

4-6 比吸収率による適合性評価手法及び比吸収率プローブ較正

4-6 *Conformity Assessment Procedure of Wireless Devices using SAR and SAR Probe Calibration*

清水 悠斗 石井 望 長岡 智明

SHIMIZU Yuto, ISHII Nozomu, and NAGAOKA Tomoaki

携帯電話等の人体近傍で使用される無線機器は電波防護指針に対する適合性評価が義務付けられている。本稿では比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) を測定することによる適合性評価に用いる測定装置の測定精度と信頼性保証のための総合評価試験とその不確かさ評価について実例を示して説明する。また、近年の高周波数化する適合性評価に対応するための SAR プローブ較正手法についても説明する。

Wireless communication devices used close proximity to the human body should be evaluated for the conformity with the radio protection guidelines. This paper describes the system validation and its uncertainty evaluation to guarantee the measurement accuracy and reliability of the measurement system for the conformity assessment by measuring the SAR (specific absorption rate). The paper also describes the SAR probe calibration method for the recent high-frequency conformity assessment.

1 まえがき

本章では、適合性評価に用いる SAR 測定装置の総合評価試験及び不確かさ評価、適合性評価試験に用いる SAR プローブの較正手法開発に関する NICT の取組について述べる。

近年、情報通信技術の発展に伴い様々な移動通信端末が普及している。特に携帯電話は日常生活において欠かせないものとなっている。その一方で、無線機器から放射される電波の人体へのばく露に対するガイドラインが ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) や IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) から提供されている [1][2]。国内においても電波防護指針 [3] が定められており、この電波防護への適合性評価が求められている。この電波防護指針において現行の携帯電話で利用されている周波数帯を含む 100 kHz から 6 GHz では SAR が安全性評価の指針値として使用されている。SAR とは単位質量あたりに吸収される電力のことであり、以下の式で定義される。

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} \text{ [W/kg]} \quad (1)$$

ここで、 σ は生体組織の導電率 [S/m]、 E は生体組織内

の電界の実効値 [V/m]、 ρ は生体組織の密度 [kg/m³] である。また、携帯電話のような主に身体に極めて近接して (20 cm 以内) 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は、局所吸収指針が適用され、局所 SAR により評価を行う。局所 SAR とは微小体積あ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関数となる SAR を任意の 1 g または 10 g の組織内で平均したもののことである。国内における適合性評価のための SAR 測定では、10 g の組織を立方体で定義し、任意の時間平均の SAR で評価を行う。日本においては時間平均として 6 分間平均を用いている。

無線機器の適合性評価について、各国独自の条件で試験を行うと、国によって同じ無線機器であるにもかかわらず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、携帯電話等の人体近傍で使用される無線機器の適合性評価方法が IEC (International Electrotechnical Commission) と IEEE により国際規格として標準化 [4] されており、国際的に同じ条件で適合性評価試験が実施されている。

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、高い信頼性をもつ

4 人体に対する電波ばく露評価技術

て確認できるように策定されている。信頼性を確保するための重要な要件として、測定システムの妥当性検証とその不確かさ評価が挙げられる。適合性評価規格では、測定システムの妥当性検証のために、単純な測定条件での SAR 測定値と数値計算によって与えられる参照値を比較することによる総合評価試験とその不確かさ評価に関する規定がされている。なお、適合性評価手法では、高い信頼性に加えて、簡便な機器と手順で実施できることも要求される。

そこで、従来の携帯電話等で用いられる 700 MHz から 6 GHz において、適合性評価装置の総合評価試験を実施し、これらの結果の信頼性担保のために不確かさ評価 [6] についてもを行い、不確かさ評価結果から支配的となっている不確かさ要因について分析した結果について報告する。これに加えて、適合性評価においては、測定に用いる SAR プローブの較正も重要な要素の 1 つである。現在、NICT では SAR プローブの較正について、導波管を用いた手法によって実施しているが、その内容については本研究報告 4-7「SAR プローブの較正と不確かさ評価」を参照されたい。ここでは、SAR プローブ較正の高周波数化対応のための液剤中アンテナを用いた SAR プローブ較正手法とその関連技術についても報告する。

2 SAR を用いた無線機器の適合性評価手法

SAR の測定は式 (1) で示されるように、ファントム内の電界強度を測定することによって測定することが可能となっている。ここでファントムとは、実験的に SAR を測定するために用いられる擬似的な人体モデルのことであり、モデル全体にわたって同じ材料を用いるものを均一ファントム、対応する組織ごとに忠実に電気的特性を模擬したものを不均一ファントムと呼ぶ。無線機器の適合性評価においては、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(生体等価液剤)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無線機器の評価に使用する頭部ファントム(SAM: Specific Anthropomorphic Mannequin)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存在する。また、生体等価液剤とは、人体の電気的特性を模擬した液体で、適合性評価に用いられる。液剤の電気的特性は適合性評価規格である IEC/IEEE 62209-1528 において、4 MHz から 10 GHz の間のいくつかの周波数において規格値が定められている。規格値が定められていない周波数については、線形補間により値を決定する。

図 1 に SAR 測定装置の外観を示す。図の測定システ

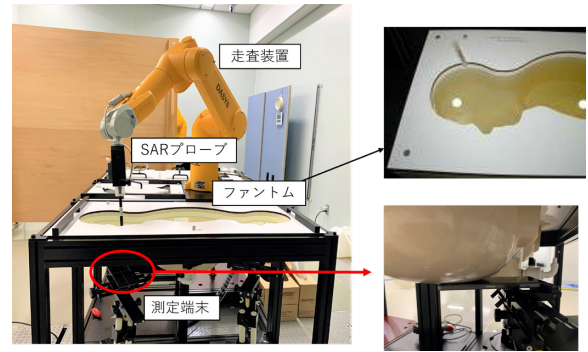


図 1 SAR 測定装置

ムは Schmid & Partner Engineering AG 社の DASY6 [5] と呼ばれるシステムであり、SAR プローブについても同社の EX3DV4 SAR プローブを用いている。この測定システムは SAR を用いた適合性評価規格 [4] に対して、4 MHz から 10 GHz の範囲において、準拠したものとなっている。

SAR を用いた適合性評価では、人体頭部と胴体での SAR 測定をそれぞれ行う必要がある。そこで、頭部ファントムもしくは平面ファントムに生体等価液剤を充填し、生体へのばく露状況を模擬する。生体等価液剤は NTT アドバンステクノロジー社のブロードバンド対応生体等価液剤 [6] を使用している。また、評価する無線機器も実際の使用状況の再現するために、頭部の場合は側頭部に密着、胴体の場合はファントムに対して一定の離隔距離をおいて設置される。さらに携帯電話の場合は、基地局シミュレータ (Anritsu MT8821C) と接続し、送信電力が最大となるように、通信条件を設定する。ここで、頭部ファントム及び平面ファントムの形状や無線機器の設置位置についても測定規格 [4] において規定がされている。

上記の設定を行った後に、生体等価液剤中の電界強度を測定し、SAR の算出を行っていく。電界強度の測定には SAR プローブと呼ばれる電界プローブを用いる。SAR プローブは等方性を実現するために 3 つの微小ダイポールのセンサから構成され、各ダイポール素子の根本にあるダイオードによる二乗検波により、電界強度の二乗値を直流電圧に変換して、測定を行う。ここで、電界強度の二乗値と直流電圧の間の変換係数の算出はプローブ較正によって行われている。

適合性評価における指針値は単位質量あたりの SAR の平均値であることから、電界強度測定も三次元走査により行う必要がある。このことから、SAR プローブが多軸可動のロボットアームに接続され、測定領域内を移動することで、10 g 平均局所 SAR は算出される。このような測定を無線機器が利用可能なすべての周波数帯や変調方式等の組み合わせで実施し、そ

の中の最大の10 g平均局所SARが許容値である2 W/kgを超えないことを確認する。

3 SAR 測定装置の総合評価試験

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と、測定の再現性を簡易的に確認するための簡易性能試験がある。総合評価試験は、その実施を少なくとも年1回以上は定期的に行うのに加えて、測定システムの改修や較正等を実施し、システム構成が変更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。また、簡易性能試験については、SAR測定を行う前に実施することが要求されている。

図2に総合評価試験の評価系を示す[4]。総合評価試験においては、標準波源として、寸法が規定されたアンテナが用いられ、ファントムに対するアンテナの設置位置についても規定されている。総合評価試験では、規定位置に標準アンテナを設置した際のSAR測定値と測定規格等で示されている数値計算による参照値を比較することで、妥当性検証を行う。

NICTでは標準アンテナとしてダイポールアンテナを使用しているため、標準ダイポールアンテナでの総合評価試験と不確かさ評価結果について、本稿では示す。

3.1 総合評価試験の手順

①総合評価試験系の構築

総合評価試験の試験環境は、電波暗室もしくはシールドルーム内で、室温が18℃から25℃の範囲であり、試験前後での生体等価液剤の温度変化が±2℃以内であることが要求される。評価ではファントム容器として平面ファントムを用いる。本測定では縦292 mm、横178 mm、高さ178 mmの直方体形状の平面ファン

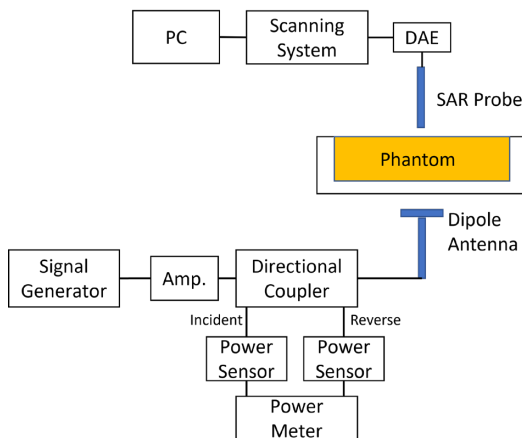


図2 総合評価試験系 [4]

トムを使用している。このファントム容器を水平になるように設置し、内部に生体等価液剤を深さ150 mmになるまで充填する。なお、使用する生体等価液剤の電気定数は、適合性評価規格[4]に定められている比誘電率・導電率に対して、差異が±5%以内であることを同軸プローブ法による電気定数測定で確認する。その後、ダイポールアンテナをファントム底面とアンテナエレメントが平行になるようにして、ファントム底面中心に設置する。このとき、ファントムとダイポールアンテナ間の離隔距離をスペーサーを用いて調整するが、周波数に応じて、1 GHz未満では15 mm、1 GHz以上6 GHz以下では10 mmとする。

②ダイポールアンテナの反射係数測定

ファントム底面に設置された状態のダイポールアンテナの反射係数をネットワークアナライザにより測定する。このとき、設置状態での反射係数が測定規格で定められている-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入力電力の決定

ダイポールアンテナの入力端での電力値は、1 GHz未満では24 dBm、1 GHz以上では22 dBmとなるように設定する。なお、測定中も±0.1 dBmの範囲で一定値となるように方向性結合器の”Incident”ポートでの値をモニターし、適宜、信号発生器の出力電力を調整する。

④SAR測定

ダイポールアンテナに電力を印加した後、10 g平均局所SARの測定を行う。このとき、印加電力の違いにより評価内容が異なる。以下に、その評価内容を示す。[SAR評価]

10 g平均局所SARが0.4 W/kgから10 W/kgの範囲となるような電力をアンテナに印加して、SAR測定を行う。その後、10 g平均局所SARを適合性評価規格[4]で規定されている数値計算条件で算出される参照値と比較し、両者の偏差が10%以内であることを確認することで、適合性評価装置の動作検証を行う。この際、10 g平均局所SARはアンテナへの入力電力で規格化され、1 W入力相当とした際のSAR値で比較を行う。

[線形性評価]

適合性評価システムの線形性評価のため、SAR評価の場合とは異なる入力電力での10 g平均局所SARを測定する。このときの入力電力は、10 g平均局所SARが10 W/kg、2 W/kg、0.4 W/kg、0.12 W/kg相当となるように設定し、そのときに得られたSARを入力電力で正規化し、SAR評価で算出した10 g平均局所

4 人体に対する電波ばく露評価技術

SAR と比較し、その差異が 10 % 以内であることを確認する。

3.2 総合評価試験結果

本報告では評価対象のシステムとして Schmid & Partner Engineering AG 社の DASY6 システムを用い、SAR プローブは同社製の EX3DV4 プローブを用いた結果について報告する。総合評価試験を行った周波数は、文献 [4] 中もしくは使用した標準ダイポールアンテナのメーカーが提供する参照値が存在する周波数とし、本稿では 900 MHz、1.95 GHz、2.45 GHz、3.5 GHz、5.6 GHz の 5 周波数について報告する。

表 1 に各周波数での総合評価試験で得られた 10 g 平均局所 SAR を示す。また、数値計算によって得られる参照値とその参照値との偏差についても示す。この表から、今回評価した全ての周波数において測定された 10 g 平均局所 SAR が参照値の 10 % 以内に収まっていることが確認できる。

表 2 に線形性評価の結果を示す。この表に記載のある 10 g 平均局所 SAR は各目標 SAR において得られた 10 g 平均局所 SAR を 1 W 入力相当になるよう規格化した値である。この結果から、アンテナへの入力電力を変化させた場合でも、SAR 評価で得られた平均局所 SAR との偏差が 10 % 以内であることがわかる。以上の総合評価試験の結果より、本報告で評価した適合性評価システムは、評価した周波数において、SAR を用いた無線機器の適合性評価に利用可能であることを示した。

3.3 総合評価試験の不確かさ

3.1 の総合評価試験系において IEC 規格 [4] に記載のある不確かさバジェットを基に不確かさ評価を実施した。表 3 に各周波数での総合評価試験の拡張不確かさを示す。この表から各周波数における拡張不確かさは 10 % から 20 % の範囲にあり、周波数が高くなるにつれて不確かさも大きくなっていることが確認できる。

表 4 から表 8 に各周波数での不確かさバジェットを示す。これらの表から、比較的大きな値となっている項目は「プローブ較正」、「軸等方性」、「直線性」、「検出限

界」、「波源に対する他の不確かさ要因」、「ファントム不確かさ」であるとわかる。各項目の評価内容については後述するが、これらのうち、「プローブ較正」から「検出限界」については SAR プローブに関連するものであり、「波源に対する他の不確かさ要因」、「ファントム不確かさ」はダイポールアンテナの位置に関連するものである。このことから、これらの不確かさ要因を低減

表 2 線形性測定結果

周波数	目標 SAR (W/kg)	比較値 (表 1 の結果) (W/kg)	測定値 (W/kg)	偏差 (W/kg)
900 MHz	10	6.96	6.81	-2.19
	2		6.96	-0.04
	0.4		6.88	-1.16
	0.12		6.87	-1.32
1.95 GHz	10	21.80	21.47	-1.51
	2		21.79	-0.04
	0.4		21.59	-0.98
	0.12		21.63	-0.80
2.45 GHz	10	26.27	25.88	-1.49
	2		25.97	-1.14
	0.4		25.99	-1.07
	0.12		26.13	-0.54
3.5 GHz	10	23.39	23.66	1.15
	2		23.54	0.64
	0.4		23.35	-0.17
	0.12		22.98	-1.75
5.6 GHz	10	24.61	24.68	0.28
	2		24.45	-0.66
	0.4		24.17	-1.81
	0.12		23.42	-4.84
	0.4		42.28	0.71
	0.12		41.88	-0.24

表 1 総合評価試験結果

周波数	参照値 (W/kg)	測定値 (W/kg)	偏差 (%)
900 MHz	6.99	6.96	-0.38
1.95 GHz	20.90	21.80	4.31
2.45 GHz	24.00	26.27	9.46
3.5 GHz	24.60	23.39	-4.92
5.6 GHz	22.50	24.61	9.38

表 3 総合評価試験における拡張不確かさ

周波数	拡張不確かさ (%)
900 MHz	10.6
1.95 GHz	11.3
2.45 GHz	12.1
3.5 GHz	13.4
5.6 GHz	20.4

することで、拡張不確かさの低減に大きく貢献することができると言える。

以下に各不確かさ項目の詳細について記載する。

- プローブ較正

NICTにおいて実施した較正の不確かさを用いた(4-7「SAR プローブの較正と不確かさ評価」参照)。

- プローブ等方性

SAR プローブの水平面内等方性を評価したものである。図2の評価系において、生体等価液剤中で電界強度が最も大きくなる地点にSARプローブをファントム底面に対して垂直に配置し、プローブを15度ずつ360度回転させ、各角度における局所SARを算出し、得られた局所SARの最大値と最小値の偏差を計算し、それを不確かさとする。

- 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、それらの電気的結合により、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(2)または(3)から導出する。

$$U_{boundary} = \Delta SAR_{be} \frac{(d_{be} + d_{step})^2}{2d_{step}} \frac{e^{-d_{be}/(\delta/2)}}{\delta/2}$$

$$(d_{be} + d_{step}) < 10 \text{ mmかつ} f \leq 3 \text{ GHz} \quad (2)$$

$$U_{baoundary} = \Delta SAR_{be} \frac{\delta}{\delta - d_{be}}$$

$$d_{be} < \delta \text{かつ} f > 3 \text{ GHz} \quad (3)$$

ここで、 d_{be} [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、 ΔSAR_{be} [%] は距離 d_{be} において、4-7に記載のある式(7)で求められる較正導波管内での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り決定した。

- プローブの線形性

本項目は、以下の方法により評価した。アンテナ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、アンテナ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対アンテナ入力電力の線形近似式を求めた。

$$SAR_{peak} = aP_{in} + b \quad (4)$$

この近似式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。

- プローブの検出限界

式(4)において、 P_{in} をSNR(Signal to Noise Ratio)が6 dB、すなわちプローブのノイズフロアから6 dB高い入力電力 $P_{in,6dB}$ におけるプローブの出力電圧 $V_{o,6dB}$ を算出する。その後、総合評価試験系においてアンテナに $P_{in,6dB}$ を印加した際のプローブでの出力電圧 $V_{o,6dB,meas}$ を測定する。そして測定によって得られた出力電圧 $V_{o,6dB,meas}$ と式(1)から算出した電圧 $V_{o,6dB}$ の差異を比較することで不確かさとする。そのため、プローブのノイズフロアについて値を小さく見積もっている場合、その値から6 dB電力が高くなった点もノイズフロアである可能性があるため、式(4)の近似直線で得られる値との差異が大きくなり不確かさを過大に見積もる可能性がある。今回の評価ではすべての周波数においてノイズフロアの値を0.01 W/kgとして不確かさを算出した。

- 読み取り電子機器

メーカ提供の不確かさを用いた。

- RF 周囲環境雑音

アンテナへのRF入力のない状態で実施したSAR測定と0.4 W/kgを比較し、その偏差を不確かさとした。

- 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測定値と比較し、その偏差を不確かさとした。

- プローブ走査装置の機械的制約

式(5)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不確かさを評価した。

$$U_{robot} = \frac{d_{ss}}{\delta/2} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 d_{ss} [mm] 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。

- ファントム容器に対する位置決め精度

式(6)により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に関する不確

かさを評価した。

$$U_{pos} = \frac{d_{ph}}{\delta/2} \times 100 \quad (6)$$

ここで、 d_{ph} [mm] 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て、0.04 mm とした。

• データ後処理

SAR 測定システムメーカ提供の値を用いた。

• 波源の数値モデルと実験装置の偏差

総合評価試験で用いたダイポールアンテナについて、製作時の許容偏差 (± 1.0 %) だけエレメント長を変化させた際の SAR 値を数値シミュレーションにより計算し、総合評価試験の際の数値シミュレーションによる参照値と比較し、その偏差を公差値とした。

• 入力電力

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。

• SAR ドリフト測定

総合評価試験中の入射電力・反射電力の測定値を記録し、測定した電力の標準偏差を公差値とした。

• インピーダンス不整合

アンテナ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、アンテナ入力端の反射係数 Γ_p 、 Γ_s 、 Γ_a を測定し、以下の式から最大値となったほうを公差値とした。

$$Error_{max} = 1 - \frac{\{(1 - |\Gamma_p|^2) \times (1 - |\Gamma_s||\Gamma_a|)\}}{(1 + |\Gamma_s||\Gamma_p|)^2} \quad (7)$$

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

• 波源に対する他の不確かさ要因

標準ダイポールアンテナの設置・製作誤差に相当するもので、式 (9) により導出した。

$$U_{ant} = \left(\frac{(a + d)^2}{a^2} - 1 \right) \times 100 \quad (9)$$

ここで a はダイポールとファントムの距離であり、1 GHz 未満で 15 mm、1 GHz 以上 6 GHz 以下で 10 mm である。また、 d はダイポールアンテナの製作精度であり、0.1 mm である

• 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 (9) 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 (11) 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。

$$U_{phantom} = \left(\frac{(a + d)^2}{a^2} - 1 \right) \times 100 \quad (10)$$

$f < 3 \text{ GHz}$

$$U_{phantom} = \sqrt{\left(100 \times \left[\frac{(a + d)^2}{a^2} - 1 \right]^2 + (5 \times |\varepsilon_{r_{sehl}} - 4|)^2 \right)} \quad (11)$$

$f \geq 3 \text{ GHz}, 2 \leq \varepsilon_{r_{sehl}} \leq 5$

ここで a はダイポールとファントムの距離であり、1 GHz 未満で 15 mm、1 GHz 以上 6 GHz 以下で 10 mm である。 d はファントム容器の形状と厚さの公差の許容値であり、メーカ仕様より 0.2 mm とした。また、 $\varepsilon_{r_{sehl}}$ はファントム容器の比誘電率であり、メーカ仕様より 3.3 とした。確率分布は矩形分布を用いる。

• ファントム液剤電気定数測定不確かさ

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 O2 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。

• 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 (12)、(13) から導出する。

$$U_{\varepsilon_r, temp} = 100 \times \left[2 \times \frac{[\varepsilon_r(T_{high}) - \varepsilon_r(T_{low})]}{\varepsilon_r(T_{high}) + \varepsilon_r(T_{low})} \times \frac{2}{T_{high} - T_{low}} \right] \quad (12)$$

$$U_{\sigma,temp} = 100 \times \left| 2 \times \frac{[\sigma(T_{high}) - \sigma(T_{low})]}{\sigma(T_{high}) + \sigma(T_{low})} \times \frac{2}{T_{high} - T_{low}} \right| \quad (13)$$

ここで、 $\varepsilon_r(T_{high})$ 、 $\varepsilon_r(T_{low})$ 及び $\sigma(T_{high})$ 、 $\sigma(T_{low})$ はそれぞれ T_{high} 、 T_{low} の時の誘電率・導電率である。 T_{high} 、 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℃、 T_{low} は18℃とした。

表4 総合評価試験における不確かさバジェット (900 MHz)

不確かさ要因	公差値 (%)	分布	除数	感度係数	標準不確かさ (%)
測定システム					
プローブ較正	3.00	N	1	1	3.00
軸等方性	2.49	R	$\sqrt{3}$	1	1.44
境界効果	0.01	R	$\sqrt{3}$	1	0.00
直線性	1.70	R	$\sqrt{3}$	1	0.98
検出限界	0.10	R	$\sqrt{3}$	1	0.06
読み取り電子機器	1.50	N	2	1	0.75
RF 周囲条件 (雑音)	0.06	R	$\sqrt{3}$	1	0.03
RF 周囲条件 (反射)	3.02	R	$\sqrt{3}$	1	1.74
プローブ走査装置の 機械的許容偏差	0.22	R	$\sqrt{3}$	1	0.13
ファントム外殻に対する プローブ位置誤差	0.22	R	$\sqrt{3}$	1	0.13
後処理	2.80	R	$\sqrt{3}$	1	1.62
総合評価試験波源					
波源の数値モデルと 実験装置の偏差	0.37	N	1	1	0.37
入力電力	1.20	R	$\sqrt{3}$	1	0.69
SAR ドリフト測定	0.14	R	$\sqrt{3}$	1	0.08
インピーダンス不整合	0.10	U	$\sqrt{2}$	1	0.07
波源に対する他の不確かさ要因	4.04	R	$\sqrt{3}$	1	2.33
ファントムとセットアップ					
ファントム不確かさ	3.13	R	$\sqrt{3}$	1	1.81
誘電率と導電率の偏差に対する SAR 値偏差補正	0.02	N	1	0.84	0.02
液剤導電率 (温度の不確かさ)	1.87	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.77
液剤導電率 (測定の不確かさ)	0.30	N	1	0.71	0.21
液剤誘電率 (温度の不確かさ)	0.24	R	$\sqrt{3}$	0.26	0.04
液剤誘電率 (測定の不確かさ)	0.54	N	1	0.26	0.14
合成標準不確かさ		RSS			5.32
拡張不確かさ (k=2)					10.63

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表5 総合評価試験における不確かさバジェット (1.95 GHz)

不確かさ要因	公差値 (%)	分布	除数	感度係数	標準不確かさ (%)
測定システム					
プローブ較正	2.45	1	1	1	2.45
軸等方性	2.56	R	$\sqrt{3}$	1	1.48
境界効果	0.01	R	$\sqrt{3}$	1	0.01
直線性	0.80	R	$\sqrt{3}$	1	0.46
検出限界	3.70	R	$\sqrt{3}$	1	2.14
読み取り電子機器	1.50	N	2	1	0.75
RF 周囲条件 (雑音)	0.07	R	$\sqrt{3}$	1	0.04
RF 周囲条件 (反射)	0.82	R	$\sqrt{3}$	1	0.47
プローブ走査装置の 機械的許容偏差	0.33	R	$\sqrt{3}$	1	0.19
ファントム外殻に対する プローブ位置誤差	0.33	R	$\sqrt{3}$	1	0.19
後処理	2.80	R	$\sqrt{3}$	1	1.62
総合評価試験波源					
波源の数値モデルと 実験装置の偏差	1.07	N	1	1	1.07
入力電力	1.82	R	$\sqrt{3}$	1	1.05
SAR ドリフト測定	0.12	R	$\sqrt{3}$	1	0.07
インピーダンス不整合	0.39	U	$\sqrt{2}$	1	0.27
波源に対する他の不確かさ要因	4.04	R	$\sqrt{3}$	1	2.33
ファントムとセットアップ					
ファントム不確かさ	4.35	R	$\sqrt{3}$	1	2.51
誘電率と導電率の偏差に対する SAR 値偏差補正	0.49	N	1	0.84	0.41
液剤導電率 (温度の不確かさ)	2.46	R	$\sqrt{3}$	0.71	1.01
液剤導電率 (測定の不確かさ)	0.49	N	1	0.71	0.35
液剤誘電率 (温度の不確かさ)	0.01	R	$\sqrt{3}$	0.26	0.00
液剤誘電率 (測定の不確かさ)	0.78	N	1	0.26	0.20
合成標準不確かさ		RSS			5.64
拡張不確かさ (k=2)					11.29

表6 総合評価試験における不確かさバジェット (2.45 GHz)

不確かさ要因	公差値 (%)	分布	除数	感度係数	標準不確かさ (%)
測定システム					
プローブ較正	2.38	1	1	1	2.38
軸等方性	2.73	R	$\sqrt{3}$	1	1.58
境界効果	0.19	R	$\sqrt{3}$	1	0.11
直線性	1.50	R	$\sqrt{3}$	1	0.87
検出限界	4.80	R	$\sqrt{3}$	1	2.77
読み取り電子機器	1.50	N	2	1	0.75
RF 周囲条件 (雑音)	0.01	R	$\sqrt{3}$	1	0.00
RF 周囲条件 (反射)	2.88	R	$\sqrt{3}$	1	1.66
プローブ走査装置の 機械的許容偏差	0.43	R	$\sqrt{3}$	1	0.25
ファントム外殻に対する プローブ位置誤差	0.43	R	$\sqrt{3}$	1	0.25
後処理	2.80	R	$\sqrt{3}$	1	1.62
総合評価試験波源					
波源の数値モデルと 実験装置の偏差	0.36	N	1	1	0.36
入力電力	1.86	R	$\sqrt{3}$	1	1.07
SAR ドリフト測定	0.19	R	$\sqrt{3}$	1	0.11
インピーダンス不整合	0.43	U	$\sqrt{2}$	1	0.30
波源に対する他の不確かさ要因	4.04	R	$\sqrt{3}$	1	2.33
ファントムとセットアップ					
ファントム不確かさ	4.35	R	$\sqrt{3}$	1	2.51
誘電率と導電率の偏差に対する SAR 値偏差補正	0.99	N	1	0.84	0.83
液剤導電率 (温度の不確かさ)	0.43	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.18
液剤導電率 (測定の不確かさ)	0.53	N	1	0.71	0.38
液剤誘電率 (温度の不確かさ)	0.04	R	$\sqrt{3}$	0.26	0.01
液剤誘電率 (測定の不確かさ)	0.61	N	1	0.26	0.16
合成標準不確かさ		RSS			6.06
拡張不確かさ (k=2)					12.11

4 人体に対する電波ばく露評価技術

表7 総合評価試験における不確かさバジェット (3.5 GHz)

不確かさ要因	公差値 (%)	分布	除数	感度係数	標準不確かさ (%)
測定システム					
プローブ較正	3.03	1	1	1	3.03
軸等方性	3.62	R	$\sqrt{3}$	1	2.09
境界効果	0.00	R	$\sqrt{3}$	1	0.00
直線性	1.20	R	$\sqrt{3}$	1	0.69
検出限界	6.50	R	$\sqrt{3}$	1	3.75
読み取り電子機器	1.50	N	2	1	0.75
RF 周囲条件 (雑音)	0.13	R	$\sqrt{3}$	1	0.07
RF 周囲条件 (反射)	1.98	R	$\sqrt{3}$	1	1.14
プローブ走査装置の 機械的許容偏差	0.70	R	$\sqrt{3}$	1	0.40
ファントム外殻に対する プローブ位置誤差	0.70	R	$\sqrt{3}$	1	0.40
後処理	2.80	R	$\sqrt{3}$	1	1.62
総合評価試験波源					
波源の数値モデルと 実験装置の偏差	0.79	N	1	1	0.79
入力電力	2.06	R	$\sqrt{3}$	1	1.19
SAR ドリフト測定	0.14	R	$\sqrt{3}$	1	0.08
インピーダンス不整合	0.46	U	$\sqrt{2}$	1	0.33
波源に対する他の不確かさ要因	4.31	R	$\sqrt{3}$	1	2.49
ファントムとセットアップ					
ファントム不確かさ	2.98	R	$\sqrt{3}$	1	1.72
誘電率と導電率の偏差に対する SAR 値偏差補正	0.62	N	1	0.84	0.52
液剤導電率 (温度の不確かさ)	0.80	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.33
液剤導電率 (測定の不確かさ)	0.60	N	1	0.71	0.43
液剤誘電率 (温度の不確かさ)	0.60	R	$\sqrt{3}$	0.26	0.09
液剤誘電率 (測定の不確かさ)	0.60	N	1	0.26	0.16
合成標準不確かさ		RSS			6.70
拡張不確かさ (k=2)					13.39

表 8 総合評価試験における不確かさバジェット (5.6 GHz)

不確かさ要因	公差値 (%)	分布	除数	感度係数	標準不確かさ (%)
測定システム					
プローブ較正	5.32	1	1	1	5.32
軸等方性	3.51	R	$\sqrt{3}$	1	2.03
境界効果	0.27	R	$\sqrt{3}$	1	0.16
直線性	4.20	R	$\sqrt{3}$	1	2.42
検出限界	11.50	R	$\sqrt{3}$	1	6.64
読み取り電子機器	1.50	N	2	1	0.75
RF 周囲条件 (雑音)	0.51	R	$\sqrt{3}$	1	0.29
RF 周囲条件 (反射)	2.37	R	$\sqrt{3}$	1	1.37
プローブ走査装置の 機械的許容偏差	1.25	R	$\sqrt{3}$	1	0.72
ファントム外殻に対する プローブ位置誤差	1.25	R	$\sqrt{3}$	1	0.72
後処理	2.80	R	$\sqrt{3}$	1	1.62
総合評価試験波源					
波源の数値モデルと 実験装置の偏差	0.50	N	1	1	0.50
入力電力	2.09	R	$\sqrt{3}$	1	1.21
SAR ドリフト測定	0.12	R	$\sqrt{3}$	1	0.07
インピーダンス不整合	2.89	U	$\sqrt{2}$	1	2.04
波源に対する他の不確かさ要因	4.31	R	$\sqrt{3}$	1	2.49
ファントムとセットアップ					
ファントム不確かさ	2.98	R	$\sqrt{3}$	1	1.72
誘電率と導電率の偏差に対する SAR 値偏差補正	0.11	N	1	0.84	0.09
液剤導電率 (温度の不確かさ)	1.30	R	$\sqrt{3}$	0.71	0.53
液剤導電率 (測定の不確かさ)	0.30	N	1	0.71	0.21
液剤誘電率 (温度の不確かさ)	0.30	R	$\sqrt{3}$	0.26	0.05
液剤誘電率 (測定の不確かさ)	0.30	N	1	0.26	0.08
合成標準不確かさ		RSS			10.20
拡張不確かさ (k=2)					20.39

4 液剤中アンテナを用いた SAR プローブ較正手法

本章では、現在 NICT で実施している導波管を用いた SAR プローブ較正手法に変わる、液剤中アンテナを用いた SAR プローブ較正手法の検討について報告する。この検討を開始した背景として、導波管は周波数に応じて基本モードを励振するための開口面が異なり、周波数が高くなるにつれて、そのサイズは小さくなることが挙げられる。導波管を用いた較正はプローブを導波管内に挿入する必要があるが、開口面が小さくなることで、それも困難となってくる。そこで、周波数による制約を受けづらい液剤中アンテナを用いた SAR プローブ較正法 [7] について検討を開始した。この手法は生体等価液剤を充填した水槽内にアンテナを設置し、そこから発生する標準電界によってプローブを較正する手法である。

以下では、液剤中アンテナによる SAR プローブ較正の原理と実際にこの手法を用いて SAR プローブを較正した結果について示す。

4.1 較正手法 [7]

液剤中アンテナによる SAR プローブ較正系を図 3 に示す。この較正系において、ポジションに取り付けられた SAR プローブを標準アンテナの中心軸に沿うように垂直に引き上げ、ある一定の測定間隔で標準アンテナから発射される電界より生じる受信電圧 V を測定する。SAR プローブはダイオードによる二乗検波を行うことから、較正係数 CF は以下の式で得ることができる。

$$CF = V/|E^{av}|^2 \quad (14)$$

ここで $|E^{av}|$ はプローブのセンサ部分における平均電界強度を表しており、以下の式により算出される。

$$|E^{av}(x, y, z)| = \frac{|I_p|}{l_{sensor}} \left| \int_{-l_{sensor}/2}^{l_{sensor}/2} e(x, y, z) dl \right| \quad (15)$$

I_p はアンテナエレメント給電点における電流値、 l_{sensor} はプローブセンサ長である。 $e(x, y, z)$ は以下の式で与えられる。

$$e(x, y, z) = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}}}{4\pi \sinh\left(\frac{\gamma l_{ant}}{2}\right)} \left[\frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1} + \frac{e^{-\gamma R_2}}{R_2} - 2 \cosh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \frac{e^{-\gamma R_0}}{R_0} \right] \quad (16)$$

ここで $\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon}$ であり、 ω は角周波数、 μ_0 と ϵ は媒質の透磁率と複素誘電率、 l_{ant} はアンテナエレメント長をそれぞれ表し、 R_0, R_1, R_2 は式 (17) - (19) で表される。

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (17)$$

$$R_1 = \sqrt{(x-l)^2 + y^2 + z^2} \quad (18)$$

$$R_2 = \sqrt{(x+l)^2 + y^2 + z^2} \quad (19)$$

ここで $e(x, y, z)$ は式 (13) で表現できるのに対し、アンテナ電流 I_p は測定からの推定が必要である。このことからプローブセンサ部分の平均電界強度の推定について、2 アンテナ法による標準アンテナの特性測定が必要となる。

$F^e = \sqrt{2}I_p l^e / \sqrt{P_{in}}$ で表される送信アンテナ係数を用いると、式 (15) は以下のように表現できる。

$$|E^{av}(x, y, z)| = \frac{\sqrt{P_{in}}|F^e|}{\sqrt{2}|l^e|l_{sensor}} \left| \int_{-l_{sensor}/2}^{l_{sensor}/2} e(x, y, z) dl \right| \quad (20)$$

さらに送信アンテナ係数 F_e は図 4 に示す測定系において

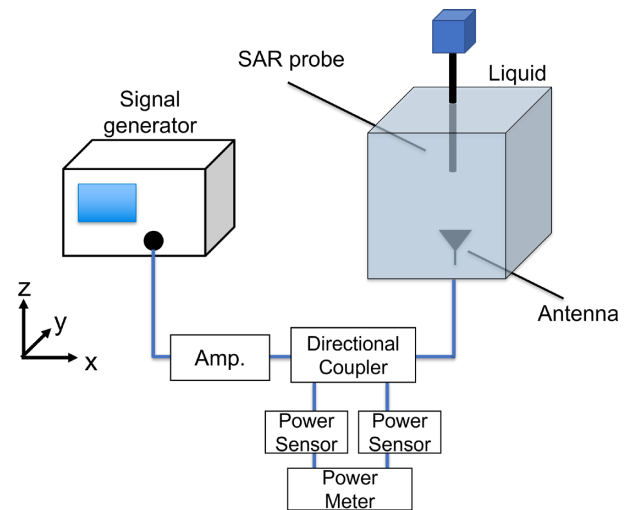


図 3 液剤中アンテナによる SAR プローブ較正系

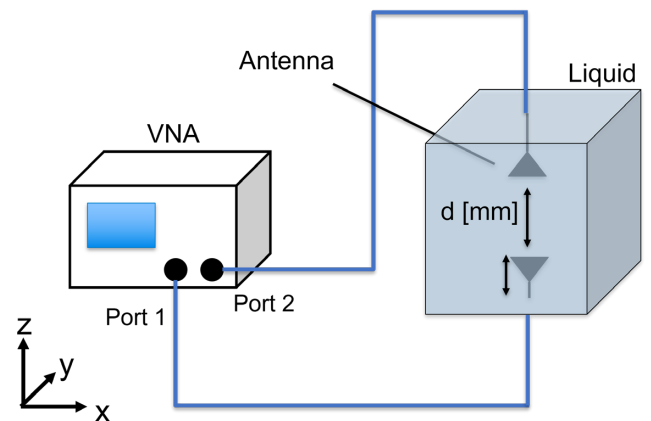


図 4 アンテナ間伝送特性測定系

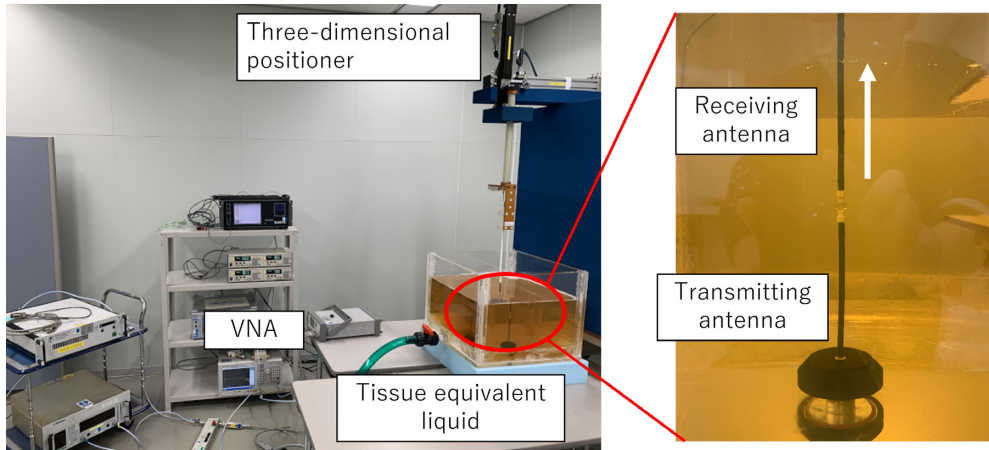


図5 2アンテナ間伝送特性測定の様子

て、送受信アンテナが同様の特性を持つと仮定した場合、以下の関係を満たす [8]。

$$F_e = \sqrt{2}I_p l^e / \sqrt{P_{in}} \doteq \left(\sqrt{\zeta(d)} / |k(d)| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

ここで l^e と P_{in} はアンテナの実行長とアンテナへの入力電力をそれぞれ表す。また、 $\zeta(d)$ と $\kappa(d)$ は以下の式で表現される。

$$\zeta(d) = \frac{|S_{21}(d)|^2}{(1 - |S_{11}(d)|^2)(1 - |S_{22}(d)|^2)} \quad (22)$$

$$\kappa(d) = \frac{1}{4l^e} \int_{-l/2}^{l/2} e(x, 0, d) i_s(x) dx \quad (23)$$

ここで $S_{21}(d)$, $S_{11}(d)$, $S_{22}(d)$ は送受信アンテナ間の伝送特性及び送受信アンテナの反射特性をそれぞれ表す。

よって、液剤中アンテナを用いた SAR プローブ較正では、図3の測定系による SAR プローブ受信電圧測定の前に、図4に測定系においてネットワークアナライザによるアンテナ特性測定を行うことで平均電界強度を推定する必要がある。

4.2 液剤中アンテナ較正法を利用した SAR プローブ較正例

4.1 で説明した液剤中アンテナ較正法を用いて 3,500 MHz において SAR プローブ較正を行った。初めに図5に測定系の写真を示す。470 mm × 470 mm × 350 mm の水槽の深さ 200 mm まで生体等価液剤を充填し、その中にエレメント長が 10 mm のダイポールアンテナを送信アンテナとして配置した。送信アンテナから生じる電界を推定するために、送信アンテナと同じ構造のダイポールアンテナを送信アンテナと対向させるように配置し、送受信アンテナをネットワークアナライザのポート 1 及び 2 にそれぞれ接続した。その

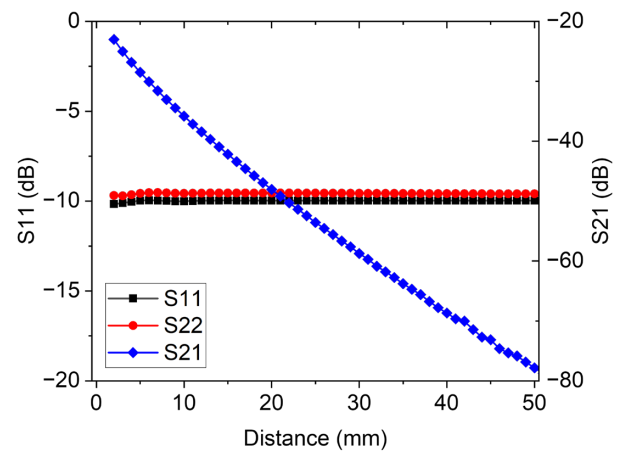


図6 アンテナ反射係数及びアンテナ間伝送特性の距離特性

後、受信アンテナを 3 軸ポジションナにより垂直方向に 1 mm 間隔で 50 mm まで引き上げ、アンテナの反射係数 $S_{11}(d)$, $S_{22}(d)$ 及びアンテナ間伝送特性 $S_{21}(d)$ を測定した。図6に反射係数及びアンテナ間伝送特性の距離特性を示す。この図から、反射係数については送信アンテナ側 ($S_{11}(d)$) と受信アンテナ側 ($S_{22}(d)$) の値に大きな違いはなく、特性も距離に寄らず一定であるとわかる。また、伝送特性についてはアンテナ間距離が離れるにしたがい単調に減少している。

次に図7に示すように図5の測定系から受信アンテナを SAR プローブに取り替え、送信アンテナと対向するように SAR プローブを配置した。その後、送信アンテナに信号発生器とアンプを接続し、1 W の電力を入力した。そして、送信アンテナから生じる標準電界による SAR プローブの受信電圧特性を 1 mm 間隔で 50 mm までプローブを垂直に引き上げ、測定した。受信電圧測定結果を図8に示す。この図から受信電圧特性は送信アンテナから離れるにつれて指数関数的に減少していることがわかる。

最後に図6の結果を用いて、式(20)から(23)により

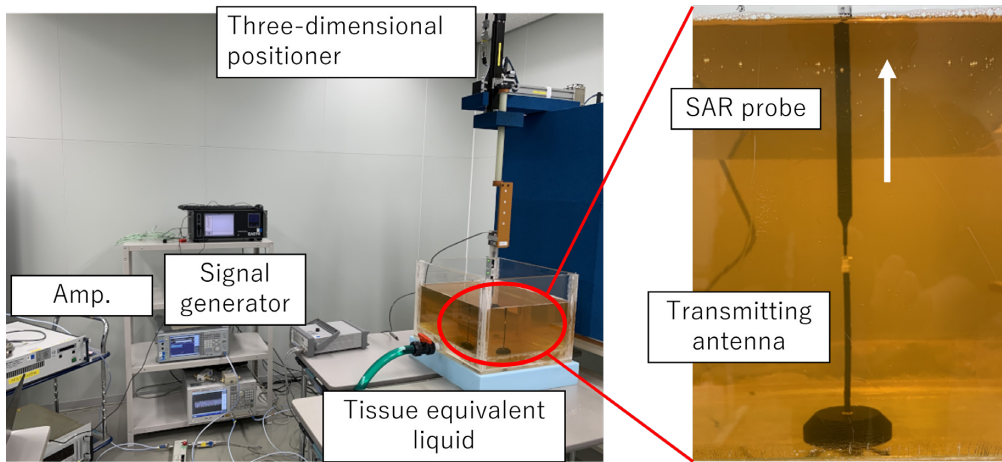


図7 液剤中アンテナによる SAR プローブ較正の様子

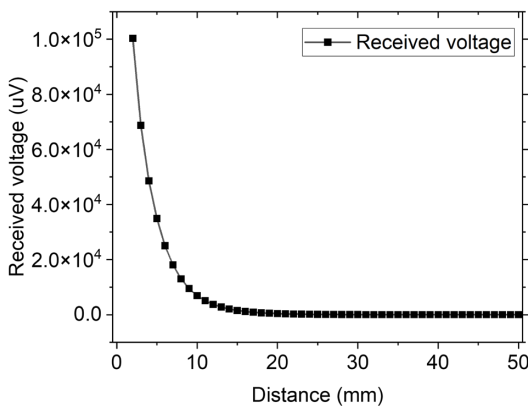


図8 標準電界に対する SAR プローブ受信電圧特性

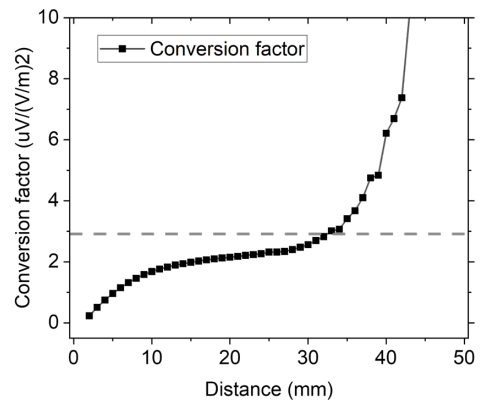


図9 液剤中アンテナ較正による SAR プローブ較正係数

算出された送信アンテナの標準電界の推定値と図8の SAR プローブの受信電圧特性を比較することで、較正係数を算出した。算出結果を図9に示す。この図から距離 20 mm から 30 mm では較正係数が比較的フラットであることから、この範囲での平均値をとり、較正係数を 2.31 とした。なお、図9中に破線で導波管を用いた較正による値も合わせて示しており、その値は 2.91 である。両者を比較すると 20 % 程度の差が生じている。この差が生じた原因については、今後、液剤中アンテナによる較正手法の不確かさ評価等を通じて、解明していく予定である。

5 あとがき

本稿では、SAR 測定方法及び SAR 測定装置の測定精度と信頼性保証のための総合評価試験とその不確かさ評価について報告した。測定した 10 g 平均局所 SAR が数値計算によって得られる参照値と比較し、偏差が 10 % 以内となったことから、評価した周波数において、SAR 測定装置が問題なく使用できることを示した。また、総合評価試験の不確かさ評価において、

周波数が高くなるにつれて、不確かさが大きくなる傾向を確認し、その中でも支配的な不確かさ要因についても明らかにした。また、高い周波数における SAR プローブ較正に対応するために、液剤中アンテナを用いたプローブ較正手法について紹介し、その手法を用いてプローブ較正を行った結果についても報告した。液剤中アンテナによる較正で得られた較正係数は、従来の導波管による較正での較正係数と比較して 20 % 程度の偏差となったため、不確かさ評価等による原因の解明が今後の課題として挙げられる。

また、2020 年に改定された ICNIRP のガイドラインに 6 GHz 以上での電波ばく露量の指針値として追加された吸収電力密度測定について、6 GHz から 10 GHz において SAR を用いた吸収電力密度測定手法が公開仕様書となった [11]。このことから、6 GHz から 10 GHz においても総合評価試験及び不確かさ評価を実施し、その妥当性を評価する必要がある。また、SAR プローブ較正については上述のとおり、周波数が高くなるにつれて導波管の開口面が小さくなることから、6 GHz から 10 GHz においては導波管でのプローブ較正が困難となってくる。このことから、液剤中アンテ

ナを用いたプローブ較正手法を 10 GHz まで拡張することも今後の課題である。

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 ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," Health Phys., vol.118, no.5, pp.483-524, March 2020.
- 2 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, IEEE Standard C95. 1, 2019.
- 3 電波防護指針, 諮問第89号「電波利用における人体防護のあり方」, 平成9年
- 4 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
- 5 Schmid & Partner Engineering AG, DASY6, <https://speag.swiss/products/dasy8/overview/>
- 6 NTT アドバンステクノロジー, SAR 評価液剤, https://keytech.ntt-at.co.jp/analysis_equipment/prd_4004.html
- 7 N. Ishii, J. Chakrothai, K. Wake, and S. Watanabe, "A probe calibration in a liquid phantom using small dipole antennas for SAR measurements in MHz band," IEEE Trans. Instrum. Meas., 2019.7
- 8 E. C. Jordan and K. G. Balmain, Electromagnetic Waves and Radiating Systems. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1968.
- 9 L. F. Chen, C. K. Ong, C. F. Neo, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, Microwave electronics measurement and materials characterization, John Wiley & Sons, 2004.
- 10 D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th ed, Wiley, 2012.
- 11 Conversion method of specific absorption rate to absorbed power density for the assessment of human exposure to radio frequency electromagnetic fields from wireless devices in close proximity to the head and body - Frequency range of 6 GHz to 10 GHz, IEC PAS 63446:2022



石井 望 (いしい のぞむ)

新潟大学
工学部工学科
准教授
知能情報システムプログラム
博士(工学)
生体電磁工学、アンテナ工学
【受賞歴】

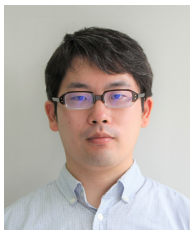
- 2018年 Ulrich Rohde Innovative Conference Paper Award on Antenna Measurements and Applications, IEEE Antennas and Propagation Society
2016年 Best Paper Award, IEICE Communications Society



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)



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