

論文

固体ファントムを用いた電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置

井山 隆弘[†] 垂澤 芳明[†] 上林 真司[†] 野島 俊雄^{†*}
藤原 修^{††}

Local SAR Estimation System Using Solid Phantom and Fixed E-field Probe

Takahiro IYAMA[†], Yoshiaki TARUSAWA[†], Shinji UEBAYASHI[†], Toshio NOJIMA^{†*},
and Osamu FUJIWARA^{††}

あらまし 携帯電話機等のハンディ型無線機に適用するため、固体ファントムを用いた電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置を提案している。本装置は、損失性誘電体で形成する固体ファントムと、その中に埋め込んだ電界プローブで構成され、液体ファントムを用いた従来法による測定値と比較して $\pm 30\%$ 程度の測定偏差で局所 SAR を容易かつ短時間に測定できる利点をもつ。まず、基本パラメータ設計について FDTD 法を用いた数値解析を行い、固体ファントムの電界プローブ挿入穴の大きさと複素誘電率が、アンテナ入力インピーダンスと局所 SAR に与える影響を明らかにしている。次に、固体ファントムを用いた電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置を開発して、複素誘電率の異なる 2 種類の固体ファントムを対象としたアンテナ入力インピーダンスと局所 SAR の測定評価を行い、これらの傾向が計算結果とほぼ一致することを確認している。最後に、本装置によって携帯電話実機 32 種の局所 SAR 測定を行い、電界プローブ走査法による測定値と比較して約 77% の機種における測定結果が偏差 30% 以内となり、ほぼ開発目標の測定精度が達成できることを確認している。

キーワード 局所 SAR, 固体ファントム, アンテナ入力インピーダンス, FDTD 法

1. ま え が き

人体の近傍で使用される無線機に対して、生体防護を背景として局所 SAR (Specific Absorption Rate) を評価指標とした規制が世界各国で取り入れられつつある。特に、頭部における局所 SAR の規制値は、日本及び欧州では任意の組織 10 g 当りの平均値で 2.0 W/kg, 米国では任意の組織 1 g 当りの平均値で 1.6 W/kg に定められている[1]~[4]。

従来、無線機による SAR の測定には、サーモグラフィ法[5]、電界プローブ走査法[6]などの測定法が用いられている。サーモグラフィ法は、人体の電気的特性を模擬した損失性誘電体に大電力を照射し、その内部断面的温度上昇分布をサーモカメラなどで取得して SAR 分布を算出する方法である。この測定法は、SAR 分布を容易に取得できる利点があるが、最大出力が 1 W 以下である実際の携帯電話機に対しては、測定可能な温

度上昇が得られないことから適用できない。一方、電界プローブ走査法は、人体の電気的特性を模擬した液剤を充填した人体モデル内で電界プローブを走査させて電界強度分布を測定し、SAR 分布を算出する方法である。実携帯電話機による SAR 分布を高精度かつ再現性良く測定できることから、この測定法が実質的な世界標準となりつつあり、我が国をはじめ[7]、欧州[8]、米国[9]、IEC (International Electrotechnical Commission) [10] での標準化が進んでいる。しかしこの測定法は、局所 SAR の定義に忠実な反面、空間走査に時間を要する、液剤を取り扱う等のため、簡便な測定の要求には必ずしも適さない。

そこで筆者らは、人体の電気的特性を模擬した均質の損失性誘電体 (固体ファントム) の内部に電界プローブを固定した簡便な局所 SAR 測定法を提案し[11]、[12]、測定装置を開発した[13]。本測定法は、1 次標準としての他の測定法による測定結果と比較することによって局所 SAR の最大値を求める相対測定法であり、簡便化による測定精度劣化を相対測定により校正し、実用的な精度の測定を実現するものである。本測定装置は、 $\pm 30\%$ 程度の偏差を認めたくなくて短時間に局所

[†] 株式会社 NTT ドコモ, 横須賀市
NTT DoCoMo, Inc., Yokosuka-shi, 239-8536 Japan

^{††} 名古屋工業大学工学部, 名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555, Japan

* 現在, 北海道大学大学院工学研究科

SARの最大値評価を行うことが可能であり、システム構成も単純でかつ経時変化がない特長を有する。例えば、開発段階における携帯電話機のSAR規格適合性チェック等に使用可能である。

2. 基本構成と原理

2.1 基本構成

本測定装置の基本構成を図1に示す。疑似頭部は、損失性誘電体で形成する固体ファントムであり、ポリフッ化ビニリデン、カーボン粉末、BaTiO₃セラミック粉末及び接着剤を材料とする。UHF帯において、高含水組織（筋肉、脳など）とほぼ同等の複素誘電率を実現できることがわかっている[14]。ただし、疑似頭部は必ずしも固体ファントムによって構成されなくともよく、例えば、人体の電気的特性を模擬した液剤を頭部形状の容器に充填することによって実現することも可能である。固体ファントムには電界プローブを挿入するための穴が必要であり、その位置は耳の付け根付近とする。また、電界プローブの挿入する向きを変えることによって、頭部左側、頭部右側の局所SAR測定が可能である。ところで、局所SAR測定は一般にアンテナ近傍界の測定となる。したがって偏波面は存在せず、電界プローブのヘッド部は3軸等方性であることが要求される。電界プローブには検出器、モニタ、制御用コンピュータが接続され、コンピュータは検出された電界強度の保存と2.2の計算を行う。

本測定法では、電界プローブは走査せず固定しており、携帯電話機を動かすことにより、ファントム、プローブと携帯電話機の相対位置関係を変化させ、まず、プローブ位置のSARの最大値を求める。次に、半波長ダイポールアンテナで求めた校正係数により、最大局所SAR値を導出する。以下に、校正係数の求め方、及び実際の携帯電話機の測定法について説明する。

2.2 校正方法

均質媒体中の点 (x, y, z) での電界強度測定に基づく

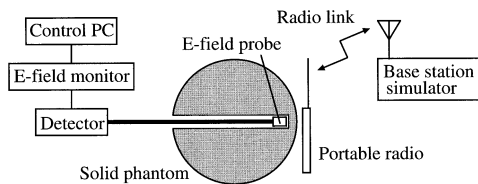


図1 固体ファントムを用いた電界プローブ固定型局所SAR測定装置の基本構成

Fig. 1 Fundamental configuration of the local SAR estimation system using a solid phantom and a fixed E-field probe.

SAR (x, y, z) は次式で定義される。

$$SAR(x, y, z) = \sigma E^2(x, y, z) / \rho \quad [\text{W/kg}]$$

ただし、 σ : 導電率 [S/m], ρ : 密度 [kg/m³], E : 電界強度実効値 [V/m]. 局所SARは、1gまたは10g当りの平均値として与えられるため、電界強度分布の測定が本来必要である。

本提案法では、電界プローブを固定しており、10gまたは1g当りの局所SARをその定義どおりに求めることはできないため、以下の手順で校正係数を求めておく。最初に、図2(a)に示すように、内部に電界プローブを設置した固体ファントムに対して、そのすぐ外側に入力電力 P_{in} [W]の半波長ダイポールアンテナを設置し電界強度を測定する。このときの電界強度を E_s [V/m]とする。次に、(b)に示すように、従来の液体ファントムを用いた電界プローブ走査法により、1gまたは10g当りの局所SARを測定する。ファントムと半波長ダイポールアンテナとの位置関係は(a)の場合と同じにする。このときの局所SARを SAR_L [W/kg]とする。これらの測定値から、校正係数 κ は

$$\kappa = SAR_L / E_s^2 \quad [\text{W/kg} \cdot (\text{V/m})^{-2}]$$

と導出される。本論文では、この校正係数 κ と電界強度測定値 E [V/m] を用いて、局所SARを、

$$\text{Local SAR} = \kappa E^2 \quad [\text{W/kg}]$$

とした。したがって、校正時に1g及び10g当りの局所SARに対する校正係数をそれぞれ求めておけば、実際の測定時には、一つの電界強度測定値から1g及び10g当りの局所SARを両方導出できる。

上記校正を行う際、携帯電話機の標準的使用位置は側頭部であるため、半波長ダイポールアンテナの位置は固体ファントム側頭部が望ましく、かつ固体ファン

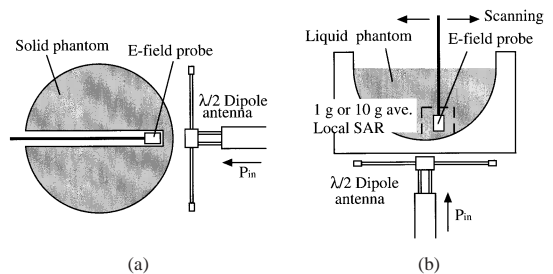


図2 校正手順の典型例: (a) 電界プローブ固定法, (b) 電界プローブ走査法

Fig. 2 Typical calibration procedure: (a) E-field probe is fixed, (b) E-field probe is scanned.

トム内部の電界プローブと正対させる。更に、小さいアンテナ入力で精度の高い校正を行うためには、プローブとアンテナをファントム表面に近い位置で正対させるとよい。ただし、プローブとファントム表面の境界効果避ける必要がある。本論文では、微小ダイポールで構成されたプローブを人体模擬固体ファントムの耳の位置の表面から 1 cm の深さに配置し、半波長ダイポールアンテナをファントムの耳の位置から 2 cm 離して配置した。そのほか、ファントム形状と半波長ダイポールアンテナを完全にモデル化し、数値計算によって上記 SAR_L [W/kg] を求める方法も考えられる。

2.3 測定方法

局所 SAR 測定を行う携帯電話機は、基地局シミュレータから制御信号を受信し、実際の通話状態と同じ周波数、変調波、及び最大送信電力で電波を放射する。携帯電話機から放射された電波の一部が固体ファントム内に設置された電界プローブによって検出され、2.2 の計算によって局所 SAR が求められる。携帯電話機を固体ファントム近傍に置き、4 分の 1 波長程度の範囲で動かし、局所 SAR の最大値を求めることにより、SAR 規格適合性判断を行う。

3. FDTD 法による基本パラメータの設計

3.1 計算モデルと検討方法

測定装置を開発するにあたり、基本パラメータとして固体ファントムの形状、電界プローブ挿入穴の大きさ、複素誘電率、及び電界プローブ設置位置を決定する必要がある。固体ファントムの形状は、成人頭部を模擬することを前提とした。また、電界プローブは、固体ファントム表面から 10 mm 内側に入った位置に設置し、固体ファントムと同一材料のふたがその上から被さって

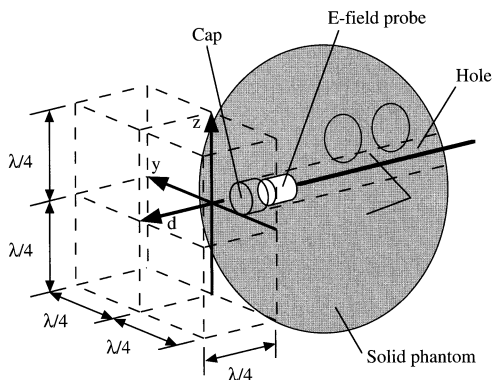


図3 アンテナ移動範囲
Fig. 3 Antenna location area.

いるものとした。これは、電界プローブが固体ファントムの表面に設置されると、携帯電話機から放射される近傍電磁界を直接測定してしまうからである。残りの基本パラメータ、すなわち固体ファントムの電界プ

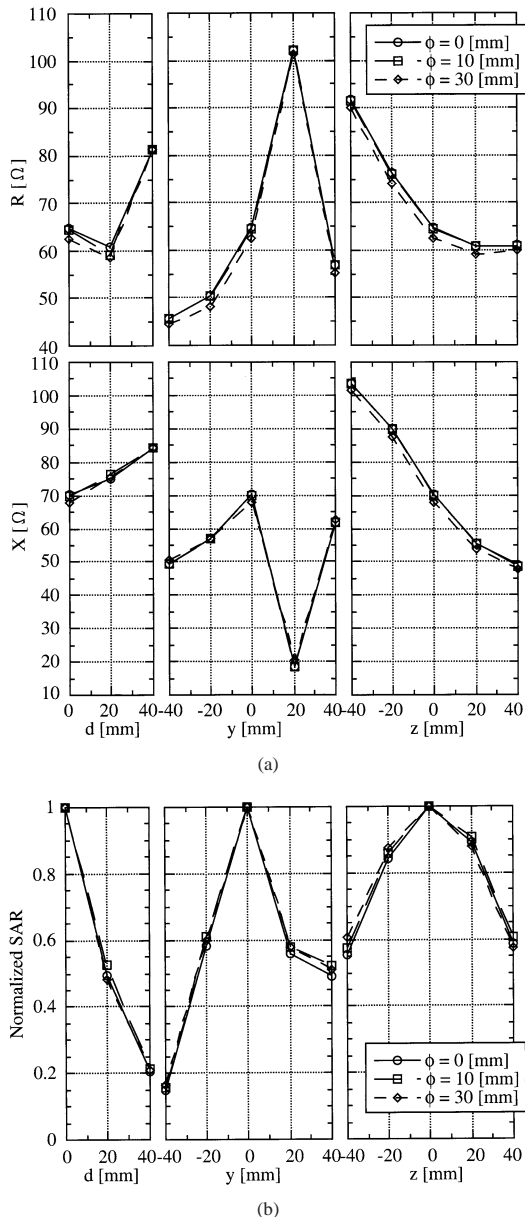


図4 半波長ダイポールアンテナの位置に対する諸特性の計算結果：(a) アンテナ入力インピーダンス (b) 規格化 SAR (ただし、電界プローブ挿入穴の直径 (φ) をパラメータとする)
Fig. 4 Calculated characteristics dependent on the location of the half-wave length dipole antenna: (a) antenna input impedance, (b) normalized SAR (the diameter of the hole for E-field probe insertion is parametric).

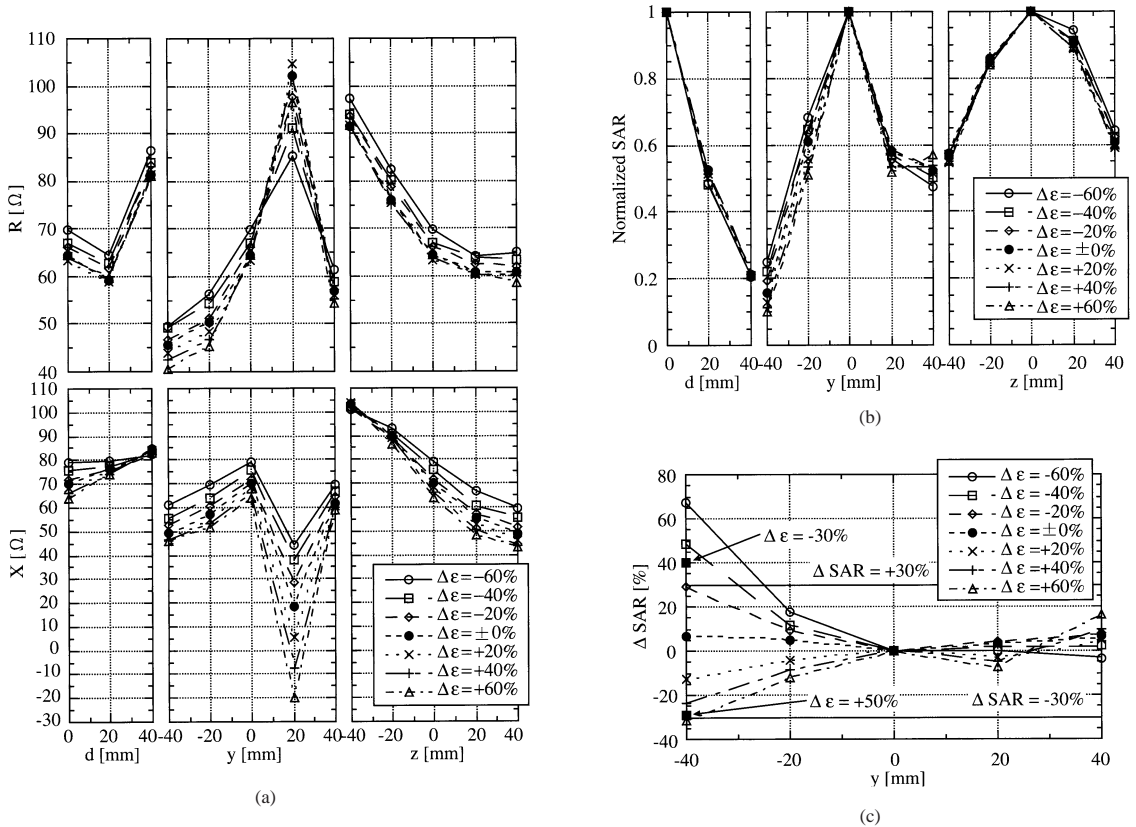


図5 半波長ダイポールアンテナの位置に対する諸特性の計算結果: (a) アンテナ入力インピーダンス, (b) 規格化SAR, (c) y軸方向のSAR偏差 (ただし, 誘電率の偏差 $\Delta\epsilon$ をパラメータとする)
 Fig. 5 Calculated characteristics dependent on the location of the half-wave length dipole antenna: (a) antenna input impedance, (b) normalized SAR, (c) SAR deviation along y axis (the deviation of the solid phantom permittivity is parametric).

ローブ挿入穴の大きさと複素誘電率について, FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法[15]を用いた数値計算によって検討を行った. 電界プローブ挿入穴の大きさは固体ファントム内に設置する電界プローブの大きさを決定し, また複素誘電率はその許容偏差を明らかにしておくことにより, 本装置を広帯域で使用できる可能性がある. なお, 局所 SAR の変動は誘電率の変化に反比例し導電率の変化に比例することが報告されている [16]. 各パラメータの評価は, 固体ファントムと向かい合うアンテナの入力インピーダンスと, 固体ファントム内に設置された電界プローブヘッド位置での局所 SAR を計算することによって行った. ただし, 上記アンテナは半波長ダイポールアンテナであり, 周波数は 900 MHz である. 固体ファントムモデルは名古屋工業大学・藤原研究室が MRI (Magnetic Resonance Imaging) データをもとに開発した数値モデル[17]と同一形状かつ均質であるとした. セルサイズは $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2$

mm, 吸収境界条件は Mur の 2 次条件[15]である. 本測定法は, 2,3 で述べたように, 電界プローブを固定し携帯電話機を移動させる. 本章の検討では, 図 3 に示すように横 d , 前後 y , 上下 z 方向にそれぞれ 40 mm (900 MHz において約 4 分の 1 波長) の範囲を移動させるものとした. アンテナ入力インピーダンスは, アンテナ給電点における電圧と, その周囲の磁界にアンペアの法則を適用して求めた電流との比で与えられる. また, 局所 SAR は, 電界プローブヘッド位置における電界強度の 2 乗値を, アンテナと電界プローブが互いに真正面 ($d = 0\text{ mm}$, $y = 0\text{ mm}$, $z = 0\text{ mm}$) に位置するときの値を基準として規格化している. ここで, $d = 0$ は固体ファントム表面から 20 mm の距離とした.

3.2 固体ファントムの電界プローブ挿入穴

固体ファントムの電界プローブ挿入穴の直径 ϕ をパラメータとし, 半波長ダイポールアンテナの位置 (d, y, z) に対するアンテナ入力インピーダンス ($R + jX$) と

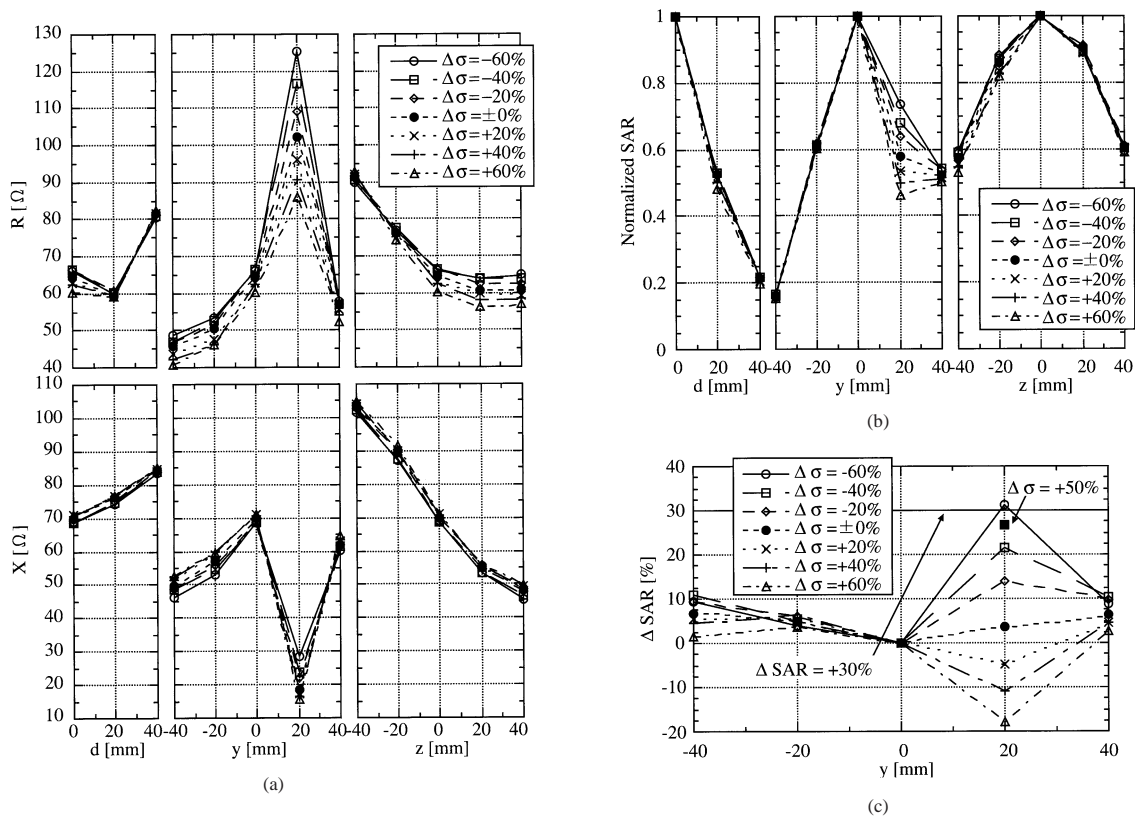


図6 半波長ダイポールアンテナの位置に対する諸特性の計算結果: (a) アンテナ入力インピーダンス, (b) 規格化SAR, (c) y軸方向のSAR偏差(ただし,導電率の偏差($\Delta\sigma$)をパラメータとする)

Fig. 6 Calculated characteristics dependent on the location of the half-wave length dipole antenna: (a) antenna input impedance, (b) normalized SAR, (c) SAR deviation along y axis (the deviation of the solid phantom conductivity is parametric).

電界プローブヘッド位置における規格化SARの計算結果をそれぞれ図4(a), (b)に示す。ただし, d を横軸とした場合は $y, z = 0$ mmであり, 同様に y または z を横軸にした場合は他の座標は0 mmとしている。また, 固体ファントムの複素誘電率は, $\epsilon_r = 51.8, \sigma = 1.43$ S/mとした。(a)より, 電界プローブ挿入穴がない場合($\phi = 0$ mm)と比較して, $\phi = 10$ mm, 30 mmの電界プローブ挿入穴がある場合にはアンテナ入力インピーダンスの偏差はそれぞれ3%以下, 11%以下であり, ほとんど影響がない。同様に(b)より, SARの偏差はそれぞれ7%以下, 12%以下であり, ほぼ一致する。

3.3 固体ファントムの複素誘電率

固体ファントムの誘電率の偏差 $\Delta\epsilon$ をパラメータとし, 半波長ダイポールアンテナの位置(d, y, z)に対するアンテナ入力インピーダンス($R + jX$)と電界プローブヘッド位置における規格化SARの計算結果を図5(a), (b)に示す。なお, 3.2の結果をふまえて, 直径10

mmの電界プローブ挿入穴(アンテナ側の末端が10 mmだけふさいである)があるものとした。また, 固体ファントムの複素誘電率の基準値は $\epsilon_r = 51.8, \sigma = 1.43$ S/mである。(a)より, 固体ファントムの誘電率が異なることによってアンテナ入力インピーダンスは大きく変化している。これにより, アンテナの位置が同じであっても, 複素誘電率が異なるとアンテナ反射電力はその影響を受け, (b)のようにSARに偏差を生じる要因の一つとなっている。また, SARの測定偏差と誘電率偏差との関係を知るために, (b)においてSARの変化が最も大きくなった y 方向の図を抜き出して, アンテナの位置 y に対するSARの偏差 ΔSAR を示したのが(c)である。アンテナの移動範囲を4分の1波長, 許容できる局所SAR測定偏差を $\pm 30\%$ とすると, 誘電率偏差の条件は $-20\% \leq \Delta\epsilon \leq +50\%$ となる。

同様に, 固体ファントムの導電率の偏差 $\Delta\sigma$ をパラメータとし, 半波長ダイポールアンテナの位置(d, y, z)

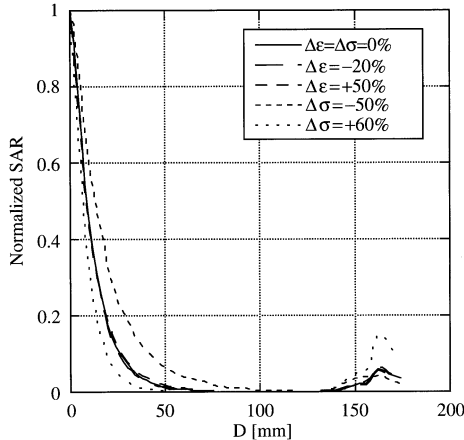


図7 SAR分布の一例
Fig. 7 An example of SAR distribution.

に対するアンテナ入力インピーダンス($R + jX$)と電界プローブヘッド位置における規格化SARの計算結果を図6(a), (b)に示す。(a)より, 図5(a)と同じく固体ファントムの導電率が異なることによってアンテナ入力インピーダンスは大きく変化し, また, 図6(b)より, SARにも影響を与えている。(b)において, SARの変化が最も大きくなった y 方向の図を抜き出して, アンテナの位置 y に対する SAR の偏差 ΔSAR を示したのが(c)である。アンテナの移動範囲を4分の1波長, 許容できる SAR 測定偏差を $\pm 30\%$ とすると, 導電率の偏差は $-50\% \leq \Delta \sigma \leq +60\%$ とすれば十分である。

図7は, 誘電率, 導電率を変化したときのファントム表面から内部(D方向)のSAR分布の一例を示す。図は, アンテナを $(d, y, z) = (0, 0, 0)$ の位置に置いた場合の例である。同図に示す範囲内で, 誘電率, 導電率が変化しても, SARの最大値の位置は変わらない。SARの分布の形状も, 大きくは変わらず, 指数関数的に減衰している。また, 導電率を高くすると, 減衰が急しゅんになっていることがわかる。

4. 実験

4.1 測定装置の構成

3.で求めた基本パラメータに基づいた固体ファントムを用いて, 電界プローブ固定型局所SAR測定装置を構成した。その概観写真を図8に示す。固体ファントムの寸法は, おおむね幅165 mm, 高さ211 mm, 奥行217 mmであり, 耳の付け根付近に直径10 mmの電界プローブ挿入穴を有している。更に, 電界プローブが携帯電話機アンテナから放射される電波を直接測定する

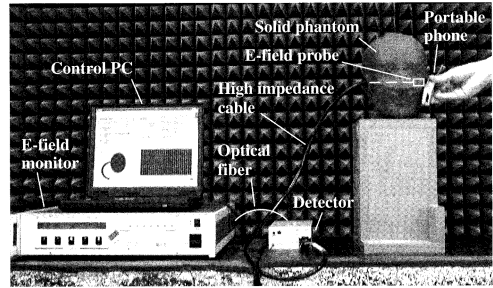


図8 電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置の概観写真
Fig. 8 Photograph of the local SAR estimation system using a solid phantom and a fixed E-field probe.

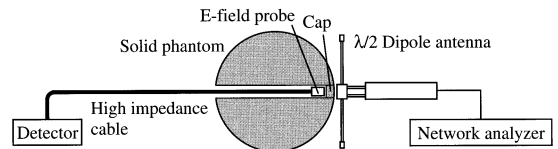
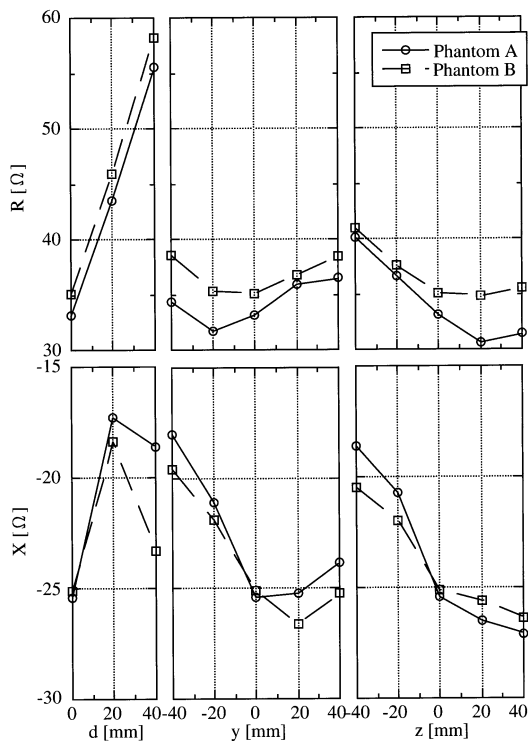


図9 アンテナ入力インピーダンスと局所 SAR の測定系
Fig. 9 Setup for antenna input impedance and local SAR measurement.

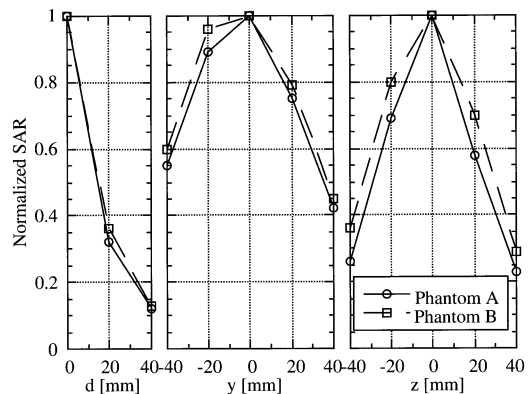
ことを防ぎ, 固体ファントム内を浸透した電波を測定できるように, 固体ファントムと同一材料で構成された厚さ10 mmのふたで電界プローブを覆っている。電界プローブは, エレメント長が4 mmの微小ダイポールを三つ直交配置したヘッド部をもち, 3軸等方性を示す。電界プローブのリード線には高抵抗線を, 検出器とモニター間の接続には光ファイバを用いており, これらは外部電界との相互影響がほとんどない。また, 検出器前段にはコイルとコンデンサから構成された時定数約1秒の平均化回路が挿入されており, 電界プローブで検出した各種変調波入力に対して時間平均値を出力する。

4.2 基本パラメータの妥当性確認

900 MHzにおいて $\epsilon_r = 51.8$, $\sigma = 1.43$ S/mである固体ファントムA, 及び $\epsilon_r = 37.7$, $\sigma = 1.19$ S/mである固体ファントムBと948 MHz用半波長ダイポールアンテナを用い, 図9に示す測定系を構成して基本パラメータの妥当性を確認した。ネットワークアナライザで半波長ダイポールアンテナのアンテナ入力インピーダンスを, 電界プローブでSARを測定した。ただし, 各固体ファントムは3.の数値計算に用いた数値モデルと若干形状が異なり, また, 測定に用いた半波長ダイポールアンテナにはバランが装備されている。固体ファントムAの複素誘電率を基準とすると, 固体ファントムBの複素誘電率は $\Delta \epsilon = -28\%$, $\Delta \sigma = -17\%$ であり, 3.3



(a)



(b)

図10 半波長ダイポールアンテナの位置に対する諸特性の測定結果: (a) アンテナ入力インピーダンス, (b) 規格化SAR
 Fig. 10 Measured characteristics dependent on the location of the half-wave length dipole antenna: (a) antenna input impedance, (b) normalized SAR.

の数値計算によって得られたSAR測定偏差 ± 30%の条件を一部逸脱している。半波長ダイポールアンテナの位置 (d, y, z) に対するアンテナ入力インピーダンス ($R + jX$) と SAR の測定結果を図 10(a), (b) に示す。3.3 の数値計算結果によると, 図 5 (a), 図 6 (a) より, 誘電率

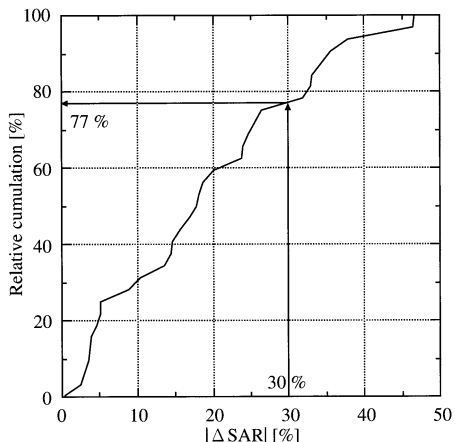


図 11 局所 SAR の偏差とその偏差内で局所 SAR を測定できた携帯電話機数の相対累積数 (全 32 機種)
 Fig. 11 Local SAR deviation vs. relative cumulation (tested portable phone number is 32).

または導電率の小さい固体ファントムを対象としたときに, アンテナ入力インピーダンスの実部 (R) は大きくなる傾向を示した (図 5 (a), $y = 20$ mm のときを除く) が, 測定結果図 10(a) も同様の傾向を示した。また, アンテナ入力インピーダンスは, 固体ファントム形状, 及びアンテナとファントムの位置関係のわずかなずれの影響を受けること, 実際の測定では, バランを含むインピーダンスを測定していること等のため, 計算結果と測定結果の絶対値の比較は難しい。局所 SAR の測定値は図 10(b) となり, 固体ファントム A を用いたときの局所 SAR を基準として, 固体ファントム B を用いたときの局所 SAR の偏差は最大でも 38% であった。

4.3 携帯電話実機の測定例

PDC (Personal Digital Cellular) 方式の 800 MHz 帯デジタル携帯電話機 32 種の局所 SAR を, 本測定法と電界プローブ走査法 (DASY3 v.3.1c) [6] によって測定した。ここで, 携帯電話機は形状 (折り畳み型, フリップ型, 箱型など) やアンテナ取付け位置の異なるものを用いた。携帯電話機の送信周波数は 945.0 MHz, 出力は 0.8 W (PDC 方式における最大出力) であり, フレーム周期 20 ms の TDMA (Time Division Multiple Access) 信号を送信した。携帯電話機的位置は, 本測定法においては文献 [18] の Intend Use ポジションを基準として摂動を行い, 電界プローブ走査法においては Intend Use ポジションに忠実であるとした。アンテナは引き延ばした状態とし, また, ファントム左側頭部を対象とした。本測定ではファントム A を使用した。図 11 は, 横軸が電界

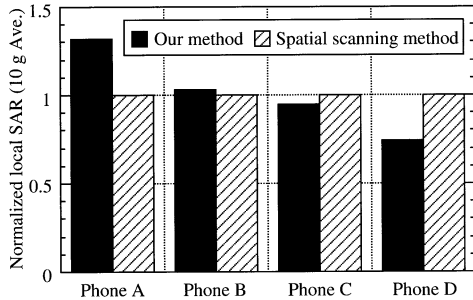


図 12 電界プローブ固定型測定法と電界プローブ走査法による PDC 携帯電話実機 4 種の局所 SAR 測定結果

Fig. 12 Local SARs of 4 commercial PDC portable phones estimated by our system and spatial scanning system.

表 1 電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置の仕様

Table 1 Specifications of the local SAR estimation system using a solid phantom and a fixed E-field probe.

Frequency range	900 MHz ~ 2.5 GHz
SAR measuring range	0.07 ~ (more than 100) W/kg
Volume for SAR averaging	10 g
Typical deviation from the spatial scanning method	within $\pm 30\%$

プローブ測定法で得られた局所 SAR に対する本測定法で得られた局所 SAR の偏差を示し、縦軸がその偏差内で局所 SAR を測定できた機種数を累積度数分布を示している。本測定法により、約 77% の携帯電話機に対して偏差 30% 以内で局所 SAR を求めることができた。残り約 23% の機種についても、偏差 50% 以内で局所 SAR を測定できた。図 12 に 32 機種中 4 機種の 10 g 平均局所 SAR を示す。ただし、電界プローブ走査法によって得られた 10 g 平均局所 SAR を基準として規格化してある。携帯電話機 A はおおむね +30% の偏差、携帯電話機 D はおおむね -30% の偏差、携帯電話機 B 及び C はほとんど偏差なく局所 SAR を求めることができた。

4.4 装置仕様

最後に、本測定装置の仕様を表 1 にまとめる。周波数 2.5 GHz の場合について、3.3 と同様の評価を行うと、許容できる SAR 測定偏差を $\pm 30\%$ とするとき、誘電率偏差の条件は、 $-30\% \Delta \epsilon +15\%$ 、導電率偏差の条件は、 $-10\% \Delta \sigma +10\%$ となり、900 MHz ~ 2.5 GHz の範囲では、複素誘電率の偏差の条件は実現可能な範囲に入っている。また、局所 SAR の測定範囲は電界プローブの感度及びダイナミックレンジに依存し、本測定装置では下限が 0.07 W/kg、上限が数百 W/kg であった。本論文では 10 g 平均局所 SAR について検証したが、

2.2 の校正を行うため、局所 SAR の単位体積として 1 g、10 g のどちらをとることも可能である。ただし、1 g 平均にすると、個々の携帯電話機による SAR 分布の違いの影響が大きくなり、測定値の偏差が大きくなると予想されるため、1 g 平均の場合の正確な適用範囲については実験による検証が必要である。

5. むすび

最初に、提案している電界プローブ固定型局所 SAR 測定装置の基本パラメータのうち、固体ファントムの電界プローブ挿入穴の大きさ ϕ と複素誘電率の偏差 ($\Delta \epsilon, \Delta \sigma$) について検討を行った。局所 SAR 測定の対象である携帯電話機を半波長ダイポールアンテナで置き換え、その移動範囲を横、前後、上下方向に 4 分の 1 波長、許容できる測定偏差を $\pm 30\%$ とすると、周波数 900 MHz の場合は、 $\phi = 10 \text{ mm}$ 、 $-20\% \Delta \epsilon +50\%$ 、 $-50\% \Delta \sigma +60\%$ であれば十分であることを FDTD 法により明らかにした。次に、本装置を開発して、複素誘電率の異なる二つの固体ファントムを用いて計算結果の妥当性を確認した。最後に、本装置によって携帯電話機実機 32 種の局所 SAR 測定を行い、電界プローブ走査法による測定値と比較して約 77% の機種における測定結果が偏差 30% 以内となることを確認した。残り約 23% の機種についても、偏差 50% 以内で局所 SAR を測定することができた。

提案している測定法は、1 次標準としての他の測定法による測定結果と比較することによって局所 SAR を求める相対測定法である。したがって、固体ファントムの形状は必ずしも人体頭部を模擬している必要はなく、例えば球体のように一般化かつ単純化することによって製作、標準化を容易に行えるメリットが期待できる。また、本測定法はボディマウントの局所 SAR 測定にも応用することが可能である。ボディマウントとは、キャリアケース等に携帯電話機を入れて持ち歩く場合のように、携帯電話機を胴体に近づけた状態を指す [19]。内部に電界プローブを挿入した胴体模擬固体ファントムの近傍で携帯電話機を移動させることにより、胴体模擬容器に液剤を満たしその内部を電界プローブで走査することと互換性のある測定を行うことができる。

謝辞 (株)NTTドコモの鈴木裕社員には実験系の構築に多大な御尽力を頂いた。またドコモテクノロジー(株)の三角信貴氏には実験推進に多大な御協力を頂いた。ここに深く感謝します。

文 献

- [1] 総務省令第 81 号, June 2001 .
- [2] Official Journal of the European Communities, COUNCIL RECOMMENDATION on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), July 1999.
- [3] IEEE Standards Coordinating Committee 28, "Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz," ANSI/IEEE C95.1-1999.
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields," Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.
- [5] T. Nojima, S. Nishiki, and T. Kobayashi, "An experiment SAR estimation of human head exposed to UHF near field using dry-phantom models and a thermograph," IEICE Trans. Commun., vol.E77-B, no.6, pp.708-713, June 1994.
- [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] 総務省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される携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法」, Nov. 2000 .
- [8] EUROPEAN STANDARD EN50361, Basic standard for the measurement of Specific Absorption Rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz), July, 2001.
- [9] IEEE SCC34, Recommended Practice for Determining the Spatial-Peak Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body Due to Wireless Communications Devices: Experimental Techniques. (審議中)
- [10] IEC/PT62209, Procedure to Determine the Specific Absorption Rate (SAR) for Hand-Held Mobile Telephones. (審議中)
- [11] 鈴木 裕, 野島俊雄, 垂澤芳明, 吸収電力測定装置, 特開平 10-185838 .
- [12] 鈴木 裕, 垂澤芳明, 野島俊雄, 吸収電力測定装置及びその校正方法, 特開平 10-311805 .
- [13] 例えば, 垂澤芳明, 野島俊雄, " 固形誘電体と電界プローブを用いた局所 SAR 測定法, "1999 信学ソ大, B-4-32, Sept. 1999 .
- [14] H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi, and T. Nojima, "A dry phantom material composed of ceramic and graphite powder," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.39, no.2, pp.132-137, May 1997.
- [15] 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998 .
- [16] 河井寛記, 岡野由樹, 吉村博幸, 伊藤公一, " 局所平均 SAR の生体等価ファントムの電気定数変動に対する依存性, " 2001 信学ソ大, B-4-2, Sept. 2001 .
- [17] 牛本卓二, 王 建青, 藤原 修, " 1.5 GHz マイクロ波遠方界による頭部 MRI 数値モデルのドシメトリと照射方向依存性, " 信学技報, EMCJ99-16, June 1999 .
- [18] 携帯電話の比吸収率測定法, STD-T56 (社) 電産産業会, Jan. 1998 .
- [19] FCC, Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human

Exposure to Radiofrequency Electromagnetics Fields, Supplement C (Edition 01-01) to OET Bulletin 65 (Edition 97-01), June 2001.

(平成 13 年 8 月 6 日受付, 11 月 30 日再受付)



井山 隆弘 (正員)

平 8 東工大・工・電気卒 . 平 10 同大学院理工学研究科修士課程了 . 同年 (株) NTT ドコモ入社 . 以来, EMC 研究に従事 .



垂澤 芳明 (正員)

昭 57 日大・理工・電子卒 . 昭 59 同大学院理工学研究科修士課程了 . 同年日本電信電話公社 (現, NTT) 横須賀電気通信研究所入所 . 以来, マイクロ波回路, 移動通信用無線回路の研究開発, EMC 研究に従事 . 現在 (株) NTT ドコモ電波環境特別研究室主任研究員 . 平 4 本会学術奨励賞受賞 . IEEE 会員 .



上林 真司 (正員)

昭 56 名大・工・電気卒 . 昭 58 同大学院理工学研究科修士課程了 . 昭 61 同博士課程了 . 同年 NTT 入社 . 以来, 電気通信研究所にて, 音声符号化, 無線データ伝送技術, EMC の研究, CDMA 移動通信方式の開発に従事 . 現在, (株) NTT ドコモ電波環境特別研究室主幹研究員 . IEEE 会員 .



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 (株) NTT ドコモにて 6 GHz 帯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, 北大大学院理工学研究科教授 . 工博 . 平 8 本会論文賞受賞 . IEEE 会員 .



藤原 修 (正員)

昭 46 名工大・工・電子卒 . 昭 48 名大学院修士課程了 . 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 .