

5 電磁環境

5-1 機器関連の EMC に関する研究動向

5-1 Recent Progress of Studies on EMC relating to various Equipments

山中幸雄 石上 忍 張間勝茂

Yukio YAMANAKA, Shinobu ISHIGAMI, and Katsushige HARIMA

要旨

高度情報社会の更なる発展には、電子機器や通信機器・システム間の不要な相互干渉を防ぎ、各種機器・システムが安心して使えるようにするための研究(EMC:電磁両立性に関する研究)が不可欠となっている。電磁環境グループでは、機器関連のEMC研究のうち、主にEMCに関する測定法について検討を行っている。本稿では、1GHz以上の放射妨害波測定法、近い将来の放射妨害波・放射イミュニティ測定法に使用可能となるGTEMセル及び反射箱の概要、研究成果等について紹介する。

In order to realize the further development of the advanced information society, R&D in EMC technologies between electric, electronic and communication equipment and/or systems are indispensable. The target of the EMC is to promote the electromagnetic environment in which those equipment can be used without mutual interference. In this paper, recent EMC studies on various equipment in CRL are explained. CRL/EMC group mainly focus its research area on measurement method. Research outline and outcome on some topics are summarized which include the radiated emission measurement method above 1 GHz, GTEM cell and reverberation chamber which are promising measuring instruments for both radiated emission measurement and radiated immunity measurement in the near future.

[キーワード]

電磁両立性(EMC), 妨害波, イミュニティ, 反射箱, GTEMセル

Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Disturbance, Immunity, Reverberation Chamber, GTEM cell

1 まえがき

コンピューター等の電子機器の普及や種々の機器との融合・システム化に伴って、これらの機器が発生する電磁妨害波によって引き起こされる通信や放送の障害の形態も複雑・多岐にわたるようになってきている。また、携帯電話等の無線機器の爆発的な増加とともに、これらの機器から発射された電波による電子機器の誤動作や医療機器への影響が懸念され、更には人体への

影響についてもマスコミ等で大きく取り上げられるようになってきた。21世紀を迎え、高度情報社会を更に発展させるには、生活の利便性や文化的な生活を支える電子機器や通信機器/システムの研究開発と同時に、それらが正常に機能するための良好な電磁環境を確保する技術の研究開発が不可欠である。

通信総合研究所では、無線通信を支える基礎技術の一つとして、電磁環境に関する研究を昭和40年代より行っている。特に、無線局に関す

る行政を担当する郵政省(現総務省)の研究機関として、無線局相互間や、無線局と電子機器間の電磁(的)両立性(EMC: Electromagnetic Compatibility)の確保を図るために、様々な調査研究を行ってきた。例えば、長年にわたり電子機器から放射される電磁妨害波の測定法に関する研究を行い、我が国の関連規格の制定や、CISPR等の国際規格の策定に貢献してきた。また、大電力送信所付近の電磁環境等、我が国の電磁環境の実態を把握し、人体や機器に対する指針策定に貢献してきた。さらに、携帯電話など人体のごく近くで使用される機器からの電波が人体に及ぼす影響についても、1996年より研究を開始するとともに、電波防護指針との適合性の評価法についても研究を行っている。以上のような広範囲な調査研究を通じて、各種機器が相互に問題なく使用でき、更に人体への影響が無視できるような電磁環境を確立することを目標としている。

電磁環境のプロジェクトは1997年7月の組織改正により横須賀無線通信研究センターに移行し、さらに、2001年より通信総合研究所が独立行政法人となったことにより、総務省からの委託に基づきプロジェクトは運営されているが、これまでどおり公的な機関としての使命を着実に果たして行くことを基本に、更に研究内容を充実・発展させて必要があると考えている。

本特集号では、EMCプロジェクトを機器関連と生体関連に分け、それぞれについて最近の主な研究成果と今後の研究課題を紹介する。機器関連では、主にEMCに関する測定法について検討を行っている。測定法に関しては、機器からの妨害波を測る「妨害波測定法」と、機器の外来電磁波に対する耐性を測定する「イミュニティ測定法」がある。さらに、筐体から(または筐体へ)の電磁波の結合を問題とする放射妨害波(イミュニティ)と、電源線や通信線を通じて結合する伝導妨害波(イミュニティ)とに分類できる。

本稿では、1GHz以上の放射妨害波測定法、近い将来の放射妨害波・放射イミュニティ測定法に使用可能となるGTEMセル及び反射箱の概要、研究成果についてそれぞれ紹介する。

2 1GHz以上の妨害波測定法

2.1 はじめに

近年、1GHz以上の周波数帯における無線通信システムの発展・普及とデジタル回路の高周波化等により、この周波数帯におけるEMC問題が重要になってきた。現在、CISPR(国際無線障害特別委員会)では、1GHz以上の放射妨害波測定法の検討を行っており、その一部(1-18GHz)については既に規格化がなされている。CISPR16-1第2版(1999)¹⁾では、妨害波測定の基本的な装置として、測定用受信器、測定用アンテナ及び測定サイトについて規定している。また、CISPR16-2修正1(1999)²⁾では、測定配置や測定手順などの測定法について規定している。概要を図1に示す。基本的な骨格はできたといえるが、残された課題もある。

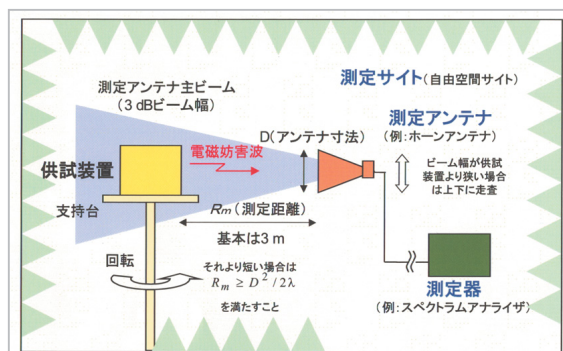


図1 1-18 GHzの妨害波測定法の概念図

ここでは、まず測定用受信機として一般的に使用されるスペクトラム・アナライザ、測定用アンテナ、測定場のそれぞれについて、課題とCRLの取組を紹介する。

2.2 測定器

CISPRにおける基本的なスペアナの規定は、

- ① 検波方式: 尖頭値検波
- ② 分解能帯域幅(RBW): $1\text{MHz} \pm 10\%$
- ③ ビデオ帯域幅(VBW): 1MHz以上

である¹⁾。

ここで、RBWはインパルス帯域幅 B_{imp} で定義されていることに注意する必要がある。これは、尖頭値測定においてはパルス性雑音に対する測定値が B_{imp} に比例するためである。しかし、市販

のスペアナのRBWは、3dB又は6dBの減衰帯域幅で定義されており、インパルス帯域幅に関しては測定されていない。

また、VBWについては、1MHz又は3MHzなど任意数の設定が可能である。さらに、VBWを小さくすることによる重み付け測定についても規定されている。

このように、スペアナを用いた1GHz以上のEMI測定では、RBWとVBWの特性が測定結果に大きく影響するため、市販されている代表的なスペアナの特性を調査した。結果を表1に示す[4]。

表1 機種及びビデオ帯域幅(VBW)による測定値(ピーク値)の変化

RBM=1MHz B_3 :3dBの帯域幅 B_6 :6dBの帯域幅			
スペクトラムアナライザ	VBW [MHz]	$A(t)_{max}$ [dBm]	差 [dB]
A社No.1(B_3)	1	-21.5	3.8
	3	-17.7	
A社No.2(B_3)	1	-19.7	3.1
	3	-16.6	
A社No.3(B_3)	1	-19.4	3.1
	3	-16.3	
B社No.1(B_3)	1	-30.2	-
B社No.2-1(B_3)	1	-24.1	2.5
	3	-21.6	
B社No.2-2(B_6)	1	-24.8	1.3
	3	-23.5	
C社(B_3)	1	-31.2	2.4
	3	-28.8	

このように同一のパルスを入力しても機種により測定値(ピーク値)が大きく(VBWを1MHz一定としても、最大11.8dB)異なることが分かる。これはIFフィルタの形・特性が異なるためである。また、同一機種でもVBWの設定が異なると

ピーク測定値が大きく(最大3.8dB)変化する。したがって、実際の妨害波測定においても、パルス性妨害波の場合は上記のようなVBW依存性がある。また、A社及びB社のスペアナについて、 B_{imp} の測定値を表2に示す。

これらの結果から、市販されているスペクトラムアナライザは、CISPRで規定するインパルス帯域幅1MHz ± 10%を満たす機種も存在するが、大きく異なる機種もあることが分かった。したがって、規格を満たさないスペアナを用いた場合、特にインパルス性ノイズ(測定帯域幅より広い帯域幅を持つ広帯域ノイズ)の測定結果は大きく異なると考えられる。今後、妨害波測定に用いるスペアナにはインパルス帯域幅の値を明示する必要がある。

また、CISPR規定「VBWは、1MHz以上」では、VBWが異なった測定結果を示す可能性があるため、同一の値(例えば3MHz)で測定することが望ましい。

ところで、スペアナのビデオ帯域幅VBWを測定信号の変調帯域幅よりも低い値にすることで、測定信号の平均値レベルに相当する値となり、連続的に発生するノイズは高い指示値、間欠的に発生するノイズは低い指示値になるように重み付け測定が行える。スペアナのディスプレイ表示では、LogモードとLinearモードがあるが、重み付け測定ではLinearモードの値の方がLogモードの値より高くなる。

CISPR11[3]では、400MHz以上の周波数で動作するISM装置グループ2のクラスBの1GHzから18GHzの放射妨害波測定において、VBWを10Hzとした重み付け測定を規定しており、Logモードで行うことになっている。

そこで、重み付け測定に関して、測定結果に影響を与える要因について検討した[4]。その結

表2 インパルス帯域幅の比較(いずれも公称RBW = 1MHz、VBW = 3MHzの時)

スペクトラムアナライザ	方法1 [MHz]	方法2 [MHz]	平均 [MHz]	パルス入力時の測定誤差 [dB]
A社No.2	1.64	1.50	1.57	3.9
A社No.3	1.69	1.66	1.68	4.5
B社No.2-1	0.92	0.88	0.90	-0.9
B社No.2-2	0.74	0.79	0.75	-2.5

CISPR規定 1MHz ± 10%(0.9 ~ 1.1MHz)

果、常に Log モードより Linear モードの重み付け測定値が大きいことが分かった。例えば Duty 比 50% のパルス測定の場合では Linear モードでは、ピーク値から 6dB 減となっているが、Log モードでは、30dB もの減衰となっている。

なお、Linear モードの重み付け測定値は、実際の平均値を示しているが、Log モードでの値は、実際の平均値とは異なり物理的な意味づけは難しい。

したがって、VBW を使った重み付け測定を採用する際は、製品委員会(測定対象の波形)ごとにその適用を再検討する必要がある。また、これに変わる重み付け測定法として、CRL 等の研究成果⁵⁾を元に APD(Amplitude Probability Distribution : 振幅確率分布) を使った測定法を我が国から提案⁶⁾し、現在、検討が行われている。

2.3 アンテナ

1-18GHz の妨害波におけるアンテナに関しては、

- ①校正された直線偏波のアンテナを使用すること
- ②その主ローブ(3dB 幅で定義) が供試機器を包含すること
- ③アンテナの最大寸法 D と測定波長 λ 、測定距離 R_m の間には以下の条件を満足すること

$$R_m \geq D^2 / 2 \quad (1)$$

が規定されている¹⁾。この式の導出にあたっては、供試機器からの主要な放射は、点波源からのものであると考えている。代表的なアンテナとしてダブルリッジガイドホーン、角錐ホーン、標準ゲインホーンなどの各種のホーンアンテナがある。基本測定距離 R_m は 3m であるが、周囲条件や測定感度の不足などによりそれ以外の距離で測定し、測定値が距離に反比例するとして換算しても良いとされている。

上記の条件に関し、EMC 測定において最も一般的に利用されているダブルリッジガイドホーンアンテナについて、評価を行った⁷⁾。その結果、主ローブ特性は 15GHz まで 3dB 幅の最小値は 30度であるが、それ以上ではパターンが変わるとともに 3dB 幅も減少することが確認され

た。また、このアンテナを使用したときに、主ローブが包含する供試機器のサイズを計算すると、15GHz までは基本測定距離 3m で最大供試機器サイズは 1.7m、距離 1m で 0.6m となり、大型機器を除けば、実用上問題ないことが分かった。

なお、15GHz 以上を超える周波数については、標準ゲインホーンの方がダブルリッジガイドホーンよりビーム幅が広くなり、測定には有利となる。さらに、基本測定距離は 3m と規定されているが、ダブルリッジガイドホーンの場合は 1-18GHz のすべての周波数にわたり、基本測定距離において(1)式の条件を満足することが確認された。

$$R_m \geq 2D^2 / \lambda \quad (2)$$

ところでアンテナの特性測定は、一般に遠方界条件を満たす距離において行われる。したがって、(1)の距離では、アンテナの利得は遠方界の利得から低下している。このため、(2)の距離の測定において遠方界の利得をそのまま使った場合、最大 2-3dB 程度の誤差を含む可能性があることが分かった。したがって、(1)を満足したとしても供試機器から 1m 程度は離す必要がある。

2.4 測定サイト

1-18GHz での測定サイトは

- ①基準テストサイトは反射のない自由空間オープンサイト
- ②代替テストサイトとして、自由空間条件を満たす任意のサイトが使用可能

ということが定まっているだけで、理想的な自由空間条件からの許容偏差、適合性確認手順等は検討中である。現在の最新ドラフト⁸⁾の概要を以下に示す。

・自由空間条件と許容偏差

理想的な自由空間における正規化サイトアッテネーション AN は下記の式で与えられる。

$$AN [dB] = 20\log(D) - 20\log(F) + 32 \quad (3)$$

ここで、 D : 送受アンテナ間距離[m]、 F : 周波数[MHz]である。

下記のような測定配置において、サイトの正規化サイトアッテネーション(水平、垂直両偏波) を測定し、その値と上記の理論値との差が $\pm 4dB$ 以内の時、このサイトは自由空間条件に適合し

ていると判断する。

・正規化サイトアッテネーションの測定配置

受信アンテナ：妨害波測定に使用するアンテナと同じもの

送信アンテナ：指向性の鋭くない(3dB幅が40度を超える)アンテナ

送受アンテナ間距離：妨害波測定を行う距離(通常3m)

送受アンテナ高さ：両者を同じ高さにして、走査はしない。具体的には、(金属床面から)0.8mが基本。ただし、受信アンテナのビーム幅が供試装置の大きさより狭いため、測定時に受信アンテナを高さ方向に走査する場合は、その間を走査する。例えば、測定距離3mで、受信アンテナを1 - 3m走査する場合は、その間を0.5mおきに測定する。

今後、上記の案について確認していく必要があるが、特に送信アンテナにはどのようなアンテナを使用すべきか、送受アンテナのアンテナ係数をどのように求めるか、送受アンテナの位置を変えて測定する必要はないか等の検討を行い、提案を行っている。また、測定用受信機や測定アンテナの校正の不確かさを評価する必要がある。さらに、床置き装置に対してどのように自由空間条件を実現するのかについても課題となっている。

2.5 今後の課題

1GHz以上の放射妨害波測定に用いられる測定システムについて評価・検討を行った。

まず、スペクトラムアナライザの特性評価を行った結果、CISPRで規定するインパルス帯域幅を満たす機種も存在したが、大きく異なる機種もあるため、今後は機器仕様の中にインパルス帯域幅を明記する必要があると思われる。また、ビデオ帯域幅VBWの設定により測定レベル(ピーク値)が異なるため、再現性を良くするには、VBWも統一することが望ましい。VBWを小さくすることによる重み付け測定では、Logモードの値はLinearモードの値より小さくなり真の平均値とは大きく異なる。VBWによる重み付けについては、その特性の把握が十分でなく、許容値との関連についても不明確である。今後、特性の把握等に務めるとともに、他の方法につい

ても検討する必要がある。

アンテナについては、今後、近傍界でのアンテナ使用法や、較正法についての規格化、標準化が重要である。

サイトについては、理想的な自由空間条件からの許容偏差、適合性確認手順等の課題が残されており、今後の精力的な検討が必要である。

3 GTEMセル

3.1 はじめに

GTEM(giga-hertz transverse electromagnetic)セルはTEM導波管(TEM waveguide)の一種であり、イミュニティ及び放射妨害波試験をマイクロ波周波数帯域においても実行可能となるように設計された装置である。外観は図2の写真のとおりである。TEM導波管の種類としては他にTEMセル、ストリップラインなどが存在する。それらの装置を用いた各試験の試験方法を標準化するために、現在IEC SC77B及びCISPR/Aの合同委員会(JTF)において議論され、国際規格にするために検討が行われている。



図2 GTEMセルの外観

現在(2001年12月)、国際規格文書IEC 61000-4-20の投票用委員会原案(CDV: committee draft for vote)CISPR/A/343/CDV⁹⁾が各国の国内委員会に送付されている。この原案の内容についての賛否を各国が投票し、賛成多数であれば国際規格文書として成立に向け、大きな前進となる。

GTEMセルは図3のような構造を持っている。内部の電界はセプタムと床導体との間にほぼ垂直となる。イミュニティ試験又は放射妨害波の試験において、被試験機器(EUT: Equipment

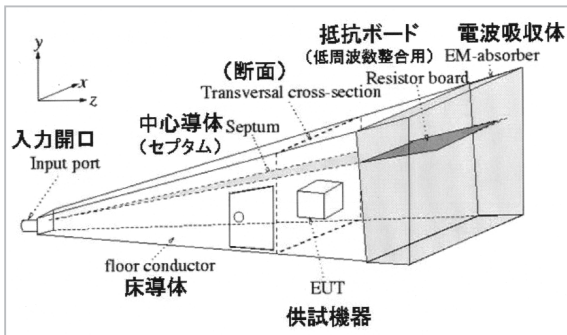


図3 GTEMセルの構造

Under Test)はこれら二つの導体の間に置かれる。背面の電波吸収体及び抵抗ボードは、インピーダンス整合及び背面に入射する電磁波の吸収のために設置されている。

3.2 均一性評価

イミュニティ・放射妨害波各試験において再現性のある試験を行うには、EUTを設置した空間において電界が均一であることが必要である。CDVでは、試験可能な空間の広さとして $0.6W \times 0.33d$ (W :セプタムの幅、 d :床導体とセプタムとの距離)とし、セルにEUTが設置されていない空の状態、GTEMセル垂直断面の上記の範囲内において主電界成分(垂直成分)のばらつきが6dB以内、かつ主成分以外の電界成分(横方向・電磁波の進行方向)が主成分に対して-6dB以下であることを提案している。我々は、その範囲が適切であるかどうかを調べるため、3軸の各電界成分について実験的及び理論的検討¹⁰⁾を行って、評価方法の提案を行い、その一部はCDVに反映されている。

上記領域における各軸の電界分布を測定するためのセンサには、比較的周囲の電界を乱しにくい光電界センサ(測定周波数は1GHzまで)を用いている。その結果を図4に示す。また、FD-TD(Finite-Difference Time-Domain)法による計算結果を図5に示す。同図の白線で囲まれた範囲は図4に示された測定による領域を示している。測定結果と理論計算結果はよく一致し、またこれよりCDVによって提案された試験可能領域が妥当であることが確認されている。

3.3 EUTサイズの影響

イミュニティ試験の際はEUTをGTEMセル内

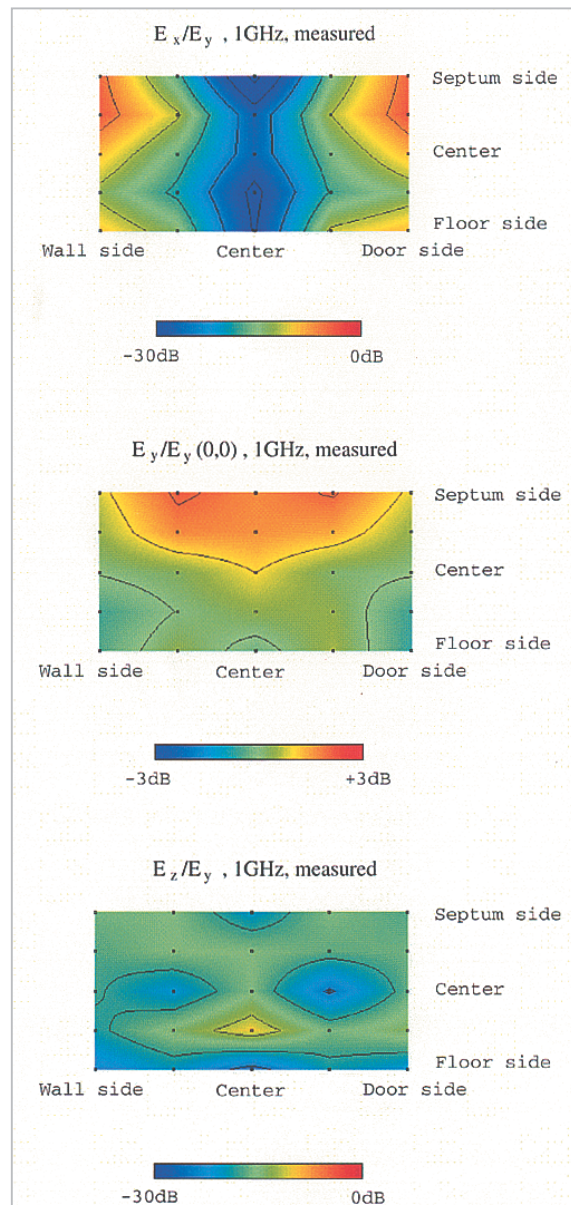


図4 電界分布測定結果(左:横電界成分 E_x 、中央:主電界成分 E_y 、右:進行方向電界成分 E_z)

に入れるが、EUTをセル内に装荷することで、セル内の電界の様子が空のセルで測定した電界分布に対して変化する。一方、従来法として六面電波暗室内を用いたイミュニティ試験がある。従来法とGTEMセルなどのTEM導波管による方法は、いずれもEUTがない状態で同じ電界レベルになるように設定されるが、EUTを置いた場合、EUTによる散乱波の影響が異なるため、双方の試験結果に違いが発生する可能性がある。このため、従来法とGTEMセルによるイミュニティ試験結果がどの程度違うか、また両者の相

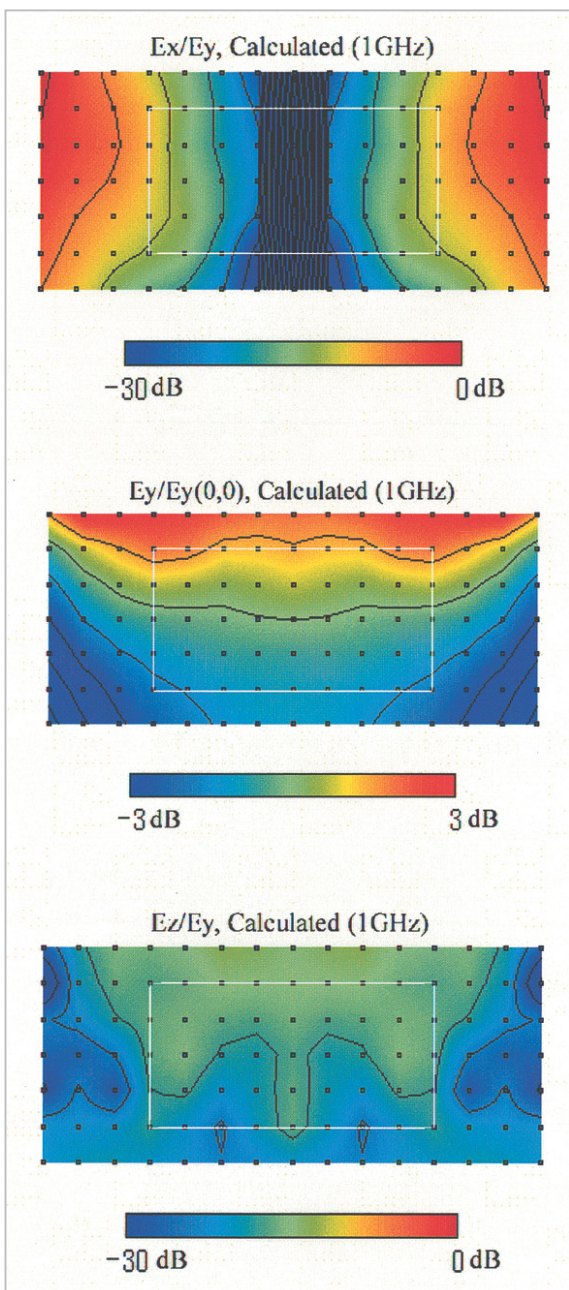


図5 電界分布計算結果(左上:横成分 E_x 、右上:主電界成分 E_y 、下:進行方向成分 E_z)

関の有無を知ることは重要である。このことは、EUTのサイズ及びEUTのセル内設置位置に依存すると考えられるので、これらをパラメータとして理論的検討を行っている。

図6はEUT装荷時の電界値と空の場合の値との比の空間分布を示したもので、左がEUTサイズ($=a$)とセプトム - 床導体間距離($=d$)との比(a/d)が0.1の場合、右が0.3の場合である。ただ

し、EUTは立方体とする。また、上二つが電波暗室、下二つがGTEMセルの場合である。同図より、電界分布の変化の仕方はEUTサイズによって違うことが分ると同時に、試験装置の違いによっても相違があることが分かる。

図7は、EUT全表面の電界の平均値を電波暗室とGTEMセルの場合で周波数レスポンスの形で表現したグラフである。例として $a/d=0.2$ の場合を示す。

同図より、定性的には電波暗室とGTEMセルの周波数特性は同じであるが、GTEMセルの特性には変動が大きいことが分かる。 a/d が大きくなるに従いこの変動幅は大きくなる。変動幅が大きくなるほど、すなわちEUTサイズが大きくなるほど、電波暗室による試験結果とGTEMセルとの結果に違いが生じる可能性が大きくなると考えられる。

これまではEUTの位置をセプトムと床導体の中央に設置していたが、図8はEUTの位置を上下に変化させた場合、EUT全表面の電界の平均値における電波暗室とGTEMセルの差がどのようになるかをプロットしたものである。図中 h_{EUT} はEUT底面と床導体との距離である。このパラメータは委員会原案(CD)により提案されたもので、CDでは $0.05d$ 以上が推奨されている。同図より、 h_{EUT} が $0.05d$ では暗室とGTEMセルとの差が他の位置の場合と比べ大きいことが分かる。また $h_{EUT}=0.85d$ はセプトムとEUT上面の間隔が $0.05d$ の場合であるが、この場合もその差が大きくなっている。ゆえにこの結果より、EUTは各導体より $0.15d$ 以上離れたほうが良いことが分かった。

3.4 今後の課題

GTEMセルによって電界が印加されているEUTについて、表面の電界だけでなく、電流・磁界といった要素についても評価し、従来法との相違・相関について検討する必要がある。また、可能であれば、EUT表面の電界等について測定し、理論計算の妥当性を証明することも重要である。さらに、妨害波測定への応用についても今後検討する必要がある。

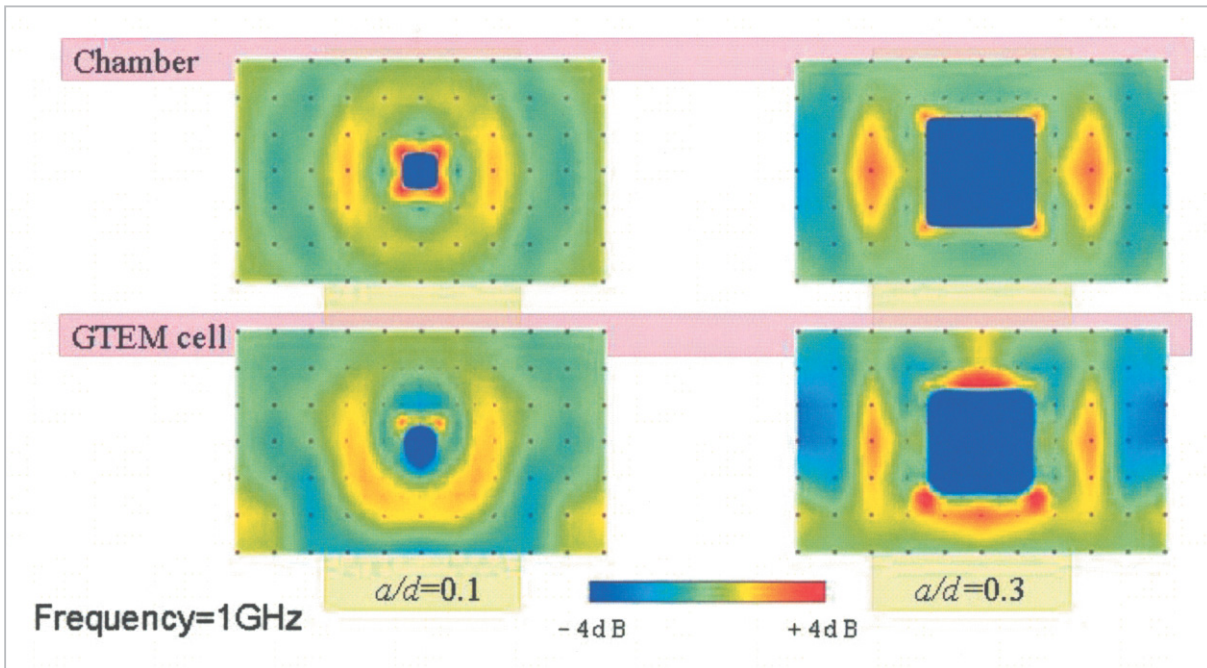


図6 EUT 装荷時の電界値と空の場合の値との比の空間分布

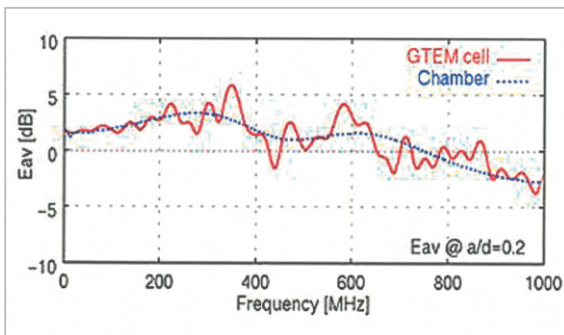


図7 EUT 全表面の電界の平均値の周波数特性

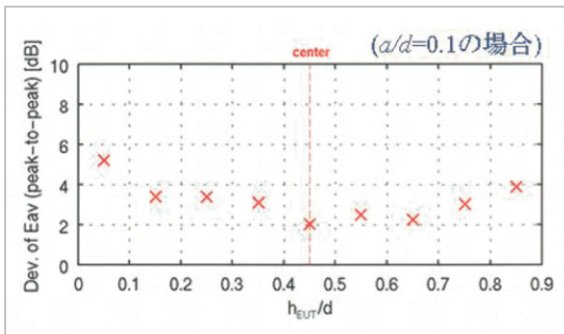


図8 EUT 全表面の電界の平均値の周波数特性

4 反射箱

4.1 はじめに

電子機器の放射妨害波及び放射免疫性 [11] の測定は、一般にオープンテストサイトや電波暗室で行われる。近年、反射箱やストリップ

ライン、TEMセルなどのTEM導波路の使用がIEC/SC77BやCISPR等の国際機関で従来の方法の代替法あるいは独立した方法として検討されている [12]~[15]。また、携帯無線機の普及に見られるようにアンテナ一体無線機が急増している。このような無線機の放射電力の測定に対しても、新たな測定法として反射箱の使用が検討されている [16]。

反射箱は金属箱の内部に金属羽根などで構成される攪拌機を設置した装置 [17] で、攪拌機により内部の境界条件を変化させて統計的に均一な電磁界分布を設定する [18][19][20]。反射箱による放射電力の測定では、供試機器 (EUT) を反射箱の試験領域内に配置し、攪拌機を連続回転により得られた平均受信電力から放射電力を推定する。また、放射免疫性測定では、攪拌機をステップ間隔で回転しながらEUTの性能をモニターする。均一性評価は、試験領域内に電界プローブを配置し得られた分布から統計的に行う [14]。いずれの測定についても、電界分布の不均一性が測定誤差の要因となる。

このため、反射箱の基礎的な特性評価として、反射箱の大きさ、攪拌機の数、攪拌機の大きさ及び設置場所による電界の均一性への影響について、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法を用いた計算機シミュレーションを行った [21]

[22]。また、これら攪拌機の影響及びプローブ測定点の数による均一性評価への影響について、実測により検討を行った[23][24][25]。

4.2 シミュレーションによる評価

反射箱法は、攪拌機を回転させることで境界条件を変え、統計的に様な電磁界を発生させる。放射妨害波やイミュニティ測定に適用する場合、反射箱内に設定した電磁界の空間的な一様性が問題となる。このため、反射箱内の電界分布の一様性の検討をFDTD法を用いて行った[21][22]。

図9に反射箱の解析モデルを示す。FDTD法を適用するため基本(Yee)格子[26]によって解析モデルを構成する。図9に示すように2枚の金属板で攪拌機を構成し、側面に2箇所設置する。また、同図のTx点は送信点、Rx点は受信点を示す。

反射箱の大きさを150×138×168cmの直方体とし、送信点には励振源としてダイポールアンテナを設置する。基本格子の空間離散間隔は1.5cm(= $\Delta x = \Delta y = \Delta z$)、時間離散間隔を25ps(= Δt)にとる。

一般に内部に損失が無い金属キャビティの電磁界問題では、壁面を完全導体と仮定すると数

値計算上の収束が困難となる。このため解析モデルでは、壁面の外周に吸収境界[27]を配置し、壁面に電気定数を与えて反射係数を設定する。壁面の反射係数 $R(\theta)$ は平面波入射の場合の値として示す。

なお、攪拌機の金属板は完全導体とし、媒質中の導電率を0とした。

図10に励振周波数が1及び2GHzの場合について、受信点Rxを通るxz面上における E_y の平均

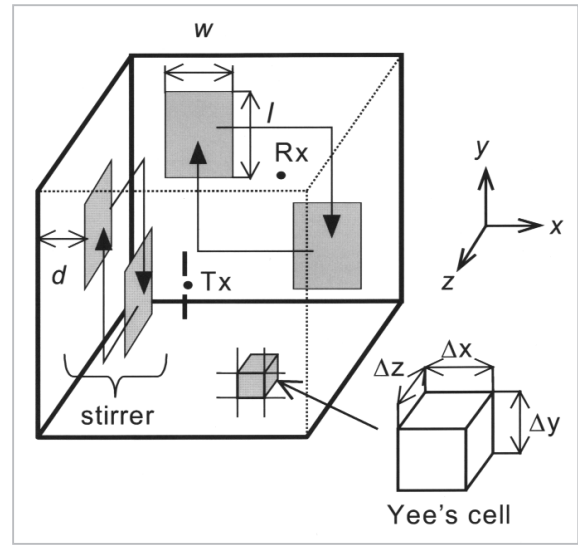


図9 反射箱の解析モデル

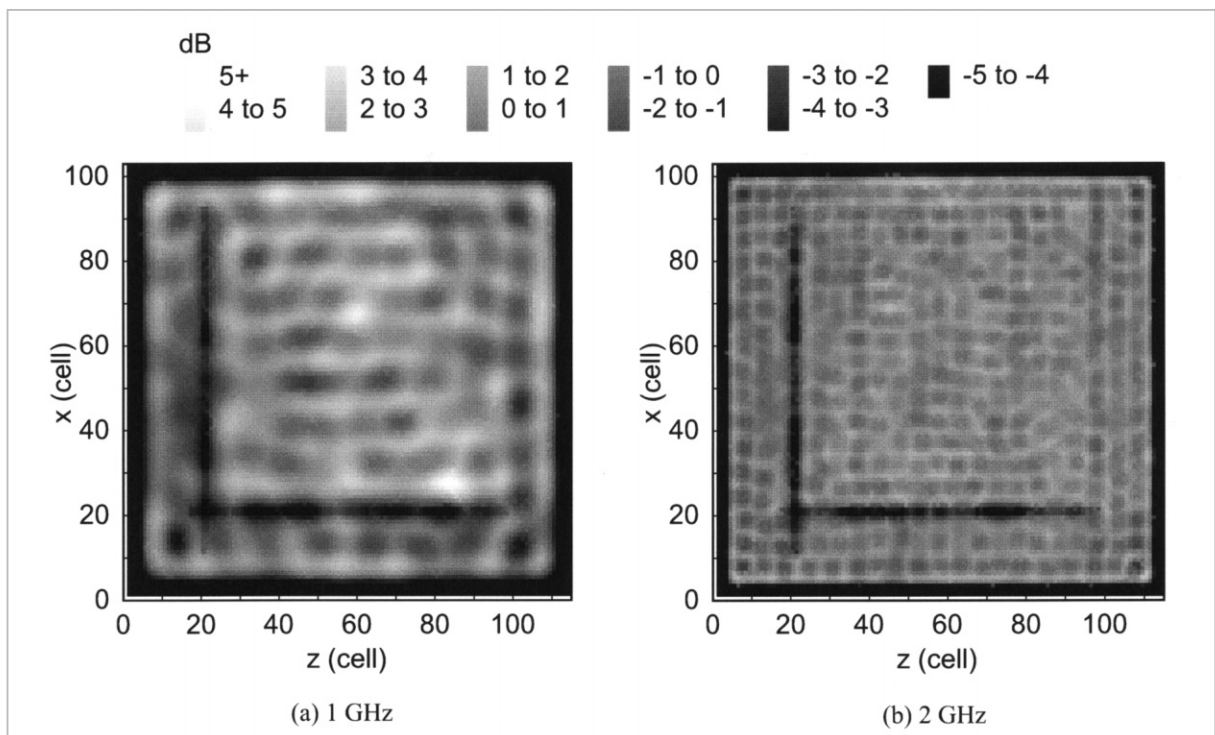


図10 反射箱断面での E_y の平均電界分布($y=67$ 、 $|R(0)|=0.97$)

電界分布の計算結果例を示す。測定周波数の波長に比べて反射箱の大きさが十分でない場合、均一性の悪化が予想できる。図11に電界の x 及び y 方向成分について、Rx点での受信電界強度の中央値に対する累積分布を示す。これより、反射箱内の攪拌機によって生じる電界の瞬時変動はレイリー分布となることが推定できる。

このように、FDTD法を用いて反射箱内部の電磁界を計算することにより、反射箱の電界均一性に対する反射箱の筐体の大きさ及び攪拌機の影響について基礎的な検討を行った。

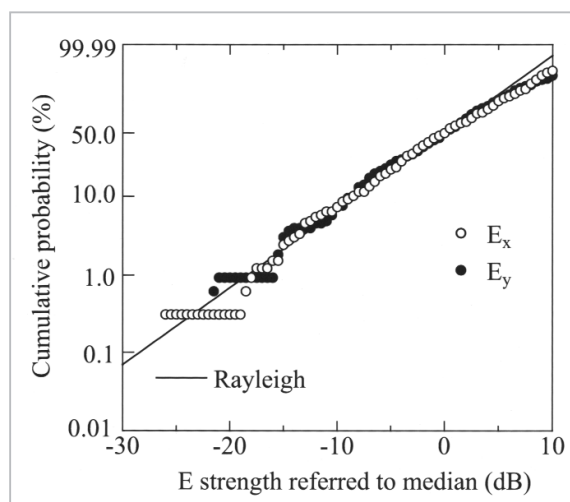


図11 受信点 Rx での受信電界強度の累積分布 (2GHz)

その結果、反射箱内の電界の不均一性を最小にするためには、(1)反射箱の大きさを10波長以上に設定する、(2)攪拌機は2個以上設置し、その回転速度を変える、(3)攪拌機の大きさは3波長以上にとる、(4)攪拌機の位置は壁面から1波長程度離す、ことが必要であると推定できた。

4.3 実測による評価

反射箱を用いた放射イミュニティ測定では、反射箱内の試験領域内に供試機(EUT)を配置し、攪拌機をステップ間隔で回転しながらEUTの性能をモニターする。電界均一性の評価は、試験領域内にプローブを配置して、攪拌機の1周期(最初の配置の状態に戻るまで)の回転中に得られた最大電界強度から統計的に行う[22]~[25]。このとき、反射箱に設置する攪拌機の数及び攪拌機のステップ数の設定が均一性への影響を与え

る[24][22]。また、測定点の数による均一性評価への影響が予想される[13]。反射箱に設置する攪拌機の数及びステップ数による均一性への影響、また、測定点の数による均一性評価への影響について、実測により検討を行った[24][25]。

図12に示す反射箱内の試験領域の電界分布を200MHz~3GHzについて方向成分(E_x 、 E_y 及び E_z)ごとに光素子電界プローブを用いて測定した。測定点は領域内の125(=5×5×5)点である。試験領域内の均一性は、得られたデータの累積分布の75%値(12.5から87.5%)の偏差($E_{75\%}$)から評価した。

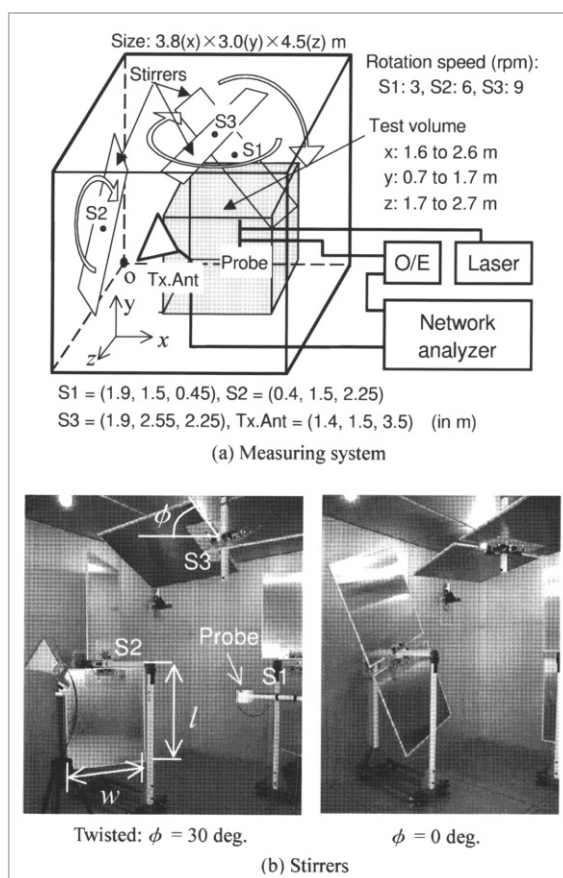


図12 測定系

図13に三つの攪拌機を用いて得られた電界分布の $E_{75\%}$ の偏差を示す。三つの攪拌機を用いることで最良な均一分布が得られたが、二つの場合と比較して均一性に対する効果は大きくない。現行の電波暗室でのイミュニティ試験の均一性の許容値6dBを適用すると、使用した反射箱の使用可能周波数は200MHz以上となる。

図14に攪拌機が元の状態になるまでのステッ

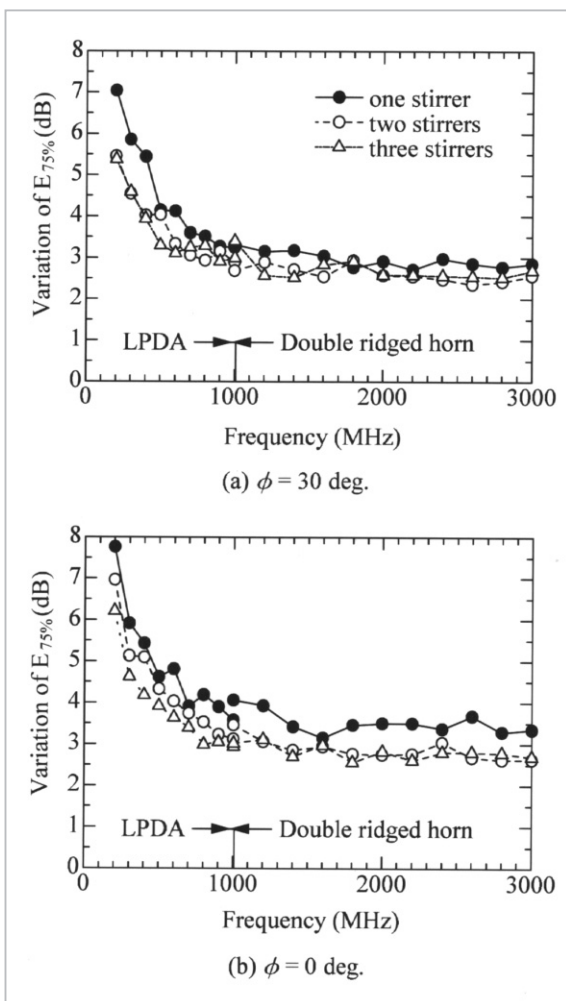


図 13 攪拌機の数による均一性への影響

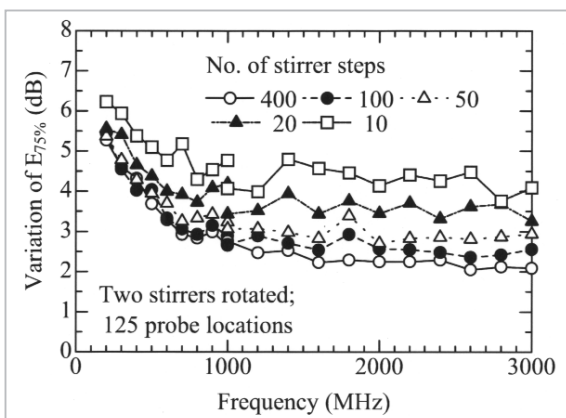


図 14 攪拌機のステップ数による均一性への影響

ブ数を 10 から 400 ステップまで増加したときの $E_{75\%}$ の偏差を示す。攪拌機のステップ数を増加に応じて均一性は改善するが、100 以上ではその効果は少ない。また、10 ステップのような少ない

ステップ数でも、得られた均一性は 400MHz 以上で許容値(6dB)を満足している。

図 15 に測定領域内に 125、45、27 及び 8 測定点で評価した $E_{75\%}$ の偏差を示す。8 箇所の測定点で均一性を評価したとき、125 箇所での評価と比較して ± 1 dB の差異があった。0.5dB 程度で評価するためには、27 箇所以上の測定点が必要となる。

以上の結果から、(1)攪拌機の 2 個の使用で十分な均一分布が得られる、(2)攪拌機のステップ数を 100 以上に増加しても、均一性の改善効果は少ない、(3)少ない測定点の使用は、均一性の評価の不確かさが增大することを実験的に確認した。

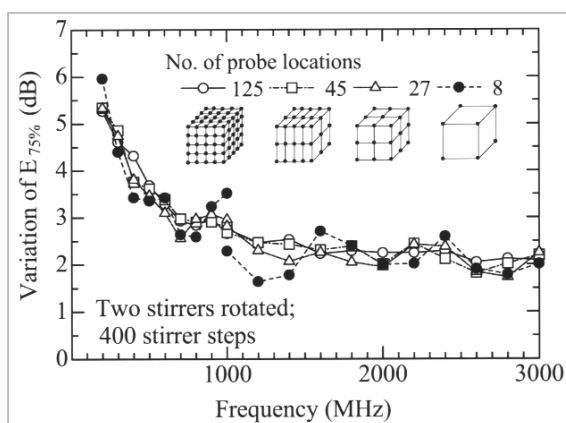


図 15 測定点の数による均一性評価への影響

4.4 今後の課題

反射箱内の電界均一性の評価基準に関して、75%値と標準偏差の関係につき、更に統計的な検討を加える必要がある。また、攪拌機の形状と均一性の関係、実機測定における問題点の検討が必要と思われる。また、妨害波測定への応用についても今後検討する必要がある。

5 むすび

電磁環境グループで行っている機器関連の EMC 研究のうち、1GHz 以上の放射妨害波測定法、GTEM セル及び反射箱の概要、研究成果等について紹介した。今後、残された課題について検討するとともに、電波利用の高周波化、高機能化の中でますます重要かつ複雑となる様々な EMC 課題に適切に対応していきたいと考えている。

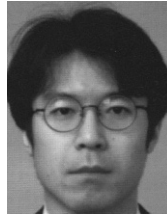
参考文献

- 1 CISPR 16-1, 2nd Ed., 1999.
- 2 CISPR 16-2, Amend. 1, 1999.
- 3 CISPR 11, Amend. 1, 1999.
- 4 菅間秀晃, 山中幸雄, "1 GHz 以上の EMI 測定装置 - スペクトラムアナライザの特性評価 - ", 信学技法, EMCJ99-86, 1999.
- 5 山中幸雄, 篠塚隆, "電子レンジ妨害波による PHS の BER 劣化の測定と推定", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-II, No.11, pp.827-834, Nov. 1996.
- 6 CISPR/A/212/NP, "Amendment to CISPR 16-1 Clause 6.2: Spectrum analyzers for the frequency range 1 GHz to 18 GHz", Nov. 1997.
- 7 菅間秀晃, 山中幸雄, "1 GHz 以上の EMI 測定装置 - 測定アンテナの特性評価 - ", 信学全大, 2000.3.
- 8 CISPR/A/342/CD, "Amendment to CISPR 16-1 Clause 5.12: Test sites for measurement of radio disturbance field strength for the frequency range 1 GHz to 18 GHz; Subclause 5.12.2 Validation of the test site", Nov. 2001.
- 9 CISPR/A/343/CDV, "IEC 61000-4-20: EMC Part 4: Testing and Measurement Techniques: Section 20: Emission and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides", Dec. 2001.
- 10 S. Ishigami, K. Harima, and Y. Yamanaka, "TEM-Mode E-Field Uniformity in a GTEM Cell," IEICE Trans. Commun, Vol. E84-B, No. 9, pp. 2610-2617, Sep. 2001.
- 11 Publication IEC 61000-4-3, "Radiated, Radio-frequency, Electromagnetic Field Immunity Test", 1998.
- 12 IEC 77B/273/CDV, 1999.
- 13 IEC 77B/260/CD, 1999.
- 14 CISPR/A/325/CD, 2001.
- 15 CISPR Publication 16-1, "Reverberation Chamber for Total Radiated Power Measurement", 1996.
- 16 A.Suzuki, T.Sugiyama, and T.Shinozuka, "Measuring of Radiated Power from Radio Equipment using a Reverberating Chamber," Proc. C EEM'96, pp.53-56, Nov.1996.
- 17 M. L. Crawford and G. H. Koepke, "Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/ vulnerability measurements", National Bureau of Standards Technical Note 1092, April 1986.
- 18 D. A. Hill, D. G. Camell, K. H. Cavcey, and G. H. Koepke, "Radiated Emissions and Immunity of Microstrip Transmission Lines Theory and Reverberation Chamber Measurements", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.EMC-38,No.2, pp.165-172, May 1996.
- 19 P. Corona, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "Reverberating Chambers as Sources of Stochastic Electromagnetic Fields", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.EMC-38,No.3, pp.348-356, Aug. 1996.
- 20 M. O. Hatfield, "A calibration procedure for reverberation chambers", Proc. 2000 IEEE International Symposium on EMC, pp.621-626, Washington D.C., USA, Aug. 2000.
- 21 K. Harima, "FDTD Analysis of Electromagnetic Fields in a Reverberation Chamber", IEICE Trans. Commun, Vol.E81-B, No.10, pp.1946-1950, Oct. 1998.
- 22 K. Harima and Y. Yamanaka, "FDTD Analysis of the Effects of Stirrers in a Reverberation Chamber", Proc. 1999 International Symposium on EMC, pp. 260-263, Tokyo, JAPAN, May 1999.
- 23 K. Harima and Y. Yamanaka, "Evaluation of E-field uniformity for immunity testing in a reverberation chamber", Proc. 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.1573-1576, Fukuoka, Japan, Aug. 2000.
- 24 K. Harima and Y. Yamanaka, "Evaluation of E-Field Uniformity for Radiated Immunity Testing in a

- Reverberation Chamber", Proc. 2001 IEEE EMC Symposium, pp. 768-770, Montreal, CANADA, Aug. 2001.
- 25 K. Harima and Y. Yamanaka, "Evaluation of Electric-Field Uniformity in a Reverberation Chamber for Radiated Immunity Testing", IEICE Trans. Commun, Vol. E84-B, No. 9, pp. 2618-2621, Sep. 2001.
- 26 K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE Trans. Antennas and Propag., Vol.AP-14, No.3, pp.302-307, May 1966.
- 27 G. Mur, "Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equation", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.EMC-23, No.4, pp.377-382, Nov. 1981.



やま なか ゆき お
山中幸雄
 無線通信部門 横須賀無線通信研究センター電磁環境グループリーダー
 電磁環境



いし が み しん じ
石上 忍
 無線通信部門 横須賀無線通信研究センター電磁環境グループ主任研究員
 博士(工学)
 電磁環境

はり ま かつ しげ
張間勝茂
 無線通信部門 横須賀無線通信研究センター電磁環境グループ研究員
 電磁環境