

## 3-5 反射箱による無線機の放射電力測定

### 3-5 Total Radiated Power of Radio Transmitters Measured in a Reverberation Chamber

張間勝茂 杉山 功 山中幸雄 篠塚 隆

HARIMA Katsushige, SUGIYAMA Tsutomu, YAMANAKA Yukio,  
and SHINOZUKA Takashi

#### 要旨

反射箱は、攪拌機の機械的な移動により境界条件を変化させて、ランダムな電磁界分布を発生させる。理想的な反射箱を仮定すると、電界の変動分布はレイリー分布に従い、空間的な電界分布は統計的に均一である。供試機からの直接波の影響を避けるように受信アンテナを配置すれば、全放射電力は、変動分布の平均値や中央値から統計的に求めることができる。しかしながら、実際の反射箱では、反射箱内の電界分布の均一性は、反射箱の大きさや攪拌機の構造等により影響を受ける。また、広帯域放射源の電力測定には、長時間を要する問題がある。本論文では、反射箱内の電界分布の統計的な特性について、理論及び実験的に評価した結果を述べるとともに、我々が提案している広帯域放射源の全放射電力の効率的な測定手法及び直接波の影響を低減できる累積分布の 63.2% 値を用いた統計的手法について紹介する。

A random electromagnetic field is created in a reverberation chamber by moving mechanical stirrers to vary the boundary condition. The received E-field strength caused by moving the stirrer is Rayleigh distributed and the field distribution is statistically uniform in an ideal reverberation chamber. The total radiated power of the EUT is obtained by the substitution method from the average or median value of the E-field when the receiving antenna is placed so as to avoid the influence of the direct wave from the EUT. However, using the substitution method requires a great deal of time to measure the averaged received level for a broadband radiated source. The dimensions of the chamber and the structure of the stirrers affect the field uniformity in an actual chamber. The statistical characteristics of the spatial E-field distribution in a reverberation chamber are described, along with an efficient technique for measuring total radiated power of broadband radiated sources and the statistical technique using a 63.2% value of the cumulative distribution that can reduce the influence of the direct wave.

#### [キーワード]

反射箱, 全放射電力, レイリー分布, ライス分布, マルチパス, 攪拌機  
Reverberation chamber, Total radiated power, Rayleigh distribution, Rice distribution,  
Multi path, Stirrer

## 1 まえがき

反射箱は、金属箱の内部に設置した攪拌機により境界条件を変化させ、統計的に均一な電界分布を発生させる装置であり [1]、放射エミッションや放射イミュニティ測定などの EMC 測定に用いられている [2][3]。また、アンテナ一体型無線機の放

射電力測定にも有効な方法である。

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、攪拌機の移動により得られた受信電力の変動分布の平均値、中央値又は最大値から全放射電力を推定する。このとき、受信電力に含まれる EUT からの直接波成分が測定誤差の要因となる。また、理想的な

反射箱を仮定すると電界分布の均一性は、確率密度関数から理論的に求めることができるが[4][6]、実際の反射箱では、その大きさや攪拌機の構造等の影響を受ける[5][6]。

一方、不要発射に対する規制に基づくスプリアス測定や、超短パルス波を利用した無線システムである Ultra Wide Band (UWB) の放射電力測定など広帯域の測定が必要となるが、従来の測定法では長時間を要する欠点がある。

本文では、反射箱内の空間的な電界分布の均一性について、理論値と実測値の比較結果[6]を示し、次に、広帯域放射源の放射電力を短時間で測定できる改良連続回転法[7][8]及び直接波の影響を低減できる測定法である受信電力の累積確率(CDF) 63.2%値を用いた統計的手法[9]をそれぞれ紹介する。

## 2 電界分布の統計的特性

### 2.1 確率密度関数

反射箱内の電界は、攪拌機の移動による境界条件の変化に応じて大きく変動する。反射箱の大きさが波長に対して大きく、反射箱内に十分な共振モード数があれば、反射箱内のある位置での電界は、攪拌機の移動によりランダムな位相を持つマルチパス波の合成和となる。

一般に、矩形の金属筐体内に発生する全共振モード数( $n$ )は、Weylの式により

$$n \cong \frac{8\pi abc}{3\lambda^3} \quad (1)$$

と近似できる[1]。ここで、 $a$ 、 $b$ 及び $c$ は筐体の三辺の長さ、 $\lambda$ は波長である。

反射箱内のある位置での電界ベクトル  $E$  は、実数項と虚数項からなる直交3成分、すなわち6

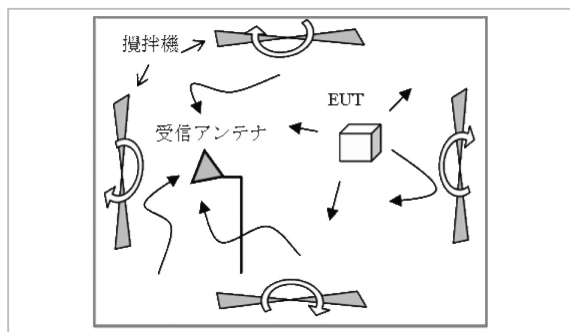


図1 理想的な反射箱

個のパラメータ、で次式のように表すことができる。

$$E = E_x + E_y + E_z \quad (2)$$

$$E_{x,y,z} = \text{Re}(E_{x,y,z}) + i \text{Im}(E_{x,y,z}) \quad (3)$$

攪拌機の移動に伴い非常に多くのマルチパス波が生じるので、電界の直交成分の実数項及び虚数項成分は中心極限定理により、正規分布に近づく。また、これら実数項と虚数項の間に相関はないので、各成分は独立な確率変数である。反射箱が理想的であると仮定すると、直交成分の実数項と虚数項の平均及び2乗平均は

$$\langle \text{Re}(E_{x,y,z}) \rangle = \langle \text{Im}(E_{x,y,z}) \rangle = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \langle \text{Re}(E_{x,y,z})^2 \rangle &= \langle \text{Im}(E_{x,y,z})^2 \rangle \\ &= E_0^2 / 6 \equiv \sigma^2 \end{aligned} \quad (5)$$

となる[10]。ここで、 $E_0^2$ は電界  $E$  の大きさの2乗平均、 $\sigma^2$ は分散である。

したがって、電界の6個のパラメータは互いに独立な確率変数で、それぞれが、平均0、分散 $\sigma^2$ の正規分布であるから、それらの各電界成分の2乗和、すなわち電界ベクトルの大きさの2乗は、自由度6のカイ2乗( $\chi^2$ )分布となる。また、電界ベクトルの大きさは、自由度6のカイ分布( $\chi^2$ 分布の平方根分布)となる。これらの分布の確率密度関数はそれぞれ

$$f(|E|^2) = \frac{|E|^4}{16\sigma^6} \exp\left(-\frac{|E|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$f(|E|) = \frac{|E|^5}{8\sigma^6} \exp\left(-\frac{|E|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

である[10][11]。

一般に、電界の測定に直線偏波のアンテナが用いられるため、測定される電界は2個のパラメータからなる1方向の直交成分の大きさである。したがって、受信電界の変動は自由度2の $\chi$ 分布に従い、その確率密度関数及び累積分布関数はそれぞれ

$$f(|E_{x,y,z}|) = \frac{|E_{x,y,z}|}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{|E_{x,y,z}|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

$$F\left(\left|E_{x,y,z}\right|\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\left|E_{x,y,z}\right|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

である[10][11]。これら分布の特性はレイリー分布と同じである。

## 2.2 空間的均一性

反射箱内の空間的な電界分布の均一性は、攪拌機のステップ数に影響される。ステップ数は、攪拌機の位置の変化の総数である。

反射箱が理想的であると仮定すると、攪拌機の移動に伴うある測定点での電界の大きさの変動は、レイリー分布に従うことを前章で示した。攪拌機を固定( $N=1$ )して測定点を移動したときの電界の大きさの変動、すなわち空間的な電界の分布も同様にレイリー分布に従う。

ステップ数  $N$  で得られる電界変動の空間的な平均値分布及び最大値分布を、レイリー分布に従う母集団から  $N$  個のデータをランダム・サンプリングすることにより求めた。図2にステップ数に対する各分布の確率密度関数(PDF)の計算結果をそれぞれ示す。

また、最大値分布の確率密度関数は、極値理論を適用して推定することができる[12]。すなわち、確率変数  $x$  を  $N$  回独立にサンプルしたとき、その最大値  $x(N)$  を確率変数とすると、極値理論によりその変数の累積分布関数  $F_N(x)$  及び確率密度関数  $f_N(x)$  は

$$F_N(x) = F(x)^N \quad (10)$$

$$f_N(x) = N \cdot F(x)^{N-1} \cdot f(x) \quad (11)$$

で表すことができる。

図2(b)に、(8)、(9)及び(11)式により求めた最大値の確率密度関数の計算結果を示す。極値理論及びランダム・サンプリングにより求めた理論値は一致している。

電界の均一性を、図2に示した各分布の確率密度関数を用いて求めた。図3にステップ数に対する平均値、中央値及び最大値分布の標準偏差を示す。各分布の均一性はステップ数の増加により改善していくが、ある程度以上にステップ数を多くしてもその効果は少ない。また、平均値及び中央値分布は最大値分布に比べ均一性の収束が良い。

例えば、平均値、中央値及び最大値分布の標準偏差が1dB以下になるために必要な攪拌機のステップ数は、それぞれ19、34及び92である。

以上述べたように理想的な反射箱を仮定すれば、電界分布の均一性はその分布の確率密度関数から攪拌機のステップ数の関数として表すことができる。しかしながら、実際の反射箱では、均一性は測定周波数や攪拌機の構造等により影響を受ける。これらの均一性に対する影響について、理

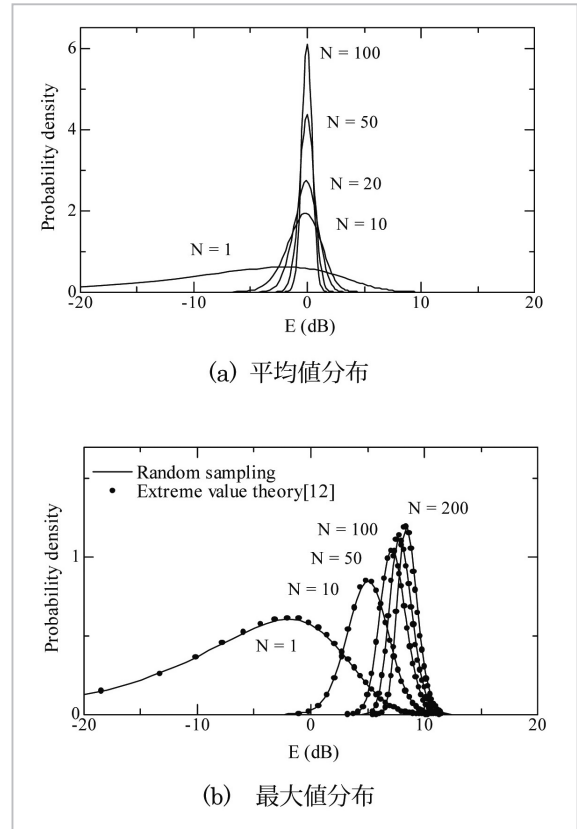


図2 攪拌機のステップ数に対する平均値及び最大値分布の確率密度関数

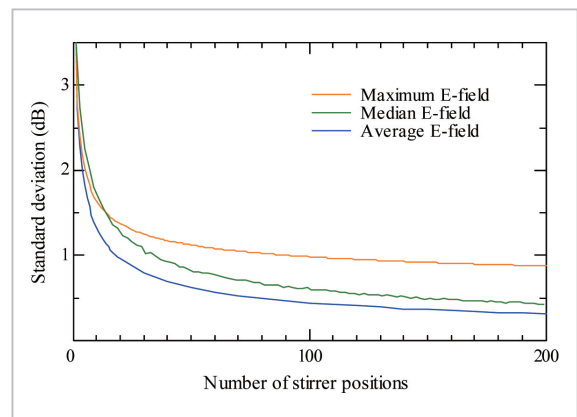


図3 攪拌機のステップ数の対する平均値、中央値及び最大値分布の均一性



(a) 反射箱 A (3.8×3×4.5 m)



(b) 反射箱 B (5.5×3×4.5 m)

図4 反射箱

論値と実測値の比較を行った。

図4に測定に用いた大きさ、攪拌機の構造及び設置数の異なる二つの反射箱を示す。これらの反射箱内に1 m×1 m×1 mの測定領域を設定し、25 cm 間隔の5×5×5の格子で区切った125の測定点で、200 MHz から3 GHz について電界分布を測定した。

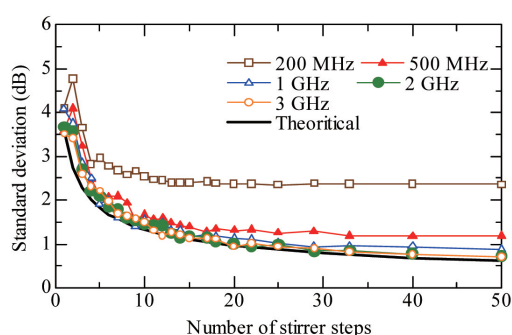
図5に平均値分布の実測値と理論値の均一性の比較を示す。均一性は、反射箱の大きさが波長に対して十分大きければ、すなわち、共振モード数が十分多く存在するような大きさであれば、理論値に近づく。また、低い周波数帯では共振モード数が少なくなり均一性が悪くなること分かる。さらに、攪拌機の構造によって均一性が影響されることを示している。

### 3 放射電力測定法

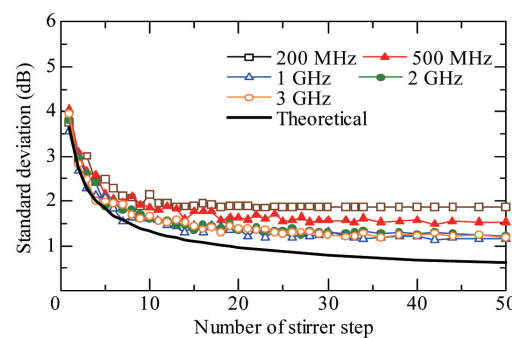
本章では、反射箱を用いた放射電力測定法として検討を行った二つの測定法を示す。3.1で広帯域放射源の放射電力の効率的な測定手法を、3.2で直接波の影響を低減できる統計的手法をそれぞれ紹介する。

#### 3.1 改良連続回転法

反射箱を用いた放射電力の標準測定法には、“mode-stirred method” (連続回転法) 及び“mode-tuned method” (ステップ回転法) の二つの方法がある[2]。



(a) 反射箱 A



(b) 反射箱 B

図5 平均値分布の均一性

連続回転法では、攪拌機を連続的に回転しながら、測定周波数ごとに回転1周期間の受信レベルの変動を測定するため、広帯域の受信電力測定に長時間を要する。また、ステップ回転法では、攪



拌機をステップ状に回転させ、各攪拌機の位置ごとに受信レベルを測定する。広帯域の測定には、有効な方法であるが、攪拌機のステップ数を多くとる必要があり、攪拌機の駆動系の制御が容易ではない。このため広帯域放射源の放射電力を短時間(数分内)で測定できる改良法を提案し、この方法の有効性を実験により確認した[7][8]。

図6に示すように反射箱内に送・受信アンテナを配置し、送信アンテナに入力電力  $P_{in}(f)$  を加える。攪拌機を連続的に回転させながら1周期間、受信アンテナの受信電力  $P_r(f)$  及び送信アンテナからの反射電力  $P_{ref}(f)$  を測定し、次式により送信アンテナへの入力電力  $P_{net}(f)$  を求める。

$$P_{net}(f) = P_{in}(f) - P_{ref}(f) \quad (12)$$

次に、受信アンテナと同じ位置に EUT を配置し同様に攪拌機を回転させながら受信電力  $P_{eut}(f)$  を測定する。下記により EUT の全放射電力  $P_{Total}(f)$  を求めることができる。

$$P_{Total}(f) = P_{eut}(f) \cdot \frac{P_{net}(f)}{P_r(f)} \quad (13)$$

このとき、スペクトラムアナライザの周波数スパンをできるだけ広く設定し、攪拌機の回転の1周期間に多くのサンプル数が得られるように、スペクトラムアナライザの掃引速度を攪拌機の回転速度に比べて十分に高速に設定する。攪拌機の1周期(1回転)間の受信電力を真値で平均化する。このとき、スペクトラムアナライザの検波モードはサンプルモードである。

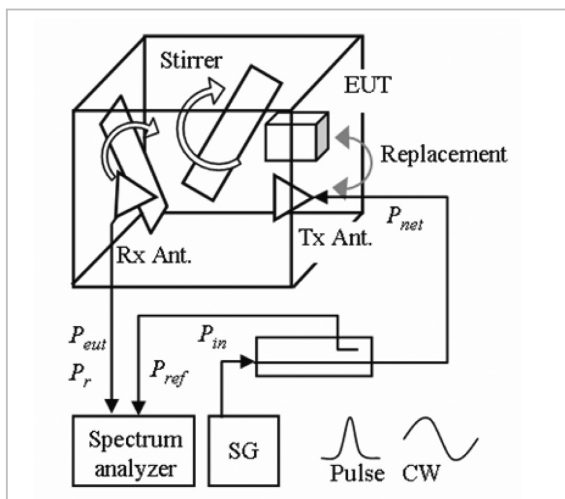


図6 実験配置図

### 3.1.1 実験結果と考察

反射箱を用い改良連続回転法により放射電力を測定した。ダブルリッジドガイドホーンアンテナを送・受信アンテナとして用い、スペクトラムアナライザと接続した。送信アンテナは、直接波の影響を避けるために受信アンテナを直接照射しないように配置した。EUTとして、パルス波(パルス幅 84 ps、パルス周期 10 ns)を発生するコムジェネレータを用いた。このコムジェネレータには、ダブルリッジドガイドアンテナが取り付けられている。

三つの攪拌機を異なる速度(1, 2, 3 rpm)で回転させながら、1 GHz から 18 GHz について放射電力を測定した。スペクトラムアナライザをサンプルモードで、4 GHz の周波数帯域(20001 ポイント)を 390 ms で掃引し、攪拌機の回転1周期間に 120 回の平均受信電力を求めた。

図7にコムジェネレータのパルス波の出力波形と反射箱内での受信波形を示す。このような短パルス波では、反射箱の高い Q のためパルス波形がゆがむことを示している。したがって、通常行われる CW 波を用いた置換では、放射電力の推定結果にこの波形歪による影響が予想される。このため、EUT の送信パルス波と同様なパルス波による置換を行い CW 波による結果と比較した。

図8にコムジェネレータの放射電力測定結果を示す。改良連続回転法と従来のステップ回転法による結果はよく一致しており、改良法の有効性が確認できた。また、このときの測定時間は5分であり、改良法の適用により短時間測定が可能になる。しかし、このような短パルス波に対する CW 波置換による結果は、コムジェネレータの出力レベルより、3 dB から 5 dB 程度大きくシフトした。一方、パルス波を用いた置換結果はこのような差異が見られなかった。この結果は、短パルス波の放射電力測定には、EUT の送信波形と同様なパルス波による置換が有効であることを示している。

### 3.2 統計的推定法

#### 3.2.1 推定法の原理

反射箱内に無線機と受信アンテナを配置したとき、受信アンテナには無線機からの直接波と攪拌機の回転により生じたランダムな位相を持つ反射

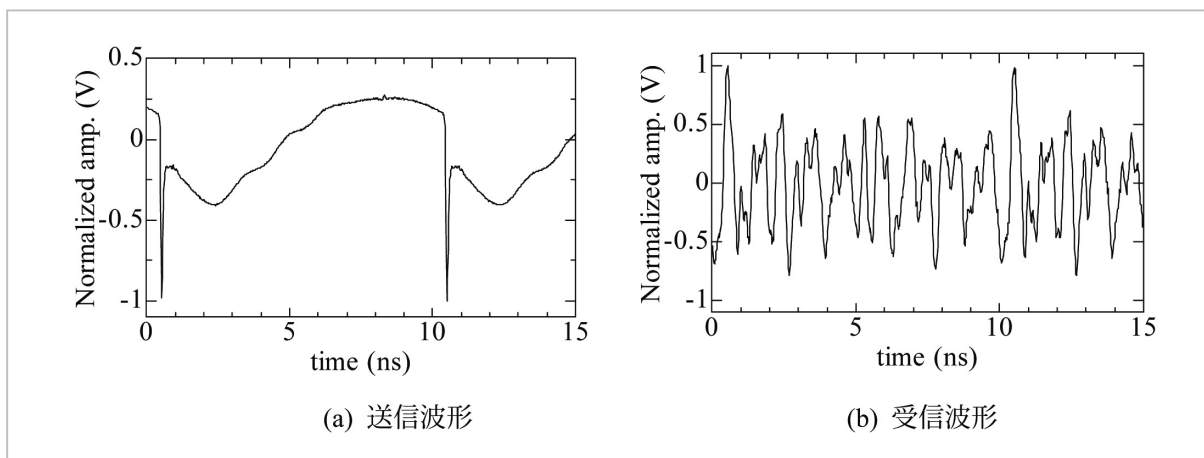


図7 パルス波形

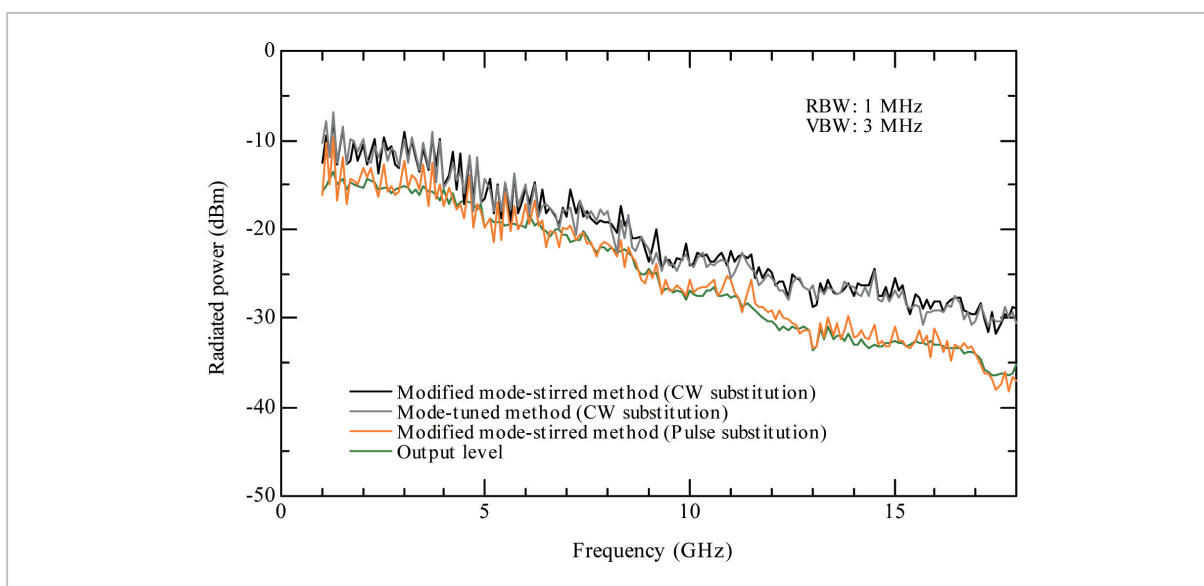


図8 実験結果

波が到来する。この直接波とマルチパス波の合成波の受信電力  $r$  の確率密度関数 (PDF)  $p(r)$  は次式で表され、その分布は Rice 分布に従う [13]。

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(A \frac{r}{\sigma^2}\right) \quad (14)$$

ここで  $\sigma^2$  はマルチパス波の電力、 $A^2/2$  は直接波の電力、 $I_0$  は 0 次の変形ベッセル関数である。

直接波の電力とマルチパス波の電力の比を  $\rho$  と定義し、 $r$  を直接波とマルチパス波の電力和の平方根で規格化すると (14) 式は

$$p(R) = 2(1+\rho)R \cdot \exp\left\{-\left[\rho + (1+\rho)R^2\right]\right\} \cdot I_0\left[2R\sqrt{\rho(1+\rho)}\right] \quad (15)$$

と書ける。ここで、

$$\rho = \frac{A^2/2}{\sigma^2} \quad (16)$$

$$R = \frac{r/\sqrt{2}}{\sqrt{A^2/2 + \sigma^2}} \quad (17)$$

である。

式 (15) を  $R$  で積分することにより求められる累積分布関数 (CDF)  $F(R)$  を図 9 に示す。 $\rho \rightarrow \infty$  のときは  $F(R) = U(R-1)$ 、ここで  $U$  はステップ関数、となり、 $\rho = 0$  のときは、 $F(R) = 1 - \exp(-R^2)$  となり、Rayleigh 分布と同じ特性を持つ。これらの曲線は CDF の  $R=1$ 、すなわち、0.632 (=  $F(1)$ ) において交差する。両者の間の任意の  $\rho$  に対しては交差点はずれるが、CDF の 63.2% 値に対して、そのずれは 0.5 dB 以内であること

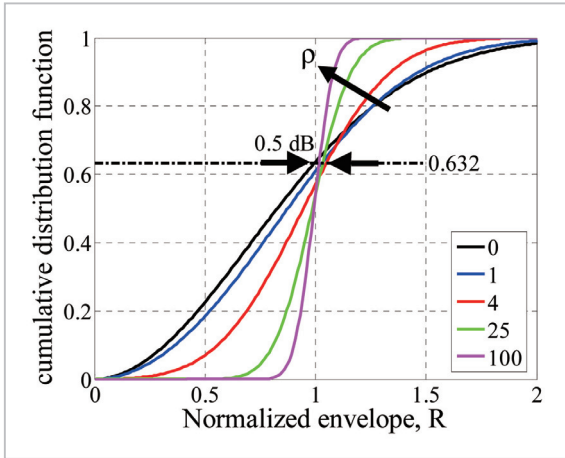


図9 Rice分布の累積分布関数

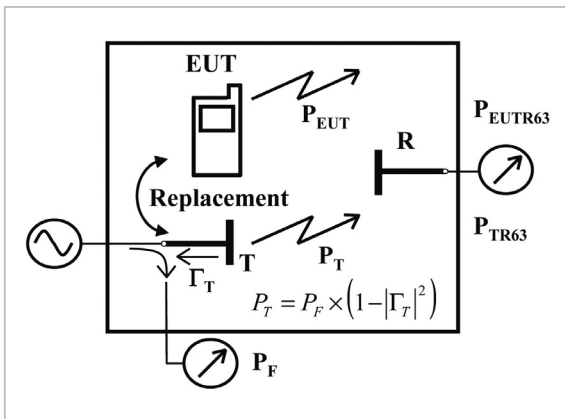


図10 反射箱損と放射電力測定

が分かる(図9参照)。すなわち規格化包絡線のCDFの63.2%値は $\rho$ にかかわらずほぼ一定の値になる。

図10のように反射箱内に送信アンテナT、受信アンテナRを置いたとき、送信アンテナに供給される電力を $P_F$ 、送信アンテナの反射係数を $\Gamma_T$ としたとき放射電力 $P_T$ は式(18)となる。

$$P_T = P_F \cdot (1 - |\Gamma_T|^2) \quad (18)$$

また、このときの受信信号のCDFの63.2%値を $P_{TR63}$ とすると、反射箱損 $L_C$ は式(19)のように定義できる。

$$L_C = \frac{P_T}{P_{TR63}} \quad (19)$$

ここで、送信アンテナTを無線機(EUT)と入れ替える。EUTの放射電力を $P_{EUT}$ とし、このときの受信信号のCDFの63.2%値を $P_{EUTR63}$ とすると、式(20)のようになる。

$$\frac{P_{EUT}}{P_T} = \frac{P_{EUTR63}}{P_{TR63}} \quad (20)$$

したがって、

$$P_{EUT} = P_{EUTR63} \cdot L_C \quad (21)$$

により反射箱損 $L_C$ とEUTの受信信号のCDFの63.2%値からEUTの放射電力を求めることができる。この手法を用いることにより直接波が存在するような条件でも精度良い測定が可能となる[9]。

### 3.2.2 2.45 GHz 無線機の放射電力測定例

置換法により無線機の放射電力を測定する場合、反射箱が理想的であれば、置換用アンテナはどこにおいても良い。しかしながら、実際の反射箱では電界分布の均一性は、周波数や攪拌機の構造によって影響されるので、反射箱損は送信アンテナの位置により異なる。例えば、ノートパソコンに内蔵された無線LAN機器のように放射源が未知なEUTの場合、置換用アンテナの配置位置によって測定値が異なる可能性がある。このため、配置位置による影響を2.45 GHz信号発生器を内蔵したノートパソコン(ダミーノートPC)を用いて検討した。ダミーノートPCは、ノートパソコン筐体内部のマザーボード等を取り除いて2.45 GHzの送信機を内蔵し、PCMCIA無線LANカードのアンテナを送信アンテナとして使用している。

ダミーノートPCの放射電力を水平方向に90度おきに回転した4方向についてそれぞれ置換用アンテナの位置を変えて受信信号のCDFの63.2%値により推定した[14]。このとき、反射箱損は、カードアンテナ近傍の5点の平均、PC筐体中心近傍の6点の平均とした。

測定結果を図12に示す。なお、真値はアンテナ入力端に電力計を直結して測定した値と、反射箱内でのアンテナ反射係数の測定値(変動幅0.3 dB)から補正して求めた。

置換位置をPC筐体中心近傍とした時(○印)は真値と比べ最大1.5 dB、カードアンテナ位置近傍で置換した時(◇印)は最大で0.5 dBの差異がそれぞれ生じた。しかし、4方向で測定した放射電力の平均値では、PC筐体中心近傍で置換した時には0.6 dBの差異、カードアンテナ位置近傍で置換した時には真値と一致した。

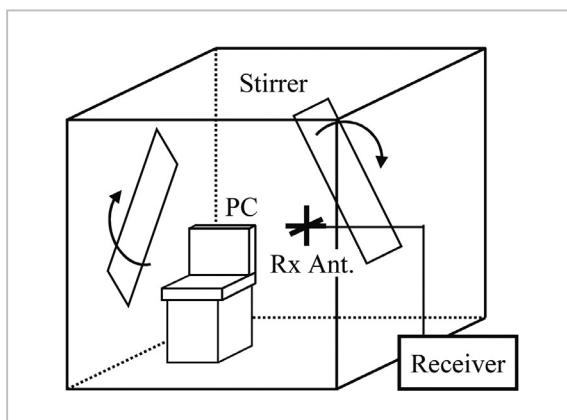


図 11 放射電力測定系統図

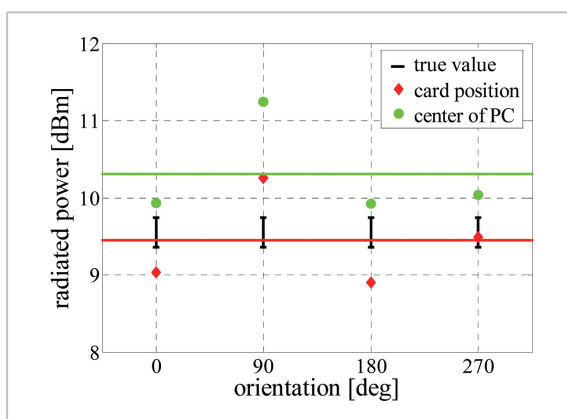


図 12 放射電力測定結果

## 4 まとめ

反射箱内の電界分布の統計的特性について、実験及び理論的に検討し、均一性に対する周波数及び攪拌機による影響を示した。

広帯域放射源の全放射電力測定法として、改良連続回転法を提案し、この方法の有効性を確認した。また、短パルス波の放射電力測定に対しては、連続波による置換では誤差が生じること及び送信波形と同様なパルス波による置換の有効性を実験により示した。

さらに、直接波の影響を低減できる放射電力測定法として累積分布の 63.2% 値を用いる統計的手法を提案した。この方法による 2.45 GHz 無線機の測定結果を示し、EUT の放射源と置換用アンテナの位置を正確に合わせることで高い精度で放射電力を推定することが可能であることを示した。

今後は、パルス幅による影響の評価、スプリアス測定及び床置型機器のような大きな EUT に対する放射電力測定法の検討が必要である。

## 謝辞

統計的推定法の検証に当たり、ダミーノート PC (2.45 GHz 無線機) を快くお貸し頂いた、財団法人テレコムエンジニアリングセンターの中島恭一氏、野島友幸氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1 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, Apr. 1986.
- 2 IEC 61000-4-21, "Testing and measurement techniques - reverberation chamber test methods", 2003.
- 3 CISPR Publication 16-1, "Reverberation chamber for total radiated power measurement", 1996.
- 4 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.
- 5 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.



- 6 K.Harima, "Statistical Characteristics of E-Field Distribution in a Reverberation Chamber", IEICE Trans. Commun, Vol.E88-B, No.8, pp.3127-3132, Aug. 2005.
- 7 K.Harima and Y.Yamanaka, "Determining Total Radiated Power for Short Pulse Signals by Using a Reverberation Chamber", Proc. EMC Europe Workshop 2005, pp. 77-79, Rome, Italy, Sep. 2005.
- 8 K.Harima, "Radiated Emission Measurement of Small EUT by Using a Reverberation Chamber", Proc. 2003 IEEE EMC Symposium, pp.471-474, Istanbul, TURKEY, May 2003.
- 9 T.Sugiyama, T.Shinozuka, and K.Iwasaki, "Estimation of Radiated Power of Radio Transmitters Using a Reverberation Chamber", IEICE Trans. Commun., Vol.E88-B, No.8, pp.3158-3163, Aug. 2005.
- 10 G.Kostas and B.Boverie, "Statistical model for a mode-stirred chamber", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.33, No.4, pp.366-370, Nov. 1991.
- 11 D.A.Hill, "Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.40, No.3, pp.209-217, Aug. 1998.
- 12 T.H.Lehman and G.J.Freyer, "Characterization of the maximum test level in a reverberation chamber", Proc. 1997 IEEE International Symposium on EMC, pp.44-47, Austin, USA, Aug. 1997.
- 13 S.O.Rice, "Statistical properties of a sine wave plus random noise", Bell Syst. Tech. J., Vol.27, pp.109-157, Jan. 1948.
- 14 M.Uchino, O.Tagiri, and T.Shinozuka, "Real-Time Measurement of Noise Statistics", IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol.43, No.4, pp.629-636, Nov. 2001.

はりま かつしげ  
**張間勝茂**

無線通信部門EMC計測グループ主任  
研究員  
EMC測定



まぎやま ともひろ  
**杉山 功**

無線通信部門 EMC 計測グループ研究員  
EMC測定



やまなか ゆきひろ  
**山中幸雄**

無線通信部門 EMC 計測グループリーダー  
EMC測定



しのづか たかし  
**篠塚 隆**

無線通信部門研究主管  
環境電磁工学