

低周波数における電界強度トランスファープローブの校正手法

森岡 健浩[†] 黒川 悟[†] 鳥羽 良和[‡] 一條 淳[‡]

[†]産業技術総合研究所 〒305-8653 茨城県つくば市梅園 1-1-1

[‡]精工技研株式会社 〒270-2214 千葉県松戸市松飛台 415-2

E-mail: [†] {t-morioka, satoru-kurokawa}@aist.go.jp, [‡] {yoshikazu.toba, jun.ichijo}@seikoh-giken.co.jp

あらまし 既知の電界（標準電界）強度によって応答が校正された電界プローブを用いることにより、電界強度の精密計測が可能となる。標準電界強度を生成する手法にはそれぞれ適した周波数範囲があり、一手法で所望の全周波数帯域を包含することは困難である。電波暗室内に電界を生成する場合、暗室のサイズや電波吸収体の特性によって、一般に数百 MHz 以下での精密な電界強度の生成は困難である。ここでは、1 GHz 付近まで高次モードの生じない大きさの TEM セル内部に標準電界強度を生成して光電界プローブの応答を校正する手法と、それに伴う不確かさを検討する。

キーワード 標準電界, 光電界プローブ, 校正係数, TEM セル, 校正

Calibration of the *E*-field Strength Transfer Probe at Low Frequencies

Takehiro MORIOKA[†] Satoru KUROKAWA[†] Yoshikazu TOBA[‡] and Jun ICHIO[‡]

[†] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

[‡] SEIKOH GIKEN Co.,Ltd. 415-2, Matsuhidai, Matsudo-shi, Chiba, 270-2214 Japan

E-mail: [†] {t-morioka, satoru-kurokawa}@aist.go.jp, [‡] {yoshikazu.toba, jun.ichijo}@seikoh-giken.co.jp

Abstract The response of an *E*-field probe is ordinary calibrated against a well-defined *E*-field. A transverse electromagnetic (TEM) cell is widely used to generate a standard *E*-field at a frequency sufficiently below the higher-order mode cutoff. A calibration method of an E/O probe for *E*-field strength transfer is discussed in the present paper. In addition to the methodology, sources that affect the calibration result are carefully investigated for the precision measurement.

Keyword Standard *E*-field, Optical *E*-field probe, Calibration Factor, TEM Cell, Calibration

1. はじめに

電気・電子機器の安全かつ確実な動作を保証するために多くの規格が制定されている。これらの規格は対象機器が周囲に放射する電磁界を規制するエミッションと、外来電磁ストレスに対する機器が耐性を要求するイミュニティに分類される。エミッション測定では微弱な電磁界を計測する必要があるため、感度の高いアンテナを用いて行われる。これに対し、イミュニティは機器を含む領域に均一な強電界を照射する必要があるため、電界強度と均一性を計測する。よって、空間分解能の高い小型のプローブが広く用いられている。ここで、既知の電界（標準電界）強度によって応答が校正された電界プローブを用いることにより、電界強度の精密計測が可能となる。標準電界強度を生成する手法にはそれぞれ適した周波数範囲があり、一手法で所望の全周波数帯域を包含することは困難である。

電波暗室内に電界を生成する場合、暗室のサイズや電波吸収体の特性によって、一般に数百 MHz 以下での

精密な電界強度の生成は困難である。低周波帯では TEM セルを用いて標準電界を生成するが、一般にプローブサイズの 3~5 倍のテスト空間の高さが必要であり、通常測定に用いられている大きさの電界プローブを収められるサイズの TEM セルの使用上限周波数は 200 MHz 程度である。ここでは光電界プローブが小型である点を利用し、1 GHz 付近まで高次モードの生じない大きさの TEM セル内部に生成した標準電界強度によって光電界プローブの応答を校正する手法とそれに伴う不確かさを検討する [1]。

2. 校正手法

2.1. 測定系

図 1 にここで用いる基本測定系を示す。系は光変調プローブ、E/O 変換ユニットとスペクトル計測器を含む光計測部と、標準電界強度を生成するための RF 部から成る。

信号源から出力された RF 信号は必要に応じて信号増幅器によって増幅され、スカラリフレクトメータを

介して TEM セルに入射する。スカラリフレクトメータは双方向結合器と二つのパワーセンサから構成され、結合端子に接続されたパワーセンサによって TEM セルに入射する電力の測定を行う。セルの出力端子は通常 50 Ω 抵抗で終端されるが、ここでは、アッテネータを通したパワーセンサを接続する。これによってスカラリフレクトメータで測定した入射電力の妥当性をモニターしている。

光電界プローブは偏波分離度の高い 1 軸の物を用い、TEM セル天板に開けられた微小な穴から垂直に挿入して配置する。プローブヘッドは LiNbO₃ を用いた反射型の変調器であり、感度向上のためにダイポールエレメントが電極に取り付けられている。空間分解能とプローブ感度はトレードオフの関係にあるため、エレメント長はおよそ 10 mm としてある。スーパーリミネッセントダイオード (Super Luminescent Diode) 光源からの光は偏波保持ファイバによって光サーキュレータを経由してプローブヘッドに入射する。ここで LiNbO₃ のポッケルス効果によって変調された光は同一のファイバを経由して戻り Variable Optical Attenuator (VOA) によって光損失の変動分を補正したのち、光検出器によって RF 信号に変換される。RF 信号のパワースペクトルは短い同軸ケーブルで接続されたシグナルアナライザを用いて計測される。信号源とシグナルアナライザの周波数軸を一致させるため、校正された周波数カウンターを接続して精密計測が行えるようになっている。

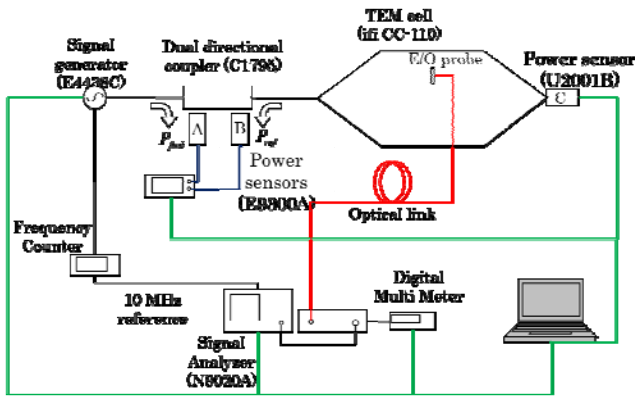


図 1. TEM セルを用いた電界プローブ測定系

2.2. 標準電界強度

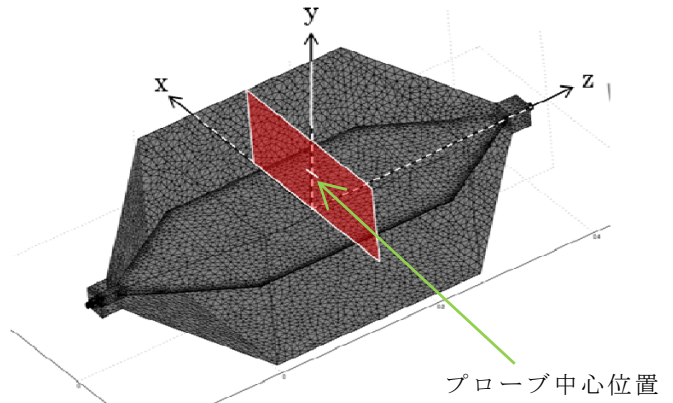
TEM セル中心部の測定空間は図 2(a) に示す平面の中央であり、これを含む x-y 平面内の電界強分布の有限要素法による計算値を図 2(b) に示す。電界プローブは基準点(エレメント間のギャップ中心)が上部測定空間の高さ d の半分の位置となる様に設置する。この位置での電界強度は

$$E = \sqrt{PZ_0}/d \quad (1)$$

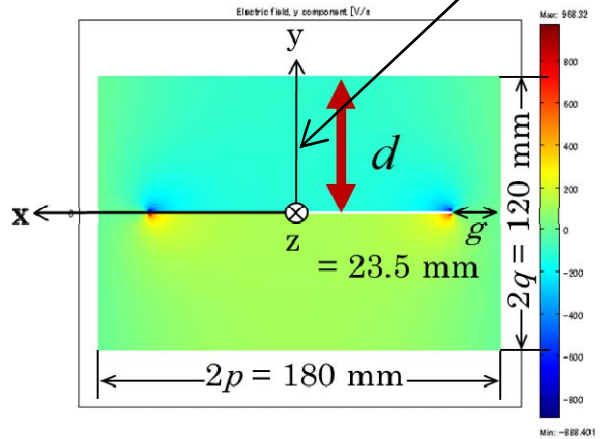
で与えられる。ここで、 P は TEM セルに入射する電力であり、 Z_0 はセルの特性インピーダンスである。 Z_0 は図 2(b) に示すセル断面の寸法によって以下の様に求まる [3]。

$$Z_0 \approx \frac{377}{4 \left[\frac{p}{q} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \frac{\pi g}{2q} \right) \right]} - \frac{\Delta c}{\epsilon_0} \quad (2)$$

ここで用いた TEM セルは測定上限周波数を 1 GHz 近辺まで上げるため、幅 ($2p$) 180 mm、高さ ($2q$) 120 mm、側壁とセプタム間のギャップ (g) が 23.5 mm、セプタムの厚みは 1 mm である。



(a) TEM セル解析モデル



(b) 500 MHz における電磁界分布

図 2. 有限要素法による TEM セル内電磁界分布

図 3 に TEM セル内部に配置された電界プローブの様子を示す。光電界プローブは TEM セル天板中心にプローブヘッドを設置するための小さな穴をあけ、ダイポールエレメント間の中心が測定空間の中心と一致するように配置する。これにより、プローブ支持のための誘電体材料を TEM セル内に設置する必要がなく、

より精確な計測が可能となる。穴の直径は 4 mm 程度であり、ここでの測定上限周波数の波長の 1.3 % 程度であるため、この影響は無視できるほどに小さい。



図 3. TEM セル内部に配置された電界プローブ

2.3. 電界プローブ校正係数

光電界プローブの入射電界強度に対する応答はシグナルアナライザによって計測されるパワースペクトルに関連付けられる。入射電界強度 E は (1) に与えられ、この時にシグナルアナライザによって測定される電力を P_r とすれば、 E は $P_r^{1/2}$ に比例することから、その校正係数 C_r は

$$C_r = E / \sqrt{P_r} \quad (3)$$

と定義することができる。ここでの C_r は光システム、シグナルアナライザとそれらを接続するケーブルの特性も含まれており、ケーブル長が変わった時などは再校正や補正が必要となる。

3. 測定結果

シールドルームの室温調整は一般空調機によって行われており、運転モードは自動・冷房・暖房である。温度変化による影響を検討することは精密計測のために重要である。はじめに 23 °C の自動運転を行い、その後 28 °C 設定の暖房運転を行った。2 時間後に 23 °C 設定の冷房に切り替えた。測定は G-TEM セルの内部に電界プローブを配置し、それ以外の機器は通常室内に設置した。温度計は室内の測定機器の近くと G-TEM セル内部に置いた。図 4 に空調の設定による室温の変化と光電界計測システムの応答を示す。暖房運転に切り替えた直後に室温が上昇し、それに連動して P_r が減少している。およそ 2 時間半後に冷房に設定し温度が急激に下がると、それに追従して P_r が上昇し、その後は温度の制御に従った明確な変動を示した。これに対し、G-TEM セル内部の温度は室温に遅れて追従し、ゆっくりとした変動をしている。これらの結果か

ら考慮して、光電界プローブ自体の応答ではなくそれ以外が室温変動の影響を強く受けていると考えられる。

更に光のシステムを使用せず、温度変動の異なる別室に置いた信号源とシグナルアナライザを長めの同軸ケーブルで直結し、同様の測定を行った。結果、シグナルアナライザの応答が周囲温度と連動していることが分かった。

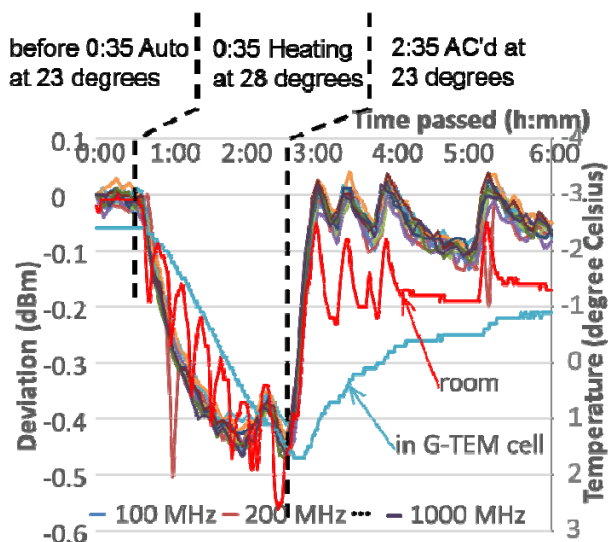


図 4. 温度変動に対する光電界システムの応答

本計測システム構成で温度変化に追従する部位をさらに詳しく調べるため、リフレクトメータ出力をシグナルアナライザにアッテネータを介して直結し、光系を経由しない RF 機器のみでの測定を行った。この時の 23 °C からの温度変動とそれに対する P_r 変動の散布図を図 5 に示す。これらのプロットは、データから得た回帰直線によって 23 °C の時の RF パワーを基準としている。実線で囲んだ 3 組のプロットは測定日時を変えて行ったものであり、ほぼ同様の傾向を示している。この図ではシステムの応答の時間遅延、温度の時間変動やその大きさが含まれていないため、回帰直線の決定係数は十分大きいとは言えないが、光系を含む場合と RF 機器のみでの応答では明確な差異がある。RF 機器のみの場合、回帰直線の傾きは -0.04 ~ -0.02 程度であり、温度変動が 23 °C ± 2 °C である時には P_r の変動が ±0.1 dBm 以内に収まる。これに対し、光系を含めると回帰直線の傾きは -0.1 を超え、同等の温度変化がある場合には P_r 変動が ±0.2 dBm を超えることが分かる。なお、この測定においてはシグナルアナライザのアライメント機能をオフにして測定を行っている。実際の測定は空調によって 21 °C から 25 °C の範囲に温度調整がされたシールドルーム内で行った。

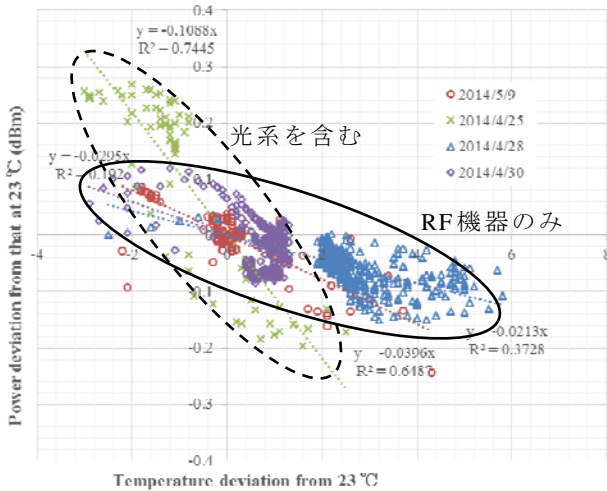


図 5. 光電界計測システムの温度依存性

図 6 に光電界プローブの校正係数の周波数特性を示す。図では二種類の双方向性結合器を用いてそれぞれ 5 回の測定を繰り返し、その平均を示した。付随するエラーバーは 5 回の測定の標準偏差である。方向性結合器の違いによる影響はリフレクタの校正によって取り除かれ、両者はよく一致している。測定の再現性は標準偏差で校正係数の 1 %程度であり、十分な測定再現性が得られている。1 GHz 付近での急峻な変化はセルの高次モードの発生によるものであり、900 MHz 以下では基本モードでの測定が行えていることを示している。この時、TEM セル内部に生成された電界強度は周波数に依存して変化するが、およそ 10 V/m から 20 V/m である。プローブに入射する電界強度に対するリニアリティは無視できる程度に小さいことを確認している。

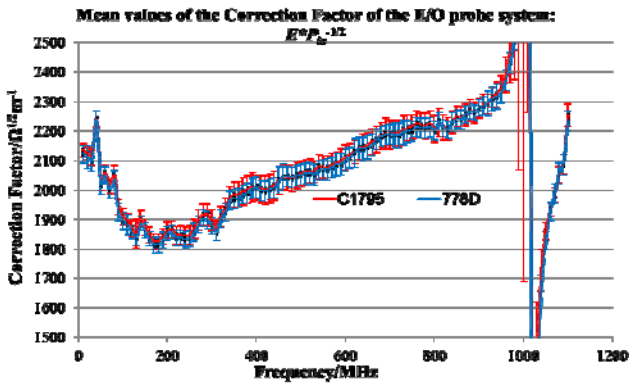


図 6. 光電界プローブの校正係数

ここでは 900 MHz 以下の校正係数を求めたが、用いたプローブは 10 GHz 程度まで計測可能である。TEM セルを用いた標準電界生成ではセル断面サイズに依存する高次モードの遮断周波数により、測定上限周波数

が存在する。これとは逆に、電波暗室での測定では暗室の大きさや吸収体の特性によって、測定周波数に下限がある。両手法による校正係数は、重複する周波数帯において一致する必要がある。図 6 に示した TEM セルによる校正係数と電波暗室にダイポールアンテナを基準として生成した標準電界を用いた 800 MHz 以上の校正係数を図 7 に示す[4]。900 MHz 付近の校正係数はよく一致していることが確認できる。1 GHz 以上の周波数帯における校正係数の振動は暗室の特性によるものである。

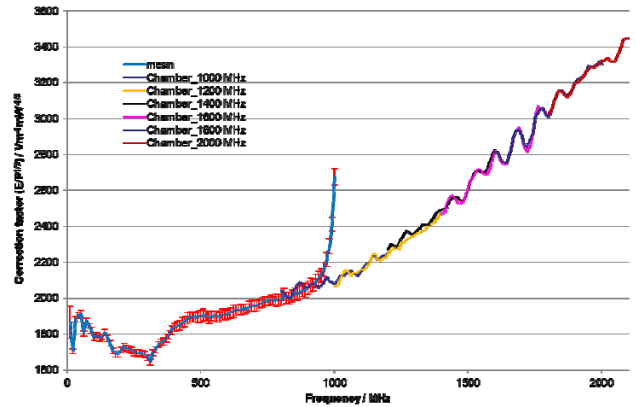


図 7. 1 GHz 以上の周波数の校正係数との接続性

3.1. 校正の不確かさ

測定値は様々な要因によってばらつき、このばらつきを不確かさとして解析し、示すことが重要である。この測定値の潜在的なばらつきを検討する手法は[5]に詳しく示され、その後もモンテカルロ法に関する追記などがなされている[6]。

測定量 y が入力量 x_1, x_2, \dots, x_n の関数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

として求まる時、入力量の不確かさをそれぞれ $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)$ とした場合、 y の標準不確かさ $u(y)$ は各入力量の標準不確かさの合成として次に与えられる。

$$u(y) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)^2 u^2(x_k) \quad (4)$$

ここで偏微分の項は感度係数と呼ばれ、各入力量のばらつきに対する y の感度を示す。

TEM セルを用いた電界プローブの測定結果に影響を与える要因としては標準電界強度の不確かさ、シグナルアナライザによるパワースペクトル測定の不確かさと測定の再現性が考えられる。これらのうち、標準電界強度生成の不確かさは、(1)より更にパワー測定 (P) の不確かさ、インピーダンス推定 (Z_0) の不確かさ、電界分布による不確かさとセブタム高測定 (d) の不確

かさの合成によって得られる。表 1 に TEM セルを用いた光電界プローブ応答校正に伴う合成標準不確かさ、要因毎の不確かさとそれらの寄与を示す。複数の不確かさ分布を合成した場合、合成不確かさの分布は中心極限定理により正規分布と考えることができる。表中の k は包含係数であり、ここで積算した自由度の場合

は $k = 2$ の場合に 95 % の信頼水準を示す。

不確かさ要因で最も寄与の大きなものは標準電界強度測定であり、さらにこの中で最大の不確かさ寄与は電力測定であることが分かる。これらの結果を(4)によって合成すると、光電界プローブの校正係数を求める測定の標準不確かさは 1.7 % ($k = 1$) となる。

| | Source of uncertainty | Value (%) | Distribution | Divider | Sens. Coeff. | Contribution (%) | Degrees of freedom |
|----------------------------------|-----------------------|-----------|--------------|---------|--------------|------------------|--------------------|
| 1 | E-field cal. | 1.1502 | Normal | 1.0000 | 1.0000 | 1.1502 | 1647 |
| | power meas. | 2.0000 | Normal | 1.0000 | 0.5000 | 1.0000 | 999 |
| | impedance | 1.0478 | Rectangular | 1.7321 | 0.5000 | 0.3025 | 999 |
| | septum height meas. | 0.8333 | Rectangular | 1.7321 | 1.0000 | 0.4811 | 999 |
| 2 | Spectrum power meas. | 1.7430 | Normal | 1.0000 | 0.5000 | 0.8715 | 590 |
| | mismatch | 0.8264 | U-shape | 1.4142 | 1.0000 | 0.5844 | 999 |
| | accuracy | 2.6833 | Rectangular | 1.7321 | 1.0000 | 1.5492 | 999 |
| | Readout stability | 0.5445 | Normal | 1.0000 | 1.0000 | 0.5445 | 9 |
| 3 | Repeatability | 0.8768 | Normal | 1.0000 | 1.0000 | 0.8768 | 4 |
| Combined uncertainty ($k = 1$) | | | | | | 1.6886 | 54.28 |
| | | | | | | 0.1454 | dB |

表 1. TEM セルを用いた電界プローブ応答校正に伴う不確か積算表

4. おわりに

ここでは、TEM セルの高次モードが生じない程度の周波数を上限とした光電界プローブシステムの標準電界強度に対する応答を校正する手法を検討した。TEM セルの利用可能な上限周波数はその断面のサイズに依存し、市販されている電界プローブを収容できる程度の大きさを持つセルでは、200 MHz 程度である。これらのプローブと比較して十分小さい光電界プローブを用いることにより TEM セルのカットオフ周波数を 900 MHz 程度まで引き上げられ、標準電界強度を TEM セル内に生成することが可能となった。これを用いて光電界プローブの応答を標準電界強度に対して校正し、その変換係数と不確かさを求めた。

文 献

- [1] N. L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission Cells," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 16, no. 4, Nov. 1974.
- [2] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Simple approximate expression for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 28, no. 3, Aug. 1986.
- [3] N. S. Nahman, M. Kanda, E. B. Larsen, and N. L. Crawford, "Methodology for standard electromagnetic field measurements," *IEEE Trans. Instrun. Meas.*, vol. 34, no. 4, pp. 490-503, Dec. 1985.
- [4] T. Morioka, "Tracing E-field probe responses to the the dipole antenna factor," in Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., pp. 1-5, Long Beach, CA.,

USA, Aug. 2011.

- [5] *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JGCM 100, 2008. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [6] *Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, JGCM 101, 2008. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>