

## 論 文

球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量分布による  
小型電波無響室評価法木谷 敦人<sup>†</sup>      桑原 伸夫<sup>†a)</sup>      川畑 将人<sup>††</sup>      雨宮不二雄<sup>†††</sup>Evaluation Method of Small Anechoic Chamber by Site Attenuation Distribution  
Using Spherical Dipole AntennaAtsuto KITANI<sup>†</sup>, Nobuo KUWABARA<sup>†a)</sup>, Masato KAWABATA<sup>††</sup>,  
and Fujio AMEMIYA<sup>†††</sup>

あらまし サイト減衰量は半波長ダイポールアンテナ等を用いて評価されているが、これらのアンテナは半波長程度の大きさが必要であるので小型電波無響室の評価には適していない。本論文では、直径 15 cm の球状ダイポールアンテナを用いた小型電波無響室の評価法について検討している。まず、球状ダイポールアンテナをワイヤグリッドでモデル化してサイト減衰量とアンテナファクタを求めた。その結果、30 MHz から 1000 MHz の範囲で、サイト減衰量の解析値と測定値の偏差は  $\pm 4$  dB 以内、アンテナファクタの解析値と測定値の偏差は  $\pm 2$  dB 以内であることが分かった。次に、電波無響室壁の反射特性を考慮したサイト減衰量をレイトレーシング法により解析した。解析では、パラメータとして、アンテナ特性はワイヤグリッドモデルより求めたアンテナファクタと指向特性を、電波吸収体の反射特性は平板多層近似解析法より求めた反射係数を使用した。その結果、周波数 600 MHz におけるサイト減衰量分布の解析値と測定値の偏差は  $\pm 3$  dB 以内であり、レイトレーシング法が球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量分布の解析に有効であることが分かった。更に、性能が異なる電波吸収体が混在した小型電波無響室に適用した結果、本評価法は特性の良いエリアの評価や電波吸収体の影響評価に有効であることが分かった。

キーワード 球状ダイポールアンテナ, NEC2, サイト減衰量, レイトレーシング法, モーメント法

## 1. ま え が き

近年の電子通信技術の発達により、電子機器等は処理能力が著しく高速化され、また同時に動作電圧の低レベル化が進んでいる。これに伴い、電子機器等に対する電磁妨害波対策がますます重要になってきている。

EMC 評価のための主要設備として電波無響室がある。サイトアッテネーション（以下サイト減衰量という）は電波無響室の重要な評価尺度であり、半波長ダ

イポールアンテナ [1] やバイコニカルアンテナ [2] 等を用いて評価されている [3], [4]。電波無響室には、主に規格試験 [4] に使用される大型電波無響室や、3 m の距離での規格試験や対策のための予備試験に使用される小型電波無響室があるが、特に、小型電波無響室の場合、大型電波無響室に比べて特性の良い空間が限定されるため、サイト減衰量の分布を測定し良い特性の得られる空間を特定することや、電波吸収体の影響が大きい場合、電波吸収体の影響を把握して適切に電波吸収体を配置することが重要になる。

しかし、従来、サイト減衰量評価に使用しているアンテナは半波長程度の大きさ（半波長ダイポールアンテナ）または 1~1.5 m 程度（バイコニカルアンテナ）となるため、小型電波無響室のサイト減衰量分布評価には適していない。また、これらのアンテナは設置高を変化させるとグラウンドプレーンの影響によりアンテナファクタが変化するため、サイト減衰量評価の際に

<sup>†</sup> 九州工業大学工学部電気工学科, 北九州市

Department of Electrical Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu-shi, 804-8550 Japan

<sup>††</sup> 福岡県工業技術センター機械電子研究所, 北九州市

Fukuoka Industrial Technology Center, Kitakyushu-shi, 807-0831 Japan

<sup>†††</sup> NTT アドバンステクノロジー EMC センタ, 武蔵野市

EMC Center, NTT Advanced Technology, Musashino-shi, 180-8550 Japan

a) E-mail: kuwabara.nobuo@buddy.elcs.kyutech.ac.jp

は補正值が必要となる．これらの理由により，小型電波無響室のサイト減衰量分布評価に適した小型のアンテナが必要とされている．

一方，EMC 測定において，アンテナの小型化の際に問題となる同軸ケーブルの影響を排除するアンテナとして発信器を内蔵したアンテナ [5] や同軸ケーブルの代わりに光ファイバを用いたアンテナ [6], [7] が開発されており，その一つとして球状ダイポールアンテナ [6] がある．球状ダイポールアンテナは直径 15 cm 程度と従来 EMC 測定に用いられてきたアンテナと比べ小型であるため，波源探査技術の研究 [8] やキャビネットのシールド特性評価 [9] に用いられている．しかし，球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量解析はアンテナの形状がダイポールアンテナなどより複雑なためこれまで行われていない．

本論文では球状ダイポールアンテナを用いた小型電波無響室のサイト減衰量分布の評価法を検討している．サイト減衰量分布の評価を行うためにはサイト減衰量の理論値が必要であり，本論文ではワイヤグリッドモデルを用いてサイト減衰量を求め測定値と比較している．次に，この解析モデルにより求めたアンテナファクタ等のアンテナパラメータを用いて，レイトレーシング法によりサイト減衰量分布を解析して測定値と比較を行っている．最後に，解析値と測定値により，サイト減衰量特性の良いエリアの評価例や電波吸収体の影響の評価例を示している．

## 2. 球状ダイポールアンテナのサイト減衰量解析

### 2.1 球状ダイポールアンテナの構造

送信用球状ダイポールアンテナ [6] の断面図を図 1 (a) に示す．送信用球状ダイポールアンテナは，電磁波を放射する部分であるアンテナ部，信号線である光ファイバケーブル及び発振器等の電気信号を光信号に変換してアンテナ部に光信号を送出する電気/光 (E/O) 変換部の三つの部分から構成される．アンテナ部のエレメントは，上下二つの半球状のエレメントでダイポールアンテナを構成している．ここで上部エレメントは，傘状の半球であり半球の中心には直径 4 mm の給電用の中心導体棒が接続されている．下部エレメントは光/電気 (O/E) 変換器，電源や電子回路を内蔵する半球である．また，下部エレメントには中心円板の蓋が付けられており電子回路等を包み込むように半球状のシールドケースになっている．この中心導体棒の先

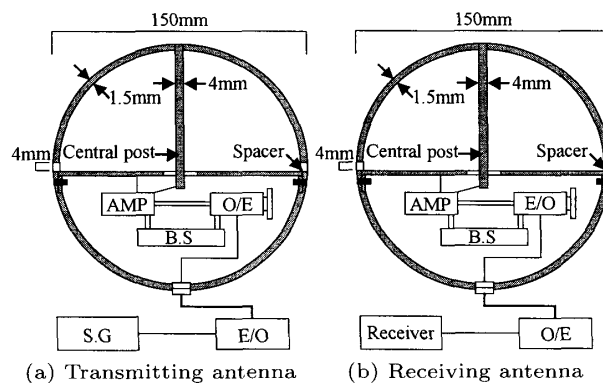


図 1 球状ダイポールアンテナの構造

Fig. 1 Configuration of spherical dipole antenna.

端はこの穴を通過して下部エレメント内に入っている．この中心導体棒と円板間に信号を印加することで電磁波を放射することができる．またスペーサが上部エレメントと下部エレメントの間に挿入されており，二つのエレメントを電氣的に分離した構造となっている．

受信用球状ダイポールアンテナは図 1 (b) に示すように送信アンテナのアンテナエレメント内部の O/E 変換器を E/O 変換器に，また外部の E/O 変換器を O/E 変換器にそれぞれ置き換えた構造となっている．

### 2.2 サイト減衰量解析モデル

サイト減衰量はサイトに置かれた送信アンテナと受信アンテナの間の伝搬損である．解析モデルを図 2 に示す．図中で  $E$  と  $Z_t$  は送信アンテナの信号源で  $W_{t1}, W_{t2}, \dots, W_{tn}$  は送信アンテナを表すワイヤである．また， $Z_r$  と  $I_r$  はそれぞれ受信アンテナの負荷インピーダンスとそれに流れる電流である．そして  $W_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rn}$  は受信アンテナのワイヤを示している．送受信アンテナを図 2 で示すようにワイヤグリッドでモデル化したときの電圧と電流の関係は次式で与えられる．

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{t1r1} + Z_t & \dots & Z_{t1tn} & Z_{t1r1} & \dots & Z_{t1rn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{tnr1} & \dots & Z_{tntn} & Z_{tnr1} & \dots & Z_{tnrn} \\ Z_{r1t1} & \dots & Z_{r1tn} & Z_{r1r1} & \dots & Z_{r1rn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{rnt1} & \dots & Z_{rntn} & Z_{rnr1} & \dots & Z_{rnrn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{t1} \\ \vdots \\ I_{tn} \\ I_{r1} \\ \vdots \\ I_{rn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで， $Z_{ii}$  は自己インピーダンス， $Z_{ij}$  は相互インピーダンスである．

図 2 に示すワイヤグリッドモデルによるサイト減衰量は次の式で与えられる．

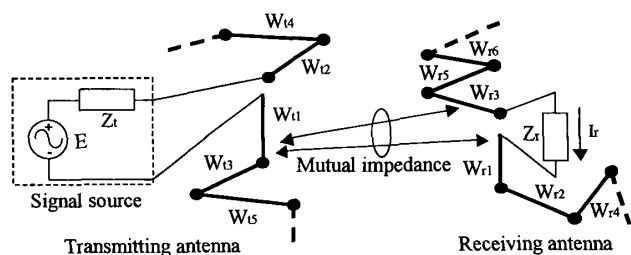


図2 ワイヤグリッドを用いたサイト減衰量の解析モデル  
Fig.2 Analysis model of site attenuation using wire grid.

$$SA_{WG} = \frac{V_{through}}{V_{site}} = \frac{E}{(Z_t + Z_r)I_r} \quad (2)$$

ここで  $V_{through}$  は送信アンテナと受信アンテナのケーブルを直結させたときの受信電圧,  $V_{site}$  はアンテナを設置したときの受信電圧である。モーメント法 [10] を用いて受信アンテナの負荷上を流れる電流  $I_r$  を計算することによりサイト減衰量を求めることができる。したがって、受信アンテナと送信アンテナを空間の離れた位置に置かれたワイヤグリッドで表すことができれば、アンテナ形状によらずサイト減衰量を求めることができる。

### 2.3 球状ダイポールアンテナの解析モデル

球状ダイポールアンテナのワイヤグリッドモデルを図3に示す。このモデルは実際の球状ダイポールアンテナと同様に傘状半球の上部エレメント、下部エレメント及び中心導体棒で構成されている。更に図のように、送信アンテナでは電圧源とインピーダンス  $Z_t$  が中心導体棒とシールドケースの間に挿入されており、受信アンテナではインピーダンス  $Z_r$  が挿入されている。ここで、 $Z_t$ ,  $Z_r$  は、それぞれ、送信アンテナ内部の O/E 変換器の出力インピーダンス、受信アンテナ内部の E/O 変換器の入力インピーダンスである。

図3のモデルを用いて求めた球状ダイポールアンテナの指向性を図4に示す。実線は解析値で、解析にはモーメント法の汎用解析ツールである NEC2 (Numerical Electromagnetic Code) [11] を用いた。その場合、セグメント内の電流は定数、正弦関数、余弦関数の3項で展開される。図3に示すように、半球表面の縦方向を7分割、横方向を36分割、中心導体棒部を90分割とし、ワイヤの半径は1.5 mm とした。これにより、ワイヤの本数は1250、セグメント数は1428、1セグメントの長さの最大と最小はそれぞれ最大周波数1000 MHz の約  $\lambda/10$  及び約  $\lambda/350$  ( $\lambda$ : 波長) となる。

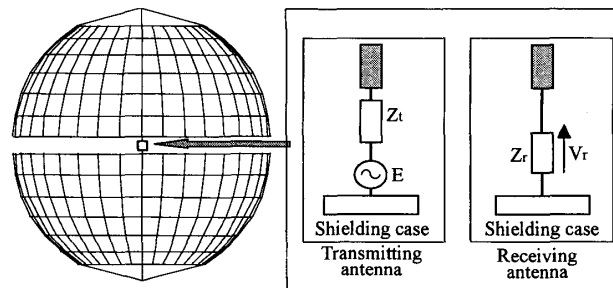


図3 球状ダイポールアンテナのワイヤグリッドモデル  
Fig.3 Wire grid model of spherical dipole antenna.

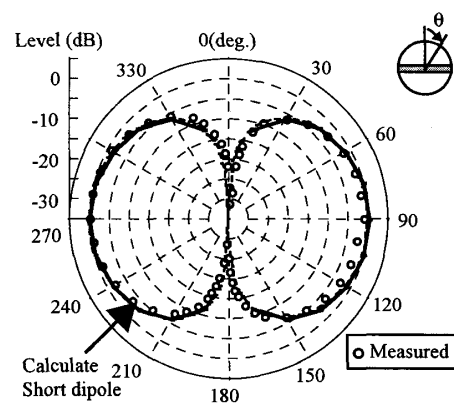


図4 球状ダイポールアンテナの指向性  
Fig.4 Directivity of spherical dipole antenna.

白丸は測定値で電波無響室を用いて3 m の距離で測定したものである。図に示す解析例は300 MHz のものであるが1000 MHz まで大きな違いはない。比較のために微小ダイポールの指向性(破線)を同時に示す。図より、解析値と測定値はよく一致しており、図3に示すモデルで指向特性の解析が可能であることが分かる。また、解析値と微小ダイポールの指向性はよく一致しており、球状ダイポールの指向性は微小ダイポールの指向性で近似できることが分かる。

指向性のほかにアンテナの重要なパラメータとして、利得、入力インピーダンス、電流分布がある。実際の球状ダイポールでは球殻の外側と内側では異なる電流が流れるのに対して、図3のモデルでは、球殻の外側と内側では同じ電流が流れるため、電流分布は模擬できない。そのため、電流分布の影響を受ける入力インピーダンスや利得をワイヤグリッドモデルで求める方法については今後の課題である。球状ダイポールアンテナの解析は文献[6]でモード整合法を用いて行われており、モード整合法を用いればこれらのアンテナパラメータを求めることは可能であると考えられる。なお、図3のモデルを用いて求めた3 m の距離における

放射電界強度は文献 [6] の結果に近い結果が得られていることや、利得についても微小ダイポールの利得に近い値が得られていることから、図 3 に示すワイヤグリッドモデルは電流分布の解析には適用できないが指向性や放射電磁界の解析には有効と考えられる。

## 2.4 球状ダイポールアンテナのサイト減衰量解析法

図 5 にサイト減衰量解析モデルを示す。図 3 に示すワイヤグリッドで表された送信アンテナと受信アンテナが無限大の完全導体面上それぞれ高さ  $H_1$ ,  $H_2$ , 距離  $D$  で配置されている。このモデルを用いてモーメント法により受信アンテナの負荷  $Z_r$  上を流れる電流  $I_r$  を求めると、球状ダイポールアンテナのサイト減衰量  $SA_{WG}$  を求めることができる。式 (2) はワイヤグリッド部分のみのサイト減衰量であり、球状ダイポールに使用されている E/O 変換器と O/E 変換器の影響が含まれていないため、これらの影響を考慮したサイト減衰量の導出方法を以下に示す。

本論文では、E/O 変換器から O/E 変換器への伝搬損はネットワークアナライザによる測定値を使用している。ネットワークアナライザの出力インピーダンスと入力インピーダンスは等しいと仮定すると伝搬損  $L_i (i = t, r)$  は次の式で与えられる。

$$L_i = \frac{E'_i/2}{V_{oi}} = \frac{E'_i}{2Z_0 E_i} \quad (i = t, r) \quad (3)$$

ここで、 $V_{oi}$  は O/E 変換器の出力電圧で、 $i = t$  は送信アンテナの場合を、 $i = r$  は受信アンテナの場合を示している。 $E'_i$  はネットワークアナライザの信号源で、 $E_i$  は O/E 変換器の信号源、 $Z_0$  はネットワークアナライザの入出力インピーダンスである。ここで、受信アンテナの E/O 変換器入力端子電圧に着目すれば

$$\frac{Z_r}{Z_r + Z_0} E'_i = I_r Z_r \quad (4)$$

の関係が成り立つ。また、図 2 より  $E_t = E$  であるので、サイト減衰量は

$$\begin{aligned} SA_{sp} &= \frac{V_{through}}{V_{site}} \\ &= \frac{E'_i/2}{V_{or}} \left( \frac{V_{or}}{(Z_0 + Z_r)/2 I_r} \right) \\ &\quad \cdot \left( \frac{I_r}{SA_{WG} (Z_t + Z_r)} E \right) \left( \frac{E}{Z_0 L_t / (Z_t + Z_0)} \right) \\ &= \frac{2L_r (Z_t + Z_r) Z_0 L_t}{(Z_r + Z_0)(Z_t + Z_0)} SA_{WG} \quad (5) \end{aligned}$$

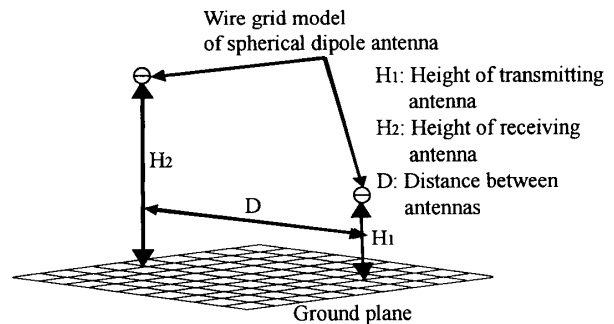


図 5 球状ダイポールアンテナのサイト減衰量解析モデル  
Fig. 5 Analysis model of site attenuation for spherical dipole antenna.

となる。ここで、2 番目の括弧の項は受信アンテナの E/O-O/E 変換器の伝搬損を、3 番目の項はワイヤグリッドでモデルのサイト減衰量を 4 番目の項は送信アンテナの E/O-O/E 変換器伝搬損を表している。つまり、図 2 に示す解析モデルで求めたサイト減衰量に E/O 変換器と O/E 変換器の影響分を掛けたものが球状ダイポールのサイト減衰量となる。なお、本論文で使用した球状ダイポールアンテナの E/O 変換器と O/E 変換器の伝送損は 30 MHz から 1000 MHz の平均がそれぞれ -20 dB 及び -10 dB であり、その変動は 6 dB 以内である。

## 2.5 解析及び測定結果

図 2, 図 3, 図 5 に示す解析モデルの妥当性を評価するため、球状ダイポールアンテナのサイト減衰量を求め測定値と比較を行った。解析では図 1 に示す球状ダイポールアンテナ内の O/E 変換器の出力インピーダンス及び E/O 変換器の入力インピーダンスは両者とも 50 Ω とした。

球状ダイポールアンテナのサイト減衰量測定は大型電波無響室（長さ 29 m, 幅 15 m, 高さ 9 m）で行った。この電波無響室のダイポールアンテナを使用したサイト減衰量は、3 m の距離では、規格値 [4] の  $\pm 0.5$  dB 以内であり、サイト減衰量評価に十分な性能をもっている。測定周波数は 30~1000 MHz で、送信アンテナを高さ 3 m の位置に置き、アンテナ間の水平距離を 3 m とし、受信アンテナを高さ 1~4 m まで 10 cm おきに変えネットワークアナライザを用いてアンテナ間の伝搬損を測定して最小伝搬損よりサイト減衰量を式 (2) の定義に従って求めた。なお、測定では図 1 に示す寸法の球状ダイポールアンテナを使用し、O/E 変換器の出力インピーダンス及び E/O 変換器の入力インピーダンスを 50 Ω とするため、O/E 変換器と送信アンテナ端子及び E/O 変換器と受信アンテナ端子の間

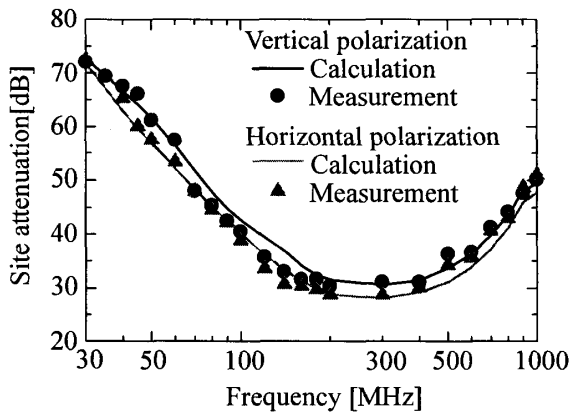


図 6 球状ダイポールアンテナのサイト減衰量

Fig. 6 Site attenuation characteristics of spherical dipole antenna.

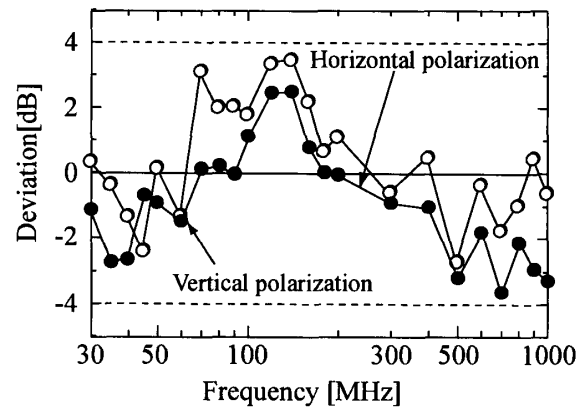


図 7 サイト減衰量の測定値と解析値との偏差

Fig. 7 Deviation between calculation and measured value of site attenuation.

にそれぞれ 6 dB 及び 10 dB の減衰器を挿入した。

サイト減衰量の解析及び測定結果を図 6 に示す。図より今回使用した球状ダイポールアンテナのサイト減衰量は 30 MHz から 1000 MHz で 70 dB から 30 dB であり、この値はダイポールアンテナ (3 m の距離で 40~10 dB) [12] に比べると大きな値である。しかし、ダイポールアンテナの場合も 10 dB 程度の減衰器を受信及び送信アンテナに挿入することを考慮した場合 10 dB 程度大きな値と考えることができ、この値で実用上大きな問題は生じないと考えられる。また、水平偏波、垂直偏波とも測定値と解析値はよく一致している。

図 7 に測定値と解析値の偏差を示す。同図より、検討した周波数 30~1000 MHz において測定値と解析値の偏差は水平偏波では  $\pm 3$  dB 以内、垂直偏波では 30~500 MHz では  $\pm 3$  dB 以内、500~1000 MHz では  $\pm 4$  dB 以内となっている。また、本論文に示す解析方法を半波長ダイポールアンテナに適用した場合、規格値との偏差が  $\pm 2$  dB 以内である。これらの結果より、更に改善の余地はあるが、本論文で提案している解析法は球状ダイポールアンテナのサイト減衰量解析に有効であるといえる。

## 2.6 アンテナファクタ

アンテナファクタは球状ダイポールアンテナを電波無響室評価に使用する場合、重要なパラメータであり、サイト減衰量の解析結果より求めることができる。ある地上高におけるアンテナファクタは改良標準サイト法 [13] を用いて求めることができる。送受信とも同じアンテナを使用した場合、サイト減衰量とアンテナファクタの関係は

$$AF_{WG} = (SA_i - NSA_i)/2 \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

と表すことができる。式 (6) で、 $SA_i$  は送信アンテナと受信アンテナを同じ高さにして距離を変化させ、送受信アンテナが十分離れかつ受信電界が最大になった距離でのサイト減衰量、 $NSA_i$  はその距離での正規化サイト減衰量である。また、 $AF_{WG}$  は図 2 に示すワイヤグリッドモデルのアンテナファクタである。つまり、球状ダイポールの場合 E/O、O/E 変換器の影響を含まない値である。

通常、アンテナファクタは自由空間の値が使用されるので、両者を比較すれば地上高の影響を評価できる。自由空間におけるアンテナファクタとの偏差の解析結果を図 8 に示す。地上高 1 m 及び 3 m におけるアンテナファクタの解析では、アンテナ高 1 m 及びアンテナ高 3 m のサイト減衰量  $SA_i$  は図 5 に示す解析モデルを用いて伝搬損が最も小さくなるアンテナ間距離で求め、正規化サイト減衰量  $NSA_i$  はその距離における値を理論式 [12] より求めた。また、自由空間でのアンテナファクタの解析においては、自由空間における正規化サイト減衰量は理論式 [12] より求め、自由空間でのサイト減衰量は図 5 においてグランドプレーンがない解析モデルより求めた。なお、自由空間のアンテナファクタ解析は十分離れたアンテナ間距離 (20 m) で行った。

図より、70 MHz 以下では高さ 1 m、3 m でアンテナファクタに差があり、大地の影響をわずかではあるが受けていることが分かる。しかし、アンテナファクタの偏差は最大でも 0.25 dB 以内であり、地上高 1 m に設置した半波長ダイポールの偏差に比べて十分小さい値である。図 7 に示すように、サイト減衰量の偏差

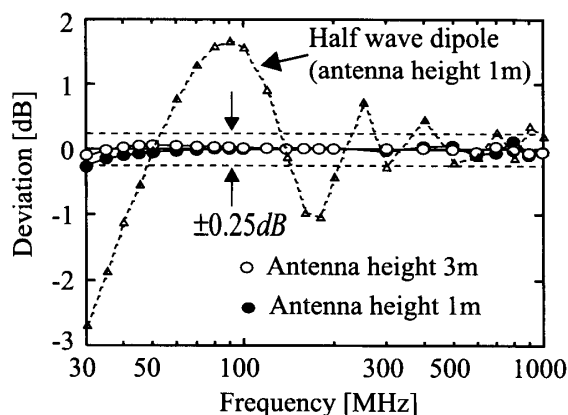


図 8 球状ダイポールアンテナのアンテナファクタの地上高の影響

Fig. 8 Influence of antenna height for antenna factor of spherical dipole antenna.

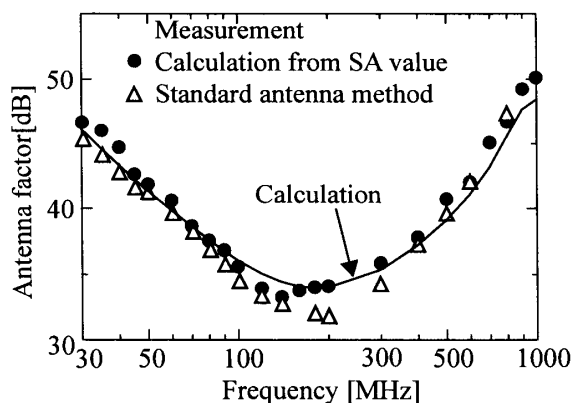


図 9 球状ダイポールアンテナのアンテナファクタ

Fig. 9 Antenna factor of spherical dipole antenna.

が  $\pm 4$  dB であることから、現在の解析精度では考慮する必要はないと考えられる。

アンテナファクタの解析結果と測定結果を図 9 に示す。解析値はアンテナ間距離 3 m、送信アンテナ高 3 m、水平偏波における値である。測定値のうち黒丸は大型電波暗室を使用して解析と同じ条件で測定した値である。正規化サイト減衰量の値は規格値 [4] を用いている。白三角は標準アンテナ法を用いて測定した結果を示しており、140 MHz 以下は電極間距離 35 cm の TEM セルを 160 MHz から 1000 MHz までは半波長ダイポールを使用した。測定は 2 回行いその平均値を用いた。なお、2 回の測定偏差が 1 dB 以上の結果は図より除いている。図で実線は解析値で二つの方法による測定値とよく一致していることが分かる。図に示すようにアンテナファクタは 32~47 dB であり、これは半波長ダイポールアンテナ (27~-4 dB) に比べると 20 dB 程度大きな値である。

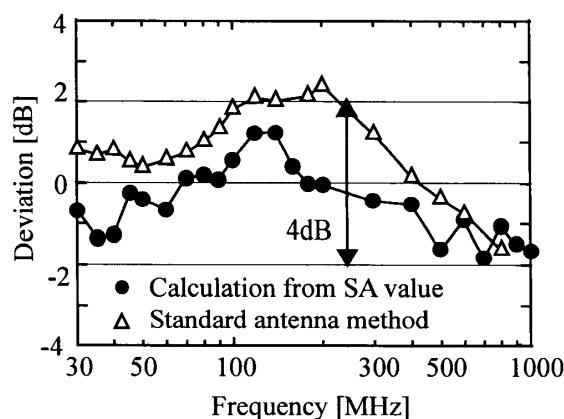


図 10 アンテナファクタの測定値と解析値との偏差

Fig. 10 Deviation between measured and calculated value of antenna factor.

図 10 に測定値と解析値の偏差を示す。図に示すように、サイト減衰量測定値より求めたアンテナファクタとの偏差は  $\pm 2$  dB 以内であることが分かる。また、標準アンテナ法で求めた測定値との偏差も 120~200 MHz でわずかに 2 dB を超えているがおおむね  $\pm 2$  dB に入っていることも分かる。図 8 に示すように、球状ダイポールのアンテナファクタは高さによらずほぼ一定であるので、この値を自由空間におけるアンテナファクタとして使用できる。

### 3. レイトレーシング法を用いた電波無響室のサイト減衰量分布解析

電波無響室のサイト減衰量分布を、前章で使用したモーメント法で行う場合、壁面も含めてワイヤグリッドでモデル化する必要があるが、電波吸収体のワイヤグリッドによるモデル化手法が明確になっていないため困難である。そこで、本論文では、100 MHz 以上の周波数帯域の電波無響室解析に有効なレイトレーシング法 [14] を用いて、球状ダイポールアンテナを送受信アンテナとしたときの、壁面を考慮した電波無響室のサイト減衰量分布解析法を検討した。

#### 3.1 球状ダイポールアンテナのモデル化

レイトレーシング法を用いたサイト減衰量解析の場合、球状ダイポールアンテナのワイヤグリッドモデルは使用できないので、このアンテナをアンテナファクタ、指向性パターンでモデル化する。アンテナファクタは 2.6 で求めた値を指向性は図 3 に示す解析モデルを用いて自由空間中で解析した結果を使用した。

#### 3.2 電波吸収体のモデル化

電波無響室の壁にはフェライトタイルやピラミッド

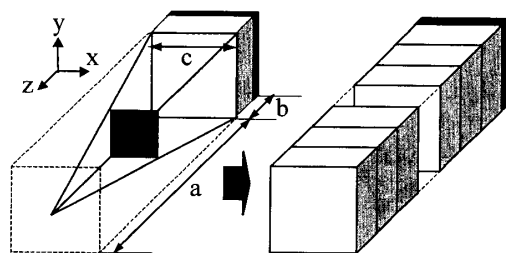


図 11 電波吸収体の解析モデル  
Fig. 11 Analysis model of radio wave absorber.

型電波吸収体が取り付けられている。電波吸収体の構造と解析モデルを図 11 に示す。本論文では、電波吸収体のモデル化に平板多層近似解析法[15]を用いた。本方法は、図に示すように電波吸収体を十分に薄い層に分割し、各層内の材料定数（誘電率，透磁率）を平均化して均一な等価材料定数をもつ平板とし、この多層平板で構成される電波吸収体モデルに伝送線路理論を適用して表面インピーダンスを求めるものである。本論文では、この表面インピーダンスを用いて任意の角度で電波吸収体に入射する電磁波の反射減衰量を求めてレイトレーシング法に適用している。実際には表面インピーダンスは入射角度により変化するが、本論文では一次近似としてこの方法を用いている。

図 12 に反射減衰量の解析値と測定値を示す。測定値は 2 種類の電波吸収体について TEM セル法を用いて垂直入射の条件で測定したものである[14]。この結果より、解析値は 100 MHz から 600 MHz において電波吸収体の反射減衰量の測定値をよくとらえており、測定値との偏差が 5 dB 以内であることが分かる。600 MHz 以上では偏差が 5 dB を超える場合もあるが、測定値，解析値とも反射減衰量が 20 dB 以上となることからサイト減衰量への影響は小さいと推測される。よって、図 11 に示す電波吸収体モデルは適用可能であると考えられる。

### 3.3 サイト減衰量分布の解析及び測定結果

前節で、球状ダイポールを用いた電波無響室のサイト減衰量分布解析に使用するレイトレーシング法の解析モデルについて述べたが、解析モデルの妥当性、特に斜入射時の電波吸収体モデルの妥当性について検討を行う必要がある。そこで、球状ダイポールアンテナを用いた小型電波無響室におけるサイト減衰量の分布を測定し、レイトレーシング法により求めた解析値との比較を行った。また、電波吸収体の影響について検討を行うため、アンテナ高さを変えたときのサイト減衰量分布を測定し、半無限空間におけるサイト減衰量理

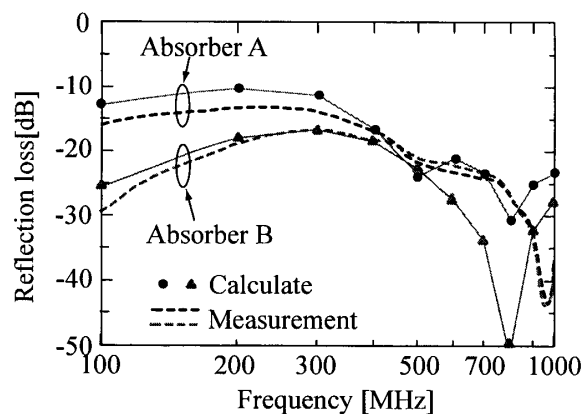


図 12 反射減衰量の解析結果と測定結果の比較  
Fig. 12 Comparison between measured and calculate value of reflection loss.

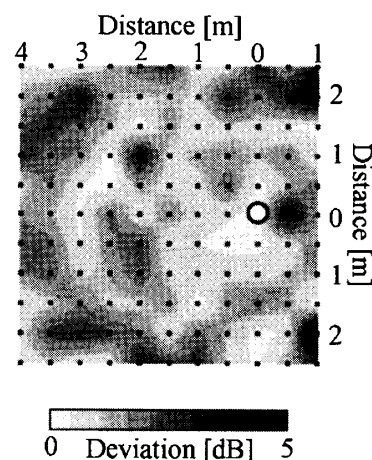


図 13 サイト減衰量分布解析値と測定値との偏差（周波数：600 MHz，アンテナ高：1 m）

Fig. 13 Deviation between measured and calculated site attenuation distribution. (Frequency: 600 MHz, Antenna height: 1 m)

論値と比較を行った。

サイト減衰量分布の測定は小型電波無響室（長さ 6 m，幅 5.2 m，高さ 5 m）で行った。測定では送受信のアンテナの高さと送信アンテナの位置を固定し受信アンテナの位置を縦横 50 cm 間隔で変化させて各点でのサイト減衰量を測定した。同様に、解析においても、送信アンテナを固定し、受信アンテナを 50 cm 間隔で変化させて計算した。

一例として、アンテナ高を 1 m，周波数を 600 MHz としたときの垂直偏波における測定値とレイトレーシング法の解析値との偏差を図 13 に示す。図中の白い丸印は送信アンテナの位置，縦横軸は送信アンテナからの距離，黒い丸印が測定及び解析を行った位置，色の濃淡は測定値と解析値との偏差の絶対値を示しており，測定位置間のスプライン補間を施した値である。

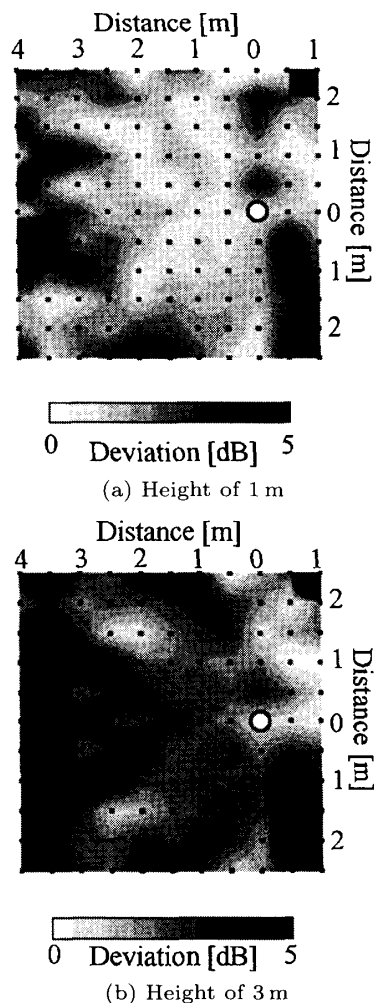


図 14 測定値と半無限空間でのサイト減衰量理論値との偏差

Fig. 14 Deviation between measured and theoretical site attenuation distribution.

図より、送信アンテナから左側の有効エリアでは測定値とレイトラシング法による解析値の偏差は 3 dB 以内となり、レイトラシング法による球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量分布の解析が有効であることが分かる。

また、地上高 1 m 及び 3 m におけるサイト減衰量分布の測定結果をそれぞれ図 14 (a)、図 14 (b) に示す。色の濃淡は測定値と半無限空間におけるサイト減衰量理論値との偏差の絶対値を示している。なお、周波数は 300 MHz、偏波は垂直偏波である。測定に使用した電波無響室は床から高さ 1.6 m までの範囲に 400 MHz 以下の吸収特性に優れた電波吸収体（図 12 の吸収体 B）が配置され、それ以外の範囲では従来用いられてきた電波吸収体（図 12 の吸収体 A）が配置されている。図 14 に示すように地上高 3 m（吸収体 A が配置）の方が地上高 1 m（吸収体 B が配置）に比べて偏差は

大きくなっており、電波吸収体の影響が評価されていることが分かる。また、地上高 3 m の場合においても、狭い範囲であるが偏差が小さい部分があり、サイト減衰量分布を評価することにより、特性の良い場所を特定できることが分かる。

これらの結果より、球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量分布の評価は小型電波無響室の有効利用や性能改善のための評価法として有効であることが分かる。

#### 4. む す び

サイト減衰量は電波無響室の評価尺度として広く使用されているが、従来評価に使用されている半波長ダイポール等のアンテナは無響室のサイズに対して十分小型ではないので、特性の良い範囲の調査や電波吸収体の影響の評価に有効なサイト減衰量分布の評価に利用できないという問題点があった。そこで、本論文では球状ダイポールアンテナに着目して小型電波無響室のサイト減衰量分布評価を試みた。

まず、球状ダイポールアンテナのサイト減衰量理論値を求めるため、球状ダイポールアンテナをワイヤグリッドによりモデル化し、モーメント法を用いてサイト減衰量を求めた。その結果、測定値と解析値の偏差は 30~1000 MHz において  $\pm 4$  dB 以内であり、ワイヤグリッドモデルによる解析が有効であることが分かった。また、サイト減衰量よりアンテナファクタを求めた結果、球状ダイポールアンテナは地上高 1 m 以上では自由空間のアンテナファクタとほぼ同じ値となること、アンテナファクタを測定値と  $\pm 2$  dB 以内の精度で解析可能であることが分かった。

次に、電波無響室を評価するため球状ダイポールを用いたサイト減衰量分布をレイトラシング法により解析した。解析に必要な、アンテナファクタ、指向特性はワイヤグリッドモデルより求め、電波吸収体の反射特性については平板多層近似解析法により求めた。平板多層近似により求めた電波吸収体の反射特性は測定値の傾向をとらえており、100~600 MHz では測定値との偏差が  $\pm 5$  dB 以内の精度で解析可能であることが分かった。これらの解析モデルを用いて、レイトラシング法により 600 MHz における小型電波無響室のサイト減衰量分布を解析した結果、測定値との偏差は  $\pm 3$  dB 以内となり、レイトラシング法を用いた解析が有効であることが分かった。

この評価法により、小型電波無響室のサイト減衰量



分布、電波吸収体の影響を評価した結果、狭い範囲ではあるが、サイト減衰量の特性の良いエリアが存在すること、電波吸収体の特性がサイト減衰量分布に大きな影響を及ぼしていることが分かり、本論文で述べている球状ダイポールアンテナを用いたサイト減衰量分布評価は小型電波無響室の評価に有効であることが分かった。

今後の課題としては、サイト減衰量の解析及び測定における誤差要因を明確にして評価精度を向上させることが必要である。

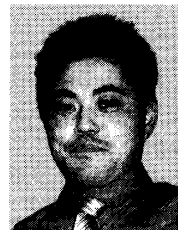
謝辞 有益な御助言を頂いた九州工業大学工学部電気工学科桑原研究室の関係各位に深謝します。

## 文 献

- [1] A. Sugiura and M. Okamura, "Correction factors for the normalized site attenuation," IEEE Int. Symp. EMC, pp.29-34, Nagoya, 1989.
- [2] K. Gyoda, A. Nishikata, T. Shinozuka, and A. Sugiura, "Analysis of biconical antenna for EMC measurement," IEEE Int. Symp. EMC, pp.755-758, Nagoya, 1994.
- [3] IEC/CISPR Publication 22, Third ed., "Information technology equipment—Radio disturbance characteristics—Limits and method of measurement," IEEE Int. Symp. EMC, pp.583-588, Tokyo, 1984.
- [4] 情報処理装置等電波障害自主規制協会, 規約・規定類, 付則1, "技術基準," URL://www.vcci.or.jp/, April 2004.
- [5] J.C. Matovani and D.N. Herman, "A spherical dipole source for use as a transfer standard between radiated emission test sites," IEEE Int. Symp. EMC, pp.583-588, Tokyo, 1984.
- [6] 村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, "光/電気変換器を用いた球状ダイポールアンテナ," 信学論 (B-II), vol.J74-B-II, no.12, pp.699-706, Dec. 1991.
- [7] N. Kuwabara, K. Tajima, R. Kobayashi, and F. Amemiya, "Development and analysis of electric field sensor using LiNbO<sub>3</sub> optical modulator," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.34, no.4, pp.391-395, Nov. 1992.
- [8] 石田康弘, 村川一雄, 山下浩二, 徳田正満, "CISPR 測定系を用いた放射妨害波源探知法における探知精度の向上," 信学論 (B), vol.J82-B, no.8, pp.1569-1577, Aug. 1999.
- [9] T. Mori, K. Shinozaki, and Y. Kaneko, "Improving shielding effectiveness measurement with spherical dipole antenna," IEEE Int. Symp. EMC, pp.1-4, Chicago, 1994.
- [10] R.F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, IEEE Press, 1992.
- [11] G.J. Burke and A.J. Poggio, Numerical Electromagnetics Code (NEC)—Method of Moments, Part I-III, Lawrence Livermore Laboratory, 1981.

- [12] 清水康敬, 杉浦 行, 電磁妨害波の基本と対策, 電子情報通信学会, 1997.
- [13] A. Sugiura, T. Morikawa, K. Koike, and K. Harima, "An improvement in the standard site method for accurate EMI antenna calibration," IEICE Trans. Commun., vol.E78-B, no.8, pp.1229-1237, Aug. 1995.
- [14] 猪ノ口真三子, 木村永寿, 徳田正満, 島田一夫, "レイトラシング法による電波無響室の特性解析と特性改善法," 信学技報, EMCJ98-91, Dec. 1998.
- [15] 安斎弘樹, 内藤喜之, 水本哲弥, "ピラミッド形電波吸収体の斜入射特性とその等価回路近似モデルについて," 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.10, pp.686-693, Oct. 1996.

(平成 16 年 4 月 19 日受付, 8 月 12 日再受付)



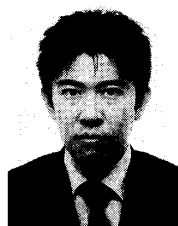
木谷 敦人 (正員)

平 15 九工大・工・電気卒。平 16 同大学院修士課程了。在学中は球状ダイポールを用いた電波無響室評価法の研究に従事。



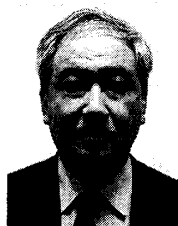
桑原 伸夫 (正員)

昭 50 静岡大・工・電子卒。昭 52 同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT)茨城電気通信研究所入所。以来、通信システムの雷防護, 光ケーブルの信頼性評価, 通信システムの EMC 評価, EMC における光計測技術等に関する研究・開発に従事。現在, 九工大・工・教授。博士(工学)。IEEE 会員。



川畑 将人 (正員)

平 7 北大・工・電気卒。平 9 同大学院修士課程了。同年川崎重工(株)入社。平 14 福岡県工業技術センター機械電子研究所入所。以来、アンテナ, 電波無響室の評価に関する研究に従事。



雨宮不二雄 (正員)

昭 46 東北大・工・通信卒。昭 48 同大学院修士課程了。同年日電公社(現 NTT)武蔵野電気通信研究所入所。以来、電子化電話機・デジタル電話機の研究実用化, 通信システムの EMC 試験・評価法の基盤研究, EMC に関する技術協力, EMC の国際標準化等に従事。平 12 NTT アドバンステクノロジー入社, EMC 試験評価・対策, 電磁環境調査, 国際標準化等の業務に従事。現在, NTT アドバンステクノロジー EMC センタ所長。