

2 GHz 帯携帯電話機による頭部内局所電磁吸収量の使用位置依存性

王 建青^{†a)} 藤原 修[†] 野島 俊雄^{††}

Dependence on Use Position of Localized Electromagnetic Absorption in Human Head for 2 GHz Portable Telephones

Jianqing WANG^{†a)}, Osamu FUJIWARA[†], and Toshio NOJIMA^{††}

あらまし 人体側頭部の側で使用する携帯電話端末等のドシメトリ評価に際しては、電話機の頭部ファントムに対する位置条件として「^{ほお}頬の位置」と「傾斜の位置」とが規定されている。しかしながら、それらの位置は、必ずしも頭部への最大局所吸収量を考慮したわけではない。本論文では、2 GHz 帯携帯電話機を対象として、種々の使用位置に対する頭部内局所ピーク SAR を、筆者らの開発になる頭部数値モデルを用いて FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法で解析した。その結果、1 g 及び 10 g 平均局所ピーク SAR は、携帯電話機を垂直に配置した使用位置付近で最大となり、使用位置により SAR 値は倍以上にも異なること、規定位置に対しては「傾斜の位置」での局所ピーク SAR は「頬の位置」でのそれより高く、垂直配置でのそれに近いレベルに達すること、などがわかった。また、脳内に生ずる 1 g 平均局所ピーク SAR は「傾斜の位置」で最大になり、ダイポール型とモノポール型の携帯電話機では同じレベルになることもわかった。これらの計算知見の妥当性については、ファントム実験と均質頭部モデルに対する FDTD 解析との結果が同じ傾向を示すことを確認することで検証できた。

キーワード 携帯電話、電磁吸収、SAR、使用位置、FDTD 解析、ファントム実験。

1. ま え が き

第 3 世代移動通信方式として登場した IMT (International Mobile Telecommunication)-2000 は、2001 年にサービスが開始される予定にあり、携帯電話の普及にいつその拍車をかけている。その一方、携帯電話は人体頭部近傍で使用されるため、頻繁な使用に伴う電波曝露で電磁界に対する人体影響の懸念が公衆の間には根強く残っている。こうした背景から、携帯電話の人体頭部を対象とした局所吸収に関し、米国では FCC (連邦通信委員会) [1] が強制規格としての安全基準を既に施行しており、日本の総務省 [2] も今世紀に入って指針から法的規制に乗り出すことが既に決まっている。これを受けて、局所ピーク SAR (Specific Absorption Rate; 比吸収率: 単位質量当りの吸収電力) の測定法の策定が活発に進められ、携

電話機の標準的な使用位置に対する条件 (^{きょう} 筐体の耳に対する位置や傾き角度など) が細かく規定される運びとなった。例えば、CENELEC (欧州電気標準委員会) が 1997 年に公表した測定法 [3] によれば、携帯電話機は「両耳道の中心線と口元とを含む平面内で頬にタッチする、あるいは長手方向に対して両耳道中心線から 80°, 90°, 100° 傾ける」位置を標準位置として規定している。最近になって、日本の総務省においても電気通信技術審議会答申 [2] に沿った測定法が採用され、米国においては IEEE (電気電子学会) が策定した測定法のドラフト [4] が承認される方向にあると聞く。これらの測定法では、携帯電話機の標準使用位置として、利用者の統計データに基づく「頬の位置」と頭部への局所 SAR の増大を想定した「傾斜の位置」が決められている。しかしながら、前述の使用位置は、頭部への最大局所吸収量を考慮したわけではない。携帯電話機の使用位置は人によって様々であり、SAR と使用位置との定量関係については必ずしも解明されておらず、不明の部分が多い。

携帯電話機による人体頭部内の SAR は、直接には実

[†] 名古屋工業大学電気情報工学科, 名古屋市

Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††} 北海道大学大学院工学研究科, 札幌市

Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-8628 Japan

a) E-mail: wang@elcom.nitech.ac.jp

測できないため、その値は、頭部数値モデルを用いた計算機シミュレーションか人体組織を模擬したファントムでの測定しか知るすべはない。前者は、人体頭部の磁気共鳴像 (MRI: Magnetic Resonance Image) データから頭部の数値モデルを構築し、組織部位に対応した電気定数を与えることで FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法による SAR の数値解析が一般に行われている [5]。後者については、頭部形状を忠実に再現しながら、脳などの 1 種類の組織で頭部全体を模擬する液体ファントムが一般に使用され、それを用いた測定系 [6] が既に市販されている。

本論文では、IMT-2000 で利用される 2 GHz 帯携帯電話機を対象として、FDTD 数値シミュレーションと上述したファントム実験の両側面から、携帯電話機の種々の使用位置に対する人体頭部の局所ピーク SAR を検討し、その使用位置依存性を明らかにする。

2. 計 算

2.1 FDTD モデルと計算法

図 1 は頭部数値モデルの垂直及び水平断面図を示す。この頭部数値モデル [5] は、23 歳の日本人男性の頭部 MRI データに基づいて製作されたものであり、皮膚、脂肪、筋肉、骨、軟骨、骨髄液、硬膜、脳髄液、灰白質、白質、硝子体、レンズ、角膜、鞏膜、耳下線、血管、粘膜の 17 種類の組織、1 辺 2 mm の立方体セル約 53 万個から構成されている。なお、SAR 計算に際し、

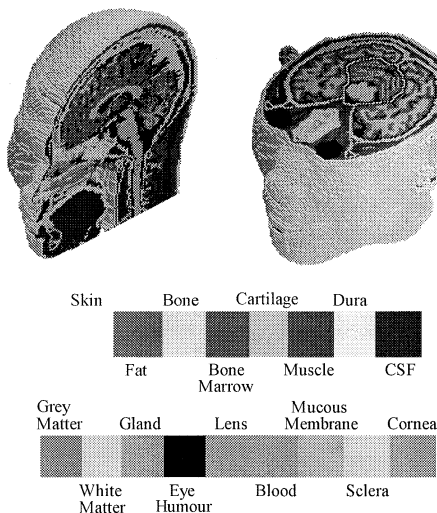


図 1 頭部 MRI 数値モデル
Fig. 1 MRI-based head model.

各組織の電気定数は Gabriel のデータを用いた [7]。

図 2 は携帯電話機のモデルを示す。携帯電話機は、厚さ 2 mm の誘電体 (比誘電率 2) で覆われた $4 \times 2 \times 12$ cm の金属筐体とその上方に設置された半波長ダイポールまたは $1/4$ 波長モノポールの 2 種類を対象とした。なお、携帯電話機のアンテナは、一般に底部で給電されるモノポール型であるが、アンテナ長を半波長にするときには電流が筐体にあまり流れず、半波長ダイポール型と類似した電流分布を有する [8]。このために、文献 [9] にならって半波長モノポールアンテナの代わりに中心部で給電を行う半波長ダイポールを模擬した。このときアンテナ底部と筐体との間には 1 セルの空間を空けた。また、携帯電話機の使用位置は、IEEE や日本で規定している「頬の位置」と「傾斜の位置」を想定した。それらの位置を図 3 に示す。なお、頭部ファントムに対する「頬の位置」は、次の

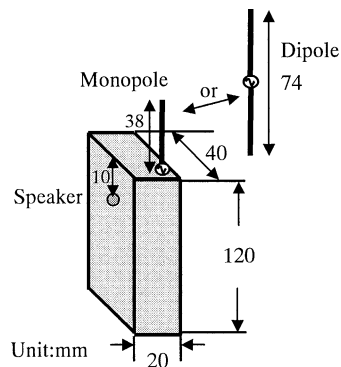


図 2 携帯電話機モデル
Fig. 2 Portable telephone model.

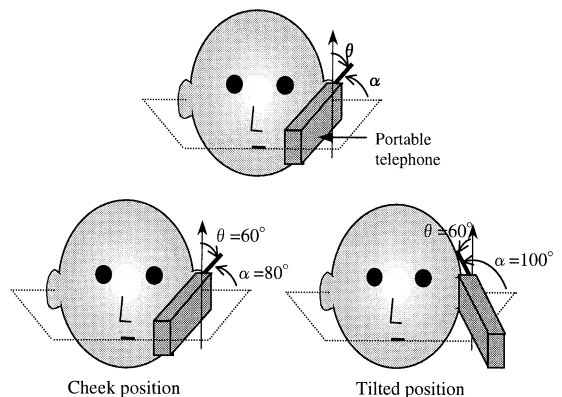


図 3 携帯電話機使用位置の定義
Fig. 3 Use position of portable telephone.

ように規定されている [2], [4], [10] .

- 受話口の中央を耳道の中心線上に合わせる .
- 携帯電話機の受話口は、その表面を耳 (無損失性突出物) に接触する .
- 送話口の中央または長手方向の電話機中心線は、両耳 (耳道) の中心を通る直線と閉じた口を平行に横切る直線とを含む平面内に位置するよう調整する .
- 携帯電話機本体は頬に平行に固定する .

上述の「頬の位置」は、IEEE の測定用標準頭部ファントムに対して、携帯電話機を両耳道の中心線からおおむね 85° 傾けることに相当する . 一方、「傾斜の位置」とは、「頬の位置」から携帯電話機を外側へ 15° 傾けた位置として標準測定法で定義されており、これは IEEE の標準頭部ファントムに対して、携帯電話機を両耳道の中心線からおおむね 100° 傾けることに相当する .

さて、FDTD 解析に際しては、「頬の位置」を次のように実現した . 図 2 に示すように、携帯電話機の筐体上辺から 1 cm 下の中央部に受話口があるものとして、そこを耳道の中心に合わせ、電話機は垂直に保ったまま頭部モデルを前方に 60° 回転させ、更に口元が電話機に向くように 10° 右回りに回転させた . この結果、携帯電話機は両耳道の中心線から 80° 傾けたことになる . また、「傾斜の位置」に対する FDTD 解析に際しては、携帯電話機は垂直に保ったまま頭部モデルを前方に 60° 回転させた後、口元が電話機の逆方向に向くように 10° 左回りに回転させた . それゆえに、この「傾斜の位置」は両耳道の中心線から 100° 傾けたことになるが、「頬の位置」から携帯電話機を外側へ 15° 傾けるといった定義とは厳密には異なる (両者の角度の差はわずか 5° である) .

上述した使用位置以外にも、携帯電話機を頭部に対して垂直 ($\theta = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$) に配置する位置を基準として、それから後方に $\theta = 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ (水平配置) 傾けるといった 7 種類の使用位置を想定し、これらの角度に対応させて頭部を前方に回転させた頭部モデルも作成した .

これら合計 9 種類の携帯電話機の使用位置に対して、FDTD 法で頭部内の 1 g 及び 10 g 平均局所ピーク SAR を計算した . なお、携帯電話機のアンテナは半径を 0.5 mm とし、その模擬にはサブセル法を適用した . また、吸収境界条件には 12 層の PML (Perfectly Matched Layer) を用いた . 1 g 及び 10 g 平均局所ピーク SAR はそれぞれ $1 \times 1 \times 1\text{ cm}^3$ の立方体及び

$2.2 \times 2.2 \times 2.2\text{ cm}^3$ の立方体領域内に含まれる頭部組織の平均 SAR の最大値から求めた . このとき、各立方体においては組織セルの占有率が 90% 以上となるようにした .

2.2 結果と考察

図 4 は、半波長ダイポール型携帯電話機による規定位置での頭部表面 SAR 分布の解析結果を示す . 図から、「頬の位置」では筐体付近の頬部位で高い電磁吸

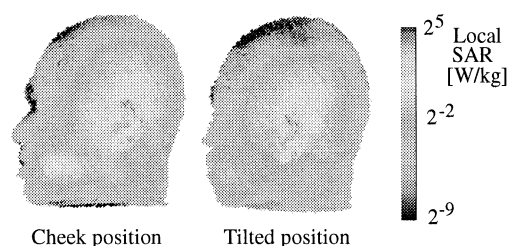


図 4 ダイポール型携帯電話機による頭部表面 SAR 分布 (アンテナ出力: 1 W)

Fig. 4 Head surface SAR distributions for a portable telephone with a dipole antenna (antenna output: 1 W).

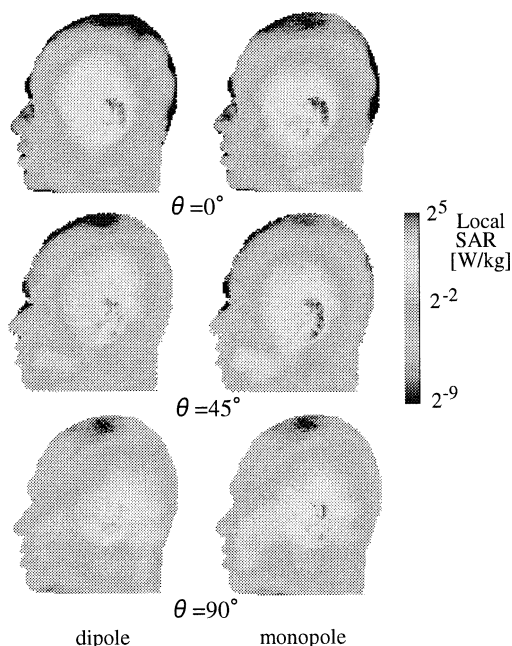


図 5 携帯電話機を後方に傾けたときの頭部表面 SAR 分布 ($\alpha = 90^\circ$, アンテナ出力: 1 W)

Fig. 5 Head surface SAR distributions for a back-tilted portable telephone ($\alpha = 90^\circ$, antenna output: 1 W).

収が生じていること、「傾斜の位置」では逆に電磁吸収量の強い領域が耳の上方に広がっていること、などがわかる。図5は、両耳道の中心線と垂直($\alpha = 90^\circ$)に配置して電話機を後方に $\theta = 0, 45, 90^\circ$ 傾けた使用位置に対する SAR 分布を示す。図から、いずれの携帯電話機も耳付近で電磁吸収量が最大となり、電話機を後方に傾けていくに従い電磁吸収の強い領域が後頭部のほうへ広がっていく様子がわかる。図6は、局所ピーク SAR の携帯電話機使用位置に対する依存性を示す。図から、ダイポール型携帯電話機では、局所ピーク SAR は、 $\theta = 0^\circ$ から角度が大きくなるにつれ徐々に増加し、 15° でピークに達した後、いったん減少し、 75° を過ぎると再び上昇する傾向がみられ、結果として使用位置によって値が倍近くも変化していることがわかる。「頬の位置」での局所ピーク SAR は、 $\alpha = 90^\circ$ のままで電話機を後方に $\theta = 60^\circ$ 傾けたときに比べて小さくなるが、「傾斜の位置」では逆に著しく増加することがわかった。この理由は次のように考

える。「頬の位置」に対しては携帯電話機を口元のほうに傾けるのでアンテナが頭部から遠ざかり、「傾斜の位置」ではアンテナが頭部へ逆に近づく。したがって、局所ピーク SAR は前者で減少するのに対して、後者では増加するのである。一方、 $1/4$ 波長モノポール型携帯電話機においても、局所ピーク SAR は半波長ダイポールとほぼ同じ傾向がみられたが、それらの値はどの使用位置においてもダイポールの場合よりも大きい。これは、モノポール型アンテナはダイポール型よりも多くの電流を筐体へ流すこと、その給電点がダイポール型(耳上方 3.5 cm 離れた位置)よりも耳の近傍に位置し、頭部表面との距離が近いこと、などの理由によるものと考えられる。

なお、今回対象とした9種類の使用位置において、ダイポール型携帯電話機の場合には、電話機本体が両耳道の中心線に対して垂直($\alpha = 90^\circ$)で、後方に $\theta = 15^\circ$ 傾いているとき局所ピーク SAR が最大となり、「頬の位置」に比べて 1 g 平均局所ピーク SAR は 2.0 倍、10 g 平均局所ピーク SAR は 1.4 倍高くなった。一方、

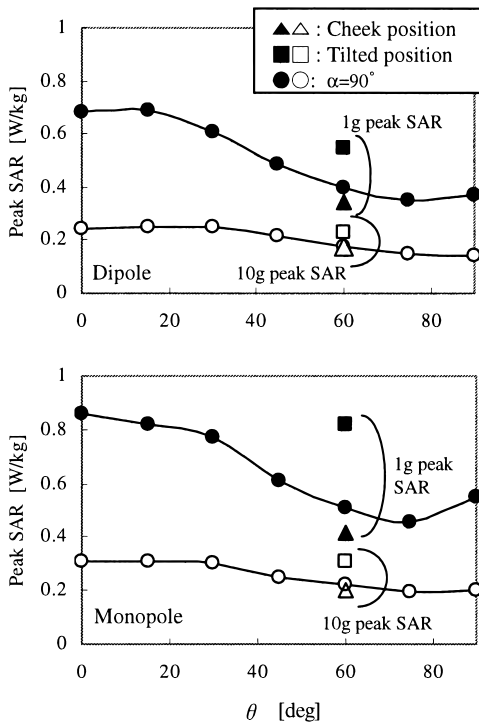


図6 局所ピーク SAR の携帯電話機使用位置依存性 (アンテナ出力: 125 mW)

Fig. 6 Dependence of peak SAR on use position (antenna output: 125 mW).

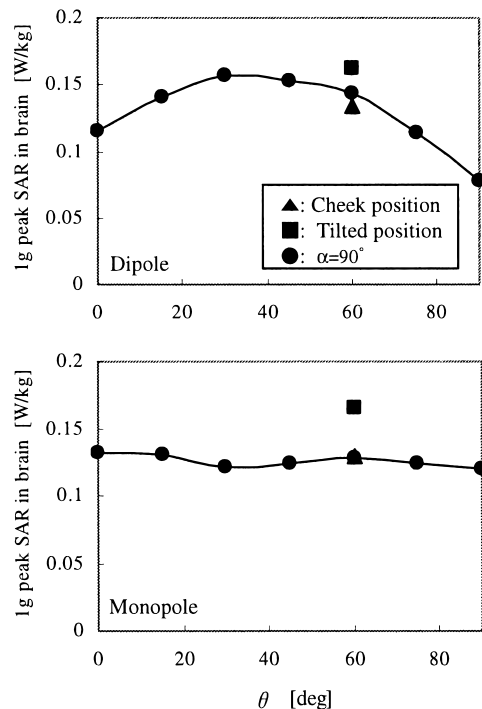


図7 脳内 1 g 平均局所ピーク SAR の携帯電話機使用位置依存性 (アンテナ出力: 125 mW)

Fig. 7 Dependence on use position of one-gram averaged peak SAR in the brain.

モノポール型携帯電話機の場合には、電話機本体が頭部に対して垂直 ($\theta = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$) のとき局所ピーク SAR が最大となり、「頬の位置」に比べて 1 g 平均局所ピーク SAR は 2.1 倍, 10 g 平均局所ピーク SAR は 1.5 倍高くなった。

図 7 は携帯電話機で脳内に生ずる 1 g 平均局所ピーク SAR の使用位置依存性を示す。ダイポール型携帯電話機では、アンテナの給電点、すなわち最大電流の位置が耳上方に位置するため、使用位置により脳との距離が大きく変化し、その使用位置依存性も顕著である。図から、携帯電話機を 30° 程度傾けたときに脳内の 1 g 平均局所ピーク SAR は最大になり、水平配置に近づけていくと急激に減少していることがわかる。一方、モノポール型携帯電話機では、アンテナ最大電流が耳道付近に位置するため、脳内ピーク SAR は照射位置への依存性が小さいが、傾斜の位置ではアンテナが頭部へ近づく結果、ダイポール型と同レベルとなる。

図 8 はアンテナ入力インピーダンスの使用位置依存

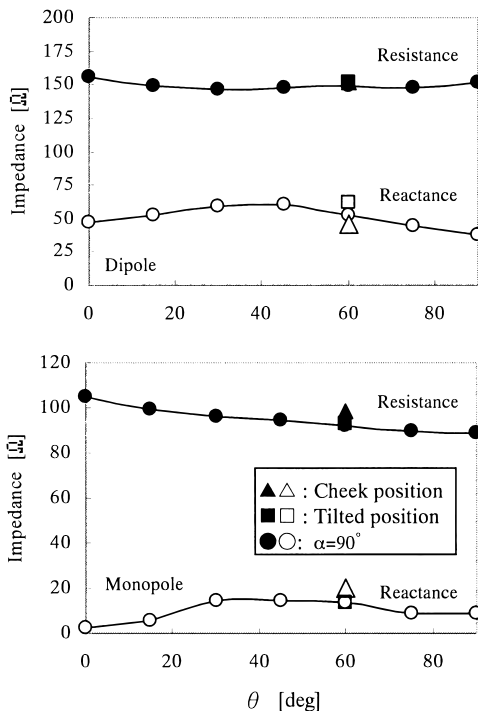


図 8 アンテナ入力インピーダンスの携帯電話機使用位置依存性

Fig. 8 Dependence of antenna input impedance on use position.

性を示す。図から、入力インピーダンスの変動幅は実部が 15Ω , 虚部が 20Ω 以下であること、また、図 6 と対照してみると、入力インピーダンスの使用位置依存性と局所ピーク SAR の使用位置依存性との間の相関は低いこと、などがわかる。

3. 検証実験

3.1 SAR 測定系

検証実験は Schmid & Partner 社の SAR 測定システム (DASY System V3.1C) を用いて行った。この測定系を図 9 に示す。使用ファントム (Generic Twin Phantom) は強化プラスチックの容器に脳組織を模擬した液体を入れたものであり、その電気定数には測定値 (比誘電率の測定値: 42.2; 導電率の測定値: 1.88 S/m) が用いられる。このファントムは欧米人の頭部形状の統計データに基づいており、耳の部分が厚さ 2 mm の無損失性突出物で模擬され、ファントム上面が測定用に開放されている。測定用口ポットに 3 軸等方性微小ダイポールの電界プローブ (ET3DV5) を取り付け、液体内部を最小 5 mm の間隔で走査して各点の電界強度を測定し、これから SAR を算定した。

携帯電話機としては、IMT-2000 の実機の代わりに 1.92 GHz の標準ダイポールアンテナを使用した。このアンテナは半径が 3 mm で長さが 7 cm であった。ダイポールアンテナの携帯電話機への装着状況を想定し、各使用位置においてはアンテナ下端から更に 1 cm の位置 (電話機受話口の仮想位置) を耳道の中心に、またアンテナ-ファントム間の距離が 1.5 cm となるようにそれぞれ設定した。

3.2 結果と考察

図 10 は、1.92 GHz の標準ダイポールの使用位置に対する局所ピーク SAR 依存性のファントム実験結果を

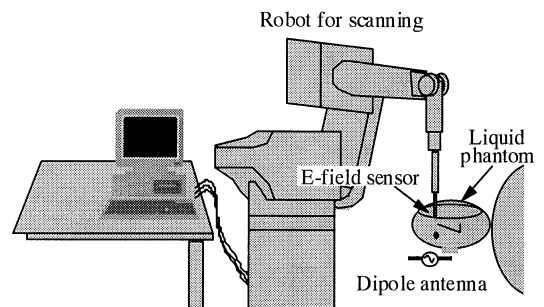


図 9 液体ファントムを利用した SAR 測定系

Fig. 9 SAR measuring system with a liquid phantom.

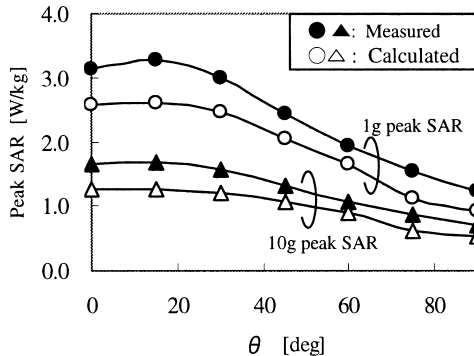


図10 均質頭部モデルを用いた局所ピーク SAR の半波長ダイポールアンテナ使用位置依存性 (アンテナ出力: 125 mW)

Fig. 10 Dependence on use position of the peak SAR for a standard dipole antenna and homogeneous head models (antenna output: 125 mW).

示す．図から，局所ピーク SAR は，傾き角度 $\theta = 15^\circ$ 付近でピークに達した後に減少し， θ によって値が倍近くも変化していることがわかる．これらの傾向は，図6のダイポール型携帯電話機と MRI 頭部数値モデルを用いた解析結果とよく一致している．ただし，図10と図6とではアンテナ出力電力が同じであるにもかかわらず，標準ダイポールでの局所ピーク SAR の実測値は実機モデルでの解析値より大きい．この理由は，ファントムには耳が存在せず，その結果としてアンテナが頭部表面へ著しく接近したためであると考ええる．

なお，図10にはダイポールアンテナ照射による局所ピーク SAR の FDTD 解析結果も示している．ファントム実験との比較を可能にするために，MRI 頭部モデルの耳を取り除き，外耳道を生体組織で埋め込んだ液体ファントムと同一の電気特性を有する均質の頭部モデルを用いた．この均質モデルは，日本人の頭部形状を有しており，欧米人の頭部に基づき製作された液体ファントムのサイズ・形状とはむしろ異なっている．また，ダイポールアンテナは，実寸法をもとに太さ 6 mm，長さ 70 mm の完全導体で模擬し，アンテナ中間点において，上下導体間に様な電界を与える一様給電で励振し，アンテナ給電部電流はそこにアンペアの法則を適用して周回磁界から求めた．図から，局所ピーク SAR の計算結果は，実測値よりも2割近く低くなっているものの，使用位置に対する依存性はほぼ同じ傾向を示していることが確認できる．なお，

局所ピーク SAR の計算値が液体ファントムの実測結果よりも低くなる傾向は，計算と実験とで使用した頭部モデルのサイズと形状とがともに異なっていることによるものと考えられる．

4. む す び

携帯電話の実使用状態で頭部に生ずる局所ピーク SAR の提示が義務付けられる．その認証試験に際しては電話機の頭部ファントムに対する位置条件として，「頬の位置」と「傾斜の位置」の2種類が IEEE 策定の測定標準で規定されており，日本でも採用されている．しかしながら，これらの規定位置の根拠ではない．本論文では，2 GHz 帯携帯電話機を対象として，種々の使用位置に対する頭部内局所ピーク SAR を FDTD 法で解析し，1g 平均局所ピーク SAR は，携帯電話機が垂直配置付近の使用位置で最大となり，使用位置による変動は最大で倍以上もあること，10g 平均局所ピーク SAR の使用位置依存性は，1g 平均局所ピーク SAR とほぼ同じ傾向であり，使用位置による変動は最大で1.5倍であること，などがわかった．規定位置に対しては「傾斜の位置」での局所ピーク SAR は「頬の位置」でのそれより高く，垂直配置でのそれに近いレベルに達することがわかった．また，これらの計算結果は，ファントム実験と同じ傾向を示すことを確認することで検証できた．これらのことから，今回検討した線状アンテナに関しては，現在の標準測定法で定義されている「傾斜の位置」がほぼ最大局所吸収量を反映するものといえる．

今後の課題は，頭部のサイズや形状に対する局所ピーク SAR の依存性を明らかにすることである．

謝辞 本論文の FDTD 計算に際しては本学卒研究生の越 正史君の協力を得た．同君に感謝する．

文 献

- [1] Federal Communications Commission: "Report and Order: Guidelines for evaluating the environmental effects of radiofrequency radiation," FCC 96-326, Washington DC, 1996.
- [2] 電気通信技術審議会答申，諮問第118号「携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法」のうち「人体側頭部の側で使用する携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法」，2000.
- [3] European Standard, "Considerations for evaluation of human exposure to electromagnetic fields (EMFs) from mobile telecommunication equipment (MTE) in the frequency range 30 MHz-6 GHz," CENELEC, Final draft, Dec. 1997.
- [4] IEEE Std 1528-200X, DRAFT Recommended

practice for determining the spatial-peak specific absorption rate (SAR) in the human body due to wireless communications devices: Experimental techniques, 2000.

- [5] 王 建青, 藤原 修, “携帯電話に対する頭部のドシメトリ評価,” 信学論 (B), vol. J84-B, no.1, pp.1-10, Jan. 2001.
- [6] T. Schmid, O. Egger, and N. Kuster, “Automated E-field scanning system for dosimetric assessments,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.44, pp.105-113, Jan. 1996.
- [7] C. Gabriel, “Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies,” Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037, 1996.
- [8] 斎藤忠夫, 立川敬二 編, 新版移動通信ハンドブック, pp.174-175, オーム社, 2000.
- [9] S. Watanabe, M. Taki, T. Nojima, and O. Fujiwara, “Characteristics of the SAR distributions in a head exposed to electromagnetic fields radiated by a hand-held portable radio,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.44, no.10, pp.1874-1883, Oct. 1996.
- [10] ARIB Standard, “Specific absorption rate (SAR) estimation for cellular phone,” ARIB STD-T56, ver. 1.0, Jan. 1998.

(平成13年7月31日受付, 11月7日再受付)



野島 俊雄 (正員)

昭47埼玉大・工・電気卒。昭49北大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現, NTT)入社。以来, 電気通信研究所, NTTドコモ電波環境特別研究室にて, マイクロ波固定通信・移動通信システム, 無線装置の研究実用化, EMC技術等の研究に従事。平14より北大大学院工学研究科教授。工博。平8年度本会論文賞受賞。IEEE, 電気学会各会員。



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, 平9名工大・工・助手, 現在, 同電気情報・助教授。環境電磁工学, 無線通信工学に関する研究に従事。工博。平12年度本会論文賞受賞。



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。平12年度本会論文賞受賞。電気学会, IEEE各会員。