

3-3 SAR 測定法と不確かさ評価

浜田リラ 渡辺聡一

携帯電話等の携帯無線機器の一部については法令で比吸収率 (Specific Absorption Rate : SAR、以下、SAR) の電波防護指針値への適合性を確認することが義務付けられている。その際に比吸収率測定の不確かさを評価することが求められている。本稿では比吸収率測定の不確かさ評価について、実例を示しつつ述べる。

1 まえがき

携帯無線機器・基地局等の電波を発する機器・設備からの電磁界ばく露評価指標のひとつに、SARがある。国内外において、比吸収率で示された電波防護指針が設けられており [1]、その制限値への適合性評価試験 (SAR 測定) が国内外の標準規格や法的規制 [2]-[5] ののっとり行われている。それらの適合性試験用の SAR プローブ較正については 2-7「比吸収率測定プローブの較正」において述べた。本章では、適合性評価における SAR 測定方法及びその不確かさ評価に関する NICT の研究について述べる。

携帯電話のように世界各国で使用する無線機器については、各国独自の条件で試験を行うと、国によって同じ端末の適合性評価結果が異なってしまう可能性がある。これは輸出入の障壁となるだけでなく、安全性評価結果の信頼性確保を困難としてしまう。そのため、携帯電話等の SAR 測定方法は前述の国際規格等において標準化されており、国際的に同じ測定条件で試験が行われている。

SAR 測定方法は試験対象となる携帯電話端末が電波防護指針に適合していることを、高い信頼性をもって確認できるように策定されている。信頼性を確保する重要な要件として、不確かさの評価と測定システムの妥当性検証が挙げられる。国際規格では、不確かさの評価項目及び各不確かさ要因の評価方法が詳細に規定されている。また、測定システムの妥当性検証のために、単純な条件での SAR 測定値と数値計算により決定されている参照値を比較する総合評価試験が規定されている。なお、適合性評価方法に対しては高い信頼性に加えて、簡便な機器・手順で実施できることも要求される。

NICT は電波の安全性評価に関する研究を推進する国内唯一の国立研究機関として、不確かさ評価と妥当性検証手法についての検討を行い、国際規格の策定・

国内標準規格・審議会答申等に貢献してきている。本稿では、SAR 測定システムの総合評価試験と不確かさ評価について、NICT における評価結果例を含めて、解説する。なお、測定方法については、前述の [2] [3] に詳細が記載されているため、本稿では概略にとどめ、不確かさ要因の評価方法等に重点をおいた。なお、本稿では特段の言及が無い限り、電波防護指針 [1] の評価指標に従い 10 g 局所 SAR について評価している。

2 定義 [1]

2.1 電波防護指針 [1]

電波利用において人体が電波 (防護指針に関しては周波数の範囲は 10 kHz から 300 GHz までに限る。) にさらされるとき、その電波が人体に好ましくないと考えられる生体作用を及ぼさない安全な状況であるために推奨される指針のことをいう。

2.2 比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) [1]

SAR とは、下記に定義されるとおり、生体組織に吸収される電力である。

損失のある媒質 (ファントム液剤など) 中の比吸収率 (SAR) は、電界 (E) と媒質中の温度勾配 (dT/dt) の双方に関係している。したがって、その関係に基づいて以下の式が与えられる。

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} = c_k \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (1)$$

ここで、

σ	導電率
ρ	媒質の密度
c_k	比熱

である。

また、損失のある媒質中の電界は、その中の温度勾配の測定によっても間接的に測定できる。

2.3 局所吸収指針 [1]

主に身体に極めて近接して使用される無線機器等から発射される電磁波により、身体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合において使用する指針をいう。

2.4 局所 SAR [1]

SAR は微小体積要素当たりの数値として与えられ、電磁波の照射条件と生体組織内の場所に依存した空間分布関数となる。この分布関数について、任意の 1 g 又は 10 g の組織内で平均した SAR を局所 SAR と呼ぶ。その中で最大の値を局所最大 SAR と呼ぶ。ただし、国内における適合性評価のための測定では 10 g の組織を立方体で定義している。任意の時間平均の SAR で評価する。日本においては 6 分間平均である。

2.5 ファントム [1]

実験的に SAR を推定するために用いられる擬似的な人体モデルをいう。モデル全体にわたって同じ材料を用いる場合を均一ファントム、対応する組織ごとに忠実に電気的特性等を模擬したものを不均一ファントムと呼ぶ。本測定方法においては、人体形状を模擬するための外殻(容器)とそれに充てんされる液剤(ファントム液剤)で構成される均一ファントムを用いる。適合性評価に用いられるファントムには、側頭部で用いられる機器評価用の頭部ファントム(Specific Anthropomorphic Mannequin: SAM)と、胴体等の側頭部以外で用いられる機器評価用の平面ファントムがある。

3 SAR 測定の原理と無線機器の適合性評価方法 [1]-[5]

SAR の測定は、式 (1) に示されるように、ファントム内の電界強度または温度上昇から測定することが可能である。ただし、携帯電話等の実際に使用されている携帯無線機の出力は比較的小さいため、これらの温度測定システムで検出可能な温度上昇は生じない。そのため、適合性試験においては、より感度に優れている電界強度測定による評価方法が採用されている。以下に評価方法の概略を示す。

まず、人体頭部または胴体を模擬したファントム容器中にファントム液剤を充てんし、ファントム近傍に試験装置を設置する。次に、基地局シミュレータや端末の試験モード等を用いて測定中は最大出力で送信し続けるように試験機器を設定する。この状態で、ファントム内を微小電界センサで走査し、式 (1) の関係から測定電界強度より SAR の最大値を求めて制限値と比較し適合性を評価する。測定システム概略を図 1 に

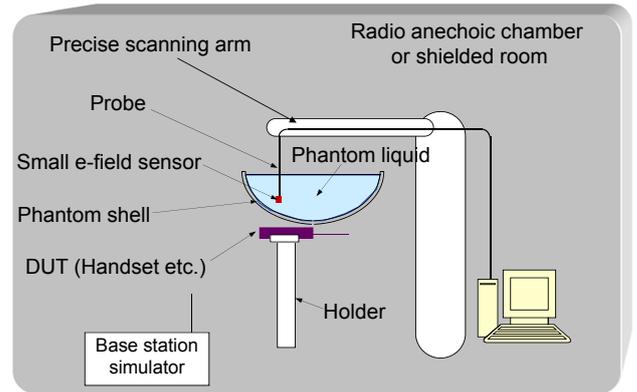


図 1 SAR 測定装置概要

示す。標準頭部ファントム (SAM) 及び平板ファントムの大きさや形状、無線機器の設置位置、ファントム液剤の電気定数は、国内外の標準規格にて規定されている。

4 SAR 測定の不確かさ評価と測定系の評価試験 [1][2]

測定装置の妥当性を標準アンテナを用いた測定により検証する [1][2] ことを、測定系の評価試験と呼ぶ。評価試験には、測定機器の動作確認及び測定精度保証のための総合評価試験 (system validation) と、測定の再現性を簡易に確認するための簡易性能試験 (system check) がある。国際規格等では、総合評価試験を少なくとも年 1 回以上 (システムの改修・較正等を実施した場合はその直後にも) 実施することが要求されている。

総合評価試験では、標準波源として、寸法が規定されたアンテナが用いられる。ファントムに対するアンテナの位置も規定されている。総合評価試験では、規定の位置に設置された標準アンテナにおける SAR 測定値と規格等で示されている参照値を比較することで、妥当性を検証する。なお、規格値等で示されている参照値は複数の研究機関により実施された数値計算結果から決定されている。

本稿では、標準ダイポールアンテナを用いた総合評価試験を例にとり、SAR 測定の不確かさ評価の例を示す。

4.1 総合評価試験の手順

① 総合評価試験系の構築

評価は、底面が平坦な平板ファントム (本稿では底面が平坦で周囲が楕円状のファントム (SPEAG 社製 ELI ファントム) を使用) 及び標準アンテナを用いて実施する。

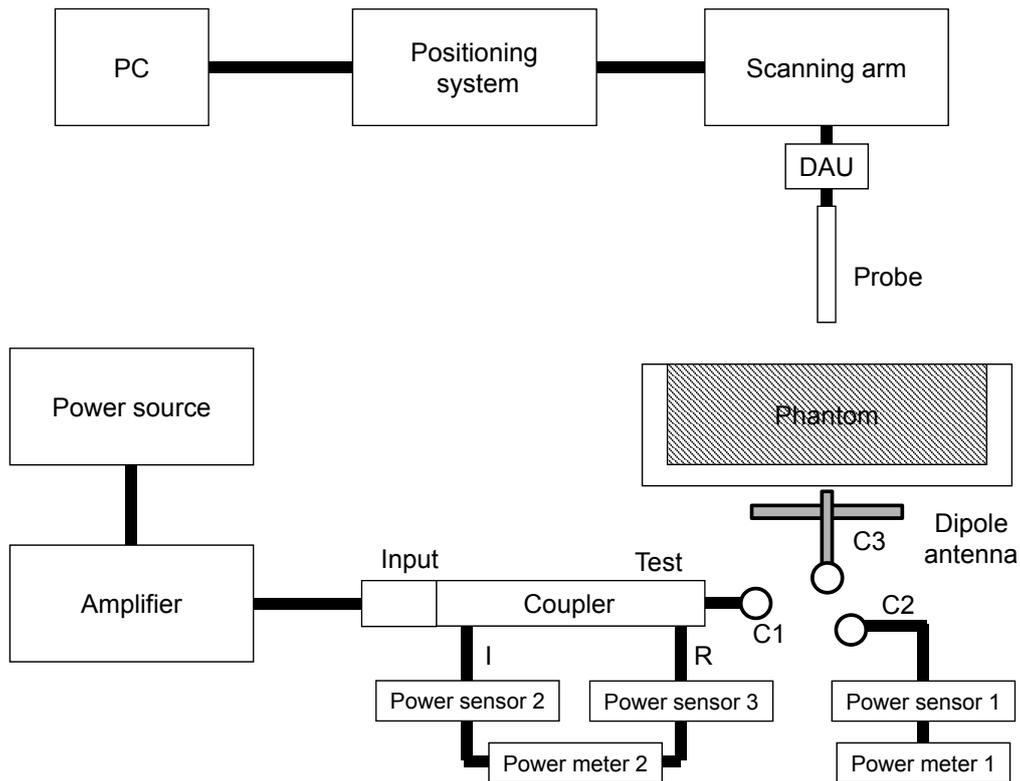


図2 評価系の構成

試験環境は、シールドルームもしくは暗室等の内部で、室温が18～25℃であり、評価前後でのファントム液剤の温度変化が±2℃を超えないことが必要条件である。

まず、評価を行うファントム底面が水平になるよう、水準器で確認しながら、ファントム容器の脚の高さを調節する。次に、ファントム容器にファントム液剤を充てんする。

ダイポールアンテナを標準波源とした評価系を図2に示す。スペーサーを用いてエレメントとアンテナとファントムの距離を調節し、1 GHz 未満で15 mm、1 GHz 以上で10 mmに設定する。図3に使用した楕円ファントムの外観を示す。



図3 平板ファントム(楕円形状)

電力が±0.1 dBmの範囲で一定値となるように試験中は調節する。入射電力は、1 GHz 以下では24.0 dBm、1 GHz 以上では22.0 dBmとしている。

- ② ダイポールアンテナの S_{11} 測定

ネットワークアナライザを用いてダイポールアンテナの S_{11} を測定する。ファントムにファントム液剤が充てんされた状態で、 S_{11} が規格で規定されている-20 dB以下であることを確認する。
- ③ ダイポールアンテナへの給電電力の決定

ダイポールアンテナ入力端(図2 C1ポート)での電力値は、以下の手順でC1における入射

- (ア) C1とC2を接続し、ポートC1への入射電力についてパワーメータ1の指示値が所望のレベルになるように、信号発生器の出力レベルを調節する。
- (イ) 項目(ア)で信号発生器の調節が完了した時点で、方向性結合器のIポートに接続したパワーメータ2の指示値がパワーメータ1の

値と等しくなるように、パワーセンサ2の指示値にオフセットをかけ調整する。つまり、パワーセンサ2の指示値がポートC1への入射電力を示すように設定する。

(ウ) 試験中は、C1とC3を接続し、パワーメータ2の指示値(=ポートC1への入射電力)が所望のレベルになるように信号発生器の出力レベルを調節する。なお、Rポート側のパワーセンサ3での指示値については出力の調節には直接用いないが、試験中に異常な反射がないかどうかの確認のため随時値を確認している。

④ 上記の設定において、SAR測定システムで局所SARを測定し、得られた10g SARを、①で測定したアンテナS₁₁の値を考慮してダイポールへの入力電力を1Wとして規格化する。この値を標準規格に示されたSAR参照値と比較し、総合評価試験の不確かさ以内であることを確認しシステムが正常に動作することを確認する。

4.2 総合評価試験の不確かさ評価例

IEC62209-1に掲載の不確かさバジェット[4]を基に、総合評価試験の不確かさ評価を実施した。各項目の評価方法を以下に示す。なお、不確かさバジェット表の確率分布の記載は、N:正規分布、R:矩形分布(一様分布)である。

- プローブ較正

較正証書等の値を用いる。今回は、NICTにおいて実施した較正の不確かさを用いる(SARプローブの較正不確かさについては2-7を参考)。確率分布は正規分布を用いる。
- ファントム液剤電気定数測定不確かさ

表1に示すバジェットを基に評価した。各項目の詳細な評価方法は以下に示す。確率分布は正規分布を用いる。

① 測定の繰り返し性
誘電率及び導電率を10回測定し、得られた標準偏差を測定の平均値で除算し、公差値とする。確率分布は正規分布を用いる。

② 電気定数の規格値からの偏差
上記で測定した誘電率・導電率の平均値と各ファントム液剤の電気定数の目標値との偏差を導出し、公差値とする。確率分布は矩形分布を用いる。

③ ネットワークアナライザ等の不確かさ
今回は、英国NPL製のモンテカルロ法を用いた不確かさ評価ソフトウェアを用いてネットワークアナライザの測定不確かさを導出した。確率分布は矩形分布を用いる。

● プローブ等方性
実機での測定の場合、プローブ較正時と異なり波源の偏波方向が不明なため、軸等方正と半球面内等方正を双方加味した評価が必要となる。式(2)にプローブ等方性の不確かさ導出式を示す。

$$u_{\text{isotropy}}[\%] = 100 \times \sqrt{(1-w_j) \times u_{\text{axialisotropy}} + w_j \times u_{\text{hemisphericalisotropy}}} \quad (2)$$

ここで、 $u_{\text{axialisotropy}}$:プローブ軸等方性、 $u_{\text{hemisphericalisotropy}}$:プローブ半球面等方性、 w_j :重み関数である。

今回の測定ではプローブの軸がファントム表面の法線方向に対して $f \leq 3$ GHzで $\pm 30^\circ$ 以内、GHz $< f \leq 6$ GHzで $\pm 20^\circ$ の条件を満たすように測定しているため、IEC 62209-1に準拠し原則として $w_i = 0.5$ を用いる。プローブ軸等方性、半球面等方性はSAR測定システムメーカーマニュアル不確かさバジェット[6]の値(軸等方性:4.7%、半球面等方性:9.6%)を用いることにする。この場合、プローブ等方性の値は7.69($k=2$)となる。プローブ等方性の詳細な評価方法は、IEC62209-1 B.4 Isotropy [4]に記載されている。確率分布は矩

表1 ファントム液剤電気定数測定の不確かさ

	a		b	C	$u_i = (a/b) \times (c)$	
不確かさ評価項目	Uncertainty value (±%)	確率分布	除数	感度係数 c_i	標準不確かさ (±%)	自由度 v_i or v_{eff}
測定の繰り返し性		N	1	1		$N-1$
電気定数(ϵ_r' or σ)の規格値からの偏差		R	$\sqrt{3}$	1		$N-1$
ネットワークアナライザ不確かさほか		R	$\sqrt{3}$	1		∞
合成拡張不確かさ						

形分布を用いる。

- 境界効果

境界効果とは、プローブ先端がファントム表面等の異なる誘電体との境界面に近接した際に、それらの電氣的結合により、見かけ上プローブ感度が異なって見える効果である。

以下の式 (3) または (4) から導出する。

$$\text{SAR}_{\text{tolerance}} [\%] = \Delta \text{SAR}_{\text{bc}} [\%] \frac{(d_{\text{bc}} + d_{\text{step}})^2}{2d_{\text{step}}} \frac{(e^{-d_{\text{bc}}/(d/2)})}{\delta/2},$$

$$(d_{\text{bc}} + d_{\text{step}}) < 10 \text{mm} \text{かつ} f \leq 3 \text{GHz} \quad (3)$$

$$\text{SAR}_{\text{uncertainty}} [\%] = \Delta \text{SAR}_{\text{bc}} [\%] \frac{\delta}{\delta - d_{\text{bc}}}, \quad d_{\text{bc}} < \delta \text{かつ} f > 3 \text{GHz} \quad (4)$$

ここで、 d_{bc} mm はファントム表面に最も近接する立方体走査測定点までの距離、 d_{step} mm は上記の測定点から最も近い測定点までの距離、 δ mm はファントム液剤中の表皮深さ、 $\Delta \text{SAR}_{\text{bc}} [\%]$ は距離 d_{bc} において、2-7 の式 (7) で求めた較正導波管内での SAR 理論値と測定値の差である。これらの値は標準規格で指定する測定パラメータによった。確率分布は矩形分布を用いる。

- プローブの線形性

2-7 でも述べたように、SAR 測定ではプローブに用いられるダイオード等の非線形性の補正を行っている。補正後のプローブの線形性を、SAR が 0.12 W/kg から 100 W/kg となる入力電力を含む範囲において入力電力と SAR 測定値との関係を線形近似して評価する。この線形近似から求めた SAR 近似値と、SAR 測定値との差異が線形性の不確かさとなる。本稿では、SAR プローブメーカー較正証書記載のプローブの線形性の不確かさの値 (1.5 %) を用いる。確率分布は正規分布を用いる。

- プローブの検出限界

上記のプローブ特性の線形近似の検出限界は、ある入力電力 ([4] では SN 比が 6 dB) における線形近似あり／なしの SAR 測定値の差異で評価する。本稿では、SAR 測定システムメーカーマニュアル不確かさバジェット [6] の値 (1.0 %) を用いる。確率分布は正規分布を用いる。

- 変調応答

今回の総合評価試験では、変調波の測定は行わないので 0 % とする。

- ステップ応答時間

本稿では基本的に連続波ベースの測定を行うため、国際規格の規定に従い、0 % とする。

- 信号の積分時間

SAR 測定では信号の時間積分処理が行われる

が、パルス波形やバースト波形等通常の連続波以外の場合には、信号積分時間の不確かさを別途考慮する必要がある。本測定では連続波の測定であり、また、測定信号周波数やプローブ応答時間と比較して 1 点あたりの SAR 測定の時間は 500 ms 程度と十分に長いため、積分時間の不確かさは無視できるものとする。

- RF 周囲環境雑音

RF 入力のない状態で実施した SAR 測定値を用いる。確率分布は矩形分布を用いる。本稿では実際に RF 入力のない状態での SAR 測定値を用いず、より最悪側の評価として、規格において検出下限と規定されている 0.012 W/kg を用いた。

- RF 周囲環境反射

SAR 測定時にダイポールアンテナ近傍に電波吸収体を設置し、通常の状態での SAR 測定値と比較する。確率分布は矩形分布を用いる。

- プローブ走査装置の機械的制約

ロボットアーム側で設定するプローブの位置と、実際のプローブ (センサ) の位置にはロボットの位置制御の精度に起因する差異が発生する。NICT では、本項目については、水平方向の位置精度の不確かさを評価した。

$$\text{SAR}_{\text{uncertainty}} [\%] = \frac{d_{\text{ss}}}{\delta/2} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 d_{ss} は、ロボット制御システムが決定したプローブ位置と実際のプローブ位置の間の誤差の最大値である。ロボットの位置精度の仕様から最大距離誤差は 0.2 mm とした。確率分布は矩形分布を用いる。

- ファントム容器に対する位置決め精度

下記の式 (6) はファントム容器内面に対する、ファントム表面のプローブ位置決め精度である。本稿では、法線方向の位置決め精度で評価した。

$$\text{SAR}_{\text{uncertainty}} [\%] = \frac{d_{\text{ph}}}{\delta/2} \times 100 \quad (6)$$

ここで、 d_{ph} はプローブのファントム表面検出センサの不確かさも含むため、ファントム表面とプローブ先端との最大距離誤差とし、SAR 測定器マニュアル記載の値によった [6]。確率分布は矩形分布を用いる。

- データ後処理

SAR 測定システムメーカーマニュアル不確かさバジェット [6] の値 (2.0 %) を用いる。確率分布は正規分布を用いる。

- 実際のダイポールアンテナと、規格値計算に用いた数値ダイポールアンテナモデルとの差異

本評価は、実際に試験に用いるアンテナ寸法等

と、規格記載の参照値の決定に用いた数値アンテナモデルとの差異に関連する不確かさである。例えば、標準アンテナメーカーの較正証書等を用いた評価が可能である。ここでは、SAR 測定システムメーカーマニュアル不確かさバジェット [6] の値を用いることとした。確率分布は正規分布を用いる。

● 入射電力ドリフト

測定時の入射電力のドリフトを測定し求める。確率分布は矩形分布を用いる。

● 波源とファントム液剤の距離

IEC 62209-1[4]では、「Other contributions related to standard source」として扱われている。標準ダイポールアンテナの設置・製作誤差に相当する。式 (7) で導出できる。

$$SAR_{tolerance}[\%] = \left(\frac{(a+d)^2}{a^2} - 1 \right) \times 100 \quad (7)$$

ここで a はダイポールとファントムの距離、 d はダイポールアンテナの製作精度であり、ファントムとの距離は 1 GHz 以下で 15 mm、1 GHz 以上で 10 mm であり、 d は 0.1 mm とする。なお、IEC62209-1 ではスペーサーの製作精度の不確かさについては言及されていないが、測定結果に影響を与えないものを用いる必要がある。確率分布は矩形分布を用いる。

● ファントム容器の不確かさ

標準アンテナ(または試験端末)はファントム容器下面から所定の離隔距離で設置されるため、ファントム容器の厚みの不確かさは、波源からファントム(ファントム液剤)までの距離の不確かさとなり、SAR 測定結果に影響を与える。したがって、前項同様に式 (8) を用いて、ファントム厚みの不確かさを評価する。また、3 GHz 以上では、式 (9) に示すとおり、ファントム容器の電気定数の影響も考慮されている。

$$SAR_{tolerance}[\%] = \left(\frac{(a+d)^2}{a^2} - 1 \right) \times 100 \quad f < 3 \text{ GHz} \quad (8)$$

$$SAR_{tolerance}[\%] = \sqrt{\left[\left(\frac{(a+d)^2}{a^2} - 1 \right) \times 100 \right]^2 + (5 \times |\epsilon_{r, shell} - 4|)^2} \quad 3 \text{ GHz} \leq f \quad (9)$$

ただし、 $2 \leq \epsilon_{r, shell} \leq 5$

ここで a は波源の線状電流とファントム液剤の距離、 d はファントム容器の形状と厚さの公差の許容値である。ファントムとの距離は 1 GHz 以下で 15 mm、1 GHz 以上で 10 mm であり、 d はメーカー仕様より 0.1 mm とした。 a は試験端末の厚みに関連する値であるが、本稿では文献 [4] 記載

の典型値を用い、 a は 5 mm とした。また、 $\epsilon_{r, shell}$ はファントム容器の比誘電率であり、メーカー仕様より 3.7 とした。確率分布は矩形分布を用いる。

● SAR 補正アルゴリズム

IEC62209-1 規格では、ファントム電気定数の規格値からの偏差が 5% を超え 10% 以内の場合は補正をかけることができるが、その不確かさの評価が必要となる。ただし、本稿の SAR 測定では SAR 補正は行ってないため 0 とする。

● ファントム液剤電気定数の温度依存性(導電率・誘電率)

ファントム液剤の温度依存性の評価は以下の式 (10) から導出する。

$$\begin{aligned} \epsilon_{temp_liqui d_uncertainty}[\%] &= 100 \times \left| \frac{2 \times [\epsilon_r(T_{high}) - \epsilon_r(T_{low})]}{\epsilon_r(T_{high}) + \epsilon_r(T_{low})} \times \frac{2 \text{ }^\circ\text{C}}{T_{high} - T_{low}} \right| \\ \sigma_{temp_liqui d_uncertainty}[\%] &= 100 \times \left| \frac{2 \times [\sigma(T_{high}) - \sigma(T_{low})]}{\sigma(T_{high}) + \sigma(T_{low})} \times \frac{2 \text{ }^\circ\text{C}}{T_{high} - T_{low}} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\epsilon_{temp_liquid_uncertainty} \cdot \sigma_{temp_liquid_uncertainty}$ はそれぞれ誘電率・導電率の温度依存性の不確かさであり、 $\epsilon_r(T_{high}) \cdot \epsilon_r(T_{low})$ 及び $\sigma(T_{high}) \cdot \sigma(T_{low})$ はそれぞれ $T_{high} \cdot T_{low}$ の時の誘電率・導電率である。 $T_{high} \cdot T_{low}$ は、測定時の最高・最低液温度である。本稿では、 T_{high} は 25 °C、 T_{low} は 18 °C とし、それぞれの温度の電気定数を 10 回測定し、その平均値を評価に用いた。確率分布は矩形分布を用いる。

次に、ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例を表 2 から 13 に示す。なお、較正証書等から引用した不確かさについては、正規分布を仮定し除数を 2 と記載してある。SAR 測定装置は Schmidt & Partner Engineering AG 社製 DASY52、SAR プローブは同社製 EX3 DV4 を用いている。また、プローブ等方性については、本測定ではファントム底面に対してほぼ垂直にプローブを挿入することになるため、軸等方性のみを計上している。

表 2 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (733 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.68	N	2	1	3.84	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.31	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.00	N	1	1	0.00	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.09	R	$\sqrt{3}$	1	0.05	∞
RF 環境反射	0.41	R	$\sqrt{3}$	1	0.24	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.13	R	$\sqrt{3}$	1	0.08	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.03	R	$\sqrt{3}$	1	0.59	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.93	R	$\sqrt{3}$	1	0.54	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	2.37	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.44	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	1.10	N	1	0.26	0.78	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.18	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.00	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.03	N	1	0.26	0.27	9
合成標準不確かさ			RSS		7.58	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			79862
拡張不確かさ					14.86	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表3 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (835 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 ν_i または ν_{eff}
測定システム						
プローブ較正	8.11	N	2	1	4.06	∞
等方性(軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.50	R	$\sqrt{3}$	1	0.29	∞
直線性	1.50	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	1.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.09	R	$\sqrt{3}$	1	0.05	∞
RF 環境反射	0.41	R	$\sqrt{3}$	1	0.24	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.14	R	$\sqrt{3}$	1	0.08	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.11	R	$\sqrt{3}$	1	0.64	∞
ポスト処理	2.00	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.51	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.28	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.86	N	1	0.26	0.61	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.07	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.00	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.28	N	1	0.26	0.33	9
合成標準不確かさ			RSS		7.67	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			223584
拡張不確かさ					15.0	

表4 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (900 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 ν_i または ν_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.41	N	2	1	3.71	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	3.77	∞
境界効果	0.81	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.47	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.75	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.00	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.30	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境反射	1.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.85	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.40	R	$\sqrt{3}$	1	0.10	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	0.81	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.49	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.28	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	1.32	N	1	0.26	0.94	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.11	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.00	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.28	N	1	0.26	0.33	9
合成標準不確かさ			RSS		7.59	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			38676
拡張不確かさ					14.9	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 5 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (1450 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.26	N	2	1	3.63	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.20	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.19	R	$\sqrt{3}$	1	0.11	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.52	R	$\sqrt{3}$	1	0.88	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.40	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	0.89	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.16	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.82	N	1	0.26	0.58	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.14	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.00	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.53	N	1	0.26	0.40	9
合成標準不確かさ			RSS		7.59	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			260008
拡張不確かさ					14.9	

表6 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (1624 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	9.12	N	2	1	4.56	∞
等方性(軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.36	R	$\sqrt{3}$	1	0.21	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.20	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.62	R	$\sqrt{3}$	1	0.94	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.31	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.70	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.31	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.77	N	1	0.26	0.55	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.40	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.01	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.64	N	1	0.26	0.43	9
合成標準不確かさ			RSS		8.08	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			430338
拡張不確かさ					15.8	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表7 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (1767.5 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.11	N	2	1	4.06	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.31	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.21	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.65	R	$\sqrt{3}$	1	0.95	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	4.12	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.82	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.75	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.72	N	1	0.26	0.51	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.48	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.70	N	1	0.26	0.44	9
合成標準不確かさ			RSS		7.84	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			497662
拡張不確かさ					15.4	

表 8 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (1950 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 ν_i または ν_{eff}
測定システム						
プローブ較正	7.68	N	2	1	3.84	∞
等方性(軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.89	R	$\sqrt{3}$	1	0.51	∞
直線性	1.50	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	1.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.21	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.67	R	$\sqrt{3}$	1	0.96	∞
ポスト処理	2.00	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	2.53	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.04	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.95	N	1	0.26	0.67	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.99	N	1	0.26	0.52	9
合成標準不確かさ			RSS		7.80	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)						160659
拡張不確かさ					15.3	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表9 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (2018 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.05	N	2	1	4.03	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	1.21	R	$\sqrt{3}$	1	0.70	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.30	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
RF 環境反射	0.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.28	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.27	R	$\sqrt{3}$	1	0.16	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.14	R	$\sqrt{3}$	1	1.24	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.40	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.42	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	1.42	N	1	0.26	1.01	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	2.12	N	1	0.26	0.55	9
合成標準不確かさ			RSS		8.03	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			36213
拡張不確かさ					15.7	

表 10 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (2450 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 ν_i または ν_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.12	N	2	1	4.06	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	2.68	R	$\sqrt{3}$	1	1.55	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.30	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
RF 環境反射	0.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.28	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.32	R	$\sqrt{3}$	1	1.34	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.46	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.42	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	1.10	N	1	0.26	0.78	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.70	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.11	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	2.14	N	1	0.26	0.56	9
合成標準不確かさ			RSS		8.15	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			106629
拡張不確かさ					16.0	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 11 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (2585 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 ν_i または ν_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	12.15	N	2	1	6.08	∞
等方性 (軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	1.38	R	$\sqrt{3}$	1	0.80	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	1.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.68	∞
RF 環境反射	0.71	R	$\sqrt{3}$	1	0.41	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.33	R	$\sqrt{3}$	1	1.35	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.34	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.37	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.66	N	1	0.26	0.47	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.79	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.12	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	2.00	N	1	0.26	0.52	9
合成標準不確かさ			RSS		9.23	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			1355108
拡張不確かさ					18.1	

表 12 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (3500 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	10.19	N	2	1	5.10	∞
等方性(軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.71	∞
境界効果	0.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.10	∞
直線性 ($k=2$)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	1.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.68	∞
RF 環境反射	0.71	R	$\sqrt{3}$	1	0.41	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.72	R	$\sqrt{3}$	1	0.42	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	5.76	R	$\sqrt{3}$	1	3.33	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.40	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.09	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.27	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.22	N	1	0.26	0.87	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.92	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.14	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.29	N	1	0.26	0.60	9
合成標準不確かさ			RSS		9.13	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			111206
拡張不確かさ					17.9	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 13 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例 (5200 MHz)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i> = <i>f</i> (<i>c</i> , <i>g</i>)	<i>e</i>	<i>f</i> = <i>b</i> × <i>e</i> / <i>d</i>	<i>g</i>
不確かさの原因	公差 / 不確かさ ±%	確率分布	除数	感度係数 <i>c_i</i> (10 g)	標準不確かさ ±%, (10 g)	自由度 <i>v_i</i> または <i>v_{eff}</i>
測定システム						
プローブ較正 (<i>k</i> =2)	9.05	N	2	1	4.53	∞
等方性(軸等方性)	4.70	R	√3	1	2.71	∞
境界効果	2.50	R	√3	1	1.44	∞
直線性 (<i>k</i> =2)	1.50	R	2	1	0.75	∞
検出限界 (<i>k</i> =2)	1.00	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0.00	N	√3	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.30	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0.00	R	√3	1	0.00	∞
積分時間	0.00	R	√3	1	0.00	∞
RF 環境雑音	1.17	R	√3	1	0.68	∞
RF 環境反射	0.71	R	√3	1	0.41	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.80	R	√3	1	0.46	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	6.39	R	√3	1	3.69	∞
ポスト処理 (<i>k</i> =2)	2.00	N	2	1	1.15	∞
総合評価試験用放射源						
数値モデルと実物との差異	5.50	N	1	0.84	5.50	∞
電力ドリフト	0.93	R	√3	1	0.54	∞
その他の波源に関する不確かさ要因	2.01	R	√3	1	1.16	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	√3	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.33	R	√3	0.71	1.37	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.09	N	1	0.26	0.77	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.68	R	√3	0.71	0.10	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.60	N	1	0.26	0.68	9
合成標準不確かさ			RSS		9.11	
包含係数 <i>k</i> (信頼の水準 95 %)			1.96			172509
拡張不確かさ					17.9	

表 14 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験における不確かさ要因と標準不確かさ

周波数 (MHz)	733	835	900	1450	1624	1767.5	1950	2018	2450	2585	3500	5200
プローブ較正 (%)	3.84	4.06	3.71	3.63	4.56	4.06	3.84	4.03	4.06	6.08	5.10	4.53
プローブ等方性 (%)	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
境界効果 (%)	0.31	0.29	0.47	0.12	0.21	0.31	0.51	0.70	1.55	0.80	0.10	1.44
数値モデルと実物との差異 (%)	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
拡張不確かさ (%)	14.9	15.0	14.9	14.9	15.8	15.4	15.3	15.7	16.0	18.1	17.9	17.9

表 14 に、主な不確かさ要因について一覧としてまとめた。今回の評価では、プローブ較正や境界効果等、周波数に直接関係する不確かさについては、低い周波数よりも精度の求められる高い周波数の方が大きくなった。また、プローブ等方性及び数値モデルと実物との差異については較正証書等の値を引用しているが周波数にかかわらず一定値のため、例えば周波数ごとに評価をした場合に差がでる可能性がある。結果として、拡張不確かさは全体として 20 % 以内に収まった。

4.3 標準ダイポールの SAR 参照値の決定 [7]

前述のとおり、SAR 測定装置の総合評価試験では、標準放射源として規格等に記載の標準アンテナを用いた測定によりその動作性能を検証する。それらの試験を行う際、例えば標準アンテナは平面ファントム直下に設置した際、反射係数 ($|S_{11}|$) が -20 dB 以下でなければならない [2]-[5]。IEC62209-1 等の規格にはファントム液剤の電気特性と共に、代表的な周波数の標準アンテナの寸法と数値計算により決定された SAR 参照値が記載されている。しかし、使用する周波数が規格に記載されていない場合、ファントムの影響によりアンテナエレメント長は自由空間中の共振長と異なるため、数値計算等による標準アンテナ設計と SAR 参照値の決定がその都度必要となる。

ここでは、規格に記載されていない周波数用のダイポールエレメント長及び SAR 参照値の決定のために実施した、複数機関での比較計算 [7] について述べる。

文献 [7] では、NICT を含む 5 機関において、図 4 のモデルを FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法により計算し、比較した。使用した計算コードは、オリジナルが 1 機関、商用シミュレータ (XFDTD (Remcom Inc)、SEMCAD X (Schmidt & Partner Engineering AG)) が各 2 機関である。

手順としては、最初に計算パラメータとして、表 15 に記載の値を設定した。900 MHz については IEC62209 規格に掲載の標準ダイポール長 L の値及び最小ファントムサイズに準拠しており、規格に記載のない 400 MHz と 2585 MHz の電気定数、ダイポール長、ファントムサイズは前後の周波数の値を線形補間

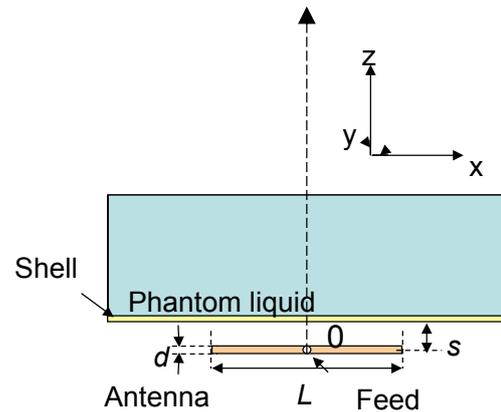


図 4 測定系の評価試験の SAR 参照値計算モデル概略図

表 15 計算パラメータ

周波数 (MHz)	比誘電率	導電率 (S/m)	L (mm)	最小ファントムサイズ (X,Y,Z) (mm)	容器厚み (mm)	s (mm)	d (mm)
400	44.1	0.87	312.7	800, 670, 170	6.3	15	6.35
900	41.5	0.97	149.0	360, 300, 150	2	15	3.6
2585	39.0	1.94	48.8	180, 120, 150	2	10	3.6

※ 900 MHz は文献 [4] 準拠

した。

次に、計算の妥当性確認のため、文献 [4] に値が掲載されている 900 MHz のダイポールについて、 L を表 15 の値の $\pm 5\%$ の範囲で変化させ、 $|S_{11}|$ の計算結果が -20 dB 以下となる素子長を求め SAR 参照値を計算し、規格値と比較した。

計算の妥当性の確認後、400 MHz と 2585 MHz についてもダイポール長の決定のため、900 MHz と同様の計算を行い各機関の結果の平均値を求め、標準ダイポール長と SAR 参照値を決定した。また、計算においてはダイポール素子部分のみを考え、バラン等は考慮しない。また、ファントム容器の側面壁の有無は底面の SAR ピーク値にはあまり影響を与えないためファントム容器は底面のみとし、図 4 に示すように最

表 16 IEC 規格値との比較結果 (900 MHz)

	L (mm)	1 g 平均 SAR 最大 値 (W/kg)	10 g 平均 SAR 最大 値 (W/kg)	局所 SAR (y=0) (W/kg)	局所 SAR (y = 2 cm) (W/kg)
IEC 規格値 [4]	149.0	10.9	7.0	16.4	5.4
計算値	147.8	10.8	6.8	15.9	5.2
各機関の計算結果の相 対標準偏差 (%)	0.8	5.2	4.3	2.9	2.6
IEC 規格値と計算結果 との差異 (%)	-0.8	-1.3	-2.3	-3.0	-4.0

表 17 SAR 規格値の決定結果

周波数 (MHz)	標準ダイポール アンテナ寸法		SAR 規格値 (1 W 入力)		
	エレメント長 L (mm)	エレメント 直径 d _i (mm)	10 g SAR 最大値 (W/kg)	給電点真上の ファントム 表面 局所 SAR (W/kg)	給電点真上から 2 cm の ファントム表面 局所 SAR (W/kg)
400	300.2	6.35	2.7	5.6	2.6
2585	49.1	3.6	24.3	117.5	6.8

小ファントムサイズの直方体のファントム液剤に底面のみファントム容器が存在する計算モデルを用いた。ファントム容器の電気定数は比誘電率 $\epsilon_r = 3.7$ 、 $\tan \delta = 0$ とした。アンテナへの供給電力は、入射電力から反射電力を差し引いた入力電力を 1 W とした。上記の計算条件でまず標準ダイポール長 L を各機関で決定した。次に、そのダイポール長 L における測定系の評価試験に用いる SAR 参照値 (以下の 4 種類) を求めた。

- 1 g 平均 SAR 最大値
- 10 g 平均 SAR 最大値
- 給電点真上のファントムファントム液剤表面 (ファントム底面) の局所 SAR
- 給電点真上から 2 cm 離れた点のファントムファントム液剤表面での局所 SAR

900 MHz の各機関の平均値と規格参照値との比較結果を表 16 に示す。文献 [4] 記載値からの差異は最大 4 % 程度と、例えば同様の計算を行っている文献 [8] と比べてもよい一致が見られた。また、各機関のデータのばらつきも、最大 5 % 程度であった。

次に、400 MHz 及び 2585 MHz の標準ダイポール長 L、の平均値は、400 MHz で 300.2 mm、2585 MHz では 49.1 mm となった。また、SAR 規格値決定結果を表 17 に示す。結果のばらつきは、400 MHz で

最大 5.4 %、2585 MHz で最大 7.2 % であった。これは文献 [3] の該当する合成標準不確かさの典型値の 11.5 % と比較しても、表 15 で指定した以外の各機関の計算パラメータはそれぞれ異なっていること等を考慮すると、おおむねよい一致が得られているといえる。

5 携帯無線機器の SAR 測定不確かさ評価の例

携帯無線機器の SAR 測定には前述のとおり、標準頭部ファントム (SAM) を用いた側頭部での評価と、平板ファントムを用いた Body-worn 測定とがある。それぞれの測定手順については文献 [2]-[5] に詳しい。

SAR 測定の不確かさ要因の大部分は前節の総合評価試験と同じである。ただし、標準アンテナではなく、実際に試験対象の携帯無線端末に起因する不確かさ要因について評価が必要である。そこで本稿ではまず、表 18 に示す SAR 測定時の端末設置の不確かさの type-A 評価結果の例について述べる。次に、不確かさ評価例として、IEC62209 規格に準拠した携帯無線端末 (側頭部・Body-worn) 測定の不確かさ評価例を示す。

まず、端末設置不確かさの評価条件を表 18 に示す。ここで、側頭部以外 (Body-worn) の端末測定位置として 3 通りを設定しているが、国際規格の規定ではマニュアル等で規定されている所定の設置位置で測定することとなっていることにご注意いただきたい。本稿

表 18 SAR 測定 of Type-A 不確かさ評価パラメータ

	側頭部	側頭部以外 (Body-worn)
周波数 (MHz)	835, 1950	
使用ファントム	標準頭部 (SAM)	平板
試験機種数	6	9
端末設置位置	4 通り (右 / 左・頬 / 傾斜)	3 通り (底面-端末距離 0, 5, 15 mm)
繰り返し測定数	5 回	
測定者数	2 名	
通信方式	W-CDMA	

での検討は、所定の位置として規定されている離隔距離が異なる場合の設置の不確かさについても検討するために、異なる離隔距離での測定も実施している。

上記の端末設置不確かさ評価では、側頭部 SAR では、標準不確かさは 835 MHz で 3.35 %、1950 MHz では 3.61 % となった。また、側頭部以外 (body-worn) では、底面-端末距離で多少の差違は見られるものの距離依存性は確認できず、それぞれ最大は 835 MHz で 3.11 %、1950 MHz では 3.90 % であった。

次に、上記の Type-A 評価不確かさをを用いた測定不確かさの評価例として、携帯無線端末測定の不確かさ評価例を表 19 ~ 22 に示す。なお、評価項目は総合評価試験の場合と重複するものも多いので、試験サンプル (試験端末) 関係の項目の評価方法について簡単に示す。

- 試験サンプル位置

試験サンプルのファントムへの設置の不確かさであり、本稿では表 7 の Type-A 評価結果を用いた。

- 保持器の不確かさ

規格で規定する端末保持器を用いて設置した測定と、保持器を用いない設置方法での測定との差異から求める。本稿では、側頭部評価では IEC 62209-1[4] 記載の値を用いた。Body-worn 評価では、保持器は用いず低損失の発泡スチロールを用いたため、0 とした。

- SAR 測定値ドリフト

測定開始時と測定終了時の定点での SAR を比較し、SAR 値のドリフトを評価する。ここでは IEC 62209-1[4] 規格記載の典型値である 5.0 % を用いた。確立分布は矩形分布を用いる。

- SAR 測定値スケールリング

同じ周波数帯で複数の変調方式を用いる端末において、ある変調 (modx) における測定結果から、キャリア周波数が同一等の条件を満たす他の変調 (mody) の SAR を外挿により求めることである。

本稿では SAR 測定値スケールリングは行っていないため、0 とする。

また、表 23 に、主な不確かさの原因を一覧にした。結果として、まず、いずれの測定、周波数においても、大きく影響する要因はプローブ関係 (較正・等方性) 及び端末関連 (設置・保持器・測定ドリフト) であることがわかる。特に、例えば IEC62209-1[4] の試験サンプル位置の不確かさは 6.0 % であり今回の Type-A 評価と比べると 2 % 程度大きくなっていることから、不確かさ低減のためには実機を用いた周波数ごとの評価が重要である。ただし、Body-worn 測定では保持器の不確かさを 0 としているため側頭部より小さくなり、前述の総合評価試験と同程度の不確かさになっている。この点についても、今後、実測による検討が必要であるといえる、周波数への依存性については、今回の 2 周波数の比較ではほとんど確認できなかった。

今回の結果は IEC62209-1[4] 等に掲載されている評価例の値 30 % 弱と比較するとかなり小さい。これは、Body-worn における保持器の影響や変調応答・積分時間等の測定対象信号による不確かさが 0 であることと、ファントム液剤電気定数関連の不確かさが小さいことが主な原因である。変調信号や SAR 補正、電気定数補正等を考慮する場合には、規格の評価例と同程度の不確かさが見込まれる。

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 19 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ評価例 (側頭部 835 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正	8.11	N	2	1	4.06	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.29	∞
直線性	1.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	1	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.09	R	$\sqrt{3}$	1	0.05	∞
RF 環境反射	0.41	R	$\sqrt{3}$	1	0.24	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.14	R	$\sqrt{3}$	1	0.08	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.11	R	$\sqrt{3}$	1	0.64	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	3.35	N	1	1	3.35	239
保持器の不確かさ	5	N	1	1	5.00	7
SAR 測定値ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
SAR 測定値スケーリング	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0.00	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.51	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.62	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.86	N	1	0.26	0.61	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.07	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.01	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.28	N	1	0.26	0.33	9
合成標準不確かさ			RSS		8.7	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.00			64
拡張不確かさ					17.4	

表 20 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ評価例 (側頭部 1950 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正	7.68	N	2	1	3.84	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.69	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	7.76	R	$\sqrt{3}$	1	0.51	∞
直線性	7.56	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	0.89	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	1.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	1	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.3	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.96	∞
ポスト処理	0.21	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	3.61	N	1	1	3.61	239
保持器の不確かさ	5.00	N	1	1	5.00	7
SAR 測定値ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
SAR 測定値スケーリング	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	2.53	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.04	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.95	N	1	0.26	0.67	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.99	N	1	0.26	0.52	9
合成標準不確かさ			RSS		8.90	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)					1.99	69
拡張不確かさ					17.7	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 21 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ評価例 (Body-worn 835 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ校正	8.11	N	2	1	4.06	∞
等方性 (プローブ軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	2.71	∞
境界効果	0.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.29	∞
直線性	1.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	1	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.09	R	$\sqrt{3}$	1	0.05	∞
RF 環境反射	0.41	R	$\sqrt{3}$	1	0.24	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.14	R	$\sqrt{3}$	1	0.08	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.11	R	$\sqrt{3}$	1	0.64	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	3.11	N	1	1	3.11	269
保持器の不確かさ※	0.0	N	1	1	0.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.27	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.514	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.62	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.86	N	1	0.26	0.61	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.07	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.01	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.28	N	1	0.26	0.33	9
合成標準不確かさ			RSS		6.2	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			3778
拡張不確かさ					12.1	

表 22 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ評価例 (Body-worn 1950 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正	7.68	N	2	1	3.84	∞
等方性 (プローブ軸等方性)	4.70	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	2.71	∞
境界効果	7.76	R	$\sqrt{3}$	1	0.51	∞
直線性	7.56	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界	0.89	R	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
変調応答	1.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	1	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0.3	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外壳に対する プローブ位置	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.96	∞
ポスト処理	0.21	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	3.90	N	1	1	3.90	2659
保持器の不確かさ	0.0	N	1	1	0.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.3	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の 補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	2.53	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.04	∞
ファントム液剤導電率 (測定値)	0.95	N	1	0.26	0.67	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率 (測定値)	1.99	N	1	0.26	0.52	9
合成標準不確かさ			RSS		6.7	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.96			1947
拡張不確かさ					13.1	

表 23 携帯無線端末 SAR 測定標準不確かさ評価例

	側頭部		Body-worn	
	835	1950	835	1950
周波数 (MHz)	835	1950	835	1950
プローブ較正 (%)	4.13	3.88	4.13	3.88
プローブ等方性 (%)	4.36	4.36	2.71	2.71
試験サンプル位置 (%)	3.35	3.61	3.11	3.90
ホルダ不確かさ (%)	5.00	5.00	0.00	0.00
拡張不確かさ (%)	17.4	17.7	12.1	13.1

6 携帯無線機器の SAR 測定不確かさの計算による評価の例

前項でも述べたとおり、試験サンプル関連の不確かさは測定には大きく影響する要素であるため、実機の測定を用いた Type-A 等の評価は欠かせない。ただし、例えば実機の入手が困難な場合でも、評価済みデータ等を用いてある程度の不確かさの推定は可能である。そこで、ここでは前項で Type-A 評価を実施した周波数以外の SAR プローブ較正周波数における SAR 測定不確かさを計算した。側頭部 SAR 測定不確かさの計算例を、表 24 から 33 に示す。試験サンプルの不確かさについては、実測を行った 835 MHz と 1950 MHz の評価結果の最大値である 3.90 % を用いることにした。この場合、側頭部測定と body-worn 端末測定の違いは、プローブ等方性評価に軸等方性が含まれる点とホルダ不確かさの有無のみになるため、詳細なバジェット表については側頭部測定のみ掲載することとした。

表 34 及び 35 に、SAR 測定の不確かさ計算結果についてまとめた。周波数特性については、周波数が高くなるにつれ側頭部・Body-worn とともに不確かさが大きくなるのがわかる。測定を行った 835 MHz/1950 MHz と同様に、いずれの測定及び周波数においても、大きく影響する要因はプローブ関係(較正・等方性)及び端末関連(設置・保持器・測定ドリフト)であり、やはり基本的には携帯端末の実機を用いた評価が重要であることがわかる。周波数への依存性については、今回の計算結果からは周波数が高くなると不確かさは大きくなるが、20 % 前後であることが推定できる。ただし、特に端末設置関連の不確かさは周波数が高くなるにつれ大きくなると予想できるため、今後、実機の入手できる周波数については、設置の Type-A 評価やホルダの評価等、より詳細な不確かさの評価を行っていく必要がある。

7 あとがき

本稿では、SAR 測定方法及びその不確かさ評価について、測定結果の妥当性検証に用いられる測定計を元に標準規格に沿った手法と具体例を挙げた。SAR 測定系はファントム電気定数等、周波数により特性が異なるため、多くの不確かさ要因の評価は周波数ごとに実施する必要がある。また、実機を用いた Type-A 評価やホルダ不確かさの実施も重要である。

また、最近の動向としては、端末の多様化・多周波数化等に伴う試験数の増加が問題となっているため、高速 SAR 測定方法や試験数削減方法が採用されてきている [1][2][4]。さらに、図 1 に示す単一のプローブを用いてファントム内を走査する方法以外にも、複数のアレーセンサを使用し高速に SAR を測定するシステムが開発されており、これを使った SAR 評価方法の標準化作業も進められている。NICT を含む日本からも、IEC 等の標準規格に新形状のファントムを用いた SAR 評価方法の簡易化について提案している [9]。また、従来の単一電界プローブを用いてファントム内部をスキャンする方法についても、周波数帯域の拡張や内蔵アンテナが主流となった等の携帯無線機器の動向を踏まえ、測定間隔や保持器の特性など測定の見直しの必要性が指摘されている。これらの新しい技術動向に対応していくために、システム評価用波源や不確かさ評価方法など、測定結果の妥当性を担保する方法について継続して検討していく必要がある。

表 24 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 733 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.68	N	2	1	3.84	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.31	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.09	R	$\sqrt{3}$	1	0.05	∞
RF 環境反射	0.41	R	$\sqrt{3}$	1	0.24	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.13	R	$\sqrt{3}$	1	0.08	∞
ファントム外壳に対する プローブ位置	1.03	R	$\sqrt{3}$	1	0.59	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2	N	2	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.93	R	$\sqrt{3}$	1	0.5	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補 正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	2.37	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.44	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.1	N	1	0.26	1.68	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.18	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.00	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.03	N	1	0.26	0.05	9
合成標準不確かさ			RSS		10.1	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.01			50
拡張不確かさ					20.2	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 25 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 900 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.41	N	2	1	3.71	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.81	R	$\sqrt{3}$	1	0.47	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
RF 環境反射	1.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.85	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.10	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.4	R	$\sqrt{3}$	1	0.81	∞
ポスト処理 ($k=2$)	2	N	2	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	1.34	R	$\sqrt{3}$	1	0.77	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補 正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.49	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.61	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.32	N	1	0.26	0.94	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.11	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.02	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.28	N	1	0.26	0.33	9
合成標準不確かさ			RSS		10.0	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.01			48
拡張不確かさ					20.1	

表 26 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 1450 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	7.26	N	2	1	3.63	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.2	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.19	R	$\sqrt{3}$	1	0.11	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.52	R	$\sqrt{3}$	1	0.88	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.4	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補 正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.49	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.36	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.32	N	1	0.26	0.58	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.11	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.02	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.28	N	1	0.26	0.40	9
合成標準不確かさ			RSS		9.9	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.01			47
拡張不確かさ					20.0	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 27 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 1624 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	9.12	N	2	1	4.56	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.36	R	$\sqrt{3}$	1	0.21	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.2	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.62	R	$\sqrt{3}$	1	0.94	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.3	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.168	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.70	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.70	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.77	N	1	0.26	0.55	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.40	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.06	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.64	N	1	0.26	0.43	9
合成標準不確かさ			RSS		10.4	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)						
拡張不確かさ						

表 28 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 1767.5 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.24	N	2	1	4.12	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.53	R	$\sqrt{3}$	1	0.31	∞
直線性	1.5	R	$\sqrt{3}$	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.13	∞
RF 環境反射	0.97	R	$\sqrt{3}$	1	0.56	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.21	R	$\sqrt{3}$	1	0.12	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	1.65	R	$\sqrt{3}$	1	0.95	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.1	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補 正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	1.82	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.75	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.72	N	1	0.26	0.51	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.48	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	1.70	N	1	0.26	0.44	9
合成標準不確かさ			RSS		10.3	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.00			55
拡張不確かさ					20.7	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 29 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 2018 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.11	N	2	1	4.06	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	1.21	R	$\sqrt{3}$	1	0.70	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.3	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
RF 環境反射	0.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.28	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.27	R	$\sqrt{3}$	1	0.16	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.14	R	$\sqrt{3}$	1	1.24	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.4	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.42	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.42	N	1	0.26	1.01	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.47	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.07	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.12	N	1	0.26	0.55	9
合成標準不確かさ			RSS		10.1	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.01			51
拡張不確かさ					20.3	

表 30 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 2450 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	8.05	N	2	1	4.03	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	2.68	R	$\sqrt{3}$	1	1.55	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0.3	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
RF 環境反射	0.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.28	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.32	R	$\sqrt{3}$	1	1.34	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.23	R	$\sqrt{3}$	1	0.10	∞
SAR 測定値スケールリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.01	R	$\sqrt{3}$	1	1.16	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.46	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.42	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.1	N	1	0.26	0.23	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.70	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.11	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.14	N	1	0.26	0.56	9
合成標準不確かさ			RSS		10.3	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.01			54
拡張不確かさ					20.6	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 31 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 2585 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	12.15	N	2	1	6.08	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	1.38	R	$\sqrt{3}$	1	0.80	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	1.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.68	∞
RF 環境反射	0.71	R	$\sqrt{3}$	1	0.41	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	2.33	R	$\sqrt{3}$	1	1.35	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.46	R	$\sqrt{3}$	1	0.3	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補 正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.34	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.37	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	0.66	N	1	0.26	0.14	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.79	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.12	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2	N	1	0.26	0.52	9
合成標準不確かさ			RSS		10.3	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			2.00			55
拡張不確かさ					20.7	

表 32 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 3500 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	10.2	N	2	1	5.10	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	7.56	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.36	∞
境界効果	0.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.10	∞
直線性 ($k=2$)	1.5	R	2	1	0.75	∞
検出限界 ($k=2$)	1	N	2	1	0.58	∞
変調応答	0	N	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
読出し電子機器	0.3	N	1	1	0.30	∞
応答時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	1.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.68	∞
RF 環境反射	0.71	R	$\sqrt{3}$	1	0.41	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.72	R	$\sqrt{3}$	1	0.42	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	5.76	R	$\sqrt{3}$	1	3.33	∞
ポスト処理	2	R	$\sqrt{3}$	1	1.15	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.69	R	$\sqrt{3}$	1	0.4	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.09	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.27	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.22	N	1	0.26	0.26	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.92	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.14	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.29	N	1	0.26	0.60	9
合成標準不確かさ			RSS		11.3	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.99			78
拡張不確かさ					22.4	

3 無線機器の試験技術の研究開発

表 33 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例 (側頭部 5200 MHz)

a	b	c	d $=f(c,g)$	e	f $=b \times e/d$	g
不確かさの原因	公差 / 不確かさ $\pm\%$	確率分布	除数	感度係数 c_i (10 g)	標準不確かさ $\pm\%$, (10 g)	自由度 v_i または v_{eff}
測定システム						
プローブ較正 ($k=2$)	9.05	N	2	1	4.53	∞
等方性 (プローブ軸等方性と半球面等方性)	9.10	R	$\sqrt{3}$	$\sqrt{0.5}$	4.55	∞
境界効果	7.56	R	$\sqrt{3}$	1	4.36	∞
直線性 ($k=2$)	2.5	R	2	1	1.44	∞
検出限界 ($k=2$)	1.5	N	2	1	0.75	∞
変調応答	1	N	$\sqrt{3}$	1	0.58	∞
読出し電子機器	0	N	1	1	0.00	∞
応答時間	0.3	R	$\sqrt{3}$	1	0.30	∞
積分時間	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境雑音	0	R	$\sqrt{3}$	1	0.00	∞
RF 環境反射	1.17	R	$\sqrt{3}$	1	0.68	∞
プローブ走査装置の機械的制限	0.71	R	$\sqrt{3}$	1	0.41	∞
ファントム外殻に対する プローブ位置	0.8	R	$\sqrt{3}$	1	0.46	∞
ポスト処理	6.39	R	$\sqrt{3}$	1	3.69	∞
試験サンプル関係						
試験サンプル位置	6.0	N	1	1	6.0	11
保持器の不確かさ	5.0	N	1	1	5.0	7
SAR 測定値ドリフト	0.93	R	$\sqrt{3}$	1	0.5	∞
SAR 測定値スケーリング	0.0	R	$\sqrt{3}$	1	0.0	∞
ファントムとセットアップ						
ファントムの不確かさ (形状と厚さの公差)	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19	∞
ファントム液剤導電率・誘電率の差異の補正アルゴリズム	0	N	1	0.84	0.00	∞
ファントム液剤導電率の温度不確かさ	3.33	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.37	∞
ファントム液剤導電率(測定値)	1.09	N	1	0.26	0.77	9
ファントム液剤誘電率の温度不確かさ	0.68	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.10	∞
ファントム液剤誘電率(測定値)	2.6	N	1	0.26	0.68	9
合成標準不確かさ			RSS		11.1	
包含係数 k (信頼の水準 95 %)			1.99			74
拡張不確かさ					22.2	

表 34 側頭部 SAR 測定における主な不確かさ要因と標準不確かさ計算値

周波数 (MHz)	733	900	1450	1624	1767.5	2018	2450	2585	3500	5200
プローブ較正 (%)	3.84	3.71	3.63	4.56	4.06	4.06	4.03	4.06	6.15	5.10
プローブ等方性 (%)	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36
試験サンプル位置 (%)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
ホルダ不確かさ (%)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
拡張不確かさ (%)	20.2	20.1	20.0	20.7	20.3	20.6	20.7	22.4	22.2	22.1

表 35 Body-worn SAR 測定における主な不確かさ要因と標準不確かさ計算値

周波数 (MHz)	733	900	1450	1624	1767.5	2018	2450	2585	3500	5200
プローブ較正 (%)	3.92	3.77	3.69	4.65	4.12	4.06	4.10	6.12	5.17	4.55
プローブ等方性 (%)	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
試験サンプル位置 (%)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
ホルダ不確かさ (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
拡張不確かさ (%)	13.2	12.9	12.8	13.9	13.3	13.7	13.9	16.4	16.1	16.0

謝辞

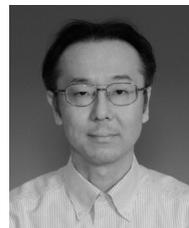
本研究の一部は、総務省からの受託研究「電波の安全性評価技術」により実施された。

【参考文献】

- 1 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「人体側頭部を除く人体に近接して使用する無線機器等に対する比吸収率の測定方法」一部答申 (H23.9)
- 2 電波産業会標準規格：携帯型無線端末の比吸収率測定法, ARIB STD-T56 3.3 版 (2015)
- 3 IEEE Standard 1528-2013 - IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, 2013
- 4 IEC 62209-1:2016, Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz), (2016).
- 5 IEC 62209-2:2010 : Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz), 2010
- 6 Schmidt & Partner Engineering AG, DASY5 Manual V52, November 2011 Application note
- 7 浜田ほか, 携帯無線機器の比吸収率測定装置の精度保証 - 評価試験用標準アンテナの設計, 信学技報 EMCJ2015-1, pp.1-4 (2015)
- 8 Ali *et.al.*, Threshold Power of Canonical antennas for inducing SAR at compliance limits in the 300-3000 MHz frequency range, IEEE Trans. EMC, vol.49, no.1, pp.143-152, Jan. 2007.
- 9 Hamada *et.al.*, A Corner-Rounded Flat Phantom for the Compliance Test for Mobile Phones, Bio EM 2009, p56, June 2009.

浜田リラ (はまだ りら)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究員
博士(工学)
生体電磁工学



渡辺聡一 (わたなべ そういち)

電磁波研究所
電磁環境研究室
研究マネージャー
博士(工学)
生体電磁工学

正誤表

・P.159 表 2 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例(733 MHz)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i> = <i>f</i> (<i>c</i> , <i>g</i>)	<i>e</i>	<i>f</i> = <i>b</i> × <i>e</i> / <i>d</i>	<i>g</i>	
(省略)							
拡張不確かさ					(誤)14.86 (正)14.9		

・P.165 表 8 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例(1950 MHz)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i> = <i>f</i> (<i>c</i> , <i>g</i>)	<i>e</i>	<i>f</i> = <i>b</i> × <i>e</i> / <i>d</i>	<i>g</i>
(省略)						
包含係数 <i>k</i> (信頼の 水準 95%)			(誤)空白 (正)1.96			160659

・P.170 表 13 ダイポールアンテナを用いた総合評価試験の不確かさ評価例(5200 MHz)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i> = <i>f</i> (<i>c</i> , <i>g</i>)	<i>e</i>	<i>f</i> = <i>b</i> × <i>e</i> / <i>d</i>	<i>g</i>	
(省略)							
拡張不確かさ					(誤)17.9 (正)17.8		

・P.182 表 27 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 1624MHz)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i> = <i>f</i> (<i>c</i> , <i>g</i>)	<i>e</i>	<i>f</i> = <i>b</i> × <i>e</i> / <i>d</i>	<i>g</i>	
(省略)							
合成標準不確かさ			RSS		(誤)10.4 (正)10.3		
包含係数 <i>k</i> (信頼の水 準 95%)			(誤)空白 (正)2.00			(誤)空白 (正)55	
拡張不確かさ					(誤)空白 (正)20.7		

・P.183 表 28 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 1767.5MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
合成標準不確かさ			RSS		(誤)10.3 (正)10.1	
包含係数 k (信頼の水 準 95%)			(誤)2.00 (正)2.01			(誤)55 (正)51
拡張不確かさ					(誤)20.7 (正)20.3	

・P.184 表 29 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 2018MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
合成標準不確かさ			RSS		(誤)10.1 (正)10.3	
包含係数 k (信頼の水 準 95%)			2.01			(誤)51 (正)54
拡張不確かさ					(誤)20.3 (正)20.6	

・P.185 表 30 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 2450 MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
RF 環境反射	0.48	R	$\sqrt{3}$	1	0.28	∞
(誤)ファントム外殻に 対するプローブ位置 (正)プローブ走査装置の 機械的制限	0.29	R	$\sqrt{3}$	1	0.17	∞
(省略)						
包含係数 k (信頼の水 準 95%)			(誤)20.1 (正)20.0			(誤)54 (正)55
拡張不確かさ					(誤)20.6 (正)20.7	

・P.186 表 31 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 2585 MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
合成標準不確かさ			RSS		(誤)10.3 (正)11.3	
包含係数 k (信頼の水準 95%)			(誤)2.00 (正)1.99			(誤)55 (正)78
拡張不確かさ					(誤)20.7 (正)22.4	

・P.187 表 32 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 3500 MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
合成標準不確かさ			RSS		(誤)11.3 (正)11.1	
包含係数 k (信頼の水準 95%)			1.99			(誤)78 (正)74
拡張不確かさ					(誤)22.4 (正)22.2	

・P.188 表 33 携帯無線端末 SAR 試験の測定不確かさ計算例(側頭部 5200 MHz)

a	b	c	d = $f(c,g)$	e	f = $b \times e/d$	g
(省略)						
包含係数 k (信頼の水準 95%)			1.99			(誤)74 (正)73
拡張不確かさ					(誤)22.2 (正)22.1	

以上