

# EMC 測定・対策効率化支援技術マニュアル (平成 21 年度)

地域イノベーション創出共同体形成事業

研究開発環境支援事業

「EMC 測定・対策効率化支援技術の開発」

## 目次

1. はじめに.....	3
1.1 背景 .....	3
1.2 九州地域におけるこれまでの取り組み .....	3
1.3 本事業の目的 .....	3
1.4 本マニュアルの概要 .....	4
用語の解説.....	4
2. 放射ノイズ測定手順 .....	5
2.1 放射ノイズ測定に関する法規制の概要(VCCI) .....	5
2.2 試験環境を準備する手順と注意点.....	6
2.3 被試験体を設置する際の手順と注意点 .....	7
2.4 放射ノイズ測定ソフトで自動測定する際の手順と注意点.....	9
3. 電波暗室間相関.....	10
3.1 概要 .....	10
3.2 相関に影響を与える要因 .....	10
3.3 実機相関測定 .....	14
用語の解説.....	20
参考文献 .....	20
4. EMC 対策支援ソフトウェアによる放射ノイズ源可視化および放射ノイズ推定.....	21
4.1 概要 .....	21
4.2 波源モデリングの原理 .....	22
4.3 放射ノイズ源可視化 .....	23
4.4 放射ノイズ推定.....	25
用語の解説.....	27
参考文献 .....	27
5. 近傍界測定による EMC 対策支援.....	28
5.1 近傍界測定によるイミュニティ対策 .....	28
5.2 近傍電磁界強度分布の可視化による EMI 対策支援.....	33
5.3 被試験体誤動作監視システムについて .....	36
6. ノイズ対策のための基礎知識.....	39
6.1 基本素子の周波数特性 .....	39
6.2 ツイストによる誘導ノイズの低減 .....	42
6.3 コモンモード信号とディファレンシャルモード信号 .....	44
6.4 コモンモードチョークの効果 .....	45
6.5 TDR による様々な基板のインピーダンス特性測定 .....	47
用語の解説.....	49
参考文献 .....	49
7. ノイズ対策部品の活用(デジタルノイズ対策) .....	50
7.1 受動部品を使ったノイズ対策 .....	50
7.2 ローパスフィルタについて.....	50

7.3 デジタルノイズ対策 .....	52
7.4 受動部品を使ったデジタルノイズ対策 .....	54
7.5 実験結果.....	58
用語の解説.....	58
参考文献.....	58
執筆者一覧 及び 問い合わせ先.....	59

## 1. はじめに

### 1.1 背景

昨今、企業が電気電子機器を商品化する際には、EMC (Electro-magnetic Compatibility 電磁両立性) 規格規制に対応するための測定・対策が不可避である。さらに、製品安全・信頼性に対する市場要求の高まりや、電子機器の小型化・高速化・高機能化・複合化に伴い、EMC 規格規制の拡大・強化が進んでいる。また、企業から公設試験研究機関(以下、公設試)に対し、“顧客から、EMC 測定データの提出を要求された” “市場で電磁ノイズが原因と思われる機器故障や誤動作等のクレームが発生し、検証を急ぎたい” 等の相談が寄せられることも多い。

このような中で、企業は EMC 測定・対策を効率的に行わないと、販売開始の遅れや対策費用の負担など深刻な影響を受けることになる。しかし、その対応に、専用設備、最新の情報、高度な技術を要し、一般に容易ではない。

#### 【主な EMC 規格・規制】

国際規格： IEC (国際電気標準会議)、CISPR (国際無線障害特別委員会)

海外・地域規格： FCC (米国連邦通信委員会)、EN (欧州規格)

国内規制・基準： 電波法、電気用品安全法、薬事法、  
VCCI (情報処理装置等電波障害自主規制協議会)

### 1.2 九州地域におけるこれまでの取り組み

九州内各公設試においては、以前より小型電波暗室を稼働、企業の製品開発支援を行うとともに、EMC 関連技術研究会 (福岡県 EMC 研究会、RIST 電磁環境技術検討会 (熊本県)、鹿児島県 静電気対策技術研究会 等) を組織し、交流連携と情報提供を進めている。また、EMC 技術者協会九州支部 (H11 年発足、会長＝熊本高専下塩教授) の運営・合同セミナーや、人材育成 (H20 年度～北部九州地域 EMC 技術人材育成事業 等) 等の活動を行ってきた。他にも、九州内大学・高専等において、EMC に関する様々な研究を実施している。

一方、H14 年、直轄産業振興センター (ADOX 福岡、福岡県直方市) が設立され、大型電波暗室等を備える九州初の公的 EMC 規格適合試験サイトとして稼働を開始した。ニーズ拡大に伴い、H20 年 3 月、第二大電波暗室、車載機器用電波暗室等が整備され、現在その規模は西日本最大級となっている。

### 1.3 本事業の目的

本事業においては、下記九州内公設試・大学・高専等が協力、技術シーズを整理・高度化し、EMC 測定・対策の効率化を阻む要因となっている問題の改善を図る (図 1-1 研究開発の概要 参照)。集約された技術情報・研究開発成果はマニュアル化し、日常の技術相談や研究会、人材育成等で活用することで、企業が EMC 測定・対策を行う際の効率化支援、製品開発の促進につながることを期待するものである。

#### 【参加機関】

産業技術総合研究所九州センター、福岡県工業技術センター機械電子研究所、  
熊本県産業技術センター、鹿児島県工業技術センター、九州工業大学、熊本工業高等専門学校

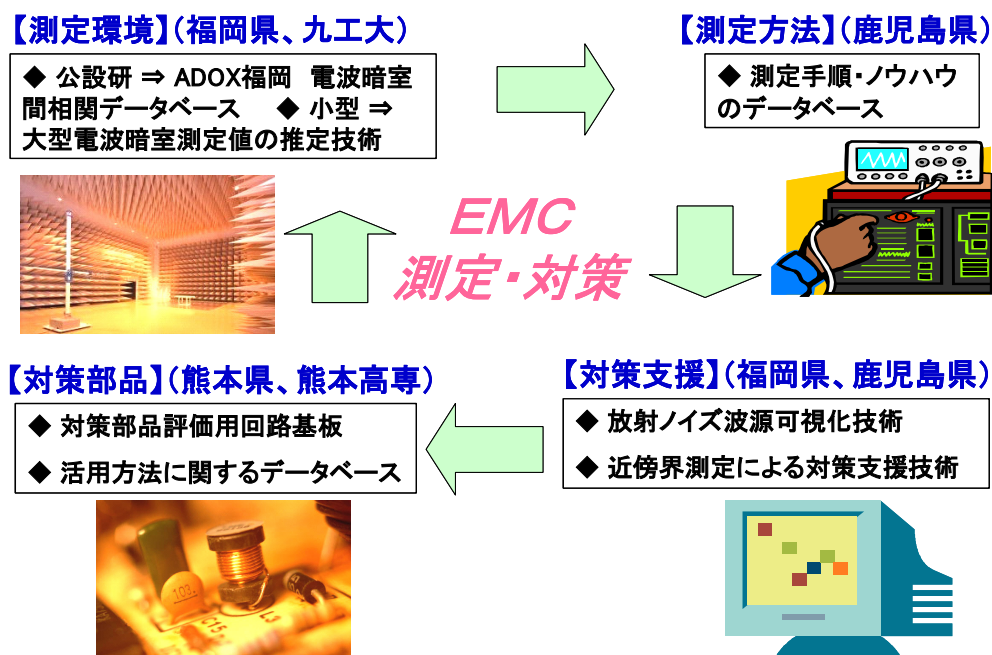


図 1-1 研究開発の概要

#### 1.4 本マニュアルの概要

EMC 技術の関連項目は大変広範囲に及ぶため、本マニュアルは、企業からのニーズが特に高い項目において、本研究開発グループが集約した技術情報やオリジナルの研究開発成果を中心に構成した。

まず、第2章は EMC 測定の中で最もニーズの高い“放射ノイズ測定”についてその手順を、第3章は放射ノイズ測定の効率化に大きく影響する“電波暗室間関連”について記している。また第4章、第5章では、EMC 対策支援の強力なツールとなる、遠方界及び近傍界を利用したソフトウェアやシステム等について記している。さらに第6章、第7章では、実践に多く用いられる EMC 対策部品に着目し、基礎知識及び部品活用について記している。

#### 用語の解説

##### 【遠方界】

放射源から比較的遠方距離にある場のことで、近傍界と対比され、その境界としては波長/(2π) が用いられることが多い。同距離でも、高周波では遠方界、低周波では近傍界となりうる。遠方界においては、電界と磁界の関係が一定となり、“電磁波”の性質を示す。

##### 【近傍界】

遠方界と反対に、放射源から比較的近傍距離にある場のこと。電界と磁界の関係は一定ではない。

## 2. 放射ノイズ測定手順

### 2.1 放射ノイズ測定に関する法規制の概要(VCCI)

日本国内における代表的なEMC規制に VCCI 規格がある。VCCI とは、「情報処理装置等電波障害自主規制協議会」の略称で、情報処理装置、電気通信機器および電子事務用機器からの妨害波がもたらす障害を自主的に防止するために、関係業界 4 団体の(社)日本電子工業振興協会(JEIDA)、(社)日本事務機器工業会(JBMA)、(社)日本電子機械工業会(EIAJ)、通信機械工業会(CIAJ)によって1985年12月19日に設立され、2009年4月には一般財団法人 VCCI 協会(以後、(財)VCCI 協会と表記)となり、EMC 規格に関する様々な活動を行っている。

(財)VCCI 協会のホームページ(<http://www.vcci.jp/index.html>)には、規程集として、図 2-1 に示すように、自主規制措置運用規程、技術基準、試験機器の校正方法、市場採取試験に関する規程などが掲載されている。

本章では、(財)VCCI 協会のご了解を頂き、(財)VCCI 協会のホームページに記載されている技術基準(V-3/2009.04 付則 1)からの抜粋も交え、実際の測定サイトで放射ノイズ測定を行う際の手順や注意点などについて説明する。なお、被試験体の種類等に応じて様々な注意事項等も掲載されているので、詳細な試験手順については、(財)VCCI 協会のホームページの規程集で確認すること。

図 2-1 (財)VCCI 協会の HP に掲載されている規定集

表紙	VCCI 規程集	日本語	英語
V-2/2009.04	自主規制措置運用規程	日本語	英語
V-3/2009.04	付則 1 技術基準	日本語	英語
V-3/2008.04	付則 1 技術基準2008年度版です。2010年3月31日まで有効です。	日本語	英語
V-4/2009.04	付則 1-1 供試装置の試験条件の補則	日本語	英語
V-12/2008.04	付則 1-2 ダイポールアンテナによるサイトアッテネーション測定方法の解説	日本語	英語
V-10/2009.04	付則 1-3 測定機器の校正および点検	日本語	英語
V-5/2009.04	付則 2 測定設備等の登録に関する規程	日本語	英語
V-6/2009.04	付則 2-1 測定設備等の管理のガイドライン	日本語	英語
V-11/2009.04	付則 2-2 測定設備等の登録に関する書類の記入要領	日本語	英語
V-7/2009.04	付則 3 市場採取試験に関する規程	日本語	英語
V-A2/2009.04	キットモジュール運用規程	日本語	英語
V-A3/2009.04	付則 1 キットモジュール妨害波測定 技術基準	日本語	英語
V-A4/2009.04	付則 1-1 キットモジュール妨害波測定 測定条件	日本語	英語
V-A5/2009.04	付則 2 キットモジュール設備届出規程	日本語	英語

技術基準は国際規格(IEC)の改定に応じて、年々、改訂が進んでおり、現在、(財)VCCI 協会のホームページに掲載されている最新の技術基準は 2009 年4月 1 日運用開始版である。

この技術基準は、「1. 目的、適用範囲」、「2. 参照文書」、「3. 用語の定義」、「4. 許容値」、「5. 測定設備」、「6. 測定方法」、「7 測定設備・装置の不確かさについて」の7章構成となっており、この中で、放射ノイズ測定を正しく行うための注意事項については、「6. 測定方法」に記載されている。

第6章は、更に、「6. 1 共通事項」、「6. 2 供試装置の配置」、「6. 3 電源ポート伝導妨害波の測定法」、「6. 4 通信ポート伝導妨害波の測定法」、「6. 5 妨害波電界強度の測定法」と項立てされている。

「6. 1 共通事項」において、電源、温度条件、供試装置の構成、供試装置(EUT)の動作、他、「6. 2 供試装置の配置」において、卓上型装置の場合、床置型装置の場合、卓上・床置型装置の組合せの場合、最大放射配置の決定などについて規定されている。

それらの規定に準拠した事前準備を完了した後に、「6. 5 妨害波電界強度の測定法」に従って放射ノイズ測定を行う。

被試験体の条件に応じて、様々な注意事項などが記載されており、測定を行う予定の電子機器について十分注意する必要がある。

## 2.2 試験環境を準備する手順と注意点

試験環境(被試験体(EUT)を設置する台の寸法、アンテナとの距離、電波的特性(サイトアッテネーション)、計測器類の仕様等)については、規格の技術基準に細かく規定されており、全ての規定を満足し、各法規制の運営機関に登録されている試験場は、一般的に、認証サイトと呼ばれている。

これに対し、受信アンテナの移動範囲や、電波的特性、計測器の性能等の関係で全ての技術基準には準拠していない場合、認証サイトでの測定値に対して、ある程度、誤差を有していることを認識しておく必要がある。

この誤差の生じる度合いは、ノイズの発生源の位置や周波数等により、変わるため、単純に補正することは難しい。

また、同じEUTを同じ測定サイトで測定する場合でも、試験環境の可動部分の設定が異なったり、測定系のケーブルの断線、緩み、校正等が、測定結果が異なる原因となるため、十分に注意する必要がある。

実際に各試験サイトで放射ノイズの測定を行う際の手順や試験の再現性に影響する注意事項について表 2-1 に示す。

表 2-1 試験環境を準備する手順と注意点

- 全ての試験設備の電源を投入し、暖機運転する。
- アンテナマストの向きや距離を、ターンテーブル中心に対して正確に合わせる。
- アンテナマスト・ターンテーブルコントローラの設定と、アンテナ高さ、ターンテーブルの向きを正確に合わせる。
- ターンテーブル(T/T)上の机の向きを0度に正確に合わせる。
- EUT用コンセントの電圧をテスター等で確認し、調整する。
- アンテナをマストへ取り付ける際は、上下、水平度を確認する
- アンテナから計測器までの同軸ケーブルのコネクタの緩みを確認し、増し締めする。
- 電波を反射する不要物は室外へ出す。
- 暗室のドアを厳重に閉める。

### 2.3 被試験体を設置する際の手順と注意点

被試験体(EUT)の配置についての注意事項を表 2-2 に示す。また、卓上型装置の試験配置例を図 2-2、図 2-3 に示す。

表 2-2 VCCI の技術基準に記載されている測定上の注意点

- 代表的な使用状態に矛盾しない範囲で、試験サンプルの配置を変えることによって、妨害を最大にするように試みなければならない。
- 最大の妨害を生ずる配置を見出すために、ケーブルの位置を変えたときの影響を調べなければならない。
- 試験報告書には最大の妨害を生ずる配置を正確に記録すること。
- 試験時間を短縮するために、尖頭値測定用受信機を準尖頭値測定用受信機または平均値測定用受信機の代わりに使用しても良い。伝導妨害波の合否判定の場合は付属文書Ⅲを用いて実施すること。妨害波電界強度の場合は準尖頭値許容値を満足していることを確認すること。なお、疑義が生じた場合は、準尖頭値許容値の測定には、準尖頭値測定用受信機が優先され、平均値許容値には、平均値測定用受信機が優先される。
- 測定結果が再現できるように、ケーブルおよび装置の配置や向きの詳細な説明を測定結果に添付しなければならない。許容値に適合するために使用上の特別な条件がある場合は、それらの条件、例えば、ケーブルの長さ、ケーブルの形式、シールドおよび接地などを規定し、文書化すること。これらの条件は、使用者用の説明書に記載しなければならない。

出典:VCCI付則1 技術基準 V-3-2009.04(P25)



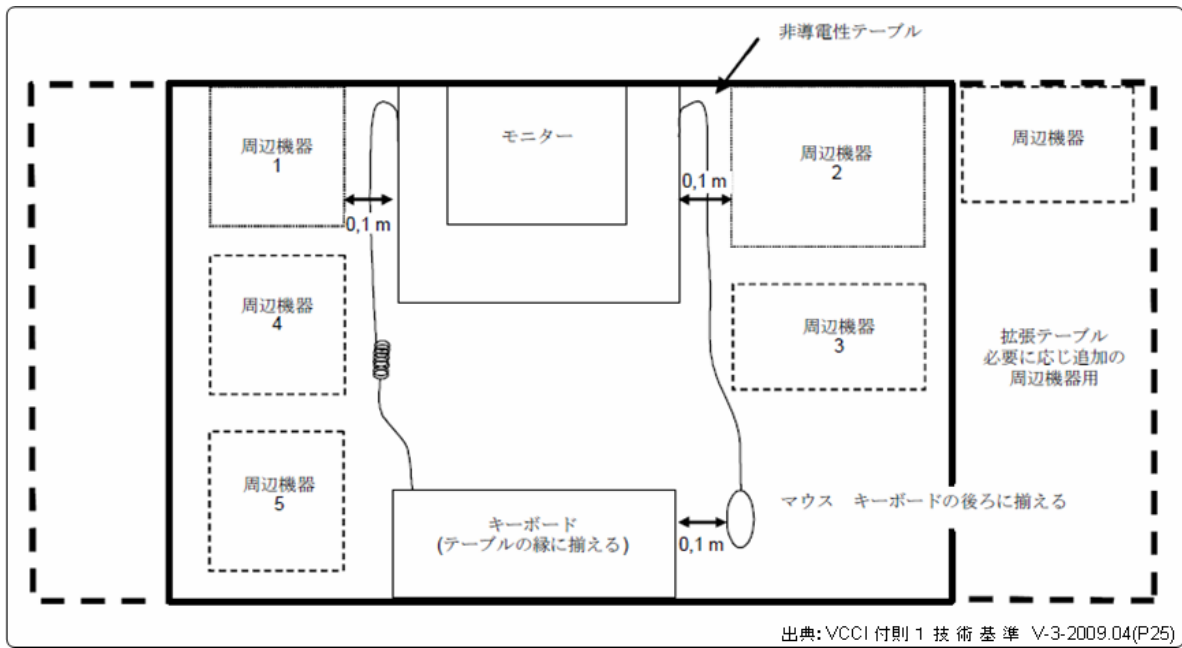


図 2-2 VCCI の技術基準に記載されている卓上型装置の試験配置例(上面図)

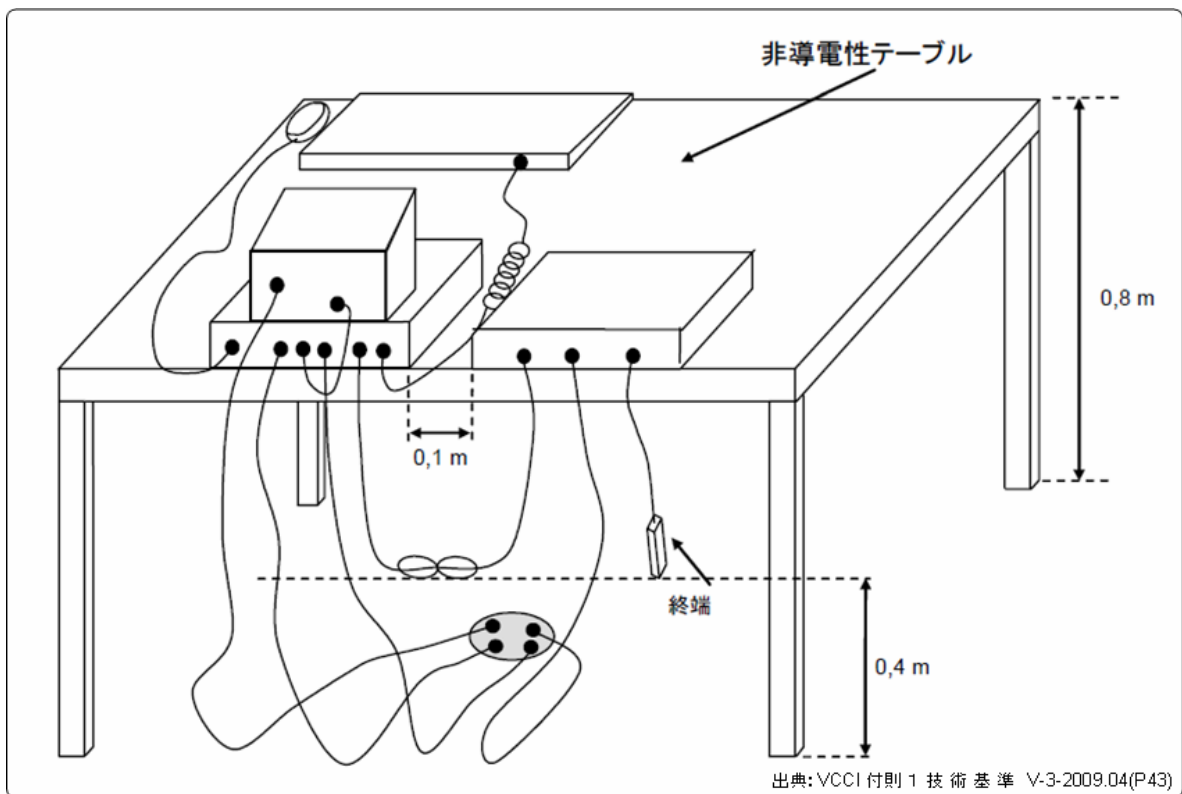


図 2-3 VCCI の技術基準に記載されている卓上型装置の試験配置例(側面図)

## 2.4 放射ノイズ測定ソフトで自動測定する際の手順と注意点

通常、殆どの測定サイトには、放射ノイズ測定用ソフトが用意されており、アンテナやターンテーブルの制御、アンテナファクタやケーブルロスの計算、測定結果の保存、グラフ表示等を行ってくれるため、試験従事者の作業負担が非常に軽減される。しかし、間欠的にノイズが発生する場合や、非常に強力なノイズが発生している場合、測定ソフトに頼りすぎると、最大ノイズを見逃し、誤った判断をしてしまう場合がある。このため、計測器(スペアナやEMIレシーバ)の測定画面を監視し、EUTから発生しているノイズが間欠的であるかどうか、ノイズレベルが強く、アンプ等が飽和状態になっていないかを確認する必要がある。

測定ソフトで測定する際の手順や注意点を表 2-3 に示す。

表 2-3 測定ソフトで測定する際の手順と注意点

- 測定ソフトを起動する
- 測定条件を選択／設定する
  - 測定条件の設定を十分確認する
    - 周波数範囲, プリアンプの有無, アンテナの種類
- PEAK測定を開始する
  - 飽和に気をつける
- 測定結果を保存する
- QP測定を行う周波数を選択する
- QP測定を実施する
  - 間欠ノイズの場合, 手動で最大方位, 高さを求める
- 測定結果を保存する
- 測定結果を印刷する

### 3. 電波暗空間相関

#### 3.1 概要

情報技術装置からの放射ノイズは図 3-1 に示すように無限に広い金属面上で測定される。被試験体(EUT)と受信アンテナの距離は 3m または 10m で規定されており、その距離において受信アンテナの地上高を 1m から 4m まで変化させ、さらに、受信アンテナの偏波面を垂直と水平に変化させて、その最大電界強度を放射ノイズレベルとしている<sup>3-1)</sup>。10m 法における限度値と、3m 法における限度値との間に 10dB の差があるため、放射ノイズレベルは、距離に反比例すると考えられる傾向がある。しかし、この関係が成り立たないことが指摘されている<sup>3-2),3-3)</sup>。

本章では、3m 法と 10m 法の測定結果の相関性について検討を行い、距離に反比例しない理由を定量的に明らかにする<sup>3-4)</sup>。さらに、複数の EUT を対象として両者の測定結果を比較し、その傾向を明らかにする。

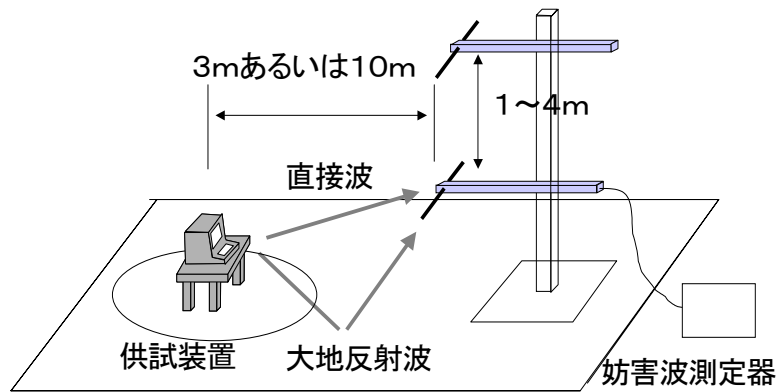


図 3-1 放射ノイズ測定系

#### 3.2 相関に影響を与える要因

電磁波を光線近似した時に放射ノイズレベルに影響を与える要因を図 3-2 に示す。図に示すように、影響を与える要因として、(1)EUT の電磁波放射特性(指向特性)、(2)受信アンテナの指向性および大地面の影響、(3)大地面の反射波の影響が考えられる。そこで、これら項目の依存性について、ダイポールアンテナ、微小ループアンテナ、模擬機器<sup>3-5)</sup>を例にとって検討を行った。

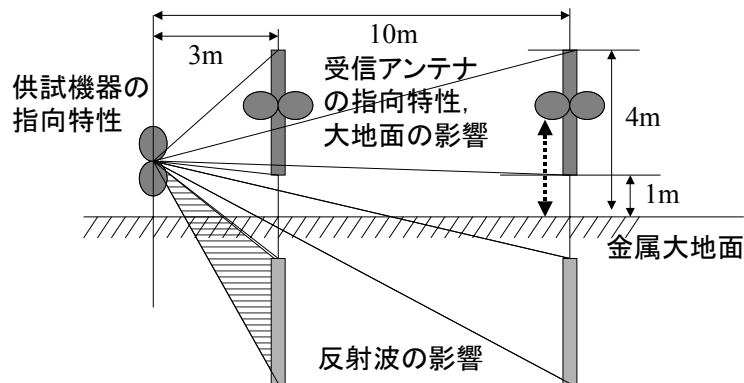


図 3-2 妨害波レベルの距離依存性に影響を与える要因

### 3.2.1 ダイポールアンテナを波源とした時の電界強度の距離依存性

放射ノイズのサイト評価に使用されるダイポールアンテナを放射源として、電界強度の距離依存性の検討を行った。測定誤差の影響を避けるため、モーメント法<sup>3-6)</sup>を用いて検討した。アンテナの掃引範囲を実際の測定系と同じとするため、80MHz 以下では 80MHz の半波長にエレメント長を設定した短縮ダイポールアンテナを、80MHz 以上では半波長ダイポールアンテナを使用し、終端抵抗は 73 Ωとした。送信アンテナ高は EUT の設置高さに近い 1m とした。

結果を図 3-3 に示す。縦軸は 10m 法放射電界強度を基準とした 3m 法放射電界強度の偏差を示している。電界強度が距離に反比例するのであれば、その偏差は約 10.5dB ( $\cong 20\log_{10}(10/3)$ )となる。比較のため、半波長ダイポールアンテナを自由空間に配置した時の偏差を併せて示す。自由空間においても 200MHz 以下では送受信アンテナ間の相互作用により偏差は 10.5dB よりも最大で 3dB 程度小さくなっているが、200MHz 以上ではほぼ 10.5dB となる。

水平偏波の場合、アンテナは大地面と垂直な面内では無指向性となるので、指向特性の要因は除くことができるが、200MHz 以下で最大 3.1dB、200MHz 以上でも最大 2.3dB の偏差が生じている。200MHz 以上では、アンテナへの大地面の影響はほとんど考慮する必要が無いので、これは直接波と大地面反射波の経路長差の影響であると考えられる。特に 10m 法において電界強度のハイパターンの複数のピークが生じる 700MHz 以上においても、最大で 1.2dB の偏差が生じており、直接波と反射波伝搬路の経路長の比が影響を与えていると考えられる。

垂直偏波の場合、アンテナは大地面と垂直な面内で指向特性を有するので、この影響が発生する。図に示すように 200MHz において 7.1dB の偏差が生じており、アンテナの指向特性は距離依存性に大きな影響を与えていることがわかる。

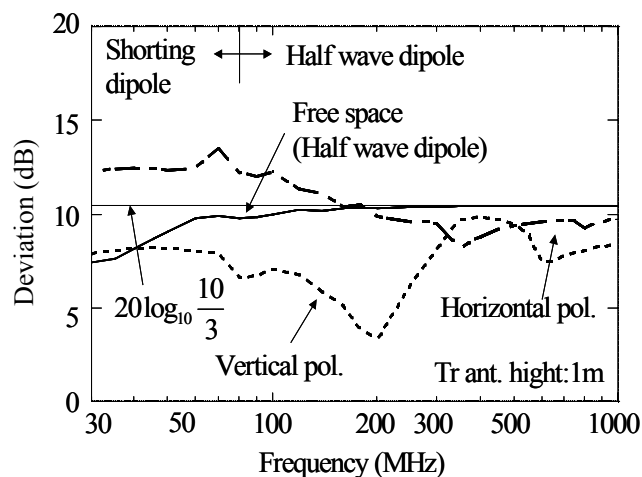


図 3-3 ダイポールアンテナから放射される電界強度の距離依存性

### 3.2.2 微小ループアンテナを波源とした時の電界強度の距離依存性

前節で、指向特性が距離依存性に大きな影響を与えることがわかった。そこで、極端な指向特性の例として、微小ループアンテナを放射源とした時の電界強度の距離依存性を検討した。

微小ループアンテナの指向特性を図 3-4 に示す。これは1辺の長さ 1cm の正方形ループの作る電界の水平成分の指向特性である。1辺の長さが最高周波数 1000MHz の波長より十分短いため、周波数による指向特性の変化がほとんどないことがわかる。また、この指向性は水平方向にヌルがあ

り、直接波に寄与する0度から180度の部分と、反射波に寄与する180度から360度の部分で位相が反転していることが特徴である。

距離依存性の解析結果を図3-5に示す。ループアンテナはループ面の法線方向をアンテナ方向とし、設置高さをダイポールアンテナと同様に1mとした。電界の垂直成分は非常に小さな値となるので、水平成分の距離依存性のみを示している。水平偏波では250MHzで8.3dBの偏差が発生している。ダイポールアンテナの場合と比較すると、水平偏波1.2dB、垂直偏波7.1dBよりも大きな値となっており、放射源の指向特性が距離依存性に大きな影響を与えることを示している。

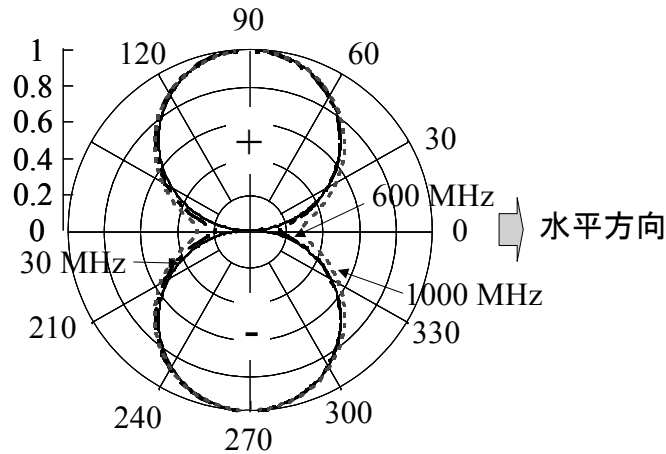


図3-4 微小ループアンテナの指向特性

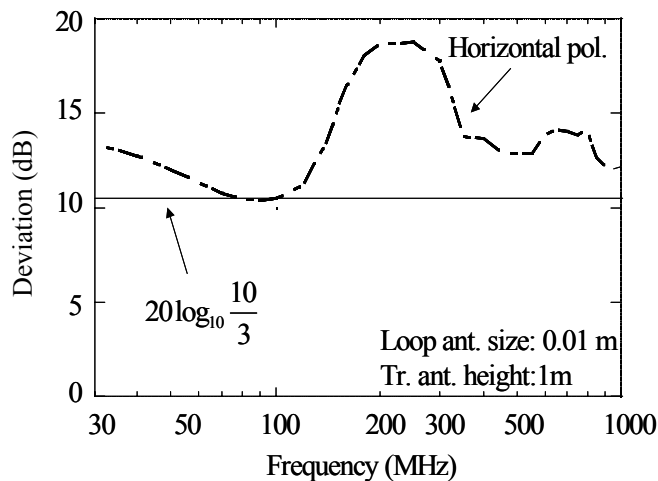


図3-5 微小ループアンテナから放射される電界強度の距離依存性

### 3.2.3 模擬機器を波源とした時の電界強度の距離依存性

これまでの、ダイポール波源、微小ループ波源と典型的な波源モデルについて検討を行って来たが、より実際の機器に近い波源として、模擬機器を波源とした場合の電界強度の距離依存性について検討を行った。

模擬機器の外観を図3-6に示す。模擬機器は、図に示すように銅の箱の上面に矩形のループを取り付けたものであり、銅の箱内部に配置されている光—電気変換器により、外部から光ファイバを

介して、放射する周波数やレベルを制御可能である。指向特性は微小ループアンテナに近い特性を示している。模擬機器は構造が単純であるため、モーメント法を用いて放射電界強度の解析が可能である。

水平偏波の放射電磁界の解析結果を図 3-7 に示す。測定値と解析値はほぼ一致しており、解析により放射電界強度の距離依存性評価が可能であることがわかる。また、3m 法における電界強度の周波数特性と、10m 法における電界強度の周波数特性は類似していることがわかる。

図 3-8 に、10m 法を基準とした時の 3m 法の電界強度偏差を示す。300MHz 以上では、電界強度偏差は距離比に比例すると仮定した場合の傾向線に近い値が得られるが、100MHz~200MHz では最大で 17dB 程度の大きな偏差が発生している。これは微小ループの最大偏差(8.3dB)よりも大きな値である。模擬機器は大地面と平行な面に対し非対称な構造をしているため、大地面と垂直な面内の指向性も非対称となり、その影響が表れているためと考えられる。

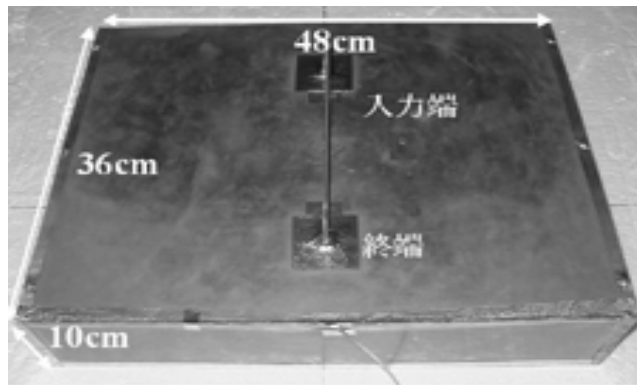


図 3-6 模擬機器の外観図

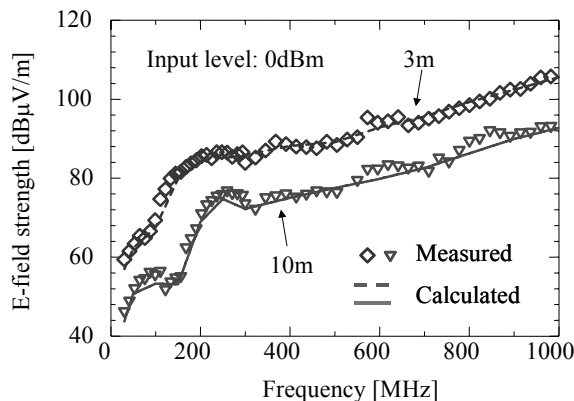


図 3-7 電界強度の測定値と解析値

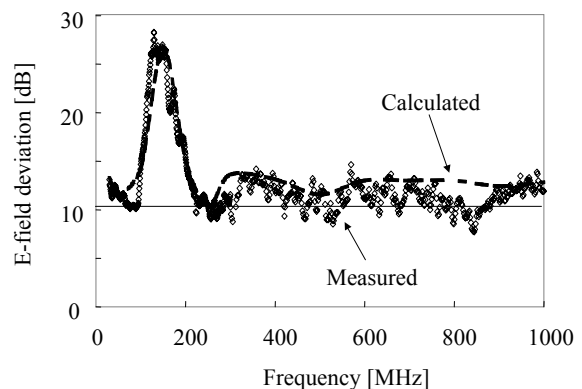


図 3-8 電界強度の距離依存性

### 3.2.4 まとめ

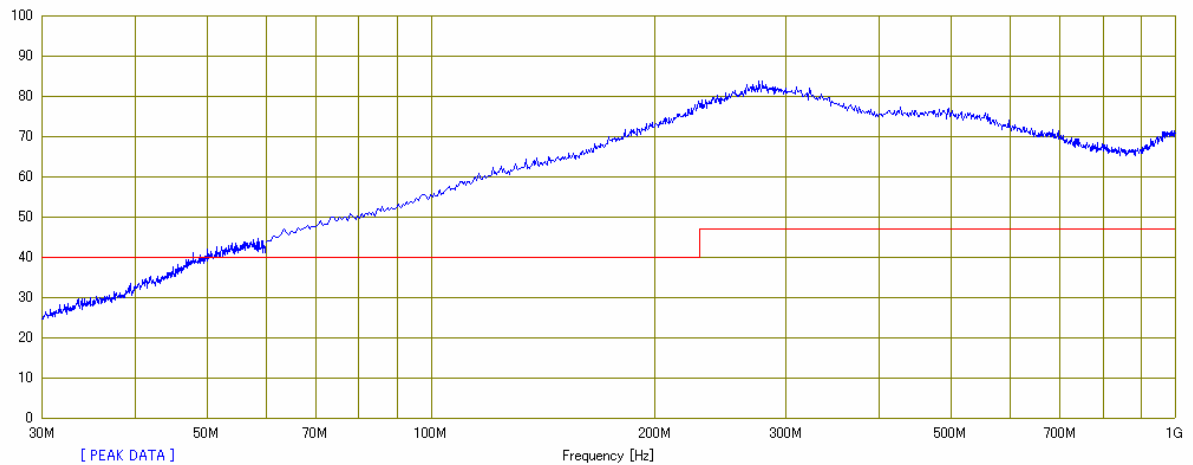
- (1) EUT から放射する電磁界強度偏差は距離比に比例しない。しかし、300MHz~1000MHz の周波数では 5dB 程度の誤差を許容すれば、距離比に比例すると考えて 10m 距離の放射ノイズレベルを求めることができる可能性はある。高い周波数における偏差の要因としては直接波と反射波の経路長差や放射源の指向特性が考えられる。

- (2) 距離依存性に最も影響を与えるのは EUT の放射電磁界の指向特性である。その影響は 300MHz 以下で顕著に発生する。
- (3) 直接波と反射波の経路長差や EUT の指向特性の影響は放射ノイズの測定が各距離で地上高 1m から 4m の電界強度の最大レベルを測定していることに起因しており、この測定法を使用する限りは避けられない。

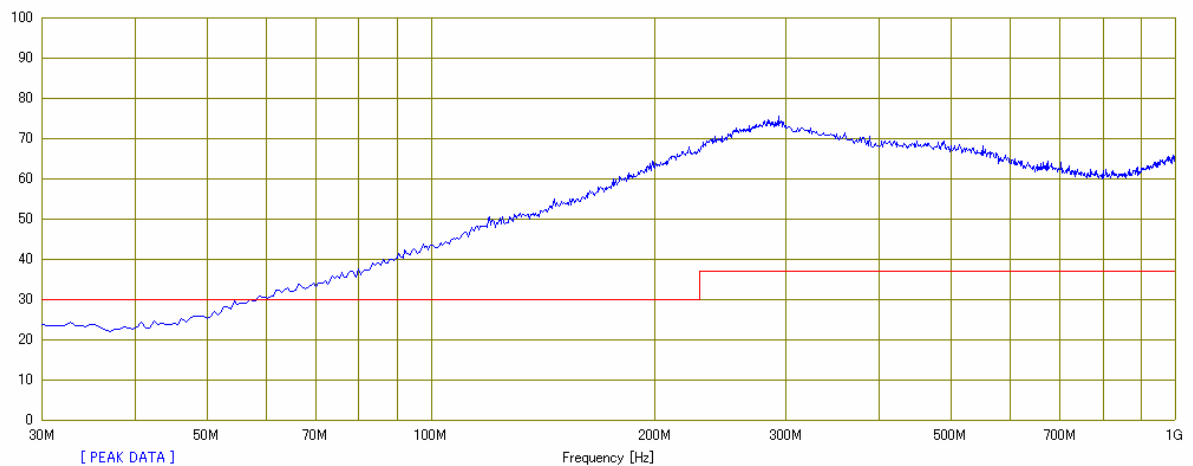
### 3.3 実機関連測定

#### 3.3.1 白色ノイズ発生器

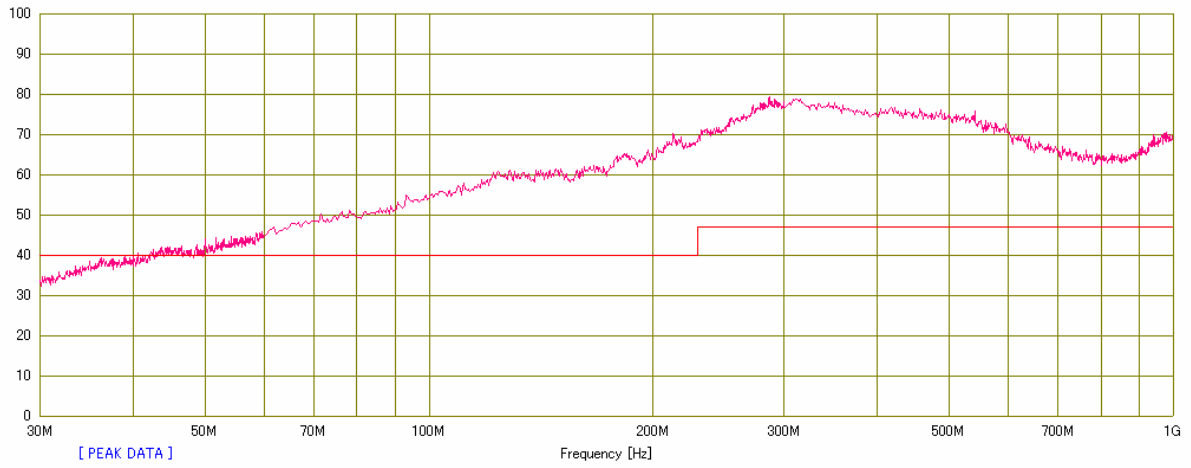
白色ノイズ発生器を EUT とした場合の放射ノイズ測定結果を図 3-9 に示す。3m 法、10m 法ともに同一サイトで実施し、基準値は VCCI クラス B としている。基準値に対するマーゲンの比較では、水平偏波、垂直偏波ともに概ね 5dB 程度の偏差となるが、200MHz 以下において偏差が大きくなる傾向にある。



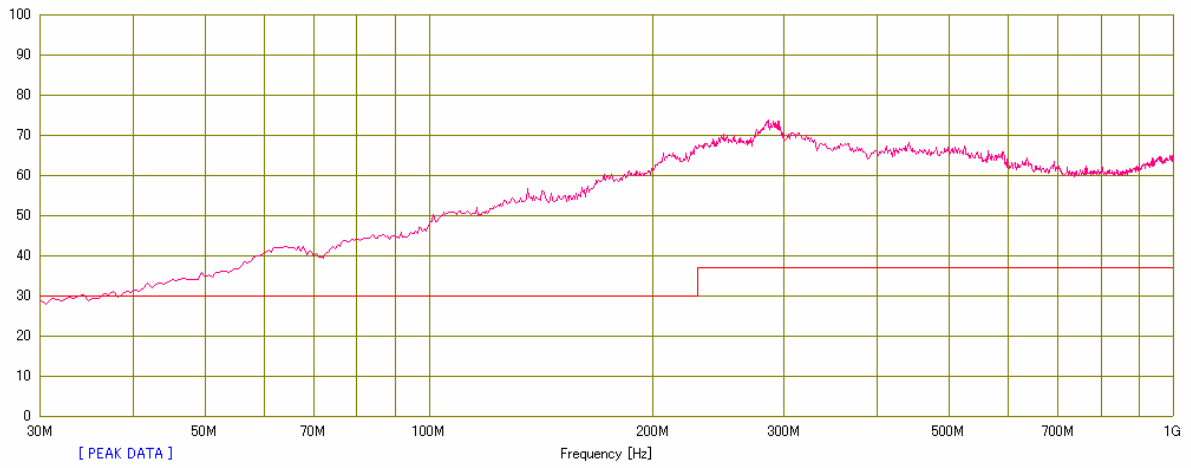
(a) 水平偏波(3m 法)



(b) 水平偏波(10m 法)



(c) 垂直偏波(3m 法)



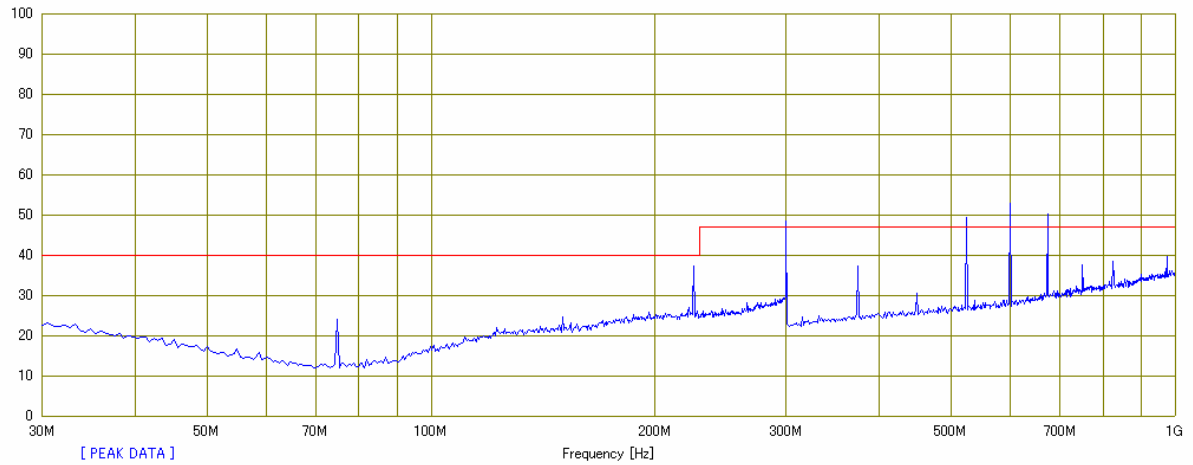
(d) 垂直偏波(10m 法)

図 3-9 白色ノイズ発生器の放射ノイズ測定結果

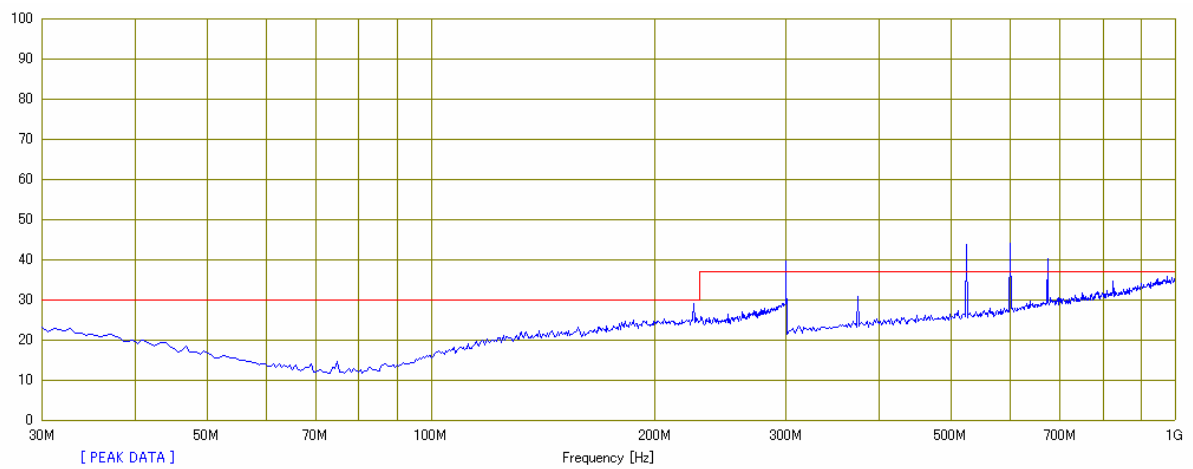


### 3.3.2 通信機器

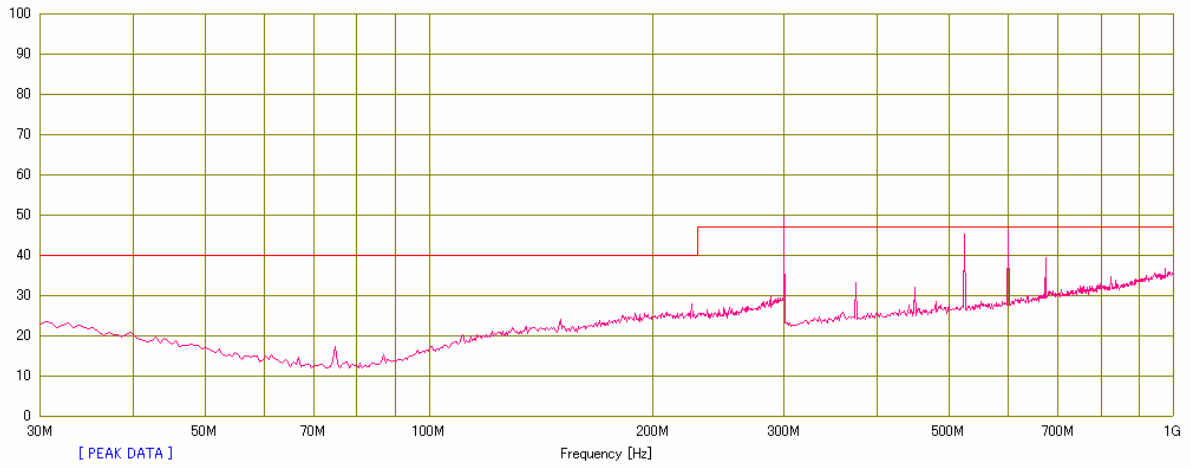
通信機器を EUT とした場合の放射ノイズ測定結果を図 3-10 に示す。3m 法、10m 法ともに同一サイトで実施し、基準値は VCCI クラス B としている。放射ノイズの周波数範囲は 200MHz 以上となり、基準値に対するマーヅンの比較では、水平偏波、垂直偏波ともに最大でも 5dB 程度の偏差となっている。



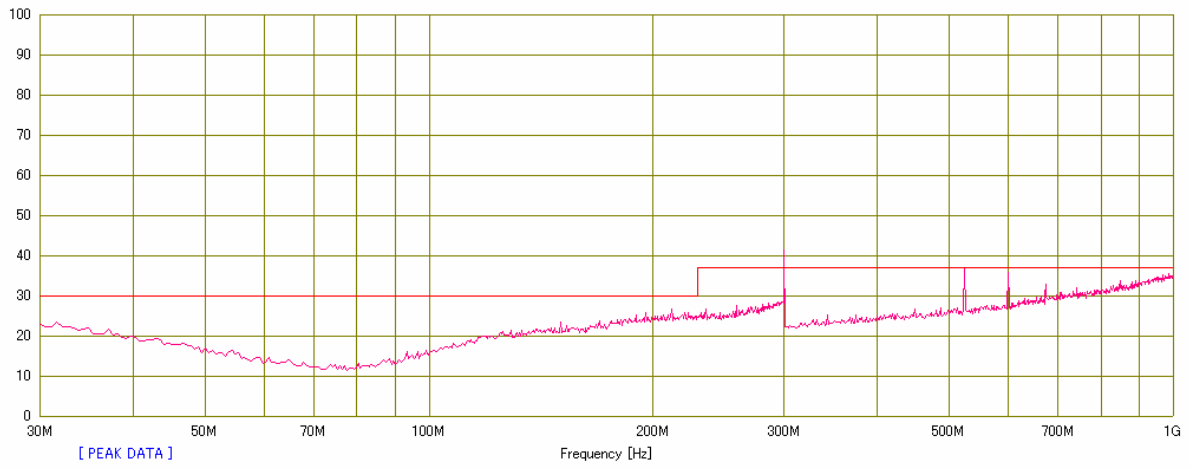
(a) 水平偏波(3m 法)



(b) 水平偏波(10m 法)



(c) 垂直偏波(3m 法)

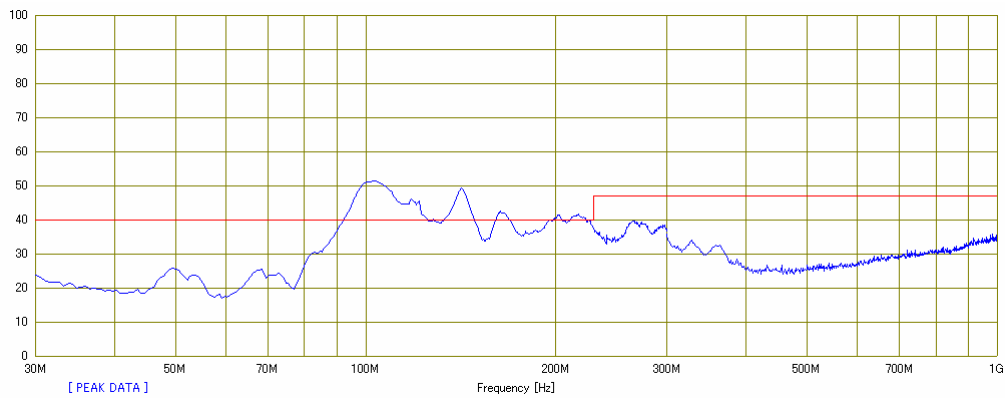


(d) 垂直偏波(10m 法)

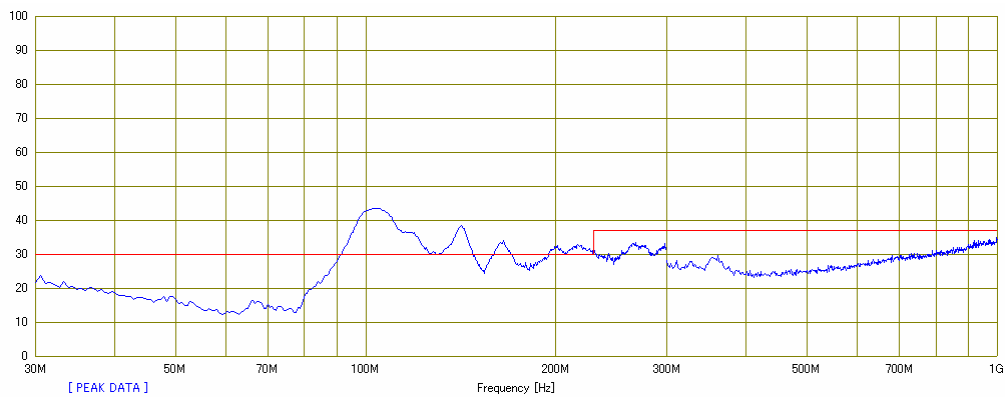
図 3-10 通信機器の放射ノイズ測定結果

### 3.3.3 照明機器

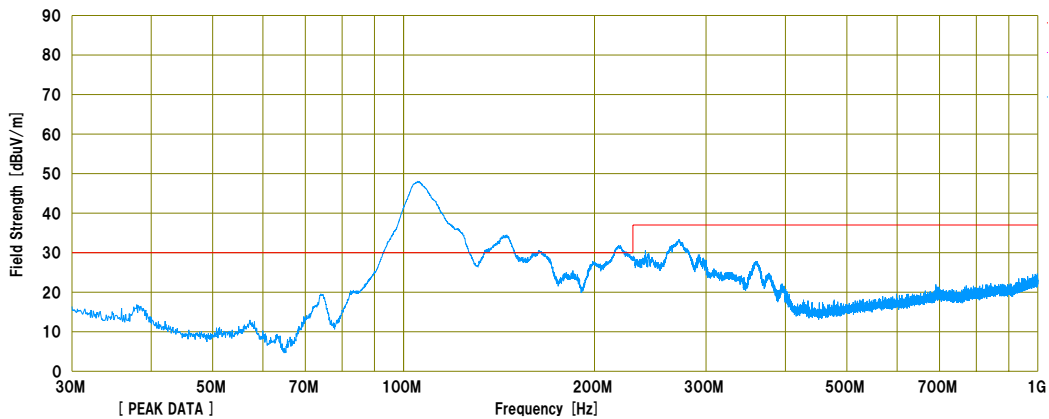
照明機器をEUTとした場合の放射ノイズ測定結果を図3-11に示す。3m法((a)、(d))、10m法((b)、(e))は同一サイトで実施したものである。他サイトにて実施した10m法の結果((c)、(f))も併せて示す。同一サイトにおける3m法と10m法の比較では、水平偏波、垂直偏波ともに概ね5dB以下の偏差となっているが、周波数によっては5dB以上の大きな偏差が生じている。サイト間の比較では、100MHz以下で大きな偏差が生じており、電源系の影響(電源インピーダンス、電源ライン長など)の影響であると考えられる。従って、電波暗室間の相関性を検討する場合、特に100MHz以下の周波数帯域において、3.2.4節の要因の他に電源系の影響も考慮する必要がある。



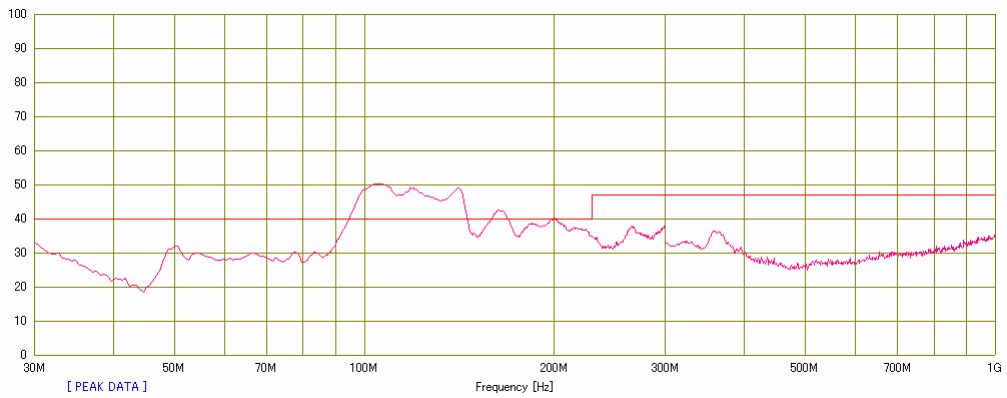
(a) 水平偏波(3m法)



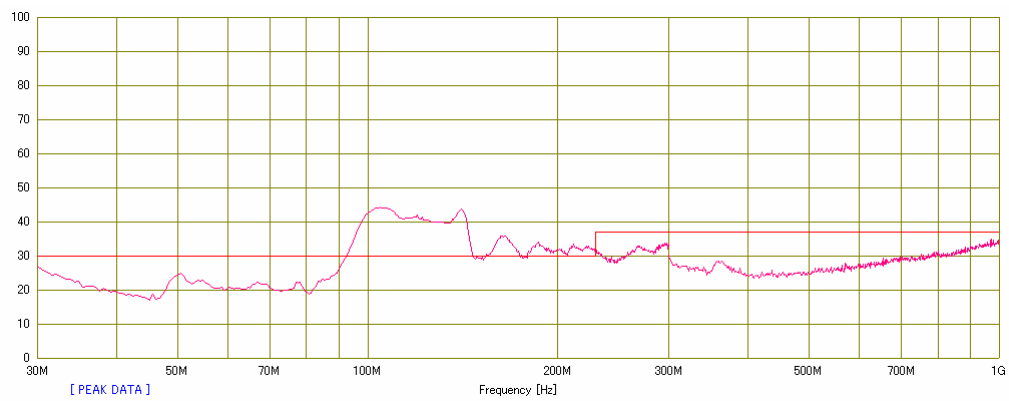
(b) 水平偏波(10m法)



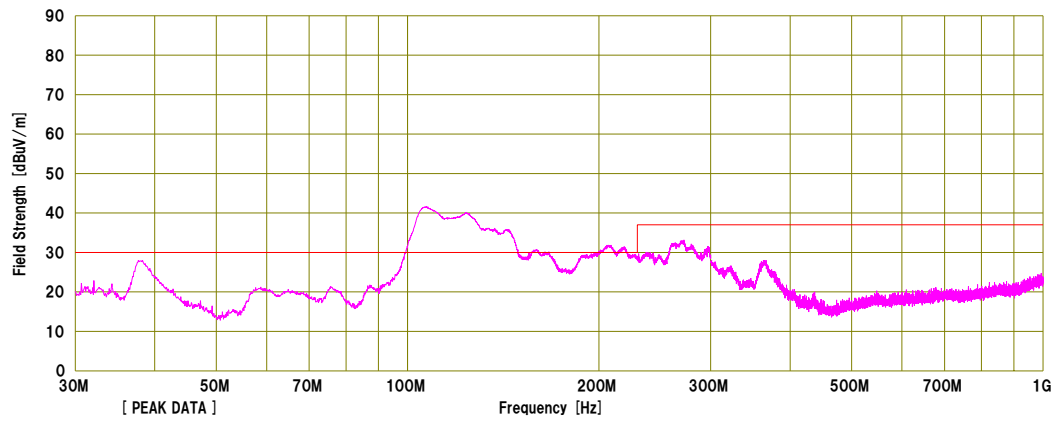
(c) 水平偏波(10m法:他サイト)



(d) 垂直偏波(3m 法)



(e) 垂直偏波(10m 法)



(f) 垂直偏波(10m 法:他サイト)

図 3-11 照明機器の放射ノイズ測定結果

## 用語の解説

### 【電波暗室】

周囲6面を金属板で囲み(外来電磁波を遮断)、かつ、内部に電波吸収体を貼る(内部で発生する電磁波の乱反射を防止)ことで、自由空間、または、半無限空間の電磁環境を模擬した測定室のこと。放射ノイズの測定には不可欠であり、特性が規格規制で定められている。

### 【EUT】

被試験体(供試機器)のこと。Equipment under Test。

### 【VCCI】

一般財団法人VCCI協会。IT機器から発生する妨害波によるテレビやラジオの電波障害を防ぐために、妨害波測定法とその基準値を規定している。国内外 1300 以上の企業や団体からなる会員で構成されている。

## 参考文献

3-1) <http://www.vcci.or.jp/>

3-2) 松原, 石田, 川畑, 桑原, “放射妨害波測定における測定距離と電界強度の相関関係の模擬波源を用いた検討,” 信学論 B, Vol. J87-B, No.4, pp.535-543, April 2004.

3-3) 島ノ江, 宮田, “3m 法 10m 法での放射雑音測定の相関性,” 信学技報, EMCJ88-23, 1988.

3-4) 桑原, 川畑, 石田, “妨害波測定における電界強度の距離依存性に関する一考察,” 信学技報, EMCJ2005-59, 2005. (copyright(c)2005 IEICE、許諾番号:09GB0082)

3-5) 南郷, 松原, 村川, 桑原, 徳田, “模擬機器の電磁界放射特性と応用法の研究,” 信学論 B, Vol.J86-B, No.8, pp.1629-1638, Aug. 2003.

3-6) G.j.Burke, A.J.Poggio, “Numerical Electromagnetic Code (NEC) Method of Moments,” Lawrence Livermore Laboratory, 1981.

## 4. EMC 対策支援ソフトウェアによる放射ノイズ源可視化および放射ノイズ推定

### 4.1 概要

電子・電気機器開発においては EMC 対策、中でも放射ノイズ測定・低減対策の効率化が強く求められている。福岡県工業技術センターと九州工業大学の共同研究成果である『EMC 対策支援ソフトウェア』は、小型電波暗室での「予備測定結果」から放射ノイズ源を探知し、さらに大型電波暗室における「規格適合試験結果」を推定することが可能であり、将来的には、九州・山口地域の EMC 測定設備を有する公設試験機関への導入を予定している。本ソフトウェアの活用により、製品開発時の EMC 対策効率が飛躍的に向上し、製品開発の活性化、競争力の強化に大きく寄与すると期待されている。

本章では、まず本ソフトウェアの基幹となる波源モデリングの原理を説明し、実機を対象とした放射ノイズ源可視化<sup>4-1)</sup>および放射ノイズ推定<sup>4-2)</sup>の適用例を示す。

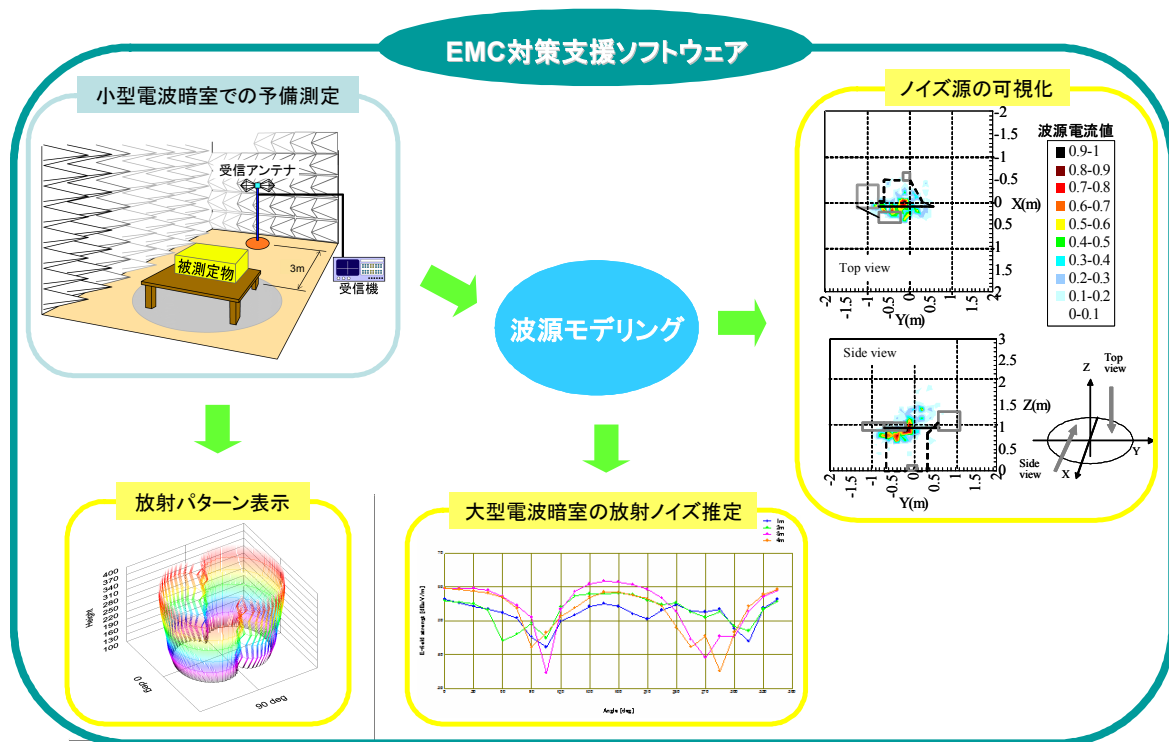


図 4-1 『EMC 対策支援ソフトウェア』の概要

## 4.2 波源モデリングの原理

図 4-2 に座標系と波源モデルを示す。放射妨害波源は微小ダイポールと仮定している。 $J_n$  は  $n$  番目の電流ベクトルで  $(x_n, y_n, z_n)$  は位置座標を示している。 $P_m$  は測定点の座標で、測定半径が 3m、高さが 1m から 4m の円筒上に分布している。 $E_{hm}$  及び  $E_{vm}$  は測定点における電界強度の水平偏波成分および垂直偏波成分である。

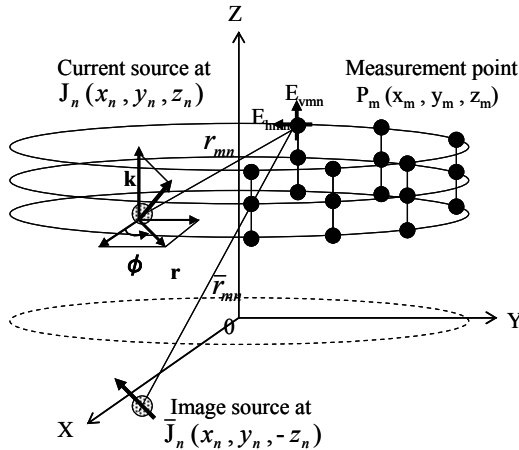


図 4-2 座標系と波源モデル

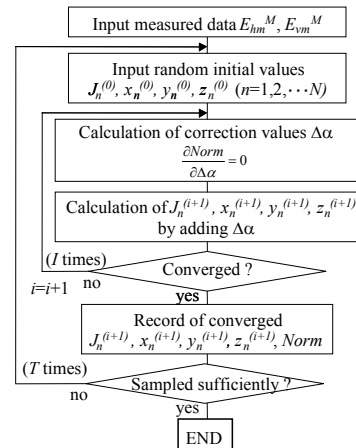


図 4-3 波源推定のアプローチ

波源推定のアプローチを図 4-3 に示す。波源推定のための最適化計算にはマルカート法<sup>4-3)</sup>を使用する。まず、円筒スキャンした測定データを入力する。次に、未知数である電流ベクトル  $J_n^{(0)}$  と座標  $(x_n^{(0)}, y_n^{(0)}, z_n^{(0)})$  の初期値を乱数で与えて、評価関数  $Norm$  が最小となるように(式 4-1)、(式 4-2)から導かれる連立方程式を解いて、未知数  $\alpha$  の補正量  $\Delta\alpha$  を求める。

$$\frac{\partial Norm}{\partial \Delta\alpha} = 0 \quad (式 4-1)$$

$$Norm = \frac{\sum_{m=1}^Q |E_m^{(i+1)} - E_m^M|^2}{\sum_{m=1}^Q |E_m^M|^2} \quad (式 4-2)$$

$Q$  は全測定ポイント数、 $E_m^M$  は  $P_m$  点における電界強度測定値の水平偏波成分または垂直偏波成分を示し、 $E_m^{(i+1)}$  は補正された電流ベクトルから計算した電界強度を示している。 $E_m^{(i)}$  は全波源の重ね合わせにより次式で求めることができる。

$$E_m^{(i)} = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{J_n^{(i)} e^{-jkr_{mn}}}{r_{mn}} D_{mn} + \frac{J_n'^{(i)} e^{-jkr'_{mn}}}{r'_{mn}} D'_{mn} \right\} \quad (式 4-3)$$

$N$  は総波源数、上添字  $(i)$  は  $i$  回目の繰り返しを意味している。 $D_{mn}$  は受信アンテナの指向性、 $r_{mn}$  は波源と観測点の経路長、 $k$  は波数である。また、第 2 項は金属床面からの反射を示している。

解が十分に収束する  $I$  回この過程を繰り返し、収束した  $N$  個の電流ベクトルと  $Norm$  を記録する。そして、新たに初期値を乱数で与えて次の最適化計算を開始し、 $T$  回繰り返す。全試行終了後、波源可視化の場合は、得られた全波源を  $Norm$  で正規化し、確からしい ( $Norm$  の小さい) 波源を積み付けして表示する。放射ノイズ推定の場合は、 $Norm$  が最も小さい波源群を放射源として任意地点の電界をレイトレーシング法により求める。

### 4.3 放射ノイズ源可視化

#### 4.3.1 計算機シミュレーションによる検証例

計算機シミュレーションによって得られた電界強度データを元に、波源可視化した例を示す。オリジナル波源は、300MHz、3波源である。可視化結果を図 4-4 に示す。正規化された電流値が色分けされており、3つの波源が正しく再現されている。

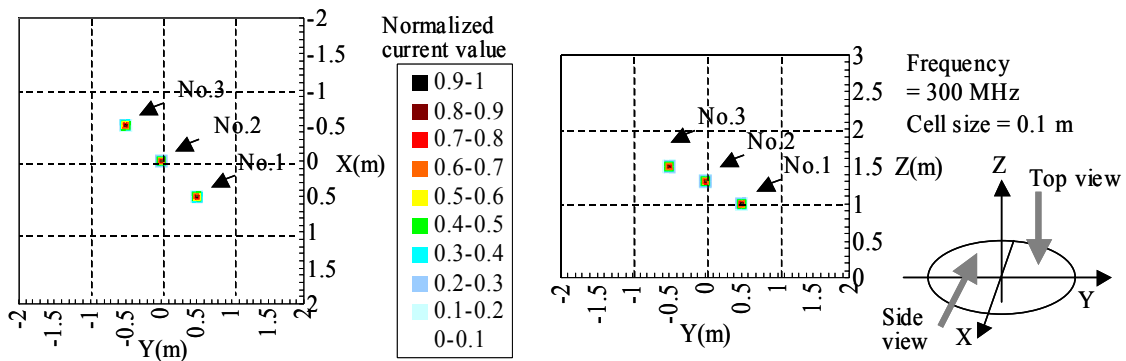


図 4-4 計算機シミュレーションによる可視化例 (300MHz、3 波源)

#### 4.3.2 PC による検証例

PC を用いて検証を行った。実験に用いた測定系を図 4-5 に示す。図のように、大型電波暗室内において、ターンテーブル上に EUT を、3m 離れた位置に受信アンテナを置き、円筒スキャンにより、電界強度測定を行った。実験に用いた被試験体 (EUT) を図 4-6 に示す。図のように、旧型のデスクトップ PC 本体、キーボード、ディスプレイ、電源ケーブル、信号ケーブルから構成される。

予備実験として切り分け試験を行ったところ、PC 本体とディスプレイをつなぐ信号線からの放射、および、電源ケーブルからの放射が強いことが分かった。続いて、Model A、Model B、Model C の 3 とおりの配置について波源可視化を行った。結果を図 4-7 に示す。可視化された電流位置は、予備実験の結果に一致しており、本手法の有効性を示している。

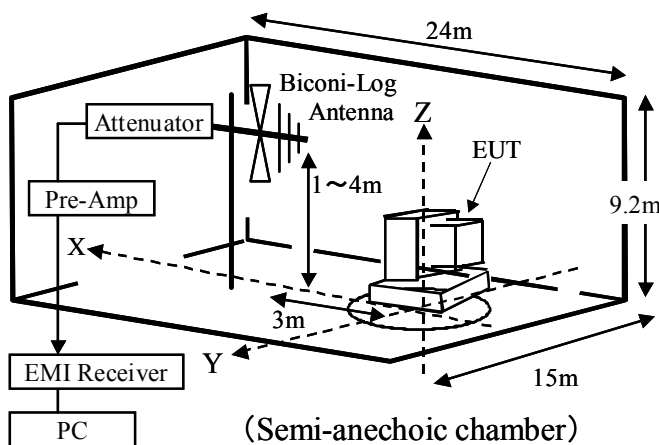


図 4-5 実験に用いた測定系

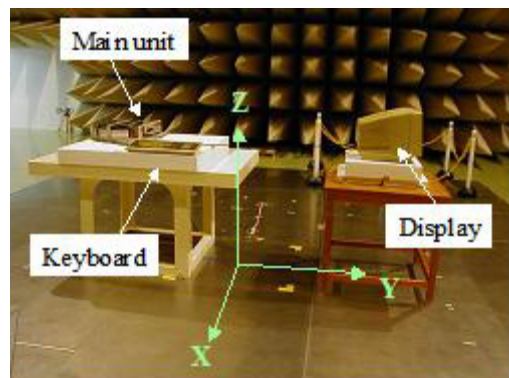


図 4-6 検証実験に用いた EUT



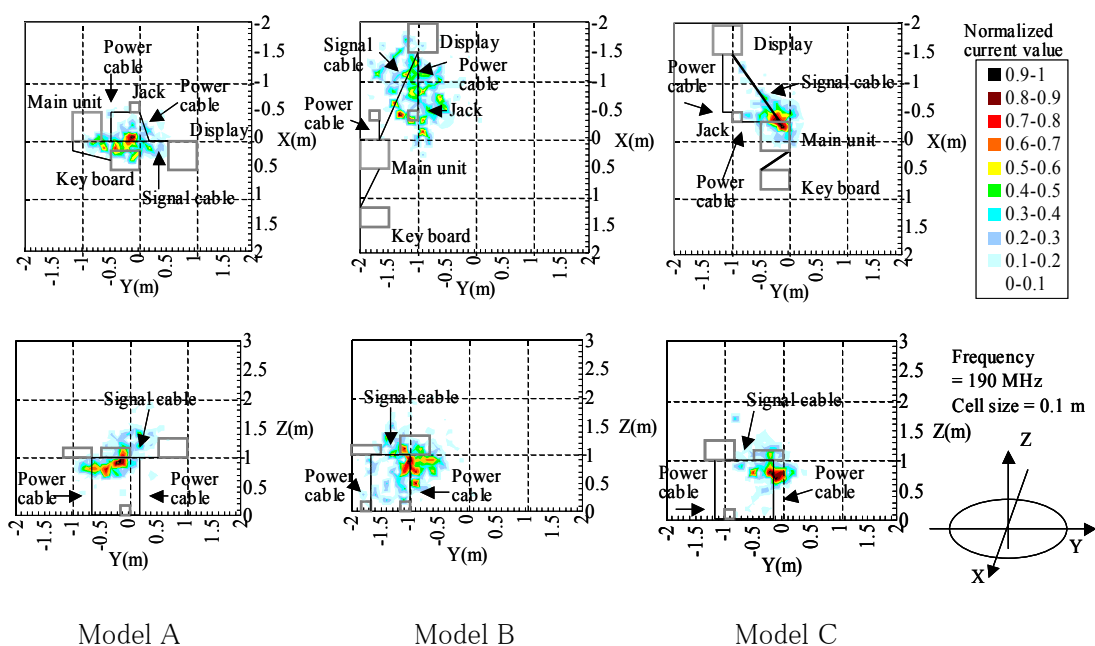


図 4-7 PC による可視化結果 (190MHz)

#### 4.3.3 FAX による検証例

FAX を用いて検証を行った。実験に用いた EUT を図 4-8 に示す。予備実験として切り分け試験を行ったところ、FAX 本体からの放射が強いことが分かった。波源可視化の結果を図 4-9 に示す。可視化された電流位置は、予備実験の結果に一致しており、本手法の有効性を示している。

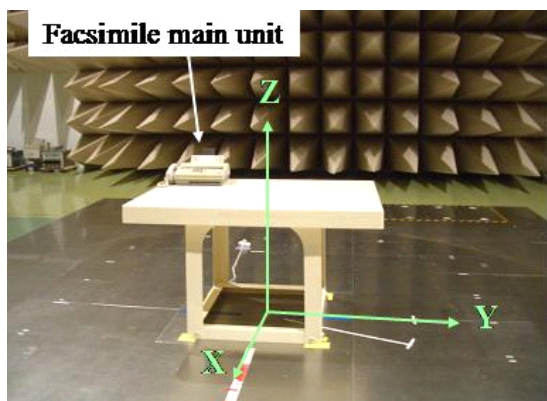


図 4-8 検証実験に用いた EUT

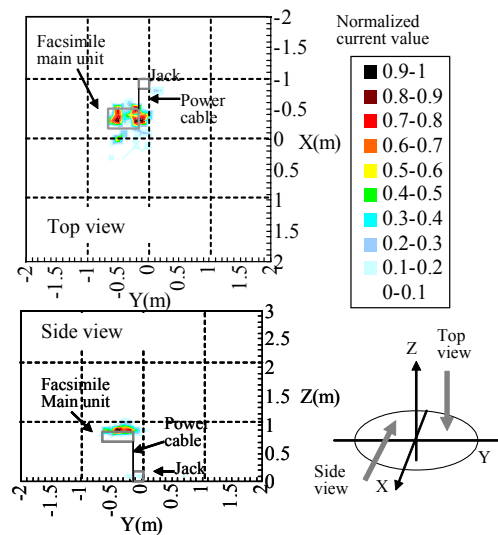


図 4-9 FAX による可視化結果 (240MHz)

## 4.4 放射ノイズ推定

### 4.4.1 計算機シミュレーションによる検証例

模擬機器<sup>4-4)</sup>をEUTとして3m法の円筒スキャン解析結果から10m法の放射電界強度を推定し、10m法の解析結果と比較した。解析にはモーメント法<sup>4-5)</sup>を使用した。30~1000MHzにおける10m法の解析値と推定値との偏差 $|\text{推定値}_{\max} - \text{解析値}_{\max}|$ を図4-10に示す。距離換算による推定結果(1/r prediction)も併せて示す。水平偏波、垂直偏波ともにいずれの周波数においても概ね2dB以内の精度で推定できていることが分かる。距離換算による推定結果では最大で5dB程度の誤差が生じており、本手法の有効性を示している。

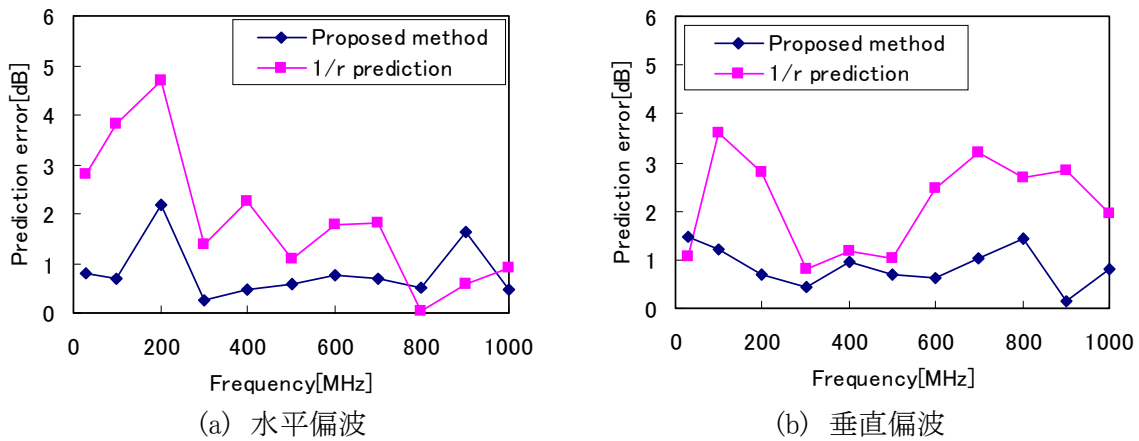


図 4-10 10m 法推定値の精度

### 4.4.2 PC による検証例

PC を EUT として検証を行った。水平偏波、垂直偏波ともに放射電界強度が大きくなる 200MHz、300MHz、700MHz の 3 周波数において、3m 法および 10m 法の円筒スキャン測定を実施し、3m 法の測定値から 10m 法の放射電界強度を推定し、10m 法の測定値と比較した。10m 法の放射電界強度の測定値と推定値との最大値の偏差 $|\text{推定値}_{\max} - \text{測定値}_{\max}|$ を図4-11示す。推定精度は水平偏波、垂直偏波ともに3dB以内となり、距離換算に比べて高い精度で推定することができる。

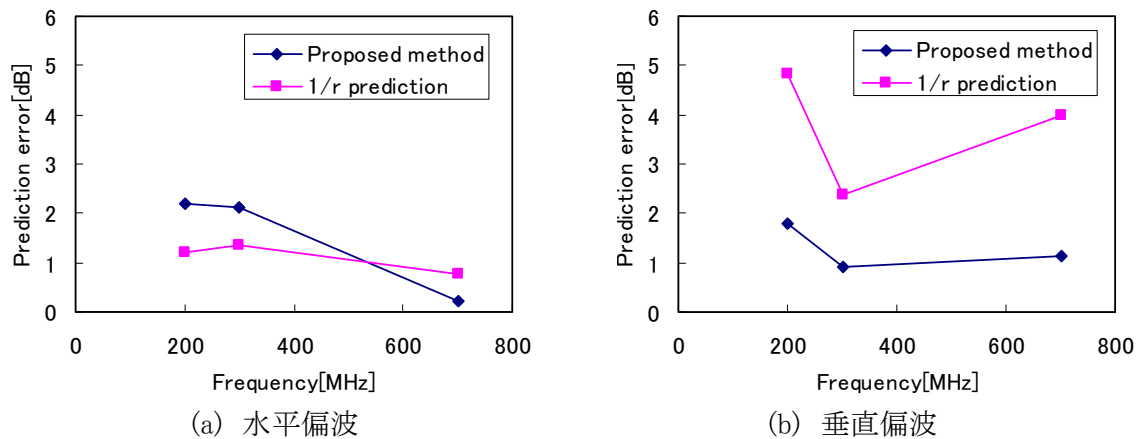


図 4-11 10m 法推定値の精度

図4-12に各周波数における水平面パターンの結果を示す。評価面は、10m法の測定において最大電界強度が得られる高さである。水平偏波については、放射パターンが複雑となる700MHz以外では傾向を良く捉えており、700MHzにおいても最大放射方向付近では良く一致している。垂直偏波についても、偏差の大きくなる角度が存在しているが、最大放射方向では傾向を捉えている。

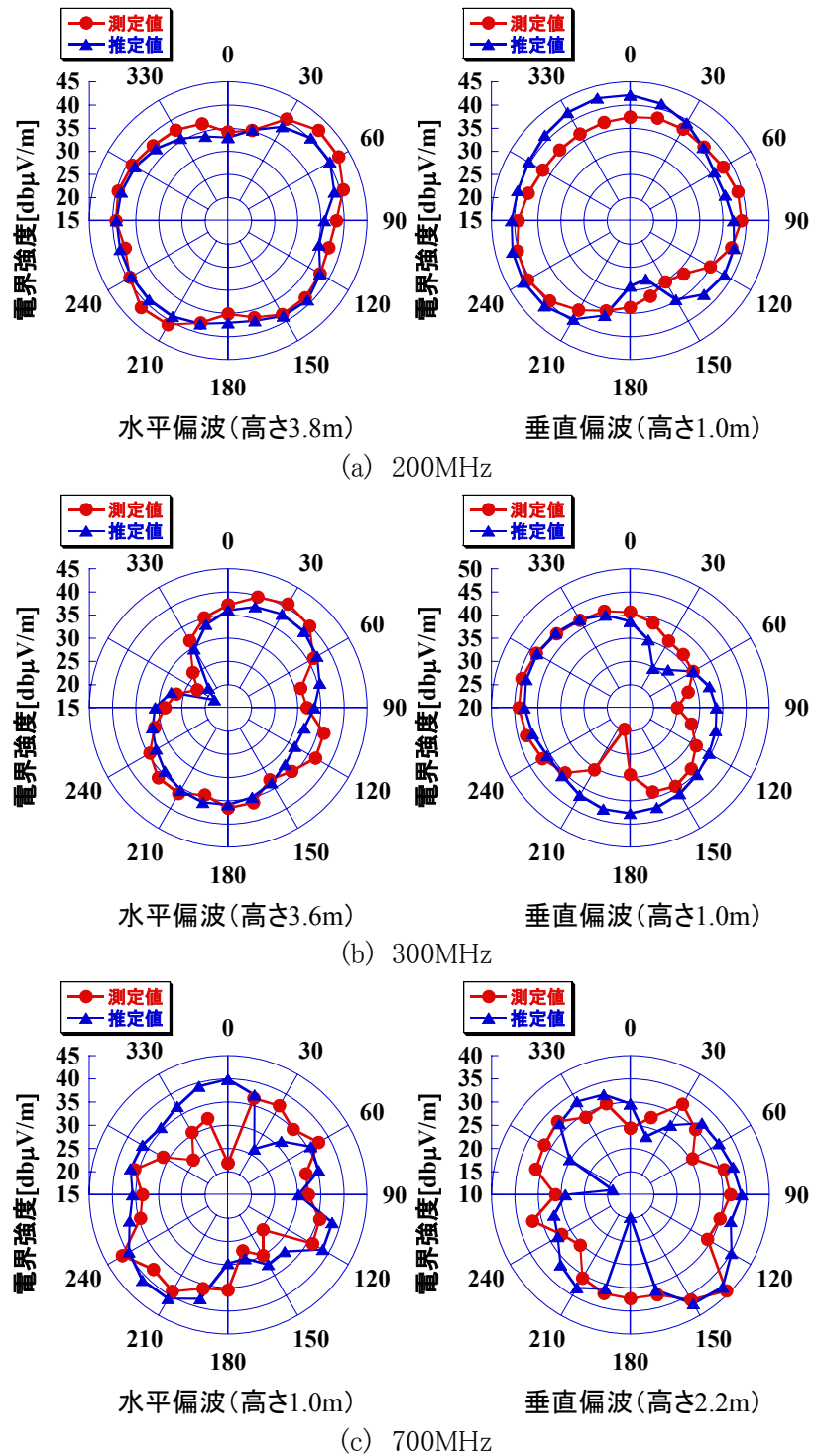


図4-12 10m法における電界強度の水平面パターン

## 用語の解説

### 【波源モデリング】

電子機器などの放射電磁界解析モデル化手法の一つ。3m 法の電界強度分布からそれと同じ放射特性を有する微小ダイポール群(波源群)を逆問題により導出してモデル化する。放射ノイズ源の可視化や放射電磁界の推定に応用することができる。

### 【EUT】

被試験体(供試機器)のこと。Equipment under Test。

### 【距離換算による推定】

自由空間において微小波源から放射される電界強度は伝播距離に反比例するという関係を用いて、放射源からの距離が異なる位置の電界強度を推定する方法のこと。3m 法と10m 法の場合、その水平距離で換算すると、相関係数は約 10.5dB ( $\cong 20\log_{10}(10/3)$ )となる。

## 参考文献

- 4-1) Y. Ishida, M. Kawabata, N. Aoki, and N. Kuwabara, "Visualization of Radiated Emission Source Using Cylindrically Distributed Far Field Amplitude Data", Proc. Asia Pacific Symposium on EMC TAIPEI 2005, Dec., 2005.
- 4-2) 川畑, 石田, 桑原, "10法における放射妨害波推定のための波源モデリング条件の検討," 信学技報, EMCJ2004-120, 2005. (copyright(c)2005 IEICE、許諾番号:09GB0083)
- 4-3) 藤元美俊, 菊間信良, 稲垣直樹, "マルカート法を用いた CMA アダプティブアレーの多重波抑圧特性," 信学論(B-II), vol.J67-B-II, No.11, pp.599-607, Nov. 1991.
- 4-4) 南郷, 松原, 村川, 桑原, 徳田, "模擬機器の電磁界放射特性と応用法の研究," 信学論 B, Vol.J86-B, No.8, pp.1629-1638, Aug. 2003.
- 4-5) G.j.Burke, A.J.Poggio, "Numerical Electromagnetic Code (NEC) Method of Moments," Lawrence Livermore Laboratory, 1981.

## 5. 近傍界測定による EMC 対策支援

### 5.1 近傍界測定によるイミュニティ対策

#### 5.1.1 はじめに

電磁波による電子機器の誤動作は大きな社会的問題となり、一般市場に販売する電子機器は基本的に電磁波耐性に関する法規制に適合させる必要がある。電磁波により電子機器が誤動作するのは、電子機器の動作を制御する電子制御回路基板に電磁波が侵入し、回路を流れる制御信号を妨害したり、電氣的エネルギーで電気配線を破損させること等で発生する。電磁波に対する電子制御回路の耐性を向上させるには、電子制御回路基板において、電磁波が侵入しやすい場所(=誤動作しやすい場所)を見つけだし、対策を施す必要がある。

従来、誤動作しやすい場所を探す場合、図 5-1 に示すように、ノイズ発生器に接続した微小磁界プローブを手を持ち、被試験体の電子制御回路基板のあちこちに近づけ、局所的に電磁波を加えることで、誤動作しやすい場所を見つけていた。しかし、この方法だと、試験の再現性が悪く、試験の漏れ(電磁波を印加しない領域)が起りやすい等の問題があった。

そこで、試験の再現性が高く、効率的に誤動作しやすい場所を見つけ出す手法を考案し、それを具現化した解析システムを開発した。ここでは、その検出手法やシステムの概要、試験手順などを説明する。



図 5-1 誤動作しやすい領域を探し出す方法(従来法)

#### 5.1.2 誤動作しやすい領域を絞り込む手法

電子制御回路基板において誤動作しやすい場所というのは、他の領域に比べて、より微弱な電磁波を加えるだけで誤動作してしまう領域ということである。高密度配線化が進む電子制御回路の中で、誤動作しやすい場所を特定するには、極力高い分解能で場所を特定する必要がある。

また、試験の漏れを防ぐためには、被試験体全体についての誤動作耐性試験も行う必要がある。

そこで、被試験体全体の誤動作耐性も把握し、かつ、微小な領域の誤動作し易さまで効率的に試



験するため、図 5-2 に示すように、大きさの異なる複数の電磁波印加用プローブを用意して、電磁波を印加する領域を段階的に小さくすることで効率的に誤動作し易い領域を絞り込む手法を考案した。現在、試作したプローブとしては、9cm角、3cm角、1cm角、3mm角、1mm角等の正方形型のプローブがある。

試験の手順として、まず最初に、被試験体全体を9cm角の領域に区切り、9cm角のプローブで各領域に電磁波を加えることで、被試験体全体の誤動作耐性の状況を大まかに把握する。

具体的には、まず最初の領域に9cm角プローブを位置合わせし、加える電磁ノイズの強度(電圧)を段階的に高め、被試験体が誤動作したら、その際に加えていた電磁ノイズ発生器の設定電圧値(以後、誤動作発生電圧)を記録する。その後、プローブを次の試験領域に移動し、被試験体を正常動作状態に復帰させて同様の試験を行う。全ての試験領域の試験が終了すると、被試験体全体における誤動作しやすさの分布を把握することができる。

この試験結果において、誤動作し易かった9cm角の領域を、3cm角のプローブで9分割して再試験を行い誤動作し易い場所を絞り込む。

この作業を、より小型のプローブに順次切り替えて試験することで、誤動作し易い場所を効率的に絞り込むことができる。

なお、被試験体の映像をデジカメ等で予め撮影し、制御ソフトに取り込んでおき、誤動作し易さの分布情報を重ね表示することで、誤動作し易い電気配線を容易に特定することができる。

また、電子制御回路が誤動作する原因は様々であり、被試験体の場所場所によっても異なる。このため、試験を行う際に生じた誤動作現象についても各試験座標毎に記録する。具体的には、試験中に発生した様々な誤動作現象を制御ソフトのデータベースに識別コード(①、②、③...)とともに登録し、各試験座標毎に識別コードを記録する。

試験終了時には、被試験体において、どのような誤動作現象が、どのような領域で発生するかの知見が得られ、それぞれの誤動作現象別に対策を施すことも可能となる。

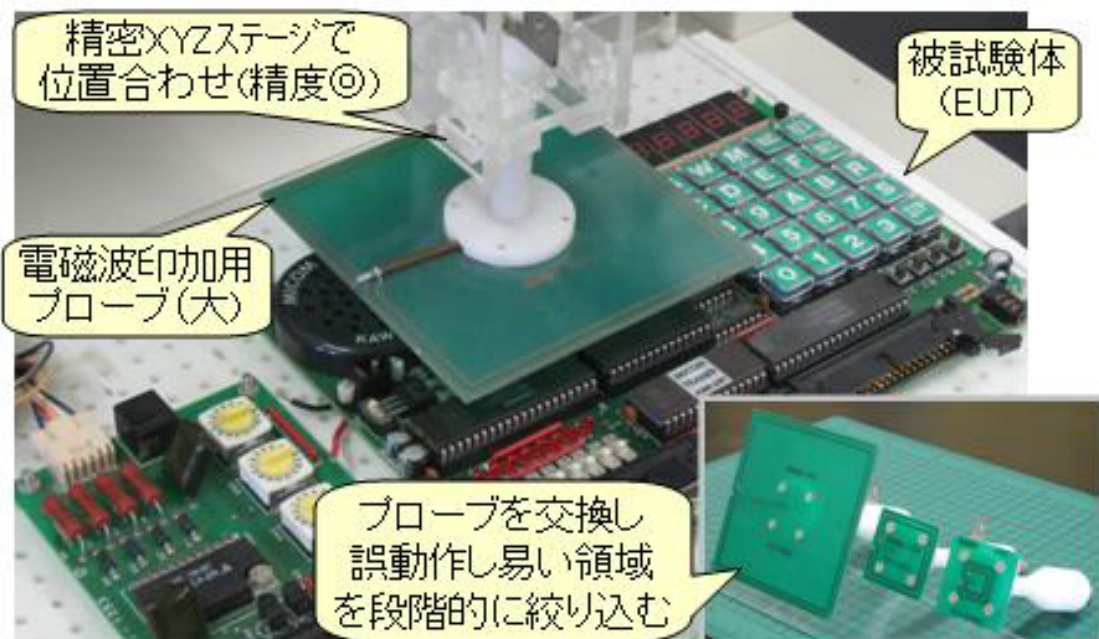


図 5-2 誤動作し易い領域を絞り込む手法

### 5.1.3 システム構成

上記の解析手法を具現化する方法として、今回開発したシステムは、図 5-3 に示すように、精密XYZ ステージを用いて、被試験体に対して上空側からプローブを接近させる機構を用いた。被試験体をステージ天板上のY軸に取り付け、電磁波を印加するプローブと拡大観察用カメラは門型部分のXZ軸に取り付けられ連動して動く。

このステージは可動範囲が X:300mm、Y:300mm、Z:80mm で、最小移動間隔は  $10\mu\text{m}$  である。試験体の映像は拡大観察モニターで 25 倍～400 倍で観察できる。その他、制御用コンピュータやノイズ発生器、信号発生器などで構成されている。

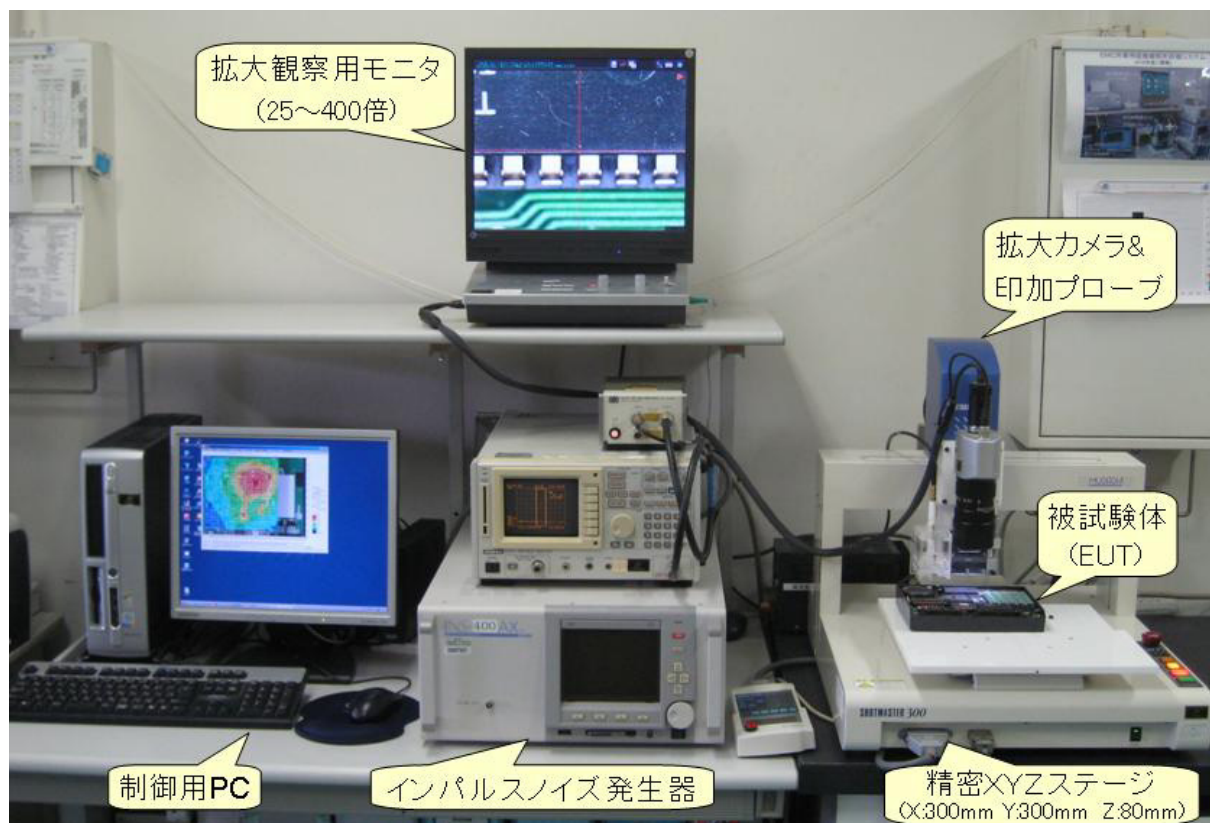


図 5-3 システム構成

### 5.1.4 制御ソフト

本解析システムでは、電磁波の印加場所、印加する電磁波の強度などの試験条件を設定し、その条件に応じて、精密XYZステージを制御して被試験体の指定した位置に印加プローブを位置合わせる。そして、ノイズ発生器の設定電圧を指定した電圧に設定して電磁波を印加させる。

試験条件の設定画面を図5に示す。試験開始ボタンをクリックすることで試験が開始される。

試験開始とともに、印加プローブが最初の試験座標に移動し、印加条件に関する設定画面が表示される。ここで試験を開始し、作業者は被試験体で誤動作が発生しないか、監視する。

ある時点で誤動作を検出したら、誤動作発生ボタンをクリックし、印加電圧と誤動作内容を示す識別コードの記録を行う。この際、誤動作現象に関するデータベースが識別コードとともに表示される。検出された誤動作現象が未登録の場合、新たな識別コードを割り振ってデータベースに追加する。

### 5.1.5 具体的な試験手順

本解析システムを用いた具体的な試験手順を図 5-4 に示す。

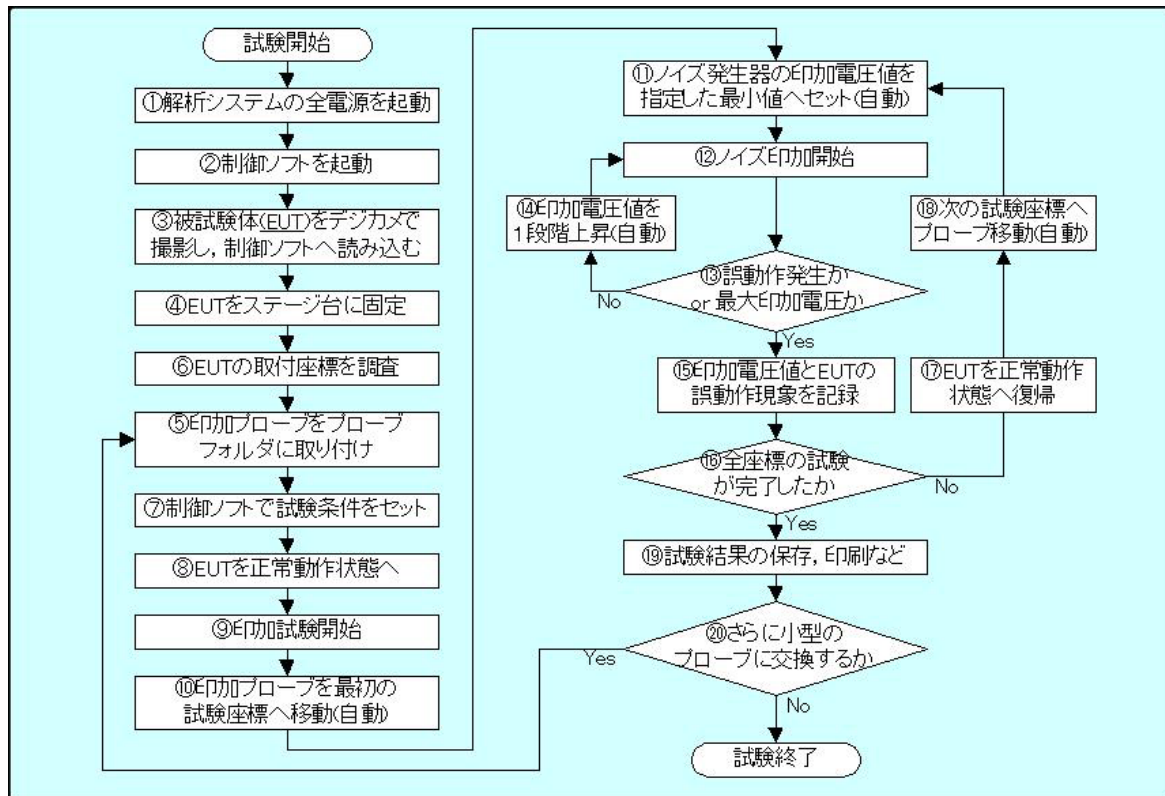


図 5-4 誤動作しやすい領域を絞り込む試験手順

### 5.1.6 実施例

実際の実施例を図 5-5 に示す。ここでの被試験体(EUT)は、教育用のワンボードコンピュータで、ステッピングモータを回転させるオプションボードを接続している。図左側の大型基板がコンピュータ本体で、右側の小型基板がオプション基板。これら2枚のプリント基板を、5mm厚のアクリル板に固定した上で、XYZ ステージに取り付けた。

最初に9cm角の印加プローブで EUT 全体を6分割して試験を行った結果、本体基板の左下2カ所の耐ノイズ性が最も低く、その上部2カ所の耐ノイズ性も低いことが判明した。次に3cm角の印加プローブに交換し、全領域について再度試験を行い、耐ノイズ性の低い領域(0.5kV で誤動作)が絞り込まれた。さらに1cm角プローブに交換し、3cm角プローブで耐ノイズ性の低かった領域について再度試験を行った結果、耐ノイズ性の低い領域の形状が更に明確になった。

EUT の画像と試験結果を見比べた結果、耐ノイズ性の低かった領域の形状と位置がほぼ一致する電気配線を数本に絞り込むことができた。確認のため、絞り込んだ数本の電気配線に対して、個別に直接電磁ノイズを直接加えたところ、本システムで発生した誤動作内容と一致する電気配線があり、誤動作の原因となる電気配線を特定することができた。

さらに、特定された電気配線に対して、誤動作対策を行った後、9cm角プローブで EUT 全体を再試験した結果、EUT 全体の耐ノイズ性が大きく改善されていることを確認できた。



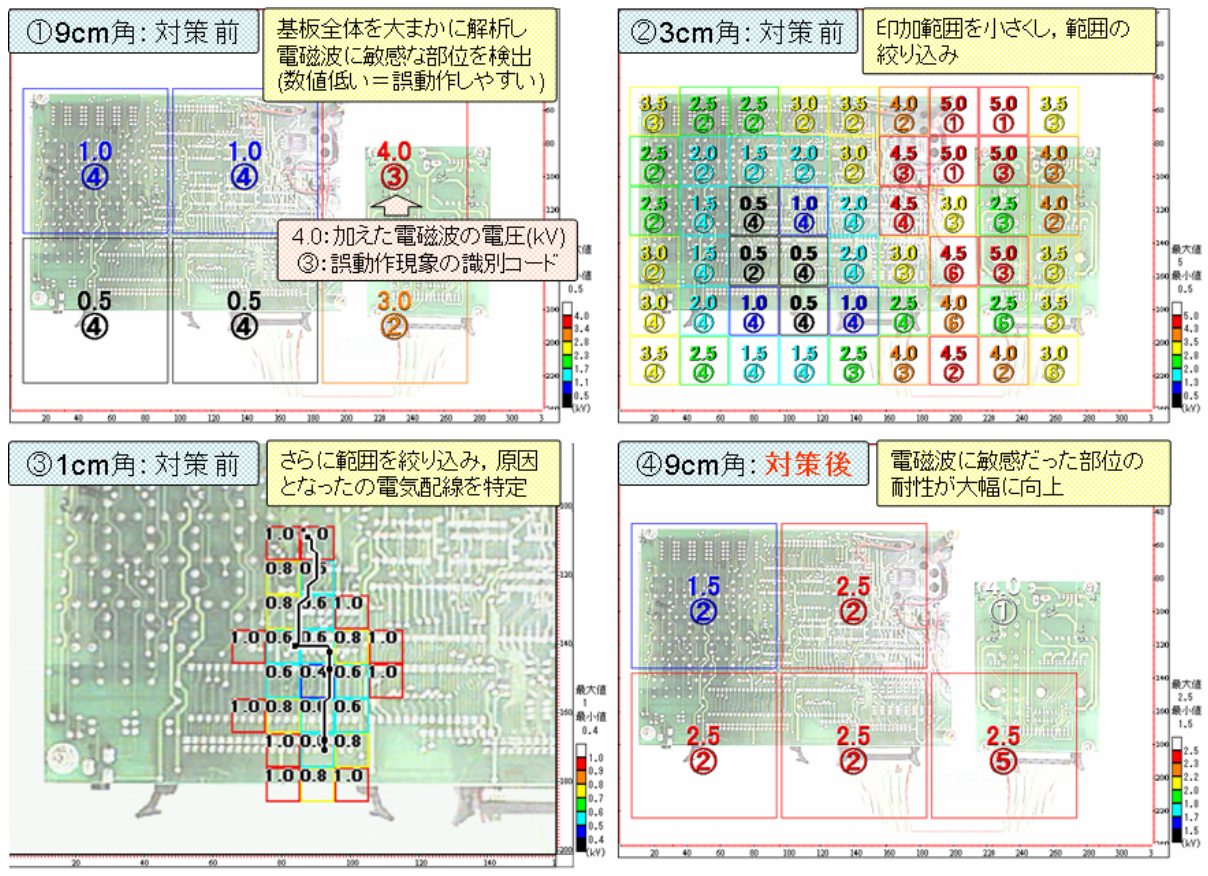


図 5-5 実施例

## 5.2 近傍電磁界強度分布の可視化による EMI 対策支援

### 5.2.1 目的

電子機器の放射ノイズ(EMI)対策を行う場合、電磁ノイズの発生源である電子回路基板における近傍電磁界分布を可視化し、対策したい電磁ノイズの発生源や伝搬経路を究明することで、より効率よく低コストの対策が可能となる。

そこで、電子制御回路基板の近傍電磁界強度分布を可視化するシステム(EMC 対策用超微細解析システム)を開発した。

### 5.2.2 システム構成

図 5-6 に近傍電磁界強度分布を可視化するシステムの構成を示す。被試験体である電子制御回路基板を精密 XYZ ステージに取り付け、電磁波の強度を測定する計測器(EMI レシーバ)に接続した磁界プローブで、被試験体近傍の XY 平面をスキャンし、制御 PC において、被試験体の画像上に測定結果をマッピングすることで、被試験体における近傍電磁界分布を可視化する。

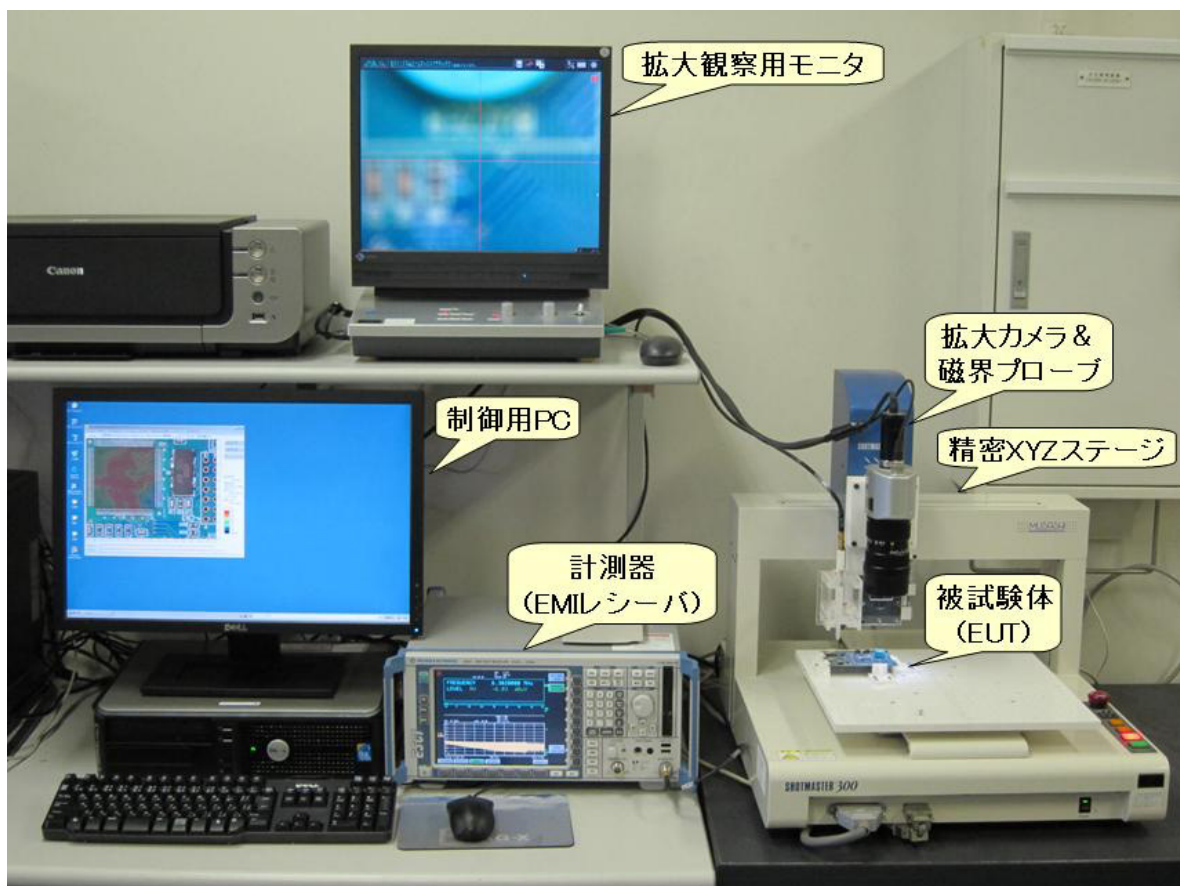


図 5-6 近傍電磁界強度分布可視化時のシステム構成

### 5.2.3 具体的な試験手順

図 5-7 に具体的な試験手順を示す。

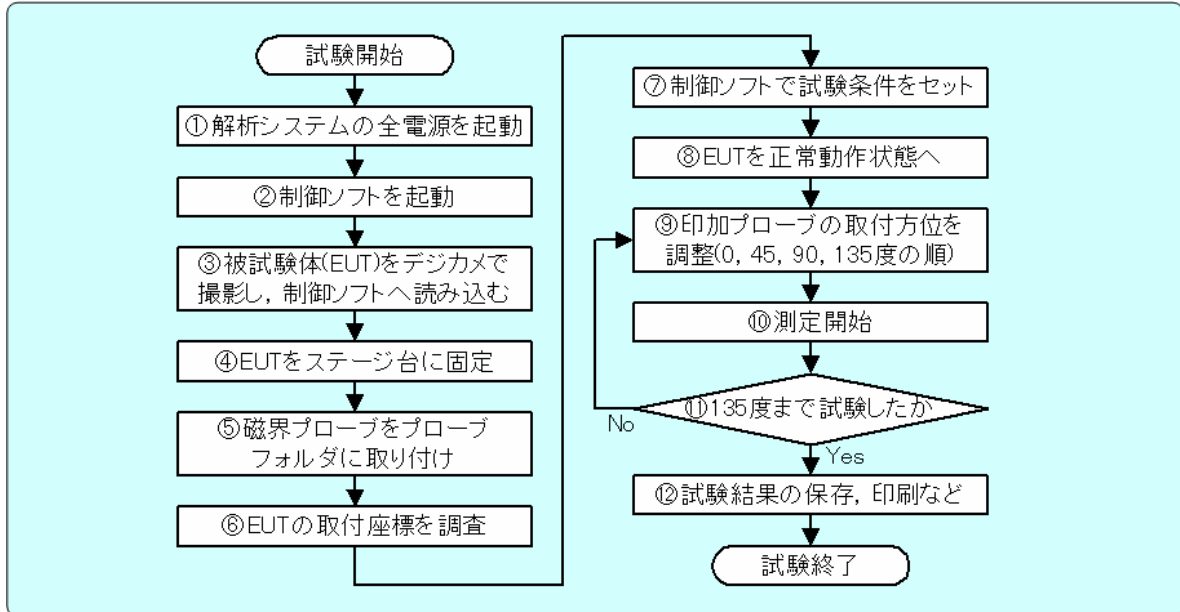


図 5-7 操作手順

### 5.2.4 実施例

図 5-8 に実施例を示す。ここでの試験体(EUT)は、教育用のワンボードコンピュータである。

最初は、測定間隔を2mmとし、プリント基板全体における電磁波の発生状況を調べた。その結果、図 5-8 に示すように、図の左中央部に存在する正方形の形をしたUSBコントロール用ICからの放射が最大であることが判明した。

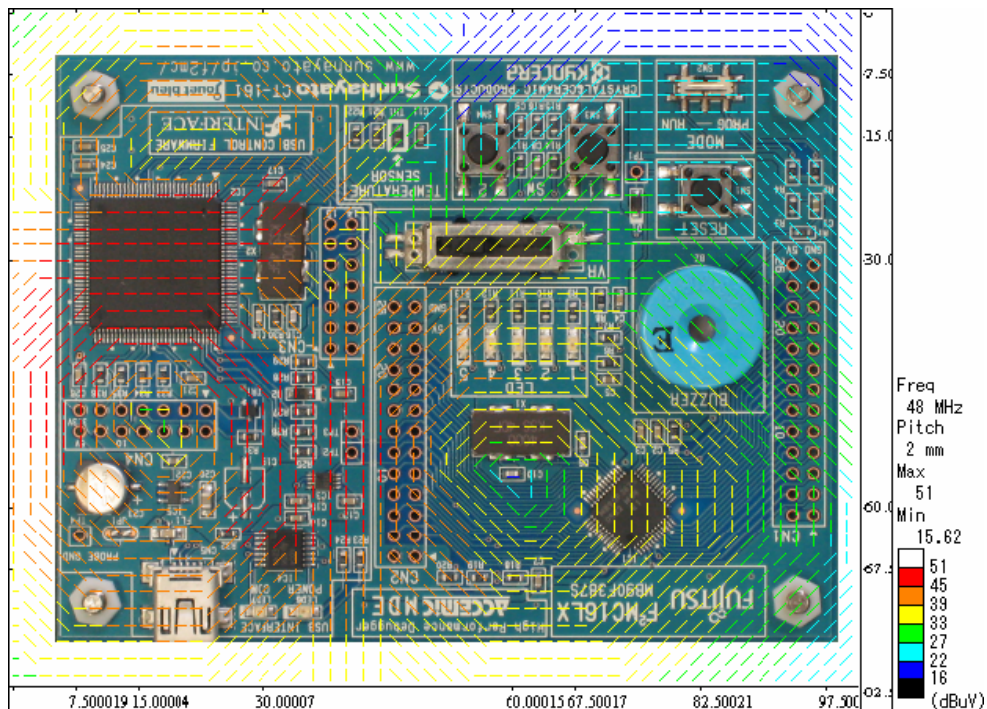


図 5-8 実施例(EUT 全体の近傍電磁界分布の可視化)



次に当該ICにおいて具体的に、どの端子からの放射が強いのかを調べるため測定間隔を0.5mmに設定し、当該IC付近の電磁界分布を測定した結果、図5-9に示すように、IC内部の半導体チップや電気配線から放射される電磁波の強度や方位が可視化され、強い電磁波の発生している端子を特定することができた。

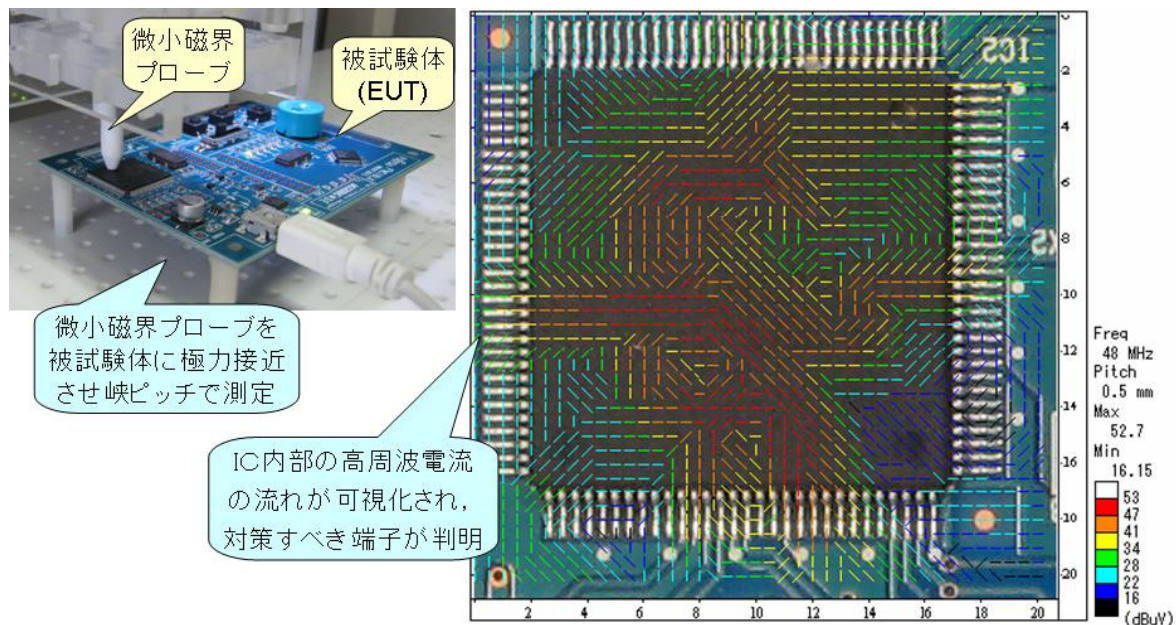


図 5-9 実施例(電磁波の発生源(IC)周辺の近傍電磁界分布)

### 5.3 被試験体誤動作監視システムについて

#### 5.3.1 目的

電子機器の耐ノイズ性試験において、被測定物(電子機器)が誤動作しているかどうかを試験従事者の判断で行う場合、試験を実施している間中、被試験体の異常挙動を作業者が常に監視し続ける必要がある。また、異常挙動の状態は、瞬時に変化する場合が多く、目視による監視では、異常状態を正確に記録することが難しい。そこで、作業者の負担を軽減し、異常挙動を自動的に判断し、試験の進行状況なども含めて正確に記録する監視システムを開発した。

なお、本システムは、被試験体の映像的な変化を検知し、アラーム表示するものであり、その変化が誤動作なのか、正常動作なのかの判定は、作業従事者が判断する。

#### 5.3.2 システム構成

本システムは、図 5-10 に示すように、被試験体(EUT)を撮影するビデオカメラを最大3台と、耐ノイズ性試験用ソフトが表示されているPC画面をビデオ画像に変換する装置、4ch分のビデオ画像を1画面に同時表示するとともに、表示画面上で一定レベル以上の変化を検知するとアラーム表示及びアラーム音を発する機能を有する画像記録装置①、ビデオ画像をHDD等に記録しながら再生も可能な画像記録装置②、映像表示装置で構成される。

画像記録装置①はアラーム検知の際、耐ノイズ性試験を実施している制御PCに、試験を中断させるアラーム信号を出力できる。

画像記録装置①では、画像上の変化を検知すると、変化を検知した画像領域に四角い枠が表示されるとともに、画面左下にアラーム表示が数秒間表示されるので、映像を見直し、アラーム検出時の映像を見つけだす際の目安になる。

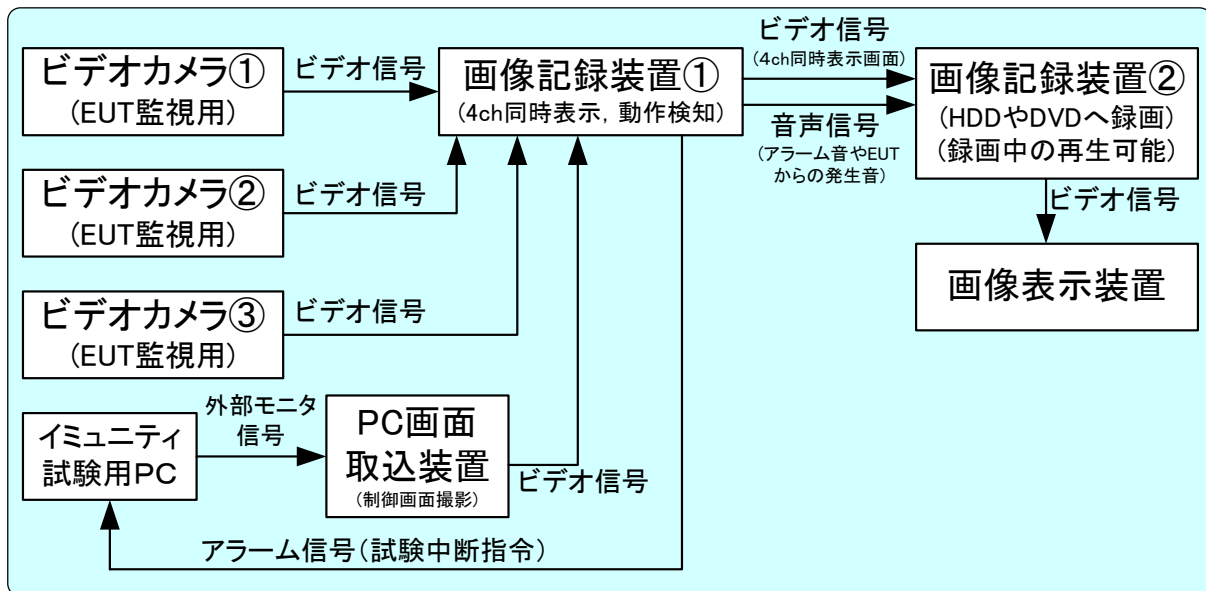


図 5-10 システム構成

### 5.3.3 具体的な操作手順

- 1)被試験体が誤動作したかどうかを映像的に判定できる被試験体の部位に対して、ビデオカメラ①～③を位置合わせし、撮影を開始する。
- 2)耐ノイズ性試験を行う制御PCの表示出力をPC画面読み取り装置に接続し、PC画面をビデオ信号に変換する。
- 3)画像記録装置①において、ビデオカメラ①～③を接続したchに対して、アラーム検出機能をONにし、必要に応じて、動作検出エリアや検出感度を調整する。
- 4)画像記録装置②の録画を開始する。
- 5)耐ノイズ性試験を開始する。
- 6)画像記録装置①のアラーム検知ブザーがなるのを監視する。
- 7)画像記録装置①のアラーム検知とともに、耐ノイズ性試験ソフトが中断される。
- 8)画像記録装置②の記録映像を巻き戻して再生し、作業者が誤動作判定を行う。
- 9)必要に応じて、被試験体の再起動、耐ノイズ試験の再開、終了等を判断する。
- 10)試験終了後、画像記録装置②の記録映像をDVDに保存し、試験記録とする。

### 5.3.4 実施例

図 5-11 に実施例を示す。ここでは、教育用のワンボードコンピュータを被試験体(EUT)とし、EUTの異常を監視するために2台の監視カメラを用いた。監視カメラ①では、EUTの表示パネル(7セグメントLED)の変化を監視し、監視カメラ②では、EUTのステップモータが勝手に回転し出さないかを監視することとした。そして、それら2台のカメラ映像と、イミュニティ試験を実施するPCの画面情報の映像を、画像記録装置①に取り込み、図 5-12 のように4分割画像化し、その画像を画像記録装置②で記録し、画像表示装置で表示する。

その後、イミュニティ試験を開始し、ある時点で、LED表示の変化等が発生すると、画像記録装置①の動作検知機能が働き、変化が発生した領域がマーキングされるとともにアラーム表示やブザー音になる。試験担当者は、イミュニティ試験を中断してEUTが誤動作していないか確認するとともに、画像記録装置②に記録された画像を再生し、アラーム検知時の画像を確認して、誤動作判定を行う。

なお、画像の変化を検知し、アラームを発生させるしきい値は、画像記録装置①において調整可能であり、ケースバイケースで監視する領域の場所、変化の度合いなどを調整する必要がある。





図 5-11 システム構成(写真)

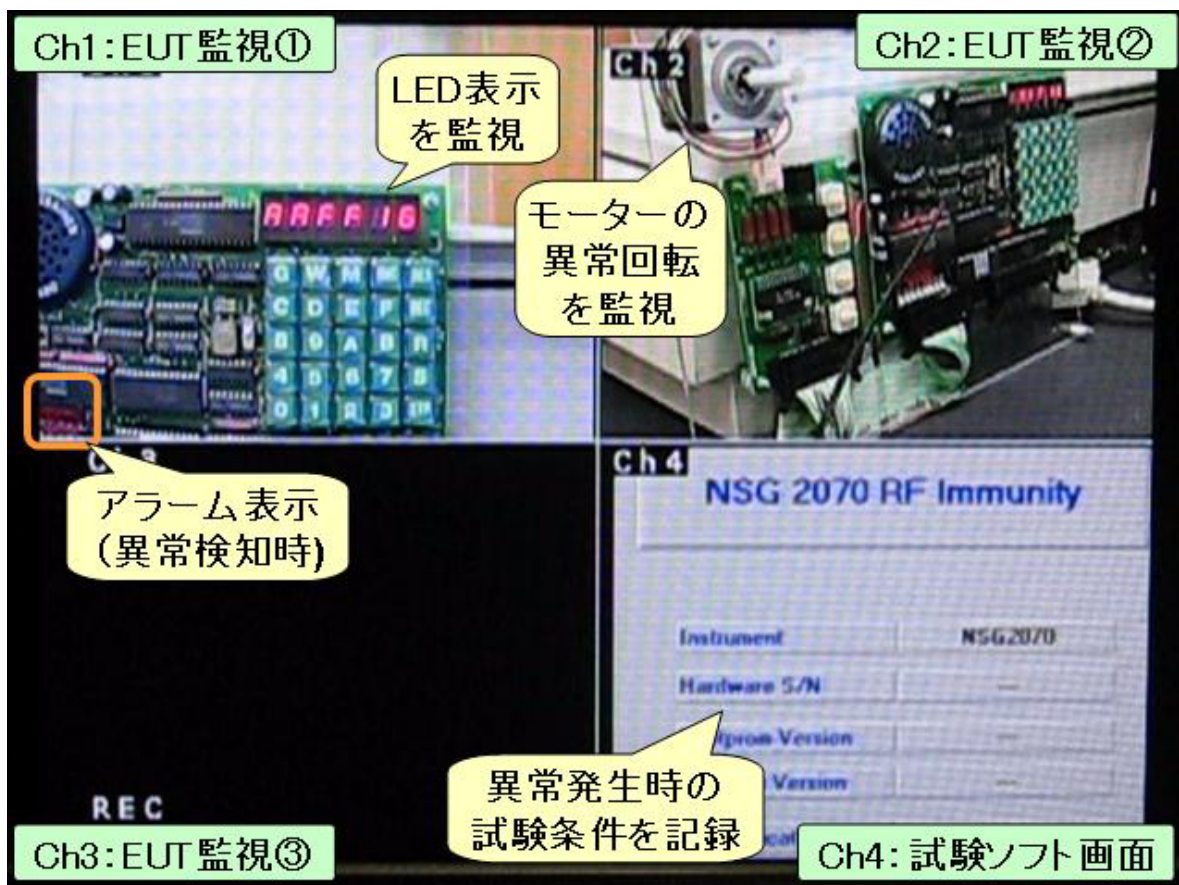


図 5-12 画像記録装置②に記録される映像(アラーム時のブザー音も記録)

## 6. ノイズ対策のための基礎知識

### 6.1 基本素子の周波数特性

EMC対策で利用される各種の素子は基本的なR, L, Cから構成されている。そこで、ここではこれらの基本的な素子の周波数特性について簡単に述べておく。ノイズ対策部品はこれらの組み合わせでできており、各素子の基本的な特性を知ることによって、対策部品の動作もより深く理解できるようになると考えられる。

#### 6.1.1 導体の抵抗

導体の抵抗は、直流や低周波においては導体の長さ、断面積、抵抗率、導電率によって(式 6-1)で表される。

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S} \quad (\Omega) \quad \text{(式 6-1)}$$

ここで、 $\rho$  : 抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ )、 $l$  : 導体長(m)、 $S$  : 断面積( $m^2$ )、 $\sigma$  : 導電率(S/m)

しかし、周波数が高くなると表皮効果により電流が流れる面積が狭くなり、抵抗値は大きくなる。これを式で表すと、(式 6-2)となる。この特性は、周波数の平方根に比例するというのである。

$$R = \frac{l}{\sigma \left\{ \pi r^2 - \pi (r - \delta)^2 \right\}} \approx \frac{l}{2\sigma\pi r \delta} = \frac{l}{2r} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma\pi}} \sqrt{f} \quad (\Omega) \quad \text{(式 6-2)}$$

ここで、 $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$  : 表皮の深さ、 $r$  : 半径(m)、 $\mu$  : 透磁率、 $l$  : 導体長(m)、

$\sigma$  : 導電率(S/m)、 $f$  : 周波数(Hz)、 $\omega$  : 角周波数(rad/s)。

直流から高周波までを表す実験式として(式 6-3)を用いることができる。理論的な検討をする場合に利用すると便利である。

$$R = \frac{l}{4\pi r^2 \sigma} \left( 1 + \sqrt[3]{3^6 + 64r^6 (\mu\sigma\pi f)^3} \right) \quad (\Omega/m) \quad \text{(式 6-3)}$$

ここで、 $r$  : 半径(m)、 $\mu$  : 透磁率、 $\sigma$  : 導電率(S/m)。

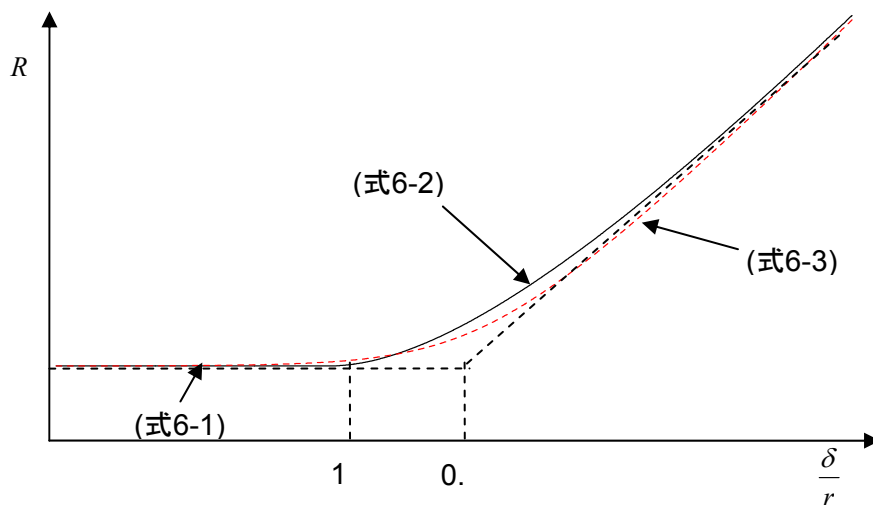


図 6-1 導体の抵抗の周波数特性



### 6.1.2 抵抗器

一般に使用される抵抗器には炭素皮膜抵抗、金属皮膜抵抗などがあり、近年は小型化に対応してチップ抵抗などが使用されるようになってきている。これらの抵抗器は図 6-2 の等価回路で表されるが、抵抗値と周波数によって、インダクタンスを無視、または、容量を無視して考える必要がある。ここで、実際に測定した値を元に検討する。図 6-3 は、異なる抵抗値の炭素皮膜抵抗器のインピーダンスを 40MHz まで測定した結果である。この結果から、以下のことがわかる。

(低抵抗の場合)  $1\Omega$  の結果より、周波数が高くなるとインピーダンス値が増加し、リード線を長くすると増加が大きくなることから、等価回路は R と L の直列となることがわかる。

(中抵抗の場合)  $100\Omega$ 、 $1k\Omega$  の結果より、40MHz までの範囲では周波数に対してほぼ一定であり、R のみの等価回路となる。

(高抵抗の場合)  $10k\Omega$  以上の結果より、周波数が高くなるとインピーダンス値が低下しており、容量の影響によるものと考えられる。従って、等価回路は R と C の並列となることがわかる。

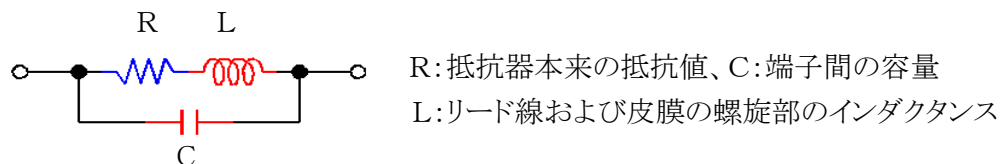


図 6-2 抵抗器の等価回路

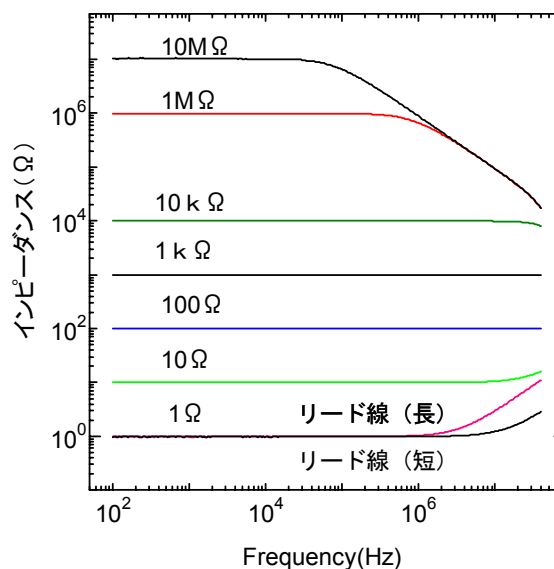


図 6-3 炭素皮膜抵抗器の周波数特性

### 6.1.3 静電容量

一般に静電容量は、二つの金属の間に絶縁体を挟んで構成されている。サイズを小さくするために、フィルム状にして巻いてあるものが多い。近年は、薄膜技術を利用して積層セラミックのものがよく使用されている。コンデンサ自体は原理的には周波数特性を持たないが、実際に構成されている材料と構造により、図 6-4 に示すような等価回路で表すことができ、ある周波数で直列共振を起こす。これがコンデンサの自己共振である。

実際に測定したコンデンサのインピーダンス特性が図 6-5 である。これからわかるように、コンデンサは自己共振を起こすまでの低い周波数帯ではコンデンサとして働くが、自己共振周波数より高い周波数帯ではインダクタンスとして働くことがわかる。コンデンサを使用する場合は、この特性を良く知って利用することが大切である。なお、自己共振周波数では等価的な直列抵抗だけがインピーダンス値として特性に表れていることがわかる。

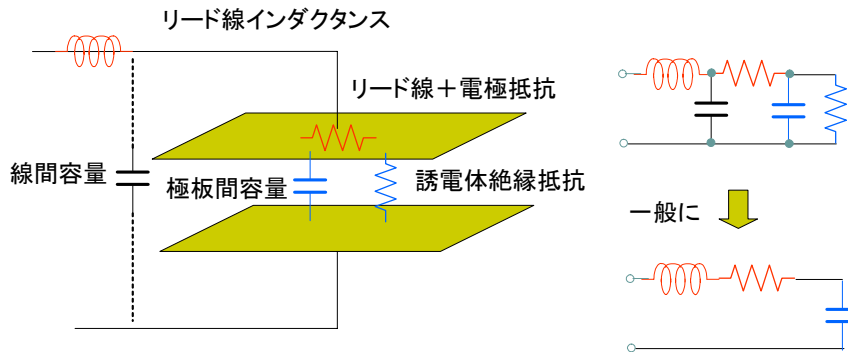


図 6-4 コンデンサの等価回路

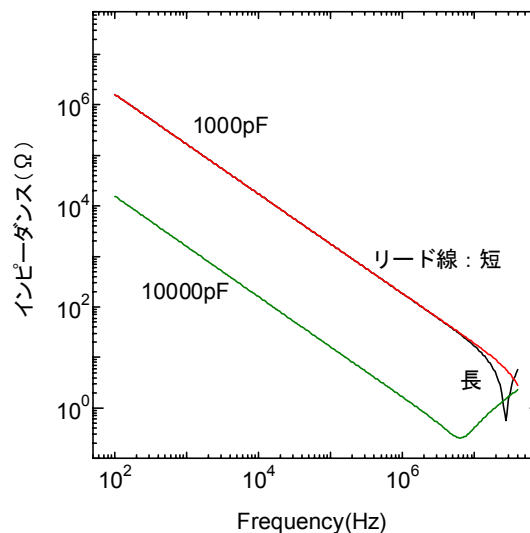


図 6-5 コンデンサの周波数特性

#### 6.1.4 インダクタンス

導体のインダクタンスの場合、低周波数帯では導体内部に生じる内部インダクタンスがあるが、周波数が高くなるにつれて表皮効果により無視できるので、導体と周囲導体等の位置関係により決定される外部インダクタンスだけを考えればよい。外部インダクタンスは導体同士あるいは導体とグラウンドなどの位置関係だけで決まる値であるため、インダクタンス自体は原理的には周波数特性を持たない。回路部品としてコイルによりインダクタンスを構成する場合は、線を巻いてコイルを作成するため線間容量により共振回路を構成し、図 6-6 のような等価回路となる。Lは本来のインダクタンス値で、Cは線間の容量、Rはコイルを構成する導体の抵抗分である。この等価回路からわかるように、インダクタンスは並列共振を起こすため、その利用範囲が限定される。

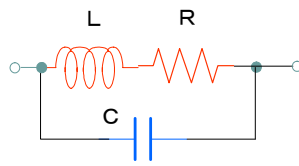


図 6-6 インダクタンスの等価回路

## 6.2 ツイストによる誘導ノイズの低減

### 6.2.1 実験の目的

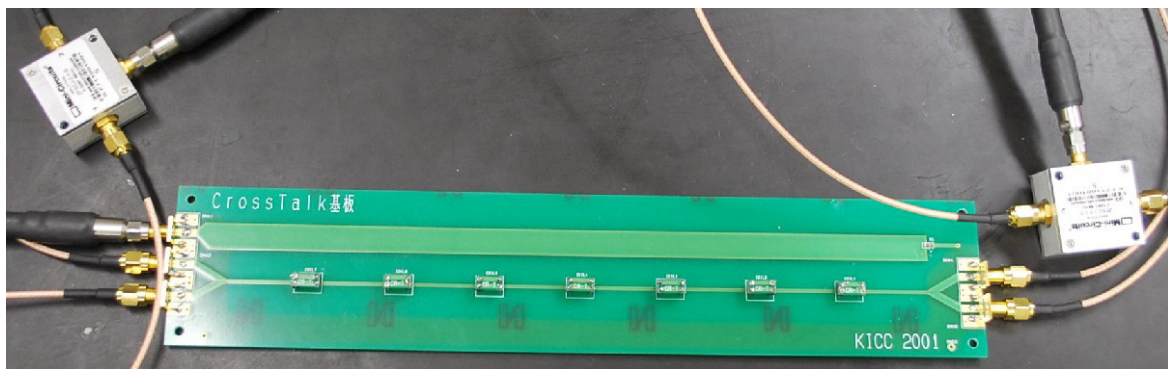
平衡ケーブルがノイズに強いことは良く知られている。しかし、完全に平衡となるケーブルを作成することは難しい。そこで、線をよじることでより平衡に近づけようとしたものがツイストペアケーブルである。ここでは、線をよじることで、どの程度誘導ノイズを除去できるかを実験で明らかにする。

### 6.2.2 実験回路の説明

図 6-7(a)は、実験回路基板である。この基板は、下側の平衡線路をはさむようにシングルエンドの回路が設置されており、平衡線路にノイズを誘導できるようになっている。平衡線路の部分は、小さいスイッチ用基板により切り替えることができ、平衡線路あるいは撚りを模擬するために、区間数を変えて交差させて実験ができるようになっている。



(a) 実験基板



(b) 実験回路

図 6-7 ツイストによる誘導ノイズ低減効果の実験回路

### 6.2.3 実験方法

(1)図 6-7(b)のように、左上のシングルエンド回路の入力端子にネットワークアナライザをつなぐ。出力側は  $50\ \Omega$  で終端されている。そして、NEXTを測定する場合は、平衡ケーブルの左側にネットワークアナライザのポート 2 を、FEXTを測定する場合は、右側に接続する。ただし、このときスプリッタ(入出力ともに、 $0-\pi$  位相出力のもの)を介して平衡回路部分とネットワークアナライザを接続する。

(2)小基板を平衡ケーブルとなるように差し替え、NEXTあるいはFEXT(いずれも  $S_{21}$  を測定すると良い)を測定する。

(3)小基板を順次取替え、以下のような回路を構成して、測定を進める。

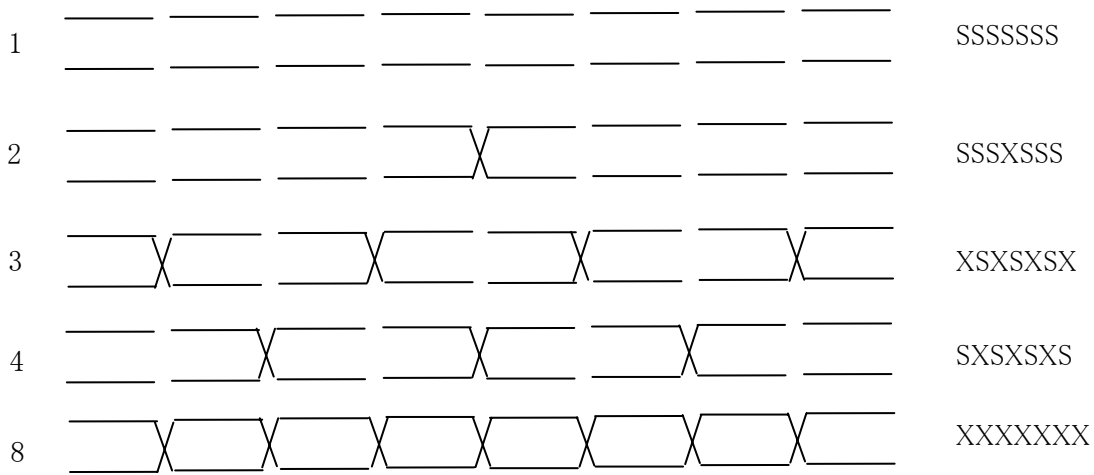


図 6-8 ツイストの作り方

#### 6.2.4 結果の考察

図 6-9 に NEXT (近端漏話) 実験結果を示す。S はそのまま接続、X はクロス接続したことを表す。これから次のことがわかる。

(1)SSSSSS はツイストしていないため、誘導が大きい。クロスする区間が入ると誘導が減少する。

(2)区関数が増えるにしたがって、誘導が減少する

(3)XSXSXS は中央部が奇数でうまくキャンセルしないため、やや誘導が多い。

つまり、ツイストすることにより、偶数区間となる場合は互いにキャンセルするため誘導が減少し、区関数が増えるとより細かにキャンセルするため、より誘導量が減ることがわかる。これが、線をよじることによる誘導ノイズ対策であり、できるだけ細かく撚って、偶数区間となるようにすることが重要である。

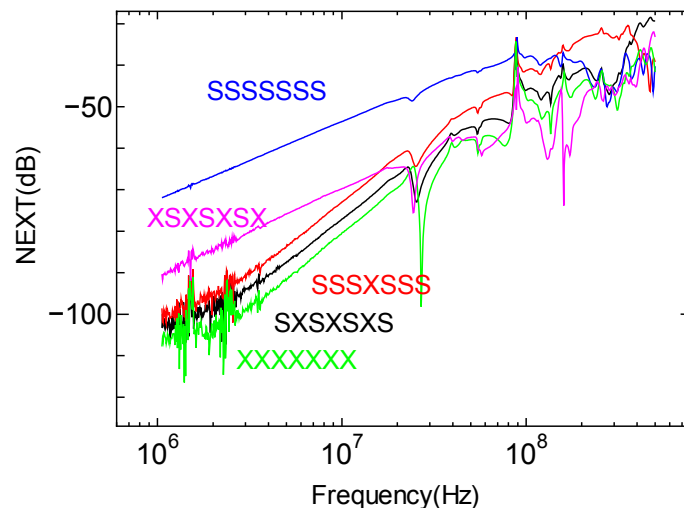


図 6-9 線をよじることによる、誘導ノイズの低減効果

## 6.3 コモンモード信号とディファレンシャルモード信号

### 6.3.1 実験の目的

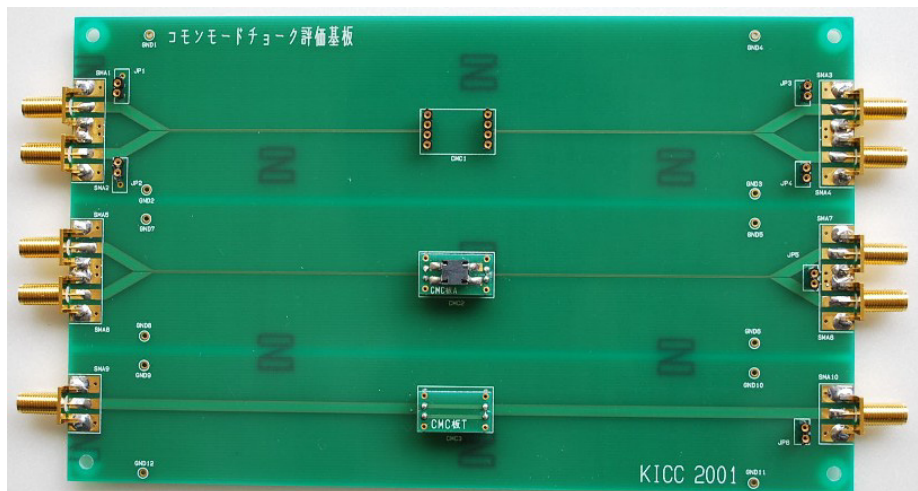
近年、よく使用されるようになった差動伝送では基本的にグラウンドとグラウンド上の2信号線を用いて、各信号線にそれぞれ位相の反転した信号すなわち、ディファレンシャルモード信号を加えて信号を伝送している。これに対し、従来のシングルエンド伝送のようにグラウンドと信号線の間を伝わる信号がコモンモード信号である。ここで、大事なものは次の2点である。

- (1) 回路の平衡度
- (2) コモンモードとディファレンシャルモード相互間の変換特性
- (3) 不平衡信号から平衡信号の変換回路の具体例

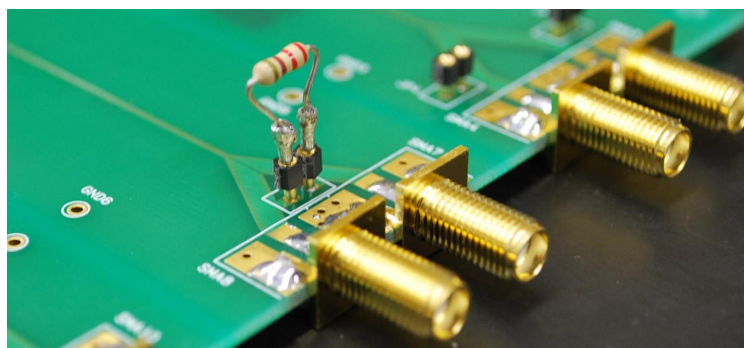
これらは、原理的には理解できるが、実際に測定してみないとイメージをつかみにくい量である。ここでは、これらの量を実験的に理解することを目的とする。

### 6.3.2 実験回路

図 6-10 に実験回路を示す。図 6-10(a)の基板は、抵抗やコンデンサなどを差し込むことで、回路の平衡を崩し、コモンモード信号からディファレンシャルモードへの変換特性を簡単に変更できるようにしてある。また、コモンモードからディファレンシャルモードへ変換する素子として、0-180 度のスプリッタを使用している。



(a)実験回路



(b)平衡を崩す回路

図 6-10 コモンモードとディファレンシャルモードを理解するための実験回路



### 6.3.3 実験方法

(1) 図6-10の実験基板の一番上の回路を用いる。この場合、2ポートネットワークアナライザからスプリッタ(0-180度位相)を介して差動信号を加え、出力側は(0-0度位相)スプリッタによってコモンモードに変換した信号を受信している。つまり、ここで測定している量は、ディファレンシャルモードからコモンモードへの変換特性である。もし、4ポートのネットワークアナライザが利用できる場合は、これらのスプリッタは不要である。4ポートネットアナを用いる場合、 $S_{cd_{21}}$ を測定すればよい。

(2) 基板右側の端子に、 $220\Omega$ を接続し、変換特性を測定する。抵抗の場合は、周波数特性がなくなり、平坦な特性になっている。コンデンサを用いると、周波数特性が出るので、実験を追加するとよい。用いるコンデンサの値は、抵抗の場合と同じ程度の平衡度にしたければ、その周波数における抵抗値と同じリアクタンス値を持つコンデンサを選択する。

### 6.3.4 実験結果

図6-11に実験結果を示す。Thruは、何も接続しないときである。CMCはコモンモードチョークだけを接続した場合で、大きな変化はない。しかし、Thru- $220\Omega$ の場合、 $220\Omega$ の抵抗を片側の線路に接続したため、平衡が崩れ、差動信号がコモンモードに変換されていることがわかる。これに、コモンモードチョークを接続したCMC- $220\Omega$ のグラフは、高域で平衡度が改善されていることがわかる。

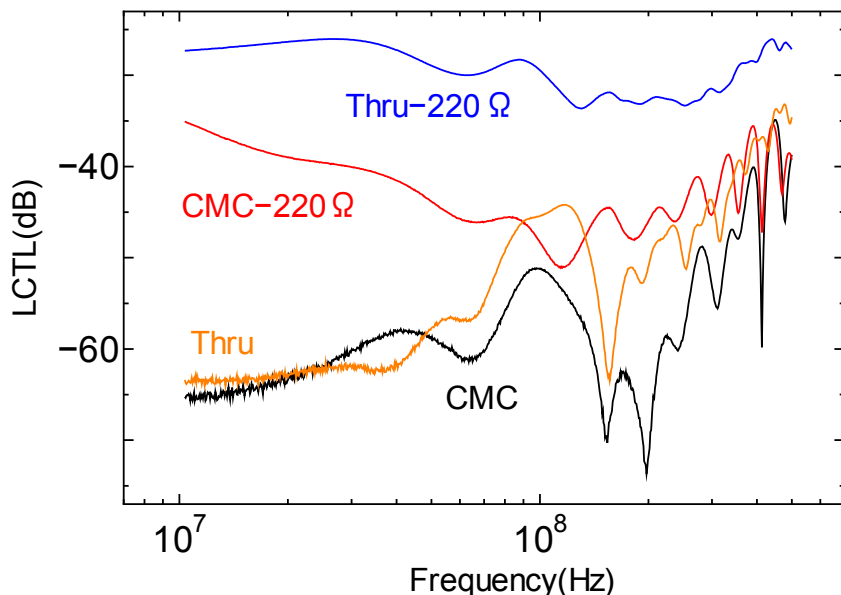


図6-11 平衡伝送回路の平衡度を変化させたときの平衡-不平衡変換特性

## 6.4 コモンモードチョークの効果

### 6.4.1 実験の目的

差動伝送回路において、何らかの原因で回路の平衡度が悪化したとする。すると、伝送している差動信号がコモンモードに変化したり、コモンモード信号がノイズとなって差動信号に混入する恐れがある。そこで、ノイズ対策に使用されるのがコモンモードチョークである。コモンモードチョークは、有効な素子であるが、コイルを用いているため、周波数特性があることや、製品の特性が $50\Omega$ 系で示されており、実際の使用時には期待した特性が出ない場合がある。ここでは、

(1)コモンモードチョークの動作原理

(2)コモンモードチョークを規定のインピーダンス以外で利用したときの特性を知ることを目的とする。

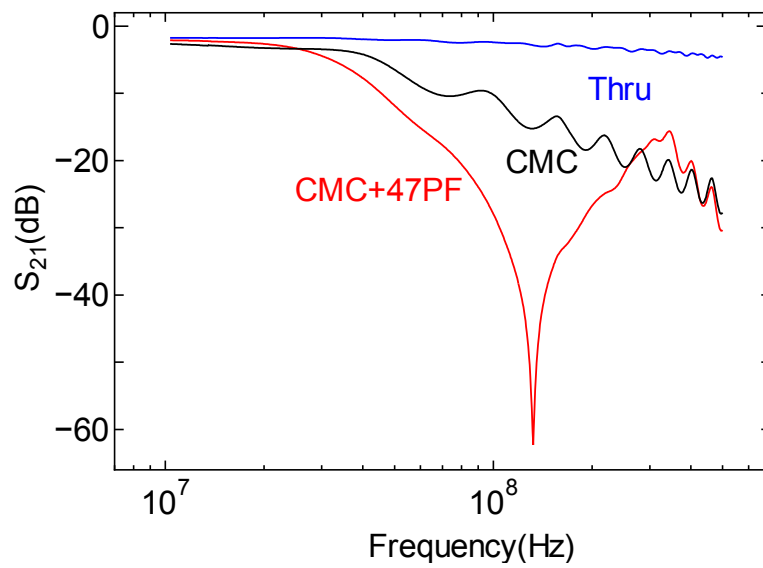
#### 6.4.2 測定回路

(1) ディファレンシャルモードの特性

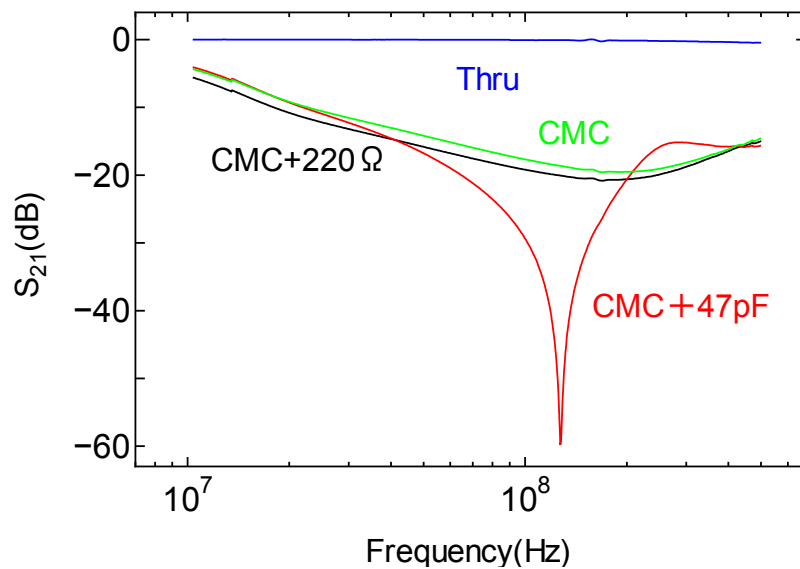
図 6-10(a)中央部の回路を用いる。説明は 6.4.3(1)参照。

(2) コモンモードの特性

図 6-10(a)最下部の回路を用いる。説明は 6.4.3(2)参照。



(a)ディファレンシャルモードの伝送特性



(b) コモンモードの伝送特性

図 6-12 コモンモードチョークの特性

### 6.4.3 実験方法

#### (1)ディファレンシャルモードの特性

図6-10(a)の回路のうち、中央部の回路を用い、入力に差動信号、出力も差動信号を取り出す。具体的には、ネットワークアナライザにより0-180度位相のスプリッタを介して、信号を加える。そして、コモンモードチョークを挿入しない場合、挿入した場合、ディファレンシャルモード回路にコンデンサを接続した場合の3つを測定する。

#### (2)コモンモードの特性

図6-10の回路の一番下の回路を用い、入力にコモンモード信号、出力もコモンモード信号を取り出す。具体的には、ネットワークアナライザをそのまま接続するとよい。そして、コモンモードチョークを挿入しない場合、挿入した場合、ディファレンシャルモード回路にコンデンサを接続した場合の3つを測定する。

### 6.4.4 実験結果

図6-12に結果を示す。図6-12(a)において、Thruはコモンモードチョークがない場合で、伝送特性が平坦なのがわかる。これにコモンモードチョークを入れたのがCMCで、高域では信号が減衰しているのがわかる。これはコモンモードチョーク自身の特性である。この状態で、47pFをディファレンシャルモード回路に接続したのがCMC+47pFである。この場合、100MHz付近で大きな変化が生じている。つまり、50Ω系で測定したのと、結果が大きく変わる様子がこれでわかる。

図6-12(b)のThruは伝送線路そのものの特性である。CMCはコモンモードチョークを挿入した場合で、コモンモード信号が減衰する様子がわかる。47pFのコンデンサをコモンモード回路に入れると、周波数特性が大きく変化することがわかる。これも、ディファレンシャルモード信号同様に、50Ω系で測定したのと、結果が大きく変わることがわかる。

## 6.5 TDRによる様々な基板のインピーダンス特性測定

TDRは、基本的に伝送線路の反射係数を測定する装置である。測定結果を変換することで、インピーダンス特性を知ることができる。ここでは、さまざまな伝送線路を測定することで、TDRの測定結果と伝送線路の関係を知ってもらうことを目的とする。

### 6.5.1 実験基板

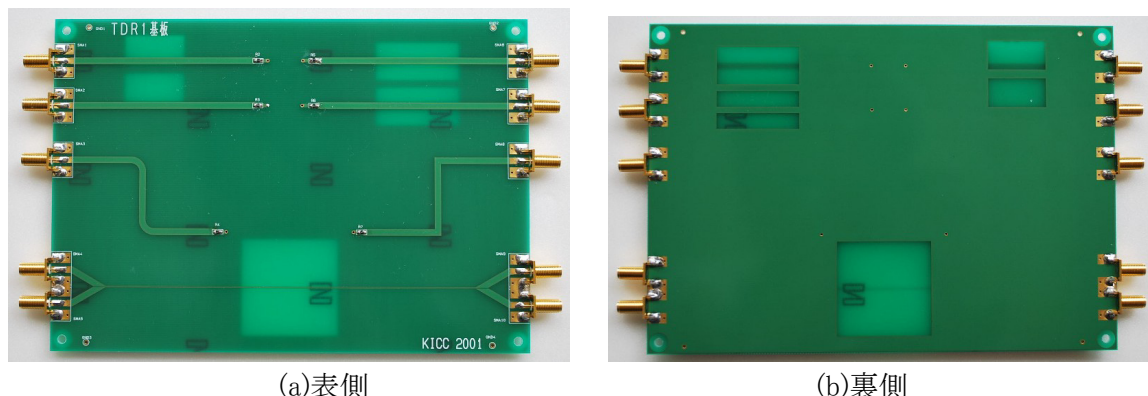


図6-13 TDR 実験基板1



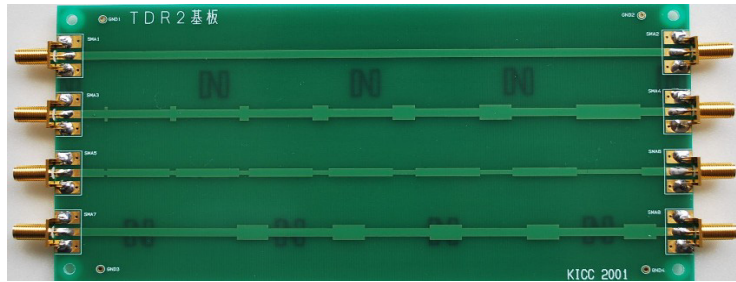


図 6-14 TDR 実験基板2

図 6-13 は、上側二つが伝送線路とグラウンドの関係を知るための回路、中央部が伝送線路の曲がりによる変化を知る回路、一番下は差動線路の特性を知るための実験回路である。図 6-14 は、伝送線路の長手方向の変化を知るための実験基板である。

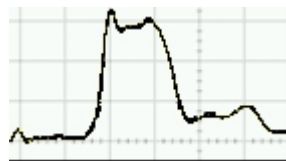
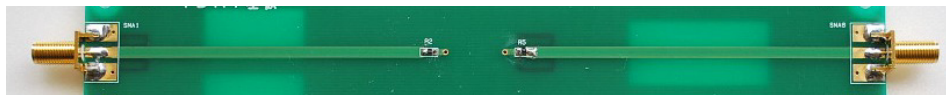
### 6.5.2 実験結果

#### (1)グラウンドとトレースの曲がりに対する TDR 波形の変化

図 6-13 の回路について測定した結果を図 6-15 に示す。図 6-15(a)は、トレースの裏面にはグラウンドはないが、トレースのすぐ横の部分の下側にはグラウンドがあるもので、ややインピーダンスが増加している。(b)は完全にグラウンドがないもので、インピーダンスが増加していることがわかる。(c)については、真裏にはグラウンドがあるが、すぐ横にはグラウンドがないものであるが、ほぼ一定のインピーダンスになっていることがわかる。(d)については、トレースの真裏にだけグラウンドがあり、周囲にはないものである。この場合も、ほぼ一定のインピーダンスとなっており、グラウンドはトレースの真裏にあればよいことがわかる。

#### (2)トレースの長手方向の変化に対する TDR 波形の変化

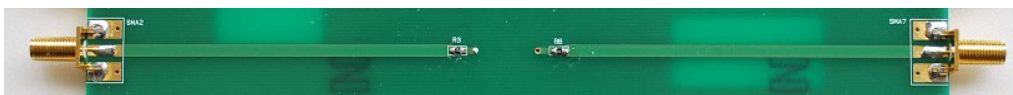
図 6-14 について測定した結果を図 6-16 に示す。この場合は、トレースの幅が広がることにより、線路-グラウンド間のキャパシタンスが増加し、特性インピーダンスが低下することが基本となる。図 6-16(a)の場合は、トレースの幅が広がっている部分が少しずつ長くなっているものであるが、その



(左右逆に注意)

(a) 伝送線路に裏側にグラウンドなし。すぐ横にはある

(b) 伝送線路の裏側にグラウンドなし



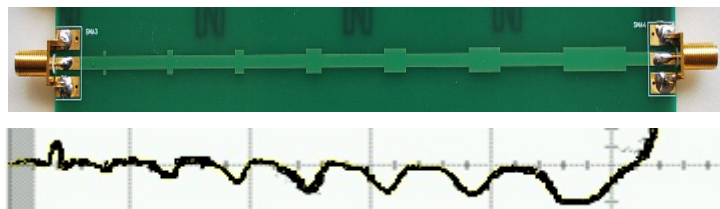
(左右逆に注意)

(c)グラウンドはあるが、すぐグラウンドが切れる

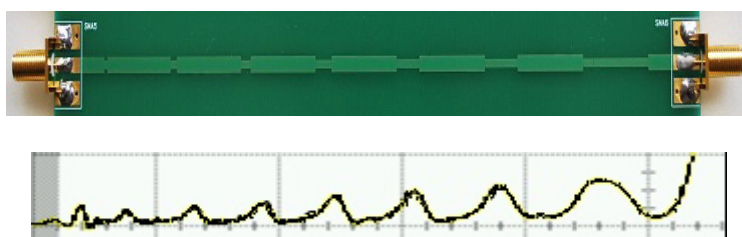
(d)線路の裏にだけグラウンドあり。周囲にはなし

図 6-15 グラウンドの有無によるインピーダンス特性の違い

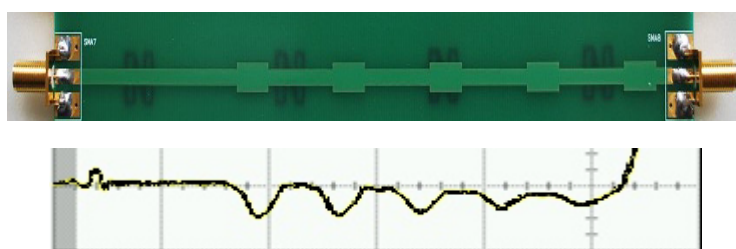
傾向は特性に生じている。(b)は、逆に狭い部分がだんだん長くなるものであるが、これもその部分の特性インピーダンスが増加している特性が読み取れる。(c)は、広がっている部分が一定のもので、遠方になるにしたがって、特性がぼやけていく様子がわかる。つまり、TDRでは、観測できる分解能は距離によって異なることがわかる。



(a)幅の広い部分がだんだん長くなる線路



(b)幅の狭い部分がだんだん長くなる線路



(c)一定幅の部分がだんだん遠方になる線路

図6-16 伝送線路の幅によるインピーダンス特性の違い

## 用語の解説

### 【コモンモード信号】

一般に、信号線とグラウンド間の電圧を示し、信号線とグラウンドからなる回路の面積が広いために、外部からあるいは外部への影響が大きい。差動伝送の場合は、差動信号(ディファレンシャルモード信号)からコモンモードへの変換特性が重要である。

### 【ディファレンシャルモード信号】

差動伝送における信号線間の信号である。本来伝送されるべき信号である。回路の平衡度が悪いと、ディファレンシャルモードからコモンモードへ信号が変換され、外部へのノイズとなる場合がある。

### 【LCTL】

ディファレンシャルモードからコモンモードへの変換特性を示す。Longitudinal Conversion Transfer Loss の略。20log(出力コモンモード信号/入力ディファレンシャルモード信号)[dB]である。

## 参考文献

6-1) C. R. Paul, 「EMC概論」、ミマツデータシステム

## 7. ノイズ対策部品の活用（デジタルノイズ対策）

ノイズ対策部品の中で受動部品を使ったフィルタを使い、デジタル信号のノイズ対策を検討したので報告する。

### 7.1 受動部品を使ったノイズ対策

電子回路を動作すると、電気信号の一部が電磁エネルギーとして放射したり、あるいは、この放射されたエネルギーの影響を受けて、電子回路の性能が出なくなることがある。電子回路のノイズ対策として、コンデンサやインダクタやトランス等の受動素子を使ったフィルタがノイズ対策に活用されている。表 7-1 に EMC 対策部品に使用されている用途を示す<sup>(7-1)</sup>。

表7-1 EMC対策部品

EMC対策の手法	用途	使用される部品
①ローパス型フィルタによる高周波ノイズ対策	デジタルノイズが高周波ノイズが重畳したアナログ信号や電源の高調波ノイズ対策	インダクタ、コンデンサ、LCフィルタ
②伝導路でのコモンモードノイズ対策	信号ラインや電源ラインのコモンモード対策	コモンモードチョーク、フェライトリングコア、絶縁トランスなど
③伝送路でのインパルス性ノイズ対策	信号ラインや電源ラインの落雷、静電気などにより発生するインパルス性ノイズの対策	バリスタ、コンデンサ、インダクタ、抵抗器、放電ギャップ部品など
④IC電源ノイズのおいず発生対策	IC電源などDC電源でラインの残留インダクタンスにより発生するノイズの抑制	コンデンサ
⑤平衡伝送路ノイズの発生対策	平衡伝送信号のバランスのくずれによって発生するノイズ抑制	コモンモードチョーク、絶縁トランス
⑥ダンピングによるノイズの発生対策	共振や定在波が発生する回路や線路のノイズ抑制	抵抗器、ピーズインダクタなど
⑦マッチングによるノイズ発生対策	定在波が発生する回路や線路のノイズ抑制	抵抗器

### 7.2 ローパスフィルタについて

電子回路のノイズ対策として、コンデンサやインダクタ等の受動素子を使ったフィルタがノイズ対策に活用されている。一般に、必要とする電気信号に比べて不要なノイズは高い周波数成分を含んだものが多い。周波数が高いノイズを除去するため、ローパスフィルタが使用される。


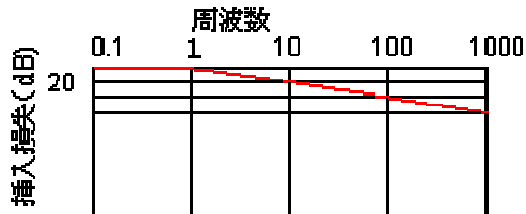

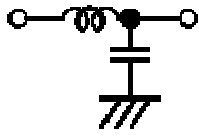
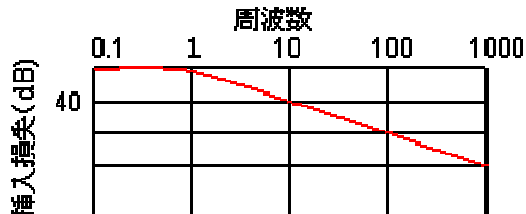
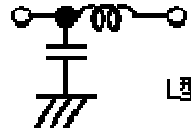
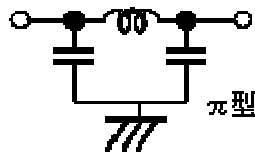
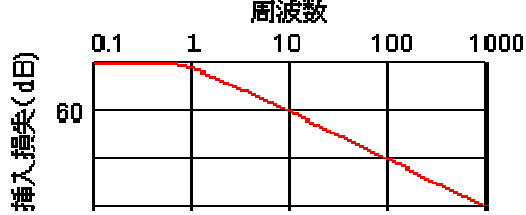

ローパスフィルタは、コンデンサとインダクタの素子数により、その効果が大きく変わる。表 7-2 にコ

コンデンサとインダクタの素子数によるフィルタの効果を示す。

コンデンサ単体、インダクタ単体のフィルタでは、周波数が1桁大きくなる毎に挿入損失が 20dB ずつ増加する。コンデンサとインダクタンスを 2 個使った 2 素子構成の L 型フィルタの挿入損失は、周波数が1桁大きくなる毎に 40dB 増える。3 素子を使ったフィルタの挿入損失は 60dB ずつ増加する。カットオフ周波数は、素子の定数で決まる。一般に、コンデンサやインダクタンスの定数が大きくなるとカットオフ周波数は低くなる。

ローパスフィルタは、接続される外部の回路のインピーダンスにより、フィルタを選択する必要がある。接続する回路がハイ・インピーダンスの場合には、コンデンサ入出力タイプ(コンデンサ単体、 $\pi$ 型など)のフィルタを使う。また、接続する回路がローインピーダンスの場合には、コイル入出力タイプ(インダクタ単体、T型など)のフィルタを使用する。<sup>(7-2)</sup>

表7-2 フィルタの素子数と特性

素子	挿入損失	出力インピーダンス
 コンデンサ		高い
 インダクタ		低い
 L型		高い
 L型		低い
 $\pi$ 型		高い
 T型		低い

### 7.3 デジタルノイズ対策

近年、デジタル信号を使った電子機器が使われ始め、デジタルノイズは深刻な問題になっている。今回受動部品を使ったフィルタによる対策を検討し、その性能を検証した。

#### 7.3.1 デジタルノイズ発生のメカニズム

デジタル信号を使ったデジタル機器の回路では、パルス信号が使用される。このパルスは、基本波とその高調波と呼ばれる基本波の整数倍周波数の正弦波成分で構成されている。この多くの周波数で構成されているパルスはプリント基板の電源線やパターンや I/O ケーブルを伝わり流れる。パターンやケーブルがアンテナになり外部に放出され、電磁妨害を与える。デジタルノイズ対策は、ローパスフィルタを使って、不必要な周波数成分を除くことにより低減させることができる。

#### 7.3.2 実験に使用した回路

デジタル機器から放射されるノイズを観測するために、図 7-1 に示す回路を作成した。水晶発信回路を使い 8MHz のパルス信号を作った。デジタル信号波形をオシロスコープで観測し、減衰回路 (50dB) を通してスペクトラムアナライザを使いデジタル信号のスペクトラムを観測した。

図 7-2 に作成した実験基板を示す。長さ 2m のケーブルをアンテナとして取り付けて、放射ノイズの電界強度を電波暗室で測定した。

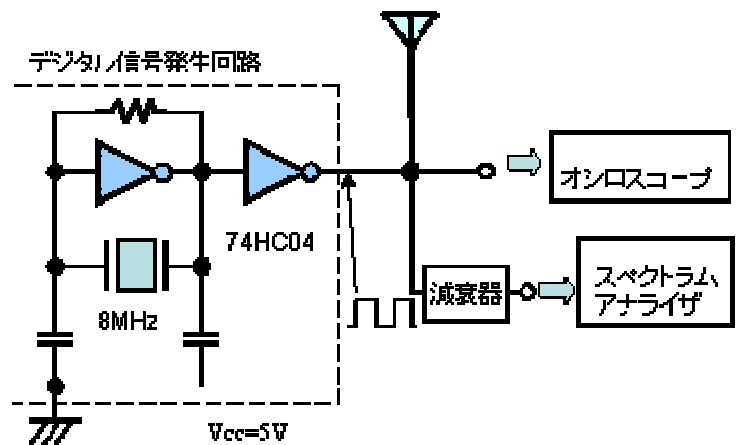


図7-1 デジタルノイズ放射実験回路

#### 7.3.3 デジタル信号波形とスペクトラム

図 7-3(a)に回路のデジタル信号波形を、図 7-3(b)にスペクトラムを示す。このデジタル信号は、周波数が 8MHz であり、立上りや立下り時間は 2.5ns とした。図 7-3 (b)より、基本周波数が 8MHz であり、その 2、3、4...倍高調波 (16、24、32...MHz) が観測される。

実験回路アンテナを付けない場合の放射ノイズを図 7-4(a)に示す。図 7-4 (b)に、アンテナになるケーブルがあるときの放射ノイズを示す。図 7-4 (a)の基板だけのときはノイズの放射は比較的小さい。図 7-4 (b)のケーブルを付けると、CISPR 規格を 30dB 超える強い電磁ノイズを放射している。アンテナから放射される電磁ノイズは、200MHz 以上では周波数が高くなると減少していく。周波数が 40MHz で放射ノイズは最大になり、120MHz でも放射ノイズが高い。この周波数は、アンテナの長さが 1/4 波長、3/4 波長になる周波数である。そのため、定在波が発生し、効率よくノイズが放射している。

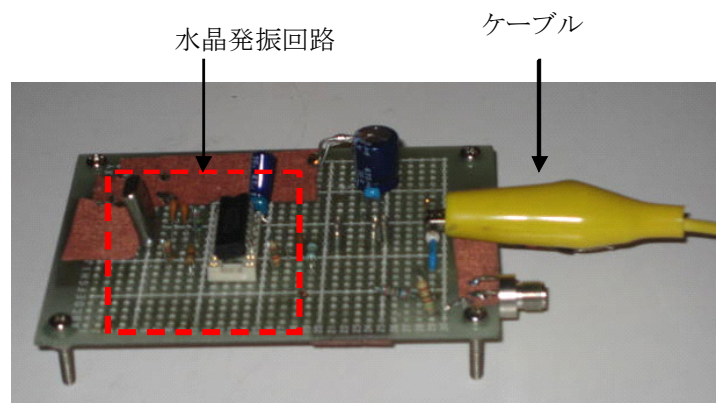


図7-2 作成したデジタルノイズ放射基板

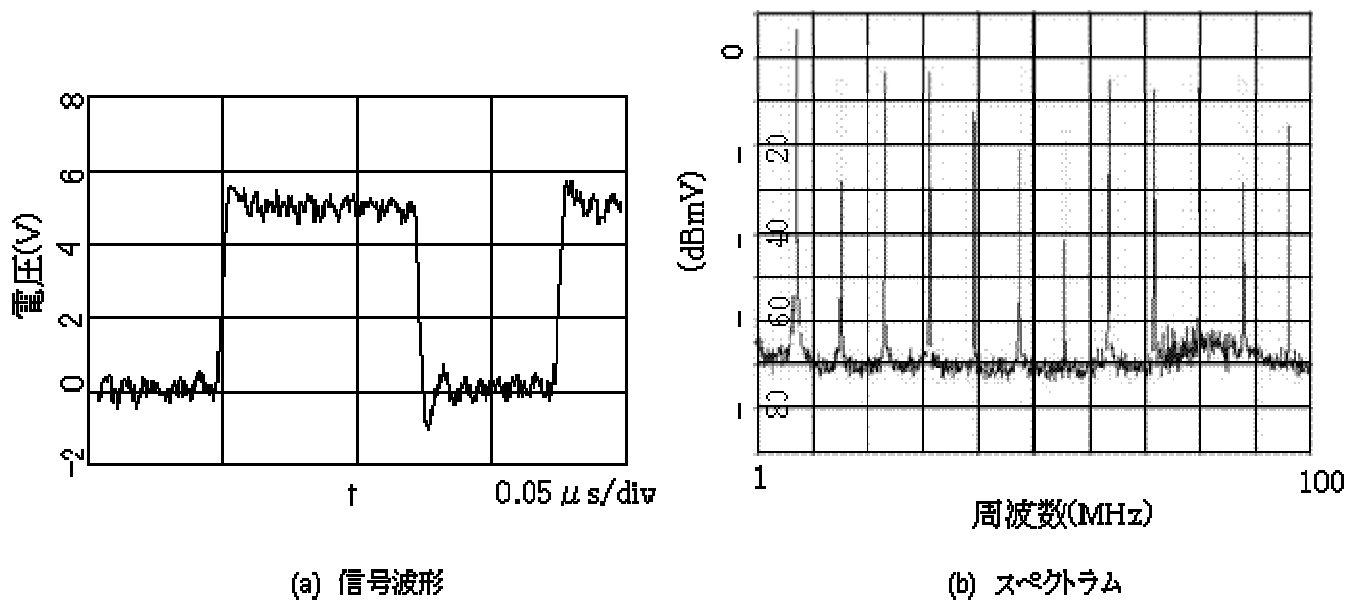


図7-3 デジタル信号波形とスペクトラム

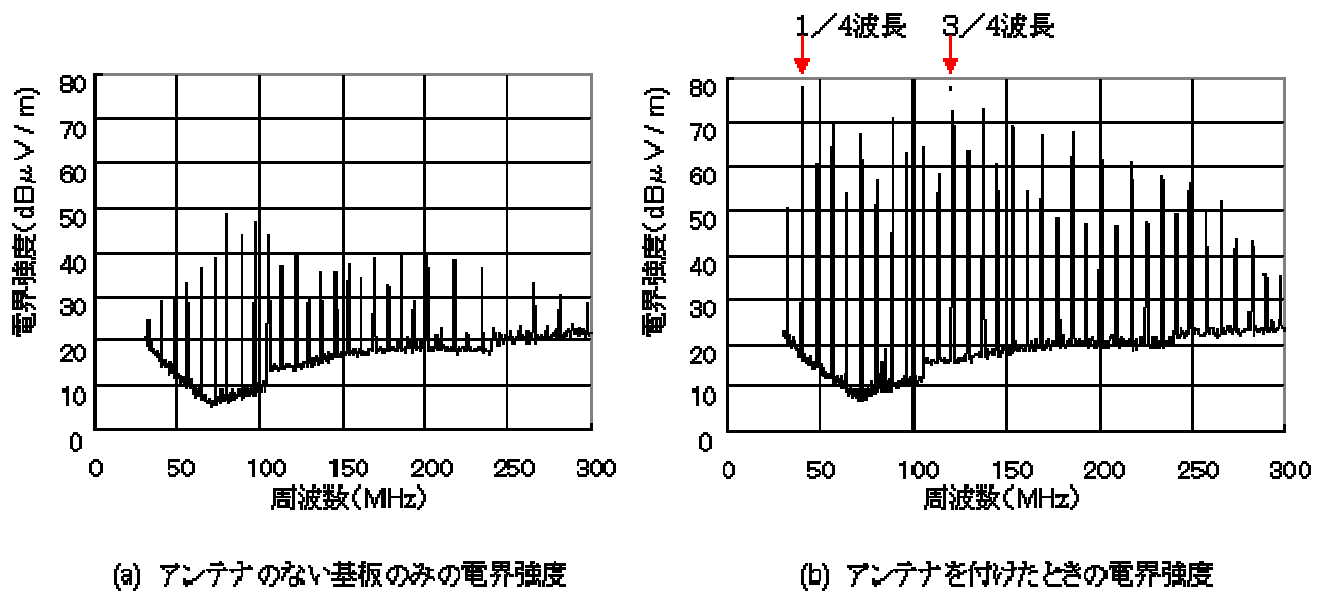


図7-4 デジタルノイズ放射基板の電界強度



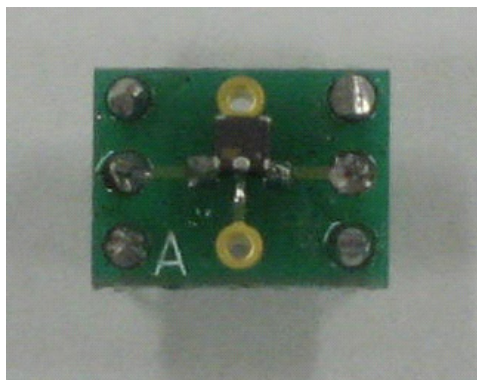
## 7.4 受動部品を使ったデジタルノイズ対策

デジタルノイズの対策としてローパス型フィルタが使われている。電源ラインや低い周波数のノイズ除去には、コンデンサやインダクタなどのフィルタ素子値が大きいフィルタを選べばよい<sup>(7-3)</sup>。電源ラインのデジタル信号のように有効信号とノイズ周波数が接近していて、フィルタにより有効信号を減衰させる恐れのある場合は、多素子のフィルタが有効である。

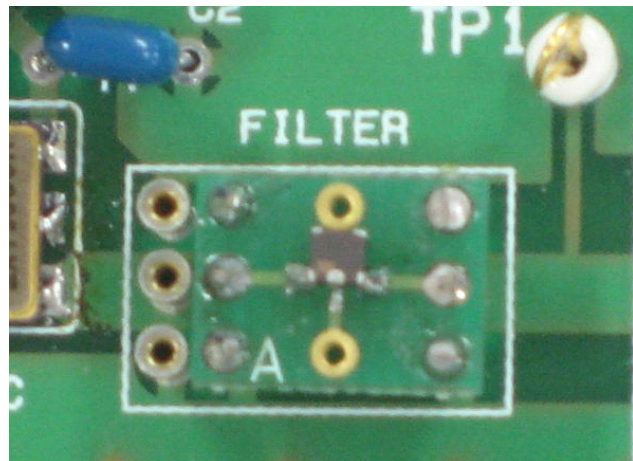
今回、T型や $\pi$ 型の3端子フィルタを使って、デジタルノイズ削減効果を実験した。

### 7.4.1 実験回路

実験に使用した基板は、図7-1に示すデジタルノイズ放射基板回路のデジタル信号出力部の後にフィルタを取り付けた子基板を挿入して行った。図7-5(a)に実際にチップを取り付けた子基板を示す。子基板の大きさは10mm×7.5mmである。図7-5(b)に実験基板に測定用子基板を挿入した状態を示す。



(a) チップを取り付けた基板



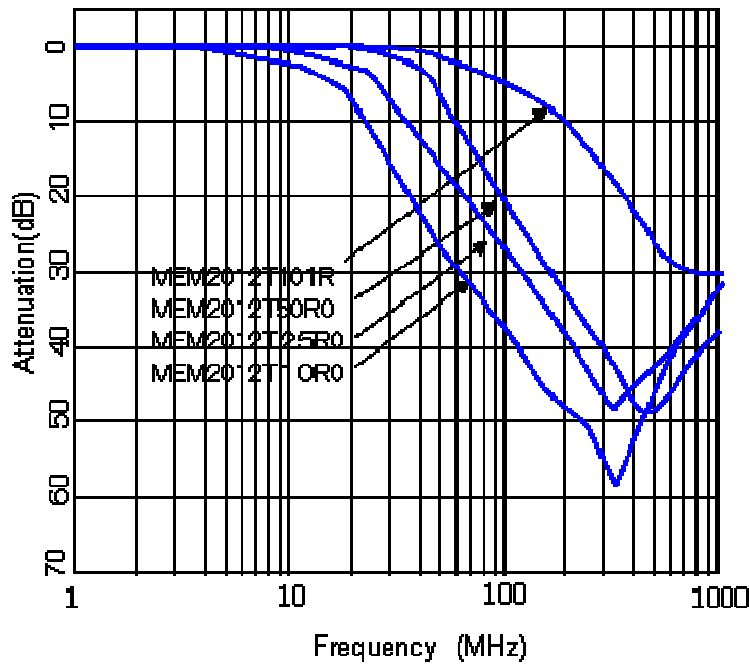
(b) 子基板を測定基板に挿入した状態

図7-5 チップ測定用子基板

### 7.4.2 実験に使用したフィルタ

今回の実験に使用したフィルタは、TDKの積層チップEMCフィルタを使った。このフィルタは、コンデンサとインダクタを積層したチップ部品であり、その大きさは2.0mm×1.2mm(2012タイプ)である。図7-6にT型3端子フィルタの電気特性を、図7-7に $\pi$ 型3端子フィルタの電気特性を示す。減衰周波数特性から、T型フィルタのほうが減衰特性のカーブが急になっていることから、ノイズキャンセル効果は高いと予想される。周波数が高くなると減衰量が増えていくが、ある周波数以上では減衰量が減ってきて、フィルタの性能が悪化する。これは、損失ESRと残留インダクタンスESLの影響によるものと思われる。実験には、カットオフ周波数が10、25、50、100MHzの4種類のチップを使用した。



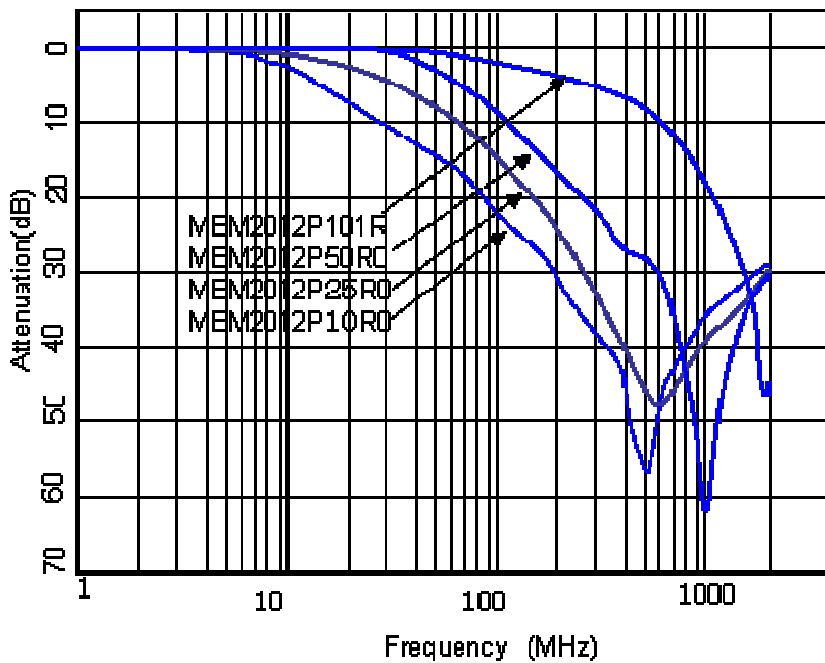


(a) 減衰周波数特定

品名	カットオフ周波数 (MHz)
MEM2012T10R0	10
MEM2012T25R0	25
MEM2012T50R0	50
MEM2012T100R	100

(b) 電気的仕様

図7-6 T型3端子フィルタの電気特性



(a) 減衰周波数特定

品名	カットオフ周波数 (MHz)
MEM2012P10R0	10
MEM2012P25R0	25
MEM2012P50R0	50
MEM2012P100R	100

(b) 電気的仕様

図7-7 pi型3端子フィルタの電気特性

表7-3 T型フィルタの効果

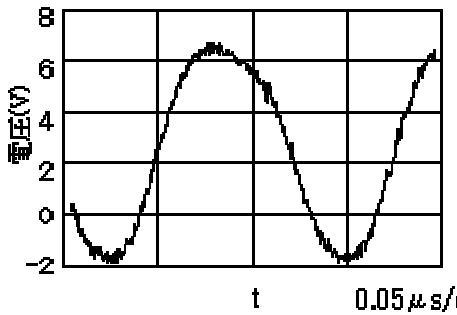
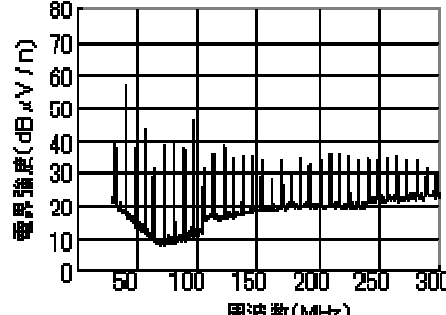
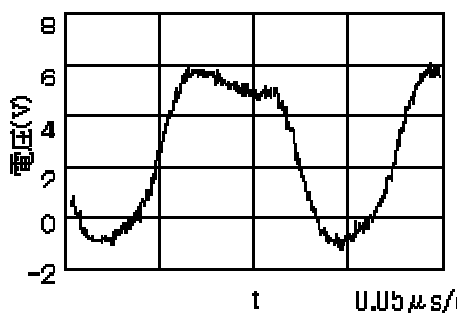
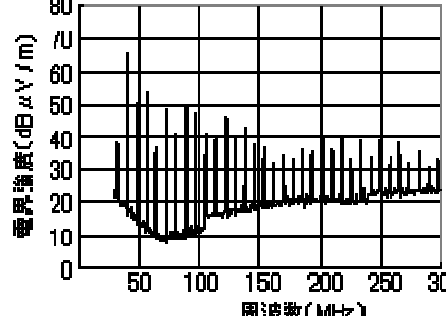
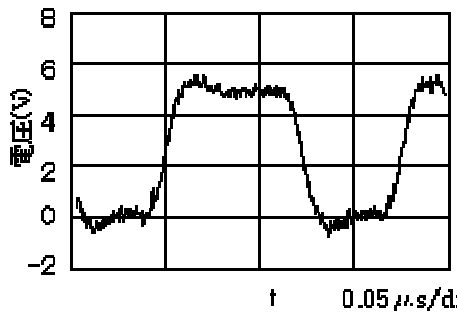
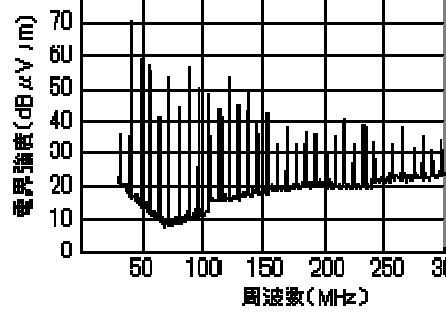
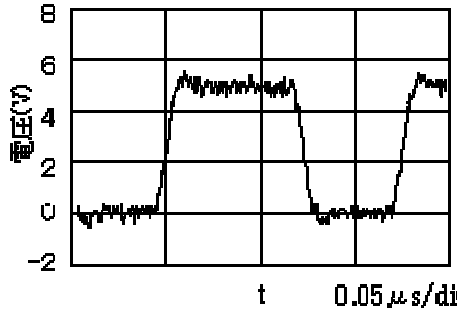
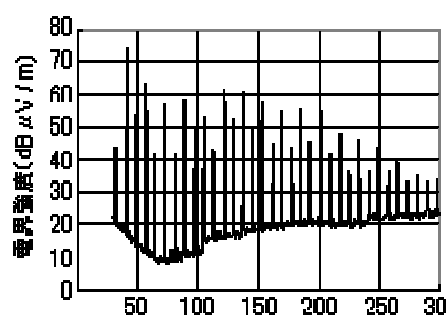
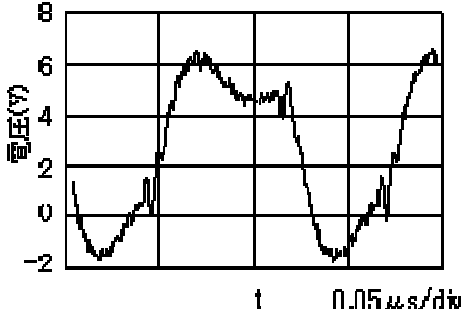
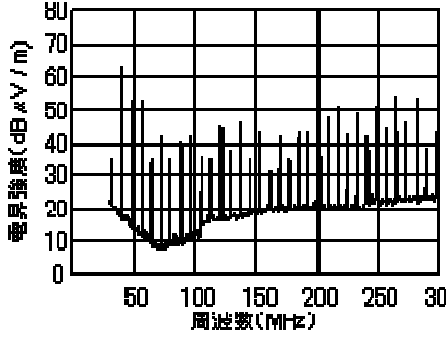
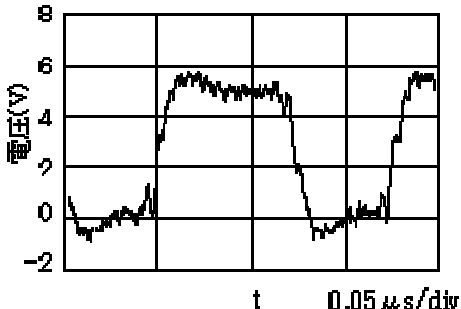
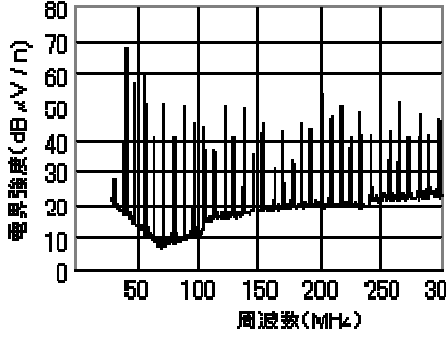
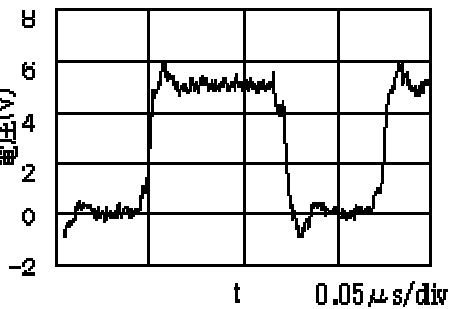
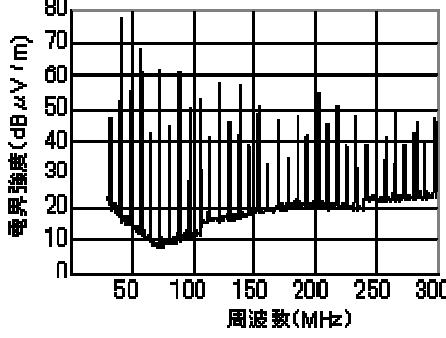
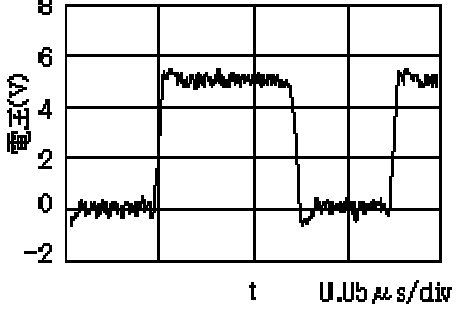
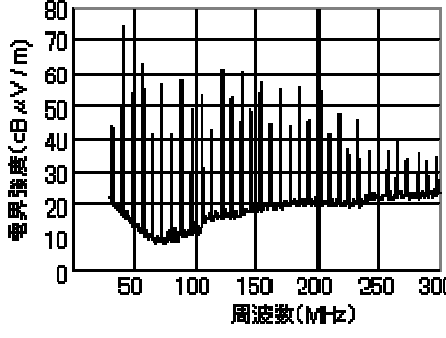
素子名	デジタル波形	放射ノイズ
MEM2012T10R0 10MHz		
MEM2012T25R0 25MHz		
MEM2012T50R0 50MHz		
MEM2012T100R 100MHz		

表7-4  $\pi$ 型フィルタの効果

素子名	デジタル波形	放射ノイズ
MEM2012P10R0 10MHz		
MCM2012P25R0 25MHz		
MEM2012P60R0 50MHz		
MEM2012P100R0 100MHz		

## 7.5 実験結果

表 7-3 に、T 型 3 端子フィルタを使ったときのデジタル信号波形と放射ノイズの電界強度を示す。表 7-4 に、 $\pi$  型 3 端子フィルタの実験結果を示す。

カットオフ周波数が低くなると、低い周波数の高調波が減衰するため、信号波形はなまりが大きくなる。カットオフ周波数 10MHz のフィルタでは、信号の基本波 (8MHz) とほぼ同じになるので、信号波形のフラットな部分がなくなってくる。

アンテナの 1/4 波長である 40MHz においては、放射ノイズの電界強度は T 型フィルタでは 20dB、 $\pi$  型フィルタでは 13dB 減少している。図 7-6(a)、図 7-7(a) から 40MHz のフィルタの挿入損失は、T 型フィルタでは 23dB、 $\pi$  型では 13dB あり、放射ノイズの電界強度はほぼ同じ値であった。

カットオフ周波数の低いフィルタを使用すると、放射ノイズをより減少させることができる。しかし、カットオフ周波数が、デジタル信号の基本波に近いと、波形のなまりが大き過ぎる。この点を考慮してフィルタを選択する必要がある。

### 用語の解説

#### 【挿入損失】

フィルタの性能評価は、挿入損失で行われる。挿入損失が大きいとノイズ除去効果が高くなる。フィルタを入れてないときの出力電圧  $E_{out}$  が一定になるようにし、フィルタがないときの入力電圧  $E_1$  とフィルタを挿入した時の入力電圧  $E_2$  の比をデシベル表示したもの。MIL-STD-220 により測定方法が決められている。

#### 【カットオフ周波数】

電圧比で -3dB 減衰する周波数である。信号やノイズの減衰が始まる周波数である。

#### 【定在波】

導体のインピーダンスが大きく変わるところで、電磁波の反射が起こる。進行波と反射波が重なり、定在波が発生する。今回のアンテナのように高いインピーダンスで終端されたときは、導体の長さの 1/4 波長の奇数倍となる周波数で定在波が発生し、ノイズが放射される。

#### 【ESR、ESL】

ESR は等価直列抵抗、ESL は等価直列インダクタンスと呼ぶ。フィルタには、コンデンサの誘電体損や電極などの銅損による損失 ESR や電極や配線による残留インダクタンス ESL がある。ESR、ESL により、フィルタの高周波特性が悪化する。

### 参考文献

- 7-1) 坂本幸夫：“対策部品で行う EMI 対策”，PP1-2，三松株(2005)
- 7-2) 坂本幸夫：“電子回路とノイズ対策が分かる本”，日刊工業新聞(2006)
- 7-3) 坂本幸夫：“デジタル信号の EMC・ノイズ対策設計”，日刊工業新聞(2006)

## 執筆者一覧 及び 問い合わせ先

氏名	所属	担当
石田 康弘	福岡県工業技術センター機械電子研究所 電子技術課 課長	全体、第1章
川畑 将人	福岡県工業技術センター機械電子研究所 電子技術課 研究員	第3章、第4章
林 宏充	福岡県工業技術センター機械電子研究所 電子技術課 主任技師	第3章
石松 賢治	熊本県産業技術センター ものづくり室 研究参事	第6章、第7章
尾前 宏	鹿児島県工業技術センター 電子部 主任研究員	第2章、第5章
桑原 伸夫	九州工業大学大学院 工学研究院電気電子工学研究系 教授	第3章、第4章
下塩 義文	熊本工業高等専門学校 情報通信エレクトロニクス工学科 教授	第6章

機関名	連絡先
福岡県工業技術センター 機械電子研究所	〒807-0831 福岡県北九州市八幡西区則松3-6-1 TEL 093-691-0260 FAX 093-691-0252 <a href="http://www.fitc.pref.fukuoka.jp/center/meri/meri.htm">http://www.fitc.pref.fukuoka.jp/center/meri/meri.htm</a>
熊本県産業技術センター	〒862-0901 熊本県熊本市東町3-11-38 TEL 096-368-2101 FAX 096-365-5704 <a href="http://www.kmt-iri.go.jp/">http://www.kmt-iri.go.jp/</a>
鹿児島県工業技術センター	〒899-5105 鹿児島県霧島市隼人町小田1445-1 TEL 0995-43-5111 FAX 0995-64-2111 <a href="http://www.kagoshima-it.go.jp/">http://www.kagoshima-it.go.jp/</a>