

## 電界分布が設定可能な試験用セルの設計・製作

光電子科 電子スタッフ 吹原祐子\* 長谷川茂

## Design and Construction of the Test-Cell with variable E-field distribution

Yuko Fukihara and Shigeru Hasegawa

EMC examination is important to evaluate the noise tolerance of an electronic equipment. Electric-field (E-field) uniformity space such as Open Area Test Site (OATS) or anechoic chamber is defined in various examination standards. Recently, the test-cells such as GTEM Cell and Reverberation Chamber are very paid to attention, because they are cheaper, and electromagnetic wave radiation of 1 GHz or more is not only possible, but a large space is not needed.

Therefore, they inquired as a method of substituting for OATS or anechoic chamber. In this study, the new test-cell that can set not only E-field strength uniformity but also not uniformity space is made for prototype, and the application is considered. The cell geometry was decided by the simulation analysis. Some basic characteristics of the cell were measured, it is revealed that uniformity of E-field distribution was changed by changing the mechanism of the cell geometry.

## 1. はじめに

半導体技術の飛躍的進歩に伴う電子機器の高速動作化と軽薄短小化により、機器から放射される妨害波や外来ノイズに対する耐性など、電子機器に対するEMC（電磁環境適合性）試験は避けては通れない課題となっている。

このEMC試験は本来、屋外測定場や電波暗室などで実施することが定められているが<sup>1)</sup>、これらの設備導入には広大なスペースと莫大な費用が必要であることから、手軽な導入は困難である。そのため近年では、同等試験が低価格で簡便に実施でき、且つ導入が比較的容易なGTEMセルや反射箱等の試験用セルが注目されており、規格化が整備されつつある。これら試験用セルは、屋外測定場や電波暗室の代替を目的としているため、供試装置（EUT）に対し十分広い電界均一空間が得られるよう設計されている。

しかし実際には、電子機器の使用環境は多様化しており、電界強度が均一な電磁曝露下ばかりではなく、局所的な外来ノイズにより不均一な電磁曝露を受ける場合も往々にしてある。そのため、従来の規

格試験だけでは実環境の再現試験が困難な場合があると考える。

さらに現在のEMC試験は、EUTが定められた強度の外来ノイズに耐えられるか、または定められた値以上の妨害波を放射していないかを調べるための試験法であり、どのような外来ノイズ曝露下で誤動作に至るのか、電子機器のどの部分から妨害波が放射しているのかは知ることができない。そのため電界均一性が確保されていない空間であっても、その電界強度の分布特性を利用することによって、新たなEMC試験や電磁波計測等に利用できるのではないかと考える。そこで本研究では、内部の電界強度分布を制御し、均一空間場だけではなく不均一空間場も任意に設定できる試験用セルの開発に取り組み、その応用について検討している。

本報告では、まず電磁界シミュレーション解析により試験用セルの構造を決定し、その応用例としてノイズ源位置推定への適用を提案する。そして解析結果をもとに実際のセルを試作し、その特性評価を行ったことについて述べる。

\*) 現 退職

## 2. シミュレーション

### 2.1 解析ソフト

試験用セルの構造を決定するために、電磁界解析ソフトMAFIA (Solution of Maxwell's equations by the Finite Integration Algorithm : (株)AET) を使用し、セル内部に発生する電界強度分布のシミュレーション解析を行った。MAFIAとはマクスウェル方程式を有限積分法で解く3次元電磁界解析ソフトであり、開領域問題における弱点を補うために開発された解析手法である。

まず、このMAFIAを当センターが所有するGTEMセル (EGT-500B : エレナ電子(株)) の電磁界解析に適用し、実測との比較を行った。写真1は当センターのGTEMセル、図1は模式図である。GTEMセルはTEM導波管の一種であり、放射イミューニティ試験をマイクロ波周波数帯域においても実行できるよう設計された装置である。GTEMセルは同軸ケーブルの中心導体を平板にし、全体を四角錐状に広げた構造となっている。四角錐の先端には同軸コネクタが、その反対側には終端器と電波吸収体が設置されており、全体は外部導体にて遮蔽されている。同軸コネクタに印加した入力電力は、空中に吊られた内部導体 (導波面) を伝導しながら周囲の外部導体 (天井面・壁面・床面) に対し電界を発生させ、垂直平面波を放射する。この平面波は終端部に向かって進行し、終端器と電波吸収体にて吸収される。また四角錐状に広がった構造により導波面の幅と床面からの高さ、および外部導体の幅の比は常に一定であり、この比がGTEMセルの特性インピーダンス50Ωを決定している。また四角錐状に広がり平行部

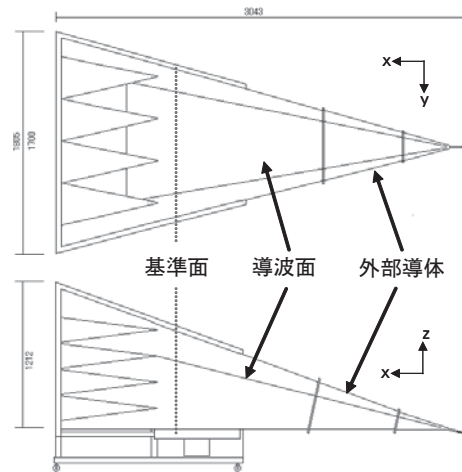


図1 GTEMセル(模式図)

(屈曲部)を持たない導波面と床面の構造により、他の試験用セルでは不可能だった1GHz以上の試験周波数に対応できるようになっている。GTEMセルはこのような優れた特徴を持ち、且つ試験領域の均一空間が確保された構造となっている<sup>2)</sup>。

このGTEMセルをMAFIAにてモデル化し、解析を行った。解析用モデルを図2に示す。MAFIAには有効使用メモリに上限があり、GTEMセルの全形状解析は不可能であるため、GTEMセルが左右対称形であることを考慮し、左半分のみを800万メッシュに分割した。またGTEMセル終端部は開放形にし無反射とすることで、終端器と電波吸収体をモデル化した。解析は1GHz・1Aの入力信号を印加し、終了条件は時間ステップ数10,000回または計算精度5%以下とした。GTEMセル基準面における電界強度の解析結果を図3(a)(b)に示す。(a)は109色による電界強度分布の色表示、(b)は109色200本による



写真1 GTEMセル

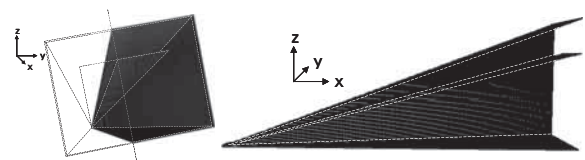
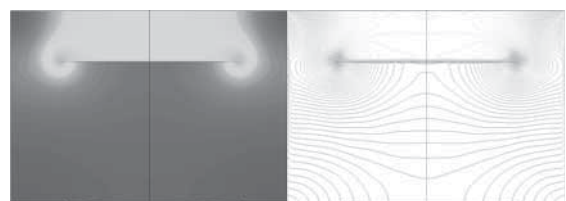


図2 MAFIAによるGTEMセルの解析用モデル



(a) 色表示

(b) 線表示

図3 GTEMセル電界強度の解析結果

る線表示である。ここでGTEMセル基準面とは、図1に示すようにy方向（GTEMセル内の外部導体幅） $W = 1\text{ m}$ 、z方向（GTEMセル内の床面から導波面までの高さ） $d = 0.5\text{ m}$ のyz垂直断面であり、通常EUTを設置する面である。

MAFIAによる解析結果と実測結果を比較するため、GTEMセルで通常用いられる高周波電界強度測定器（EMR-20：東洋メディック株）を使用し、基準面内の電界強度を測定した。測定点は図4（上図）に示すように、y方向の間隔 $\Delta W = 0.1\text{ m}$ 、z方向間隔 $\Delta d = 0.05\text{ m}$ としたとき、GTEM基準面の中心である基点Aから、試験領域として推奨されている $3\Delta W \times 3\Delta d$ の四隅を点B・C・D・E、その4点の中間を点F・G・H・Iとした。またその外側 $6\Delta W \times 3\Delta d$ を点B'～H'、さらに外側 $8\Delta W \times 7\Delta d$ を点B''～I''とし、以上23点を測定点とした。解析と実測との比較結果を図4（下図）に示す。解析結果と実測結果は各々、基点Aの電界強度値を基準としたdB表示としてある。

この結果より、試験領域外である壁面近傍および導波面エッジ下、試験領域である導波面中央下ともにMAFIAによる解析結果と実測結果はほぼ同様の結果が得られたため、MAFIAが新たなセル構造決定の電磁界解析に有効なツールであることが確認できた。

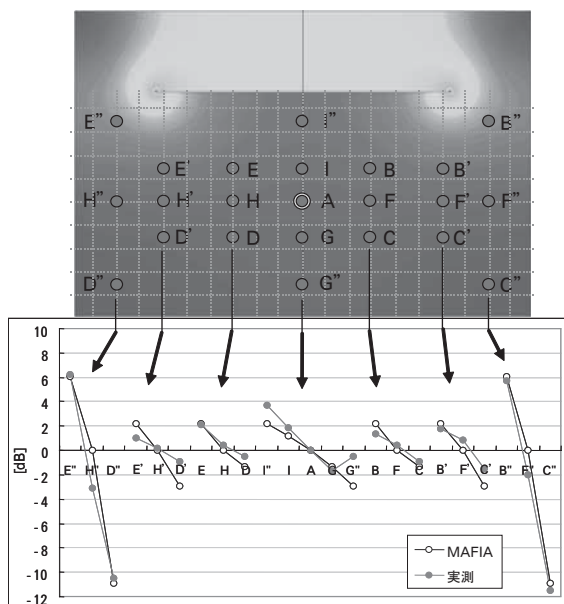


図4 GTEMセルのMAFIA解析と実測との比較

## 2.2 新構造セルのモデル

### (1) セルの設計

MAFIAによる解析結果（図3）より、GTEMセルの導波面から放射される電界は、より距離の近い天井面への集中が強く、試験領域である床面方向への放射は天井面方向へ放射される電界強度の約4分の1程度と電力効率が悪い。試験領域の電界分布特性を変化させるためには試験領域外への放射を抑え、試験領域に電界を集中させることが有効であると考えた。そのためGTEMセルの優れた特長を残し、且つ試験空間に効率良く電界を発生させるために、図5に示す構造の試験用セルを検討した。

これはGTEMセルから壁面と天井面を取り外した構造で、床面と導波面からなる。天井面を取り外すことで、印加した入力電力が導波面から床面に効率良く放射すると考える。導波面は、電界分布を乱さない発砲スチロールにて支持する。周囲は電波吸収体で囲み、セル内部で発生した電界が外部へ漏洩することを防ぐ。今回設計したこの試験用セルのサイズは全長1.27m、幅0.60m、高さ0.31mであり、GTEMセルと同様、導波面の幅と床面からの高さの比は常に一定である。

また図5に示すように、y方向（床面の幅） $W = 0.6\text{ m}$ 、z方向（床面から導波面までの高さ） $d = 0.3\text{ m}$ のyz垂直断面を、この試験用セルの基準面とする。

(2) 解析モデルと条件

この新しい試験用セルについて、MAFIAによる電磁界解析を行った。解析用モデルを図6(a)～(d)に示す。

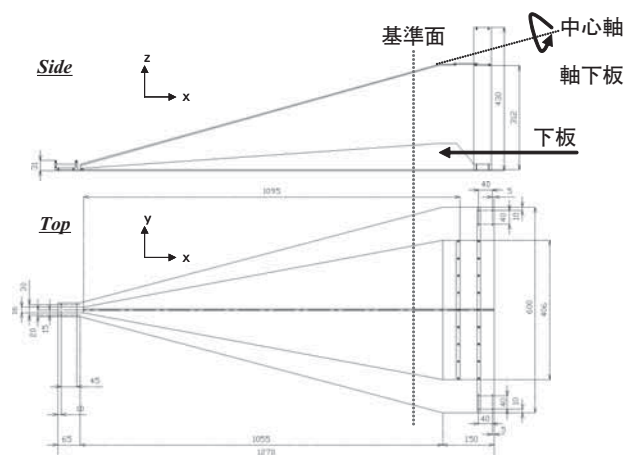


図5 新しい試験用セルの構造

【報告】

(a) 基準型：GTEMセルから壁面と天井面を取り外した構造。電界が導波面から床面へ理想的に放射し、試験領域に電界を集中させることが可能になると考える。

(b) 下板型：電界分布を変化、特に1点に集中させるために、基準型の床面に垂直金属板（下板）を設置した構造（図5参照）。下板は、床面から導波面までの高さに対し、常に4分の1になるよう設計した。

(c) 傾斜型：電界分布を変化させるために、基準型の導波面を、図5に示す中心軸にて回転、傾斜させた構造。時計回りに10度傾斜させた場合は傾斜（10度）型と表現する。

以上3つのタイプ（計4モデル）について解析を行った。各試験用セルはともに800万メッシュにて全形状をモデル化し、1GHz・1Aの入力信号を印加する。解析終了条件は時間ステップ数10,000回または計算精度5%以下とした。

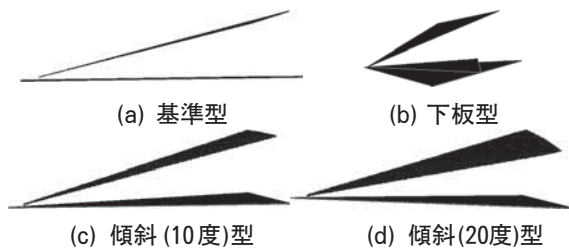


図6 新構造セルの解析モデル

(3) 解析結果

MAFIAによる解析結果を図7(a)~(d)に示す。左図は基準面における電界強度分布、右図は中心部（基点A）を基準とした計63点の観測点（ $y = -0.12\text{m} \sim -0.12\text{m}$ 、 $z = 0.06\text{m} \sim 0.24\text{m}$ ； $0.03\text{m}$ 刻み）の電界強度値をdB表示したグラフであり、左図中に示した領域に対応する。

(a)の基準型では天井面が無いことから、入力した電力は導波面から床面へ効率良く放射され、理想的な電界分布が得られた。また観測領域は±2dB程度の電界差で、均一空間を作り出している。(b)の下板型では、下板の頂点に向かって局所的な電界集中が見られた。観測領域は最大8dB程度の急峻な電界強度差が生じており、不均一空間が作り出されている。(c)の傾斜（10度）型では、観測領域は傾きを

持った穏やかな電界差を生じ、(d)の傾斜（20度）型では電界分布の傾斜がさらに大きくなることが分かった。以上より、この新しい試験用セルは入力電力を効率良く放射でき、また床面に垂直金属板を立てたり導波面を傾斜させたりすることで内部の電界強度分布を変更できることが分かった。

2.3 新提案セルによるノイズ源推定

新提案セルを使用し、電界強度の強度差（不均一分布）と電磁界における相反定理を応用することで、電子機器のノイズ源位置推定が可能になると考える。例えば基準型・傾斜（10度）型・傾斜（20度）型の3モデルについて、セル先端部から入力電力を印加し、図8(a)に示すように左上1点を基点とし、そこから順に(A)→(B)→(C)→(D)→(E)→(F)の順で電界強度を測定すると図8(b)となる。これは相反定理を応用すると、セル先端部にスペクトラムアナライザを接続し、ノイズ源を図8(a)に示すように左上1点に設置し、そこから順に(A)→(B)→(C)→(D)→(E)→(F)の順で移

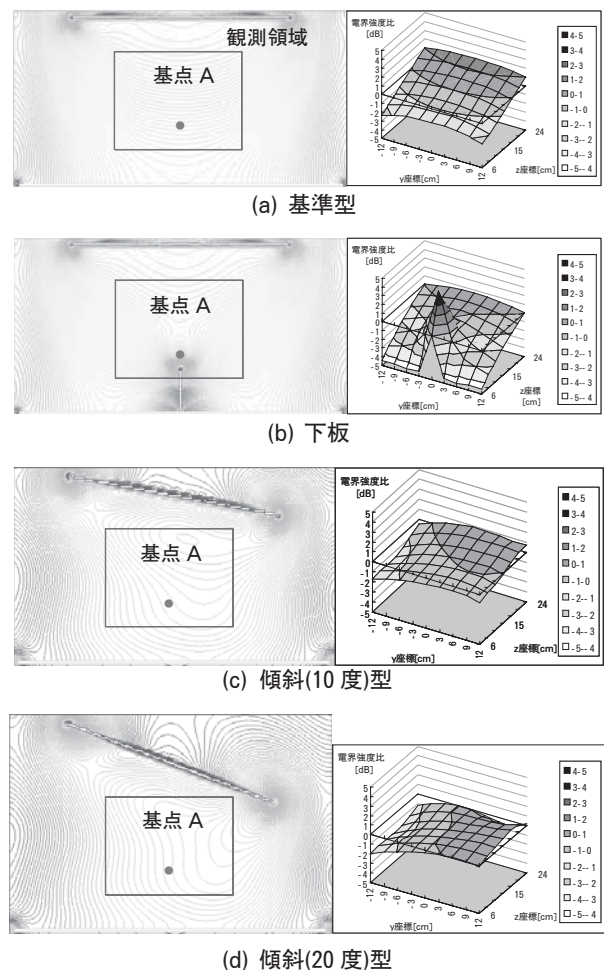


図7 新構造セルの解析結果

動させた時の受信値は図8(b)になる、と言い換えることができる。

これより、基準型ではEUTを上下方向に動かす場合、ノイズ源が下へ向うほど受信値は小さくなり、上へ向うほど大きくなる。また横方向に動かす場合、ノイズ源が中央へ向うほど受信値は大きくなり、中央から離れるほど小さくなる。つまりEUTを左から右へ動かした時、増加している受信値が減少し始めた瞬間に、ノイズ源が中央部を通過したことが分かる。傾斜(20度)型では、EUTを横方向に動かす場合、右へ行くほど受信値は大きくなるが、移動分に対し受信値の増加量は小さくなる。また上下方向に動かす場合、右領域ではノイズ源が下へ向うほど受信値は減少するが、左領域に近づくほど受信値は増加する。つまりEUTを上から下へ動かした時、受信値の増減傾向により左右の領域が分かり、EUTを左から右へ動かした時、EUTの変位量に対する受信値の増加量の観測により、ノイズ源位置推定が可能になる。

これらの特性を利用し、基準面を格子状に区切り、各点における電界強度値をデータベース化しておく。EUTを何ヶ所か移動し、移動量と受信値についてデータベースと照らし合わせることで、ノイズ源の位置推定が可能になると考える。

### 3. セルの試作

#### 3.1 構造

シミュレーション解析に用いたモデルを基に試作したセルを写真2に示す。床面および導波面はアルミにて製作、導波面は発砲スチロールにて支持する。また床面および壁面は電波吸収体(PFP-20/PFP-20WW：楸リケン)にて覆っている。

### 3.2 特性評価

試作した試験用セルを電波暗室内に設置し、入出力特性、定在波比、電界分布について評価を行った。

#### (1) 入出力特性

試作した試験用セルに信号発生器(SG；Signal Generator/SML03：ROHDE&SCHWARZ)とパワーアンプ(CBA9413B：TESEQ)を接続し、1GHzの入力電力を印加する。その時、試験用セルとパワーアンプの間にパワーメータ(4421：BIRD)を挿入し、SG出力値と試験用セルの入力電力の関係を測定した。また図5および図7で示した基準面の中心部(基点A)に高周波電界強度測定器を設置し、併せて電界強度も測定した。SG出力値と試験用セルへの入力値および基点Aにおける電界強度の

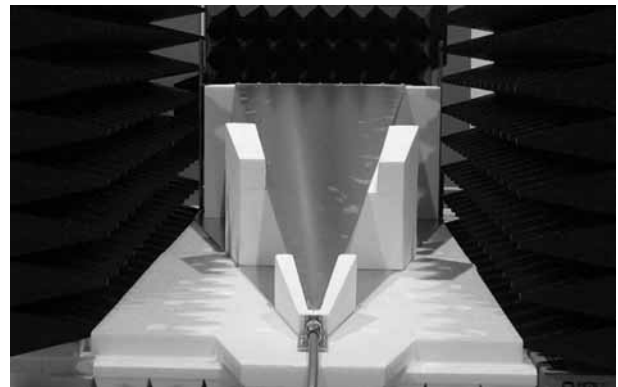


写真2 試作した試験用セル

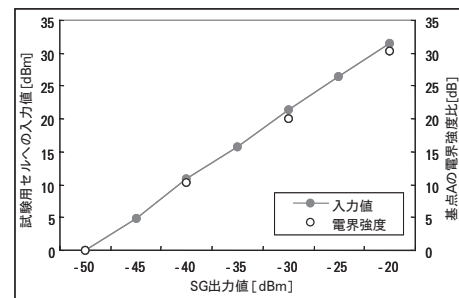


図9 SG出力値とセル入力値および電界強度

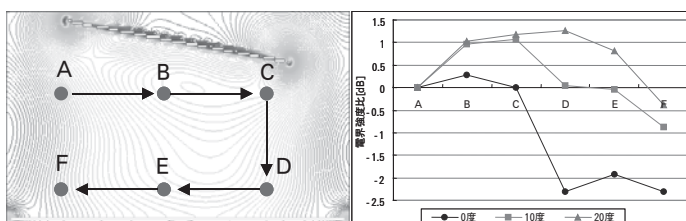


図8 新構造セルによるノイズ源位置推定例

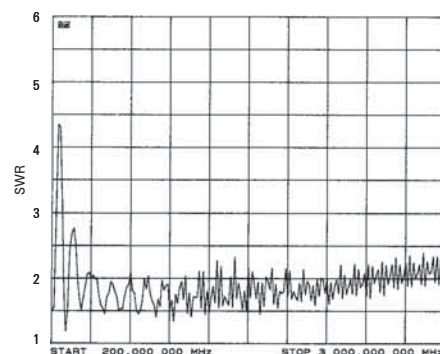


図10 定在波比

測定結果を図9に示す。これより、SG出力値に応じて試験用セルへの入力値が直線的に変化し、合わせて基点Aにおける電界強度値も比例して変化することが確認できた。

(2) 定在波比 (SWR)

試作した試験用セルにネットワークアナライザ (8753C : HEWLETT PACKARD) を接続し、200 MHz～3 GHzにおける定在波比 (SWR) を測定した。その結果を図10に示す。これより500MHz～1.3 GHzの周波数帯域でSWRは約2以下、1.3GHz～3 GHzで約2.4以下であった。これは実使用上問題の無いレベルであるが、若干高めの特性である。この理由として、ネットワークアナライザを始めとする機器の特性インピーダンスが50Ωであるのに対し、試作したセルの特性インピーダンスは設計上約100Ωと考えられるため、インピーダンス不整合が発生していると思われる。

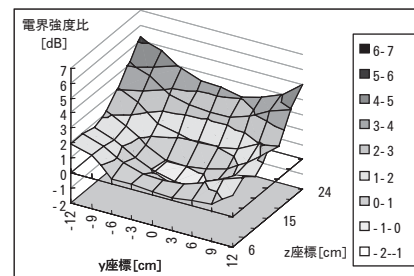
(3) 電界分布

試作した試験用セルにSGとパワーアンプを接続し、1 GHz・-30dBmの入力電力を印加した時の、基準面における電界強度を測定した。測定は高周波電界強度測定器を使用し(a)基準型(b)下板型(c)傾斜(10度)型の3タイプにて各々計63点 (y=-0.12m～0.12m、z=0.06m～0.24m ; 0.03m刻み) にて実施した。結果を図11(a)～(c)に示す。これは図7に示した基点Aにおける実測値を基準としたdB表示である。

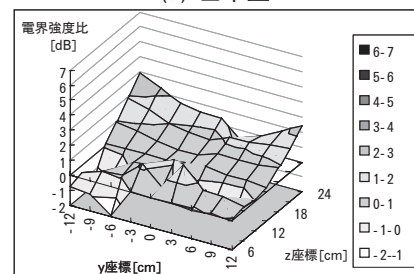
これより、床面に垂直金属板を立てたり導波面を傾斜させたりするなど、セル構造を変化させることにより内部の電界強度分布を変更できることが、実測においても確認できた。しかしMAFIAによる解析結果と比較した結果、実測ではz=0.12m近辺で電界強度が一旦落ち込む傾向がみられ、シミュレーション結果と一致しなかった。この原因として(1)試作したセルの特性インピーダンス不整合により、セル最終端で反射波が生じている(2)MAFIAと試作したセルで、金属材質の違いが影響している(3)高周波電界強度測定器が電界分布を乱している、などが考えられるが定かではなく、今後の検討課題である。

4. まとめ

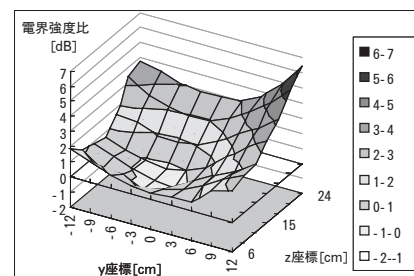
電界強度分布を制御し、均一空間だけではなく、不均一空間も任意に設定できる試験用セルの開発を目指し、試験用セルを設計・試作した。この試験用セルの構造は、GTEMセルの長所を残し、且つ試験領域に効率良く電界を発生できる性能を目指し、MAFIAによるシミュレーション解析を活用し、決定した。床面と導波面からなる基準型を基とし、基準型の床面に垂直金属板を立てる下板型、基準型の導波面を軸回転させる傾斜型とセル構造を変化させることで、発生する電界強度分布が変化することが確認できた。また本セルの応用例の1つとして、電子機器のノイズ源位置推定の可能性について提案した。



(a) 基準型



(b) 下板型



(c) 傾斜(10度)型

図11 電界強度の分布

謝辞

本研究を進めるにあたりご指導を頂いた静岡大学電子工学研究所杉浦敏文教授およびMAFIA解析に

ご協力を頂いた静岡大学電子工学研究所平田寿技官  
に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IEC61000-4-3、Electromagnetic compatibility (EMC) -Part4-3 : Testing and measurement techniques- Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test、(2002)
- 2) Clemens Icheln、The construction and application of a GTEM Cell、Technical University of Hamburg-Hanburg/Helsinki University of Technology、(1995)