

## 2-5 アンテナの較正

### 2-5-1 30 MHz 以下における EMI 測定用ループアンテナの較正

藤井勝巳 酒井孝次郎 杉山 功 瀬端好一 西山 巖

30 MHz 以下の周波数において磁界を測定するために用いるループアンテナの較正について、近年、開発した方法について解説する。近年の電波利用の多様化・多目的化に対応するために、無線設備の試験だけでなく放射妨害波測定 (EMI 測定) にも使用できるよう、ISO/IEC17025 規格を満たしていることを証明する ASNITE 認定を取得し、国際的にも通用する較正值の提供を開始した。

#### 1 まえがき

近年、周波数 30 MHz 以下の電波は、従来のラジオ放送や業務用無線通信に加えて、IH 調理器や非接触給電装置、非接触 IC カードといった、従来と異なる新しい使い方がなされるようになってきた。両者が同じ周波数帯を共用するためには、実際に電磁界を測定して、干渉や混信が無いことを確認する必要がある。また、AC 電源アダプタや LED 電球をはじめとしたスイッチングレギュレータを内蔵した電気電子機器が、我々の身近なところで広く使われるようになってきており、意図せずに放射される電磁雑音を規制するために、測定を行う必要性が高まっている。このような背景から、NICT では、ISO/IEC17025 規格を満たすことを証明する ASNITE 認定を取得し、較正サービスを 2015 年 7 月より開始、無線通信用、電磁雑音測定用と区別することなく、すべての測定に利用でき、かつ、国際的にも通用する較正証明書を発行できるように体制を整備した。

30 MHz 以下の電磁界強度測定には、従来から、波長に比べて寸法が十分小さなループアンテナが用いられてきた。NICT では、電波研究所の時代からループアンテナの較正に関する研究開発及び較正サービスを行っている [1]。ループアンテナの較正を行う方法には、送信ループアンテナから発射する磁界を、被較正アンテナ (受信アンテナ) を鎖交する磁界を理論的に求める「標準磁界法」が用いられてきた。送信ループアンテナから発射する磁界の強さは、送信ループアンテナのエレメントを流れる高周波電流を正しく測定することによって決定する。エレメントを流れる高周波電流は、エレメントに取り付けられた変換素子を用いて、エレメントを流れる高周波電流を直流電圧に変換して測定する。変換素子としては、交流電流を熱に変換する抵抗体と、熱によって直流電圧を生じる熱電対

が真空ガラスの中に封じ込められたものが用いられる。このとき、送信ループアンテナから発射した磁界強度の正しさ及び国家標準へのトレーサビリティは、変換素子の変換係数を正しく校正することによって保持できる。しかしながら、この較正は煩雑であるなど精度の向上には限界があった [2][3]。

この問題を解決するために、近年、NICT で新たな較正法を開発し [4][5]、較正サービスを開始した。この方法は、従来と同じ「標準磁界法」に分類される方法であるが、従来の方法のように異なる物理量から求める較正法ではなく、較正済みのループアンテナから別のループアンテナを較正する方法である。この較正法の特長は、高周波電流ではなく高周波電力を測定する点と、ループアンテナを用いて国家標準とのトレーサビリティを確保する点である。本稿では、実際に市販のループアンテナを較正した結果を示し、較正結果に付随する不確かさの評価方法について解説する。

#### 2 磁界アンテナ係数の定義と使用法

ループアンテナは、ループ面を鎖交する磁界によって起電力が生じることで動作する。そのため、ループ

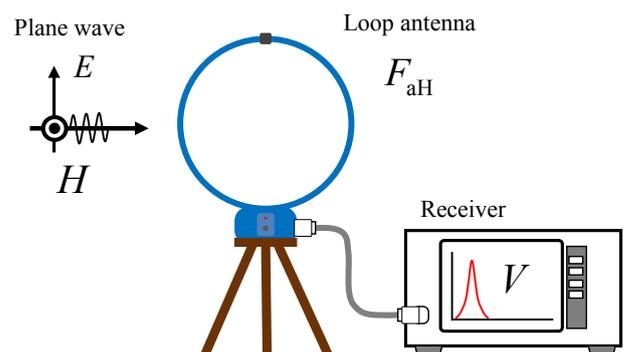


図 1 磁界強度の測定と磁界アンテナ係数の定義

## 2 較正技術の研究開発

アンテナの特性は、図1に示すように、ループ面を鎖交する磁界強度  $H$  と、ループアンテナに接続された受信機に生じる電圧  $V$  との比を使って

$$F_{\text{aH}} = \frac{H}{V} \quad [\text{S/m}] \quad (1)$$

と定義する。この  $F_{\text{aH}}$  を「磁界アンテナ係数」と呼ぶ。通常は、

$$F_{\text{aH}}^{\text{dB}} = 20 \log_{10} F_{\text{aH}} \quad [\text{dB (S/m)}] \quad (2)$$

として dB で表記して用いる。単位は、dB (S/m) である。ループアンテナを較正することによって、磁界アンテナ係数をあらかじめ求めておけば、受信機の出力電圧  $V$  を読むことで、次式を用いて、アンテナを鎖交した磁界の強度を知ることができる。

$$H^{\text{dB}} [\text{dB}(\mu\text{A/m})] = V^{\text{dB}} [\text{dB}(\mu\text{V})] + F_{\text{aH}}^{\text{dB}} [\text{dB(S/m)}] \quad (3)$$

送信源が十分遠方に存在し、平面波を受信している場合には、自由空間中における波動インピーダンス ( $\eta_0 = 120\pi \approx 377.0 \Omega$ ) を加えて、

$$E^{\text{dB}} [\text{dB}(\mu\text{V/m})] = V^{\text{dB}} [\text{dB}(\mu\text{V})] + F_{\text{aH}}^{\text{dB}} [\text{dB(S/m)}] + 51.53 [\text{dB}(\Omega)] \quad (4)$$

を用いて、電界強度に換算することができる。

$$(20 \log_{10} 377.0 = 51.53)$$

## 3 較正法

ループアンテナを較正する方法は、すでに幾つもの方法が提案されており [6]–[8]、一部の方法は国際無線障害特別委員会 (CISPR) にて国際規格化されている [8]。分類の仕方もいくつかあるが、表1に示すのは、高周波電流や高周波電力といった他の物理量からループアンテナの磁界アンテナ係数を求める方法 (絶対較正) と、磁界アンテナ係数が既知のループアンテナを使って、被較正アンテナの磁界アンテナ係数を求める方法 (相対較正) とで分類し、較正に必要な装置類、測定回数や特徴などが記してある。

今回、NICT で開発した較正法 [4][5] は「相対較正」に分類される方法であり、磁界アンテナ係数が既知のループアンテナを必要とするが、国家標準とのトレーサビリティを直接的に確保できる、測定が1回で済む、といった利点を有する較正法である。測定回数が少ないことは、較正の不確かさを小さくする上で不可欠な要素である。

いま、「磁界アンテナ係数が既知のループアンテナ」(以下、「標準器」) を送信アンテナとして使用することを考える。磁界アンテナ係数は、式 (1) で定義したよ

表1 ループアンテナの較正法

	名称	較正装置	測定回数	特徴
絶対較正	TEM セル法	TEM セル 電力計 信号発生器 受信機	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>入力電力から TEM セル内を伝搬する磁界の強度を求める。高周波電力とトレーサブル。</li> <li>被較正アンテナの大きさは、TEM セルの大きさの制限を受ける。</li> <li>測定は1回でよい。</li> </ul>
	電流測定法	送信ループ (熱電対又は電流 プローブ付) 信号発生器 受信機	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>エレメントを流れる高周波電流を測定してループより発生した磁界の強度を求める。高周波電流とトレーサブル。</li> <li>磁界強度は熱電対や電流プローブの耐入力に依存。</li> <li>測定は1回でよい。</li> </ul>
	3 アンテナ法	アンテナ 3 個 VNA	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>高周波減衰量とトレーサブル。</li> <li>3 回の測定が必要。</li> </ul>
相対較正	置換法	送信ループ 標準器 VNA	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>標準器と被較正アンテナと寸法が異なる場合には補正が必要。</li> <li>標準器だけでなく、送信ループの管理が必要。</li> <li>2 回の測定 (比較測定) が必要。</li> </ul>
	磁界アンテナ係数法	標準器 VNA	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>磁界アンテナ係数が既知のアンテナを磁界発生用の送信アンテナとして使用。</li> <li>測定は1回でよい。</li> </ul>

注) VNA：ベクトル・ネットワーク・アナライザ。信号発生器と受信機の組み合わせでも較正実施可能。

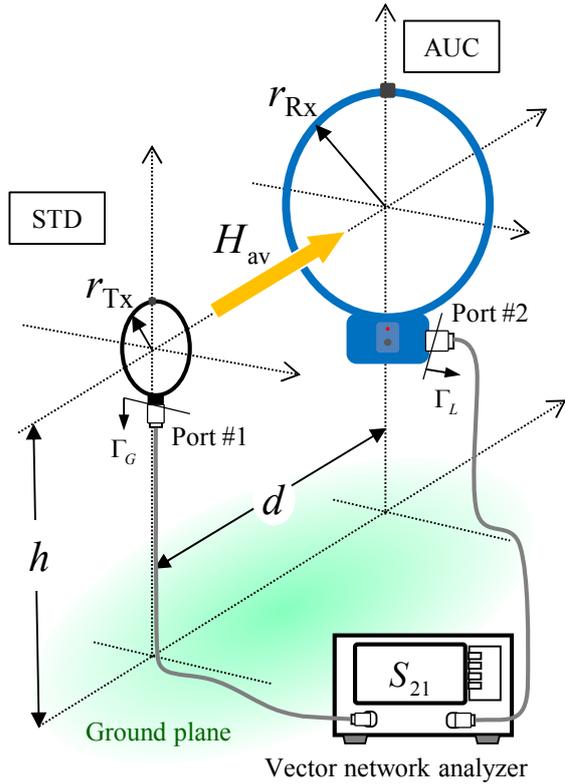


図2 アンテナ配置と実際の測定の様子

うに、受信アンテナの特性を表すパラメータであるが、可逆性を有するアンテナの場合には、送信アンテナとして使用することができる。

図2に示すように、標準器(半径  $r_{Tx}$ )から距離  $d$  だけ離れた場所に、磁界アンテナ係数を求めたい半径  $r_{Rx}$  の大きさの円形ループアンテナ(以下、「被校正アンテナ」と記す。)を、ループ面が標準器と平行かつ中心が一致するように配置する。このとき、ベクトル・ネットワーク・アナライザ(以下、VNA)を使用して、標準器と被校正アンテナの間の  $S_{21}$  を測定すれば、被校正アンテナの磁界アンテナ係数は、次式から決定できる。

$$F_{ah}(AUC) = \frac{2K}{\omega \mu_0 Z_0 F_{ah}(STD)} \frac{1}{|S_{21}|} \quad (5)$$

ただし、

$F_{ah}(STD)$  : 標準器の磁界アンテナ係数 [S/m]

$\omega$  : 角周波数 ( $2\pi f$  [rad/s])

$\mu_0$  : 真空の透磁率 ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)

$Z_0$  : 測定系の特性インピーダンス (50  $\Omega$ )

である。また、

$$K \approx \frac{\sqrt{1 + (\beta R_0)^2}}{2\pi R_0^3} \left\{ 1 + \frac{15}{8} \left( \frac{r_{Tx} r_{Rx}}{R_0^2} \right)^2 + \frac{315}{64} \left( \frac{r_{Tx} r_{Rx}}{R_0^2} \right)^4 \right\} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (\lambda \text{ は波長、} c \text{ は光の速さ})$$

$$R_0 = \sqrt{d^2 + r_{Tx}^2 + r_{Rx}^2}$$

$d$  : 標準器と被校正アンテナのループ面間の距離 [m]

$r_{Tx}$  : 標準器のループ半径 [m]

$r_{Rx}$  : 被校正アンテナのループ半径 [m]

である [9]。dB を使って計算する場合には、

$$F_{ah}^{dB}(AUC) = -45.9 - 20 \log_{10} f_{MHz} - S_{21}^{dB} + 20 \log_{10} K - F_{ah}^{dB}(STD) \quad [\text{dB (S/m)}] \quad (7)$$

である(導出は付録参照)。

## 4 校正結果

本稿では、図3(a)に示す EMI 測定用ループアンテナ (TESEQ 社製、HLA-6210) を校正した結果を示す。このループアンテナは、エレメントの太さ  $\phi_{AUC} = 2.0$  cm、半径  $r_{Rx} = 30$  cm のシールドループアンテナで、プリアンプを内蔵している。

一方、NICT の標準器は、図3(b)に示すように、エレメントの太さ  $\phi_{STD} = 3.7$  mm、半径  $r_{Tx} = 5.0$  cm のシールドループアンテナ (林栄精器社製、M201 A-100 R) であり、英国の国家標準を維持管理している国立物理学研究所 (NPL: National Physical



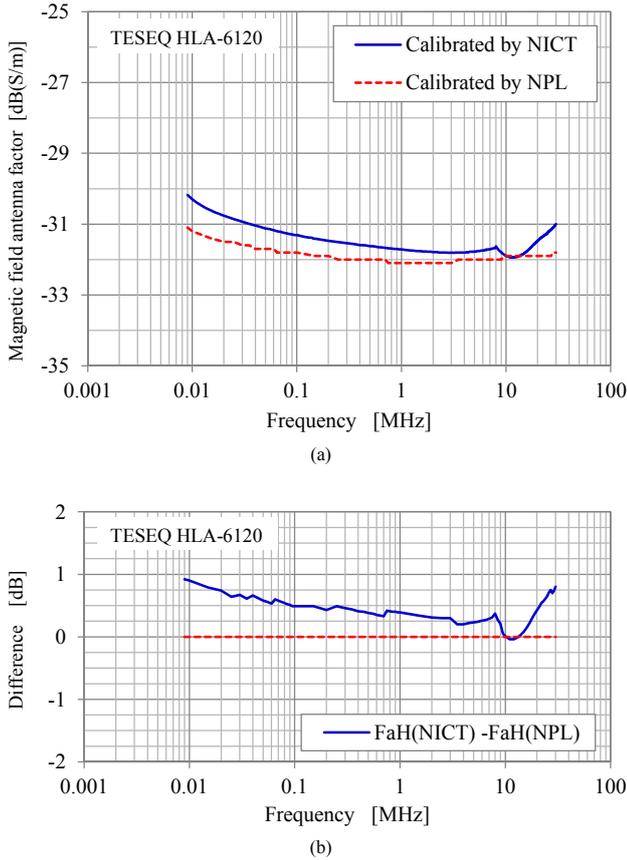


図5 校正結果の例 (TESEQ 社製、HLA-6120)

なった。この理由は、次章で述べるように、標準器の NPL における校正値と、アンテナ間距離  $d$  やループ半径の測定が原因と考えられる。

## 5 不確かさ

校正結果に付随する不確かさは、信頼の水準約 95 % を持つと推定される拡張不確かさで表される。その値の大きさは、以下に述べる複数の要因によって生じる不確かさを、次式を用いて合成することにより推定できる [10]。ただし感度係数の大きさは、すべて 1 なので省略して記してある。

$$u(F_{\text{aH}}(\text{AUC})) = \sqrt{u(S_{21}^{\text{dB}})^2 + u(K^{\text{dB}})^2 + u(F_{\text{aH}}^{\text{dB}}(\text{STD}))^2 + u(H_{\text{av}}^{\text{dB}})^2 + u(I_{\text{Tx}}^{\text{dB}})^2} s^2 \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

ここで、

$u(F_{\text{aH}}^{\text{dB}}(\text{AUC}))$  : 被校正器の不確かさ

$u(S_{21}^{\text{dB}})$  :  $S_{21}$  測定の不確かさ

$u(K^{\text{dB}})$  :  $K$  の計算値が持つ不確かさ ( $K^{\text{dB}} = 20 \log_{10} K$ )

$u(F_{\text{aH}}^{\text{dB}}(\text{STD}))$  : 標準器の不確かさ。NPL によって発行された校正証明書に記載された値

$u(H_{\text{av}}^{\text{dB}})$  : 被校正アンテナへの入射磁界が不均一なことによる不確かさ

$u(I_{\text{Tx}}^{\text{dB}})$  : 標準器のエレメントを流れる電流分布が不均一なことによる不確かさ

$s$  : 測定のばらつき

である。式 (7) にある定数項を求める際に使った値については、周波数の不確かさは他の不確かさ要因に比べて無視できる、真空中の透磁率は定義値なので不確かさは無い、特性インピーダンスの不確かさは  $S_{21}$  測定の不確かさに含まれるとして扱うことにする。式 (8) の値は、「合成標準不確かさ」と呼ばれる値であるため、最終的には、包含係数  $k = 1.96$  を掛けて、信頼の水準が 95 % の拡張不確かさを求める。ただし、簡単のため包含係数は  $k = 2$  として扱い、信頼の水準約 95 % (厳密には 95.45 %) の拡張不確かさを求める。以下、それぞれの項目について不確かさを見積もった結果、周波数 30 MHz における不確かさは、表 3 (a) の不確かさバジェット表のとおり見積もられ、信頼水準約 95 % の拡張不確かさは 1.2 dB と見積もられた。

### 5.1 $u(S_{21}^{\text{dB}})$ : $S_{21}$ 測定の不確かさ

表 3 (b) に示すのは、 $S_{21}$  の測定の不確かさ要因を検討し合成するために用いたバジェット表である。 $S_{21}$  の測定に使用した VNA について、次の 5 項目を主たる要因として評価を行った。

#### (1) リニアリティ

VNA の受信部のリニアリティは、図 4 のトレーサビリティ体系図で示すように、産業技術総合研究所によって校正が行われた高周波減衰器 (特定二次標準器) を用いて評価した。校正証明書に記載された産業技術総合研究所による校正値と、VNA に表示された値との差の最大値を、不確かさの上限値とした。

#### (2) VNA を校正した際の不完全性

VNA は、校正キットと呼ばれる標準器群を用いて校正 (目盛り合わせ) を行い、VNA 内部の回路や接続した同軸ケーブルの特性を補正してから使用する。今回は、Unknown Thru 校正と呼ばれる校正法による補正を行っているが、補正しきれなかった量が、校正の不完全性による不確かさとして残る。VNA の取扱い説明書 (データシート) に記載の残留ソースマッチ 0.1 dB を不確かさとして計上した。確率分布は不整合不確かさであるので、U 分布とした。

#### (3) 送受信ケーブル間の信号の漏れ

低い周波数において極めて弱い信号を測定すること、ループアンテナの構造上、ケーブルの

外皮に信号が漏れる可能性があることから、同軸ケーブル間で不要な結合が生じ、測定値に影響を与える可能性がある。この影響として 0.1 dB を不確かさの上限として見積もった。確率分布は一様分布とした。

(4) SN 比

特に周波数が低くなると、ループアンテナ間の結合が弱くなり、 $S_{21}$  は -100 dB 程度にまで達する。今回の被校正アンテナは、プリアンプを内蔵しているので十分な信号強度を得ることができているが、0.1 dB を不確かさの上限として与えた。確率分布は一様分布である。

(5) ケーブルの曲げ延ばしによる測定値の変化

ケーブルを曲げ延ばししながら測定を行い、測定結果の変化を評価した。周波数が低いため、マイクロ波帯のような変化は生じないことから、0.1 dB を不確かさの上限として与えた。確率分布は一様分布である。

以上 5 つの要因の不確かさを、表 3 (b) に示すように合成した結果、 $S_{21}$  の測定標準不確かさは 0.18 dB と見積もられた。

5.2  $u(K^{dB})$ :  $K$  の計算値が持つ不確かさ

$K$  を計算する際に生じる不確かさを見積もった結果を、表 3 (c) に示す。これらの値は、式 (6) 及びモーメント法に基づく電磁界数値シミュレーションソフト NEC2 を使って計算した結果から決定している。例えば、(1) 距離の不確かさについては、 $d = 20$  cm を入力して計算した  $K^{dB}$  の値と、 $d = 20$  cm - 2 mm 及び  $d = 20$  cm + 2 mm として計算した  $K^{dB}$  の値との差を不確かさの大きさとした。同様に、(2) 送信ループの半径の測定の不確かさ (5 cm に対して  $\pm 2$  mm)、(3) 受信ループの半径の測定の不確かさ (30 cm に対して  $\pm 3$  mm)、(4) 標準器のループ面を被校正アンテナのループ面に平行に配置することに対する不確かさ (平行を  $0^\circ$  としたときに  $\pm 5^\circ$ )、(5) 被校正アンテナのループ面を標準器のループ面に平行に配置することに対する不確かさ (平行を  $0^\circ$  としたときに  $\pm 5^\circ$ )、(6) 標準器及び被校正アンテナを、同一軸上に配置することに対する不確かさ (同一軸上に配置できた場合を 0 mm としたときに  $\pm 10$  mm)、(7) グランドプレーンの反射の影響 (高さ 1.6 m の場合の計算値と自由空間とした場合の計算値の差を計上)、(8) 近似式を使ったことによる不確かさ (式 (A.4) との差を不確かさとして計上) を計算した。すべての値は、これ以上ずれた値で測定することはないという上限・下限の値を与えていると考え、確率分布は一様分布として取り扱った。

5.3  $u(F_{ant}^{dB} (STD))$ : 標準器の不確かさ

図 4 のトレーサビリティ体系図に示したように、NICT が維持管理している標準器は、英国 NPL にて校正されており、NPL によって発行された校正証明書に記載された校正値と不確かさを基準として NICT での校正が行われる。校正証明書に書かれた不確かさの値は、包含係数を  $k = 2$  として求めた信頼水準約 95 % の拡張不確かさであることから、校正証明書に書かれている値を、包含係数 2 で割って標準不確かさとする。実際には、1.0 dB なので 0.5 dB を、表 3 (a) に入力した。

5.4 内挿の不確かさ

NPL によって校正された校正点の値を用いて、それ以外の周波数における磁界アンテナ係数を、内挿により求めたことによる不確かさである。図 6 (a) は標準器の NPL による校正結果である。磁界アンテナ係数の dB 値は、8 MHz 以下では周波数の対数を取った値に対して直線的に変化することから、回帰曲線として 8 MHz 以下は両対数式 ( $F_a^{dB} = a \ln f + b$ )、8 MHz 以上は 3 次の多項式 ( $F_a^{dB} = af^3 + bf^2 + cf + d$ ) を用いる。それぞれ、周波数における回帰曲線からのずれの最大値を不確かさの値とする。ずれは最大値以下に収まっていることから確率分布は一様分布とする。図 6 (b) は、NPL における校正値の回帰曲線からのず

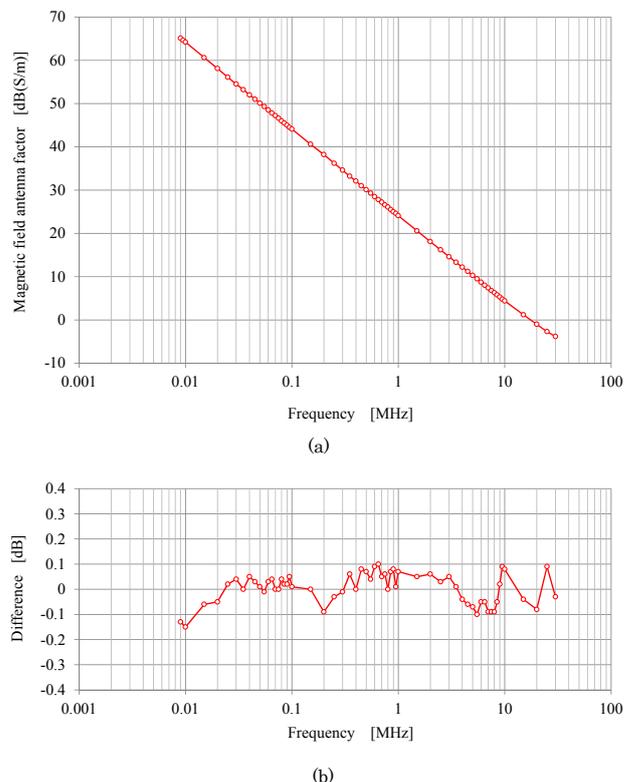


図 6 標準器の磁界アンテナ係数 (a) NPL による磁界アンテナ係数、(b) 校正値を内挿して得られた値との差

表 3 不確かさバジェット表  
30 MHz,  $r_{Tx}=5\text{ cm}$ ,  $r_{Rx}=30\text{ cm}$ ,  $d=20\text{ cm}$   
(a)

不確かさ要因	値 [dB]	確率分布	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $c(x_i)$	寄与 [dB] $ c(x_i)u(x_i) $	備考
1	$S_{21}$	-	-	0.18	-1	0.18	表 3 (b) 参照
2	$K$	-	-	0.14	1	0.14	表 3 (c) 参照
3	$F_{aH}$ (STD)	正規 ( $k=2$ )	2	0.50	-1	0.50	上位校正機関の校正証明書より
4	内挿	一様	$\sqrt{3}$	0.06	-1	0.06	
5	入射磁界	一様	$\sqrt{3}$	0.02	1	0.02	
6	電流分布	一様	$\sqrt{3}$	0.02	1	0.02	
7	ばらつき	正規	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	3 回測定
合成不確かさ						0.56	
拡張不確かさ (信頼の水準約 95%)						1.2	包含係数 $k=2$

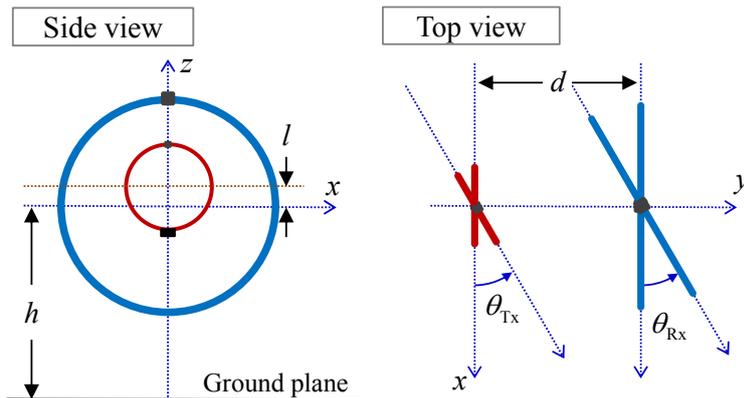
(b)  
 $S_{21}$  測定の不確かさ (30 MHz,  $r_{Tx}=5\text{ cm}$ ,  $r_{Rx}=30\text{ cm}$ ,  $d=20\text{ cm}$ )

不確かさ要因	値 [dB]	確率分布	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $c(x_i)$	寄与 [dB] $ c(x_i)u(x_i) $	備考
1	リニアリティ	一様	$\sqrt{3}$	0.12	-1	0.12	高周波減衰器による実測値より
2	校正の不完全性	U	$\sqrt{2}$	0.08	1	0.08	VNA の取扱説明書より
3	ケーブル間の信号のもれ	一様	$\sqrt{3}$	0.06	-1	0.06	
4	S/N 比	一様	$\sqrt{3}$	0.06	-1	0.06	S/N > 38 dB
5	ケーブルの曲げ延ばし	一様	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	
合成不確かさ						0.18	

(c)  
 $K$  の不確かさの算出 (30 MHz,  $r_{Tx}=5\text{ cm}$ ,  $r_{Rx}=30\text{ cm}$ ,  $d=20\text{ cm}$ )

不確かさ要因	値 [dB]	確率分布	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $c(x_i)$	寄与 [dB] $ c(x_i)u(x_i) $	備考
1	$d$	一様	$\sqrt{3}$	0.19	1	0.099	$d = 20\text{ cm} \pm 5\text{ mm}$
2	$r_{Tx}$	一様	$\sqrt{3}$	0.39	1	0.006	$r_{Tx} = 5\text{ cm} \pm 2\text{ mm}$
3	$r_{Rx}$	一様	$\sqrt{3}$	0.04	1	0.087	$r_{Rx} = 30\text{ cm} \pm 3\text{ mm}$
4	$\theta_{Tx}$	一様	$\sqrt{3}$	0.01	1	0.024	$\theta_{Tx} = 0^\circ \pm 5^\circ$
5	$\theta_{Rx}$	一様	$\sqrt{3}$	0.01	1	0.018	$\theta_{Rx} = 0^\circ \pm 5^\circ$
6	$l$	一様	$\sqrt{3}$	0.00	1	0.006	$l = 0\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$
7	グラウンドプレーンの影響	一様	$\sqrt{3}$	0.00	1	0.006	$h = 1.6\text{ m}$
8	式 (6) の近似	一様	$\sqrt{3}$	0.00	1	0.006	式 (A.4) による値との比較
合成不確かさ						0.14	

アンテナ配置図



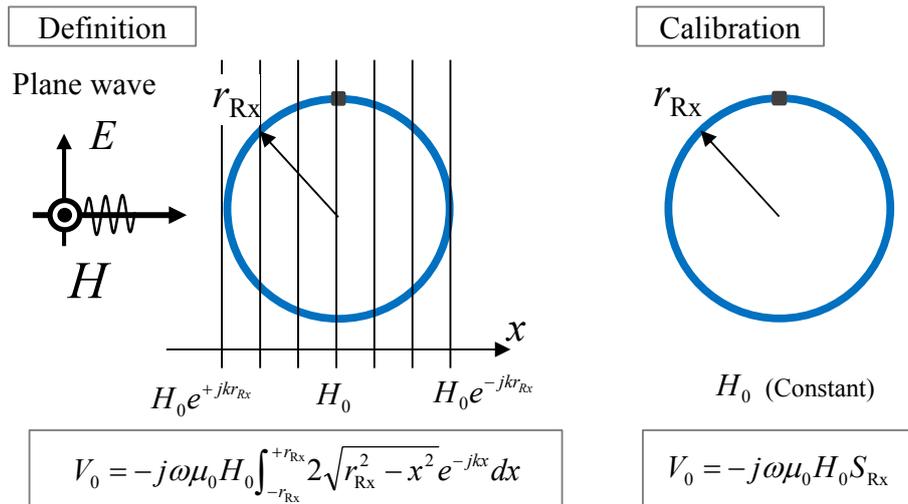


図7 ループ面を鎖交する磁界の不均一性

れを dB で示したグラフである。周波数 9 kHz, 10 kHz では 0.1 dB を超えているが、周波数 40 kHz 以上では、0.1 dB 以内に収まっているので、不確かさの根拠として 0.1 dB を計上した。

### 5.5 ループ面を鎖交する磁界の不均一性による不確かさ

磁界アンテナ係数は、式 (1) で示したように平面波が入射した場合として定義されており、図 7 に示すように、磁界強度は一定だが、ループ面に対し位相遅れを持ち、その傾向は、受信ループの半径が大きいくほど顕著になる。一方、較正時は、被校正アンテナの極近傍に対向させて配置した標準器から生じる磁界強度の平均値を用いており、位相遅れは考慮されていない。そのため、両者の違いが不確かさとなる。そこで、数値積分により、位相遅れがあった場合と無かった場合との差を求め不確かさとする。確率分布は、計算により得られた値が不確かさの上限・下限を与える最悪値であると考え、一様分布とした。

### 5.6 標準器を流れる電流分布による不確かさ

標準器を流れる電流分布は一定であるとの仮定の下で、 $K$  の計算は行われているが、実際には、標準ループアンテナが波長に比べて大きくなるほど、すなわち、周波数が高くなるにつれて電流分布が生じるため、電界成分が生じ、被校正アンテナとの間に不要な結合が生じる。NEC2 を使った数値シミュレーションにより、電流分布の最大値と最小値の間に所望の電流値が存在するとして、その差を不確かさで見積もった。得られた値が不確かさの上限・下限を与えると考え、確率分布は一様分布とした。

### 5.7 測定のばらつき

繰り返して測定を行った場合に、結果がどの程度ばらつくか、別の日に測定し直した場合に、同じ測定結果が得られるかを考慮する。表 3 (a) には、3 回測定した際のばらつき (実験標準偏差) を代入した。校正結果としては、3 回測定した結果の平均値を採用することから、標準不確かさは、実験標準偏差を測定回数平方根 ( $\sqrt{3}$ ) で割った値になる。

以上が、ループアンテナを校正する際に生じる不確かさの要因であるが、不確かさが大きくなる主たる要因は、表 3 (a) をみると分かるように、標準器の NPL による校正値に付随する不確かさ (0.5 dB) 及び  $K$  の計算値が持つ不確かさである。 $K$  の計算値の不確かさについては、表 3 (c) を見ると分かるように、アンテナ間距離の測定、ループ半径の測定の不確かさが支配的である。言い換えると、アンテナ間距離、ループの半径を正確に測れるようになれば、不確かさは小さくできることになる。距離や半径、すなわち「長さ」の測定については、今後、改善していく余地が残されている。

## 6 最高測定能力

最高測定能力とは、NICT が提供する校正結果に付する最も小さな不確かさのことである。ASNITE 認定校正では、プリアンプを内蔵していない AUC を対象とすることもあるので、表 3 で見積もった不確かさの値よりも、最高測定能力の値は大きな値になっている。磁界用ループアンテナの校正における最高測定能力を表 4 に示す。被校正アンテナの寸法が小さくなると、受信レベル (SN 比) が小さくなり、特に 40 kHz 未満の低い周波数帯では測定が難しくなるため、周波

数帯を分けて定めている。受信レベルを改善するためには、外付けでプリアンプを挿入する等の方法が考えられるが、被校正アンテナの反射係数が大きい場合には、プリアンプの入力部の反射の影響を十分低減する必要がある。

## 7 おわりに

周波数 30 MHz 以下の放射妨害波測定に用いるループアンテナの校正について、近年、NICT が開発した校正方法について解説した。開発した方法は、従来、送信ループアンテナのエレメントを流れる高周波電流を測定していた方法に代わり、送信アンテナに入射する電力を測定すれば、磁界強度を決定できる方法であり、高周波電流を測定するために使う熱電対や電流センサの校正が不要である。また、送信アンテナの特性は、受信アンテナとして動作させたときの磁界アンテナ係数を使うため、上位校正機関とのトレーサビリティの確保が容易、標準器として維持管理する設備が最小限で済むといった特長を持った方法である。

NICT では、近年の 30 MHz 以下の電波利用の多様化・多目的化に対応するために、無線設備の試験だけでなく放射妨害波測定 (EMI 測定) にも使用できるよう、ISO/IEC17025 規格を満たしていることを証明する ASNITE 認定を取得し、国際的にも通用する校正値の提供を開始した。今後も様々な利用形態が開発されることが予想されるため、高精度なループアンテナの校正サービスへの需要は高まるものと思われる。

### 【付録】 式 (5) の導出

図 2 に示す標準器のコネクタ部に、入射電力  $P_{in}$  (アンテナで消費される電力ではなく入射する電力) を入射したとき、標準器のループエレメントの給電ギャップ部に流れる電流  $I_{Tx}$  は、標準器の磁界アンテナ係数  $F_{aH}(STD)$  を用いて、

$$I_{Tx} = \frac{2}{\omega \mu_0 \sqrt{Z_0} S_{Tx} F_{aH}(STD)} \sqrt{P_{in}} \quad (A.1)$$

から求めることができる。ただし、 $\omega$  は角周波数 (=  $2\pi f$ )、 $\mu_0$  は真空中の透磁率 (=  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)、 $Z_0$  は信号源及び受信機の入力インピーダンス (= 50  $\Omega$ )、 $S_{Tx}$  は標準器のループアンテナの面積である。

いま、図 2 に示すように、標準器から距離  $d$  だけ離れた場所に、いまから磁界アンテナ係数を求めたいループアンテナ (以下、「被校正アンテナ」と記す。) を、ループ面が標準ループアンテナと平行かつ中心が一致するように配置する。このとき、送信ループエレメントに流れる電流  $I_{Tx}$  が一定であると仮定すると、被校正アンテナのループ面を鎖交する磁界の強度の平均値  $H_{av}$  は次式を用いて求めることができる [1]-[6][9]。

$$H_{av} = I_{Tx} S_{Tx} K \quad (A.2)$$

したがって、式 (A.1) を代入すれば、

$$H_{av} = \frac{2K}{\omega \mu_0 \sqrt{Z_0} F_{aH}(STD)} \sqrt{P_{in}} \quad (A.3)$$

を得る。ここで、 $K$  は 2 つのループアンテナ間の磁界成分による結合を表した値であり、

$$K = \frac{1}{4\pi S_{Tx} S_{Rx}} \left| \oint_{C_{Tx}} \oint_{C_{Rx}} \frac{e^{-jkR}}{R} d\mathbf{l}_{Rx} \cdot d\mathbf{l}_{Tx} \right| \quad (A.4)$$

で与えられる。ここで  $S_{Tx}$  は標準器のループ面積、 $S_{Rx}$  は受信ループアンテナのループ面積、 $R$  は、ループエレメント上の線素ベクトル  $d\mathbf{l}_{Tx}$ 、 $d\mathbf{l}_{Rx}$  の間の距離である。この積分は、円形ループだけでなく、方形や三角形といった形状のループアンテナに適用でき、コンピュータを使った数値計算により簡単に行うことができる。

もし、標準器、被校正アンテナとも、それぞれ半径  $r_{Tx}$ 、 $r_{Rx}$  の円形のループアンテナであり、条件  $kr_0 \leq 1.0$  及び  $r_{Tx}r_{Rx}/R_0^2 \leq 1/16$  を満足する場合には、

$$K \approx \frac{\sqrt{1 + (\beta R_0)^2}}{2\pi R_0^3} \left\{ 1 + \frac{15}{8} \left( \frac{r_{Tx}r_{Rx}}{R_0^2} \right)^2 + \frac{315}{64} \left( \frac{r_{Tx}r_{Rx}}{R_0^2} \right)^4 \right\} \quad (A.5)$$

ただし、

$$R_0 = \sqrt{d^2 + r_{Tx}^2 + r_{Rx}^2}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (\lambda \text{ は波長、} c \text{ は光の速さ)}$$

と近似でき、本文中の式 (6) が得られる [9]。得られた  $H_{av}$  と被校正アンテナに接続された受信機で測定した受信電圧  $V$  を、式 (1) に代入すれば、被校正アンテナ

表 4 最高測定能力

DUT のループ半径	周波数範囲	
	9 kHz 以上 ~ 40 kHz 未満	40 kHz 以上 ~ 30 MHz 以下
5 cm 以上 ~ 10 cm 未満	1.6 dB	1.4 dB
10 cm 以上 ~ 20 cm 未満	1.4 dB	1.4 dB
20 cm 以上 ~ 30 cm 以下	1.4 dB	1.4 dB

## 2 較正技術の研究開発

の磁界アンテナ係数を求める式は、次式で表せる。

$$F_{\text{aH}}(\text{AUC}) = \frac{2K}{\omega\mu_0\sqrt{Z_0}F_{\text{aH}}(\text{STD})} \frac{\sqrt{P_{\text{in}}}}{V} \quad (\text{A.6})$$

この式は、信号発生器と受信機が、それぞれ個別に用意してある場合の式であるが、図2に示すように、VNAを使って校正する場合、標準器と接続する信号発生側のポートの反射係数 $\Gamma_G$ 、被校正アンテナと接続する受信側のポートの反射係数 $\Gamma_L$ は、どちらも0と見なせるので、

$$|a_1| = \sqrt{P_{\text{in}}} \quad (\text{A.7})$$

$$|b_2| = \left| \frac{V}{1+\Gamma_L} \right|_{\Gamma_L=0} = V \quad (\text{A.8})$$

となり、

$$|S_{21}| = \left| \frac{b_2}{a_1} \right| = \frac{V}{\sqrt{P_{\text{in}}}} \quad (\text{A.9})$$

であるため、式(A.6)は、

$$F_{\text{aH}}(\text{AUC}) = \frac{2K}{\omega\mu_0 Z_0 F_{\text{aH}}(\text{STD})} \frac{1}{|S_{21}|} \quad (\text{A.10})$$

となり、本文中の式(5)を得る。dBを使って求めるには、両辺の常用対数をとって20倍(20 log<sub>10</sub>)し、

$$F_{\text{aH}}^{\text{dB}}(\text{AUC}) = -45.9 - 20 \log_{10} f_{\text{MHz}} - S_{21}^{\text{dB}} + 20 \log_{10} K - F_{\text{aH}}^{\text{dB}}(\text{STD}) \quad (\text{A.11})$$

となる。ここで、式(A.11)の定数項は、

$$\begin{aligned} 20 \log_{10} \frac{2}{\omega\mu_0 Z_0} &= 20 \log_{10} \frac{2}{(2\pi \times 10^6)(4\pi \times 10^{-7}) \cdot 50} - 20 \log_{10} f_{\text{MHz}} \\ &= -45.9 - 20 \log_{10} f_{\text{MHz}} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

から求めた値であり、 $f_{\text{MHz}}$ は単位をMHzとしたときの周波数である。

### 【参考文献】

- 1 中村 利幸, 七井 寧, 須藤 俊朗, “誘導磁界法によるVHFループアンテナ付電界強度測定器の校正,” 電波研究所季報, vol.5, no.18, pp.52-59, Jan. 1959.
- 2 鈴木 晃, 坂齊 誠, 小池 国正, 増沢 博司, “MF/HF帯ループアンテナの較正不確かさ,” 情報通信研究機構季報, vol.52, no.1, pp.15-22, March 2006.
- 3 藤井 勝巳, 小池 国正, 松本 泰, “30 MHz以下の標準磁界発生器の校正,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J96-B, no.4, pp.446-457, April 2013.
- 4 藤井 勝巳, 石居 正典, “30MHz以下における基準アンテナを用いたEMI測定用ループアンテナの校正,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J96-B, no.4, pp.437-445, April 2013.
- 5 藤井 勝巳, 和氣 加奈子, 石居 正典, “30 MHz以下で用いる標準磁界発生器の開発,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J99-B, no.3, pp.124-134, March 2016.
- 6 M. Kanda, E. B. Larsen, M. Borsero, P. G. Galliano, I. Yokoshima, and N. S. Nahman, “Standard for Electromagnetic Field Measurements,” Proc. of IEEE, vol.74, no.1, pp.120-128, Jan. 1986.

- 7 M. J. Alexander, M. J. Salter D. A. Knight, B. G. Loader, and K. P. Holland, “Calibration and use of antennas, focusing on EMC applications,” A National Measurement Good Practice Guide, no.73, Dec. 2004, available from [http://www.npl.co.uk/publications/good\\_practice/](http://www.npl.co.uk/publications/good_practice/)
- 8 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method — Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — EMC antenna calibration, CISPR 16-1-6, Edition 1.0, 2014-12.
- 9 F. M. Greene, “The Near-Zone Magnetic Field of a Small Circular-Loop Antenna,” J. Res. NBS, vol.71C, no.4, pp.319-326, Dec. 1967.
- 10 飯塚 幸三監修, 計測における不確かさの表現ガイド, 日本規格協会, 1996.



藤井勝巳 (ふじい かつみ)

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)  
無線用測定器の較正、環境電磁工学



酒井孝次郎 (さかい こうじろう)

電磁波研究所  
電磁環境研究室  
有期研究技術員  
無線用測定器の較正



杉山 功 (すぎやま つとむ)

電磁波研究所  
電磁環境研究室  
主任研究員  
無線用測定器の較正



瀬端好一 (せばた こういち)

電磁波研究所  
電磁環境研究室  
主任研究員  
無線用測定器の較正、測地学



西山 巖 (にしやま いわお)

電磁波研究所  
電磁環境研究室  
無線用測定器の較正