

## 2-7 比吸収率測定プローブの較正

浜田リラ 渡辺聡一

比吸収率 (Specific Absorption Rate: SAR、以下、SAR) プローブの較正とは、損失のあるファントム液剤中での電界測定用センサの較正であり、ファントム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。また、その他の較正手法についても紹介する。

### 1 まえがき

携帯無線機器・基地局等の電波を発する機器・設備からの電磁界は露評価指標のひとつに、SAR がある。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]-[10] 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 の指針値の適合性評価試験においては、SAR を測定するための SAR プローブが用いられており、SAR 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。

本稿では、NICT における SAR プローブの較正について述べる。SAR プローブの較正方法のいくつかは、国内外において規格化されている。ここでは代表的な 3 手法の原理について紹介し、NICT の較正業務に採用している較正用導波管法について、詳細手順や測定例及び不確かさ評価例を示す。

### 2 定義 [7]

#### 2.1 電波防護指針 [1]

電波利用において人体が電波 (周波数の範囲は 10 kHz から 300 GHz までを対象とする。) 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) [1]

SAR とは、下記に定義される通り、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 (ファントム液剤など) 中の比吸収率は、電界 (E) と媒質中の温度の時間変化の勾配 (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、

$\sigma$	導電率
$\rho$	媒質の密度
$c_k$	比熱

である。

式 (1) より、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可能である。高空間分解能で高速な応答時間 (1 秒未満) をもつ擾乱を与えない温度プローブ (光ファイバ・プローブあるいは抵抗線使用のサーミスタプローブ) が使用可能である。

#### 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 と呼び、その中で最大の値を局所最大 SAR と呼ぶ。ただし、国内の電磁界防護指針の適合性評価においては、10 g の組織の立方体で定義され、任意の 6 分間の平均で評価する。

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。モデル全体に渡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。SAR 測定においては、人体形状を模擬するための外殻(容器)とそれに充填される液剤(ファントム液剤)で構成される均一ファントムを用いる。このため、SAR プローブ較正においてもファントム液剤中での較正係数の決定が必要になる。

2.6 ファントム液剤 [1]

ファントムに充填するファントム液剤の電気的特性は、IEC 62209-1 [8] 等の SAR 測定方法の規格値に従うことになる。IEC 62209-1 [8] では、30 MHz-6 GHz のいくつかの周波数において規格値が定められている。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。表 1 に NICT の較正周波数における電気定数を示す。

表 1 ファントム液剤電気定数の規格値の例

周波数 (MHz)	$\epsilon_r'$	導電率 $\sigma$ (S/m)
733	41.9	0.89
835	41.5	0.90
1450	40.5	1.20
1624	40.3	1.30
1767.5	40.0	1.38
1950	40.0	1.40
2018	40.0	1.42
2450	39.2	1.80
2585	39.0	1.94
3500	38.5	2.40
5200	36.0	4.66

斜体は各周波数の内挿で求めた値

2.7 境界効果 [11]

プローブ先端と誘電体容器表面等が近接した際に、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。

3 比吸収率 (SAR) 測定プローブの構造と較正係数 [12] [13]

まず、実際の無線機器の SAR 測定システムと代表的なプローブ構造を図 1 及び 2 に示す。測定方法の詳細は 3-3「SAR 測定法と不確かさ評価」で述べるが、SAR プローブとは損失のあるファントム液剤中で用いる電界測定センサである。したがって、SAR プローブへの入射電界と出力電圧を関連づける値が較正係数(または感度係数)となり、この点は通常自由空間中でのアンテナ較正と変わらない。ただし、SAR プローブ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 測定に用いるファントム液剤中における較正係数を求める必要がある。

典型的な SAR プローブ構造として、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  $\Delta$  構造に配置した 3 軸直交アンテナがある [11]。SAR プローブは、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  $V_i$  を出力する。センサ中心位置の電界強度  $E$  はこれら 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。ここで、 $K_i$  は各センサの較正係数である。

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

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、例えば次式 (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。

$$V_i = U_i + \frac{U_i^2}{1000 \times DCP_i} \tag{3}$$

また、較正係数  $K_i$  は、各センサの自由空間中の感度係数  $NF_i$  と自由空間とファントム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。

$$K_i = NF_i \times Factor \tag{4}$$

なお、変換係数  $Factor$  は各センサによらないという前提としている。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。

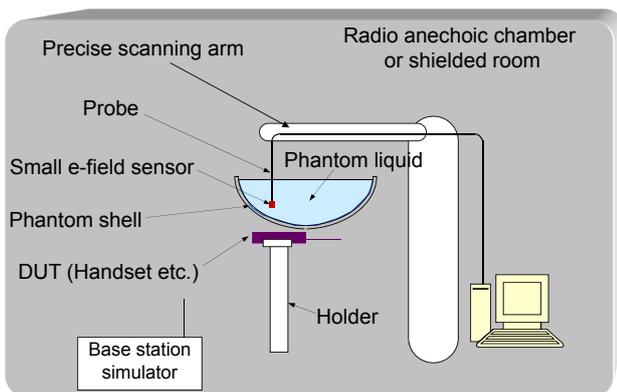


図 1 SAR 測定装置概要

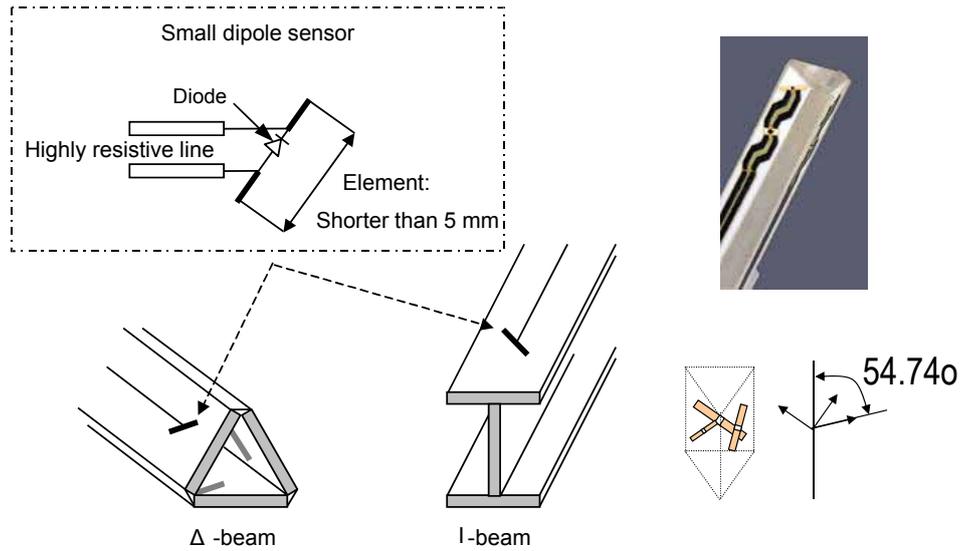


図2 SARプローブの構造

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

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、更にファントム液剤中感度係数  $Factor$  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。

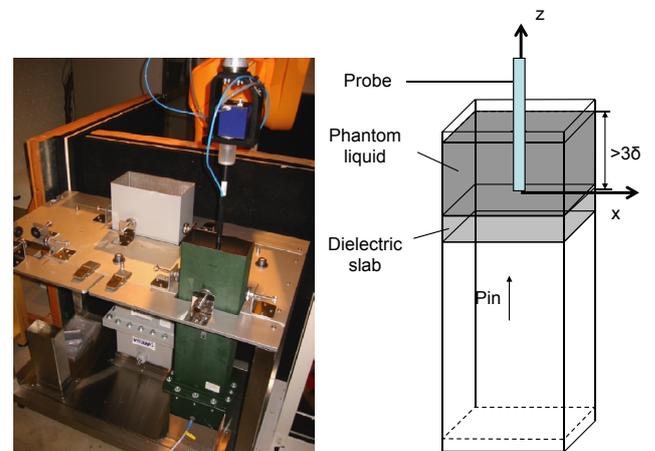
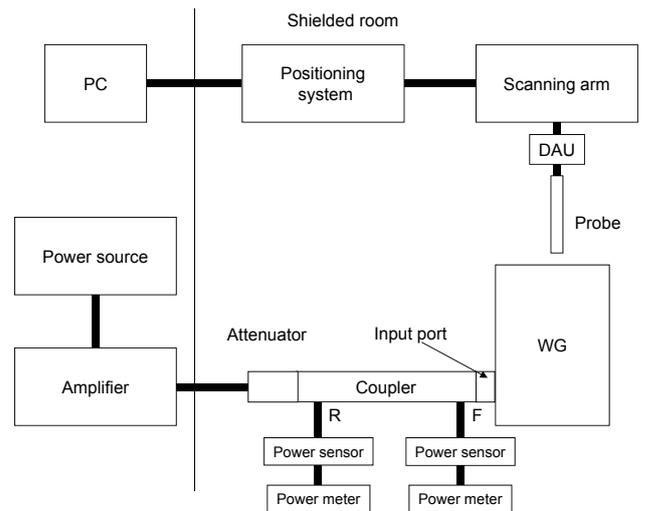
#### 4 プローブ較正の原理

ここでは、代表的なSARプローブ較正手法の原理を説明する。

##### 4.1 較正用導波管を用いたプローブ較正システム [8]-[10]

SARプローブの較正では、ファントム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<sub>10</sub>) 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、その上部にファントム液剤が充填されている。ファントム液剤の深さは、ファントム液剤内の波長で表皮深さ  $\delta$  の3倍以上が望ましい。ファントム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ファントム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



DAU:Data Acquisition Unit

図3 較正用導波管を用いたSARプローブ較正システムと概略図

る。現在使用されている較正用導波管では、ファントム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~-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、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ファントム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較正では、SARプローブでファントム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ファントム液剤部分の反射が十分に抑制されている場合、ファントム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<sub>10</sub>モードとほぼ変わらない開口面内分布となる、また、ファントム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Pinより下記の式で求めることができる。

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

ここで、aは導波管長辺、bは導波管短辺、δはファントム液剤の浸透深さ、σはファントム液剤の導電率、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Pin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<sub>10</sub>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。

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

## 4.2 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 ファントム液剤の電気定数測定
 

ファントム液剤の電気定数を測定する。測定値が目標値と比較して±3%以上離れていた場合、ファントム液剤を調整する。
- 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。較正用導波管にファントム液剤を充填する。
- ③ 較正用導波管のS<sub>11</sub>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S<sub>11</sub>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S<sub>11</sub>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指示)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測定システムへの指示を行う。

#### 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 $K_i$ 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。

- ▶ ファントム液剤電気定数：測定値を用いる
- ▶ 較正用導波管の $S_{11}$ ：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 [14]
- ▶ 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・ファントム液剤)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
- (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(ファントム液剤最下面： $z=0$  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(EX3 DV4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(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(1 mmごと)  
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

#### 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[11]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ファントム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おり、SN比は下記の曲線当てはめ範囲の中央の位置で評価している。これらの曲線当てはめ範囲の設定については周波数ごとに不連続となっているが、今後、最適化をしていく予定である。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。

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)	733	835	900	1450	1624	1767.5	1950	2018	2450	2585	3500	5200
導波管規格 (EIAJ)	WRI-9			WRI-14			WRI-22				WRI-40	WRI-48
曲線当てはめ範囲 $z$ (mm)	20-40	10-30	10-30	10-30	10-30	6-37	6-30	6-37	6-37	8-15	4-7	8-12

## 2 較正技術の研究開発

(オ) 5回測定の平均値から、較正係数  $K_i$  を決定する。

### 4.3 温度上昇との比較を用いた較正方法 [8][9][15]

温度上昇と電界強度及びSARは、式(1)に示すように、伝導や放射等による熱拡散が無視できる程度に小さければ比例関係とみなせる。すなわち、ファントム液剤の比熱と入力電力が分かれば、温度上昇を用いたSARプローブ較正が可能となる。

この原理を用いた較正システムの例として、同軸型較正システムがある [8][15]。本装置は、主に150 MHz以下のプローブ較正への適用を目的として英国(National Physical Laboratory : NPL)にて開発されたものである。図4に較正装置の概略図を示す。本装置は、50 Ωで整合した同軸較正用導波管の中心導体の一部を、ファントム液剤を充填した容器で置き換え、端部を短絡した構造である。想定している周波数帯では、ファントム液剤は導体に近い振る舞いをするため、ファントム液剤充填容器の中心付近では比較的均一な電界分布を得ることができる。実際には、周波数としては数～450 MHz程度までの適用が可能である。

### 4.4 標準アンテナを用いたファントム液剤中較正システム [13]

較正用導波管を用いない較正方法として、構造や放射特性が既知の標準アンテナを用いる標準電界法を、ファントム液剤を充填した容器中に拡張した較正方法が検討されている。較正システムの概念図を図5及び6に示す。まず標準アンテナ自身の利得を下記により

求める。手順としては、まず、相似な1対のアンテナを、ファントム液剤を充填した容器内部に垂直に設置し、アンテナ間の距離を変えて  $S_{21}$  を取得し、水槽底面に設置された標準アンテナの利得を求める(図5)。次に、対向するロボットアームに較正対象プローブを取り付け、出力を測定し、アンテナ較正を実施する(図6)。

標準アンテナの利得を求める際は、反射損失及びアンテナ間の距離減衰特性を用いて、Friisの伝達公式を損失のある媒質中に拡張した2アンテナ法を用いる。ファントム液剤中では、自由空間中と異なり減衰が著しいために通常のアンテナ較正のように遠方界領域における較正の実施は難しい。そこで、ファントム液剤中の減衰及び極近傍界における影響を考慮し、Friisの伝達公式をFresnel領域まで拡張した。ファントム液剤中における標準アンテナとしては、構造が簡単で理論解析が容易なダイポールアンテナ及び切り離し導波管アンテナが提案されている。

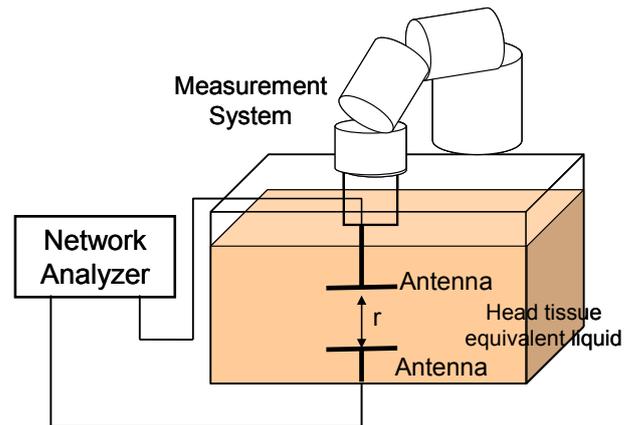


図5 ファントム液剤中標準アンテナの絶対利得較正

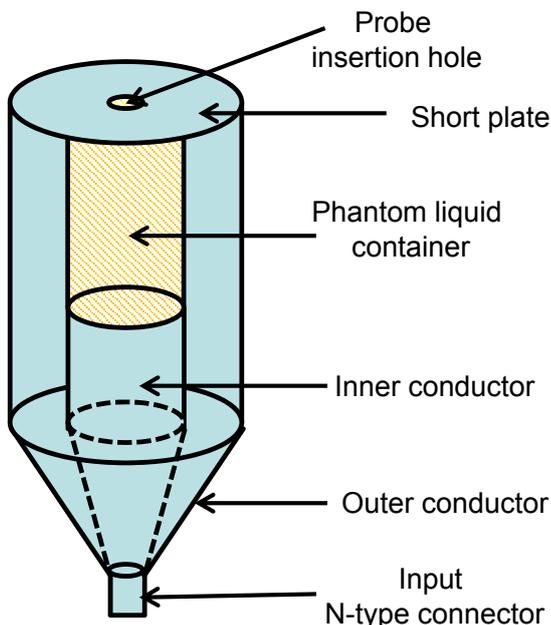


図4 同軸型較正システム [8][15][16]

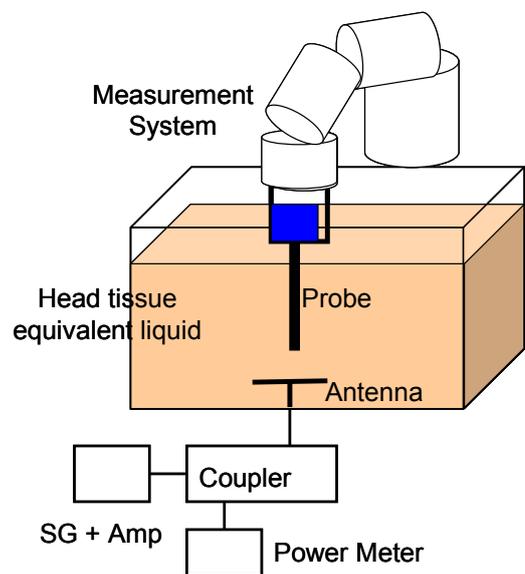


図6 ファントム液剤中標準アンテナを用いたプローブ較正

## 5 導波管較正方法による SAR プローブ 較正不確かさの評価例

ここでは、実際の SAR プローブ較正結果の例とともに、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。ファントム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、ファントム液剤電気定数の不確かさ評価方法としては、IEC 62209-1[8]に準拠した。

### 5.1 不確かさ要因と各項目の評価方法

#### (1) 入力電力

終端電力測定用パワーセンサの較正証書の不確かさの値を使用した。確率分布は正規分布を仮定した。

#### (2) 較正用導波管の不整合

較正用導波管入力端の不整合の公差値は、以下の式(8)のように導出することができる。したがって、本検討では終端型パワーセンサ、装置入力端、方向性結合器の出力端反射係数を測定し、不整合を評価した。確率分布はU分布を仮定した。

$$M = 1 - \frac{(1 - |\Gamma_p|^2) \times (1 - |\Gamma_s \parallel \Gamma_c|)^2}{(1 + |\Gamma_s \parallel \Gamma_p|)^2} \quad (8)$$

ここで、M は不整合の最大公差値、 $\Gamma_s$ ：方向性結合器出力端の反射係数、 $\Gamma_p$ ：終端パワーセンサの反射係数、である。

#### (3) プローブ出力読み取り装置 (Data Acquisition Unit: DAU)

ここでは、メーカー較正証書の不確かさの値を使用した。確率分布は正規分布を仮定した。

#### (4) ファントム液剤の誘電率・導電率

ファントム液剤電気定数の導電率測定の不確かさは、誘電率測定プローブのメーカー提供の不確かさ典型値 (typical accuracy) を用いる方法等が考えられる [17]-[20]。本稿では、IEC62209-1[8] の評価方法に準拠した。

#### ① 測定の繰り返し性

各周波数において、ファントム液剤の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。

表 3 に IEC62209-1[8] の不確かさバジェットを示す。

#### (5) 較正時のファントム液剤の誘電率・導電率の目標値からの偏差

各周波数において、使用するファントム液剤の電気定数の偏差を評価する。当機構では、全ての周波数でファントム液剤の電気定数は目標値から ± 3 % 以内となるように調整しているため、ここでは 3 % を用いた。確率分布は一様分布を仮定した。

#### (6) 電界分布の均一性

電界分布は較正用導波管中心近辺において較正用導波管内の電界分布を測定し、測定された電界強度の 2 乗と余弦二乗関数による TE<sub>10</sub> モー

表 3 液剤電気定数測定の不確かさ

	<i>a</i>		<i>b</i>	<i>C</i>	$u_i = (a/b) \times (c)$	
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 $\nu_i$ or $\nu_{eff}$
測定の繰り返し性		正規	1	1		N-1
電気定数 ( $\epsilon_r'$ or $\sigma$ ) の規格値からの偏差		一様	$\sqrt{3}$	1		N-1
ネットワークアナライザ不確かさ他		一様	$\sqrt{3}$	1		$\infty$
合成拡張不確かさ						

## 2 較正技術の研究開発

ドの近似式からの最大偏差で評価した。ここで、電界分布は前述の近似式(7)を用いた。電界分布の測定は、測定位置(z方向)はプローブ先端-誘電体スラブ間の距離が10mm(835~2,450MHz)または5mm(5GHz帯)、測定範囲(導波管長辺方向は中心点から±20mmの範囲で評価した。確率分布は一様分布を仮定した。

### (7) プローブ位置

ロボットのz方向の検出位置ずれに起因するプローブ位置決め不確かさを、表面検出時の距離誤差(Δz)と浸透深さδにより式(9)により評価した。

$$\Delta SAR = (1 - e^{-\frac{2\Delta z}{\delta}}) \quad (9)$$

Δz: 表面(z=0)検出時のプローブ先端と誘電体スラブ表面との距離

ここで、Δzはファントム液剤中でのロボットのz=0の位置検出誤差、すなわち誘電体スラブ表面位置の検出誤差に相当する。ただし、NICTで用いているSAR測定システムでは出力読み取り装置(DAU)のプローブコネクタ部分にバネ機構を用いているため、そのあそびに起因する誤差も含まれている。評価方法として

は、ファントム液剤を平板上に垂らしその液上で表面検出を行い、表面とプローブ先端の距離をすきまゲージで測定した。確率分布は一様分布を仮定した。

### (8) SAR プローブの線形性

メーカー較正証書に記載している線形性不確かさ0.6%を用いた。確率分布は正規分布を仮定した。

### (9) データ SN 比

較正信号入力時のプローブ出力読み取り装置表示電圧値と、信号無印可時のプローブ出力読み取り装置表示電圧値を用いてS/N比を求めた。確率分布は正規分布を仮定した。

### (10) 較正係数のばらつき

較正を5回実施し、その相対標準偏差を用いた。確率分布は正規分布を仮定した。

まず、下記表4~15に、相対不確かさ評価の例を具体的数値とともに示す。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として記載してある。

表4 導波管較正の不確かさ評価例(733MHz, EX3DV4プローブ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 c <sub>i</sub>	標準不確かさ (±%) u = (a / b) × c <sub>i</sub>	自由度 v <sub>i</sub> or v <sub>eff</sub>
入力電力 (k=2)	3.30	正規	2	1	1.65	∞
導波管不整合	2.53	U	√2	1	1.79	∞
DAU 不確かさ (k=2)	1.50	正規	2	1	0.75	∞
ファントム液剤電気定数測定(導電率)	1.10	正規	1	1	1.10	9
ファントム液剤電気定数測定(誘電率)	1.03	正規	1	1	1.03	9
ファントム液剤の規格値からの偏差(導電率)	3.00	一様	√3	1	1.73	∞
ファントム液剤の規格値からの偏差(誘電率)	3.00	一様	√3	1	1.73	∞
電界均一性	0.13	一様	√3	1	0.08	
プローブ位置	0.30	一様	√3	1	0.17	
プローブの線形性 (k=2)	0.60	正規	2	1	0.30	∞
出力電圧の SN 比	0.63	正規	1	1	0.63	∞
測定データのばらつき (5回測定)	0.32	正規	√N (N=5)	1	0.14	4
合成標準不確かさ					3.91	
包含係数 k (信頼の水準 95%)					1.96	812
拡張不確かさ					7.83	

表 5 導波管較正の不確かさ評価例 (835 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ or $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	3.10	U	$\sqrt{2}$	1	2.19	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	0.86	正規	1	1	0.86	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.28	正規	1	1	1.28	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.40	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.40	一様	$\sqrt{3}$	1	0.23	$\infty$
プローブ位置	0.31	一様	$\sqrt{3}$	1	0.18	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.63	正規	1	1	0.63	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.41	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.18	4
合成標準不確かさ					4.13	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.96	818
拡張不確かさ					8.11	

表 6 導波管較正の不確かさ評価例 (900 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ or $\nu_{eff}$
入力電力	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	1.24	U	$\sqrt{2}$	1	0.88	$\infty$
DAU 不確かさ	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	1.32	正規	1	1	1.32	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.28	正規	1	1	1.28	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.42	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.42	一様	$\sqrt{3}$	1	0.24	$\infty$
プローブ位置	0.33	一様	$\sqrt{3}$	1	0.19	$\infty$
プローブの線形性	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.70	正規	1	1	0.70	$\infty$
測定データのばらつき (5 回)	0.57	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.25	4
合成標準不確かさ					3.77	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.97	313
拡張不確かさ					7.41	

## 2 較正技術の研究開発

表7 導波管較正の不確かさ評価例 (1450 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	1.03	U	$\sqrt{2}$	1	0.73	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	0.82	正規	1	1	0.82	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.53	正規	1	1	1.53	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.11	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.11	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.06	$\infty$
プローブ位置	0.42	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.24	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.76	正規	1	1	0.76	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.30	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.13	4
合成標準不確かさ					3.69	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.97	278
拡張不確かさ					7.26	

表8 導波管較正の不確かさ評価例 (1624 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	3.94	U	$\sqrt{2}$	1	2.79	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	0.77	正規	1	1	0.77	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.64	正規	1	1	1.64	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.34	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.34	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.20	$\infty$
プローブ位置	0.46	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.26	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.95	正規	1	1	0.95	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.77	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.34	4
合成標準不確かさ					4.64	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.96	544
拡張不確かさ					9.12	

表9 導波管較正の不確かさ評価例 (1767.5 MHz, EX3DV4 プローブ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $v_i$ OR $v_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	2.77	U	$\sqrt{2}$	1	1.96	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	0.72	正規	1	1	0.72	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.70	正規	1	1	1.70	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.25	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.25	一様	$\sqrt{3}$	1	0.15	$\infty$
プローブ位置	0.48	一様	$\sqrt{3}$	1	0.28	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.47	正規	1	1	0.47	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.33	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.15	4
合成標準不確かさ					4.12	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.97	299
拡張不確かさ					8.11	

表10 導波管較正の不確かさ評価例 (1950 MHz, EX3DV4 プローブ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $v_i$ OR $v_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	0.48	U	$\sqrt{2}$	1	0.34	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	0.95	正規	1	1	0.95	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	1.99	正規	1	1	1.99	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.99	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.99	一様	$\sqrt{3}$	1	0.57	$\infty$
プローブ位置	0.49	一様	$\sqrt{3}$	1	0.28	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.52	正規	1	1	0.52	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.28	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.13	4
合成標準不確かさ					3.88	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.98	123
拡張不確かさ					7.68	

## 2 較正技術の研究開発

表 11 導波管較正の不確かさ評価例 (2018 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	0.50	U	$\sqrt{2}$	1	0.35	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	1.42	正規	1	1	1.42	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	2.12	正規	1	1	2.12	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.31	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.31	一様	$\sqrt{3}$	1	0.18	$\infty$
プローブ位置	0.50	一様	$\sqrt{3}$	1	0.29	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.52	正規	1	1	0.52	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.55	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.25	4
合成標準不確かさ					4.06	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.98	101
拡張不確かさ					8.05	

表 12 導波管較正の不確かさ評価例 (2450 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	0.84	U	$\sqrt{2}$	1	0.59	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
ファントム液剤電気定数測定 (導電率)	1.10	正規	1	1	1.10	9
ファントム液剤電気定数測定 (誘電率)	2.14	正規	1	1	2.14	9
ファントム液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.80	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
ファントム液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一様	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.80	一様	$\sqrt{3}$	1	0.46	$\infty$
プローブ位置	0.64	一様	$\sqrt{3}$	1	0.37	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.93	正規	1	1	0.93	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.57	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.25	4
合成標準不確かさ					4.10	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.98	114
拡張不確かさ					8.12	

表 13 導波管較正の不確かさ評価例 (2585 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	5.34	U	$\sqrt{2}$	1	3.78	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
液剤電気定数測定 (導電率)	1.11	正規	1	1	1.11	9
液剤電気定数測定 (誘電率)	3.42	正規	1	1	3.42	9
液剤の規格値からの偏差 (導電率)	0.94	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	0.94	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.54	$\infty$
プローブ位置	0.69	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.40	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.65	正規	1	1	0.65	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.34	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.15	4
合成標準不確かさ					6.12	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.99	91
拡張不確かさ					12.2	

表 14 導波管較正の不確かさ評価例 (3500 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ OR $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	3.17	U	$\sqrt{2}$	1	2.24	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
液剤電気定数測定 (導電率)	1.22	正規	1	1	1.22	9
液剤電気定数測定 (誘電率)	2.29	正規	1	1	2.29	9
液剤の規格値からの偏差 (導電率)	3.87	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	3.87	一樣	$\sqrt{3}$	1	2.23	$\infty$
プローブ位置	0.87	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.50	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.08	正規	1	1	0.08	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	1.27	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.57	4
合成標準不確かさ					5.17	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.97	214
拡張不確かさ					10.2	

## 2 較正技術の研究開発

表 15 導波管較正の不確かさ評価例 (5200 MHz, EX3DV4 プロープ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u = (a / b) \times c_i$	自由度 $\nu_i$ or $\nu_{eff}$
入力電力 ( $k=2$ )	3.30	正規	2	1	1.65	$\infty$
導波管不整合	1.57	U	$\sqrt{2}$	1	1.11	$\infty$
DAU 不確かさ ( $k=2$ )	1.50	正規	2	1	0.75	$\infty$
液剤電気定数測定 (導電率)	1.09	正規	1	1	1.09	9
液剤電気定数測定 (誘電率)	2.60	正規	1	1	2.60	9
液剤の規格値からの偏差 (導電率)	1.94	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
液剤の規格値からの偏差 (誘電率)	3.00	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.73	$\infty$
電界均一性	1.94	一樣	$\sqrt{3}$	1	1.12	$\infty$
プローブ位置	1.43	一樣	$\sqrt{3}$	1	0.83	$\infty$
プローブの線形性 ( $k=2$ )	0.60	正規	2	1	0.30	$\infty$
出力電圧の SN 比	0.37	正規	1	1	0.37	$\infty$
測定データのばらつき (5 回測定)	0.52	正規	$\sqrt{N}$ ( $N=5$ )	1	0.23	4
合成標準不確かさ					4.55	
包含係数 $k$ (信頼の水準 95 %)					1.99	82
拡張不確かさ					9.05	

表 16 導波管較正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
導波管不整合 (%)	1.79	2.19	0.88	0.73	2.79	1.96	0.34	0.35	0.59	3.78	2.24	1.11
電気定数測定 (導電率) (%)	1.10	0.86	1.32	0.82	0.77	0.72	0.95	1.42	1.10	1.11	1.22	1.09
電気定数測定 (誘電率) (%)	1.03	1.28	1.28	1.53	1.64	1.70	1.99	2.12	2.14	3.42	2.29	2.60
拡張不確かさ (%)	7.68	8.11	7.41	7.26	9.12	8.11	7.68	8.05	8.12	12.2	10.2	9.05

表 17 較正結果の例 (EX3DV4)

周波数 (MHz)	733	835	900	1950	2450	3500	5200
較正係数 $K [\mu V / (V/m)^2]$	3.90	3.55	3.50	3.03	2.73	2.92	2.16
前回の結果	3.89	3.59	3.49	3.11	2.81	2.98	2.00
偏差 (%)	0.23	-1.14	0.49	-2.39	-2.74	-1.88	8.15
偏差と拡張不確かさの比	0.03	-0.14	0.04	-0.33	-0.35	-0.19	0.89

表 16 に、上記の結果から代表的な不確かさ要因と、標準不確かさ及び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。個々の要因については、導波管不整合については周波数ごとに整合を調整しているため周波数への依存性は見られないが、

各々の周波数で最適化する必要がある。一方、誘電率・導電率の不確かさは周波数が高くなるにつれて増加しているため、高い周波数において精度の良い測定が行えるようにしていく必要がある。

表 17 に較正結果の例として、NICT で実施した SAR プロープ EX3 DV4 の較正結果を前年の較正結

果からの差違とともに示す。また、参考までに、前回較正結果データからの差異と拡張不確かさの比も附記した。

## 6 あとがき

本稿では、SAR プローブの較正手法、原理、較正結果及び不確かさ評価例について紹介した。SAR プローブ較正については一次標準が確立されていないため、複数の原理を用いた較正が適用できるようにしておくことが望ましい。また、信頼性の担保という観点から、複数の較正機関での相互比較も重要である。当機構の較正結果は、英国 NPL 及びプローブメーカー較正值 (ISO17025 認定校正機関) と、それぞれの較正不確かさの範囲 (10% 程度) に収まっていることを確認している [21]。今後、較正時の当てはめ範囲の検討や境界効果等、その他要因の詳細な不確かさ評価を実施し、さらに、較正周波数の拡張や、較正用導波管以外を用いた手法での較正值も提供できるよう、データの蓄積や不確かさ評価を実施していく予定である。

## 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】

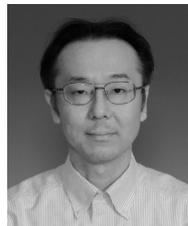
- 1 電波防護指針 諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」, (1990)
- 2 電波防護指針 諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」, (1997)
- 3 ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics, 77 (4), pp.494-522 (1998)
- 4 Evaluating Compliance with FCC Guidelines 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 (1Hz - 100 kHz), Health Physics, 99 (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 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).
- 9 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
- 10 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

- 11 Katja Pokovic, "Advanced Electromagnetic Probes for Near-Field Evaluations." Swiss Federal Institute of Technology, Zurich Doctoral Dissertation ETH No.13334, 1999.
- 12 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
- 13 浜田, 御代田, 佐藤, 石井, 渡辺, "標準アンテナを用いたファントム液剤中での SAR プローブ較正システムの周波数拡張," EMCJ, 環境電磁工学 109 (370), pp.135-140, 2010 (Jan. 2010).
- 14 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
- 15 Low-frequency (10-450 MHz) Coaxial SAR Calibration System <http://www.npl.co.uk/instruments/products/rf-microwave/low-frequency-coaxial-sar-calibration-system/>
- 16 Loader, B.G, Gregory A.P. Bownds, D., Coaxial artefact standard for specific absorption rate 100 kHz to 400 MHz, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), pp.23-27 March, 2009, Beijing, China
- 17 相京ほか, "携帯無線端末 SAR プローブ較正装置の試作と不確かさの検討 2—1450MHz/1950MHz システムと人体模擬液剤の深度—," 信学技報, EMCJ2005-112, pp.33-38, Nov. 2005.
- 18 相京ほか, "携帯無線端末 SAR プローブ較正装置の試作と不確かさ評価—900MHz 帯 ARIB 標準規格準拠システム—," 信学技報, EMCJ2004-126, pp.55-59, Jan. 2005.
- 19 市野ほか, "携帯電話の SAR 測定における不確かさの評価," 信学技報, EMCJ2004-125, pp.49-54, Jan. 2005.
- 20 浜田, 渡辺, 藤井, 松本, 導波管を用いた SAR プローブの較正不確かさの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ, 環境電磁工学 111 (492), pp.19-23, 2012-03
- 21 Loader *et.al.*, SAR probe calibration: the results of an intercomparison study, EMC Kyoto 2009, pp.81-83, 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.124 表 4 導波管較正の不確かさ評価例(733MHz、EX3DV4 プローブ)

公差の原因	公差 a [%]	確率分布	除数 b	感度係数 $c_i$	標準不確かさ ( $\pm\%$ ) $u=(a / b) \times c_i$	自由度 $v_i$ or $v_{eff}$
(省略)						
拡張不確かさ					<b>(誤)7.83</b> <b>(正)7.68</b>	

以上