

高周波における測定サイトの評価と木製板の斜め反射特性 Evaluation of an EMI Test Site Above 1GHz and Oblique Incidence Reflectivity of Plywood

柏木利幸*

Toshiyuki Kashiwagi

抄 録

当センター既設の EMI 測定用電波暗室の床面に電波吸収体を設置し、1GHz～26.5GHz における測定サイトとしての評価を行った。サイトの減衰量であるノーマライズドサイトアッテネーション(NSA)を測定し、自由空間の理論値との比較を行った結果、ほとんどの周波数で ± 4 dB 以内の偏差に収まった。しかし、18GHz 以上の高周波では、測定に使用したアンテナビーム幅が狭く、適正な評価が行われていない可能性があったため、床面設置吸収体の反射の影響を調べる実験を行った。吸収体の設置個数を変えて実験を行ったところ、 $3\text{m} \times 1.2\text{m}$ 以上の吸収体の設置で床面からの反射はほとんど問題のないレベルであることが確認できた。

また、EMI の測定において木製テーブルのテーブル表面での反射の影響を予測するため、合板を用いて斜め反射特性を測定した。反射特性は、合板の繊維の方向により差があり、同じ周波数で 10dB 以上異なる場合もあった。

1 はじめに

自動化機械の高機能化や高性能化のために、機械装置に無線 LAN や高性能のマイクロプロセッサを組み込む機会が増え、1GHz を越える電磁ノイズの対策は不可欠となってきた。当センターでは、これまで 30MHz～1GHz の周波数範囲の電磁ノイズ測定に対応した設備を保有していたが、新たに 1GHz～26.5GHz までの測定が行える設備を導入した。これに伴い、測定サイトである電波暗室の高周波での評価と、サイト内で測定台として使用している木製台の反射の影響を予測するため木製板の斜め反射特性の測定を行った。

1GHz を超える高周波での測定サイトは、6面が電波吸収体で全く反射の無い空間が理想である。その評価方法は大きく分けて2つの方法がある。一つは CISPR (国際無線障害特別委員会) 等で検討している方法で、サイトの減衰量であるノーマライズドサイトアッテネーション(NSA)を測定し、自由空間の理論値と比較し、その差が ± 4 dB 以内であれば、適正な測定サイトであると判断する方法である¹⁾。もう一つは、送受信アンテナ間の距離を変えて受信電界レベルの変化を調べ、直接波と反射波の干渉により観測される電界の定在波を測定する方法で、電

波法の「試験場所の条件等」では、「1.5m の高さに設置した送受信アンテナにおいて受信アンテナを上下に ± 50 cm 移動させた時の電界強度変化の最大値を ± 1 dB 以下とし、 ± 0.5 dB 以下を目標とする」としている²⁾。いずれの方法でも、反射物がなく反射波が存在しなければ、適正に評価が行われるはずである。

しかし、一般的には測定サイト内にはアンテナマスト、測定台、照明機器、監視カメラなどの反射物があり、電波吸収体も全ての電磁波を吸収するわけではない。

当センター既設の EMI 測定用の電波暗室は、床面が金属で、他の5面にフェライトとカーボンの複合電波吸収体が設置されている。このため、自由空間を実現するためには床面に電波吸収体を設置し、床からの反射波を抑制する必要がある。

そこで、本研究では、このように床面に電波吸収体を設置した本電波暗室が、1GHz～26.5GHz の周波数において適正に電磁波の計測が行えるかどうかを検証するため、サイトアッテネーション測定を行う方法をベースとした実験を行った。特に、18GHz 以上の周波数では、測定に使用したアンテナのビーム幅が狭いため、サイトアッテネーションの評価が適

正に行われていない可能性があったため、床面設置電波吸収体の効果を調べる実験も行った。また、EMIの測定では、使用される木製測定台の高周波での反射の影響が無視できず、この影響を予測するために木製板の斜め反射特性の実験も併せて行った。

2 ノーマライズドサイトアッテネーション

ノーマライズドサイトアッテネーション (NSA) とは、測定サイトが測定場の条件を満足しているかどうかを広帯域アンテナを用いて評価するための方法である。CISPR では、30MHz~1GHz に関して、アンテナの高さや偏波面に応じて、大地面からの反射を考慮した詳細な補正値を設定している。しかしながら、1GHz を越える周波数に関しては、「自由空間条件を満たす任意のサイト」ということが決まっているだけで詳細な規定はない。ただし、CISPR の小委員会では、理論値との偏差が ± 4 dB 以内、測定距離 3 m、指向性の鋭くないアンテナ (3dB 幅が 40° を越えるアンテナ) などの内容が検討されている¹⁾。

サイトアッテネーション A は、次式により求める。

$$A = V_{direct} - V_{site} \quad (1)$$

ここで、 V_{direct} は、送信及び受信 (測定) アンテナをはずしてケーブルを直結した時の読み、 V_{site} は、送信アンテナと受信アンテナを規定の距離 (3m) だけ離して、受信アンテナを上下させた時の最大電圧である。

ノーマライズドサイトアッテネーション A_N は、サイトアッテネーション A より、送信及び受信アンテナのアンテナファクターを減じたもので次式のようになる。

$$A_N = A - AF_t - AF_r = V_{direct} - V_{site} - AF_t - AF_r \quad (2)$$

また、理論値は、

$$A_N = 32 - 20 \log f [\text{MHz}] - 20 \log E_{max} [\text{dB}] \quad (3)$$

より求めることができる³⁾。

ここで、 E_{max} は、受信アンテナの高さを変化させて得た最大の受信電圧で、電波の伝搬経路が、直接波 (距離 R) と反射波 (距離 r) の2つとすると、

$$\langle \text{水平偏波} \rangle E = \left| \frac{e^{-jkR}}{R} - \frac{e^{-jkr}}{r} \right| \quad (k=2 \quad / \quad) \quad (4)$$

$$\langle \text{垂直偏波} \rangle E = \left| \frac{e^{-jkR}}{R} \cos^2 \theta_1 - \frac{e^{-jkr}}{r} \cos^2 \theta_2 \right| \quad (5)$$

(θ_1, θ_2 は、受信アンテナに対する直接波及び反射波の水平方向に関する入射角度) の最大値である³⁾。

自由空間の場合は、電波の伝搬経路は直接波だけと考えると、式(3)は、下記ようになる。

$$A_N = 32 - 20 \log f [\text{MHz}] + 20 \log R [\text{m}] \quad (6)$$

すなわち、式(2)を用いて測定した結果と式(6)の計算値を比較し、偏差が ± 4 dB 以内であれば、測定サ

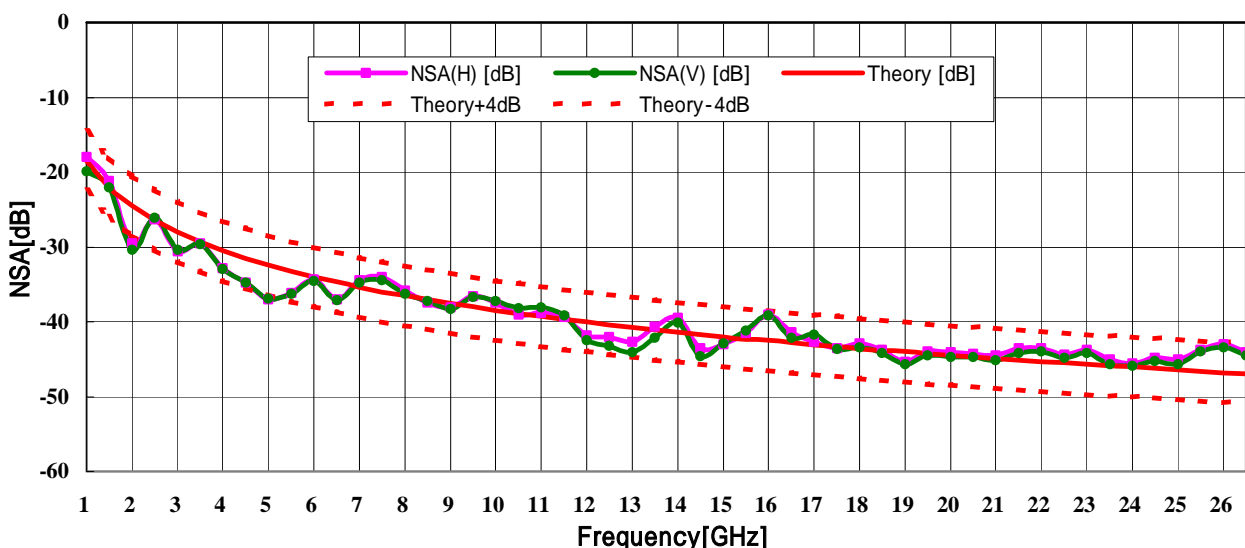


図1 ノーマライズドサイトアッテネーション (送信アンテナ 1m)

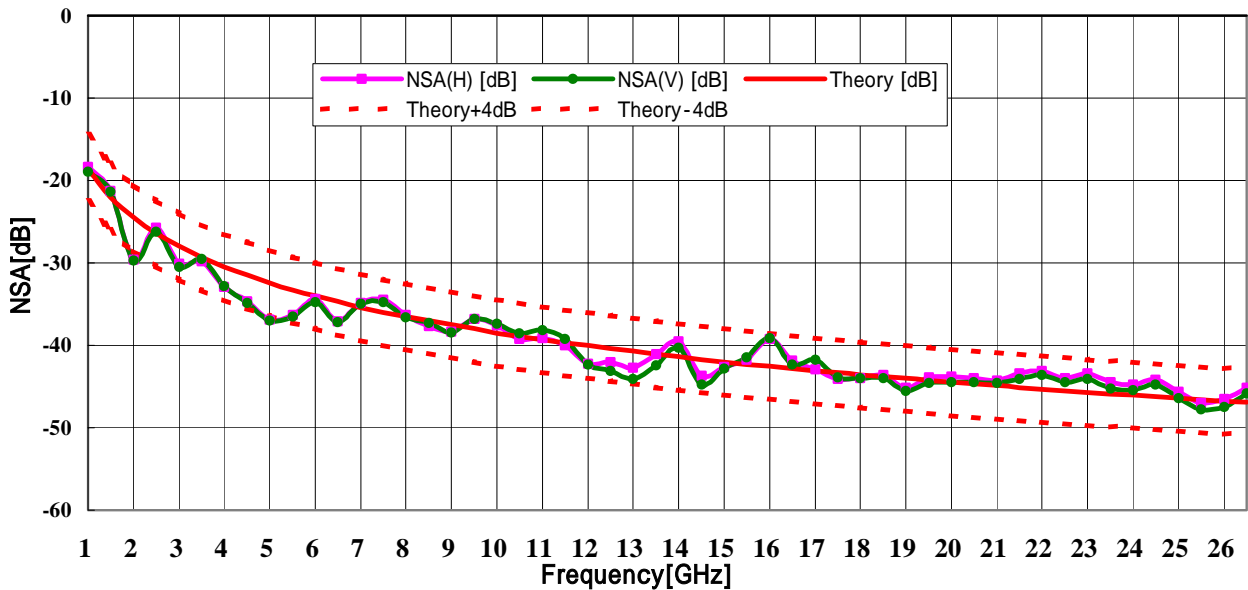


図2 ノーマライズドサイトアッテネーション (送信アンテナ 1.5m)

イトとして適合していると判断できる。

3. NSA測定結果

測定は、床面に 3×4 (1.8m \times 2.4m) の電波吸収体 (EHP-18STD (61 \times 61cm)) を設置し、送信アンテナを 1m 及び 1.5m に設置して、水平および垂直偏波に関して、ノーマライズドサイトアッテネーションを測定した。また、アンテナは、1~18GHz では、ダブルリッジドガイドアンテナを、18GHz ~ 26.5GHz では、ホーンアンテナを使用し、各測定周波数で、アンテナの放射パターンを測定した。

測定したノーマライズドサイトアッテネーションと理論値との比較を図1、図2に示す。これらの結果を見ると、2GHz と 5GHz で、サイトの反射の影響があり、理論値 \pm 4dB からはずれる箇所があるものの他の周波数はほぼ許容範囲に入っていることが分かる。

また、使用したダブルリッジドガイドアンテナとホーンアンテナの水平偏波の放射パターンを図3、図4に示す。図4を見ると使用したホーンアンテナは、アンテナのビーム幅が狭く、正しい評価が行え

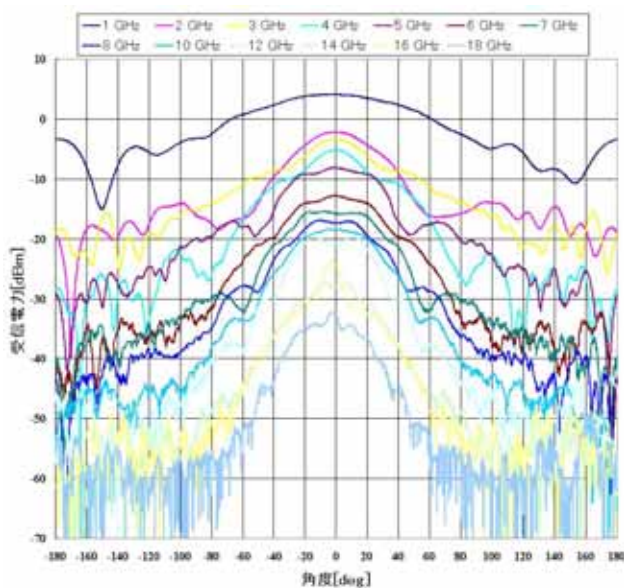


図3 ダブルリッジドガイドアンテナ放射パターン (水平偏波)

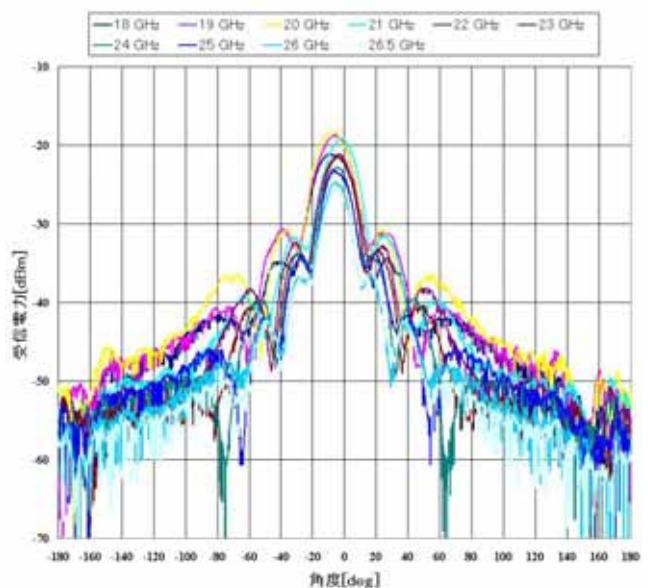


図4 ホーンアンテナ放射パターン (水平偏波)

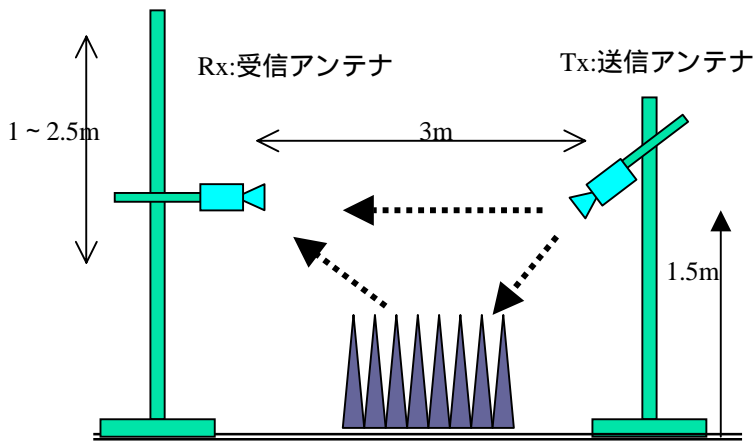


図5 床面吸収体評価方法

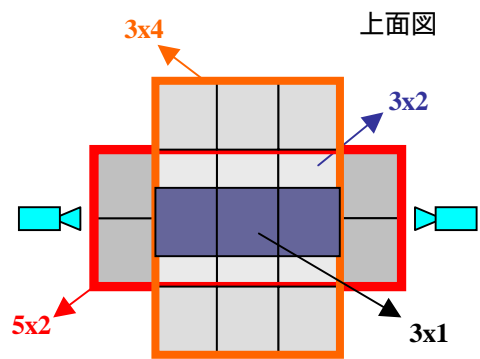


図6 電波吸収体設置方法

ているとは言えない。

そこで、つぎに床面に設置した電波吸収体による反射波の抑制効果を調べる実験を行った。

4. 床面設置吸収体の効果の検討

自由空間を実現するために、床面に設置する電波吸収体の性能や設置面積などの具体的な基準はない。

実験では、吸収体の設置方法を変えて、受信アンテナのハイトパターンを測定して比較した。床面からの反射波があると定在波が発生し、高さ方向には電界強度の大きな変化となって現れる。

床面に設置した電波吸収体は、ETS・LINDGREN社製のEHP-18STDで、61cm角のベースに40cmの高さのピラミッドが16個あるカーボンタイプの広帯域電波吸収体である。垂直入射の反射減衰量は、2-8GHz

で40dB、8GHz以上で50dB以上を保証している。

4・1 評価方法

図5のように、送信用ホーンアンテナを45°傾けて設置し、図6のように吸収体の設置面積を3個、6個、10個、12個と変えながら受信アンテナのハイトパターンと受信電界の最大値を取得する。測定したハイトパターンと最大値を吸収体の設置面積ごとに比較することにより吸収体の効果を調べることができる。図5のように送信アンテナを傾ける理由は、送信アンテナから直接受信アンテナに入る直接波の強度を小さくし反射波とのバランスを保つためである。すなわち、反射波は吸収体などにより減衰するため、直接波の強度を小さくすることで定在波をより観測しやすくしている。図7に使用したアンテナの24GHzでの放射パターンを示す。水平、垂

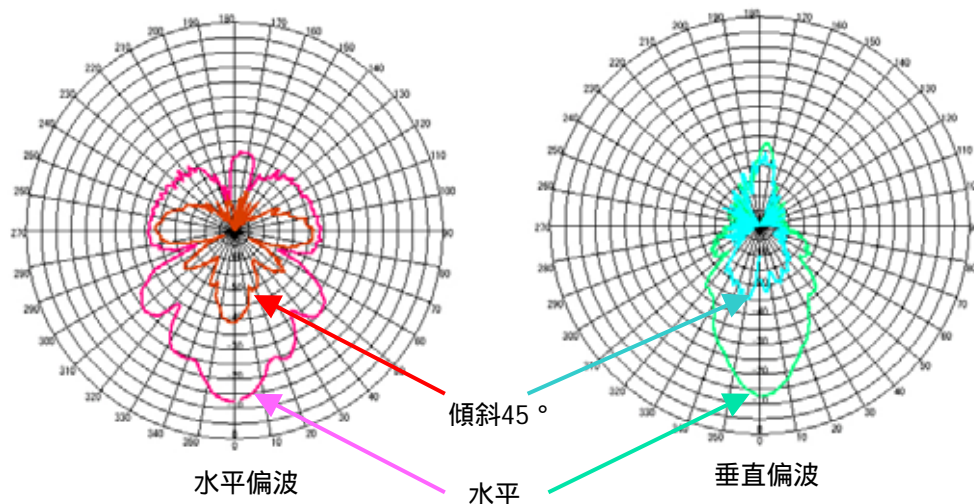


図7 使用アンテナの放射パターン(24GHz)

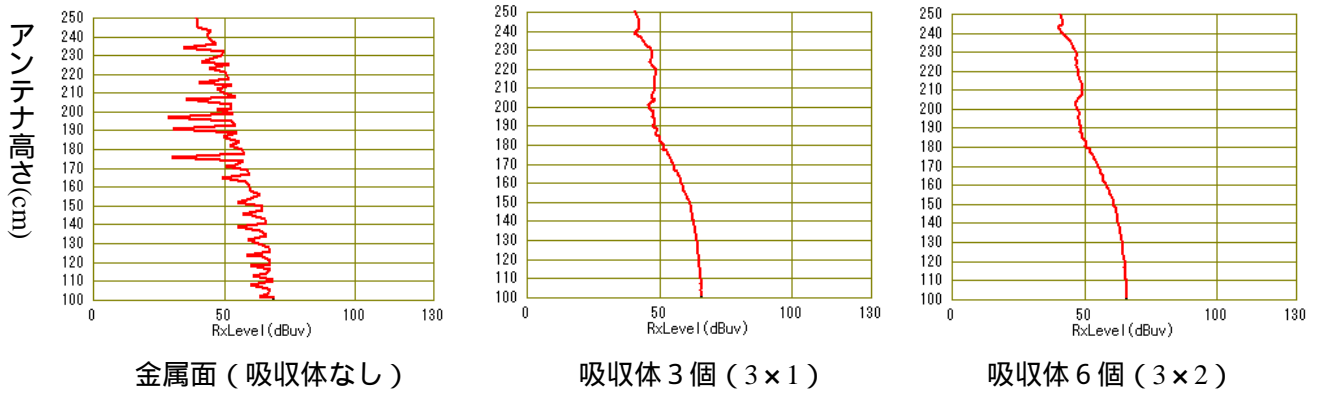


図8 ハイtpタターンの比較

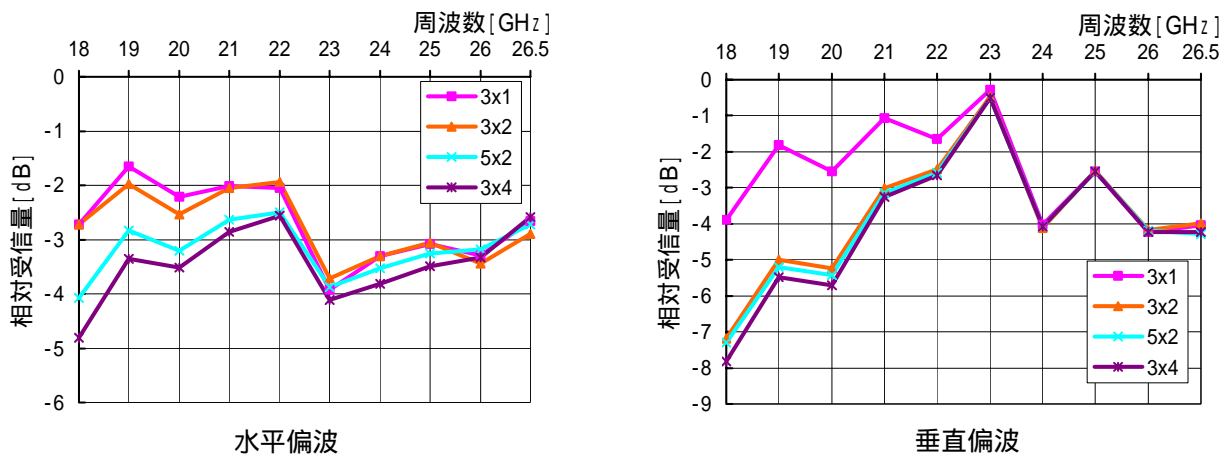


図9 金属面を基準とした時の最大受信電界レベルの比較

直偏波についてアンテナを水平に保った場合と45°傾けた場合についてそれぞれ測定している。この結果をみると、アンテナを傾斜させると水平の場合に比べて30dB程度受信電界レベルが低くなっていることが分かる。

4・2 実験結果

18GHz~26GHzまで1GHzおきに電波吸収体の設置

面積を変えながらハイtpタターンの最大値を取得した。一例として18GHz(水平偏波)でのハイtpタターンの測定結果を図8に示す。この結果を見ると、3個の吸収体を設置するだけで受信レベルの変化幅がかなり小さくなっていることが分かる。他の周波数および偏波面においても同様の結果が得られており18GHz~26.5GHzでは吸収体3個以上で床面から

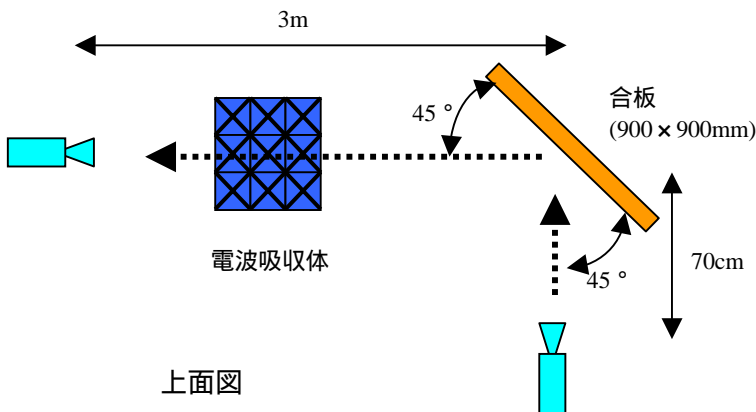


図10 斜め反射特性の測定方法

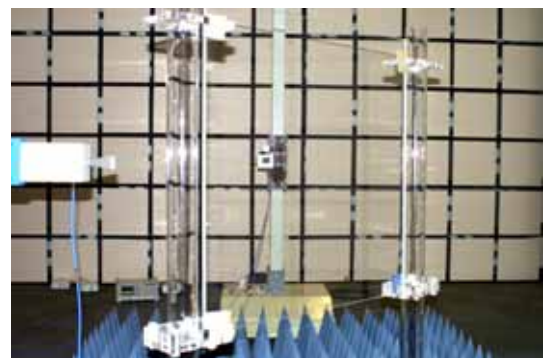


図11 測定風景

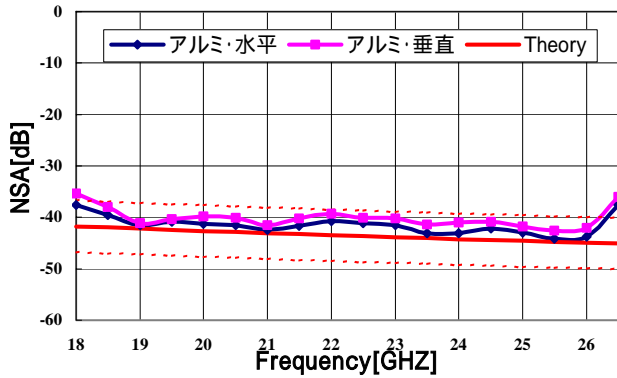


図 12 測定経路のノーマライズドサイトアッテネーション

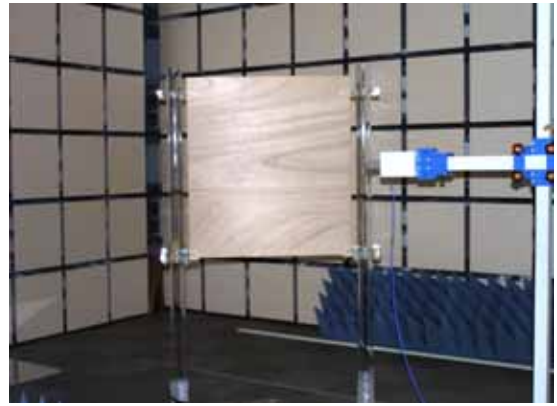


図 13 合板 0°

の反射の影響がほとんどないことが確認できた。

つぎに、各周波数における吸収体の設置個数による受信レベルの最大値の変化を、金属面を基準として表示したグラフを図 9 に示す。設置面積により周波数の低い方で吸収性能にばらつきがあったが、吸収体を 10 個以上設置すると受信レベルにはほとんど影響がないことが分かる。

5. 木製板の斜め反射特性

EMI の測定では、被測定物を木製台の上に設置して計測を行う場合が多い。そのため、被測定物から放射された電磁波が、木製板の表面で反射し、計測結果に影響を与える場合が考えられる。このような場合は被測定機器からの電磁波は、木製板に斜めに入射するため、木製板の斜め反射特性を調べる実験を行った。

5.1 実験方法

送信アンテナと受信アンテナを 1.5m の高さに設

置し、図 10 のように、送信アンテナと受信アンテナに対して 45° の入射及び反射角を持つように合板（ベニヤ板）を設置する。合板の厚さは 15mm で、サイズは 900mm × 900mm、中心高さが床面より 1.5m になるように設置する。送信アンテナより、18GHz ~ 26.5GHz の電磁波を送信し、受信アンテナでその電界強度を測定する。図 11 に測定風景を示す。なお、合板の設置には直径 80mm 厚さ 3mm のアクリルのパイプ 2 本を支柱として用いている。

また、比較のために、3mm 厚のアルミ板、15mm 厚のアクリル板、4mm 厚のパーティクルボードの測定も併せて行った。

合板は、丸太を丸剥きした単板(ベニヤ)を、繊維方向が互いに直交するように、3枚、5枚と奇数枚積層接着した材料で、実験に使用したものは7枚を積層したタイプである。また、パーティクルボード（削片板）は、木材を削り、破碎した小片を板状に成形接着した材料である。

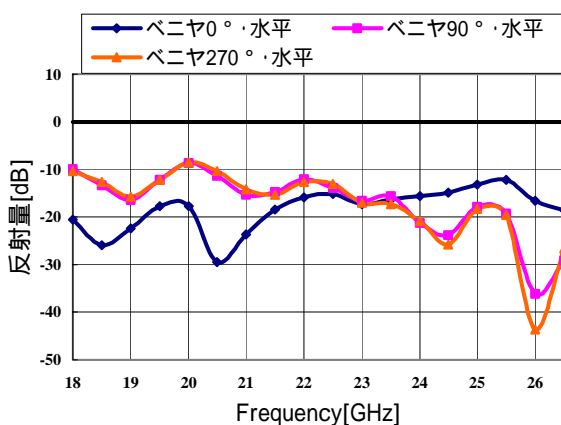


図 14 合板（ベニヤ板）の設置方向による反射量（水平偏波）

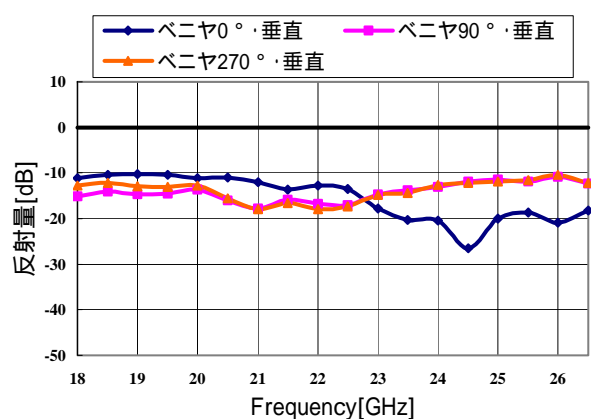


図 15 合板（ベニヤ板）の設置方向による反射量（垂直偏波）

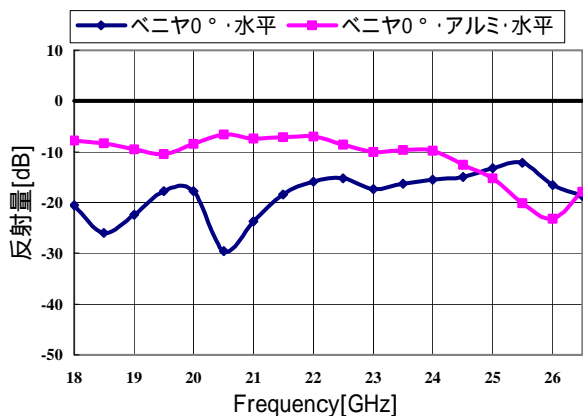


図 16 合板（ベニヤ板）と合板 + アルミ板の反射量（水平偏波）

5・2 実験結果

まず、図 10 の配置で、計測が適正に行えるかどうかを検証するために、反射板としてアルミ板を設置し、送信アンテナから受信アンテナまでの経路が自由空間の条件を満足するかどうかを調べた。すなわち、ノーマライズドサイトアッテネーションを測定し、その結果が自由空間の理論値に適合するかどうか（偏差が ± 4 dB 以内）を調べた。図 12 にその結果を示す。ノーマライズドサイトアッテネーションのグラフでは、減衰量が多いほど（床面などからの反射量が少ないほど）理論値より上にプロットされる。図 12 を見ると、全体的に、反射量は少ないもののほぼ理論値に近い値を示している。また、グラフのパターンも 26.5GHz を除いて前記の電波暗室のノーマライズドサイトアッテネーション測定結果と非常によく似ている。

次に、図 13 のように合板を設置した場合を 0° として、反時計方向に 90° 、 270° 回転させて設置した場合の反射レベルを水平および垂直偏波について測定した。アルミ板の反射量を基準とした測定結果を図 14、図 15 に示す。これらより、合板の繊維の方向によりかなりの反射特性の違いがあることが分かる。比較のために、パーティクルボードの測定も行ったが、設置方向による反射量の違いは合板より少なかった。

また、図 16 には合板の裏に 3mm 厚のアルミ板を設置した時の反射量を合板のみの場合とともに示している。これより、合板は電磁波を吸収していることが分かる。

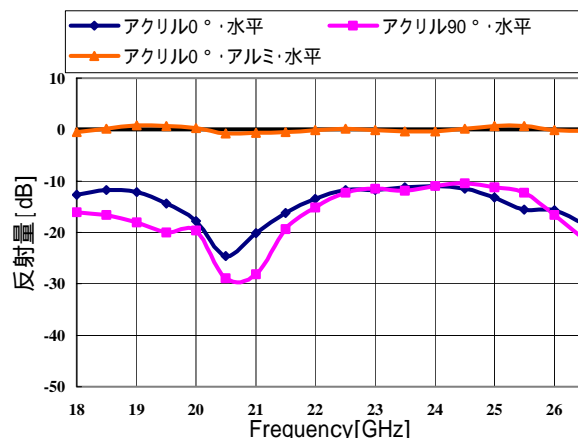


図 17 アクリル板とアクリル板 + アルミ板の反射量（水平偏波）

最後に、加工しやすく樹脂材料の中では低価格であるアクリル板の電波暗室内での使用を検討するために、アクリル板の反射特性についても実験を行った。アクリル板の 0° と 90° の反射量測定結果とアクリル板の裏側にアルミ板を設置し、反射量を測定した結果を図 17 に示す。これより、アクリル板はほとんど電磁波を吸収せずにある特定周波数で電磁波を良く透過していることが分かる。また、アクリル板はベニヤ板のように設置方向による反射特性の変化が少ないが、高周波の反射量そのものはベニヤ板とほとんど変わらず、透過量はベニヤ板よりも多い。

当センターの測定サイトでは被測定物の設置に合板の木製テーブルを使用している。斜め反射特性は、合板の繊維の方向により反射量の差があり、同じ周波数で反射量が 10dB 以上異なることもある。したがって、高周波測定では、被測定物の設置方向（テーブル上の置き方）により測定結果に差がでることも考えられる。

6．まとめ

当センターに既設の EMI 測定用電波暗室の床面に電波吸収体を設置し、1GHz ~ 26.5GHz での測定サイトとしての評価を行った。サイトの減衰量であるノーマライズドサイトアッテネーション (NSA) を測定し自由空間の理論値との比較を行った結果、2GHz と 5GHz で理論値とのずれが大きい箇所があったが他の周波数は ± 4 dB 以内の偏差に収まっていた。しかし、18GHz 以上の高周波では測定に使用したアンテナのビーム幅が狭く、適正な評価が行われ

ていない可能性があったため、床面設置吸収体の反射の影響を調べる実験を行った。吸収体の設置個数を変えて実験を行ったところ、5 × 2 個以上すなわち 3m × 1.2m 以上の吸収体の設置で床面からの反射はほとんど問題のないレベルであることが確認できた。

また、EMI の測定において被測定物の設置に用いる木製テーブルのテーブル表面での反射の影響を予測するため、合板を用いて斜め反射特性を測定した。

反射特性は、合板の繊維方向により差があり、同じ周波数で 10dB 以上異なる場合もあった。このため、高周波での EMI 測定では被試験機器の設置方法により計測誤差が生じる可能性があり、注意して計測を行う必要がある。

謝辞

本研究は、四国経済産業局地域新生コンソーシア

ム研究開発事業「定在波を用いた高分解能アブソリュート型変位計測システムの開発」の一環として高周波計測を行う上で必要な計測環境を実現するために実施いたしました。研究をご支援していただいた関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 不要電波問題対策協議会：「CISPR の現状と動向」, (2001.9)
- 2) 財団法人テレコムエンジニアリングセンター：「10.5GHz を超え 10.55GHz 以下又は 24.05GHz を超え 24.25GHz 以下の周波数の電波を使用する特定小電力無線局（移動体検知センサー）（アンテナ一体型）の無線設備の特性試験方法」, pp1-2, (2001.8)
- 3) 清水康敬他：「電磁波の吸収と遮蔽」日経技術図書（株）, pp450-453, (1989)