	56,998	40,294	26,969	18,106	10,926
brain	109,506	74,220	46,862	29,730	15,590
muscle	74,135	49,512	29,556	19,399	9,823
eyeball	778	544	344	230	124
fat	2,522	1,524	880	572	214
skin	27,575	21,646	16,525	12,263	8,145
total	271,514	187,740	121,135	80,300	44,822

unit : cell

表 2 頭部組織の電気定数

Table 2 Dielectric properties of tissues.

Tissue Type	Frequency			
	900MHz		1.5GHz	
	ϵ_r	σ [S/m]	ϵ_r	σ [S/m]
Brain	44.1	0.89	42.8	1.08
Bone	17.4	0.19	16.1	0.32
Muscle	51.8	1.11	50.2	1.39
Eyeball	74.3	1.97	73.9	2.21
Fat	10.0	0.17	9.7	0.20
Skin	39.5	0.69	39.1	0.86

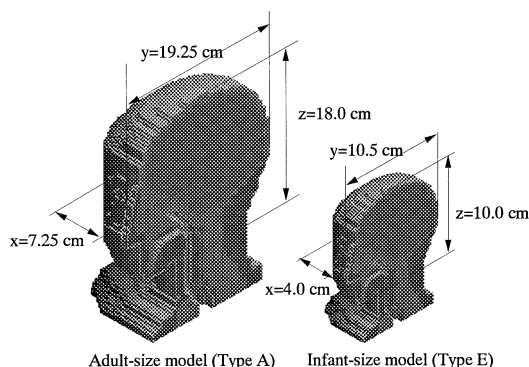


図 1 成人と幼児の頭部モデル

Fig. 1 Realistic head models for adult and infant.

に図 1 に示した頭部リアルモデルを配置した。携帯電話機は、 $12 \text{ cm} \times 4.25 \text{ cm} \times 2.25 \text{ cm}$ 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から構成した^(注 1)。

耳は電話機の実使用状態を考慮し、押しつぶされているものとした。これにより、アンテナとそれに最も近い頭部表面との距離は 2 cm となった。時間ステップ間隔はセルサイズと解の安定条件から 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約 7 周期必要であった。周波数は 900 MHz, 1.5 GHz で、ア

(注 1): 現行の多くの携帯電話機では、 $\lambda/2$ 型のアンテナが装着されているが、同じアンテナ入力電力に対する頭部内の局所ピーク SAR は $\lambda/2$ 型よりも $\lambda/4$ モノポールアンテナのほうが倍近く高くなることが知られている [4] ので、本論文では、より厳しい安全性評価の立場から $\lambda/4$ モノポールアンテナを想定した。

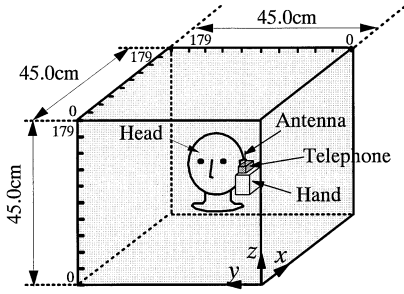


図2 FD-TD 計算領域
Fig.2 FD-TD computation region and model configuration.

表3 頭部組織の熱定数

Table 3 Thermal parameters of head tissues.

Tissue Type	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg \cdot °C]	K [W/m \cdot °C]	b [W/m \cdot °C]
Bone	1810	1300	0.30	1401
Brain	1040	3500	0.60	37822
Muscle	1040	3500	0.60	34888
Eyeball	1010	3900	0.50	0
Fat	920	2300	0.22	816
Skin	1010	3500	0.50	8652
h_a		10.5 [W/m ² ·°C]		
h_b		50 [W/m ² ·°C]		

組織ごとの数値は組織内において一定としているが、熱伝達率 h については、頭部表面の外気に接する部位 (h_a)[15] と主に腔内に接する部位 (h_b)[16] とで区別している。

頭部内上昇温度は、前論文 [10] と同じく、次のように計算した。まず、頭部リアルモデルの全セルに 37°C を与え、SAR=0 とした式 (1) と外気温 (20°C) を与えた式 (2) とから定常状態に達する温度を計算し、携帯電話を使用しない場合の頭部内における初期温度分布を求めた。次に、携帯電話の近傍電磁界にさらされた場合の頭部内の SAR を計算し、これを発熱源とした式 (1) で頭部内の温度を新たに求めるのであるが、本論文では携帯電話を 3,600 秒 (60 分) 間使用した場合の温度 (ほぼ定常温度に等しい) を計算した。最後に、携帯電話の使用前後における温度変化の差を上昇温度として求めた。

アンテナ入力電力はそれぞれ 0.6 W, 0.27 W とした。

2.2 上昇温度の計算

900 MHz 及び 1.5 GHz の携帯電話による頭部内 SAR を発熱源とした熱伝導方程式を FD-TD 法で解析し、頭部内の上昇温度を求めた。熱平衡状態にある頭部に対して時刻 $t = 0$ で始まる連続波が照射されたものとすれば、頭部内温度 T [°C] は、

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + \rho \cdot \text{SAR} - b \cdot (T - T_b) \quad (1)$$

という支配方程式を満たす。ここで、 ρ は組織の密度 [kg/m³], C_p は比熱 [J/kg \cdot °C], K は熱伝導率 [W/m \cdot °C], b は血流に関する定数 (数値が大きいほど血流量が大) [W/m³·°C], T_b は血流の温度 [°C] を表す。また境界条件は、

$$h \cdot (T - T_a) = -K \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

で表される。ただし、 h は熱伝達率 [W/m²·°C], T_a は外気の温度 [°C], $\partial/\partial n$ は頭部または腔内表面の法線方向での微分を表している。

式 (1) で熱発生源の SAR は頭部リアルモデル内の各セルの SAR 値を用いるため、頭部内上昇温度分布は式 (1), (2) を時間と空間について差分化することにより数値的に求めることができる。時間ステップ δ_t と空間差分 δ に関する差分解の安定化条件 [9] は、血流を考慮した場合も差分化された上式の熱伝導方程式に Von Neumann の条件を適用することで導出でき、本論文では $\delta_t = 2.0$ s, $\delta = 2.5$ mm とした。

上昇温度の数値計算に際しての諸量は次のとおりである。頭部内各組織の熱的定数は文献 [13], [14] から引用した。それらの数値を表 3 にまとめて示す。表 3 の

3. 結果と考察

3.1 局所ピーク SAR とピーク上昇温度

表 4 に頭部内の 1 g 及び 10 g 平均ピーク SAR とピーク上昇温度をまとめて示し、それらの頭部サイズ依存性を図 3 に示す。ただし、図では、835 MHz 及び 1.9 GHz の携帯電話による頭部内 SAR を、成人、10 歳児、5 歳児について計算した Gandhi らの結果 (アンテナ入力電力は、835 MHz では 0.6 W, 1.5 GHz では 0.125 W) を併せて示している。なお、Gandhi らの計算は、アンテナ入力電力、周波数、モデルとも筆者らのそれらと厳密には異なるが、参考のために 835 MHz での結果を、筆者らの 900 MHz, 1.9 GHz のそれを 1.5 GHz, また 10 歳児をタイプ C, 5 歳児をタイプ E にそれぞれ対応させた。

図表から、局所 SAR のピーク値はいずれの頭部サイズでも、1 g 平均 (米国評価法) では 900 MHz でも 1.5 GHz でも指針値 (1.6 W/kg) を超えているのに対し、10 g 平均 (欧州、我が国の評価法) では 900 MHz

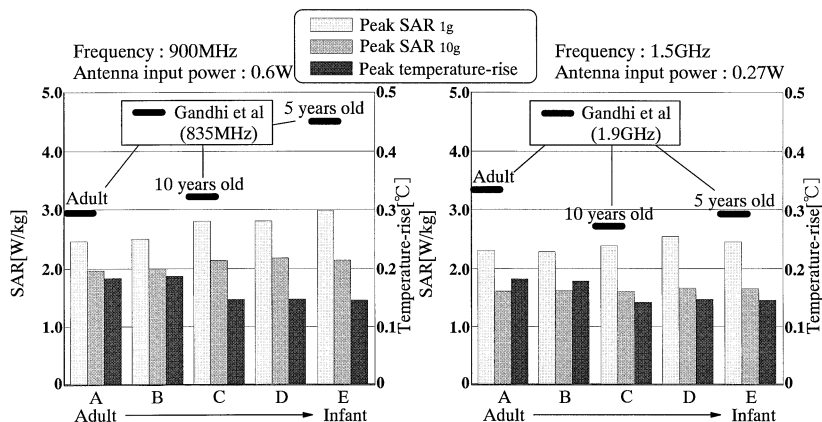


図3 携帯電話によるピーク SAR とピーク上昇温度の頭部サイズ依存性

Fig.3 Dependence on head model size of localized peak SARs and peak temperature-rises by portable telephones.

表4 携帯電話による頭部内のピーク SAR とピーク上昇温度

Table 4 Localized peak SARs and peak temperature rises in the head models for portable telephones.

		A	B	C	D	E
900 MHz	Peak SAR _{1g} [W/kg]	2.46	2.50	2.81	2.80	2.99
	Peak SAR _{10g} [W/kg]	1.96	2.00	2.14	2.17	2.14
	Peak Temperature rise[°C]	0.184	0.186	0.148	0.147	0.145
1.5 GHz	Peak SAR _{1g} [W/kg]	2.31	2.29	2.38	2.53	2.45
	Peak SAR _{10g} [W/kg]	1.59	1.60	1.59	1.65	1.63
	Peak Temperature rise[°C]	0.181	0.177	0.142	0.148	0.146

で指針値 (2 W/kg) 程度であり, 1.5 GHz ではそれを下回っていることがわかる. この結果から, 同じ携帯電話に対しても, 局所 SAR は米国評価法をとれば指針値 (1.6 W/kg) を超え, 欧州, 我が国の評価法をとれば指針値 (2 W/kg) をほぼ満たすことになり, 両者による安全性評価が分かれることになる.

局所ピーク SAR の頭部サイズ依存性については, 1g 平均値は 900 MHz で頭部サイズが小さいほど増加の傾向にあるが, 1.5 GHz では一定の傾向はみられないこと, これらの結果は Gandhi らのそれに比較的類似していること, 10g 平均値は頭部サイズが小さいほどわずかに増加する傾向がみられるものの, サイズの依存性は小さいこと, などがわかる. 一方, ピーク上昇温度はいずれの頭部サイズでも両周波数に対して 0.2°C 以下であり, 頭部サイズ依存性については, 局所ピーク SAR のそれとは逆に, 頭部サイズが小さいほど上昇温度も減少する傾向にあることがわかる. こ

のことは, 局所ピーク SAR が深部体温上昇に基づく安全性評価の整合した尺度でないことを意味する.

なお, 局所ピーク SAR はいずれの頭部サイズや周波数に対してもアンテナ側に近い頭部の皮膚組織で生ずるのに対し, 上昇温度のピークはいずれも骨部で生じており, この相違で局所ピーク SAR とピーク上昇温度の頭部サイズに対する依存性の傾向が異なったものと推察する.

3.2 視床下部の局所 SAR と上昇温度

携帯電話の近傍電磁界曝露に対する安全性の評価尺度として, 局所ピーク SAR でなく体温調節中枢である視床下部の局所 SAR に注目し, これとその場所における上昇温度との関係を調べた. 表5は頭部中央にある視床下部の SAR と上昇温度を示し, それらの頭部サイズ依存性をグラフ化したものを図4に示す. これらの図表から, 局所ピーク SAR は, 900 MHz でも 1.5 GHz でも評価法とは無関係に頭部サイズが小さいほど増加し, 上昇温度の頭部サイズ依存性も同じ傾向であることがわかる. このことは, 頭部中央部での局所 SAR は深部上昇温度に基づく安全性評価の整合した尺度であることを意味する. また, 視床下部での上昇温度は成人サイズモデルで 0.003°C 以下, 最小の幼児サイズでも 0.05°C 以下にあり, 体温調節行動を誘発するしきい値 (0.3°C) [9] を大きく下回ることがわかる. それゆえに, 現用の携帯電話に対しては, 局所ピーク SAR が米国評価法で指針値を超えたとしても, 頭部の表面や深部での上昇温度は, ヒトの基礎代謝で生ずる深部体温変動 1°C に比べて十分に小さく, そ

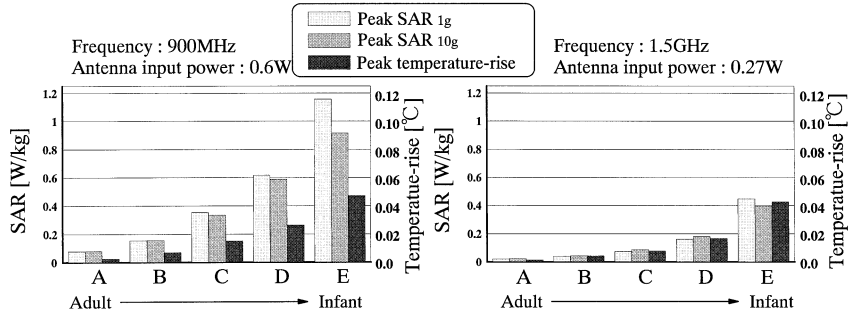


図4 携帯電話による視床下部の SAR と上昇温度の頭部サイズ依存性
 Fig.4 Dependence on head model size of localized SARs and temperature-rises at the hypothalamus by portable telephones.

表5 携帯電話による視床下部の SAR と上昇温度
 Table 5 Localized SARs and temperature rises at the hypothalamus in the head models for portable telephones.

		A	B	C	D	E
900 MHz	SAR _{1g} [W/kg]	0.079	0.155	0.353	0.617	1.157
	SAR _{10g} [W/kg]	0.080	0.156	0.334	0.588	0.916
	Temperature rise [°C]	0.003	0.007	0.015	0.026	0.047
1.5 GHz	SAR _{1g} [W/kg]	0.021	0.040	0.074	0.162	0.448
	SAR _{10g} [W/kg]	0.023	0.045	0.086	0.180	0.397
	Temperature rise [°C]	0.001	0.004	0.008	0.017	0.043

れが引き起こす熱ストレスの影響はないものと結論できる。

4. むすび

電波の人体影響が体温上昇の熱的作用に基づくものとする限り、局所 SAR の人体影響も体温調節中枢を含む頭部内の上昇温度との関連で生ずるものと推察される。本論文では、この立場から 900 MHz 及び 1.5 GHz の現用の携帯電話による頭部内の SAR と上昇温度分布を、成人から幼児までの 5 種類の頭部リアルモデルに対して FD-TD 法で計算した。その結果、ピーク SAR は、米国制定の評価法 (1g 平均) では指針値 (1.6 W/kg) を超えるのに対し、欧州、我が国制定の評価法 (10g 平均) では指針値 (2 W/kg) を下回ること、しかしながら、ピーク上昇温度は 900 MHz でも 1.5 GHz でも頭部表面で 0.2°C 以下であること、などがわかった。一方、視床下部での上昇温度は頭部サイズが小さいほど増加するが、その値は成人サイズモデルで 0.003°C 以下、幼児サイズモデルでは 0.05°C 以下であり、体温調節行動のしきい値 (0.3°C) を大き

く下回ることがわかった。このことから、現用の携帯電話による局所ピーク SAR が米国指針値を超えたとしても熱的ストレスを受けることはないものと判断できる。

ヘリカルアンテナなどの種類のアンテナに対する頭部ドシメトリの詳細解析と安全性評価が今後の課題となる。

文 献

- [1] Om P.Gandhi, ed., Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy, Prentice Hall, Englewood Clifts, New Jersey, 1990.
- [2] American National Standards Institute, American National Standard Safty Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, ANSI C95.1-1990.
- [3] 郵政省電気通信技術審議会答申、電波利用における人体防護指針、諮問第 38 号, 1990.
- [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., vol.MTT-44, no.10, pp.1884-1897 Oct. 1996.
- [5] ANSI/IEEE C95.1-1992, American national standard - Safety levels with respect to exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE, New York, 1992.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP statement - Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters," Health Physics, vol.70, no.4, pp.587-593, April 1996.
- [7] 郵政省電気通信技術審議会答申、電波利用における人体防護の在り方、諮問第 89 号 1997.
- [8] J. Wang and O. Fujiwara, "FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-47, no.8, pp.1528-1534, Aug. 1999.

- [9] 藤原 修, 谷野正明, 王 建青, “1.5 GHz マイクロ波による頭部内上昇温度の FDTD 計算,” 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.3, pp.240-247, March 1998.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Microwave Consultants, Dielectric Database, Microwave Consultants Ltd., London, 1994.
- [13] A.W. Guy, J.F. Lehmann, and J.B. Stonebridge, “Therapeutic applications of electromagnetic power,” Proc. IEEE, vol.62, no.1, pp.55-75, Jan. 1974.
- [14] 晴山典彦, 藤井麻美子, 酒本勝之, 金井 寛, “電磁誘導ハイパーサーミアによる頭部加温の基礎検討,” 医用電子と生体工学, vol.34, no.3, pp.230-237, 1996.
- [15] H.N. Kritikos, K.R. Foster, and H.P. Schwan, “Temperature profiles in spheres due to electromagnetic heating,” J. Microwave Power, vol.16, no.3 & 4, pp.327-344, 1981.
- [16] A. Taflov and M.E. Brodwin, “Computation of the Electromagnetic Fields and Induced Temperatures Within a Model of the Microwave-Irradiated Human Eye,” IEEE Trans., vol.MTT-23, no.11, pp.888-896, Nov. 1975.

(平成 11 年 8 月 3 日受付, 12 月 13 日再受付)



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, 平 9 名工大・工・助手, 現在, 同講師。環境電磁工学, 無線通信に関する研究に従事。工博。



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 名工大工学部助教授, 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。



城向 剛博

平 9 名工大・工・電気情報卒。平 11 同大大学院博士前期課程了。現在, トヨタ自動車 (株) 勤務。在学中, 生体電磁環境工学に関する研究に従事。