

論 文

模擬機器の電磁界放射特性と応用法の研究

南郷 隆裕[†] 松原 亮[†] 村川 裕基[†] 桑原 伸夫^{† a)}
 徳田 正満^{††}

Investigation of radiated electromagnetic field characteristics of imitated equipment
 and its application

Takahiro NANGO[†], Ryo MATSUBARA[†], Yuki MURAKAWA[†], Nobuo KUWABARA^{† a)},
 and Masamitsu TOKUDA^{††}

あらまし 電子機器から放射される電磁波が近隣の通信装置や電子機器に影響を与えたり、外部から進入する電磁波が機器の動作に影響を与えたりする現象に対する対策がIT化の進展とともに重要になってきている。本論文では、このような現象のうちプリント基板からの放射メカニズムの解明に用いるために、直方体金属箱を模擬的な波源（模擬機器）として提案している。模擬機器として使用するためには、これから放射される電磁界が理論的に求められることが必要であり、簡単な例として、模擬機器上に導体ループが存在する場合について電波無響室を使用して放射電磁界を測定しNEC-2を使用した解析値と比較を行った。検討の結果、測定値と解析値の偏差は50 MHz～1 GHzにおいて水平偏波で±2.5 dB、垂直偏波で±1.9 dB以内であり、この周波数帯域では解析により放射電磁界を求めることができることがわかった。次に、放射源としてプリント基板を模擬機器に実装した場合について検討した。NEC-2では局所的な誘電率の変化をデータとして入れることができないので、信号ライン部分に、マイクロストリップラインの特性インピーダンスと等しくなるようにインダクタンスとキャパシタンスを挿入して解析を行った。また、対策部品のインピーダンス変化も素子として装荷して解析を行った。電波全無響室における放射電界の解析結果と測定結果はほぼ一致しており、この模擬機器により、プリント基板からの放射特性や対策効果の解析が可能であることがわかった。

キーワード 放射妨害波、模擬機器、モーメント法、NEC-2、マイクロストリップライン

1. ま え が き

近年、電気・電子機器から発生する電磁波により、放送受信波や他の機器への障害、誤作動が問題となってきており、CISPR（国際無線障害特別委員会）で国際規格が作成され、既に多くの国で規制がなされている[1]、[2]。国内においては電気用品安全法、VCCI（情報処理装置等電波障害自主規制協議会）等で規制されている[3]。規制に対応するためには、機器から放射される電磁妨害波や妨害波に対するイミュニティを測定する必要があり、通常30 MHz～1 GHzの電磁妨害波測定はオープンサイト、電波半無響室が使用されており、イ

ミュニティ試験については電波全無響室、TEMセル等で行われている。

これらのEMC試験設備の評価には、アンテナ[4]や電界センサ[5]が使用されている。しかし、アンテナについては同軸ケーブルが周囲の電磁界を乱すことや、サイズが大きい等の問題点があり、電界センサについては、応答速度が遅い、周波数情報が得られない等の問題点がある。また、小型で同軸ケーブルを使用しないアンテナとして球状ダイポールアンテナや模擬機器（Imitated equipment）が報告されている[6]～[8]。

一方、規制に対応するための対策法として、プリント基板レベルでの対策があり、多くの測定や解析が行われている[9]～[12]。しかし、これらの放射メカニズムの検討や対策効果の評価は、電波半無響室の床面にプリント基板を設置して実施されており、直接波と床面の反射波の干渉が発生する問題点がある。また、非金属テーブル上に筐体やプリント基板を設置して放射メ

[†] 九州工業大学工学部電気工学科, 北九州市
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu
 Institute of Technology, Kitakyushu-shi, 804-8550 Japan

^{††} 武蔵工業大学電子通信工学科, 東京都
 Faculty of Electrocommunication Engineering, Musashi Institute of
 Technology, Tokyo, 158-8557 Japan

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

カニズムを検討した例[11]もあるが、信号線や電源線を含めた理論解析が困難であり、実験結果を主体とした評価に留まっている。

解析手法としては、FDTD法やモーメント法[12]が良く使用されてきている。モーメント法は放射電磁界強度が規定されている3mや10mの距離での電界強度の計算には適しているが、プリント基板に使用されている誘電体の影響や対策部品の効果の解析には問題があり、プリント基板の誘電体を容量素子で表して解析を試みた報告はあるが[12]、インダクタンスや抵抗を装荷してプリント基板の特性インピーダンスや対策部品の影響を検討した例はない。しかし、放射メカニズムや対策法を明らかにするためには、プリント基板上には多くの電子素子が実装されるので、それらを含めた解析手法の明確化が必要である。

これまで、プリント基板や筐体からの電磁界放射を解析するために、多くの試みがされてきている。しかし、複雑な機器をコンピュータで解析を行うには無理があり、放射メカニズムを検討して適切な解析モデルを明らかにすることが重要である。このような目的のためには、できるだけ、構造がシンプルなものが良く、従来は半無響電波暗室の床面に基板を配置して信号ケーブルを除去した方法が取られてきた。しかし、この方法では、床面の反射波と直接波が干渉して高さ方向の電界強度が大きく変化したり、床面の低い位置ではアンテナが床面の影響を受けるため、電界強度が正確に測定できない問題点がある。そのため、解析モデルの検討を行うための評価装置が必要になってきている。

本論文では、プリント基板の解析モデルの検討を行うために必要となる評価装置として模擬機器を提案し、その有効性について検討している。模擬機器として、O/E変換器を内蔵した直方体の金属箱を解析の容易さから使用し、解析手法としては、ワイヤの結合点にさまざまな受動素子を装荷することが可能なワイヤグリッド法を用いている。模擬機器上にプリント基板を配置し、基板と模擬機器を含めてワイヤグリッド法で解析することにより、床面の影響がない全無響室において放射特性の評価が可能となり、より詳細なモデルの妥当性の検討が可能になる。検討では、まず、解析により模擬機器からの放射特性を求めることができることを示すために、模擬機器にループ導体を実装したモデルを考えて、電波全無響室での測定結果と解析結果の比較を行っている。次に、模擬機器の解析モデル

評価への応用として、プリント基板の特性インピーダンスに一致するようにインダクタンスと容量を信号線を表すワイヤの結合点に装荷したモデル、対策部品をワイヤの結合点に装荷したモデルについて、その妥当性を評価している。

2. 模擬機器の構成

今回、作製したO/E変換器を内蔵した模擬機器の外観を図1に示す。模擬機器は電子機器の筐体を模擬しており、 $480 \times 360 \times 100$ (mm)の直方体である。直方体の外側は銅製で一種のシールドケースとなっており、内部にO/E変換器とバッテリーを内蔵している。本模擬機器は単純な構造をしているため、放射電磁界の解

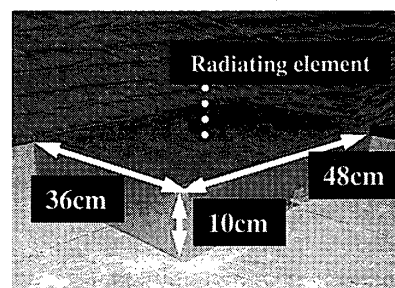
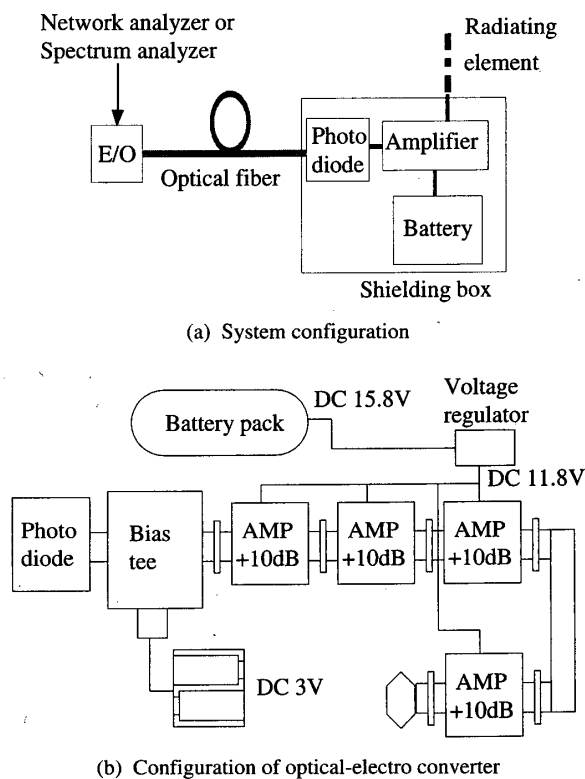


図1 模擬機器の外観

Fig. 1 External view of imitated equipment.



(b) Configuration of optical-electro converter

図2 模擬機器の構成

Fig. 2 Configuration of imitated equipment.

論文/模擬機器の電磁界放射特性と応用法の研究

析が容易である。本模擬機器の構成図及び筐体内部のO/E変換部の構成を図2に示す。O/E変換部は、PD、増幅器そして増幅器駆動用のバッテリーにより構成され、筐体でシールドすることにより周囲の電磁界への影響を与えないようにしている。増幅器の電源はリチウム電池であり、連続使用時間は約10時間である。

3. 模擬機器から放射される電磁界の解析

模擬機器から放射される電磁界の解析方法を検討するため、模擬機器の上面に図3に示すようなループがある場合について解析を行った。導体ループの形状は、($L = 20\text{ cm}$, $h = 5\text{ cm}$)であり、終端側は $50\ \Omega$ としている。ワイヤ半径は、 1.5 mm である。

3.1 放射電磁界の解析

模擬機器の放射電界の解析に当たっては、将来の拡張性を考えた場合、できる限り汎用性のある解析法を使用することが望ましい。本検討では解析に NEC-2 (Numerical Electromagnetics Code-2) [13]を使用した。NEC-2は境界をワイヤグリッドで近似を行うが、そのノードごとに電圧源、抵抗、インダクタンス、キャパシタンス等の素子の挿入が可能であるので、後で述べるようにプリント基板や対策部品を実装した状態での解析が可能となる利点がある。

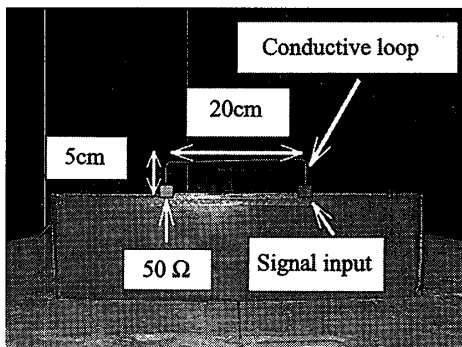


図3 導体ループを実装した模擬機器の外観

Fig. 3 External view of imitated equipment with loop conductor.

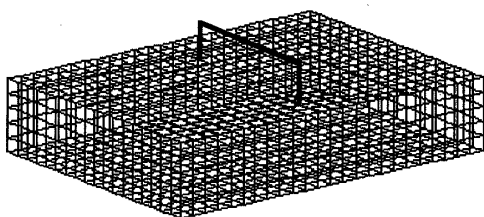


図4 NEC-2の解析に用いたワイヤグリッドモデル (セグメント数: 2598, ワイヤ本数: 2571)

Fig. 4 Wire grid model used for NEC-2 calculation (Number of segment: 2598, Number of wire: 2571).

NEC-2の解析モデルを図4に示す。図4に示すように、筐体部分をワイヤで近似して解析を行った。信号源は、導体ループと筐体の結合部に電圧源と $50\ \Omega$ の抵抗を挿入した。また、導体ループの終端と筐体の結合部に $50\ \Omega$ の抵抗を挿入した。

解析結果はワイヤの本数に依存する。ワイヤの本数と解析結果の関係を図5に示す。解析は freespaceで行っている。導体ループのセグメント数を30 (10 mm/セグメント)で固定し、模擬機器部分のワイヤ本数を18本から2,571本まで変化させて、30 MHzから1 GHzの帯域で電界強度を求めた。模擬機器とアンテナ間の距離は3 mとし、模擬機器配置高は0.8 mとし、受信アンテナ高は1 mである。図はワイヤ本数が一番多い2,571本の値を基準とした時の偏差を示している。図に示すように、ワイヤ本数が687本 (ワイヤ長40 mm/本以内)以上では偏差は $\pm 1.6\text{ dB}$ 以内であり、この周波数帯域ではワイヤ本数を2,571本 (ワイヤ長20 mm/本以内)とすれば、再現性良く電磁界強度の解析が可能であることがわかる。

3.2 模擬機器から放射される電界強度

解析結果の妥当性を確認するために図6に示す測定系で放射電磁界の測定を行った。測定には床面にフェライト吸収体を置いた電波全無響室[13]を使用し、模擬機器は床面から80 cmのターンテーブル上に置き、受信アンテナから3 m離して設置した。測定は30 MHzから1,000 MHzで行い、受信アンテナは各周波数帯域に合わせて、バイコンカルアンテナ、ログペリオディックアンテナを使用した。測定ではトラッキングジェネレータ付きのスペクトルアナライザを用いて模擬機器のE/O変換器の入力端と受信アンテナの出力端の挿入損失 L_a (dB)を測定した。 L_a の解析値は次の式で与えられる。

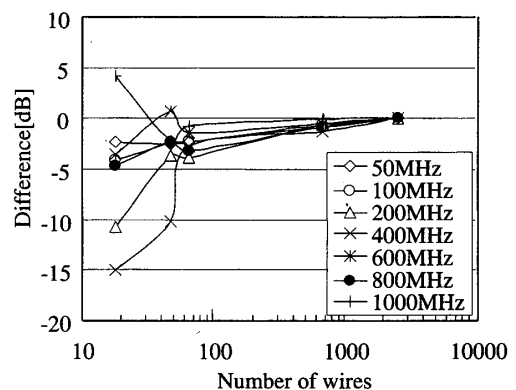


図5 ワイヤ本数の相違による解析値の変動
Fig. 5 Relation between number of wire and analysis value.

$$L_a = 20 \log \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right) = 20 \log \left(\frac{A_f V_1 \sqrt{P_{in} / P_1}}{E} \right)$$

$$= 20 \log \left(\frac{A_f \sqrt{P_{in} / P_1}}{2(E / 2V_1)} \right) = 20 \log \left(\frac{A_f \sqrt{L_b}}{2F_a} \right) \quad (1)$$

ここで、 A_f は受信アンテナのアンテナファクタで本論文ではカタログ値を使用した。 L_b は模擬機器のE/O変換器の入力端と筐体内部のO/E変換器の出力端の挿入損失で、本論文で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。 V_{in} 、 P_{in} は模擬機器の入力部の入

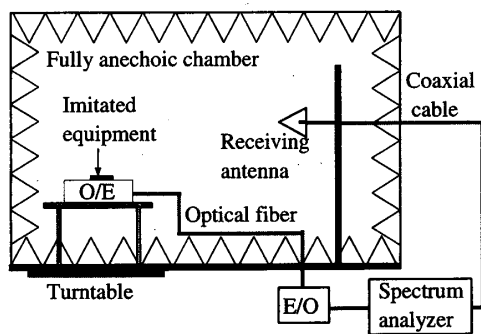
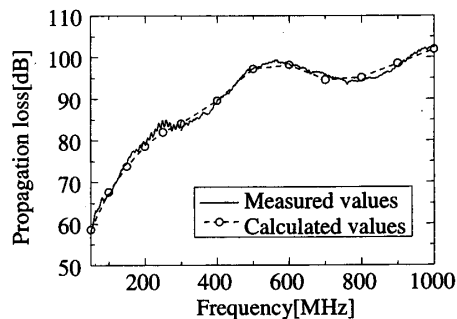
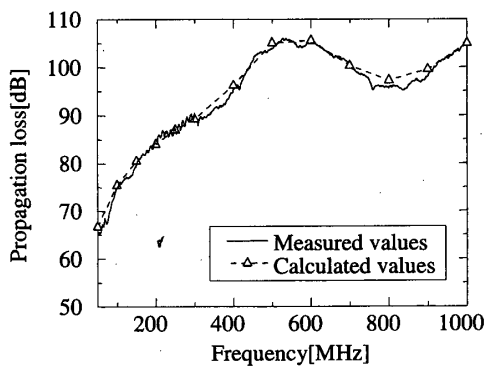


図6 放射電界強度の測定系
Fig. 6 Experimental setup for measuring electric field strength.



(a) Horizontal polarization



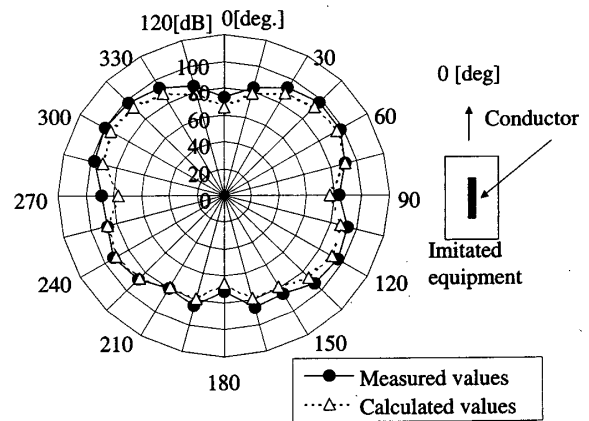
(b) Vertical polarization

図7 模擬機器より放射される電界強度の解析値と測定値
Fig. 7 Calculating and measuring results of radiated electric field strength from imitated equipment.

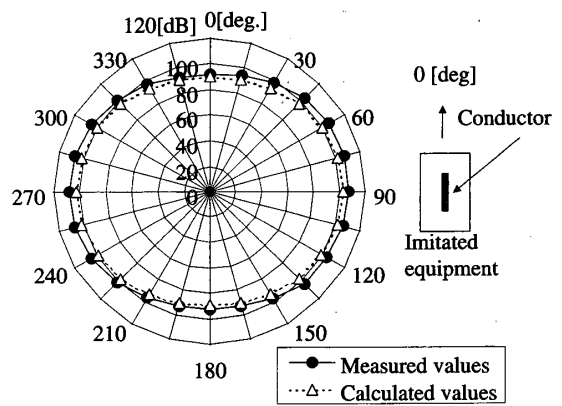
力電圧及び電力、 V_1 、 P_1 はO/E変換器の出力端を50Ωで終端したときの電圧及び電力、 F_a はNEC-2の解析モデルにおける電圧源の電圧値と図6のアンテナ位置における電界強度 E の比である。解析ではO/E変換器の出力インピーダンスは50Ωと仮定しているの、電圧源の電圧値は50Ω終端で測定した値の倍となる。

測定では、受信アンテナ高を1～4mの間で掃引させ、ターンテーブルを回転させた状態で、最大値を検出し、それを受信電界としている。なお、ターンテーブルに関しては10度ステップで回転させている。アンテナ高依存性は各テーブル角度でスペクトルアナライザを最大値ホールドの状態にして測定している。

解析結果と測定結果を図7に示す。なお、測定は30～1,000MHzで行ったが、30～50MHzの周波数帯域では測定系の感度が不十分で十分な精度が得られなかったため、評価は50～1,000MHzで行った。実線が測定値、波線が計算値である。両偏波共に、測定値と解析値はほぼ一致しており、その偏差は50MHz～1



(a) Horizontal polarization



(b) Vertical polarization

図8 模擬機器から放射される電界の角度依存性
Fig. 8 Angle pattern of radiated electric field strength from imitated equipment.

GHzにおいて、水平偏波で±2.5 dB、垂直偏波で±1.9 dB以内である。この結果より、50 MHz～1 GHzの帯域では、NEC-2により放射電界強度の最大値についてはほぼ解析可能であることがわかる。

次に、模擬機器の指向性パターンを図8に示す。図6に示す測定系を使用し、周波数600 MHzでの指向性パターンを示している。実線が測定値、波線が解析値である。図に示すレベルは挿入損失 L_a (dB)である。図より、解析値と測定値はほぼ一致しており、図4に示すモデルで指向性パターンの解析も可能であることがわかる。なお、高さ方向のパターンについては、解析モデルの妥当性の検討を行う上で重要であるが、今回の測定では最大値をホールドしたので検討しなかった。高さ方向のパターンについては今後の検討課題である。

以上の結果より、本章で使用した解析モデルにより、模擬機器からの放射特性の解析が可能であり、このモデルを用いて、プリント基板からの放射やその対策効果の解析が可能であることがわかる。

4. PCB実装モデルによる検討

模擬機器の応用法の一つとしてプリント基板からの電磁界放射メカニズムの解析がある。そこで、模擬機器にプリント基板(PCB)を実装した場合について検討を行った。PCBの信号ラインは、マイクロストリップ線路とした。PCB実装時の概観図を図9に示す。検討に使用したプリント基板のパラメータを表1に示す。

4.1 解析モデル

NEC-2では筐体部分をワイヤグリッドで近似を行っているため、プリント基板の誘電体材料の影響をうまく表すことができない。

そこで、本解析では基板上の信号ラインを等価的な円形状ワイヤでモデル化する。等価ワイヤの半径 r_{eq} は、

$$r_{eq} = 2h / \exp\left\{\left(Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}}\right) / 60\right\} \quad (2)$$

で表される[15]。ここで、 Z_c は、ストリップ線路の特性インピーダンスであり、 $W/h > 1$ で、

$$Z_c = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left[\frac{W_{eff}}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_{eff}}{h} + 1.444\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

となる。ただし、上式において W_{eff} はストリップ線路の厚さを考慮した場合の等価的な幅で、 $W/h > 1/(2\pi)$ のとき、

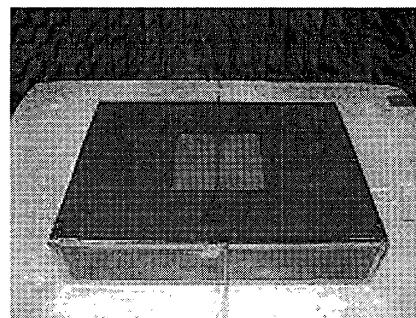


図9 プリント基板を実装した模擬機器の外観
Fig. 9 External view of imitated equipment with printed circuit board.

表1 検討に使用したプリント基板のパラメータ
Table 1 Parameter of printed circuit board used for examination.

| 項目 | 定数值 |
|-------------------|-------------|
| 基板サイズ | 150×150(mm) |
| 基板厚 h | 1.6mm |
| 誘電体材料 | ガラスエポキシ |
| 比誘電率 ϵ_r | 4.7 |
| 線路の長さ l_g | 150mm |
| 線路の幅 W | 3mm |
| 線路の厚さ t | 35 μ m |

$$\frac{W_{eff}}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1.25t/h}{\pi} \left[1 + \ln\left[\frac{2}{t/h}\right] \right] \quad (4)$$

となる。また、 ϵ_{eff} はプリント基板及びストリップ線路を等価的な均質媒質に置き換えた場合の実効誘電率であり、線路の厚さをゼロと仮定した近似式で表すと、

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

となる[16]。これより、表1に示すパラメータ値の場合、 ϵ_{eff} は、3.585、 Z_c は48.943 Ω 、等価ワイヤ半径 r_{eq} は0.6833 mmとなる。

NEC-2を用いてプリント基板上の電流分布を求めた結果を図10に示す。NEC-2の解析モデルは、図4に示すワイヤ本数2571のワイヤモデルを用いた。信号ラインは、長さ1 mmのセグメントで分割した。また線路の片端には内部インピーダンス50 Ω の電圧源を、もう一端には50 Ω の終端を接続した。図10で破線は500 MHzにおける計算値、◆印は測定値である。測定値は相対的なレベルしか測定できなかったため、最大値で正規化した値を示している。図に示すようにNEC-2では誘電体の影響を入れることができないため、線路の特性インピーダンスが50 Ω とならず、測定値と解析値には

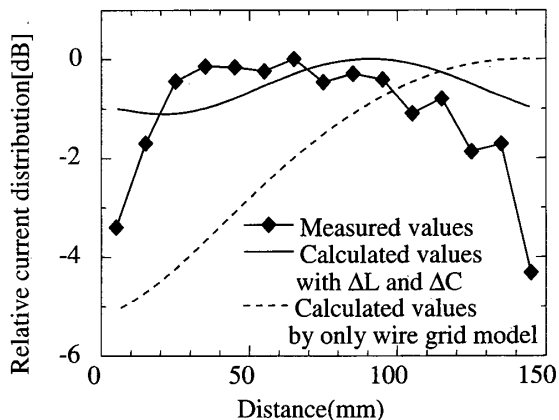


図10 ストリップ線路上の電流分布
Fig. 10 Current distribution on micro-strip line.

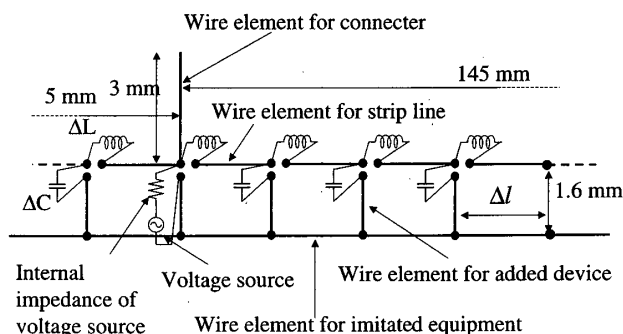


図11 誘電体を考慮した NEC-2 解析モデル
Fig. 11 Analysis model for NEC-2 calculation considering with influence of dielectric material.

大きな誤差が生じる。

そこで、ワイヤグリッドグリッドの各結合点にインダクタンスとキャパシタンスを挿入して特性インピーダンスを 50Ω にするモデルを考えた。解析モデルを図11に示す。図で ΔL , ΔC は次の式で与えられる。

$$\Delta L = (L_g - L_0) \cdot \Delta l \quad (6)$$

$$\Delta C = (C_g - C_0) \cdot \Delta l \quad (7)$$

ここで、 L_g , C_g はストリップ線路の単位長当りのインダクタンスとキャパシタンス、 L_0 , C_0 はワイヤグリッドで構成された線路の単位長当りのインダクタンスとキャパシタンス、 Δl はセグメントの長さ(m)である。

ストリップ線路の単位長当りのインダクタンスはストリップ線路の単位長当りの抵抗、コンダクタンスを無視すれば、文献[16]より次の式で与えられる。

$$L_g = \frac{Z_0}{v} \quad (8)$$

$$C_g = \frac{1}{vZ_0} \quad (9)$$

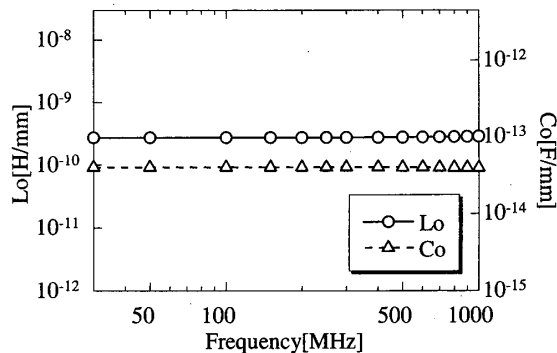


図12 ワイヤグリッドで構成される伝送路の線路一次定数解析結果
Fig. 12 Calculation results of primary line constant constructed with wire grid.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{eff}}} \quad (10)$$

ワイヤグリッドで構成された線路の単位長当りのインダクタンス L_0 , キャパシタンス C_0 は線路の遠端をオープン及びショートしたときの入力インピーダンス Y_f , Z_s , より求める。 Y_f , Z_s を用いると L_0 , C_0 は次の式で表される[17]。

$$L_0 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{Z_s}{Y_f}} (\alpha \sin \zeta + \beta \cos \zeta) \quad (11)$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{Y_f}{Z_s}} (-\alpha \sin \zeta + \beta \cos \zeta) \quad (12)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{\theta_s - \theta_f}{2} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{1}{l_g} \tanh^{-1}(Z_s Y_f) = \alpha + j\beta \quad (14)$$

$$Z_s = |Z_s| e^{j\theta_s} \quad (15)$$

$$Y_f = |Y_f| e^{j\theta_f} \quad (16)$$

式(11),(12)で ω は角周波数、式(14)で l_g は線路の長さである。 L_0 , C_0 の NEC-2 による計算結果を図12に示す。図12においてストリップ線路長は最大計算周波数である1,000 MHzにおける波長より十分短い50 mmとした。

図より、ワイヤグリッドで構成される線路は1,000 MHzまではほぼ一定のインダクタンス、キャパシタンスを有していることがわかる。図12よりワイヤグリッドで構成される線路の単位長当りのインダクタンス、キャパシタンスは $L_0=0.30$ (nH/mm), $C_0=0.045$ (pF/mm) となる。

この値を用いて、式(7), (8)により $\Delta C, \Delta L$ を求め、ストリップ線路上の電流分布を求めた結果を図10に同時に示す。図に示すように、電流分布の相対値は測定値とほぼ一致しており、図11に示すモデルにより、導体上の電流分布が比較的良く模擬できていることがわかる。

4.2 プリント基板から放射される電界強度

図4及び図11に示すワイヤグリッドモデルを用いて模擬機器から放射される電界強度を求め、電波全無響室における測定結果と比較を行った。測定には図6に示す測定系を用い、受信アンテナ高1mでターンテーブルを15度ずつ回転させて、挿入損失の最大値を測定し、式(1)を用いて求めた挿入損失と比較した。挿入損失の測定にはネットワークアナライザを使用した。計算結果、測定結果を図13に示す。図に示すように、解析値と測定値はほぼ一致しており、図4, 図11に示すワイヤグリッドモデルでプリント基板からの放射電界強度の最大値については解析が可能であることがわかる。

図14にストリップ線路の終端を開放したときの電界強度の計算値と測定値を示す。両偏波共に、解析値と

測定値はほぼ一致しており、線路の終端条件を変えても図4, 図11に示すワイヤグリッドモデルで放射電磁界強度の最大値については解析が可能であることがわかる。

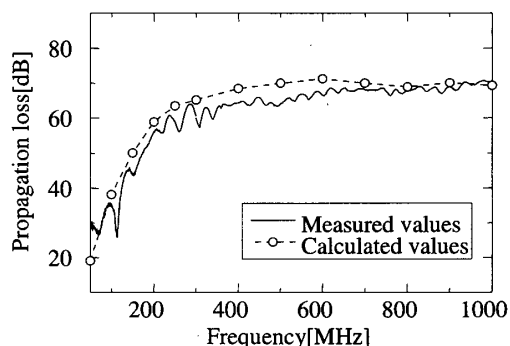
指向性パターンや高さ方向のパターンについては、筐体上の電流分布の影響や線路を集中定数で模擬したことの影響が出ることが予想され、本論文で用いたモデルがこれら電界強度分布まで評価可能であるかどうかは今後の検討課題である。

5. 対策部品の対策効果の解析

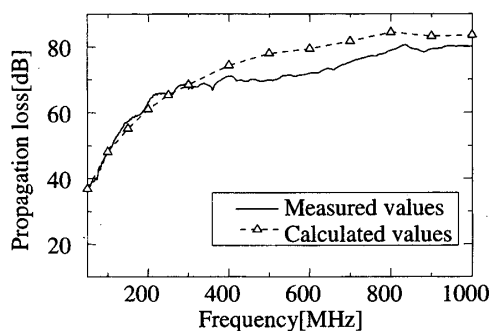
模擬機器を用いて、プリント基板に対策部品を実装したときの対策効果について検討した。対策部品の実装状況を図15に示す。図に示すように、給電点 (Signal source point) より10mmの位置に対策部品を実装した。

対策部品のインピーダンス特性を図16に示す。 R_a, X_a は対策部品のレジスタンスとリアクタンスを示している。

対策部品の対策効果を評価するためのワイヤグリッドモデルを図17に示す。ワイヤグリッドモデルでは図16に示すように、対策部品をLCRの等価回路で表してワイヤの結合点に実装することが可能であり、このよ



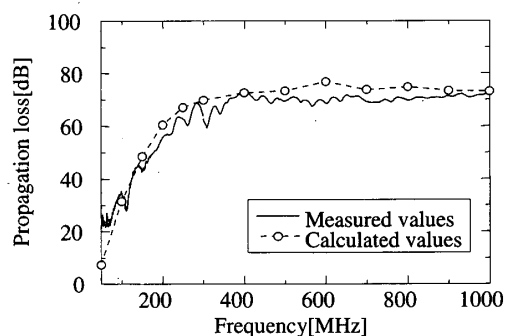
(a) Horizontal polarization



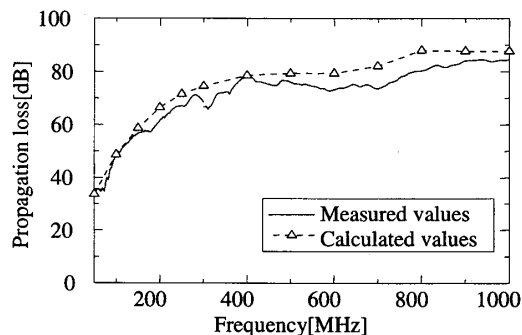
(b) Vertical polarization

図13 プリント基板から放射される電界強度の解析結果と測定結果

Fig. 13 Measurement and calculated result of electric field strength radiated from printed circuit board.



(a) Horizontal polarization



(b) Vertical polarization

図14 終端を開放したときの放射電界強度
Fig. 14 Radiated electric field strength when to end is opened.

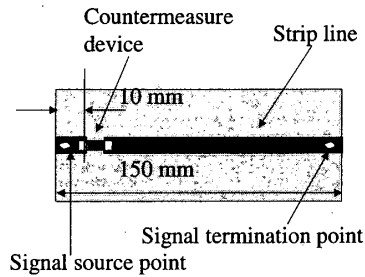


図 15 対策部品をインストールしたプリント基板
Fig. 15 Printed circuit board installing countermeasure device.

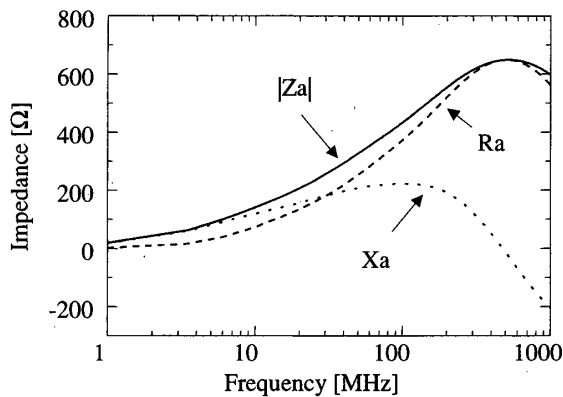


図 16 対策部品の周波数特性
Fig. 16 Frequency response of countermeasure device.

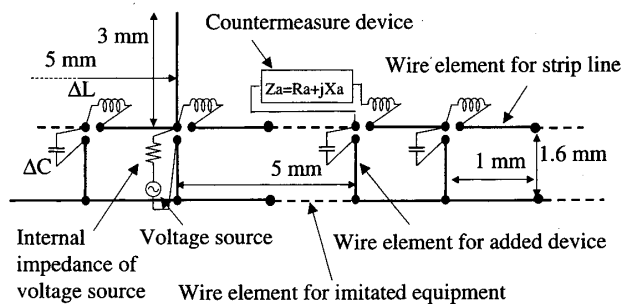
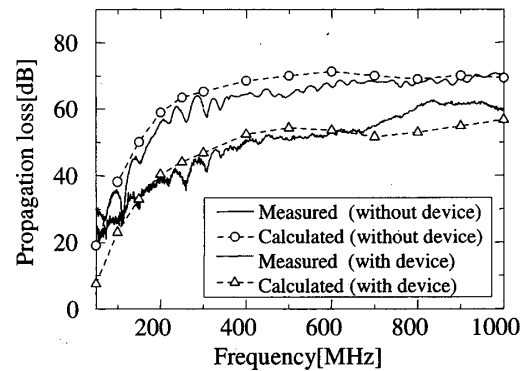


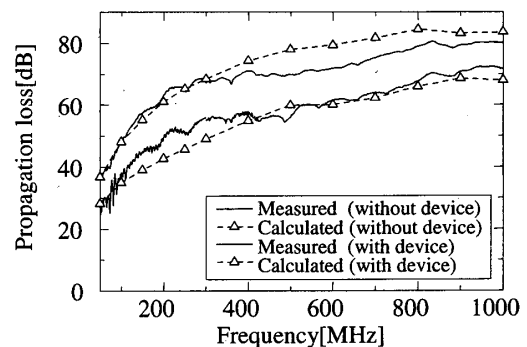
図 17 対策部品の効果の評価するために使用したワイヤモデル
Fig. 17 Wire grid model for estimating effect of countermeasure device.

うなモデルで対策効果の評価が可能であれば、従来回路シュミレータの領域であった対策部品の効果を電磁界解析シュミレータ上で取り扱うことができる。本論文では図 17 に示すように、ストリップ線路の給電点から 5 mm の位置に図 16 に示す対策部品のインピーダンスを挿入した。

図 6 に示す測定系を用いて測定を行った。模擬機器配置高は導体ループと同じ高さにプリント基板が来るように 90 cm、受信アンテナ高は 1 m として、ターンテーブルを 15 度ずつ回転させ、そのときの最大値をネットワークアナライザで測定し挿入損失とした。測定及び



(a) Horizontal polarization



(b) Vertical polarization

図 18 対策効果の解析結果と測定結果
Fig. 18 Calculation and measurement results of countermeasure effect.

解析結果を図 18 に示す。水平偏波については、最大で 20 dB 程度の対策効果が得られることがわかる。また、垂直偏波についても、検討した全帯域で同じ程度の対策効果があることがわかる。同様に、解析結果と測定値はほぼ一致していることがわかる。

以上の結果より、図 17 に示すように、対策部品を等価回路で表し、それをワイヤグリッドモデルに挿入することにより、対策効果の解析が可能であることがわかる。

6. むすび

プリント基板の解析モデルの検討を行うために必要となる評価装置として模擬機器を提案し有効性について検討した。本論文で提案している模擬機器は電子機器の筐体を模擬した直方体をしており、信号は光ファイバで給電するため解析が容易であると同時に床面の反射の影響がない 6 面暗室でモデルの妥当性を検討できる利点がある。

模擬機器上に導体ループを実装した簡単なモデルについて、解析を行い測定結果と比較を行った。解析には NEC-2 を使用し、測定には電波全無響室を使用し、放

射電磁界の最大値を測定した。検討の結果、50 MHz から 1,000 MHz で解析値の偏差を 1.6 dB 以内にするためには長さが 40 mm/本以内のワイヤエレメントが必要であること、解析値と測定値の偏差は 50 MHz から 1,000 MHz で ± 2.5 dB 以内であり、NEC-2 で放射電磁界最大値の解析がある程度可能であることがわかった。

次に、プリント基板からの放射メカニズムの解析を目的として、模擬機器上にプリント基板を実装した場合の放射電磁界の解析を行った。検討の結果、ストリップ線路のワイヤの結合部分にストリップ線路の特性インピーダンスに等しくなるようにキャパシタンスとインダクタンスを実装することにより、放射電磁界最大値の解析が可能であることがわかった。また、実装するキャパシタンスとインダクタンスをプリント基板の構造及びストリップ線路を表すワイヤグリッドの入力インピーダンスより決定する方法を示した。

最後に、プリント基板に対策部品を実装した場合の対策効果について、模擬機器を用いて解析を行った。その結果、対策部品のインピーダンス特性を求め、それを対策部品の挿入位置におけるワイヤグリッドの結合点に挿入することにより対策効果の解析が可能であることがわかった。

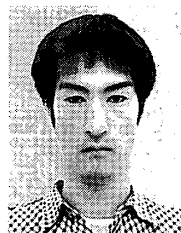
今後の課題としては、模擬機器の動作周波数の高周波域への拡大、筐体表面に流れる電流の影響の検討が考えられる。

謝辞 本検討に当り、有益な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] CISPR 16: "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus and Part 2: Methods of measurement of disturbance and immunity".
- [2] ANSI C63.4-1992, "American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emission from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9kHz to 40GHz".
- [3] 情報処理装置等電波障害自主規制協議会 (VCCI) 規約・規定類.
- [4] 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, 1995.
- [5] N. Kuwabara, K. Tajima, R. Kobayashi, and F. Amemiya, "Development and Analysis of Electric Field Sensor Using LiNbO₃ Optical Modulator," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.34, no.4, pp.391-396, 1992.
- [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.699-704, Dec. 1991.

- [7] M. Tokuda and N. Kuwabara, "Recent Progress in fiber Optic Antennas for EMC Measurement," IEICE Trans. Commun., vol.E75-B, no.3, pp.107-114, March 1992.
- [8] 川島鉄也, J.C. Aquino, 徳田正満, "O/E 変換器を内蔵した模擬機器による電波無響室の特性評価," IEEJ, EMC-99-1-9, pp.29-34, Dec. 1999.
- [9] 松原 亮, 宮内啓次, 石田康弘, 桑原伸夫, 徳田正満, "コプレーナストリップライン構造のプリント基板による放射電磁界抑制効果の検討," 信学技法, EMCJ2001-45-51, pp.1-6, Sept. 2001.
- [10] 宮内啓次, 石田康弘, 徳田正満, 金子敏己, "コンダクタ及びコンデンサ型 EMI フィルタを実装したマイクロストリップラインの放射特性解析," 信学技法, EMCJ2000-133, pp.25-30, March 2001.
- [11] 小暮裕明, 電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界, CQ 出版, 1999.
- [12] M. Mukai, S. Ohtsu, K. Nagase, and S. Nishino, "Analysis of Radiation from opening of metal cabinet enclosing printed circuit board," 1994 IEEE International Symposium on EMC, 17P506, pp.120-123, SENDAI, May 1994.
- [13] G.J. Burke and A.J. Poggio, "Numerical Electromagnetics Code (NEC), Method of Moments, Part I-III, Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
- [14] 徳田正満, 島田一夫, 石井博義, "九州工業大学に建設された電波無響室の仕様と特性 (その1), (その2)," 信学技法, EMCJ98-16, pp.41-48 (1998-05), pp.49-56 (1998-05).
- [15] M. Leone, H. Bruns, and H. Singer, "Fast EMC Analysis for Printed Circuit Boards Using an Equivalent-Wire Method of Moments," EMC'98 Roma, A-2, 1998.
- [16] Clayton R. Paul, EMC 概論, ミマツデータシステム, 1996.
- [17] 林 憲一, "有線電話伝送工学," p.98, 学献社, 1969. (平成 14 年 4 月 26 日受付, 10 月 10 日再受付)



南郷 隆裕 (学生会員)

平 10 鹿児島高専・電気卒. 平 12 九工大・工・電気卒. 現在, 同大学院修士課程在学中. 模擬機器を用いた放射電磁界の解析に関する研究に従事.



松原 亮 (学生会員)

平 13 九工大・工・電気卒. 現在, 同大学院修士課程在学中. プリント基板の電磁放射抑制対策に関する研究に従事.



村川 裕基 (学生員)

現在, 九工大・工・電気在学中. 模擬機器を用いた放射電磁界の解析に関する研究に従事.



徳田 正満 (正員)

昭42北大・電気卒. 昭44同大大学院修士課程了. 同年日本電信電話公社(現, NTT)入社. 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. 平8に九工大・工・教授. 平13より, 武蔵工大・工・教授. 工博. 昭61年度本会業績賞受賞.

IEEE 会員.



桑原 伸夫 (正員)

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(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.