

# 論文

## 導体球の散乱電界を用いた放射イミュニティ試験電磁界印加装置の特性評価

正員 秋山 佳春<sup>†</sup>      正員 桑原 伸夫<sup>†</sup>  
 正員 井手口 健<sup>†</sup>      正員 徳田 正満<sup>†</sup>

### Evaluation of RF Immunity Test Facilities Based on the Scattered Field of a Conductive Sphere

Yoshiharu AKIYAMA<sup>†</sup>, Nobuo KUWABARA<sup>†</sup> Tsuyoshi IDEGUCHI<sup>†</sup>  
 and Masamitsu TOKUDA<sup>†</sup> Members

あらまし 情報技術装置の放射イミュニティ試験では電波暗室・TEMセル・GTEMセル等の電磁界印加装置が使用されている。これらについて、供試機器のない場合の電界均一性等の特性は評価されているが、供試機器が存在する場合の電界分布等の特性は評価されていない。

本論文では、これらの電磁界印加装置がいずれも平面波を模擬した電磁界を発生するように設計されている点に着目し、平面波が導体球に入射したときに周囲にできる電界分布を基準として、印加装置内に供試機器が設置された場合の電界分布を評価・比較した。更に、各印加装置でイミュニティ試験が可能な供試機器の大きさについて評価した結果も示している。評価方法としては、まず自由空間中の導体球に平面波が入射したときの散乱電界理論値を求め、つぎにこの理論値と各電磁界印加装置内における導体球周囲の電界測定値を比較した。その結果、電波暗室の場合が最も理論値との偏差が小さく、かつ周波数による変動が少ないことがわかった。またTEMセル・GTEMセルの場合、供試機器の大きさが内部導体の外部導体の間隔の1/3以下であれば、理論値と測定値との偏差は+6 dB以下になることがわかった。

キーワード 放射イミュニティ試験, 電波暗室, TEMセル, GTEMセル, 散乱電界, 電界の均一性

### 1. まえがき

情報技術装置が電磁妨害波に対して十分な耐力をもっていないと、TV局近傍等の強電界中に設置された場合に放送電波が混入する等の障害を起こすことがある<sup>(1)</sup>。そこで、空間を伝搬して装置に侵入する妨害波に対する情報技術装置の耐力(イミュニティ)を評価するため、供試機器に電界を印加してどの程度の電界強度まで正常に動作するかを評価する放射イミュニティ試験が行われている<sup>(2),(3)</sup>。

放射イミュニティ試験を行うための電磁界印加装置として、これまでに電波暗室<sup>(2)</sup>、TEMセル<sup>(4)</sup>、GTEMセル<sup>(5)</sup>等が開発されている。一方、国際標準化機関であるIEC(国際電気標準会議)等では、80 MHz~1 GHz

について電波暗室を用いた放射イミュニティ試験法の標準化が進んでいる<sup>(2)</sup>。しかし、電波暗室を用いた試験設備は非常に高価であり、途中でアンテナを取り替える必要があるため、試験効率が悪いという問題点がある<sup>(6)</sup>。こうした問題点は、GTEMセル等の安価で広帯域な試験装置を用いることで解決できる。そこで、電波暗室とGTEMセル等の簡易な印加装置との相関性を明らかにすることが望まれている。しかし、再現性の良いイミュニティレベルの測定法が確立されていないことや、機器のイミュニティレベルが周波数によって大きく変化するため、実際の試験結果から相関性を評価することが困難であり、GTEMセル等と電波暗室間のイミュニティ評価結果に関する相関性については、電話機を用いた測定例が報告されている程度<sup>(7)</sup>、定量的な検討はまだまだ行われていない。

一方、供試機器のイミュニティレベルは、印加されている電界と密接な関係にあることから、実際の試験

<sup>†</sup> NTT 通信網研究所, 武蔵野市  
 NTT Telecommunication Networks Laboratories, Musashino-shi, 180 Japan

## 論文／導体球の散乱電界を用いた放射イミュニティ試験電磁界印加装置の特性評価

結果を用いる方法の他に、イミュニティ試験時に供試機器に印加されている電界が、印加装置によってどのように異なるかを明らかにすれば、試験結果の相関性が評価できると考えられる。しかし、電磁界印加装置については、供試機器がない場合の電界の特性（均一性等）は評価されているが、供試機器が存在する場合については評価されていない。供試機器の有無は、印加装置内の電界の特性に大きく影響し、イミュニティ試験時に印加されている電界の特性を評価するためには、供試機器が存在する場合の電界の特性を評価する必要がある。

本論文では、放射イミュニティ試験の電磁界印加装置が、平面波を模擬した電磁界を発生できるように設計されていることに着目し、供試機器の代わりに導体球を印加装置内部に設置した場合の球近傍の電界分布を測定し、その値と自由空間における理論値とを比較することによって、供試機器が存在する場合の印加装置内の電界の特性を評価・比較した結果について述べている。また、供試機器の大きさと印加装置内の電界の特性との関係についても検討を行っている。

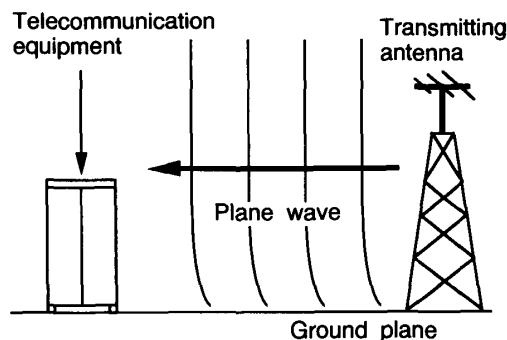
## 2. 導体球を用いた放射イミュニティ試験電磁界印加装置内の電界分布評価法

### 2.1 基本概念

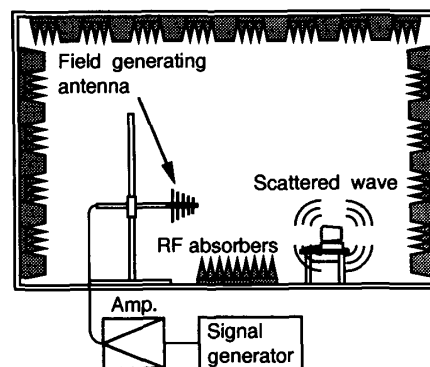
情報技術装置に電磁波が印加されている状態を図1(a)に示す。情報技術装置に影響を与える電磁波として放送電波等が考えられるが、これらは情報技術装置からみて、一般的に波長に比べて十分離れた位置に放射源がある。従って、図に示すように平面波が印加されていると考えることができる。電磁波に対するイミュニティ試験は、実環境において情報技術装置に印加される電磁波を模擬して行うもので、再現性等を考慮して自由空間に供試機器が設置された場合に印加される電磁波（平面波）を模擬している。

放射イミュニティ試験を行う電磁界印加装置として様々なものが提案されているが<sup>(2)~(5)</sup>、主に使用されているのは電波暗室<sup>(2)</sup>、TEMセル<sup>(4)</sup>、GTEMセル<sup>(5)</sup>である。図1(b)~(d)に電波暗室、TEMセル、GTEMセルを用いたイミュニティ試験系を示す。図に示すように、電波暗室については床面に電波吸収体を配置することで、一方、TEMセル、GTEMセルについてはTEMモードの電磁界を発生させることにより、平面波を模擬した電磁界を供試機器に印加している。

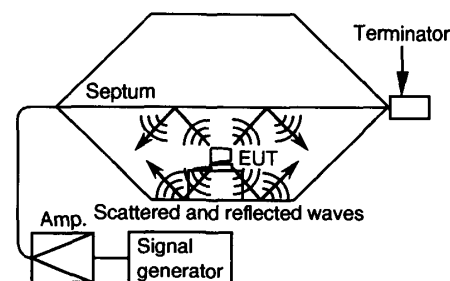
放射イミュニティ試験では平面波を模擬するため、



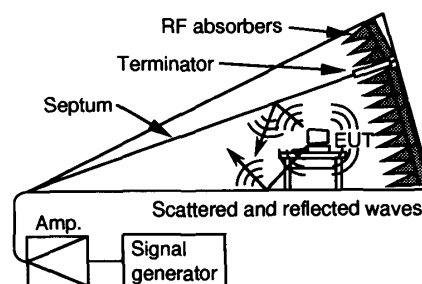
(a) Electromagnetic field model



(b) Test setup for semi-anechoic chamber



(c) Test setup for TEM cell



(d) Test setup for GTEM cell

図1 電磁環境モデルと放射イミュニティ試験系  
Fig.1 Electric field environment model and RF immunity test setups.

均一な電界を印加して試験を行うよう規定されているが、現状では印加装置内に供試機器がない場合の電界均一性のみ規定されている。均一性（電界強度の変動範囲）としては、印加しようとしている電界強度に対し0～+6 dBと規定されている。しかし、供試機器が印加装置内に設置されると、図1に示すように供試機器の散乱や、TEMセル等では供試機器周囲の導体からの反射等によって電界分布が変化する。供試機器内部に侵入したり機器内の配線に誘導する電圧と、機器近傍の電界分布は密接な関係があるため、電磁界を印加した際に機器周辺に生じる電磁界分布を測定することにより、電波暗室等の放射イミュニティ試験の印加装置の相関性評価が可能であると考えられる。

そこで本論文では、実際の供試機器の代わりに導体球を用い、平面波が入射したときに球近傍に生じる電界分布を解析し、電界分布の理論値と測定値を比較する。そして比較結果より、各印加装置に供試機器が設置された状態で、平面波が入射した状態をどの程度模擬しているかを求めることにより、各印加装置の供試機器が設置された場合の電界分布特性を評価した。

## 2.2 導体球近傍の電界分布解析

自由空間に置かれた導体球に平面波が入射したときに導体球周囲に生じる電界分布は、ベクトルモード関数を用いて求めることができる<sup>(6)</sup>。

いま図2に示すように、X軸に偏波した平面波がZ軸方向から導体球に入射している場合を考える。このときP点における入射波の電界成分および散乱波の電界成分は、ベクトルモード関数を用いて以下の式で表される。

$$\mathbf{E}^i = \mathbf{E}_0 \sum_n (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\mathbf{M}_{01n} + \mathbf{N}_{e1n}) \quad (1)$$

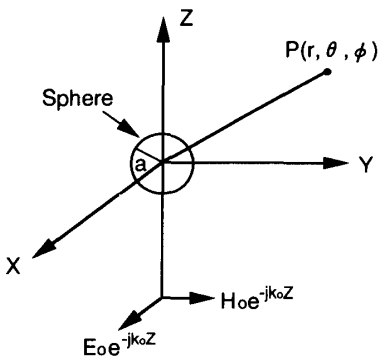


図2 散乱電界計算に用いた座標系  
Fig. 2 Coordinates using scattered field calculation.

$$\mathbf{E}^s = \mathbf{E}_0 \sum_n (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\mathbf{a}_n^s \mathbf{M}_{01n} + \mathbf{b}_n^s \mathbf{N}_{e1n}) \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_n^s = -\frac{j_n(\rho)}{h_n^{(2)}(\rho)} \quad (3)$$

$$\mathbf{b}_n^s = -\frac{[\rho j_n(\rho)]'}{[\rho h_n^{(2)}(\rho)]'} \quad (4)$$

ここで、 $\rho = k_0 a$ 、 $a$ は球の半径、 $k_0$ は自由空間における波数( $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ :  $\lambda_0$ は自由空間中の波長)、 $\mathbf{E}_0$ は入射波の波長の振幅、 $j_n(\rho)$ は球ベッセル関数、 $h_n^{(2)}(\rho)$ は第2種ハンケル関数である。また、全電界強度は入射電界成分と散乱電界成分の和として、以下の式から求められる。

$$E = \sqrt{|\mathbf{E}^i|^2 + |\mathbf{E}^s|^2} \quad (5)$$

導体球の直径が50 cmの場合の計算結果を図3に示す。これは図2の+Z軸上において、球面から10～50 cmの範囲を50 cm間隔で全電界強度を計算し、導体球がある場合とない場合の電界強度[dBμV/m]の差を示したものである。図からわかるように、入射波の波長が導体球の直径に対して十分に長い100 MHz以下では、導体球がある場合とない場合の偏差は1 dB以下である。

## 2.3 各試験装置内での導体球周囲の電界測定

次に、電波暗室、TEMセル、GTEMセル内に導体球を置いた場合の、球周囲の電界を測定した。図4は電波暗室での測定系、図5はGTEMセルでの測定系である。TEMセルの測定系はGTEMセルの場合と同

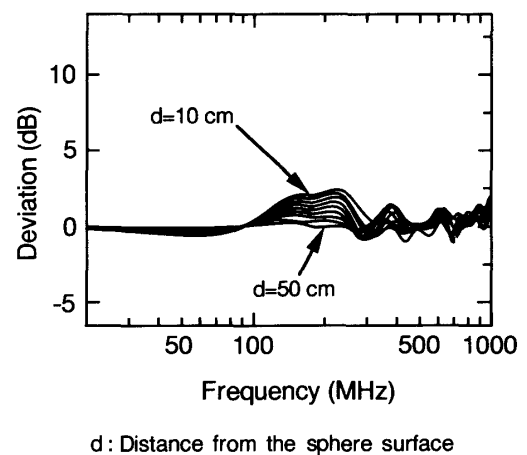


図3 導体球の散乱電界計算結果例  
(球の直径50 cm)

Fig. 3 A calculation result of the scattered electric field by a conductive sphere (sphere diameter = 50 cm).

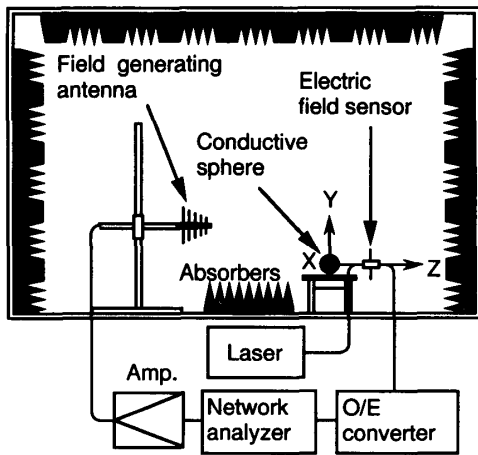


図 4 散乱電界の測定系 (電波暗室)  
Fig. 4 Setup for scattered field measurement (semi-anechoic chamber).

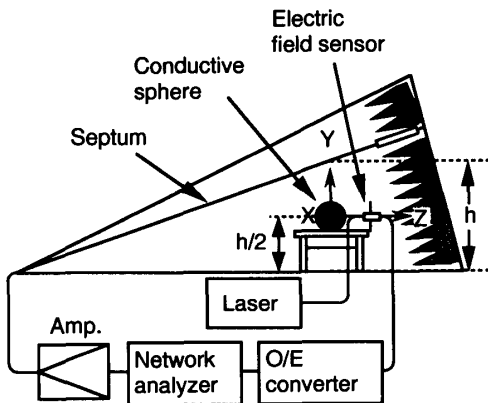


図 5 散乱電界の測定系 (GTEM セル)  
Fig. 5 Setup for scattered field measurement (GTEM cell).

様である。導体球を置いた位置は、各印加装置を用いたイミュニティ試験で供試機器が通常設置される位置である。電波暗室の場合、高さ 80 cm の非導電性支持台上で送信アンテナから 3 m の位置に、TEM セル、GTEM セルの場合導体球の中心が内部導体と外部導体間の中央と一致するように置いた。また電波暗室の場合、供試機器が内場の場合の印加電界が IEC 801-3 で要求される均一性を満足するように、導体球と電磁界印加アンテナ間の床面に電波吸収体を配置した<sup>(9)</sup>。導体球周囲の電界は LiNbO<sub>3</sub> 光変調器を用いた電界センサ<sup>(10)</sup> を使用し、導体球の中心を通る平面上において、球面から 10~50 cm の範囲を 5 cm 間隔で測定した。光変調器を用いた電界センサは、エレメント以外はすべて非金属で構成されており、測定する電界をほとんど乱さない。更に、抵抗を装荷したエレメントによっ

表 1 測定に用いた試験装置のサイズ

	サイズ (高さ×幅×奥行き)	内部導体と外部 導体の間隔 (m)
電波暗室	8 m×20m×15m	—
TEMセル	3.8m×2.0m×2.0m	1.0 m
GTEMセル	2.8m×7.7m×4.0m	1.45 m

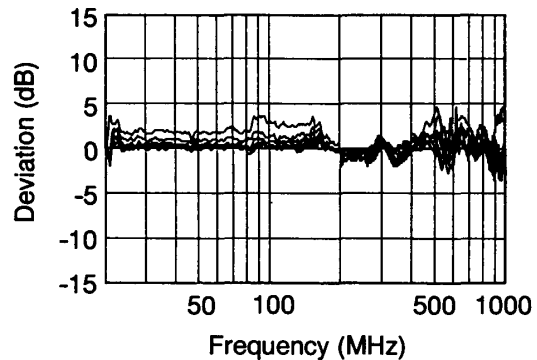


図 6 散乱電界測定例 (電波暗室)  
(球の直径 50 cm, Z 軸方向)  
Fig. 6 A result of scattered electric field measurement (semi-anechoic chamber) (sphere diameter = 50 cm, Z axis).

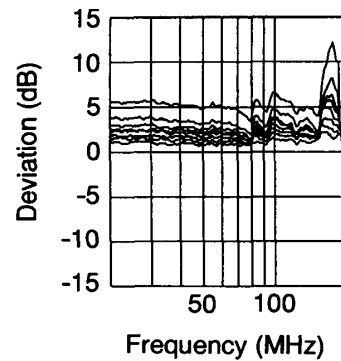


図 7 散乱電界測定例 (TEM セル)  
(球の直径 50 cm, Z 軸方向)  
Fig. 7 A result of scattered electric field measurement (TEM cell) (sphere diameter = 50 cm, Z axis).

て共振を抑え、DC~1 GHz の広帯域で一定の感度特性を有している<sup>(10)</sup>。測定周波数の上限は各印加装置で放射イミュニティ試験を行う場合の上限周波数とし、周波数範囲は電波暗室、GTEM セルが 20 MHz~1 GHz、TEM セルは 20~200 MHz である。測定に用いた試験装置の大きさを表 1 に示す。但し TEM セル、GTEM セルの内部導体と外部導体の間隔は、導体球を置いた位置での間隔を示している。

球の直径が 50 cm の場合の測定例を図 6～図 8 に示す。これらは図 4 および図 5 中の Z 軸上の測定結果である。TEM セルについては、GTEM セルの場合と同様に、図 5 中の Z 軸上に相当する位置での測定結果である。縦軸は導体球がある場合とない場合の電界強度の差を示している。図に示すように、電波暗室における導体球近傍の電界分布が、導体球がない場合に対して最も偏差が小さく、20 MHz～1 GHz にわたって  $\pm 5$  dB 以内である。これに対し TEM セルの場合は 150 MHz 以上、GTEM セルの場合は 200 MHz 以上で偏差が 10 dB を超えている。これは、TEM セル、GTEM セルは導体球周囲に金属壁があり、散乱波が壁で反射され球近傍の電界分布を乱しているためと考え

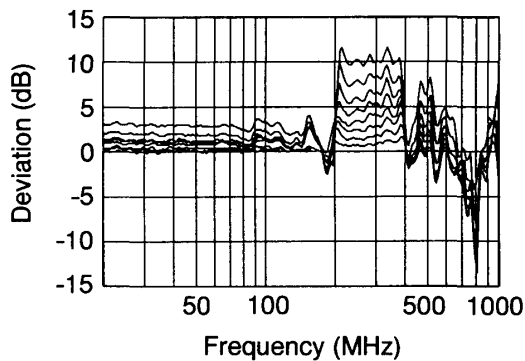


図 8 散乱電界測定例 (GTEM セル)  
(球の直径 50 cm, Z 軸方向)

Fig. 8 A result of scattered electric field measurement (GTEM cell) (sphere diameter=50 cm, Z axis).

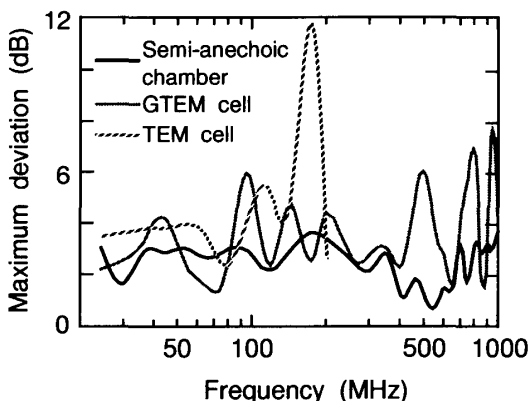


図 9 散乱電界理論値と測定値の最大偏差  
(球の直径 50 cm)

Fig. 9 Maximum deviation between measured and calculated scattered electric field (sphere diameter=50 cm).

られる。

#### 2.4 供試機器が存在する場合の電界分布の評価

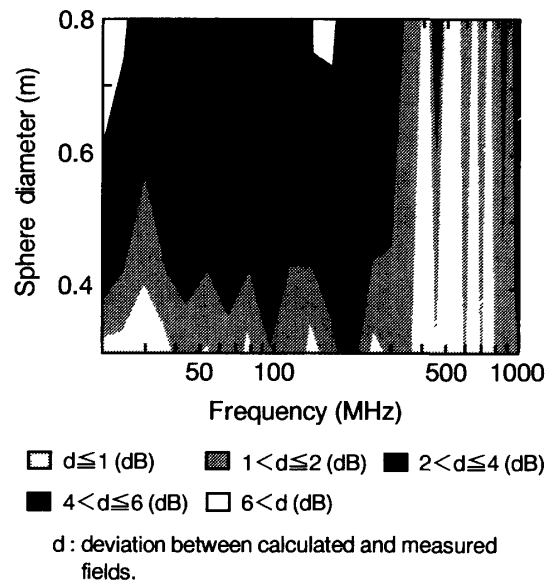
供試機器が存在する場合、電磁界印加装置内の電界分布を評価するため、理論値と測定値を比較した結果を図 9 に示す。この図は球の直径が 50 cm の場合の、理論値と測定値の偏差の最大値を示している。図からわかるように、どの電磁界印加装置でも周波数が高くなるにつれて偏差が大きくなる傾向を示している。また、電波暗室、GTEM セル、TEM セルの順で、偏差が大きくなっていることがわかる。

TEM セルや GTEM セルのように、内部導体、外部導体といった金属壁に囲まれた狭い空間に供試機器を設置する場合に比べ、電波暗室のように電波吸収体壁に囲まれた広い空間に供試機器を設置したほうが、平面波をより忠実に模擬できると考えられ、図 9 に示す結果はこのことを裏付けている。

### 3. 供試機器の大きさと電界分布との関係の評価

TEM セル、GTEM セルの場合、イミュニティ試験が可能な供試機器の大きさは内部導体と外部導体の間隔に依存する。ここでは、導体球の大きさと電磁界印加装置内の電界分布との関係を測定した。

図 10～図 12 に導体球の直径と、理論値と測定値の



d : deviation between calculated and measured fields.

図 10 直径と理論値と測定値との差の関係  
(電波暗室)

Fig. 10 Relation between the deviation of the fields and sphere diameter (semi-anechoic chamber).

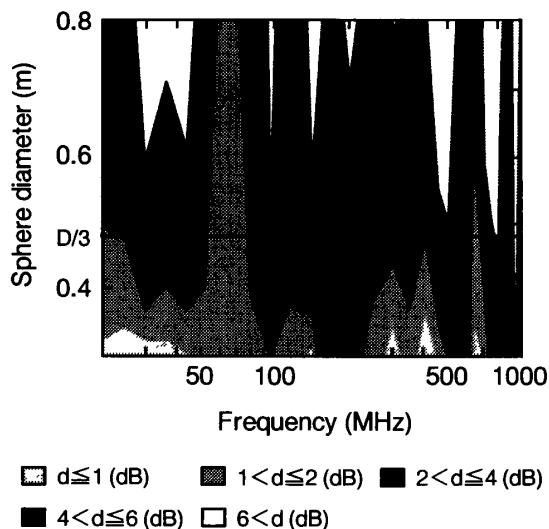


図 11 直径と理論値と測定値との差の関係 (GTEMセル)

Fig. 11 Relation between the deviation of the fields and sphere diameter (GTEM cell).

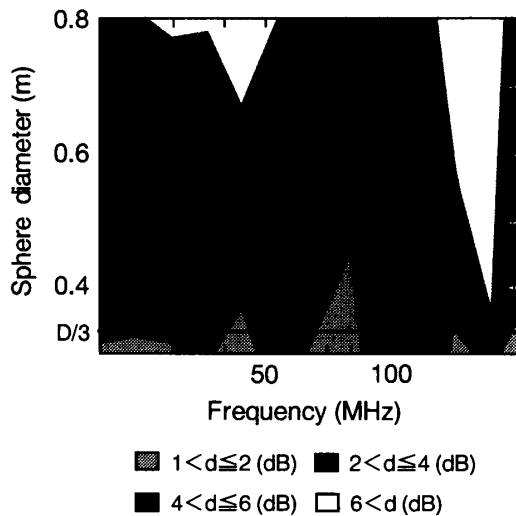


図 12 直径と理論値と測定値との差の関係 (TEMセル)

Fig. 12 Relation between the deviation of the fields and sphere diameter (TEM cell).

偏差の関係を示す。これらの図は、周波数 20 MHz～1 GHz において対数軸上で等間隔な 20 の周波数に対し

て、理論値と測定値の偏差と導体球の直径との関係求めたものである。但し、実際は直径 30, 50, 80 cm の場合のみ測定しており、その他の直径については直線近似によって求めている。また、図 11 および図 12 中の  $D/3$  は、TEM セル、GTEM セルの内部導体と外部導体の間隔の  $1/3$  と等しくなる直径を示している。

各印加装置とも導体球の直径が大きくなるに従って、理論値と測定値の偏差が大きくなる傾向を示している。また、偏差が大きくなる割合は TEM セルの場合が最も大きく、GTEM セル、電波暗室の順で小さくなっていることがわかる。

前述のように、電磁界印加装置については、供試機器が存在しない場合の電界均一性として、 $0 \sim +6$  dB という値が規定されている。いま、この値を供試機器が存在する場合についてそのまま適用すると、導体間隔の  $1/3$  以下の大きさであれば、TEM セルの場合は  $20 \sim 200$  MHz、GTEM セルの場合は  $20 \sim 900$  MHz の範囲で、この値を満足できることがわかる。一般的に TEM セル、GTEM セルの試験可能な供試器の大きさは、内部導体と外部導体の間隔の  $1/3$  以下といわれており、これは評価結果と良く一致している。

#### 4. む す び

自由空間における導体球近傍の電界分布理論値と、電波暗室等の放射イミュニティ試験電磁界印加装置内での電界分布測定値を比較することによって、放射イミュニティ試験電磁界印加装置の、供試機器が存在する場合の特性を評価した。

導体球近傍の電界分布理論値はベクトルモード関数を用いて求め、測定値は光変調器を用いた電界センサで測定した。電波暗室、TEM セル、GTEM セルについて評価した結果、電波暗室の場合が最も理論値に対する偏差が小さく、かつ周波数による変動も少ないことがわかった。

また、TEM セル、GTEM セルの場合、内部導体、外部導体間隔の  $1/3$  程度の機器までは、導体球がある場合とない場合の電界強度の偏差を、IEC で議論されている電界均一性の基準である、 $-0 \sim +6$  dB に抑えられることがわかった。

今後は導体球がどの程度実機を模擬しているか、供試機器に接続される通信線・電源線の影響を考慮した評価方法を確立する必要がある。

**謝辞** 本検討を進めるに当たり測定に御協力いただいた、通信 EMC 研究グループ・徳田研究グループ、なら

びに NTT アドバンステクノロジーの皆様に深謝致します。

### 文 献

- (1) 栗山明海：“通信端末機器の電磁雑音問題—現場における障害とその対策状況—”，電磁環境工学情報 EMC, No. 19, pp. 23-30 (1980-11).
- (2) IEC TC65A-77B (Sec.) 135/100: “Revision of IEC 801-3: Electromagnetic compatibility for electrical and electronic equipment Part 3: Immunity to radiated radio frequency electromagnetic fields” (1992-12).
- (3) CISPR/G (Central Office) 26 Pub. 24: “Immunity of Information Technology Equipment (ITE) Part3: Immunity to radiated radio frequency fields” (1992-12).
- (4) Perry F. Wilson and Mark T. Ma: “Simple approximate expressions for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells”, IEEE Trans. EMC, EMC-28, 3, pp. 125-132 (1986-8).
- (5) D. Koenigstein and D. Hansen: “A new family of TEM-cells with enlarged band width and optimized working volume”, Proc. 7th Int. Zurich Symp. and Tech. Exhb. on EMC, pp. 127-132 (1987-3).
- (6) 西岡亮一：“イミュニティ試験の現状”，KEC 情報 No. 134, pp. 38-41 (1989-10).
- (7) F. Attardo, C. Tarantola, M. Cappio Borlino, M. Guinta and L. Lavezzaro: “GHz TEM cell: Radiated immunity test performance”, Proc. 10th Int. Zurich Symp. and Tech. Exhb. on EMC, pp. 589-593 (1993-3).
- (8) 虫明康人, 安達三郎：“基礎電波工学”，pp. 199-203, 共立出版初版 3 刷 (1975-11).
- (9) 秋山佳春, 桑原伸夫, 広島芳春, 井手口健：“放射イミュニティ試験用電界分布特性”，1991 信学会春季全大, B-298
- (10) N. Kuwabara, K. Tajima and F. Amemiya: “Development and analysis of electric field sensor using LiNbO<sub>3</sub> optical modulator”, IEEE Trans. EMC, EMC-34, 4, pp. 391-396 (1992-12).

(平成 6 年 8 月 1 日受付, 6 年 11 月 28 日再受付)



### 徳田 正満

昭 42 北大・工・電子卒。昭 44 同大大学院修士課程了。同年，日本電信電話公社電気通信研究所入所。以来，光ケーブルの伝送特性測定法，通信装置の EMC 技術等に関する研究に従事。現在，NTT 通信網研究所徳田研究グループリーダー。工博。昭 61 年度業績賞受賞。著書「光通信要覧」の測定法に関する章。



### 井手口 健

昭 46 九大・工・通信卒。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。以来，電力線からの誘導対策用遮へいケーブルの研究，通信機器の耐雷試験法の研究，通信システムの EMC 試験評価技術の研究に従事。現在，NTT 通信網研究所通信品質研究部グループリーダー。



### 桑原 伸夫

昭 50 静岡大・工・電子卒。昭 52 同大大学院修士課程了。同年，日本電信電話公社茨城電気通信研究所入所。以来，通信システムの雷防護，光ファイバの信頼性評価，通信システムの EMI 評価，EMC における光計測技術などに関する研究・開発に従事。現在，NTT 通信網研究所主幹研究員。工博。



### 秋山 佳春

平 2 電通大・通信卒。同年 NTT 通信網総合研究所入所。以来，通信装置の EMC 試験評価法の研究に従事。現在，NTT 通信網研究所に勤務。