

4-7 SAR プローブの較正と不確かさ評価

4-7 SAR Probe Calibration and Uncertainty Evaluation

川上 博士 清水 悠斗 長岡 智明

KAWAKAMI Hiroshi, SHIMIZU Yuto, and NAGAOKA Tomoaki

比吸収率 (Specific Absorption Rate: SAR、以下、SAR) プローブの較正とは、損失のある生体等価液剤中での電界測定用センサの較正であり、生体等価液剤を充填した較正用導波管を用いる標準電界法が一般的に用いられている。NICT では我が国で唯一、SAR プローブの較正業務を実施している。本稿では、NICT における較正手順及び較正結果、不確かさ評価について述べる。

SAR (specific absorption rate) probe calibration is a calibration for the electric field probe in a lossy dielectric liquid. Generally, the calibration is performed by the standard electric field method using a waveguide filled with a tissue equivalent liquid. NICT is the only institute in Japan that performs calibration of the SAR probe. This paper describes the calibration method of the SAR probe and the results of uncertainty evaluation.

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。SAR とは、下記に定義されるとおり、生体組織 (損失性誘電体) に吸収される電力である。損失のある媒質 (生体等価液剤など) 中の SAR は、電界 (E) 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 (1) が与えられる。

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 σ は導電率、 ρ は媒質の密度である。

国内外において、SAR の指針値が設けられており [1]-[6]、主に携帯電話等の身体に近接して使用される無線通信装置に適用されている。したがって、携帯電話等の携帯無線通信装置に対して、SAR の指針値への適合性評価試験が国内外の標準規格や法的規制 [7][8] にのっとって行われている。

無線通信機器の試験に用いる測定装置は法令に基づき、定期的に較正を行うことが必要とされている。SAR を指針値とする無線通信端末の適合性評価試験においては、SAR を算出するための電界測定に SAR プローブと呼ばれる損失媒質中で利用可能な電界プローブが用いられており、このプローブの較正が必要となる。NICT は、我が国で唯一 SAR プローブ較正業務を実施している機関である。

2020 年に 5G でのサービスが開始された背景から、5G sub-6 で使用される周波数での SAR 測定でも必要となってきたため、これらに該当する周波数における SAR プローブ較正も実施している。また、NICT では SAR プローブ較正の不確かさ評価にも取り組んでおり [9]、近年では不確かさバジレットの項目や評価方法についての見直しを行い、再評価を行っている。ここで、不確かさバジレットとは、測定における不確かさを算出するために用いられ、測定結果がばらつく要因 (測定機器や評価式の影響) をまとめたものであり、各項目での不確かさを合成し、合成標準不確かさを求めることで、不確かさが評価される。なお、文献 [9] から再検討を行った項目としては、背景雑音や高次モードの影響の不確かさバジレットへの追加と、電界強度均一性の評価方法の見直しである。

本稿では NICT の較正業務に採用している導波管を用いた較正手法における SAR プローブの較正不確かさについて述べる。またその詳細手順や測定例及び不確かさ評価例を示す。

2 SAR プローブの構造と較正係数 [8][10]

無線機器の適合性評価に用いられる SAR 測定システムの構成を図 1 に示す。SAR 測定では人体を模擬した容器とそれに充填される人体と電氣的に等価である生体等価液剤で構成されるファントムと呼ばれるものが使用される。このファントム近傍に無線通信端末を

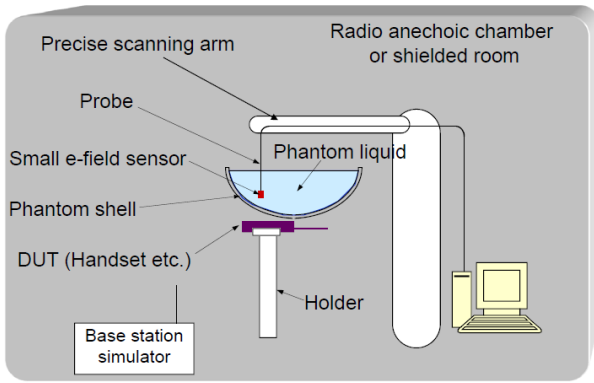


図1 SAR測定装置概要

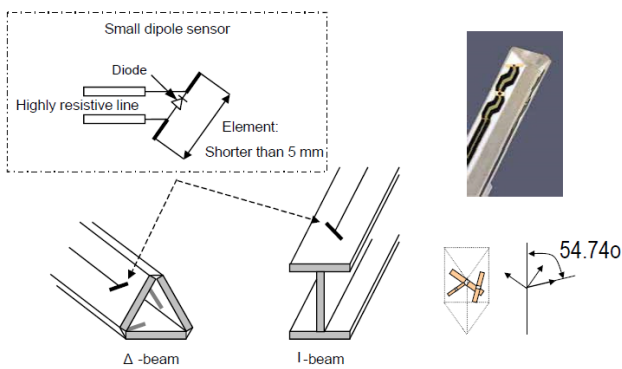


図2 SARプローブの構造

配置し、そこから放射され、ファントム内に発生する電界をSARプローブにより測定することでSARの算出を行う。図2にSARプローブ構造を示す。典型的なSARプローブの構造は、3つの微小ダイポールアンテナ ($i=0 \sim 2$) のエレメント間にショットキーダイオードを挟んだセンサを Δ 構造に配置した3軸直交アンテナとなっている [11]。

ここで、SARプローブに対する入射電界は、ダイオードの2乗検波特性により、各センサが配置された位置における電界強度 E_i の2乗に比例する電圧 V_i として出力される。そのため、センサ中心位置の入射電界強度 E は式(2)に示すように、3つのセンサが受信する電界強度の2乗和で与えられる。

$$|E|^2 = \sum_{i=0}^2 |E_i|^2 = \sum_{i=0}^2 \frac{V_i}{K_i} \quad (2)$$

ここで、 K_i は各センサの較正係数である。そのため、SARプローブへの入射電界と出力電圧を関連づける値である較正係数を求める必要がある。また、この較正係数は周囲の媒質の電気定数により変動するため、SAR測定に用いられる生体等価液剤中における較正係数を求めなければならない。また、各センサが実際に検出する電圧 U_i は、ダイオード圧縮 (diode

compression) DCP_i の非線形性の影響を受けるため、式(3)による補正 (DCP_i の較正) を行い、式(2)で想定している電圧 V_i に変換する。

$$V_i = U_i + \frac{U_i^2}{1000 \times DCP_i} \quad (3)$$

そして、較正係数 K_i は、各センサの自由空間中の感度係数 NF_i 及び自由空間と生体等価液剤中での感度係数の比である変換係数 $Factor$ との積として表すことができる。

$$K_i = NF_i \times Factor \quad (4)$$

なお、変換係数 $Factor$ は各センサによらないことを前提としている。よって、較正位置でのSARプローブの検出電圧 U_i を以下の式(5)に当てはめることで変換係数 $Factor$ を算出できる。

$$Factor = |E|^{-2} \sum_{i=0}^2 NF_i^{-1} \left(U_i + \frac{U_i^2}{1000 \times DCP_i} \right) \quad (5)$$

図2に示すような3つのセンサを持つSARプローブの場合は、中空導波管内やTEMセル等でまず3センサの自由空間中の感度係数 NF_i を求め、さらに生体等価液剤中感度係数 $Factor$ を求め最終的な較正係数 K_i を決定するという手順が取られる。NICTにおいては、較正係数として K_i の値を提供している。

3 プローブ較正の原理

3.1 較正用導波管を用いたプローブ較正システム [8]

SARプローブの較正では、生体等価液剤を充填した方形導波管内に標準電界を発生させ、そこに対象プローブを挿入し、標準電界とプローブ出力電圧を比較する導波管法が一般的に用いられている。較正システムの概要を図3に示す。

導波管下部には空気が満たされており、基本モード (TE_{10}) が最下部の同軸導波管変換器から上方に伝播している。較正用導波管の上部には誘電体スラブの仕切りがあり、その上部に生体等価液剤が充填されている。生体等価液剤の深さは、生体等価液剤内の波長で表皮深さ δ の3倍以上が望ましい。生体等価液剤は高損失の誘電体であるため、誘電体スラブは空気と生体等価液剤の間での反射を抑えるために1/4波長整合板となるように誘電率と厚みが調整されている。現在使用されている較正用導波管では、生体等価液剤を充填した状態で、同軸導波管変換器の入力ポートで $-10 \sim -20$ dB以下の反射係数となるように製作されている。

誘電体スラブの構造及び素材は多岐にわたるが、

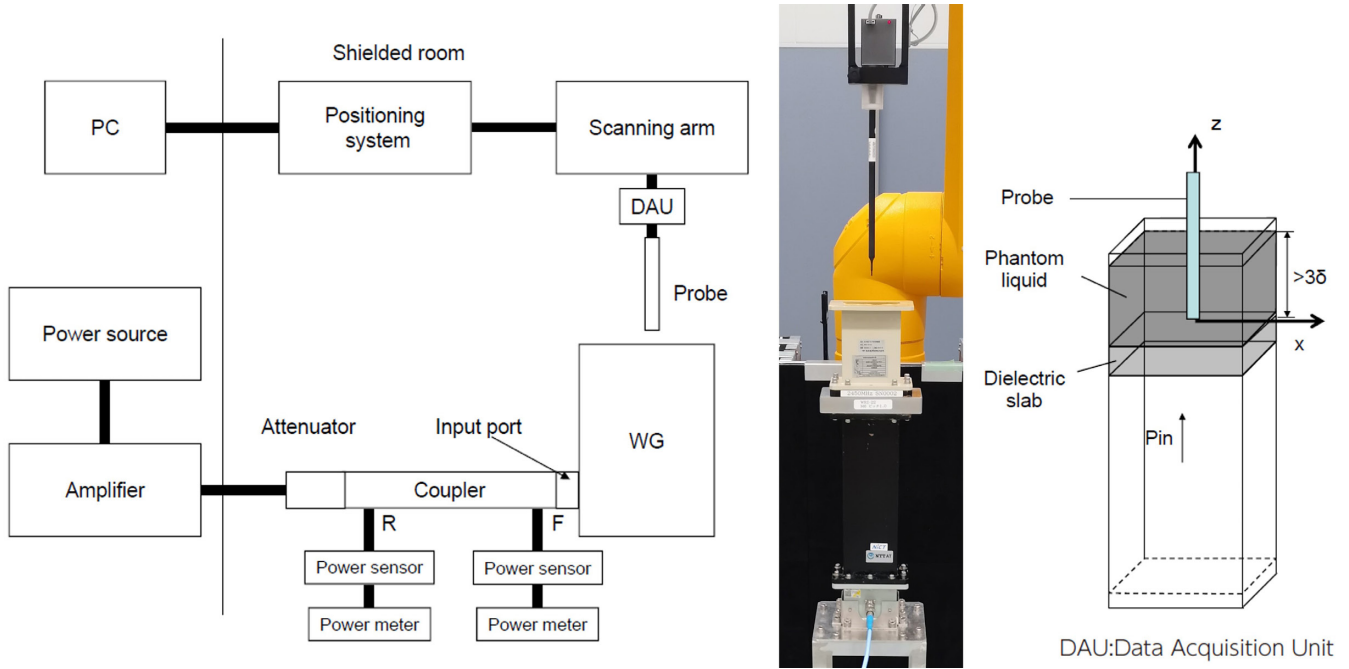


図3 較正用導波管を用いた SAR プロローブ較正システムと概略図

NICT では基本的に PEEK (ポリエーテルエーテルケトン: polyetheretherketone) 樹脂製の 1 枚板を用い、厚みを 1/4 波長前後とすることで整合を取っている。ただし、実際に十分な整合を取るためには生体等価液剤電気定数の影響も考慮する必要があるため、試作や数値シミュレーション等による厚みの微調整が必要である。また、使用環境を考慮すると耐水・耐食性が必須であるため、ポリイミドフィルムで両面をコーティングしている。フィルム表面に傷・気泡が生じると不整合の原因になるため、十分に注意する必要がある。また、カットオフ周波数を考慮すると周波数が低くなるにつれ導波管サイズも大きくなることから、測定装置の取り回し等を考慮すると、本手法は 700 MHz 以上の周波数に適しているといえる。

SAR プロローブ較正では、SAR プロローブで生体等価液剤内部の電界を測定し、プローブの出力電圧と標準電界を関係付けることで較正を実施する。誘電体スラブによる生体等価液剤部分の反射が十分に抑制されている場合、生体等価液剤が充填されている較正用導波管中央付近では、下部の中空導波管の TE_{10} モードとほぼ変わらない開口面内分布となる。また、生体等価液剤による減衰があるため、深さ方向 (図 3 の z 方向) には指数関数的な減衰勾配を持つことになる。中心軸上で深さ方向 z の標準電界の大きさは、入力電力 P_{in} より下記の式 (6) で求めることができる。

$$E(z) = \sqrt{\frac{4 \times P_{in}}{ab\delta\sigma}} \times \exp\left(-\frac{2z}{\delta}\right) \quad (6)$$

ここで、 a は導波管長辺、 b は導波管短辺、 δ は生

体等価液剤の浸透深さ、 σ は生体等価液剤の導電率、 z は誘電体平板部からの距離を示す。SAR には一次標準が存在しないため、国家標準等とのトレーサビリティは入力電力 P_{in} の測定に用いる較正された電力計で確保される。

また、導波管中心近辺においては、導波管内の電界分布は TE_{10} モードが主となるため、短辺 (y) 方向の電界分布はほぼ一定となり、位置 z においては式 (6) の $E(z)$ を用いて、長辺 (x) 方向の分布は下記の式 (7) で近似できる。

$$|E(x)|^2 \cong E_{(z)}^2 \left(\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right)^2 \quad (7)$$

3.2 較正用導波管を用いたプローブ較正手順

以下に NICT で実施している具体的な較正手順を示す。データは市販の SAR 測定システム (Schmidt & Partner Engineering AG 社製 DASY52) を用いて取得している。

① 生体等価液剤の電気定数測定

生体等価液剤の電気定数を測定する。測定値が表 1 の目標値と比較して $\pm 3\%$ 以上離れていた場合、生体等価液剤を調整する。なお、表 1 の電気定数は IEC/IEEE62209-1528 [8] 等の SAR 測定規格により規定されている。IEC/IEEE62209-1528 [8] では、4 MHz - 10 GHz のいくつかの周波数において規格値が定められており、規格に記載のない周波数の値については、線形補間で求める。

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表1 生体等価液剤電気定数の規格値

| 周波数 [MHz] | 比誘電率 ϵ'_y | 導電率 σ [S/m] |
|-----------|--------------------|--------------------|
| 733 | 42.0 | 0.89 |
| 835 | 41.5 | 0.90 |
| 900 | 41.5 | 0.97 |
| 1450 | 40.5 | 1.20 |
| 1624 | 40.3 | 1.30 |
| 1767.5 | 40.0 | 1.38 |
| 1950 | 40.0 | 1.40 |
| 2450 | 39.2 | 1.80 |
| 3500 | 37.9 | 2.91 |
| 3900 | 37.5 | 3.33 |
| 4600 | 36.7 | 4.04 |
| 5200 | 36.0 | 4.66 |
| 5600 | 35.5 | 5.07 |
| 5800 | 35.3 | 5.27 |

斜体は各周波数の内挿で求めた値

② 測定系準備

図3に示すように開口面が水平になるように設置した較正用導波管を、走査用ロボットアーム付近に設置する。この場合、導波管内の伝搬方向は図3のz方向となる。較正用導波管に生体等価液剤を充填する。

③ 較正用導波管のS11測定

ネットワークアナライザにて、較正用導波管の入力ポート(図3のInput port)側でのS11を測定する。⑥及び⑧で述べる較正係数算出時の較正用導波管の入力電力の決定には、この値を用いる。

④ 入力電力の決定と調整

まず、方向性結合器の較正用導波管接続用ポート(Input port)側に電力計を直接接続し、出力値が規定の電力値になるよう、信号発生器の出力を調整する。その際のパワーメータF(方向性結合器の進行方向電力の出力)の読み値(オフセット)を記録した後、較正用導波管接続用ポートに直接接続された電力計を外し、較正用導波管と方向性結合器を直結する。較正中は、方向性結合器に接続したパワーメータFの読み値が上記で求めたオフセット値と一致するよう、信号発生機出力を微調整する。較正用導波管への入力電力Pinは、24.0 dBm(1 GHz以下)、22.0 dBm(1 GHz以上)±0.1 dBm以内としている。なお、入力電力は、上記パワーメータFの読み値を、較正用導波管のS11を用いて補正して求める。また、R portの電力計の読み値は入力電力の制御に直接は使用しな

いが、較正作業中に過大な電力が反射してきていないかどうかの確認に用いている。

⑤ 較正用導波管位置のSAR測定システムへの教示
まず、SAR測定システムを起動し、付属のレーザー変位計を用い、SARプローブの正規化(プローブ軸が垂直になるように調整する位置教示)を行う。次に、較正用導波管の上端の基準点を用いて、較正用導波管の位置のSAR測定システムへの教示を行う。

⑥ 較正用データシートの準備

測定値と理論値(式(6))への曲線当てはめ(⑧で詳述)による較正係数Kiの導出には、専用のデータシートを用いてデータの後処理を行っている。まず、準備として較正用データシートに下記パラメータを記入する。

- ▶生体等価液剤電気定数：測定値を用いる。
- ▶較正用導波管のS11：測定値を用いる。
- ▶3軸センサごとの感度比(自由空間)：初期値として1を入力する。
- ▶境界効果補正パラメータ：メーカー較正証書記載の値を用いる。
- ▶※境界効果補正を用いないことも可能であるが、補正を用いない場合、測定値が表面付近で過大となる傾向がある[13]。
- ▶ダイオード圧縮(DCP)補正係数：メーカー較正証書記載の値を用いる。なお、DCP補正係数は周囲(空気・生体等価液剤)の電気定数の条件によらないため、自由空間中(TEMセルや導波管)での較正が可能である。

⑦ 較正ジョブの実行

下記の一連の動作をまとめた較正用ジョブを5回実行し、測定データ(各センサ出力電圧値)をデータシートにエクスポートする。

- (ア) プローブを導波管中央の所定の位置(⑧で詳述)に移動する。
- (イ) プローブに接続されたタッチセンサによる誘電体スラブ面(生体等価液剤最下面: z=0 mm)を検出。ただし、実際の測定位置はセンサのプローブ先端からのz方向オフセット(EX3DV4プローブでは1 mm)を考慮する。
- (ウ) RF出力オン
- (エ) z=5 mmにおいて軸等方性の測定する(回転角15度ごとに測定)。
- (オ) ロボットアームのz方向(導波管深さ方向)走査する(1 mmごと)。

表 2 導波管較正における曲線当てはめデータ範囲

| 周波数 [MHz] | 導波管規格 (EIAJ) | 曲線当てはめ範囲 min [mm] | 曲線当てはめ範囲 max [mm] |
|-----------|--------------|-------------------|-------------------|
| 733 | R9 | 6 | 46 |
| 835 | R9 | 6 | 41 |
| 900 | R9 | 6 | 41 |
| 1450 | R14 | 6 | 36 |
| 1624 | R14 | 6 | 31 |
| 1767.5 | R22 | 6 | 31 |
| 1950 | R22 | 6 | 31 |
| 2450 | R22 | 6 | 26 |
| 3500 | R32 | 6 | 16 |
| 3900 | R40 | 6 | 16 |
| 4600 | R48 | 6 | 16 |
| 5200 | R48 | 6 | 11 |
| 5600 | R48 | 6 | 11 |
| 5800 | R48 | 6 | 11 |

周波数により z 方向走査範囲を変える (最大 80 mm まで)。

(カ) 測定完了後、RF 入力を切った値でのシステムノイズ測定を行う。

⑧ 較正係数の算出

較正用データシート上で、Excel のソルバー機能等を用い、電界分布の理論式と実験データが一致するように数値計算を用いた最適化曲線当てはめを行う。なお、例えば Excel のソルバー機能では、最適化アルゴリズムとして GRG2 : Generalized Reduced Gradient method (一般化簡約勾配法) が採用されている。算出手順の内容は下記のとおり。

(ア) 3 センサ出力データ (z 方向及び軸等方性データ) の取り込み

(イ) ダイオード特性 (DCP) の補正

(ウ) 曲線当てはめに使用するデータ範囲の設定 (z 方向)

誘電体スラブの近傍では、プローブ先端と誘電体スラブの電氣的結合による境界効果 [12] による見かけ上の感度係数の変化が無視できなくなる。一方で、誘電体スラブから離れた位置では生体等価液剤の損失により受信電界強度が低下してしまうため、これらの影響の少ない当てはめ範囲の設定が重要である。

NICT では現在、経験的に決定した下表 2 の曲線当てはめデータ範囲を用いて、評価している。また、使用した導波管標準規格を参考として記載した。

(エ) 式 (2) により求めた 3 軸センサ出力の合成電界が、電界理論式 (6) の z 方向減衰曲線に近づくように較正係数 K_i を最適化して数値的に曲線当てはめを行い、曲線当てはめの相対誤差が小数点以下 2 桁より小さくなるように較正係数 K_i を決定する。

(オ) 5 回測定の平均値から、較正係数 K_i を決定する。

4 導波管較正方法による SAR プロローブ較正不確かさの評価

ここでは、較正用導波管を用いた方法の不確かさ評価について述べる。生体等価液剤の電気定数をはじめいくつかの項目は周波数依存性があるため、周波数ごとに評価する必要がある。なお、生体等価液剤電気定数の不確かさ評価方法としては、IEC/IEEE62209-1528 [8] に準拠した。以下に今回評価した不確かさ項目及びその評価方法を示す。

(1) 入力電力 (進行電力)

入力電力の不確かさは、測定に用いているパワーセンサとパワーメータ及び導波管への入射電力を算出するための反射係数を測定するネットワークアナライザに起因するため、これらの不確かさを合成したものとした。

表 3 に入力電力の不確かさバジェットを示す。また、各項目の算出方法は下記のとおりである。

1) パワーセンサの不確かさ

NICT の電力計較正不確かさを参照した。

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表3 入力電力の不確かさバジェット

| 不確かさ要因 | 公差値 | 確率分布 | Div | Ci | 標準不確かさ |
|------------------|-----|------|-----|----|--------|
| パワーセンサ (入力電力決定用) | | N | 2 | 1 | 0 |
| パワーメータ (入力電力決定用) | | N | 1 | 1 | 0 |
| ネットワークアナライザ | | N | 3 | 2 | 0 |
| 統合した標準不確かさ | | RSS | | | 0 |

表4 プローブ位置のバジェット

| 不確かさ要因 | 公差値 | 確率分布 | Div | Ci | 標準不確かさ |
|---------------|-----|------|------------|----|--------|
| 走査装置の機械的許容偏差 | | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0 |
| 導波管に対するプローブ位置 | | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0 |
| 統合した標準不確かさ | | RSS | | | 0 |

2) パワーメータの不確かさ

Keysight 提供のエクセルシートを用いて不確かさを導出した。

3) ネットワークアナライザの不確かさ

Keysight 提供のエクセルシートを用いて不確かさを導出した。

確率分布は、正規分布を仮定した。

(2) 反射電力

導波管入力端での不整合を評価したものであり、終端型パワーセンサ、アンテナ入力ケーブルの出力端、導波管入力端の反射係数 Γ_p 、 Γ_s 、 Γ_{wg} を測定し、以下の式(8)、式(9)から最大値となったほうを公差値とした。

$$Error_{max} = 1 - \frac{\{(1 - |\Gamma_p|^2) \times (1 - |\Gamma_s| |\Gamma_{wg}|)\}}{(1 + |\Gamma_s| |\Gamma_p|)^2} \quad (8)$$

$$Error_{min} = 1 - \frac{\{(1 - |\Gamma_p|^2) \times (1 + |\Gamma_s| |\Gamma_{wg}|)\}}{(1 - |\Gamma_s| |\Gamma_p|)^2} \quad (9)$$

(3) 液剤導電率測定

IEC/IEEE 62209-1528 [8] の手順に従い、導電率の測定不確かさを評価した。具体的には下記に示す項目の合成標準不確かさとして算出した。各項目の詳細な評価方法は以下に示す。

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、公差値とした。確率分布は正規分布とした。

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生

体等価液剤の電気定数の目標値との偏差を導出し、公差値とした。確率分布は矩形分布とした。

③ ネットワークアナライザ等の不確かさ

本項目は IEC/IEEE 62209-1528 Annex O.2 に記載のある不確かさ 0.5 % を用いた。確率分布は矩形分布とした。

(4) 液剤誘電率測定

(3) の液剤導電率測定と同様にして、比誘電率についても不確かさの算出を行った。

(5) 液剤導電率偏差

SAR プローブ較正時に測定した液剤の導電率と参照値との偏差を求めた。確率分布は矩形分布を仮定した。

(6) 液剤誘電率偏差

SAR プローブ較正時に測定した液剤の導電率と参照値との偏差を求めた。確率分布は矩形分布を仮定した。

(7) 周波数偏差

周波数カウンタを用いて SAR プローブ較正時の進行電力の周波数変動を測定した。

確率分布は、矩形分布を仮定した。

(8) 電界強度均一性

導波管内部の電界強度の理論値に基づき、深さ方向及び導波管長軸方向のセンサ領域における電界の変動量を確認した。なお、SAR プローブ較正のフィッティング領域における 10 ポイントにおいて電界強度の変動を確認した。

式(10)に電界強度の均一性不確かさの評価式を示す。なお、電界強度の変動を確認する領域は深さ方向において ± 1.0 mm とした。

確率分布は、矩形分布を仮定した。

$$\text{不確かさ} = \frac{Z \times 2}{\delta \left(\exp\left(\frac{Z}{\delta}\right) - \exp\left(-\frac{Z}{\delta}\right) \right)} - 1 \quad [\%] \quad (10)$$

Z : 深さ方向の変動領域 (EX : ± 1 mm)

σ : 各周波数の浸透深さ [mm]

(9) プロローブ位置

表4のバジェットを用いて不確かさを導出した。

操作装置の機械的許容偏差は、測定で用いているロボットシステム (TX90) のそれぞれの技術仕様書もしくはカタログ情報等から、位置決めに関する不確かさ情報を取得した。確率分布は矩形分布を仮定した。

導波管に対するプロローブ位置は、較正対象となる14周波数用の導波管を所定の位置に設置し、隙間ゲージ等を用いて導波管の参照点に対する位置に関する不確かさを評価し、IEC/IEEE 62209-1528 [8] の手順に基づいて計算された SAR に関連づけられた不確かさ量を取得した。確率分布は矩形分布を仮定した。

(10) プロローブ直線性

以下の方法により評価した。導波管への入力電力を最大局所 SAR が 100 W/kg に相当する値とし、そのときの生体等価液剤中の最大局所 SAR を測定した。次に、導波管への入力電力をアッテネータを介して 0.1 W/kg 相当まで 3 dB 間隔で減少させ、その際の最大局所 SAR を測定する。20 dBmW/kg (= 0.1 W/kg) から 50 dBmW/kg (= 100 W/kg) 間での取得データを用いて、以下で表される最大局所 SAR 対入力電力の線形近似式 (11) を求めた。

$$SAR_{peak} = aP_{in} + b \quad (11)$$

この近似式 (11) と取得データとの最大局所 SAR を比較し、取得データの近似式に対する偏差を各入力電力において算出した。そして、算出された中の最大の偏差を不確かさとした。

(11) 入力電力ドリフト

プロローブ較正中の、SAR 測定中において、導波管に接続されている方向性結合器を介した進行電力と反射電力の測定値を継続的に記録し、各電力測定値の平均値・最大値・最小値・標準偏差を算出し、標準偏差を公差値として評価した。確率分布は正規分布を仮定した。

(12) 高次モード

SAR プロローブ較正のフィッティングエリアの最低・最高部を含む5箇所において水平断面の電界強度分布を測定し、測定した領域に関して、分布の測定値と理論値で基本モードのとの結合係数を評価して、各面の

中の最大偏差を不確かさとして評価した。確率分布は矩形分布を仮定した。式(12)に導波管結合係数の評価式を示す。ここで E_{meas} は導波管水平断面での電界分布の測定値、 E_{theory} は式 (7) で表される導波管水平断面の電界分布の理論値である。

$$u = 1 - \frac{\iint E_{meas}(x,y) \times E_{theory}(x,y) dx dy}{\iint E_{theory}^2(x,y) dx dy} \quad (12)$$

(13) 背景雑音

RF をオフにした状態で SAR プロローブを導波管内に挿入し、SAR を測定し、0.4 W/Kg との偏差を公差値とした。なお、プロローブ先端位置はフィッティングレンジの最上部とした。確率分布は矩形分布を仮定した。

(14) 測定再現性

SAR プロローブを5回測定し、その相対標準偏差を公差値とした。確率分布は正規分布を仮定した。

表5～18に、相対不確かさ評価の例を具体的数値とともに示す。

表19に、拡張不確かさを一覧としてまとめた。今回の評価では、拡張不確かさは全体に周波数が高くなるにつれ増加する傾向が見られた。この理由としては、入力電力及びプロローブ直線性の不確かさが比較的値が大きく、周波数が高くなるにつれて、不確かさが増大する傾向にあることから、拡張不確かさもこれらにつられて増加しているためであると考えられる。また、表19には文献 [9] での不確かさ評価結果も合わせて示しているが、この結果と比較すると、今回評価した不確かさはすべての周波数において減少している。この中で減少に大きく寄与した不確かさ項目は液剤の導電率及び誘電率測定と電界強度均一性であった。電気定数測定に関しては、測定精度の向上及び測定規格で示されている電気定数の目標値に対する偏差の縮小により、不確かさが低減したためである。また、電界強度均一性については、文献 [9] での評価方法である、測定された導波管内の電界分布と TE₁₀ モードの近似式との比較によるものから、4 (8) で示した評価方法に変更したことにより不確かさが低減している。以上のことから、文献 [9] と比較して、SAR プロローブ較正における不確かさが低減された。

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表5 SARプローブの較正不確かさバジェット(周波数: 733 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力(進行電力) | 1.43 | N | 1 | 1 | 1.43 |
| 2 | 反射電力 | 0.64 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.45 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.37 | N | 1 | 1 | 0.37 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.49 | N | 1 | 1 | 0.49 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.18 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.68 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 2.47 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.43 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.01 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 9 | プローブ位置 | 0.16 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.09 |
| 10 | プローブ直線性 | 0.70 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.41 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.11 | N | 1 | 1 | 0.11 |
| 12 | 高次モード | 0.01 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 13 | 背景雑音 | 0.98 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.57 |
| 14 | 測定再現性 | 1.21 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.54 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.43 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 4.87 |

表6 SARプローブの較正不確かさバジェット(周波数: 835 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力(進行電力) | 1.21 | N | 1 | 1 | 1.21 |
| 2 | 反射電力 | 0.85 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.60 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.30 | N | 1 | 1 | 0.30 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.53 | N | 1 | 1 | 0.53 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 2.05 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.18 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 2.77 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.60 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.01 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 9 | プローブ位置 | 0.17 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.10 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.23 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.71 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.06 | N | 1 | 1 | 0.06 |
| 12 | 高次モード | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 13 | 背景雑音 | 0.70 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.40 |
| 14 | 測定再現性 | 1.82 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.82 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.73 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 5.47 |

表7 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：900 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 1.23 | N | 1 | 1 | 1.23 |
| 2 | 反射電力 | 1.68 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 1.19 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.30 | N | 1 | 1 | 0.30 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.54 | N | 1 | 1 | 0.54 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 2.58 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.49 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 2.22 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.28 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.01 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 9 | プローブ位置 | 0.18 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.10 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.59 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.92 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.08 | N | 1 | 1 | 0.08 |
| 12 | 高次モード | 0.01 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 13 | 背景雑音 | 1.14 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.66 |
| 14 | 測定再現性 | 1.66 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.74 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 3.00 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 6.00 |

表8 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：1,450 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 1.86 | N | 1 | 1 | 1.86 |
| 2 | 反射電力 | 1.75 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 1.24 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.40 | N | 1 | 1 | 0.40 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.73 | N | 1 | 1 | 0.73 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 0.16 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.09 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 1.21 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.70 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.02 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 9 | プローブ位置 | 0.23 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.13 |
| 10 | プローブ直線性 | 0.99 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.57 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.14 | N | 1 | 1 | 0.14 |
| 12 | 高次モード | 0.04 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.02 |
| 13 | 背景雑音 | 0.75 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.43 |
| 14 | 測定再現性 | 0.83 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.37 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.62 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 5.24 |

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表9 SARプローブの較正不確かさバジェット (周波数: 1,624 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力(進行電力) | 1.83 | N | 1 | 1 | 1.83 |
| 2 | 反射電力 | 1.39 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.98 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.36 | N | 1 | 1 | 0.36 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.76 | N | 1 | 1 | 0.76 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.45 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.84 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.72 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.42 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.02 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 9 | プローブ位置 | 0.25 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.14 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.32 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.76 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.18 | N | 1 | 1 | 0.18 |
| 12 | 高次モード | 0.05 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.03 |
| 13 | 背景雑音 | 0.70 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.40 |
| 14 | 測定再現性 | 0.72 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.32 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.60 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 5.21 |

表10 SARプローブの較正不確かさバジェット (周波数: 1,767.5 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力(進行電力) | 1.66 | N | 1 | 1 | 1.66 |
| 2 | 反射電力 | 2.34 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 1.65 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.51 | N | 1 | 1 | 0.51 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.80 | N | 1 | 1 | 0.80 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 0.34 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.20 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 2.90 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.68 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.03 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.02 |
| 9 | プローブ位置 | 0.26 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.15 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.09 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.63 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.06 | N | 1 | 1 | 0.06 |
| 12 | 高次モード | 0.03 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.02 |
| 13 | 背景雑音 | 0.36 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.21 |
| 14 | 測定再現性 | 0.78 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.35 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 3.14 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 6.27 |

表 11 SARプローブの較正不確かさバジェット (周波数：1,950 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 1.82 | N | 1 | 1 | 1.82 |
| 2 | 反射電力 | 0.27 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.19 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.49 | N | 1 | 1 | 0.49 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.78 | N | 1 | 1 | 0.78 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.71 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.99 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 1.29 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.74 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.03 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.02 |
| 9 | プローブ位置 | 0.27 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.16 |
| 10 | プローブ直線性 | 0.75 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.43 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.04 | N | 1 | 1 | 0.04 |
| 12 | 高次モード | 0.03 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 13 | 背景雑音 | 0.43 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.25 |
| 14 | 測定再現性 | 0.40 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.18 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.45 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 4.90 |

表 12 SARプローブの較正不確かさバジェット (周波数：2,450 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 1.87 | N | 1 | 1 | 1.87 |
| 2 | 反射電力 | 0.78 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.55 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.53 | N | 1 | 1 | 0.53 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.61 | N | 1 | 1 | 0.61 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 0.61 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.35 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.53 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.31 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.05 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.03 |
| 9 | プローブ位置 | 0.35 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.20 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.45 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.84 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.02 | N | 1 | 1 | 0.02 |
| 12 | 高次モード | 0.07 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.04 |
| 13 | 背景雑音 | 0.34 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.20 |
| 14 | 測定再現性 | 1.00 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.45 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 2.38 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 4.76 |

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表 13 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：3,500 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.08 | N | 1 | 1 | 2.08 |
| 2 | 反射電力 | 2.19 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 1.55 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.64 | N | 1 | 1 | 0.64 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.62 | N | 1 | 1 | 0.62 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.33 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.77 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.03 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.01 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.13 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.07 |
| 9 | プローブ位置 | 0.57 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.33 |
| 10 | プローブ直線性 | 0.87 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.50 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.03 | N | 1 | 1 | 0.03 |
| 12 | 高次モード | 0.90 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.52 |
| 13 | 背景雑音 | 0.35 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.20 |
| 14 | 測定再現性 | 1.43 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.64 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 3.03 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 6.07 |

表 14 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：3,900 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.87 | N | 1 | 1 | 2.87 |
| 2 | 反射電力 | 1.15 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 0.81 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.59 | N | 1 | 1 | 0.59 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.56 | N | 1 | 1 | 0.56 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.58 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.33 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.19 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.17 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.10 |
| 9 | プローブ位置 | 0.65 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.38 |
| 10 | プローブ直線性 | 1.74 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.00 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.03 | N | 1 | 1 | 0.03 |
| 12 | 高次モード | 0.05 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.03 |
| 13 | 背景雑音 | 0.33 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.19 |
| 14 | 測定再現性 | 2.03 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.91 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 3.46 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 6.91 |

表 15 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：4,600 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.73 | N | 1 | 1 | 2.73 |
| 2 | 反射電力 | 3.91 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 2.76 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.38 | N | 1 | 1 | 0.38 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.37 | N | 1 | 1 | 0.37 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.06 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.61 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.16 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.09 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.25 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.15 |
| 9 | プローブ位置 | 0.80 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.46 |
| 10 | プローブ直線性 | 2.41 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.39 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.14 | N | 1 | 1 | 0.14 |
| 12 | 高次モード | 0.08 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.05 |
| 13 | 背景雑音 | 0.23 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.13 |
| 14 | 測定再現性 | 1.42 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.64 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 4.29 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 8.57 |

表 16 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数：5,200 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.07 | N | 1 | 1 | 2.07 |
| 2 | 反射電力 | 3.18 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 2.25 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.31 | N | 1 | 1 | 0.31 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.37 | N | 1 | 1 | 0.37 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 2.20 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.27 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 0.68 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.39 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.34 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.20 |
| 9 | プローブ位置 | 0.93 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.54 |
| 10 | プローブ直線性 | 2.80 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.62 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.17 | N | 1 | 1 | 0.17 |
| 12 | 高次モード | 0.39 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.23 |
| 13 | 背景雑音 | 0.19 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.11 |
| 14 | 測定再現性 | 0.89 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.40 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 3.81 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 7.62 |

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表 17 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数 : 5,600 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.68 | N | 1 | 1 | 2.68 |
| 2 | 反射電力 | 5.13 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 3.63 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.30 | N | 1 | 1 | 0.30 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.33 | N | 1 | 1 | 0.33 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.86 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.08 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 1.45 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.84 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.41 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.23 |
| 9 | プローブ位置 | 1.02 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.59 |
| 10 | プローブ直線性 | 3.87 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 2.23 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.12 | N | 1 | 1 | 0.12 |
| 12 | 高次モード | 0.14 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.08 |
| 13 | 背景雑音 | 0.37 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.21 |
| 14 | 測定再現性 | 1.48 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 0.66 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 5.32 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 10.64 |

表 18 SAR プローブの較正不確かさバジェット (周波数 : 5,800 MHz)

| No | 不確かさ要因 | 公差値 | 分布 | Div | Ci | 標準不確かさ [%] |
|--------------|-------------|------|----|------------|----|------------|
| 1 | 入力電力 (進行電力) | 2.62 | N | 1 | 1 | 2.62 |
| 2 | 反射電力 | 5.03 | U | $\sqrt{2}$ | 1 | 3.56 |
| 3 | 液剤導電率測定 | 0.30 | N | 1 | 1 | 0.30 |
| 4 | 液剤誘電率測定 | 0.32 | N | 1 | 1 | 0.32 |
| 5 | 液剤導電率偏差 | 1.58 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.91 |
| 6 | 液剤誘電率偏差 | 1.86 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 1.07 |
| 7 | 周波数偏差 | 0.00 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.00 |
| 8 | 電界強度均一性 | 0.44 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.25 |
| 9 | プローブ位置 | 1.06 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.61 |
| 10 | プローブ直線性 | 4.69 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 2.71 |
| 11 | 入力電力ドリフト | 0.15 | N | 1 | 1 | 0.15 |
| 12 | 高次モード | 0.19 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.11 |
| 13 | 背景雑音 | 0.61 | R | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.35 |
| 14 | 測定再現性 | 3.33 | N | $\sqrt{5}$ | 1 | 1.49 |
| 合成標準不確かさ | | RSS | | | | 5.64 |
| 拡張不確かさ (k=2) | | RSS | | | | 11.29 |

表 19 導波管較正における拡張不確かさ

| 周波数 [MHz] | 拡張不確かさ [%] | 文献 [9] における 拡張不確かさ [%] |
|-----------|------------|---------------------------|
| 733 | 4.87 | 7.68 |
| 835 | 5.47 | 8.11 |
| 900 | 6.00 | 7.41 |
| 1450 | 5.24 | 7.26 |
| 1624 | 5.21 | 9.12 |
| 1767.5 | 6.27 | 8.11 |
| 1950 | 4.90 | 7.68 |
| 2450 | 4.76 | 8.12 |
| 3500 | 6.07 | 10.2 |
| 3900 | 6.91 | - |
| 4600 | 8.57 | - |
| 5200 | 7.62 | 9.05 |
| 5600 | 10.64 | - |
| 5800 | 11.29 | - |

5 あとがき

本稿では、SAR プローブの較正手法について紹介し、プローブ較正の不確かさ評価結果について示した。今後の課題として、今回見直しを行った不確かさ項目以外についても、評価方法の見直しや新たな不確かさ要因についての洗い出し等による、更なる不確かさ評価の検討が挙げられる。また、無線通信技術の利用周波数の多様化に対応した、較正周波数の拡張や、液剤中アンテナによる較正などの導波管以外を用いた SAR プローブ較正手法の開発も重要な課題である。

謝辞

本研究は総務省委託研究「電波の安全性に関する調査及び評価技術」JPMI10001 により実施された。

【参考文献】

- 1 電波防護指針 諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」,1990.
- 2 電波防護指針 諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」,1997.
- 3 ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics, vol.77, no.4, pp.494-522 ,1998
- 4 Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, FCC OET Bulletin 65 OET Supplement C, 1997
- 5 IEEE C95.1-2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, 2005.
- 6 ICNIRP Guidelines for limiting exposure for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz), Health Physics, vol.99, no.6, pp.818-836, 2010.
- 7 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

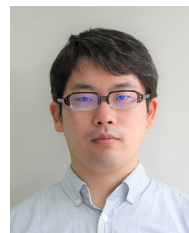
測定方法]一部答申, H23.9

- 8 Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body mounted wireless communication devices – Part 1528 Human models, instrumentation, and procedures -frequency range of 4 MHz to 10 GHz), IEC/IEEE 62209-1528
- 9 浜田 リラ, 渡辺 聡一, “比吸収率プローブの較正,” 情報通信研究機構研究報告, vol.62, no.1, pp.117-131, 2016.
- 10 Katja Pokovic, Thomas Schmid, and Niels Kuster, “Millimeter-Resolution E-Field Probe for Isotropic Measurement in Lossy Media Between 100 MHz and 20 GHz,” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS, vol.49, no.4, Aug. 2000.
- 11 浜田, 御代田, 佐藤, 石井, 渡辺, “標準アンテナを用いた生体等価液剤中での SAR プローブ較正システムの周波数拡張,” EMCJ, 環境電磁工学 vol.109, no.370, pp.135-140, 2010, Jan. 2010.
- 12 Katja Pokovic, “Advanced Electromagnetic Probes for Near-Field Evaluations,” Swiss Federal Institute of Technology, Zurich Doctoral Dissertation ETH no.13334, 1999.
- 13 岩谷, 浜田, 渡辺, 須賀, 橋本, “無線通信端末の比吸収率測定における境界効果の影響に関する検討,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, B-4-24, 2015.



川上 博士 (かわかみ ひろし)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究技術員



清水 悠斗 (しみず ゆうと)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究員
博士(工学)
生体電磁工学
【受賞歴】
2021年 電子情報通信学会 学術奨励賞
2019年 URSI Young Scientist Award



長岡 智明 (ながおか ともあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士(医科学)
生体電磁環境
【受賞歴】
2022年 電波功績賞電波産業会会長表彰
2013年 第59回(平成25年度)前島密賞
2004年 Physics in Medicine and Biology
最優秀論文賞 (Robert Prize)