

2-2 近接放射イミュニティ試験に用いる TEM ホーンの開発

2-2 *Development of TEM Horn Antennas for Radiated Immunity Tests in Close Proximity*

張間 勝茂 後藤 薫 久保 崇将 石田 武志

HARIMA Katsushige, GOTOH Kaoru, KUBO Takayuki, and ISHIDA Takeshi

近接放射イミュニティ試験で用いる電界印加アンテナとして、短縮型及びハイブリッド型指数関数テーパ TEM ホーンを設計及び試作した。これらアンテナの特性を有限積分法による数値シミュレーション及び測定から評価した。また、アンテナ近傍の伝搬特性及び電界分布を EMC 測定で使用する代表的なアンテナについて測定により比較した。これらの結果は、提案したアンテナが 380 MHz から 6 GHz までの試験周波数をカバーする広帯域放射特性、低い VSWR 特性及び良好な均一場をアンテナ近傍に生成することを示す。さらに、近傍・遠方放射特性の評価法として、位相中心を考慮した遠方界近似の有効性を示す。

We have designed and fabricated as shortened and hybrid exponential tapered TEM (Transverse Electromagnetic) horns as field-generating antennas for use in radiated immunity tests in close proximity. The characteristics of these antennas were evaluated using numerical simulations with the finite integration technique and measurements, and the field characteristics near the antenna were compared with those of other typical test antennas which are widely used in EMC measurements. The results show that the TEM horns have broadband radiation characteristics with low VSWR (voltage standing wave ratio) and generate a homogeneous field over the entire test frequency range from 380 MHz to 6 GHz. In addition, we show the effectiveness of the evaluation for near-field propagation characteristics considering the phase center.

1 まえがき

電波利用システムやサービスの拡大・進展にともない、良好な電波環境の維持は重要な課題である。調和のとれた電磁的環境のため、電子機器には電磁適合性 (EMC) と呼ばれる不要な電磁ノイズを出さない、かつ、電磁ノイズ下で正常に動作する能力が要求される。一般には、国際的な技術基準・規格を定め試験により適合性を確認している。国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) では、国際規格策定への寄与を含む EMC に関する測定・評価技術の研究開発を進めている。

電子機器に対して、無線利用機器から放射される電磁波及びテレビ・ラジオ放送波等の遠方放射源からの保護を目的とした放射イミュニティ試験が実施されている [1]-[3]。近年、スマートフォンのような携帯無線端末が社会の隅々にまでいきわたり、電子機器の近くで使用されるケースも多い。このような近接放射源に対する医療用電子機器等のイミュニティの向上が求められている。しかしながら、従来の“遠方界”放射試験

法は、このような近距離での放射源を想定していない。このため、携帯無線端末の近接による電子機器のイミュニティの確保を目的に、近傍放射イミュニティ試験が国際規格 [4][5] 及びメーカー規格 [6][7] に定められている。

国際電気標準会議 (IEC) の近接放射試験では、試験の効率性から広帯域アンテナである TEM ホーンの使用が規定されており、米国国立標準技術研究所 (NIST) が開発した直線テーパ状のアンテナプレートで構成する TEM ホーンが代表例として示されている [4]。直線テーパ TEM ホーンは、アンテナの入力端から開口部までの特性インピーダンスの整合のため、アンテナプレート上に抵抗を装荷している [8][9]。一方、抵抗装荷の必要の無いテーパ伝送線路に基づく指数関数状のテーパプレートをもつ TEM ホーンが提案されている [10][11]。このアンテナは、良好なインピーダンス特性と広帯域特性を有するが、主ローブを維持しない周波数帯が生じる [12]。また、放射試験の下限周波数が 380 MHz であるためアンテナが大型化

する。効率の良い近接放射試験を行うため、試験に用いるアンテナは、試験周波数帯全域で利用が可能であり、アンテナ交換が不要、良好な反射・放射特性、広い電界均一場の生成及び小型化が課題となる。近接放射試験は、遠方界での放射試験に比べて供試器(EUT)の配置位置の電界の距離変動が大きく、用いたアンテナにより近傍放射特性も異なる。言い換えれば、近接放射試験での EUT 内部の電子基板に印加される電界強度がアンテナ及び距離に依存する。

本章では、TEM ホーンのプレート構造に代表的なテーパ伝送線を適用し、アンテナ特性を比較する [12]。この検討から近接及び遠方界での EMC 測定に用いるため、指向性を改善した指数関数テーパ伝送線路に基く短縮型及び小型化を実現したハイブリッド型 TEM ホーンを開発し、近接放射試験に要求されるアンテナ特性及び電界均一性を評価した [13]-[15]。さらに、近接放射試験 [4][5] で用いる代表的なアンテナである TEM ホーン及びフラット広帯域ダイポール [16]、基本アンテナである半波長ダイポール、EMC 測定に広く用いられているダブルリッジガイド (DRG) ホーンについて、アンテナ近傍での電界の伝搬特性及び分布特性を比較した。また、TEM ホーンの波動インピーダンス及び位相中心を考慮した伝搬特性から近傍・遠方界特性の評価を行った [17]。

2 近接放射イミュニティ試験

電子機器の放射イミュニティ試験は、従来、電波暗室 (IEC61000-4-3)、TEM セル (IEC61000-4-20) 及び反射箱 (IEC61000-4-21) を用いた遠方界での放射試験が行われている [1]-[3]。携帯無線端末の普及に伴い、これら無線機が電子機器に近接して利用される状況を想定した近傍での放射試験 (IEC61000-4-39) が規定された [4]。近接放射試験は、携帯電話や RFID (radio frequency identification) 等の可搬通信機器を考慮した周波数範囲 9 kHz から 6 GHz で行われる。試験法は、周波数によって、磁界 (9 kHz ~ 26 MHz) 及び電界放射試験 (26 MHz ~ 6 GHz) から成る。特に、周波数範囲 380 MHz から 6 GHz では、携帯無線端末を想定した以下のような試験が規定されている。

図 1 に近接放射試験のためのセットアップを示す。EUT を非導電性の台上に配置し、送信アンテナを EUT の照射面から 100 mm の距離だけ離す。無変調波により規定された電界レベル (10 ~ 300 V/m) に設定しパルス変調で照射を行う。アンテナの生成する電界均一面は、最大電界強度で規格化した 0 から -4 dB 内となる矩形と定義し、均一面ごとに EUT に沿ってアンテナ走査する。

3 TEM ホーン

TEM ホーンは、同軸給電部とアンテナ開口面までを対向配置した 2 枚の金属プレートから成る。反射の影響を低減するため、給電部の入力インピーダンスと開口面での特性インピーダンスを整合する必要がある。直線状テーパの TEM ホーンの場合、通常、整合のためプレート上に抵抗を装荷している [8]。プレート形状にインピーダンス変換に用いられるテーパ伝送線路を適用すれば、入力インピーダンスから開口部の特性インピーダンスまで連続的に変換することができる。すなわち、プレートの形状のみで整合が可能となり抵抗装荷の必要がない。

テーパ伝送線路を図 2 に示す。伝送線路の入力及び負荷インピーダンスをそれぞれ Z_0 及び Z_L とする。指数関数、Triangular、Klophenstein 及び Hecken テーパ伝送線路の位置 z での特性インピーダンス $Z(z)$ は、それぞれ次式となる [18]-[20]。すなわち、指数関数テーパ [18]:

$$Z(z) = Z_0 e^{\alpha z} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (1)$$

及び

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right), \quad (2)$$

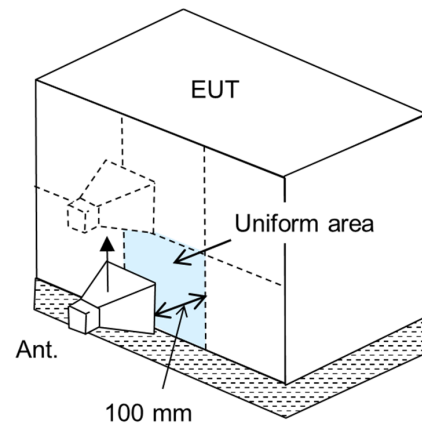


図 1 近接放射イミュニティ試験 [13]

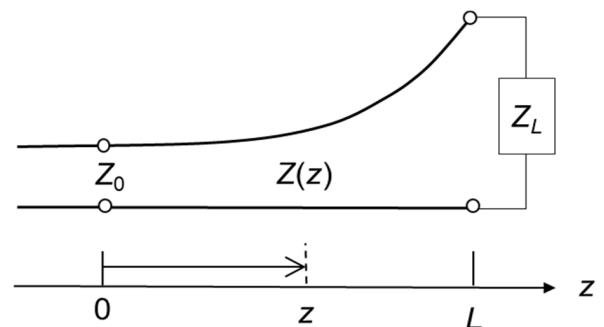


図 2 テーパ伝送線路 [18]

Triangular テーパー [18]:

$$Z(z) = \begin{cases} Z_0 e^{2\left(\frac{z}{L}\right)^2 \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right)} & (0 \leq z \leq L/2) \\ Z_0 e^{\left(\frac{4z}{L} - \frac{2z^2}{L^2} - 1\right) \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right)} & (L/2 \leq z \leq L) \end{cases} \quad (3)$$

Klopfenstein テーパー [19]:

$$\ln(Z(z)) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{\Gamma_0}{\cosh(A)} A^2 \phi\left(\frac{2z}{L} - 1, A\right) \quad (0 \leq z \leq L), \quad (4)$$

及び

$$\phi(x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy \quad (|x| \leq 1), \quad (5)$$

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (6)$$

ここで、 I_1 は、1 次の第 1 種変形ベッセル関数、 A は定数である。

Hecken テーパー [20]:

$$\ln(Z(z)) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) \frac{B}{\sinh(B)} \varphi\left(B, \frac{2z}{L} - 1\right) \quad (0 \leq z \leq L), \quad (7)$$

及び

$$\varphi(B, x) = \int_0^x I_0(B\sqrt{1-y^2}) dy \quad (8)$$

ここで、 I_0 は、0 次の第 1 種変形ベッセル関数、 B は定数である。

3.1 特性インピーダンス

特性インピーダンスの整合のため、TEM ホーンのテーパー構造に前節で述べたテーパー伝送線を適用する。各 TEM ホーンの二つのテーパープレートの間隔 $h(z)$ 及び特性インピーダンス $Z(z)$ は、式 (1)、(3)、(4) 及び (7) を用いて決定できる。ここで、図 3 に示すようにプレート形状が微小幅 dz を持つ多数の平行平板で構成されると仮定すると、テーパーの幅 $w(z)$ は、特性インピーダンスとプレートの間隔から、次式に示す平行平板の特性インピーダンスの近似式から決定できる [10]。

$$w(z) = \frac{h(z)}{Z(z)} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \frac{h(z)}{Z(z)} 120\pi \quad (9)$$

図 4 にテーパー伝送線の特性インピーダンスを示す。TEM ホーンの入力インピーダンス Z_0 を 50Ω 、正方形とした開口部の特性インピーダンス Z_L を 377Ω 、アンテナ長 L 及び開口部の間隔を最低周波数の波長の

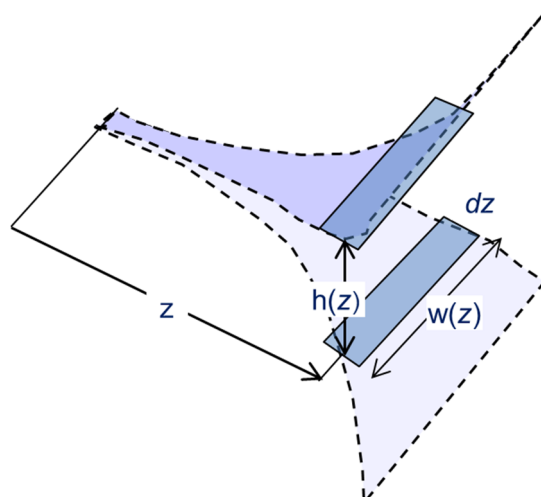


図 3 TEM ホーンモデル [12]

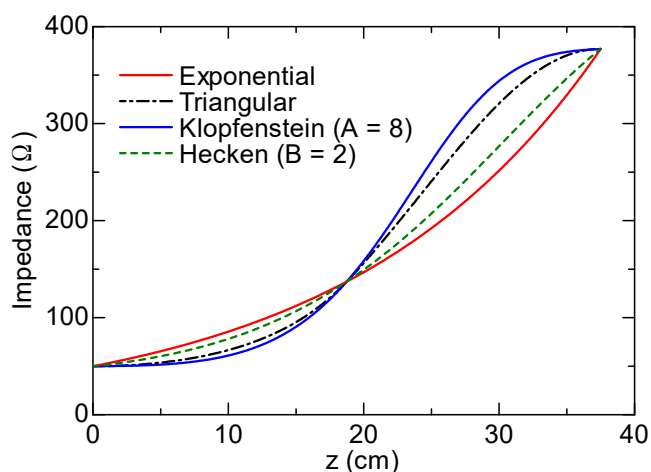


図 4 テーパー伝送線の特性インピーダンス [12]

1/2、最低周波数を 400 MHz に設定した。Klopfenstein 及び Hecken テーパーは、定数 A 及び B の設定によってインピーダンス特性、すなわち、テーパー形状が変化する。また、Hecken テーパーは、その定数 B を小さくすれば指数関数テーパーに近づく。ここでは、形状が指数関数と僅かに異なるように B を定め、アンテナ特性への影響を比較した。

3.2 アンテナ特性

テーパー伝送線を適用した TEM ホーンのアンテナ特性を、有限積分法 (FIT) に基づく電磁界解析ソルバーである CST Suite を用いて評価した。TEM ホーンの解析モデルを図 5 に示す。各アンテナの反射特性 ($|S_{11}|$) と利得の計算結果をそれぞれ図 6 及び 7 に示す。これらアンテナの反射特性は、テーパー伝送線の効果が反映されて良好な特性が得られている。しかしながら、Triangular 及び Klopfenstein テーパーを適用したアンテナの利得は、図 7 に示すように、大きなリッ

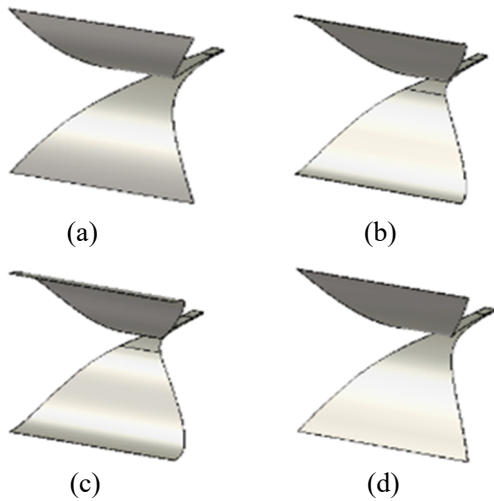


図5 (a) 指数関数、(b) Triangular、(c) Klopfenstein 及び (d) Hecken テーパーに基づく TEM ホーンモデル [12]

プルが生じておりアンテナとしての十分な特性が得られていない。一方、指数関数テーパーは、アンテナとして利用できるリップルのないフラットな特性を持つ。また、Hecken テーパーのように指数関数と僅かに形状が異なるだけで、利得特性に対する影響は大きい。このように TEM ホーンのプレート形状に適用できる伝送線路としては、指数関数テーパーが最も有用である。

4 指数関数テーパー TEM ホーン

4.1 短縮型

指数関数テーパー TEM ホーンは、広帯域特性から近接・遠方界放射イミュニティ試験や放射エミッション測定に用いる EMC 測定用アンテナとして期待できる。しかしながら、アンテナ正面で主ビームが落ち込む周波数帯を生じる [12]。この指向性の問題は、プレート長 (L) の 6 から 12 % の切取り (dl) による短縮で改善できる。試作した短縮型指数関数テーパー TEM ホーンのプレート構造及び外観を図 8 に示す。アンテナ給電点からの距離 z とすると、プレートの間隔 $h(z)$ は次式となる。

$$h(z) = h_0 e^{bz} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (10)$$

ここで、

$$b = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{h_L}{h_0}\right) \quad (11)$$

式(1)及び(2)から、入力及び開口部の特性インピーダンスは、それぞれ $Z_0 (= Z(0))$ 及び $Z_L (= Z(L))$ 、式(10)及び(11)から、プレートの始点と開口部での間隔は、 $h_0 (= h(0))$ 及び $h_L (= h(L))$ とする。これらから

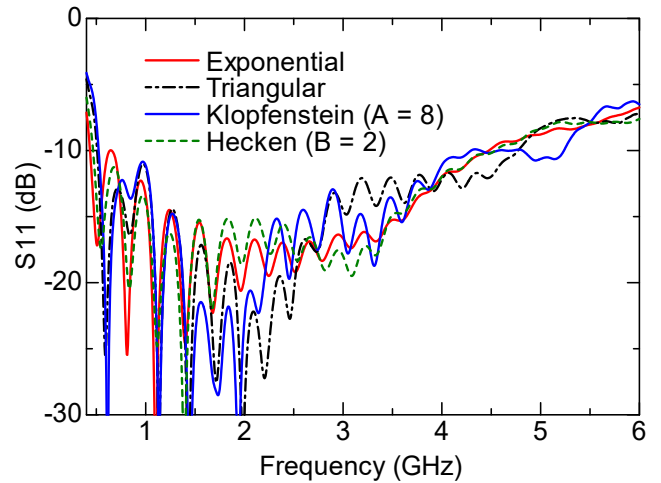


図6 テーパー TEM ホーンの反射特性計算値 [12]

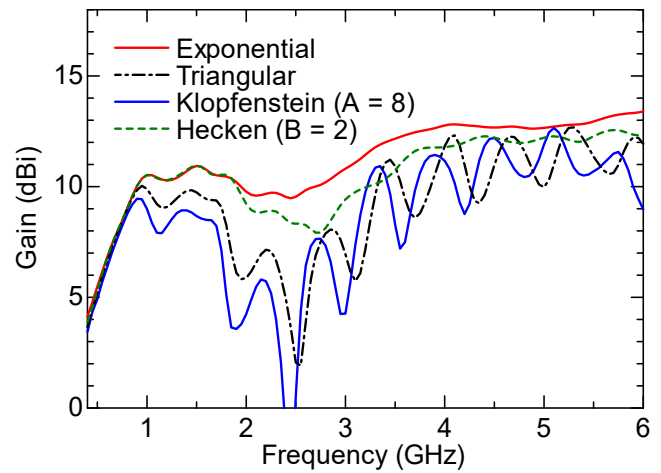
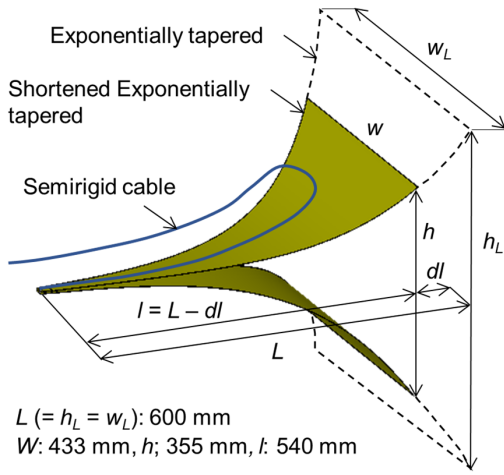


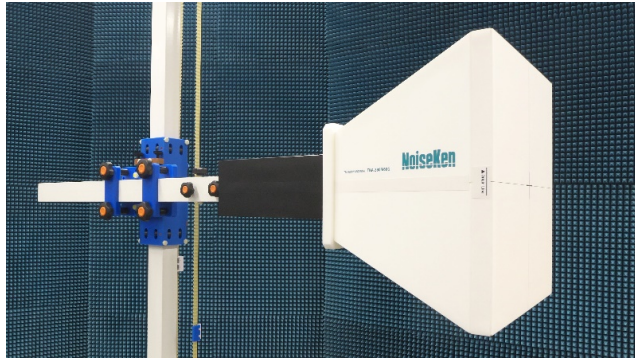
図7 テーパー TEM ホーン利得計算値 [12]

式(9)により定まるプレート幅も指数関数テーパーの形状となる。近接放射試験の反射特性に関する要求を考慮して設計上の最低周波数を 250 MHz に設定し、切取り量をテーパー長の 10 % ($= dl = 0.1 L$) とした。また、アンテナのプレート材料は 0.6 mm 厚の黄銅を用い、比誘電率 1.07 の硬質発泡材により両プレートを維持した。これらの誘電支持材の配置は、数値シミュレーションにより放射特性への影響を考慮しながら調整した。

TEM ホーンは、平衡型アンテナであり、同軸による不平衡給電するとき、通常、 balan 回路を介する必要がある。特に、放射イミュニティ測定に用いるとき、balan は広帯域、低損失及び高耐電力性が要求される。しかしながら、アンテナの電流分布を考慮することにより balan を用いないで同軸ケーブルの外導体の外側に流れる電流の低減が可能である [21]。TEM ホーンのプレート上の電流分布を有限積分法による計算例を図 9 に示す。プレートの狭幅部とエッジ部分で表面電流が高く、プレート前方の中央部では周波数に拠らず

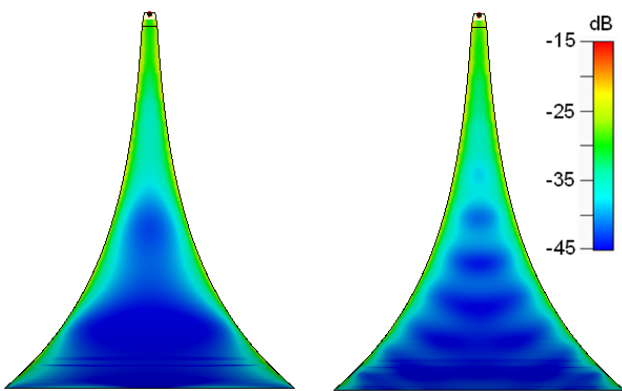


(a)



(b)

図8 短縮型指数関数テーパ TEM ホーンの (a) プレート形状 [13] 及び (b) アンテナ外観

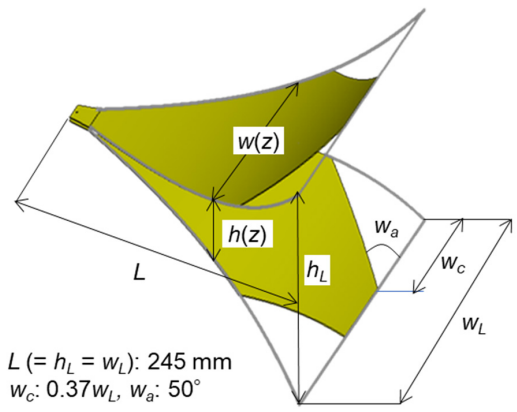


(a) 870 MHz

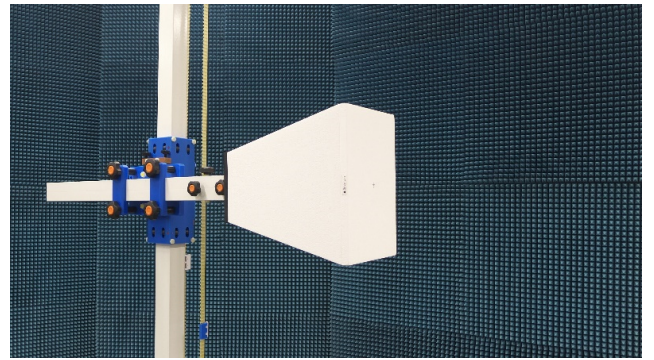
(b) 2.45 GHz

図9 短縮型指数関数テーパ TEM ホーンの電流分布計算結果 [13]

低い箇所がある。図8(a)に示すようにアンテナの給電点からプレート上の電流の低い箇所まで同軸ケーブルの外導体、例えば、セミリジッド同軸ケーブルをプレートに接触させて給電する。



(a)



(b)

図10 ハイブリッド型テーパ TEM ホーンの (a) プレート形状 [15] 及び (b) アンテナ外観

4.2 ハイブリッド型

図10に試作したハイブリッド型 TEM ホーンのプレート形状及び外観を示す。ハイブリッド型 TEM ホーンの構造も指数関数テーパ伝送線路の特性インピーダンスに基づいている。すなわち、図10(a)に示すようにアンテナプレート幅が直線状及びプレート間隔が曲線状のハイブリッド構造を有する。プレート幅を次式の一次関数で示す直線テーパ状に設定する。

$$w(z) = az + w_0 \quad (0 \leq z \leq L) \quad (12)$$

$$a = \frac{w_L - w_0}{L} \quad (13)$$

ここで、プレートの始点と開口部での間隔は、 $w_0 (= w(0))$ 及び $w_L (= w(L))$ である。アンテナの特性インピーダンスに指数関数テーパ伝送線路を適用するとき、プレート間隔の曲線形状は、次式で示すように指数関数と一次関数の積となる。すなわち、式(9)から

$$h(z) = \frac{Z(z)(az + w_0)}{120\pi} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (14)$$

である。

図10(a)に示すようにアンテナプレートのエッジの

切り取りにより反射及び指向性を改善することができる [15]。アンテナの反射特性に関する近接放射試験の要求 (VSWR < 3) を満たすために、数値シミュレーションにより、アンテナ長及びプレートのエッジの切り取りの最適化を行った [15]。すなわち、アンテナ長は 4.1 で述べた指数関数テーパ TEM ホーンアンテナ [14] の半分程度となる 24.5 cm (= L)、切り取り角は 50° (= w_a)、及び切り取り量は 37% (= $w_c = 0.37 w_l$) である。また、アンテナの入力インピーダンスは 50Ω (= Z_0)、正方形 ($h(L) = w(L) = L$) にとった開口部の特性インピーダンスは 377Ω (= Z_l) である。

5 アンテナ特性

5.1 VSWR 特性

近接放射試験に用いる TEM ホーンの特性のうち、反射特性、広帯域特性及び均一放射特性が重要である。

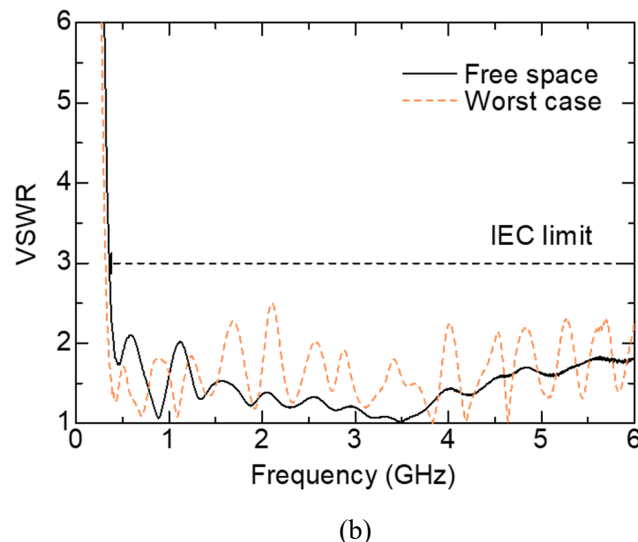
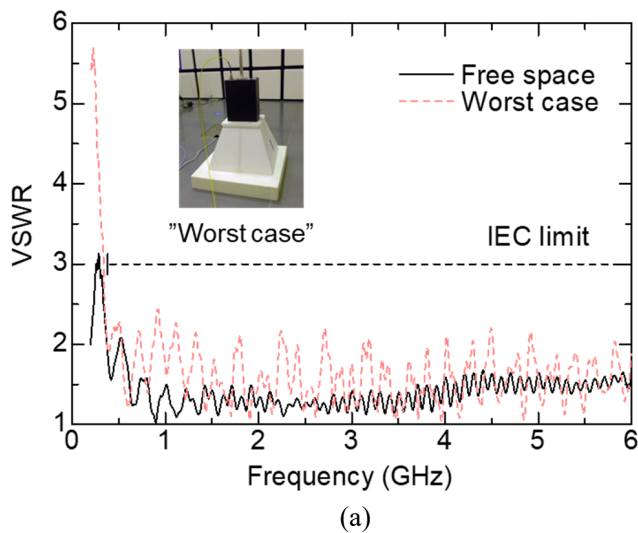


図 11 (a) 短縮型及び (b) ハイブリッド型テーパ TEM ホーンの VSWR 測定結果

すなわち、アンテナの VSWR は、3:1 を超えないことが要求されている。また、アンテナの広帯域性と電界均一領域の大きさは、試験の効率に影響する。短縮型及びハイブリッド型 TEM ホーンの VSWR 特性の測定結果を図 11 に示す。試験周波数の 380 MHz から 6 GHz の全ての帯域で、テーパ伝送線路の整合効果が反映され、VSWR が 2:1 以下となる良好な特性が得られている。アンテナの近くに配置した EUT からの反射波は、VSWR 特性を劣化させる。EUT からの反射の影響を“最悪条件”で評価した。すなわち、非常に大きな金属表面を有する EUT を仮定して、TEM ホーンの開口面を金属床から 100 mm の位置に配置した。アンテナの VSWR は、最悪条件においても全周波数帯域で VSWR 許容値を満足している。

5.2 電界均一性

電界照射面の利用可能な電界の均一領域は、最大値の 0 ~ -4 dB の矩形領域と規定されている。EUT 全体に電界を印加するためにアンテナを走査するが、矩形の均一領域がアンテナの移動分解能となる。したがって、試験時間の短縮には、アンテナの広帯域性に加え均一領域の広さも重要である。

アンテナ近傍の電界分布の測定系を図 12 に示す。TEM ホーンの開口面から 100 mm の距離に周波数選択性の光電界プローブを配置し、TEM ホーンと電界プローブを O/E 変換器を介してネットワークアナライザ (VNA) に接続した。XYZ ポジショナを用いて電界プローブを 25 mm ステップで 400 mm × 400 mm の平面上を走査し、電界分布を測定した。

短縮型及びハイブリッド型の主方向成分 (E_y) の電界分布の測定結果を図 13 及び 14 にそれぞれ示す。電界均一領域は、対称性を維持しており、分布に大きな偏りはない。また、電界最大値は、アンテナ軸上、すなわち照射面の中央にある。短縮型の均一領域は、低周波数帯で非常に大きいですが、周波数が増加に従って縮

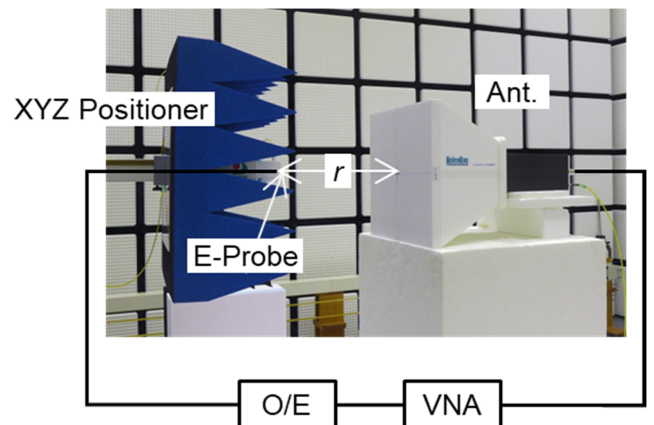
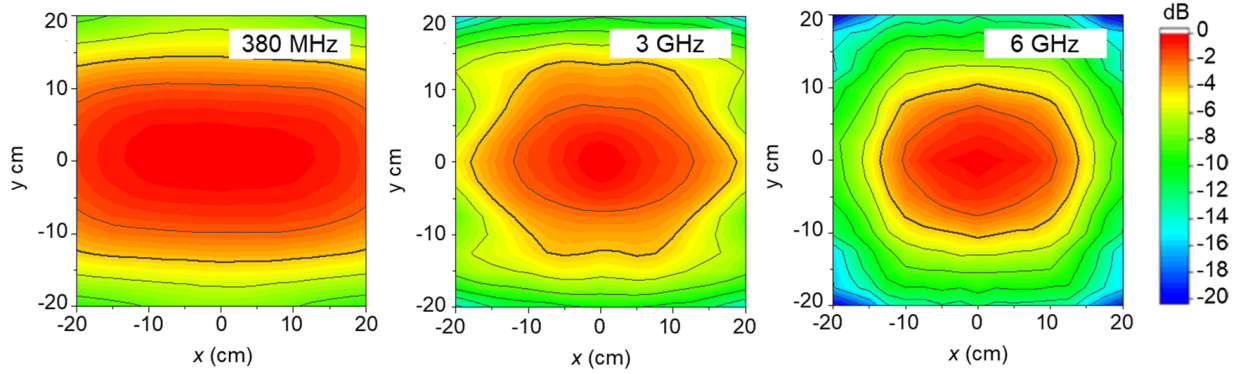
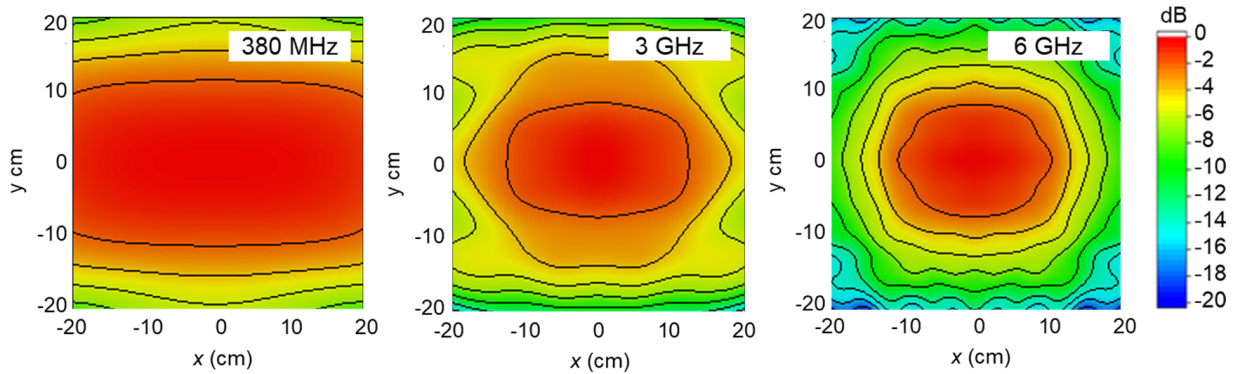


図 12 電界分布の測定系

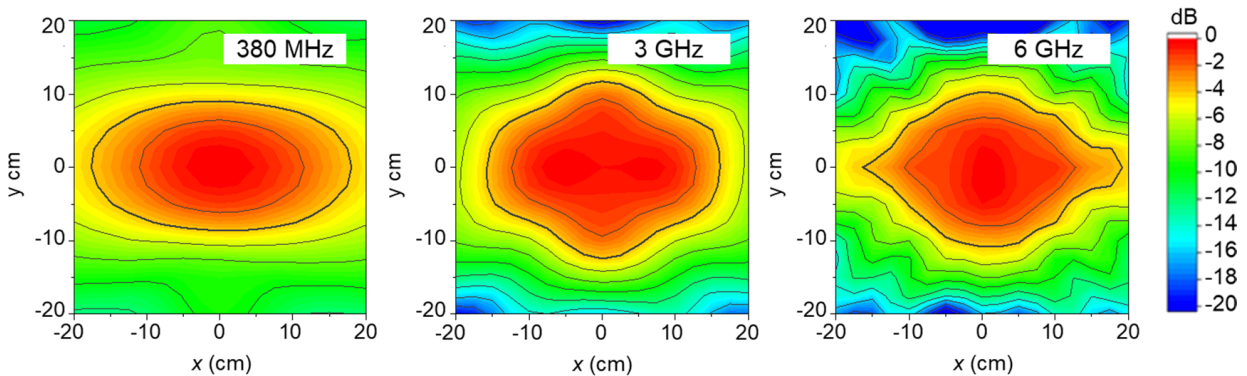


(a) 測定値

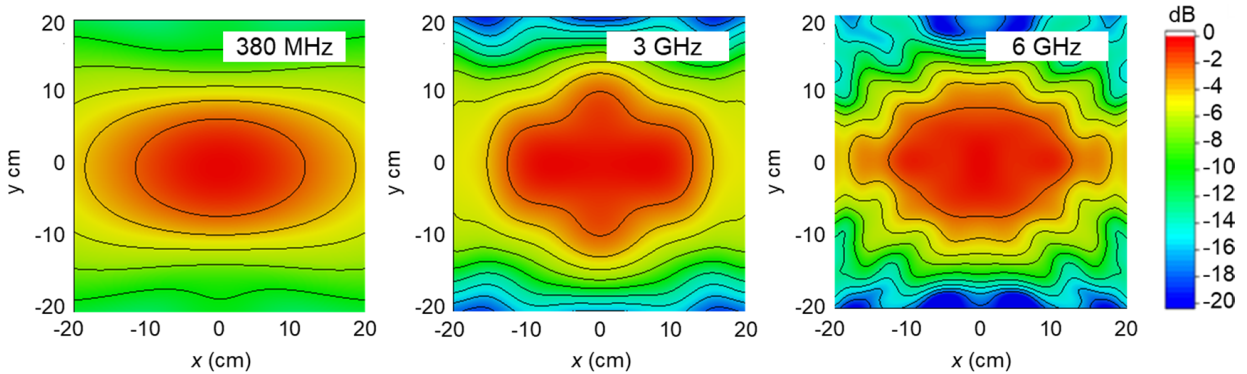


(b) 計算値

図 13 短縮型 TEM ホーンの電界分布 (開口面から 100 mm)



(a) 測定値



(b) 計算値

図 14 ハイブリッド型 TEM ホーンの電界分布 (開口面から 100 mm)

小傾向がある。一方、ハイブリッド型は、周波数による均一領域の変化は少ない。測定結果は、数値シミュレーションの結果はよく一致している。

6 近傍放射特性

近接放射試験では、遠方界試験に比べて、アンテナ特性の試験結果への影響が大きい。EUT 配置位置でのアンテナ放射特性、すなわち、印加電界の校正基準面から離れた位置にある EUT 内部の電子回路に到達する電界強度及び分布がアンテナにより異なるためである。アンテナ近くの放射特性を TEM ホーンと代表的な EMC アンテナについて測定により比較する [17]。次に、TEM ホーンの波動インピーダンス及び位相中心を考慮した伝搬特性から近傍・遠方界特性の評価を行う。

6.1 位相中心

アンテナの位相中心は、遠方界での放射波の等位相面の曲率の中心として定義される。一般に、位相中心

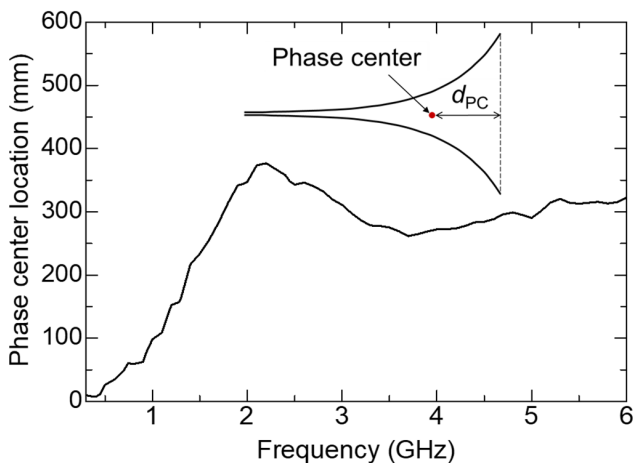


図 15 TEM ホーンの位相中心計算値 [17]

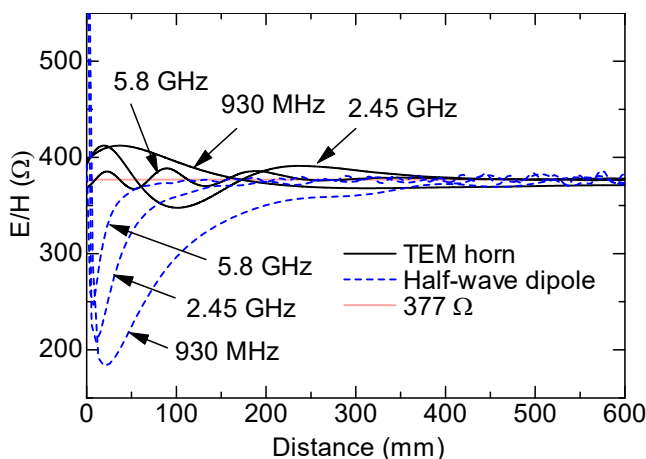


図 16 波動インピーダンス計算値 [17]

は E 面及び H 面で異なる。放射中心は、E 面及び H 面の位相中心の平均と一致するため [22]、平均位相中心は、アンテナ測定において遠方界での等価的な点波源として扱うことができる [23]。

短縮型 TEM ホーンの位相中心を有限積分法による数値シミュレーションにより位相パターンから推定した。位相が一定となる範囲は、アンテナのビーム幅の半分程度であり、それ以上の掃引幅では位相が変化し、位相中心の定義を満足しない。位相が一定となる角度範囲± 15 度で計算した位相中心位置を図 15 に示す。位相中心 d_{pc} は、周波数に依存し、周波数の増加に応じて開口面から給電部に変動している。

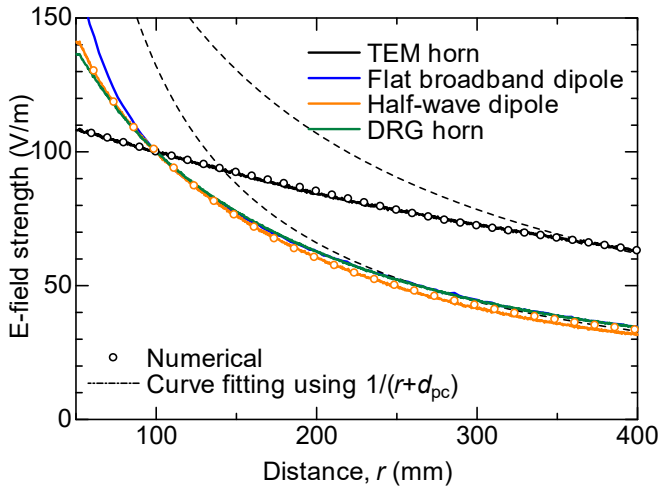
6.2 波動インピーダンス

アンテナ近傍の波動インピーダンスを数値シミュレーションにより電界 E と磁界 H の比 E/H として計算した。アンテナから放射された電磁波の波動インピーダンスは、アンテナより十分に離れていれば自由空間インピーダンス 377 Ω となる。短縮 TEM ホーン及び半波長ダイポールのアンテナ近くでの波動インピーダンスの距離特性を図 16 に示す。波動インピーダンスは、アンテナから離れるにしたがって、377 Ω に収束することがわかる。アンテナの近傍では、周波数及びアンテナの種類によって波動インピーダンスが異なる。TEM ホーンは、ダイポールのような急峻な変化はない。

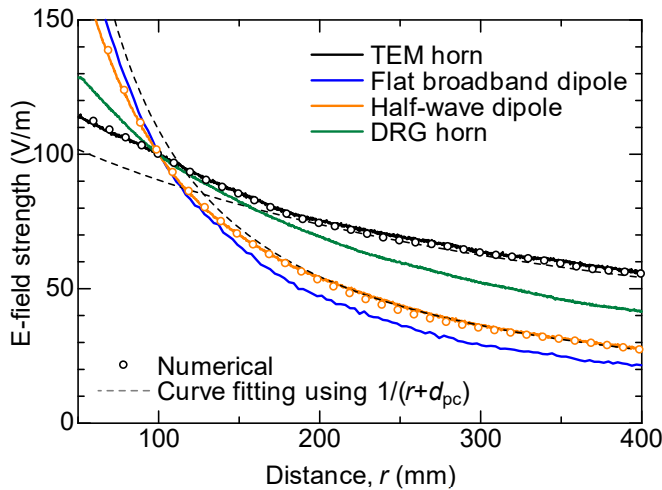
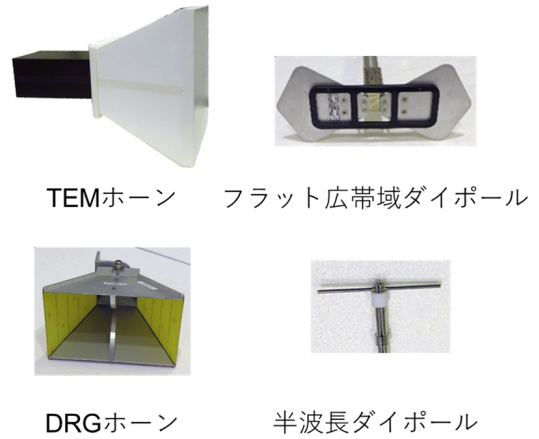
6.3 近傍電界特性

アンテナ近傍での電界の距離特性を TEM ホーン、自動車の近接試験で用いられるフラット広帯域ダイポール [16]、基準アンテナである半波長ダイポール及び EMC 試験でよく用いられる DRG ホーンの各アンテナについて測定した。測定周波数は、代表的な試験周波数 930 MHz、2.45 GHz 及び 5.8 GHz である。図 12 に示した測定系を用いて、XYZ ポジショナに設置した電界プローブによりアンテナ軸上の距離伝搬特性を開口面を起点に 50 mm から 400 mm まで測定した。また、距離 50 mm ごとに電界分布を 400 mm × 400 mm の平面上を 25 mm ステップでプローブを走査し測定した。

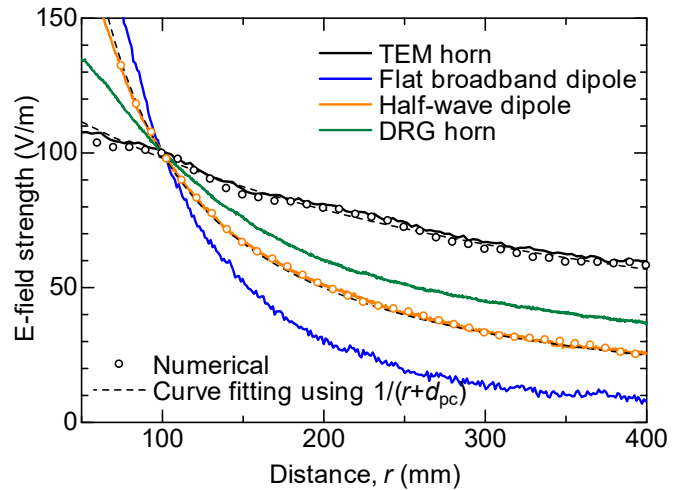
図 17 に各アンテナのアンテナ軸方向の伝搬距離特性の測定結果を示す。受信電界レベルは、近接放射試験の条件である距離 100 mm における照射電界レベル 100 V/m で正規化した。TEM ホーン及び半波長ダイポールの測定値と数値シミュレーション結果はよく一致している。アンテナ近くでの電界距離特性は、アンテナの種類によって大きく異なる。TEM ホーンは、他のアンテナ、特にダイポールに比べて電界強度の減少



(a)



(b)



(c)

図 17 (a) 930 MHz、(b) 2.45 GHz 及び (c) 5.8 GHz でのアンテナ近傍の電界距離特性 [17]

が小さい。

次に、距離伝搬特性から EUT 配置位置での近・遠方界特性の評価を行う。十分遠方であれば、電界強度は距離 r に反比例する。したがって、受信電界レベルが $1/r$ を用いた近似カーブと一致する範囲が遠方界領域となる。TEM ホーンの測定結果を、位相中心位置を考慮して $1/(r + d_{pc})$ を用いて近似を行った。TEM ホーンの位相中心は、図 15 に示すように 930 MHz、2.45 GHz 及び 5.8 GHz でそれぞれ開口面よりアンテナ内側に 76 mm、348 mm 及び 313 mm である。これら位相中心を考慮した近似による TEM ホーンの最小遠方界距離は、930 MHz、2.45 GHz 及び 5.8 GHz において、それぞれ 350 mm、200 mm 及び 50 mm である。その位置での波動インピーダンスは、図 16 よりそれぞれ 368 Ω 、386 Ω 及び 368 Ω となり、ほぼ自由空間インピーダンスに一致する。また、TEM ホーンの開口寸法を用いた開口面アンテナのよく知られた遠方界条

件 $2D^2/\lambda$ (たとえば、2.45 GHz のとき 3 m) は、前述の最小遠方界距離 (たとえば、2.45 GHz のとき 200 mm) と大きく異なる。これは、TEM ホーンの位相中心が開口面の内側にあるため、等価的な開口径は開口寸法より小さいと推測される。同様に電界距離特性と波動インピーダンスで判断した半波長ダイポールの最小遠方界距離は、例えば、2.45 GHz で 200 mm となるが、ダイポールのよく知られた遠方界条件 $\lambda/2\pi$ (19 mm) と大きく異なる。この条件は、準静電界、誘導界及び放射界が等しくなる条件であり、完全に遠方界を満たすためには一波長程度の距離が必要である。

放射特性の評価に位相中心考慮の有効性を確認するため、5.8 GHz の伝搬測定値に関数 $a/(r+d)$ を用いた最小二乗法によるカーブフィッティングの結果を図 18 に示す。 d の値をパラメータにして TEM ホーンの伝搬測定値にフィッティングを行った。 d の値を位相中心とした場合、TEM ホーンの伝搬測定値に一致

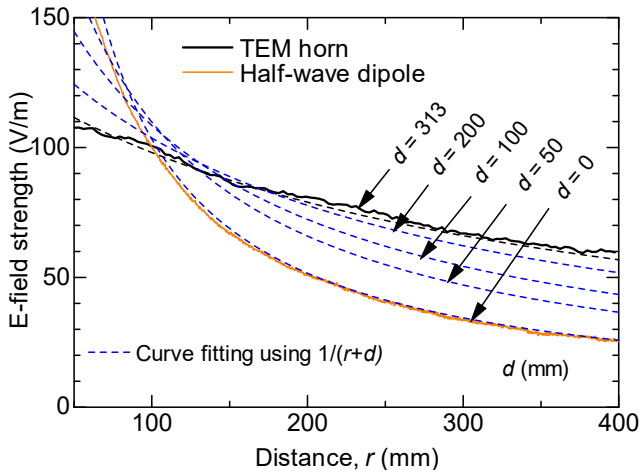


図 18 位相中心を考慮した伝搬特性評価 (5.8 GHz)

する。また、 d の値を 0、すなわち開口面位置とすると半波長ダイポールの測定値と一致する。アンテナ近くでの電界の距離特性は、開口面を起点にしたとき、見かけ上、近傍界特性の挙動を示すが、位相中心を起点とすると遠方界特性を満足していることがわかる。

図 19、20 及び 21 に各アンテナの電界分布の測定結果を示す。照射基準面 ($r = 100$ mm) で電界及び均一性を校正しても、アンテナの種類によって基準面からの距離、すなわち、EUT 配置位置での電界強度及び分布が異なる。フラット広帯域ダイポールは、TEM ホーン及び DRG ホーンの開口面アンテナに比べて距離減衰が急峻である。TEM ホーンは、アンテナ近くにおいても、基準電界強度に対する減衰が小さい。例えば、2.45 GHz において 400 mm の距離での電界強度は、フラット広帯域ダイポールよりも 10 dB 以上高い。フ

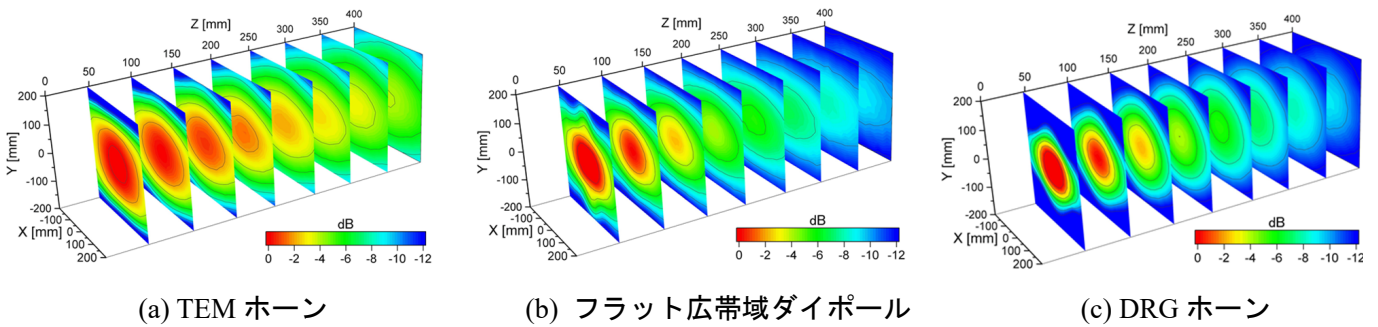


図 19 930 MHz でのアンテナ近傍電界分布

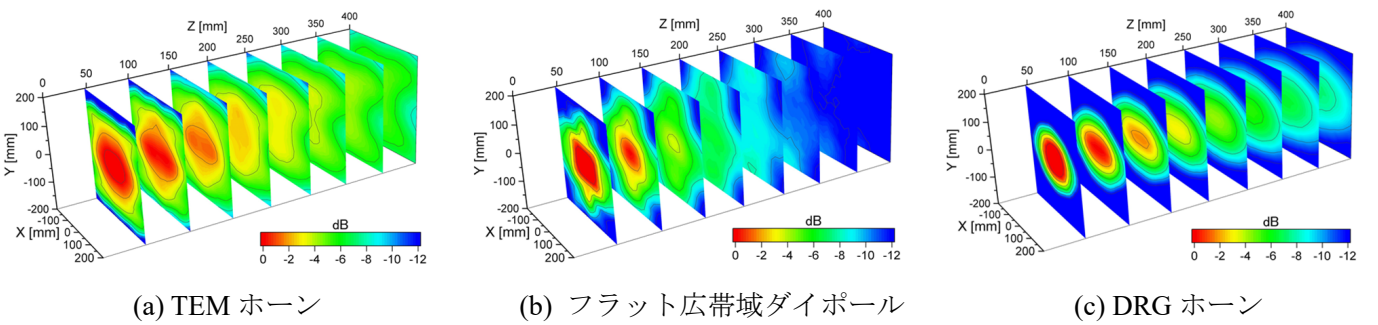


図 20 2.45 GHz でのアンテナ近傍電界分布

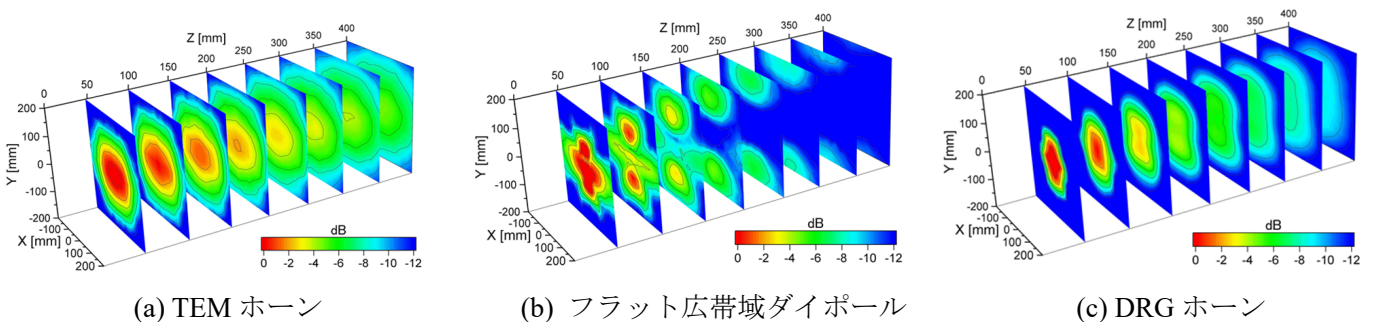


図 21 5.8 GHz でのアンテナ近傍電界分布

ラット広帯域ダイポールは、5.8 GHz でビームの割れのため図 21(b) に示すようにアンテナの軸上では強度が低くなる。TEM ホーンは、比較した他のアンテナに比べて広帯域にわたり大きな均一電界領域を生成した。アンテナ近くでも、TEM ホーンの電界強度はダイポールタイプのアンテナに比べ急激な変化はない。

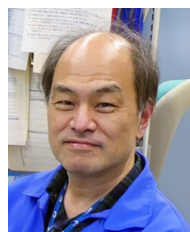
7 まとめ

EMC 測定に用いる広帯域アンテナとして TEM ホーンを設計及び試作し、近接放射イミュニティ試験で要求されるアンテナ特性を評価した。TEM ホーンのインピーダンス整合のため、代表的なテーパ伝送線路のうちで指数関数テーパが最適な選択である。この特性に基づいた短縮型及びハイブリッド型の指数関数テーパ TEM ホーンを提案した。これらアンテナ反射特性及び電界均一性は、近接放射試験の IEC 規格を十分に満足している。すなわち、提案アンテナは、1) 380 MHz から 6 GHz の試験周波数をカバーできる広帯域性、2) 試験要求を十分に満足する VSWR 2:1 となる反射特性を有する。また、3) 高周波数域においても対称に近い電界均一場を維持できることを示した。

アンテナ近傍の伝搬特性及び電界分布を EMC 測定で使用する代表的なアンテナについて測定により比較した。特に、ダイポールタイプの近接用アンテナでは、基準面から離れるに従って電界強度が急峻に減衰する。一方、TEM ホーンは、その減衰が小さく、広帯域にわたり良好な均一電界領域を生成する。また、近傍・遠方放射特性の評価法として、位相中心を考慮した遠方界近似の有効性を示した。

【参考文献】

- IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques. - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, 2020.
- IEC 61000-4-20, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, 2022.
- IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods, 2011.
- IEC 61000-4-39, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-39: Testing and measurement techniques. - Radiated fields in close proximity - Immunity test, 2017.
- ISO 11452-9 Ed.1, Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 9: Portable transmitters, 2012.
- Ford FMC1278, Electromagnetic compatibility specification for electrical/electronic components and subsystems, 2016.
- NTT TR549002 号 1.1 版, 通信センタ内における無線機利用を想定した通信装置のイミュニティに関するテクニカルリクワイアメント, 2018.
- C.A. Grosvenor, R.T. Johnk, D.R. Novotny, S. Canales, B. Davis, and J. Veneman, TEM horn antenna design principles, NIST Technical Note 1544, Jan. 2007.
- M. Kanda, "The effects of resistive loading of TEM horns," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.24, pp.245-255, May 1982.
- H. Choi and S. Lee, "Design of an exponentially tapered TEM horn antenna for the wide broadband communication," Microwave and Optical Tech. Lett., vol.40, no.6, pp.531-534, March 2004.
- K. Chung, S. Pyun, and J. Choi, "Design of an ultrawide-band TEM horn antenna with a microstrip-type balun," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.10, pp.3410-3413, Oct. 2005.
- K. Harima, "Numerical estimation for TEM horn antennas with transmission line taper shapes," IEICE Communications Express, vol.6, no.9, pp.560-565, Sept. 2017.
- K. Harima, T. Kubo, and T. Ishida, "Evaluation of a TEM horn antenna prototype for radiated immunity test in close proximity," Proc. 2019 Joint Int. Symp. Electromagn. Compat. and Asia-Pacific Int. Symp. Electromagn. Compat., pp.581-584, Sapporo, Japan, June 2019.
- K. Harima, T. Kubo, and T. Ishida, "Evaluation of a TEM horn antenna for radiated immunity tests in close proximity," IEICE Communications Express, vol.9, no.2, pp.60-65, Feb. 2020.
- K. Harima, K. Gotoh, T. Kubo, and T. Ishida, "Design of hybrid tapered TEM horn for radiated immunity test in close proximity," Proc. 2020 International Symposium on Antenna and Propagation, pp.123-124, online, Japan, Jan. 2021.
- D. Schwarzbeck, "Field uniformity measurements of flat broadband dipoles used for near-field immunity testing," IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, vol.2, no.3, pp.72-75, Sept. 2020.
- K. Harima, T. Kubo, K. Gotoh, and T. Ishida, "Near-field characteristics of a TEM horn used for radiated immunity tests," IEICE Communications Express, vol.10, no.11, pp.881-886, Nov. 2021.
- D.M. Pozar, Microwave engineering, 4th Ed., New York: Wiley, 2011.
- R.W. Klopfenstein, "A transmission line taper of improved design," Proc. IRE, vol.44, no.1, pp.31-35, Jan. 1956.
- R.P. Hecken, "A near-optimum matching section without discontinuities," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.20, no.11, pp.734-739, Nov. 1972.
- M. Manteghi and Y. Rahmat-Samii, "A novel UWB feeding mechanism for the TEM horn antenna, reflector IRA, and the Vivaldi antenna," IEEE Antennas Propag. Mag., vol.46, no.5, pp.81-87, Oct. 2004.
- A.R. Panicali and M.M. Nakamura, "On the amplitude center of radiating apertures," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-33, no.3, pp.330-335, March 1985.
- K. Harima, "Numerical simulation of far-field gain determination at reduced distances using phase center," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no.10, pp.2001-2010, Oct. 2014.



張間 勝茂 (はりま かつしげ)

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
環境電磁工学
【受賞歴】

2002年 Best Paper Poster Presentation Award, EMC EUROPE 2002



後藤 薫 (ごとう かおる)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
標準校正グループ
グループリーダー
博士(工学)
電磁雑音の統計量、電磁干渉評価法
【受賞歴】

2020年 令和2年度文部科学大臣表彰
科学技術賞

2011年 IEEE Richard Schulz Transactions Prize Paper Award

2 先端 EMC 技術 (通信 EMC)



久保 崇将 (くぼ たかゆき)

株式会社ノイズ研究所
商品開発部
EMC システム技術課
課長
環境電磁工学



石田 武志 (いしだ たけし)

株式会社ノイズ研究所
商品開発部
上席部長
博士 (工学)
環境電磁工学
【受賞歴】

- 2019 年 EMC 札幌 & アジアパシフィック
EMC 国際シンポジウム エクセ
レントペーパーアワード
- 2018 年 国際電気標準会議 電磁両立性
TC77 エキスパート IEC 1906 賞
- 2015 年 米国電気協会 EMC ソサエティ
EMC ヨーロッパ共催 国際シンポ
ジウム Best paper award hon-
orable mention