

不要電磁波による電子機器の誤動作解析に関する研究

尾 前 宏

①

不要電磁波による電子機器の誤動作解析
に関する研究

**Study on Malfunction of Electronic Equipments
by Electromagnetic Noise**

平成13年3月

尾 前 宏

目 次

第1章	序 論	1
1.1	はじめに	
1.2	電磁波による電子機器の誤動作問題の歴史的経緯	
1.3	誤動作問題に関する法規制化の動向	
1.4	誤動作解析に関する研究の動向	
1.5	本研究の目的	
第2章	各種印加プローブの試作と発生電磁界分布の均一性の評価	10
2.1	緒言	
2.2	試作印加プローブの概要	
2.3	評価方法	
2.4	各印加プローブ間のレベル補正	
2.5	印加プローブの電磁波放射特性	
2.6	マイクロストリップ線路と印加プローブとの結合特性	
2.7	結言	
第3章	実機モデルにおける誘導電圧	36
3.1	緒言	
3.2	全面アースの影響	
3.3	近傍に存在するグラウンド面が結合に及ぼす影響	
3.4	結言	
第4章	誤動作解析システムの構築	60
4.1	ハードウェア仕様	
4.2	ソフトウェア仕様	
4.3	試験手順	
4.4	試験条件による試験結果への影響	
4.5	結言	

第5章 実機に対する静電気放電試験と国際規格試験との相関性

70

5.1 緒言

5.2 供試体について

5.3 試験手順

5.3.1 イミュニティレベルの低い箇所の系統的絞り込み

5.3.2 誤動作原因となった配線パターンの特定

5.4 IEC Pub.61000-4-2 準拠試験との相関性について

5.5 結言

第6章 総括

94

文献

本学位論文に関連する発表論文

本学位論文に関連するその他の論文等

参考論文等

謝辞

第1章 序 論

1.1 はじめに

携帯電話やコンピュータ等の電子機器の高速な普及に伴い、携帯電話によるペースメーカーへの悪影響、電子機器から発生する電磁波による飛行機の計器異常など、不要電磁波による電子機器の誤動作問題が社会問題化するようになった。

これに伴い、電子機器のイミュニティ(Immunity=耐ノイズ性)に関する法規制が世界的に行われるようになり、電子機器メーカーでは規制への適合を余儀なくされている。

法規制では、電子機器としてのイミュニティを評価する試験法、規制値が規定されており、この規制値を満足しなかった場合、イミュニティを向上させるため、何らかの対策を施す必要がある。このためには、電子機器のどの場所が誤動作の原因なのか突き止める必要があるが、これまでは、その開発品に精通した担当者が誤動作内容を元に、経験や勘を頼りに対策を行っており、真の誤動作箇所を突き止められないまま、プリント基板全体をシールドしたり、対策部品を随所に追加するなど、非効率的な対策が行われる場合も多かった。

電子機器は、年々、高性能化、小型軽量化が進んでおり、コスト削減や軽量化等のため、無駄な部品や部材は極力削減し、誤動作原因の究明や対策に掛かる時間の削減、イミュニティ向上の為の設計ルール等のフィードバック等が求められるようになり、より高度なイミュニティ向上のための対策技術が望まれている。

1.2 電磁波による電子機器の誤動作問題の歴史的経緯

電子(電気)機器は、内部で使用する電磁エネルギーの一部を周囲の空間や電源線などへ放出したり、あるいはこの放出されたエネルギーの影響を受け、所定の性能が出なくなったりする。こういうトラブルは古くからあり、最初は特に放送や通信の分野で問題が顕著であったため、RFI(Radio Frequency Interference=無線障害)として研究され、対策もとられてきた。

しかし、電子(電気)機器が普及するにつれ、サイリスタやパワートランジスタを応用したパワー・エレクトロニクス分野やマイクロコンピュータに代表されるようなデジタル機器分野、あるいは狭いスペースに高性能な機器が多数装備される航空機、船舶、ミサイル、人工衛星など、広い分野でノイズ障害が発生するようになった。

このような広い分野でトラブルを起こしているノイズは無線周波だけとは限らず、電界もあれば磁界もあり、電源では商用周波数帯の障害もある。

このため、RFI より範囲の広い EMI (Electromagnetic Interference=電磁波障害) という用語が使われるようになった。

また、ノイズ問題が厳しくなってきたことにより、ノイズ対策を単に妨害を発生する機器側だけではなく、被害を受ける機器側のイミュニティも問われるようになり、EMC (Electromagnetic Compatibility=電磁共存性) という言葉が誕生し、総合的な見地でノイズ対策が行われるようになった。

表 1-1 に、10 年を 1 区切りとした年代別のノイズの移り変わり [1] を示す。

1.3 誤動作問題に関する法規制化の動向

電磁ノイズに関する法規制としては、IEC (International Electrotechnical Commission=国際電気標準会議) や IEC の下部組織である CISPR (International special Committee on radio Interference=国際無線障害特別委員会を意味する仏語の頭文字) などが、ノイズや不要電波の試験法、許容値等を制定し各国に採用を勧告している。

ノイズの規制には大きく分けて 2 種類ある。ひとつはノイズの放射を規制するもので、もうひとつはノイズを受けても誤動作しないよう規制するものである。主に前者を「EMI 規格」、後者を「EMS (Electromagnetic Susceptibility=電磁感受性) 規格」、または「イミュニティ規格」と呼ぶ。さらに EMI, EMS の両方の規格を含めたものを総称して「EMC 規格」という。代表的な EMI 規格には「CISPR Pub.11, 14, 22」などがあり、EMS 規格には、「IEC Pub. 61000-4 シリーズ」などの国際規格がある。各国でも CISPR の勧告に基づき国内規格を整理している。

ノイズ規格のほとんどが、電子機器が設置される場所によって規格に対する電子機器の階級を定め、工業地区などの範囲に設置されるものを「クラス A 機器」、家庭内およびその環境に設置されるものを「クラス B 機器」と定義し、通常、「クラス B 機器」に対する規制を「クラス A 機器」よりも厳しく定めている。

これらの規格のほかにも、米軍調達機器に対するノイズ規格として「Mil Std461/462」があり、米軍規格でありながら各国の軍規格、または自動車や航空機搭載機器のノイズ規格に影響を与えている。

ほとんどの場合 EMI 規格は、電源線を伝導するノイズに対して規制を行う「伝導ノイズ

規格」と、空間に放射されるノイズを規制する「放射ノイズ規格」に区別される。

国際規格 CISPR Pub.22 では、伝導ノイズに関しては 150kHz~30MHz を、放射規格では 30MHz~1GHz の周波数範囲で測定することとなっている。また、他の規格においてさらに低い周波数から高い周波数にわたって測定する規格もある。例えば、米軍規格である Mil Std では、20Hz~40GHz 以上という広い絶間で限度値を決め測定法を定めている。

EMS 規格の内容は、EMI 規格よりもかなり複雑である。世の中には雷などの自然ノイズ、また、電磁開閉器、モータ、自動車などから発生する人工ノイズとさまざまなノイズが存在する。したがって擬似的にノイズを発生させて、電子機器のノイズに対するイミュニティを調べる測定も多くの種類になる。IEC Pub.61000-4 シリーズでは、さまざまな EMS 試験の中から 5 項目を選択し、測定方法を定義している。これに当たって各国で EMS 規格の採用の検討が行われており、欧州連合では EN 規格として既に規制が開始されている。

静電気放電試験に関する法規制は IEC Pub.61000-4-2 として規定されているもので、低い相対湿度、人工繊維の絨毯、ビニールの衣料などが使用されるような環境や設置条件により、操作者から直接、あるいは近接物体へ発生する静電気放電現象に対する電子機器のイミュニティ評価に適用される規格である。この規格では帯電した人体が金属の物体を手に持ち、電子機器に放電をした場合を想定し、そのとき発生する電流波形をシミュレートするための回路を用いて試験を行なうことと規定されている。試験の際は、図 1-1 に示すように、放電ガンと呼ばれる装置の電子機器の筐体への直接放電や、水平結合板、垂直結合板に放電する間接放電等を行い、製品としてのイミュニティの評価を行っている。また、印加する電流波形も図 1-2 のように規定されている。

1.4 誤動作解析に関する研究の動向

外来電磁波に対する電子機器のイミュニティの評価方法としては、従来、下記のような手法があった。

(1) 電子機器に対するイミュニティ試験法である国際規格 IEC Pub.61000-4-2[2]等

電子機器の筐体への直接放電や、水平結合板、または垂直結合板に放電する間接放電等を行い製品としてのイミュニティの評価を行う方法。電子機器のどの部分がノイズに対して弱いのかを特定することは困難である。

(2) 衝撃磁界アダプタや衝撃電界アダプタを静電気放電試験機の放電ガンに取り付け、供

試体に近づけて印加する方法。ノイズに弱い部分の大まかな場所は把握できたとしても、正確な位置あわせを行うための機構がないため、試験の再現性が乏しく、正確な場所や、分布、対策効果などを把握することは困難である。

- (3) ノイズ発生器に接続した小型の電界プローブや磁界プローブをプリント基板や配線の任意の部分に手動で近づけてノイズを印加する。ノイズ発生器の出力を加減することで一番弱い部分を探す。大まかな場所を素早く探し出すため、最初は大きなプローブを使用し、次に小さなプローブに取り替え弱点を限定する方法。(2)の手法と同様に、正確な位置あわせを行うための機構がないため、試験の再現性が乏しく、正確な場所や、分布、対策効果などを把握することは困難である。
- (4) 電子機器のプリント基板の中から誤動作箇所を検出する方法として、半杭英二ら(NEC)によって「磁界印加形プリント基板用イミュニティ評価装置」[3][4]等で提案された手法。この手法は、ノイズ発生器に接続したループアンテナを、プリント基板近傍でXY軸方向に走査させて局所的なノイズを加えることで誤動作の発生場所や発生メカニズムを解析している。この手法では、ループアンテナのサイズは1種類であるため、誤動作箇所を詳細に検出するには膨大な試験回数が必要で時間がかかる。また、印加するノイズレベルは一定で、誤動作した場所を塗りつぶしてエラーマップとして表現するものであるため、最もイミュニティレベルが低い部分がどこであるのかを特定するのは困難である。そして、誤動作現象の情報がないため、複数の誤動作要因がある場合に、それぞれの現象がどのような分布で生じているかを把握することも困難である。

1.5 本研究の目的

不要電磁波による電子機器の誤動作が社会問題化し、イミュニティ向上に関する対策技術の高度化が望まれている。電子機器のイミュニティを向上させるには、電子機器の制御回路が搭載されているプリント基板の中から電磁波の影響を受けやすい箇所を検出し、誤動作する理由を究明することが重要である。

従来、単一サイズのループアンテナ等を電磁波源とし、手動でプリント基板近傍を走査したり、XYステージ等で機械走査する手法など[3]~[5]で実施されていたが、再現性よく試験することが困難であったり、誤動作箇所を詳細に検出するには膨大な試験回数が必要で時間がかかり、短時間で試験したければ、大まかな誤動作箇所しか特定できない等の

問題があった。

そこで、本論文では誤動作を発生させる電磁ノイズ源を静電気放電ノイズに限定し、プリント基板に対するイミュニティ試験法の確立を目指す。静電気放電(ESD)試験機の放電ガンに接続した正方形の小型導体平板(以後、印加プローブと表記)を、供試体であるプリント基板近傍に対向させ、供試体の局所的な領域に電磁波を印加する。それぞれの領域に電磁波を印加することで誤動作が発生した場合、誤動作発生時の ESD 試験機の設定電圧と誤動作現象を記録する。このような手法を基板上全ての領域に対して実施することで、供試体上の局所的なイミュニティレベルの分布状況を視覚化する手法を考案した[6]~[10]。この際、印加プローブとして大中小の導体平板を用い、電磁波の照射領域を段階的に小さくすることで、誤動作箇所を効率的に絞り込むことが可能となり、検査時間を大幅に短縮できる。また、各領域での誤動作現象を記録し、誤動作現象ごとに発生範囲を表示することで、誤動作要因毎に切り分けて対策することが可能となる。

本論文は、この誤動作解析システムについて、実際に実現可能であるか確認するため、任意の領域に局所的な電磁波を均一に印加できるかの検討、供試体であるプリント基板近傍の金属物などの影響を検討するとともに、実際に誤動作解析システムを構築し、再現性の高い試験条件を検討するとともに、市販されている供試体を用いて、その有用性を確認したことについてまとめたものである。

第2章は、局所的な電磁波を加えるために試作した各種印加プローブについて、プローブ全面から印加される電磁界分布の均一性について様々な周波数を用いて評価した。

第3章は、供試体であるプリント基板の条件として、信号ラインとアース面の構成条件の差異による影響について検討した。

第4章は、静電気放電試験機を電磁波源とする誤動作解析システムを構築し、その等価回路及び、試験手順や、試験条件等、その性能について検討した。

第5章は、第4章で構築した誤動作解析システムを用いて、実機プリント基板に対する静電気放電試験と、国際規格との相関性について考察した。

第6章は、以上の結果を総括した。最後に、現状で残された課題や今後の望ましい発展の方向性について考察した。

表 1-1 ノイズの遍歴の歴史

年 代	電気・電子機器	能動素子	ノイズの状況
第1世代 [～1950年(S25年)]	・AMラジオ ・電車 ・電蓄 ・アイロン ・白熱電球	鉱石検波器 真空管 使用電圧 (200～400V)	・ノイズは存在しているが ・ほとんどノイズを意識する 必要なし
第2世代 [～1960年(S35年)]	・FMチューナ ・Hi-Fiオーディオ ・蛍光灯 ・電気釜・冷蔵庫・洗濯機 ・テレビ受信機	真空管 使用電力(22.5～400V) トランジスタ 使用電圧(3～50V) IC 使用電圧(3～5V)	・機器が増えてノイズの種 類也多岐になる ・次第にトラブルが出てくる
第3世代 [～1970年(S45年)]	・セパレートステレオ ・4chステレオ ・ロボット ・コンパクトカセット ・ラジカセ ・電化製品 ・新幹線	高性能 トランジスタ IC 億用電圧(5V)	・ノイズに対する規制が必要 になる ・商品にも不要輻射の出る ものがでてくる ・ノイズ意識の必要が出て くる
第4世代 [～1980年(S55年)]	・単コンの高級化 ・マイカー ・ミニコン ・マイコン使用の機器出現 ・光通信 ・CD, LD	LSI 使用電圧(3V) 使用電圧(1.5V)	・本格的なデジタル機器 が誕生 ・マイコンが車から家電そ の他に搭載されノイズの 種類もレベルも上がる ・対策なしでは使用不可 能の時代となる
第5世代 [～1990年(H2年)]	・ミニコン ・光通信 ・ワープロ ・マシン ・ノパソコン ・BS放送 ・ファミコン ・パワーエレクトロニクス ・ハイビジョン ・カラオケ ・CD-I ・DAT ・CD-ROM ・FAX ・光磁気ディスク	(低電力化) 超LSI	・家庭の中にデジタル機 器が入ってくる ・ノイズ対策部品が増加し てくる
第6世代 [1990年～]	・MD ・DCC ・PHP・MPEG ・PCM音楽放送 ・液晶カムコーダ ・Photo CD ・デジタルテレビ	(小型化) 大容量メモリー	・NTT回線を使った情報の 入手やパッケージメデイ アも固体化するなどの変 化が出てくる ・ノイズ対策が基本設計に 含まれる

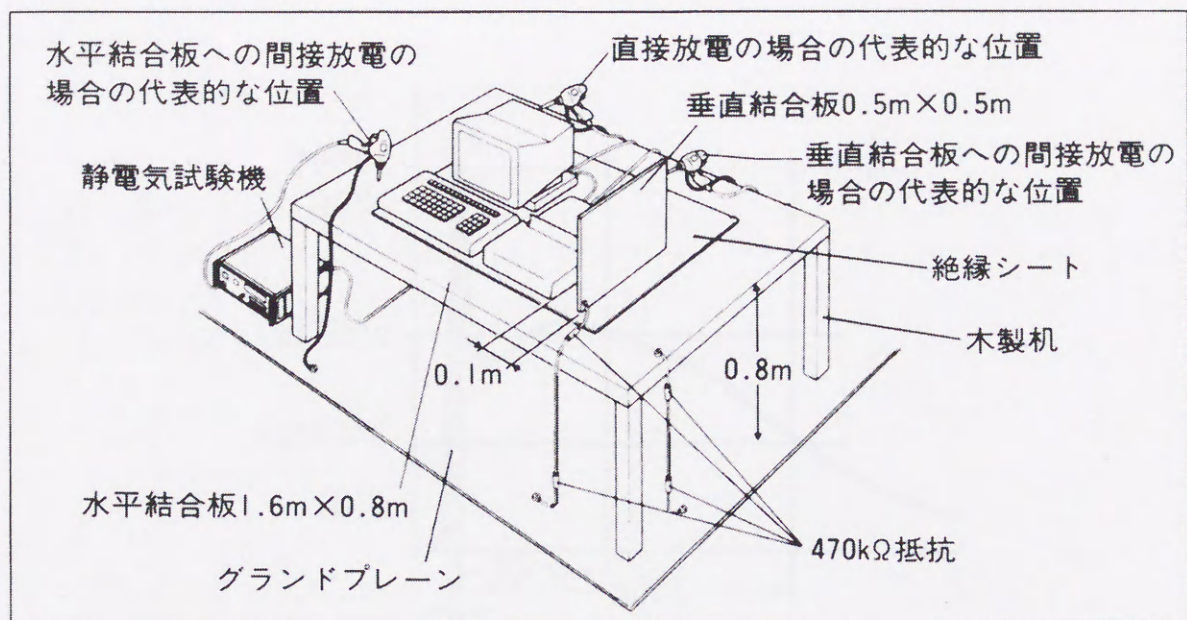
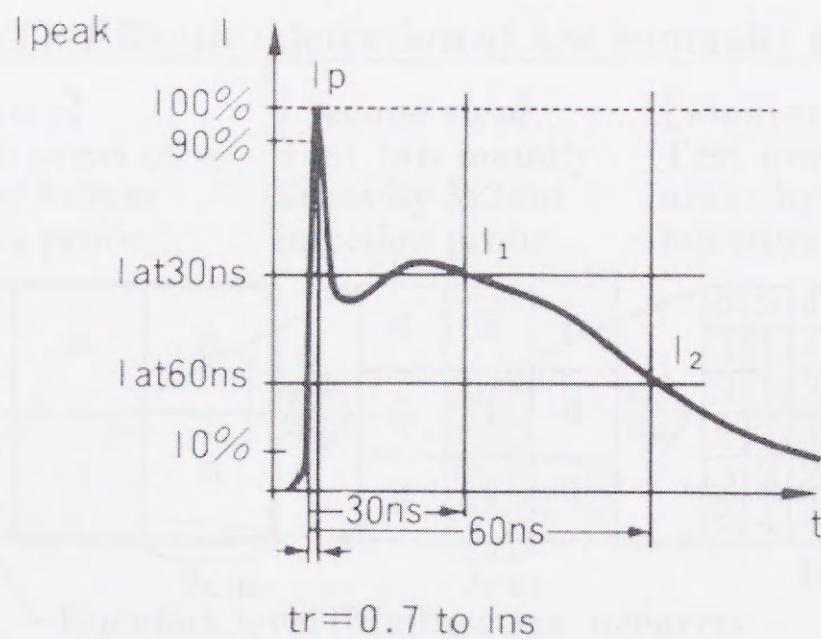


図 1-1 静電気放電試験に関する国際規格 (IEC Pub.61000-4-2) の試験環境



レベル	表示電圧 kV	最初の放電 ピーク電流 ($\pm 10\%$) I_p	放電スイッチ による立ち上 がり時間	30nsの時 の電流値 ($\pm 30\%$) I_1	60nsの時 の電流値 ($\pm 30\%$) I_2
1	2	7.5A	0.7~1ns	4A	2A
2	4	15A	0.7~1ns	8A	4A
3	6	22.5A	0.7~1ns	12A	6A
4	8	30A	0.7~1ns	16A	8A

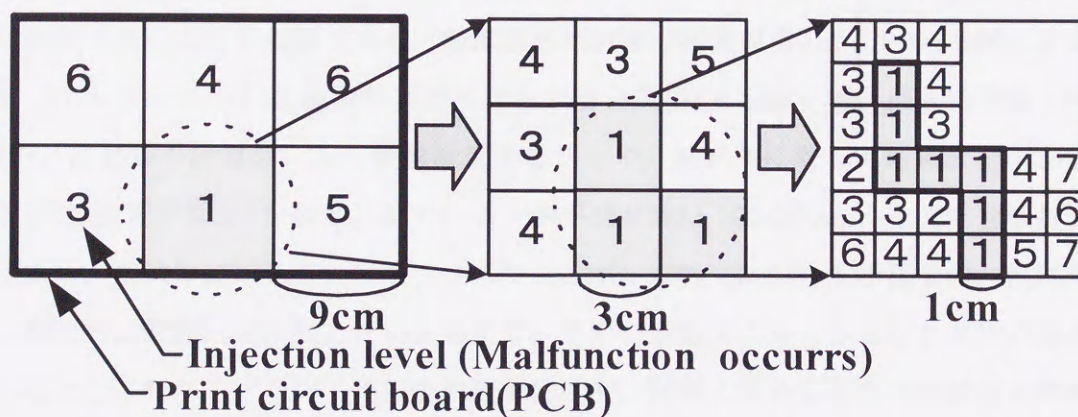
図 1-2 静電気放電試験機の印加波形

(1): Effective detection of low immunity areas.

【First step】
Test all areas of
PCB by 9x9cm
injection probe

【Second step】
Test low immunity
areas by 3x3cm
injection probe

【Final step】
Test low immunity
areas by 1x1cm
injection probe



(2): Multiple detection of different malfunction areas.

For Example

- ① Reset
- ② Hang Up
- ③ Buzzer
- ④ Unnatural Indication

①	①	①	①	①	②	②	②	②
①	①	①	①	①	②	②	②	②
①	①	③	③	③	③	②	②	②
①	①	③	③	③	③	②	②	②
①	①	③	③	④	④	④	④	④
①	①	③	③	④	④	④	④	④

图 1-3 提案方法

第2章 各種印加プローブの試作と発生電磁界分布の均一性の評価

2.1 緒言

本論文で提案しているプリント基板のイミュニティ解析手法では、供試体へ加える電磁波の印加領域を段階的に小さくすることで、イミュニティレベルの低い箇所を効率的に絞り込むことである。このためには、印加プローブと対向した領域だけに強い電磁波が均一に放射されることが必要である。静電気放電試験の国際規格 IEC Pub.61000-4-2 において、図 1-1 に示すように、供試体近傍に存在する金属板(水平結合板、垂直結合板と呼ばれている)に対して放電ガンから接触放電することで、供試体に対して電磁波を印加する試験法(間接放電試験法)が規定されている。水平結合板は 100x200cm、垂直結合板は 50x50cm であり、供試体に対して大きなサイズであるが、本論文における手法では、供試体に対して局所的に電磁波を印加したいと考えているので供試体よりも小さなサイズの金属板を用いることにした。プリント基板上の配線密度や、試験に掛かる手間や時間等を考慮し、最終的に絞り込む領域を 1x1cm 角と想定した。また、電磁波を印加する領域は、図 1-2 に示すように、最初、大きな領域に電磁波を印加し、イミュニティレベルの低かった領域に対して9分割して再試験する作業を段階的に繰り返し行うことにしている。最終的な領域のサイズを 1x1cm 角としたので、1x1cm、3x3cm、9x9cm の印加プローブ(以後、9cm 角印加プローブ等と表記)を用いることとした。

そこで、3 種類の印加プローブについて放射される電磁界特性を確認した。評価実験の手法について次節以降に示す。

2.2 試作印加プローブの概要

図 2-1 に示す 9cm、3cm、1cm 角の印加プローブを試作した。金属板には、片面プリント基板を利用し、約 10cm のセミリジッドケーブル(外導体が銅パイプで構成されている同軸ケーブル)の心線をプリント基板中央部に半田付けした。

2.3 評価方法

実験は、図 2-2 に示すように、スペクトラムアナライザ(以後スペアナと表記)のトラッキングジェネレータ(以後 TG と表記)の正弦波出力を印加プローブに接続し 20 ~1000MHz の周波数について評価した。印加プローブには 9cm、3cm、1cm 角印加プローブを使用し、

受信プローブには微小ループアンテナ(株ノイズ研究所 ESV システム用 plobeA)を使用した。受信プローブの諸特性については図 2-3 に示す。

印加プローブを下向きに固定し、その直下約 8mm の平面上を受信用プローブで 2mm 間隔で走査し、受信レベルを測定した。詳細な実験条件については表 2-1 に示す。

それぞれの試験結果を図 2-4(9cm 角印加プローブ)、図 2-5(3cm 角印加プローブ)、図 2-6(1cm 角印加プローブ)に示す。

この結果、9cm 角印加プローブでは 20MHz~300MHz、3cm 角と 1cm 角印加プローブでは 20MHz~500MHz において、印加プローブと対向する部分のほぼ全面が均一な電磁界(最大レベル-3dB 以内)となり、印加プローブの正面からはずれた部分では、急速に受信レベルが下がることがわかった。

9cm 角印加プローブで 500MHz 以上、3cm 角と 1cm 角印加プローブで 700MHz 以上の周波数については、分布の偏りが発生しており原因を検討しなければならないが、少なくとも 20MHz~300MHz 程度の範囲については、印加プローブを当てた範囲だけに強い電磁波が均一に放射されることが確認できた。

また、各プローブの最大放射レベルの比較を行った結果を図 2-7 に示す。9cm 角印加プローブと 3cm 角印加プローブはほぼ同レベルで、1cm 角印加プローブの場合、他の 2 つのプローブより 7dB ほど低くなっていた。

2.4 各印加プローブ間のレベル調整

2.3.の実験において、各印加プローブの最大放射レベルに差があることが判明した。そこで、9cm 角、3cm 角、1cm 角印加プローブの中心部分の放射レベルの周波数特性を評価することとした。実験には図 2-2 に示すシステムを使用し、各印加プローブの中心部の直下に受信プローブを固定し、20MHz~1000MHz の周波数特性を調べた。

最初に TG 出力を 75dBuV で統一した場合の結果を図 2-8 に示す。

この結果、9cm 角、3cm 角、1cm 角印加プローブのいずれも、傾向的には似ており、特に 3cm 角と 1cm 角の場合、20MHz ~ 700MHz の間については、ほぼ約 5dB の一定の差となっていた。

そこで、1cm 角印加プローブへの TG 出力を 5dB 強くした(=80dBuV)結果を図 2-9 に示す。

1cm 各プローブでの受信レベルも全帯域で 5dB の上昇が見られ、ほぼ 3cm 角印加プロ

ープと同レベルの出力となることが分かった。

このことから、放射プローブへの印加電圧に比例して放射レベルが得られることが分かった。

2.5 印加プローブの電磁波放射特性

ESD による EMI の強さは、パルスの立ち上がり時間と振幅が大きく影響しているといわれている[11]。そこで、図 2-10 に示すマイクロストリップ線路を疑似供試体とし、その中央部分に、図 2-11 に示すように印加プローブをマイクロストリップ線路に対向させて設置する。印加プローブへの供給電圧を段階的に上昇させ、マイクロストリップ線路に誘起される電圧波形と、そのピーク値の変化を調べた。詳細な試験条件を表 2-2 に示す。

また、図 2-12 に ESD 試験機の原理的な回路構成と回路の接続状況を示す。マイクロストリップラインとデジタルオシロのアースは分離されている。

ここで、印加電圧 3kV の時の誘起電圧波形について、図 2-13(9cm 角印加プローブ)、図 2-14(3cm 角印加プローブ)、図 2-15(1cm 角印加プローブ)に示す。この結果、いずれの印加プローブにおいても、最初に鋭いパルス状の波形が誘起されているが、ピーク電圧は 3cm 角印加プローブを 1 とするとすると、1cm 角印加プローブ:0.78, 9cm 角印加プローブ:0.34 という割合であった。誘起されるピーク電圧は、図 2-16 に示すように印加電圧に比例して上昇していることを確認した。

2.6 印加プローブと供試体との位置関係による結合状態の変化

本システムは、印加プローブの一部が配線パターンと対向するよう配置されたときに、配線パターンへの結合が強く(=低い印加電圧で高い電圧が誘起され)、それ以外の場合は、配線パターンへの結合が弱くなるということを前提にしたシステムである。そのことを実験的に裏付けるため、図 2-17 に示すように、マイクロストリップ線路の中央部分を、直角に横切る直線上に印加プローブを配置し、位置を 5mm 間隔で移動させた。各々の印加プローブ位置で、マイクロストリップ線路上に 2.5V を越える電圧が誘起されるまで、印加電圧を 0.1kV~8kV まで 0.1kV 間隔で、段階的に上昇させた。一方、デジタルオシロスコプは、シングルトリガモードでトリガレベルを+2.5V に設定し、トリガがかかった事で、2.5V 以上の電圧が誘起されたと判断した。詳細な実験条件については表 2-3 に示す。

その結果、図 2-18 に示すように、どのサイズの印加プローブの場合でも、印加プロー

ブの端がマイクロストリップ線路と重なり始めた時から、印加プローブの端がマイクロストリップ線路から離れ始めるまでの区間(=マイクロストリップ線路と印加プローブのどこか一部が重なり合っている区間)は、それ以外の時に比べ、結合状態が非常に強いことが分かった。さらに、マイクロストリップ線路と印加プローブが重なり合っている場合、重なり合う部分が印加プローブの中央でも端部でもほぼ同一の電圧波形、同一電圧が誘起されることがわかった。

このことから、伝送路の位置を、各印加プローブのサイズと同じ分解能で特定することが可能であり、印加プローブサイズを段階的に小さくすることで、原因となる伝送路パターンの絞り込みができていることを実験的に確認することができた。

2.7 結言

プリント基板の局所的領域に電磁波を印加させるための印加プローブの電磁波放射特性について検討を行った。その結果以下の事項が解明できた。

(1) 9cm 角印加プローブで 20MHz~300MHz、3cm 角と 1cm 角印加プローブでは 20MHz~500MHz において、印加プローブと対向する部分のほぼ全面が均一な電磁界(最大レベル-3dB 以内)となり、印加プローブの正面からはずれた部分では、急速にレベルが下がっていることがわかった。

それ以上の周波数については、分布の偏りが発生しており原因を検討する必要があるが、少なくとも 20MHz~300MHz 程度の範囲については、印加プローブで照射した領域だけに強い電磁波が均一に放射されることが確認できた。

(2) 各プローブの周波数特性については、各プローブ間での最大放射レベルは異なるが傾向は一致している。

(3) 各印加プローブ間での最大放射レベルが異なることについては、印加プローブに対する入力レベルを調整することで、印加レベルを同じにすることができる。

以上のことから、これら的大中小のプローブを使用することで、プリント基板に対して局所的な電磁波を段階的に範囲を絞り込みながら加えることができることがわかった。

次に、印加プローブから放射された電磁波がプリント基板上の伝送線路と結合するメカニズムについて検討した。プリント基板モデルとしてプリント基板上で特性インピーダンスが 50 Ω となるマイクロストリップ線路を利用した。

マイクロストリップ線路を供試体とした場合に、印加プローブのサイズにより、受信波

形やピーク電圧に若干の違いはあるものの、マイクロストリップ線路に誘起されるピーク電圧は、印加電圧に比例して上昇することを確認した。また、印加プローブの一部がマイクロストリップ線路と対向するよう配置された場合は、結合が強く（低い印加電圧で高い誘起電圧が発生）、印加プローブとの位置がマイクロストリップ線路から少しでも外れると、急速に結合が弱くなることを実験的に確認した。これらの事から、印加プローブのサイズが、そのままプリント基板上の伝送路の位置探査に対する分解能となり、印加プローブのサイズを段階的に小さくすることで、伝送路の位置を効率的に絞り込めることを明らかにした。

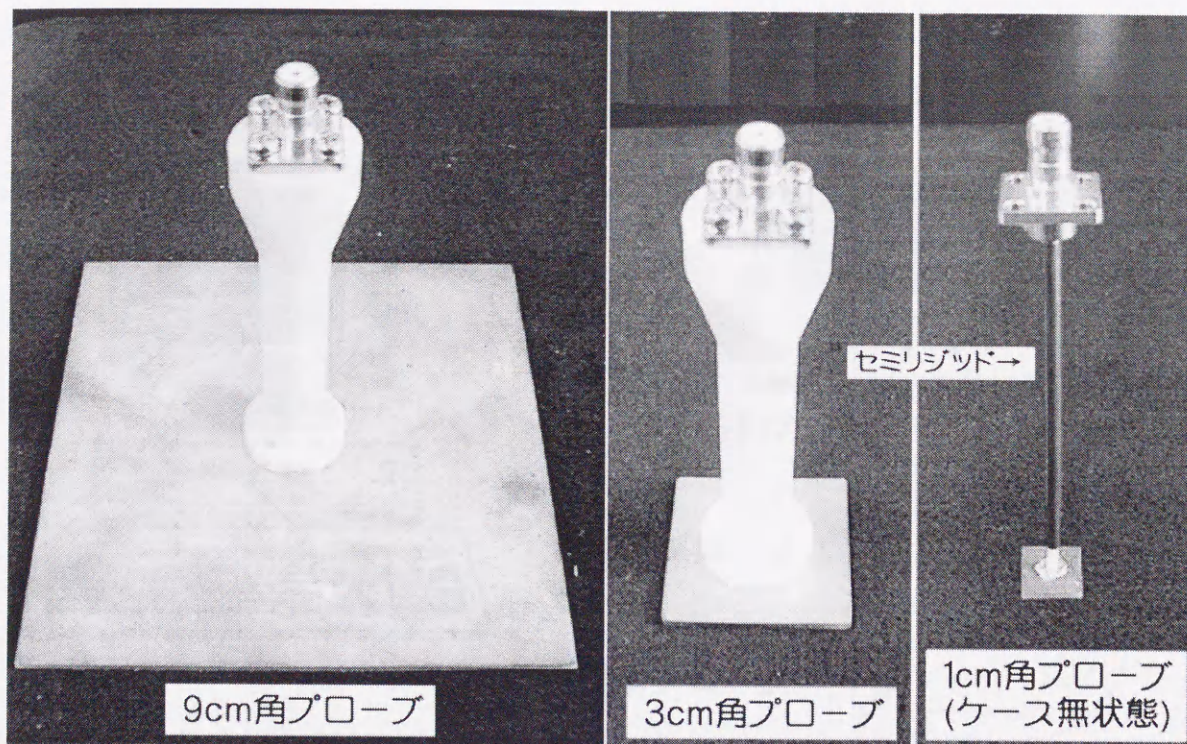


図 2-1 試作プローブ群

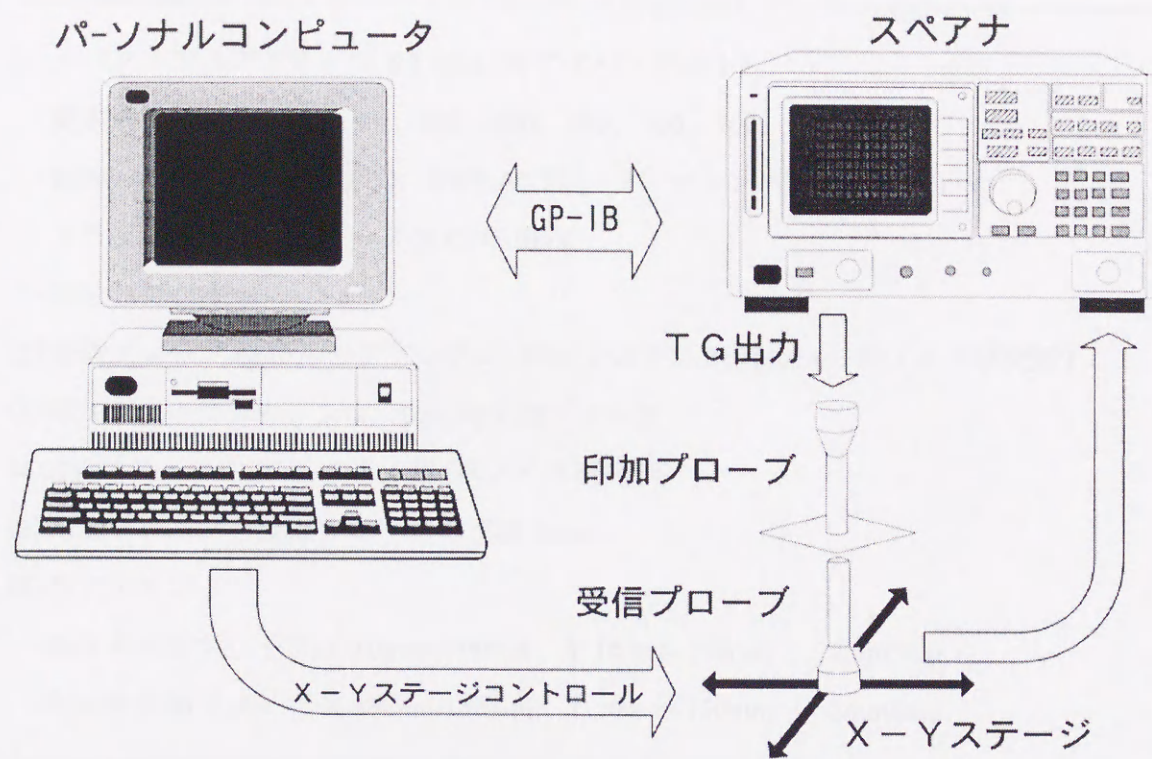


図 2-2 印加プローブ電磁界分布解析方法

表 2-1 実験条件

-
- (1) スペクトラムアナライザ:R3361A (株アドバンテスト)
- ・測定周波数 (MHz):20, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000
 - ・RBW:AUTO, VBW:AUTO, SWP:AUTO, リファレンスレベル:80dBuV
 - ・トラッキングジェネレータ出力:75dBuV
 - ・PREAMP:25dB
- (2) 受信プローブ:微小ループアンテナ (ESV システム用 plobeA, (株)ノイズ研究所)
- (3) 印加プローブ:9cm, 3cm, 1cm 角印加プローブ
- (4) XY ステージ:ESV システム用 (株)ノイズ研究所)
- (5) 印加プローブと受信プローブの間隔:8mm
- (7) 測定ポイント:
- ・9cm 角印加プローブ:X:10mm~190mm, Y:10mm~190mm, 2mmStep
 - ・3cm 角印加プローブ:X:50mm~150mm, Y:50mm~150mm, 2mmStep
-

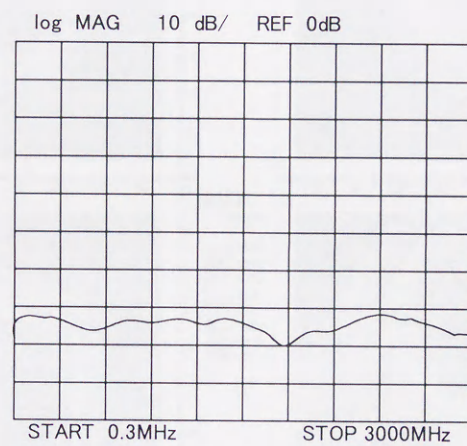
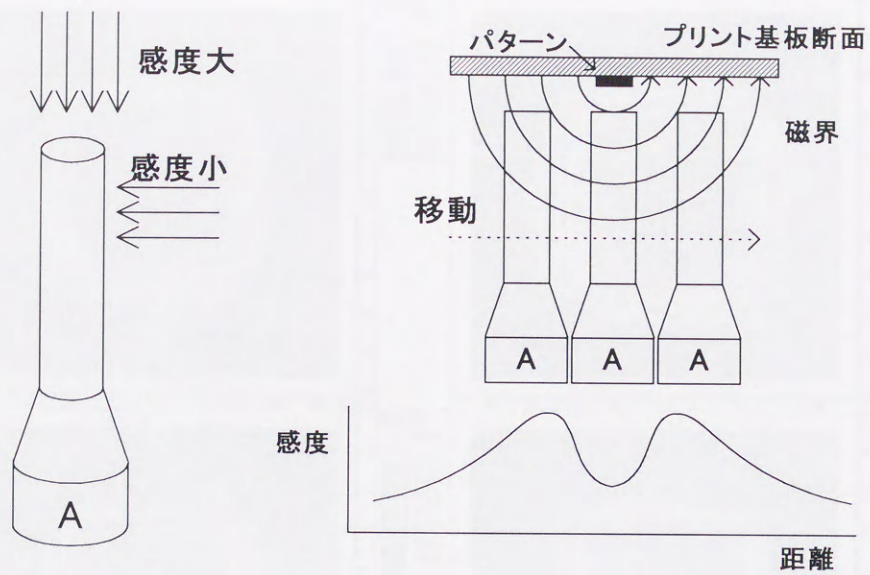


図 2-3 受信プローブの諸特性

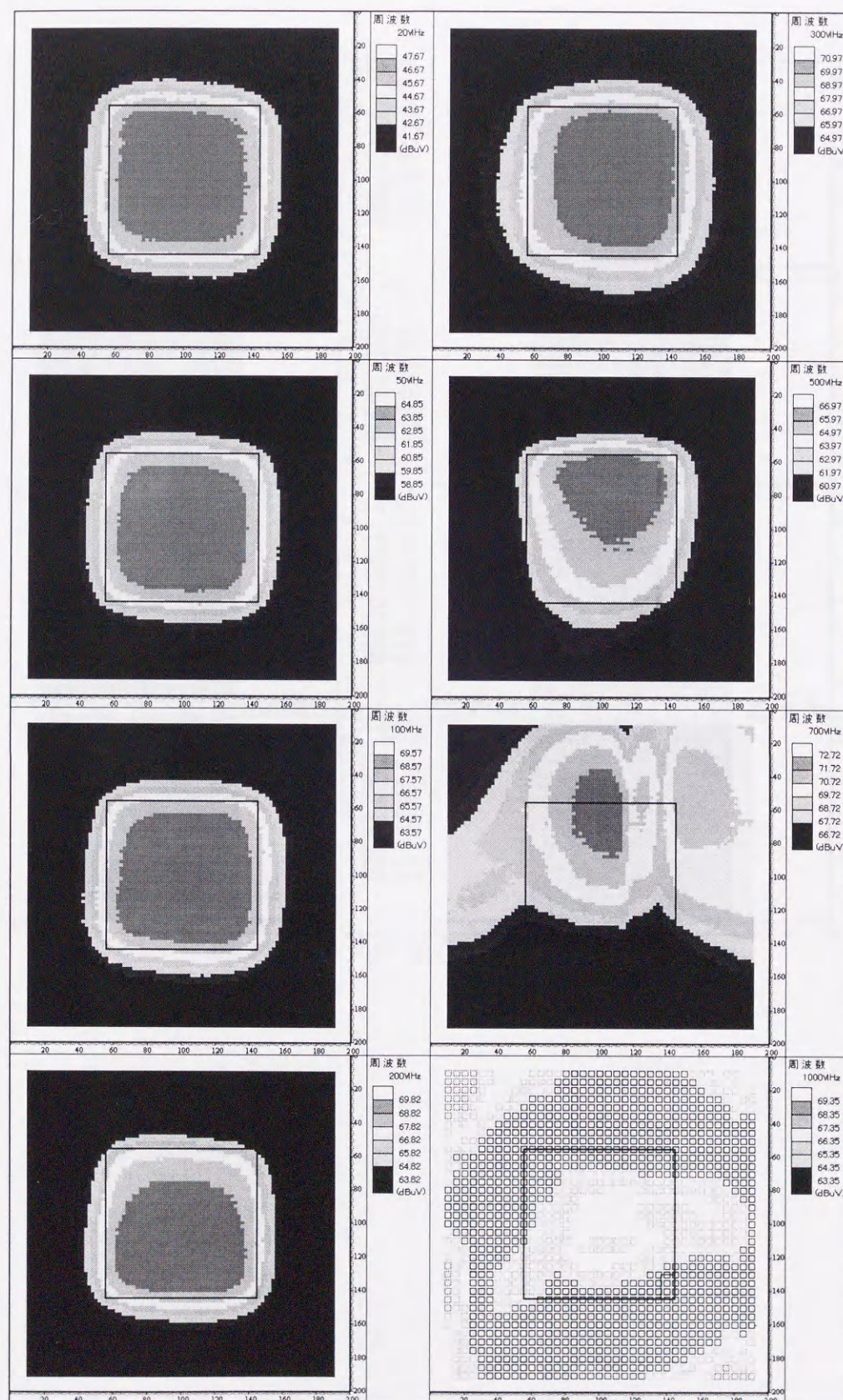


図 2-4 9cm 角印加プローブの解析結果

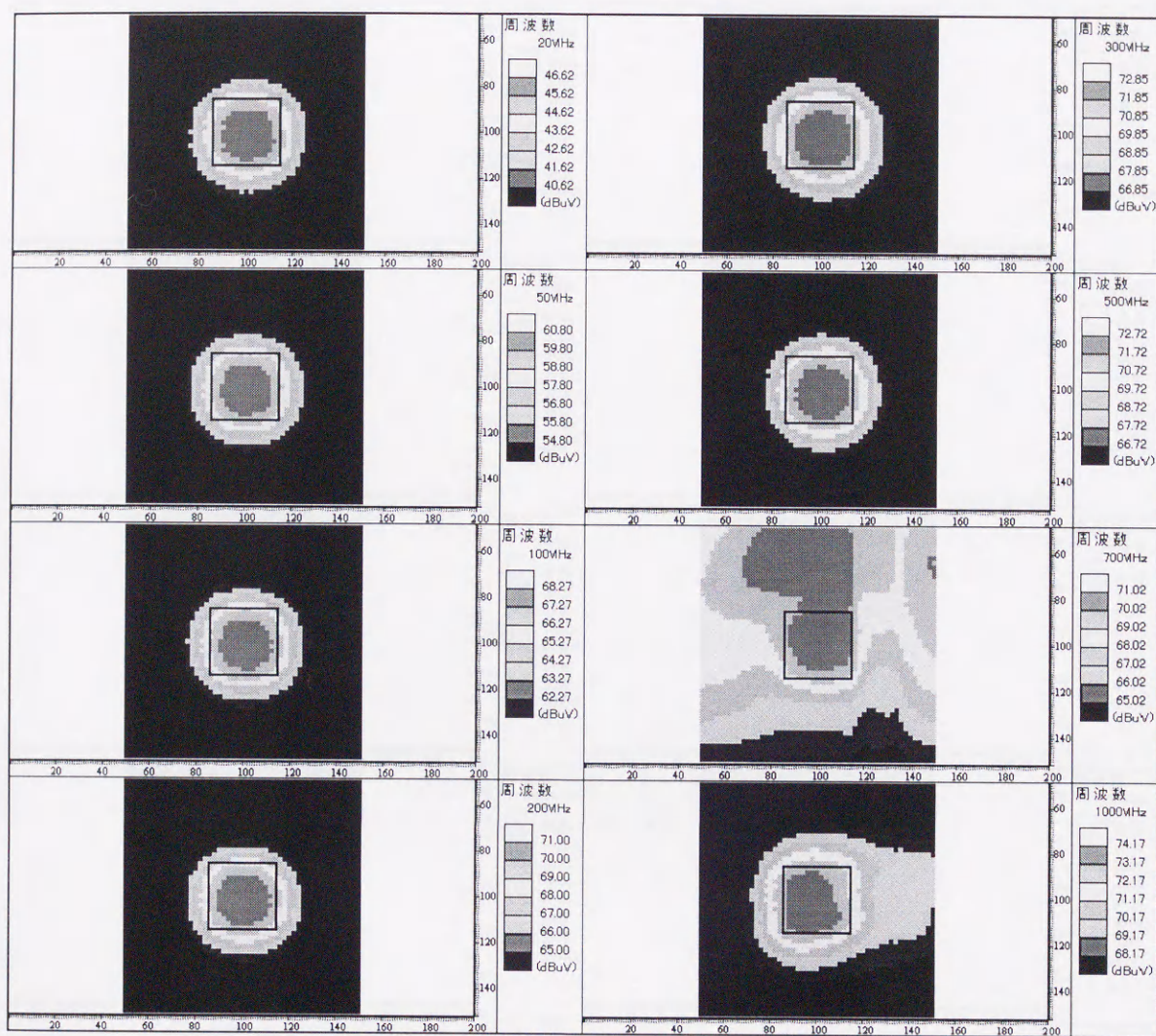


図 2-5 3cm 角印加プローブの解析結果

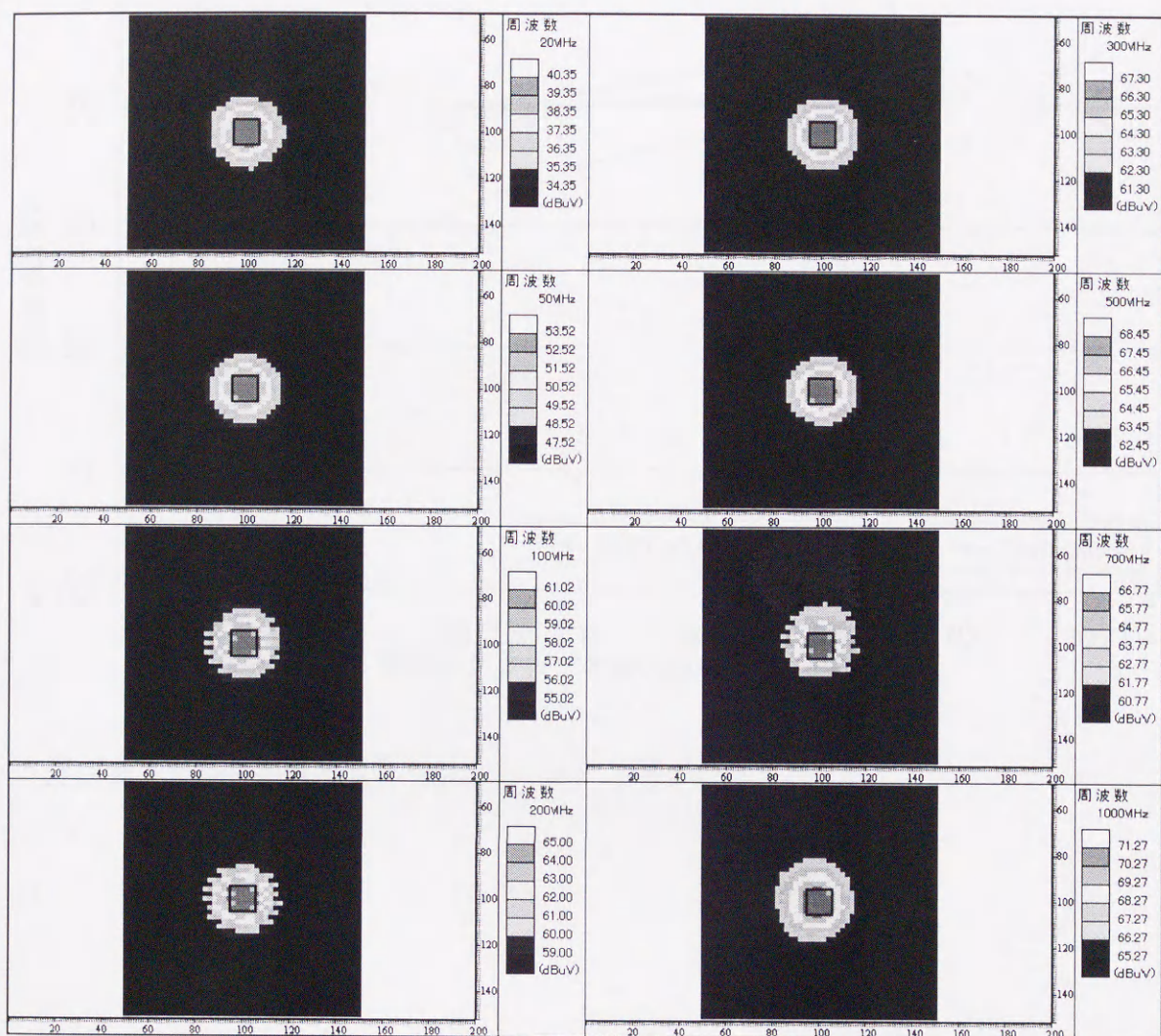


図 2-6 1cm 角印加プローブの解析結果

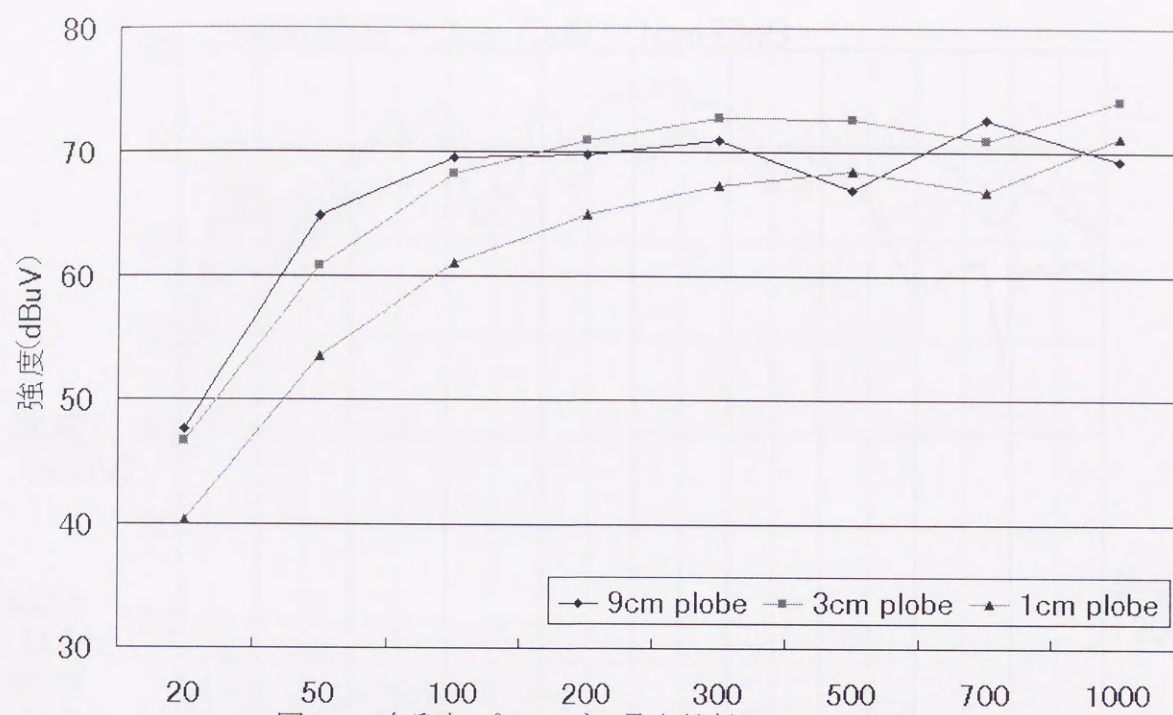


図 2-7 各印加プローブの最大放射レベルの比較

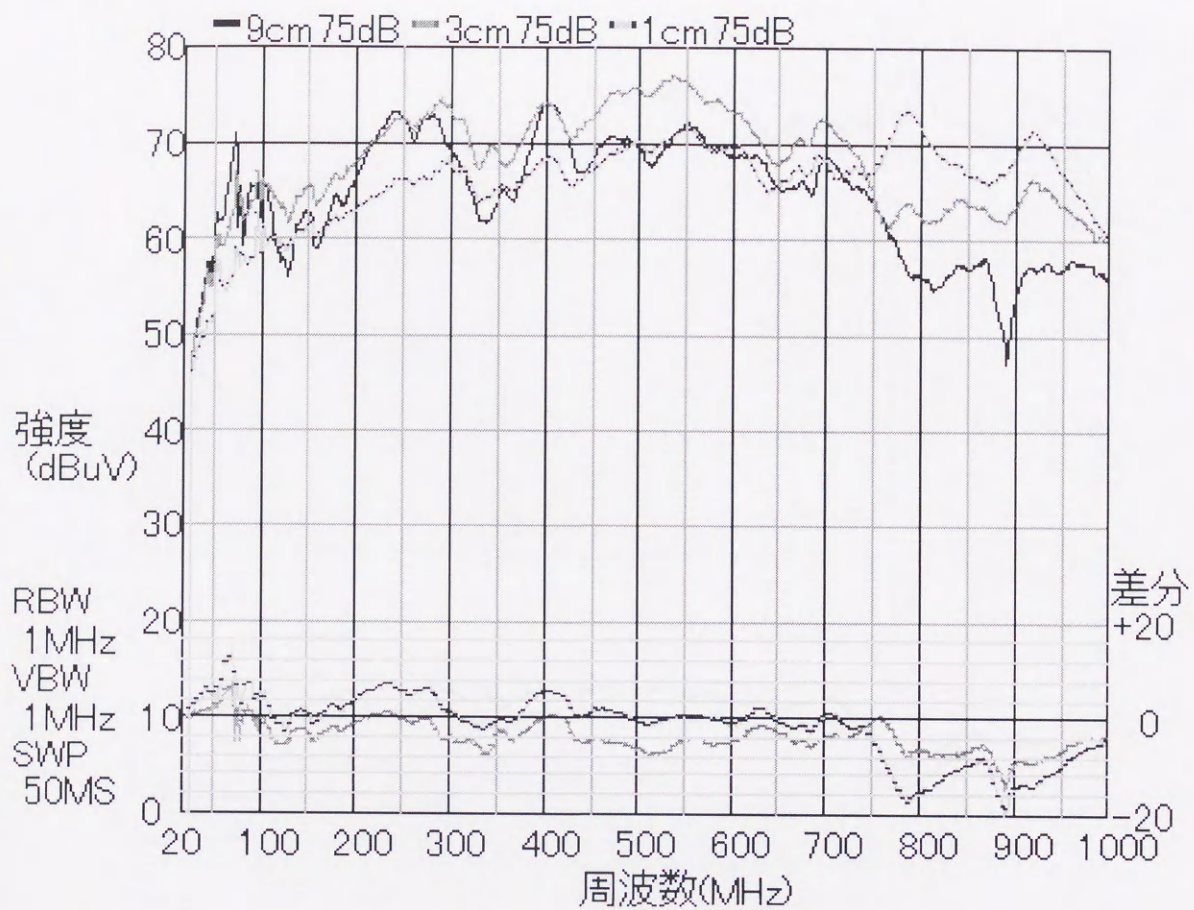


図 2-8 各印加プローブ中心部分の周波数特性
(TG 出力=75dB の場合)

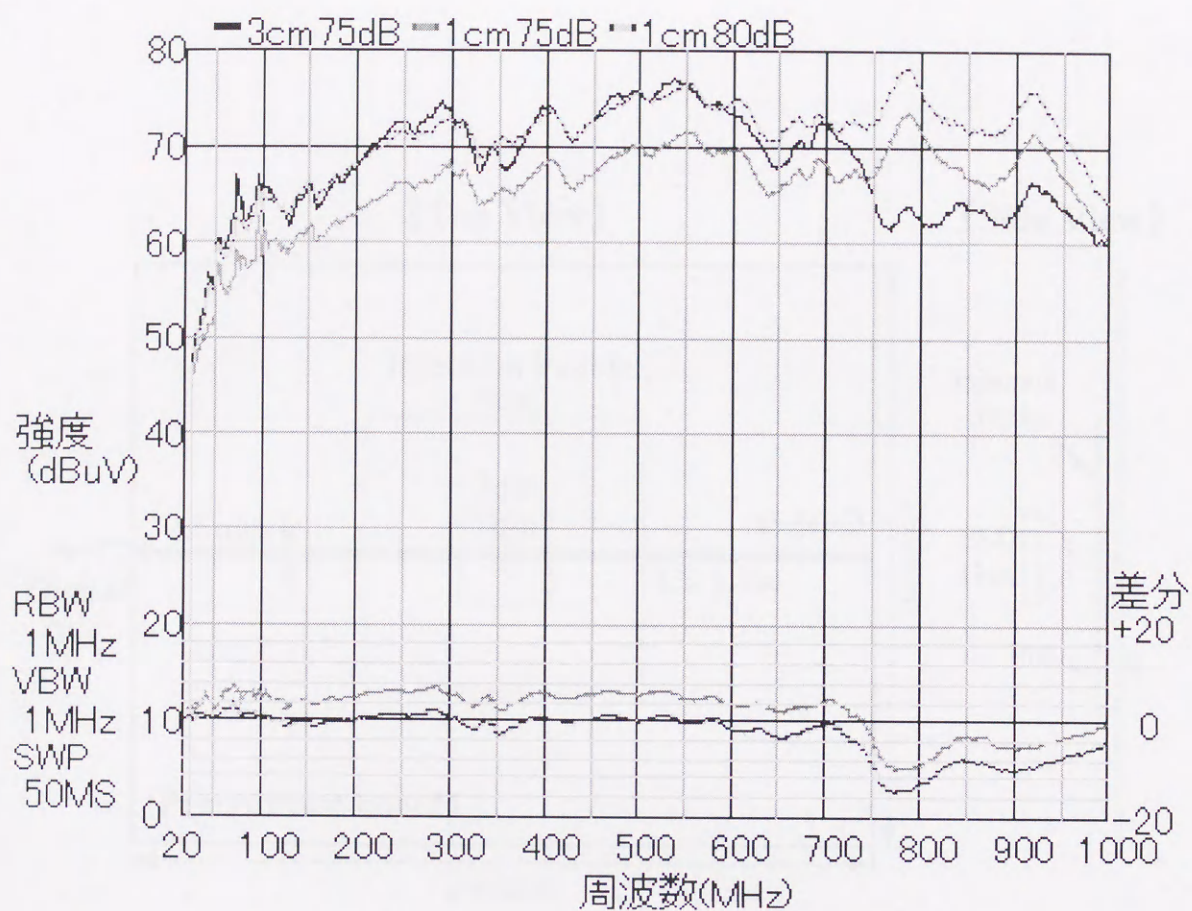


図 2-9 各印加プローブの周波数特性の比較
 (1cm 角印加プローブに補正 (+5dB) した場合)

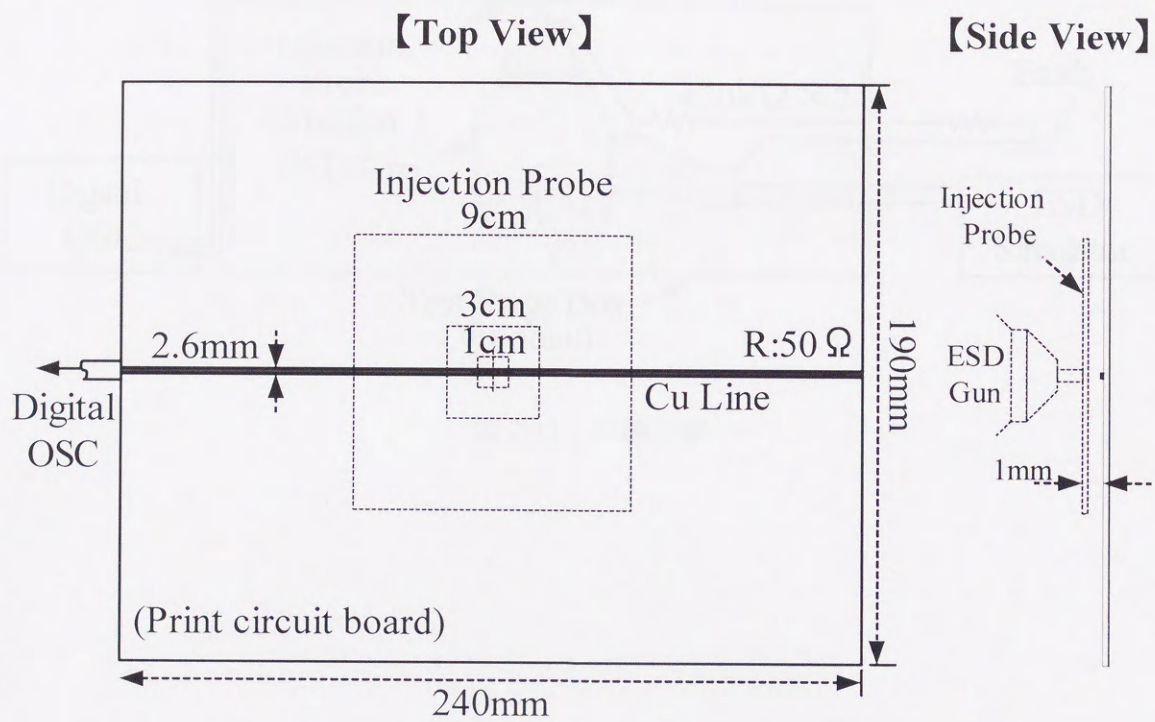


図 2-10 供試体と印加プローブの配置

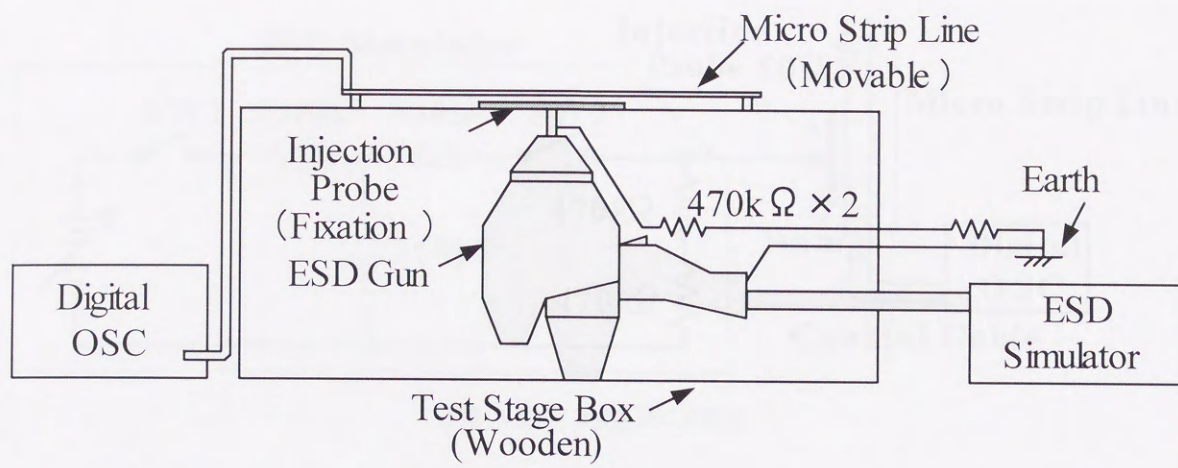


図 2-11 試験配置

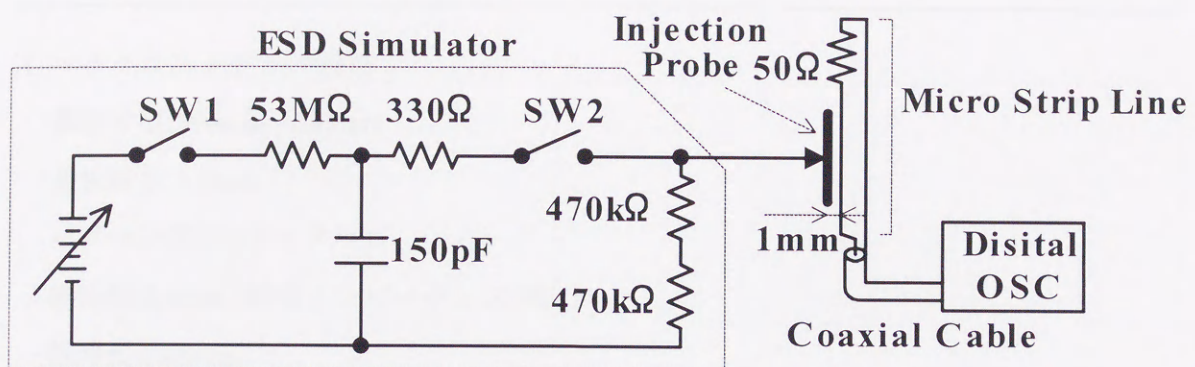


図 2-12 実験系の構成

表 2-2 実験条件

(1) マイクロストリップ線路

- ・基板寸法:190mm × 240mm
- ・基板厚さ:1.5mm
- ・パターン厚み:32 ミクロン
- ・線路幅:2.6mm (特性インピーダンス:50 Ω)
- ・線路長:240mm
- ・基板裏面:全面アース
- ・基板材質:ガラスエポキシ (比誘電率=4.7)

(2) 印加電圧:1kV~3kV (0.5kVstep)

(3) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株 HP 社)

- ・周波数帯域:500MHz
- ・サンプリング周波数:2GHz
- ・TRG level:+2.5V
- ・シングルモードトリガモード
- ・TimeRange:20ns/div
- ・50 Ω DC 入力モード

(4) マイクロストリップ線路と印加プローブの間隔:1mm

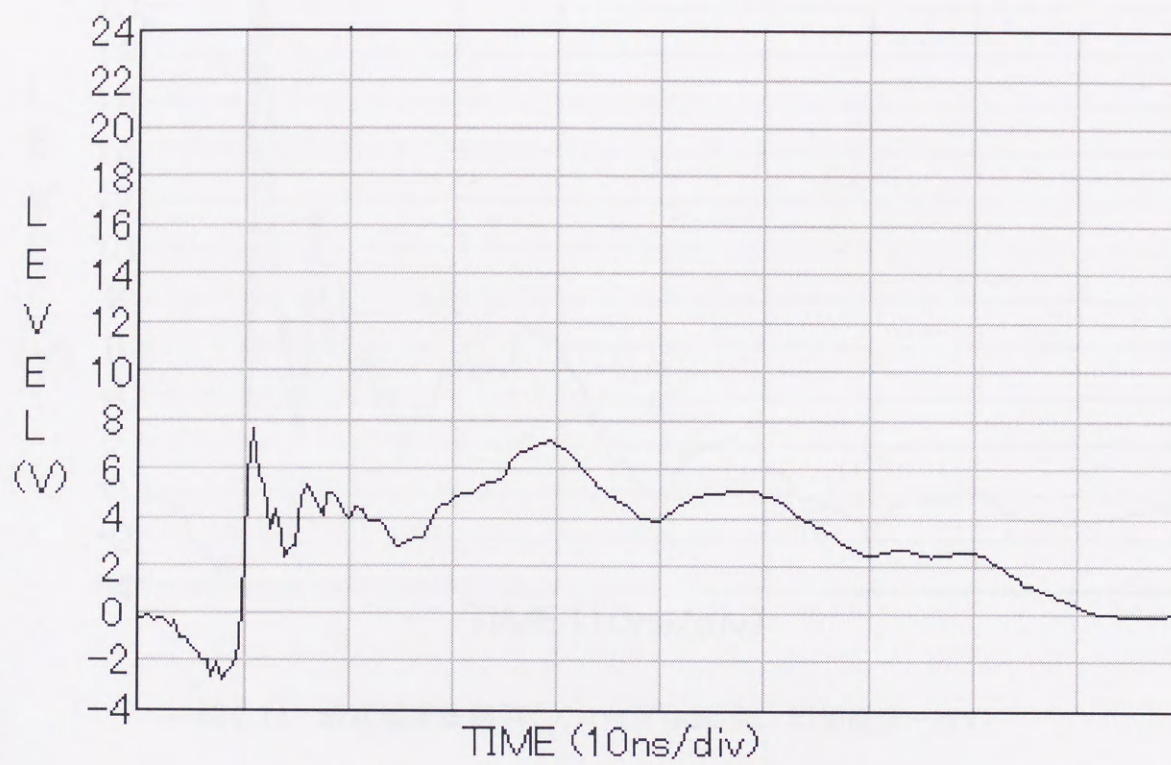


図 2-13 誘起電圧波形例(プローブ:9cm 角, 印加電圧:+3kV)

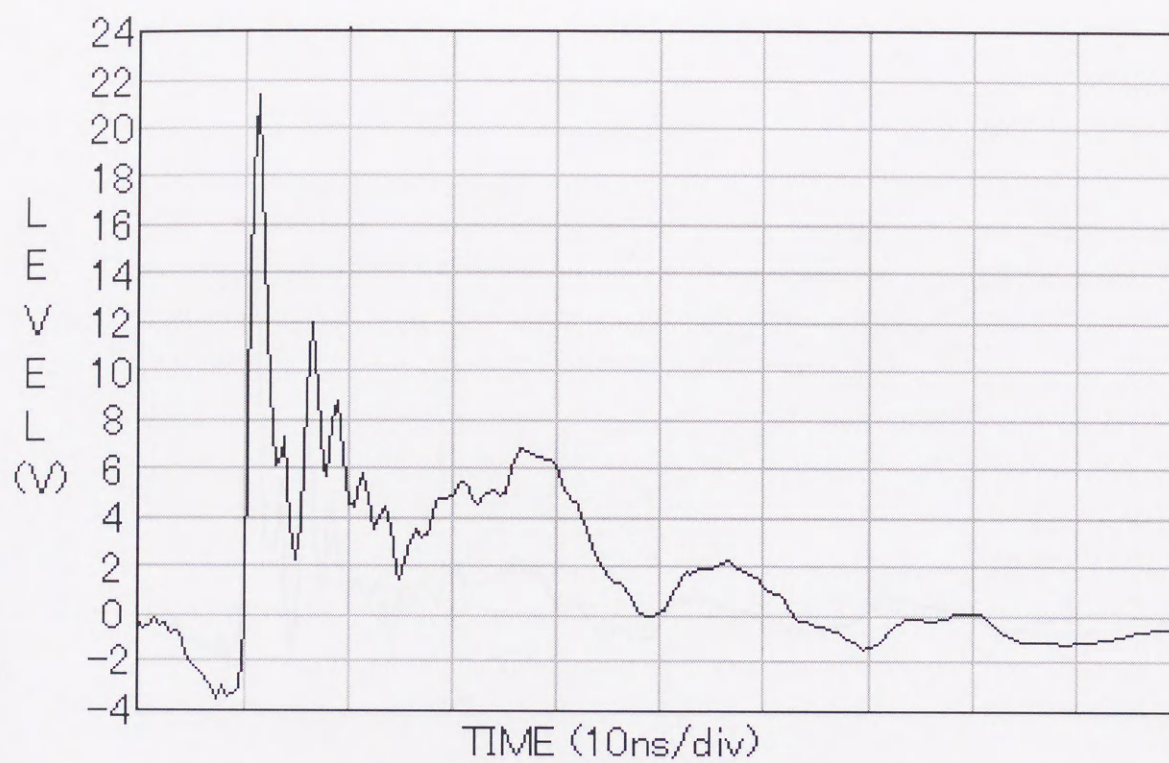


図 2-14 誘起電圧波形例(プローブ:3cm 角, 印加電圧:+3kV)

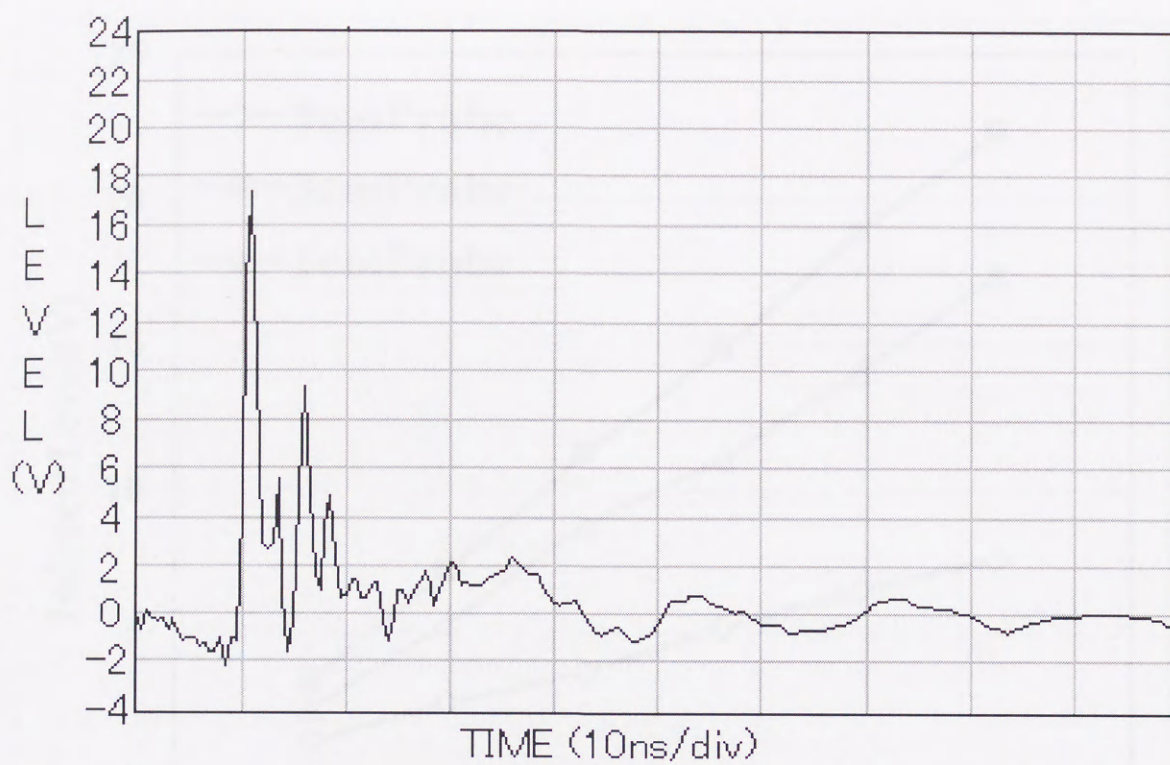


図 2-15 誘起電圧波形例(プローブ:1cm 角, 印加電圧:+3kV)

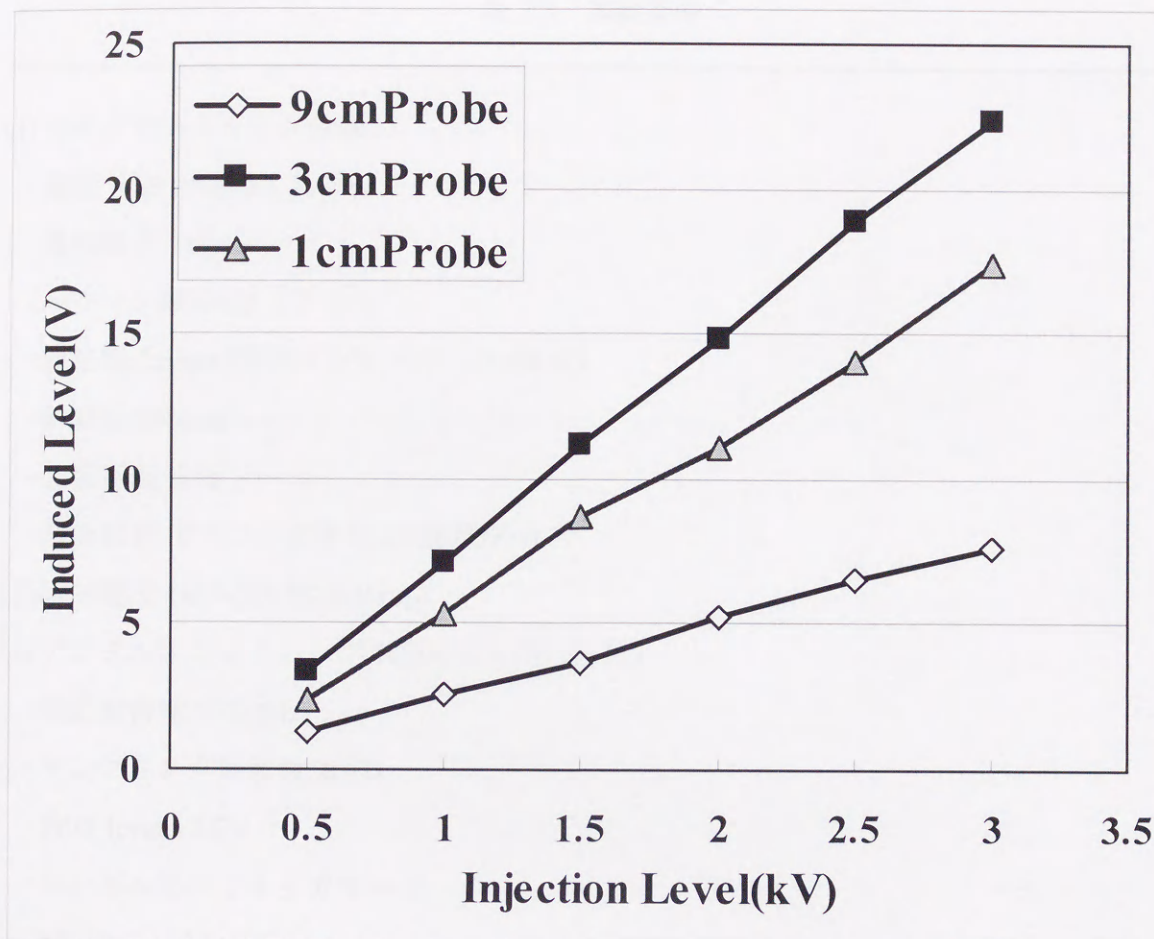


図 2-16 印加電圧と誘起ピーク電圧の関係(5 回の平均)

表 2-3 実験条件

(1) マイクロストリップ線路

- ・基板寸法:190mm × 240mm
- ・基板厚さ:1.5mm
- ・パターン厚み:32 ミクロン
- ・線路幅:2.6mm (特性インピーダンス:50 Ω)
- ・線路長:240mm
- ・基板裏面:全面アース
- ・基板材質:ガラスエポキシ (比誘電率=4.7)

(2) 印加電圧:1kV~3kV (0.5kVstep)

(3) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株 HP 社)

- ・周波数帯域:500MHz
- ・サンプリング周波数:2GHz
- ・TRG level:+2.5V
- ・シングルモードトリガモード
- ・TimeRange:20ns/div
- ・50 Ω DC 入力モード

(4) マイクロストリップ線路と印加プローブの間隔:1mm

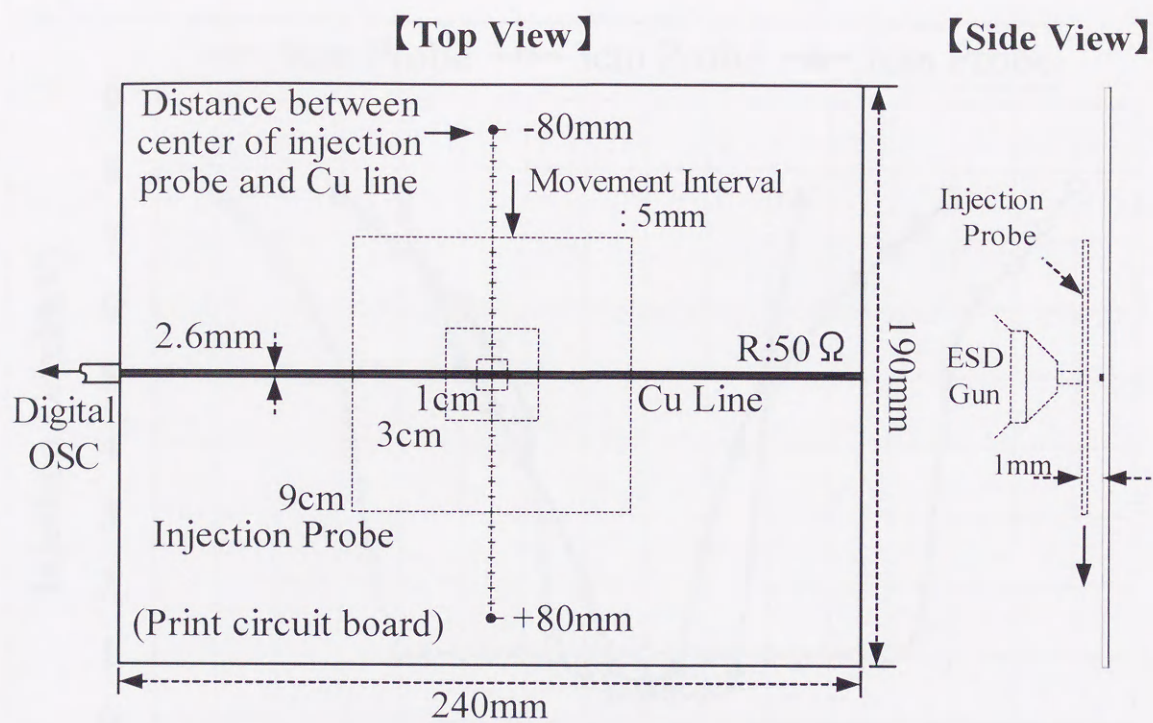


図 2-17 供試体と印加プローブの配置

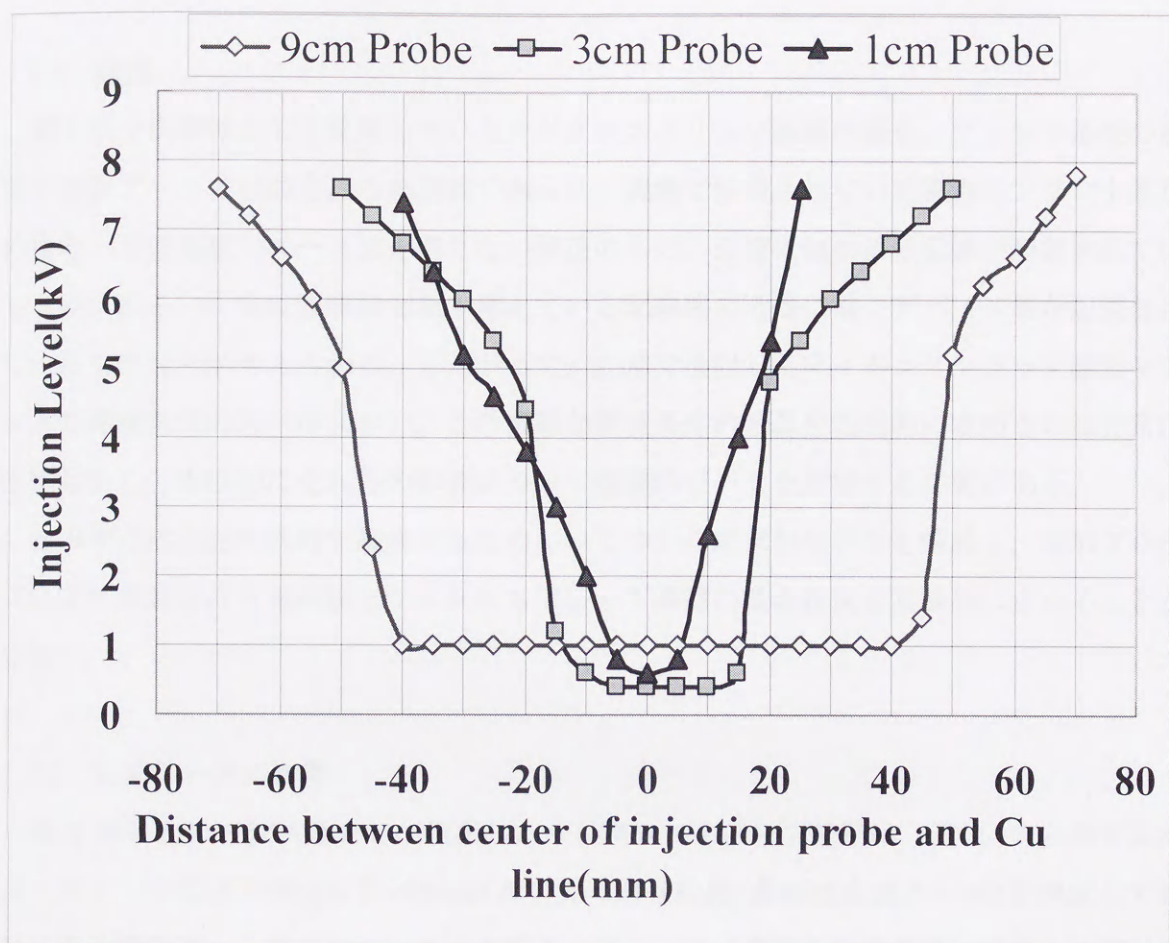


図 2-18 線路に 2.5V 誘起させるための印加電圧

第3章 実機モデルにおける誘導電圧

3.1 緒言

第2章で供試体として使用していたマイクロストリップ線路の場合、プリント基板の裏側が全面アースで構成される単線路であった。実機で使用されている実際のプリント基板の場合、片面基板でアース面を持たない構造のもの、近傍に他の信号配線が配置されているもの、あるいは電磁波照射対象と考えている配線路の近傍に電子デバイス等が配置されているものなどが考えられる。したがって、2章で検討したマイクロストリップ線路モデルとは環境条件の違いが大きい。この複雑な環境条件の差異を理論的に求めるのは非常に困難なため、実験的にそれらの影響について基礎的データを把握する必要がある。

この章では上記の問題を解決するため、いくつかの供試体モデルを構成し、印加プローブにより照射される電磁波とマイクロストリップ線路の結合状況を実験的に求めることとした。

3.2 全面アースの影響

第2章において供試体として使用したマイクロストリップ線路は、図 2-17 に示すように、プリント基板(190mm × 240mm)の中央に信号線路(裏側は全面アース)を構成しており、信号線路側から裏面のアース面を眺めた場合、信号線路の左右両側にはアース面が存在していた。ここでは、裏側が全面アースとならない信号線路に対し、全面アースの場合と比較して照射電磁波と信号線の結合量の相違について検討する。

モデル線路の形状と実験システムを図 3-1 に示す。モデル線路は線路の側から裏側を眺めた場合、左右のうち片側は(信号線路の直下を含め)全面アースが形成されるが、他方の側には全くアース面が存在しないモデルである。このような状況に設置されたマイクロストリップ線路に対し、信号線路を直角に横切る直線上に印加プローブを配置し、位置を 5mm 間隔で移動させ、各々の印加プローブ位置で、信号線路上に 2.5V を越える電圧が誘起されるまで、印加電圧を 0.1kV~8kV まで 0.1kV 間隔で、段階的に上昇させた。一方、デジタルオシロスコープは、シングルトリガモードでトリガレベルを+2.5V に設定し、トリガがかかった事で、2.5V 以上の電圧が誘起されたと判断した。詳細な試験条件を表 3-1 に、試験環境を図 3-2 に示す。

実験の結果を図 3-3 に示す。印加プローブのどこか一部が信号線路と重なり合っている

際(-15mm~+15mm(3cm 角), -5mm~+5mm (1cm 角))の結合状況はほぼ同じレベルである。信号線路に対して、全面アースが存在する側へ印加プローブが移動する場合(+15mm~+50mm(3cm 角), +5mm~+50mm(1cm 角))場合、印加プローブと信号線路との重なりがなくなり始めると急速に結合状況が悪くなり、全くアース面が存在しない側へ移動する場合、(-15mm~-50mm(3cm 角), -5mm~-50mm(1cm 角))場合、前者と比べて結合状況の悪化が緩やかである。

3.3 近傍に存在する金属体との立体的な位置関係による影響

供試体のプリント基板上で、誤動作の原因となる箇所の近傍に存在する金属体としては、供試体そのものに存在する他の信号配線や電子デバイス、ヒートシンク、シールド板等、また、供試体以外では、筐体への取り付け金具や、金属筐体等が考えられる。これらの金属体は、供試体のプリント基板に対して同一面に存在していない場合が多い。これらの金属体の影響を調べるためには、供試体との相対的な高さを調整できる金属体を用いて試験する必要がある。第2章などで使用したマイクロストリップ線路の場合、両面基板を使った供試体の場合、マイクロストリップ線路の信号線路と全面アース面との位置関係を変える事が困難であるため、今回は、図3-4に示すように、円筒形の樹脂ケースに格納された小型の電界プローブを疑似供試体(以後、供試体である電界プローブと表記)とし、その樹脂ケースを貫通し、供試体である電界プローブとの相対的な高さを自在に調整可能な金属板を用いることとした。

3.3.1 実験方法

図3-4に実験系を示す。供試体である電界プローブは、直径8.2mmの円形のプリント基板を用いたもので、樹脂製のケースに入っている。セミリジッド同軸ケーブルの心線に半田付けされており、セミリジッド同軸ケーブルには円筒形のフェライトコアを連ねている。この樹脂製ケースを貫通し、高さを自在に調整可能な金属板には9cm 角の片面プリント基板を使用した。金属板を取り付けた状態の写真を図3-7に示す。

金属板の高さと供試体である電界プローブの相対的な高さが+2mm~-2mm の場合は、主に、供試体そのものに存在する金属体の影響で、-2mm 以上離れている場合は、主に金属筐体等との距離の影響であると想定し、-12mm まで検討することにした。

また、全面アース等やシールド板等によって、供試体の表面が覆われた場合を想定し、

供試体である電界プローブの上の部分、導電性接着剤の塗布された銅箔(以後、銅箔テープと表記)で覆いかぶせる実験(図 3-8 参照)も行った。

印加プローブは、第 2 章で用いたものと同じ 9cm 角、3cm 角、1cm 角のものを用いた。

印加プローブは、XY テーブル中央部に下側向きに固定し、XY ステージに供試体である電界プローブを取り付ける。印加プローブと供試体である電界プローブとの間隔は約 5mm である。実験の際は、図 3-5 に示すように、印加プローブ中央部を横切る直線上を、供試体である電界プローブを 5mm 間隔で移動させ、各々の位置で、供試体である電界プローブ上に 2.5V を越える電圧が誘起されるまで、印加電圧を 0.1kV~8kV まで 0.1kV 間隔で、段階的に上昇させた。一方、デジタルオシロスコープは、シングルトリガモードでトリガレベルを+2.5V に設定し、トリガがかかった事で、2.5V 以上の電圧が誘起されたと判断した。この作業を、金属板の高さを供試体である電界プローブより+2mm~24mm の間で段階的に変更して行った。実験時の写真を図 3-6 に、詳細な実験条件を表 3-2 に示す。

また、供試体である電界プローブに誘起される電圧波形についても調べた。この際は、図 3-4 の実験系において、印加プローブと供試体である電界プローブの中心を一致させた状態で、印加電圧を 0.5kV~1.5kV まで 0.5kV ステップで上昇させた。詳細な試験条件を表 3-4 に示す。

また、図 3-4 の実験系を用い、印加電圧を一定(+0.6kV)にした場合に、供試体である電界プローブに誘起される電圧について、金属板の高さを+2mm~24mm の範囲で試験した。

3.3.2 結果及び考察

- (1) 金属板を取り付けなかった場合の、9, 3, 1cm 角印加プローブでの試験結果を図 3-9 に示す。この場合、印加プローブと供試体である電界プローブの位置が重なり合っている間は、結合が強く、位置のずれの大きさに関係なく誘起電圧はほぼ一定(TRG 発生時の印加電圧:0.5kV)。重なりが無くなる(ズレ:20mm)と結合が急速に弱くなる。このとき、結合が悪くなる度合いは、マイクロストリック線路の場合に比べ、緩やか。
- (2) 金属板を供試体である電界プローブと同じ高さに取り付けた場合の 9, 3, 1cm 角印加プローブでの試験結果を図 3-10 に示す。この場合、金属板がない場合(図 3-9)に比べ、印加プローブと供試体である電界プローブとのずれが大きくなる際の結合の悪化の度合いが緩やかであった。
- (3) 3cm 角印加プローブを用い、金属板の高さを変えた場合について、図 3-11 に示す。供

試体である電界プローブと金属板との相対的な高さが+2mm~-2mm の時は、印加プローブと供試体である電界プローブの位置が重なり合っている間の結合の強さは金属板がない状態の時と同じ(TRG 発生時の印加電圧:0.5kV)。その後、徐々に結合が弱くなる度合いは、金属板がないときよりも緩やか。相対的な高さが-6mm では、金属板がない状態に近くなり、-12mm では、金属板がない状態とほぼ同じとなった。

供試体である電界プローブ上に銅箔テープで覆った場合、金属板の端に、印加プローブ中心部が配置される(ズレ:約 45mm)まで、結合が強い状態が続く。結合の強さは条件 1 と同じ。(TRG 発生時の印加電圧:0.5kV)。その後、結合が徐々に弱くなる。弱くなる度合いは条件 3 と同じ。

金属板を電界プローブの外部導体にアースすると、ズレが全くない状態(ズレ:0mm)でも結合が著しく弱い(TRG 発生時の印加電圧:1.6kV)。金属板の端に、印加プローブ中心部が配置される(ズレ:約 45mm)まで結合の状態は同じ。その後、結合が徐々に弱くなる。

(4) 供試体である電界プローブに誘起された電圧波形の例(印加電圧 1.5kV 時、各サイズの印加プローブについて金属板有、無)を図 3-14 に示す。また、印加電圧を 0.5kV~1.5kV まで 0.5kV で変化させたときに、供試体である電界プローブに誘起されたピーク電圧値をプロットした結果を図 3-15 に示す。いずれの波形も鋭いピーク波形を有しており、ほぼ同じ形状をしていることがわかった。また、電圧波形、ピーク電圧とも金属板の影響は殆どないことがわかった。

(5) 印加電圧を一定(+0.6kV)で試験した結果を図 3-16 に示す。受信プローブと金属板の高さの差が ± 2 mm の場合、印加プローブと受信プローブの重なりが無くなった場合の結合状況の悪化の度合いが金属板なしの時より緩やか。受信プローブと金属板の高さの差が-6mm 以上の場合、印加プローブと受信プローブの重なりが無くなった場合の結合状況の悪化の度合いが、金属板なしの時とほぼ同じであった。また、印加プローブと供試体である電界プローブのずれがない部分について、供試体である電界プローブと金属板の相対的な高さでの誘起電圧の変化を図 3-17 に示す。金属板が受信プローブ天板と同じ高さの時が受信レベルが最大となる。

以上のことから、供試体の近傍に金属物が存在する場合、印加プローブが供試体の位置と重なり合っていないなくても、供試体に対してより多くの結合をもたらすことが分かった。この場合、金属板が供試体の上まで覆っている場合、結合はさらに大きくなり、外来電磁

波の影響をより受けやすくする働きがあることが分かった。但し、印加プローブが供試体と重なり合う部分での結合については、金属板の有無に関係なく同じであることが分かった。

3.4 結言

照射電磁波と信号線路の結合に関しては、信号線路の裏側に左右両方とも全面アースがある場合と、片側のみに全面アースが存在する場合を比較した。その結果以下のことが確認できた。

(1) 印加プローブのどこか一部がマイクロストリップ線路の信号線路と重なり合っている際の結合状況はほぼ同レベルである。

(2) 左右両側とも、印加プローブがマイクロストリップ線路の信号線路から離れると急速に結合が減少する。

(3) マイクロストリップ線路の裏側で、片側のみに全面アースが存在する場合、印加プローブがマイクロストリップ線路の信号線路から離れたときの結合の現象が緩やかである。

また、近傍に金属板があると、外来電磁波の影響を受けやすくなることが確認できた。

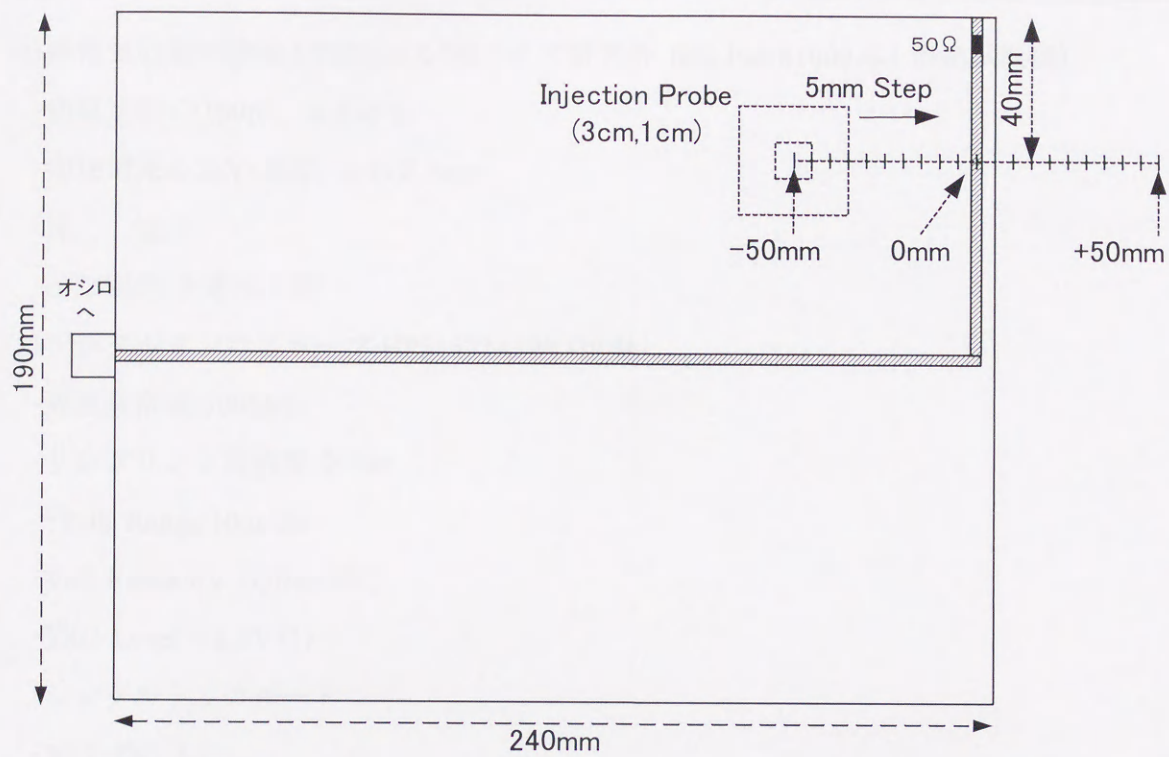


図 3-1 印加プローブとマイクロストリップ線路の位置関係

表 3-1 試験条件

(1) 静電気放電試験機:ESS200AX (株)ノイズ研究所 IEC Pub.61000-4-3 準拠試験機)

- ・回路定数:C:150pF, R:330 Ω
- ・印加電圧:0.2kV~8kV, 0.1kV Step
- ・極 性:+
- ・印加回数:各電圧 1 回

(2) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株) HP 社)

- ・周波数帯域:500MHz
- ・サンプリング周波数:2GHz
- ・TIME Range:10ns/div
- ・Volt Range:6V (Offset:0V)
- ・TRG Level :+2.5V (↑)
- ・シングルトリガモード
- ・50 Ω DC 入力

(3) 印加プローブ:3cm 角, 1cm 角

(4) 印加プローブと供試体との間隔:3mm

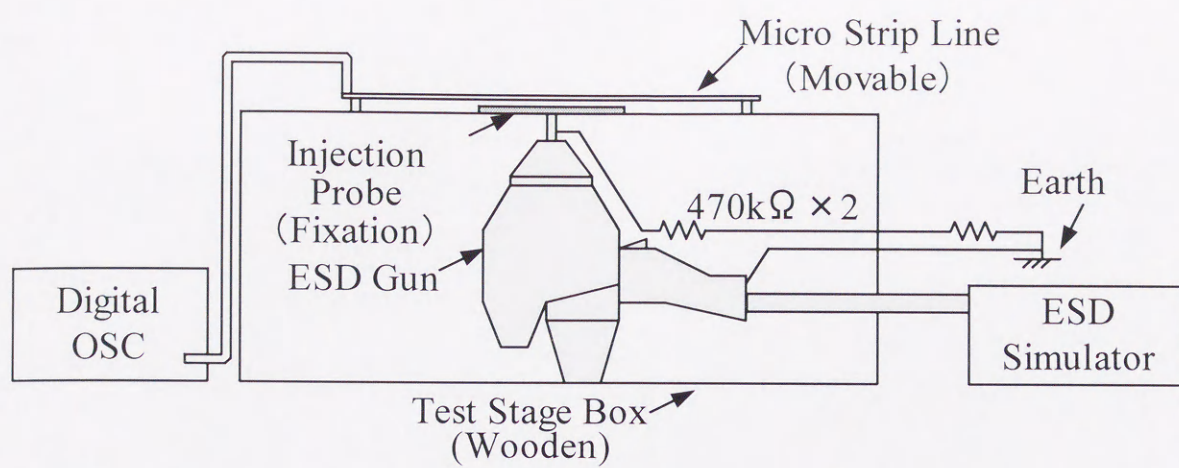
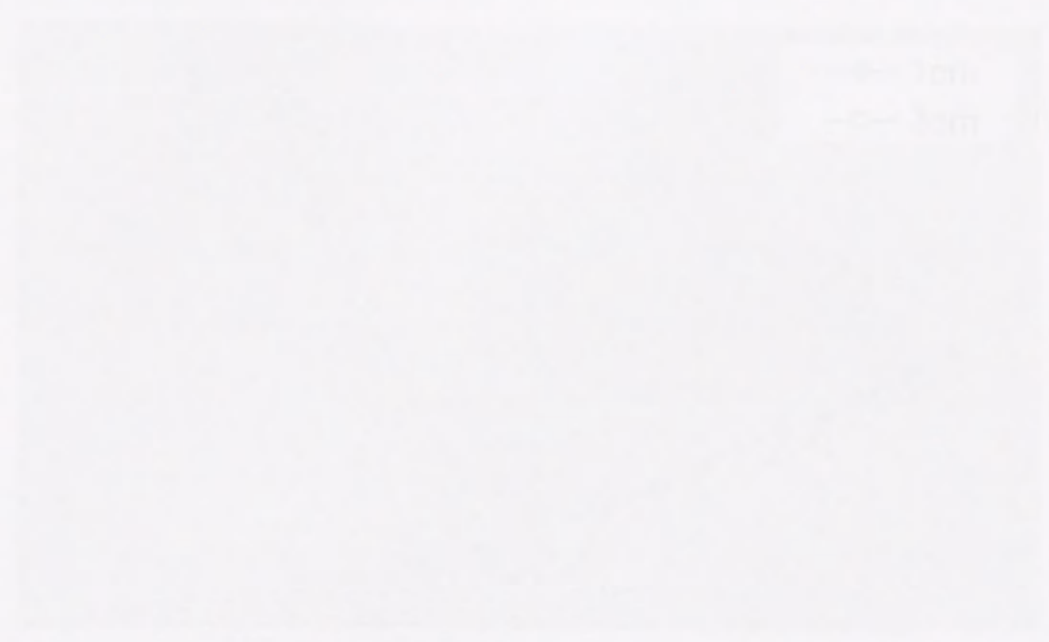


図 3-2 試験環境



1911-12-15
1911-12-15
1911-12-15

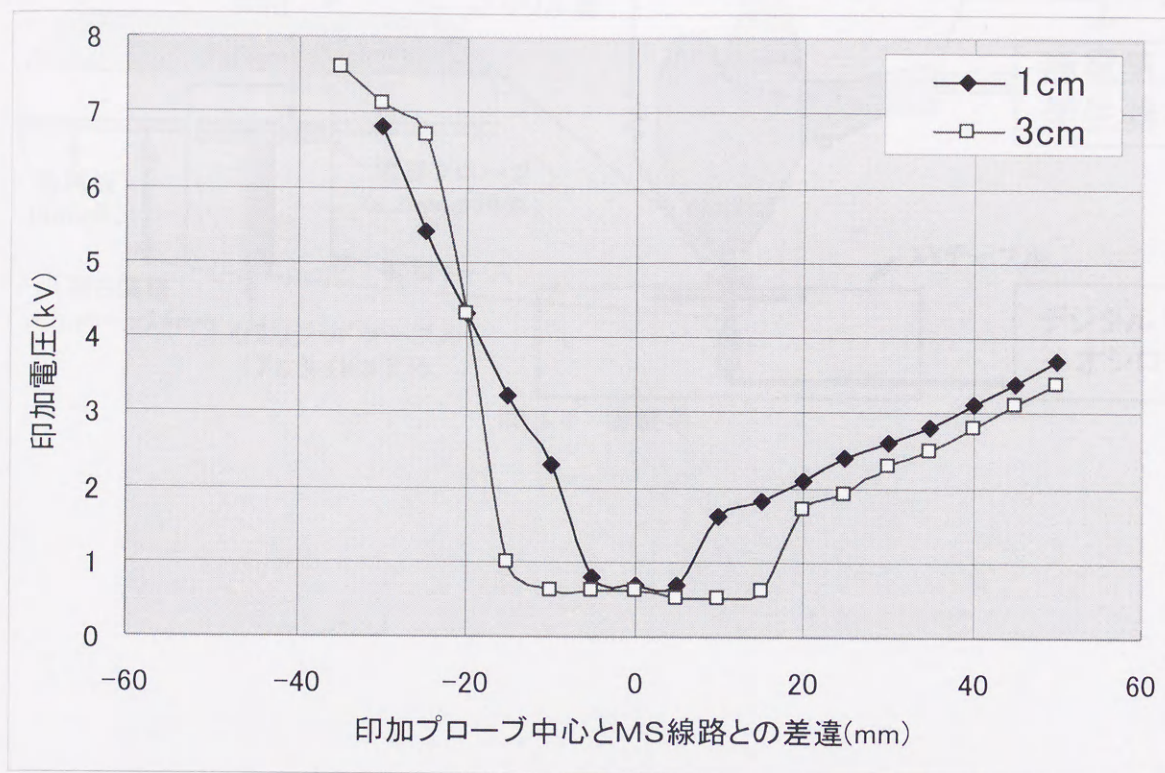


図 3-3 試験結果

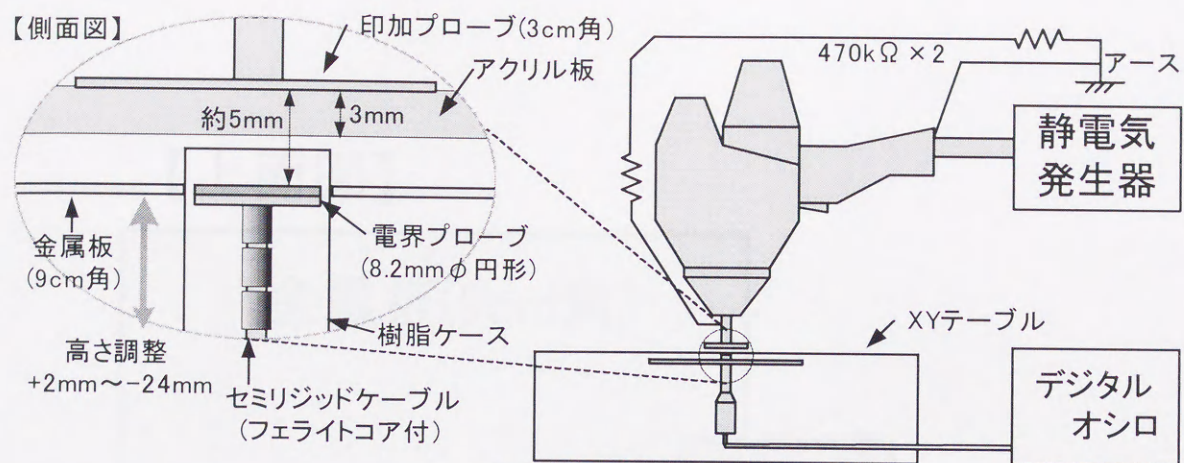


図 3-4 実験系

【上面図】

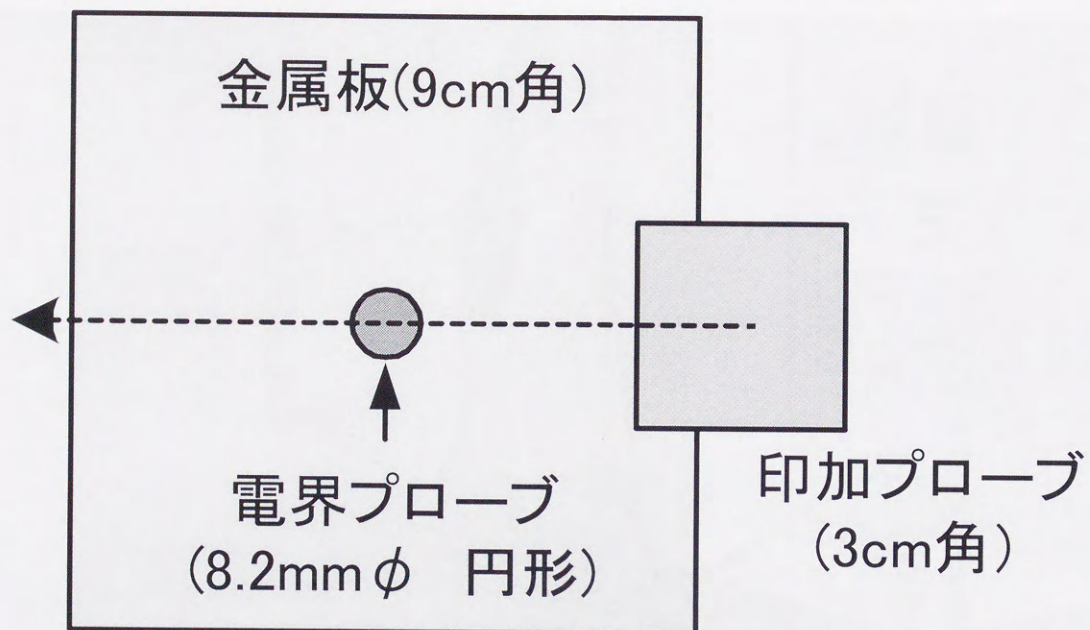


図 3-5 印加プローブと受信プローブの位置関係

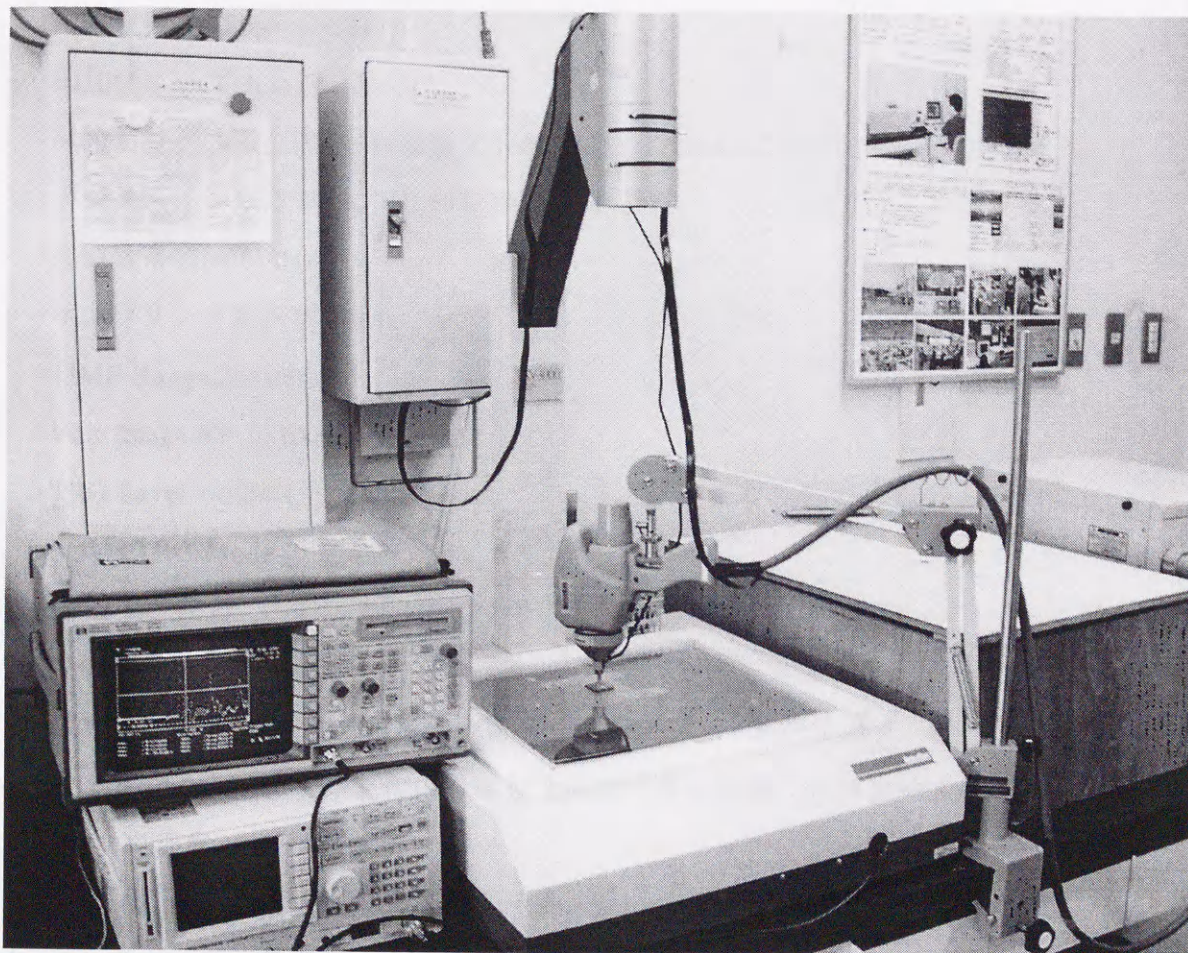


図 3-6 実験時の写真

表 3-2 試験条件

-
- (1) 静電気放電試験機:ESS200AX (株)ノイズ研究所 IEC Pub.61000-4-3 準拠試験機)
- ・印加電圧:0.2~8kV, 0.2kV Step
 - ・回路定数:C:150pF, R:330 Ω
- (2) 印加プローブ:3cm 角
- ・試験ボックス中央部(中心座標 X:160mm, Y:120mm)に固定
- (3) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株) HP 社)
- ・周波数帯域:500MHz
 - ・サンプリング周波数:2GHz
 - ・TIME Range:20ns/div
 - ・Volt Range:6V (Offset:0V)
 - ・TRG Level :+2.5V(\uparrow)
 - ・Single TRG Mode
 - ・50 Ω DC 入力
- (4) 受信プローブ
- ・電界プローブ 8.2mm ϕ 円形の金属板, 片面プリント基板使用
 - ・セミリジッド同軸ケーブルの心線を金属板に半田接続。同軸ケーブル部分にフェライトコア装着。
- (5) 印加プローブと受信プローブの間隔:約 5mm
- (6) 電界プローブに対する金属板の高さ:+2, 0, -2, -6, -12mm
- (7) 印加用電界プローブとの間隔:約 5mm
- (8) 設置座標:X:80mm~240 mm, Y:120mm~120mm, step:5mm
- ESS200AX, ESV3000, ATGPIB
- (9) 金属板:32um ϕ \times 90mm \times 90mm, 片面プリント基板使用
- 中央にプローブ装着用の穴 ϕ 10.5mm
- (10) XY ステージ:プリアンプなし(スルー状態)の受信プローブ取付部を使用
-

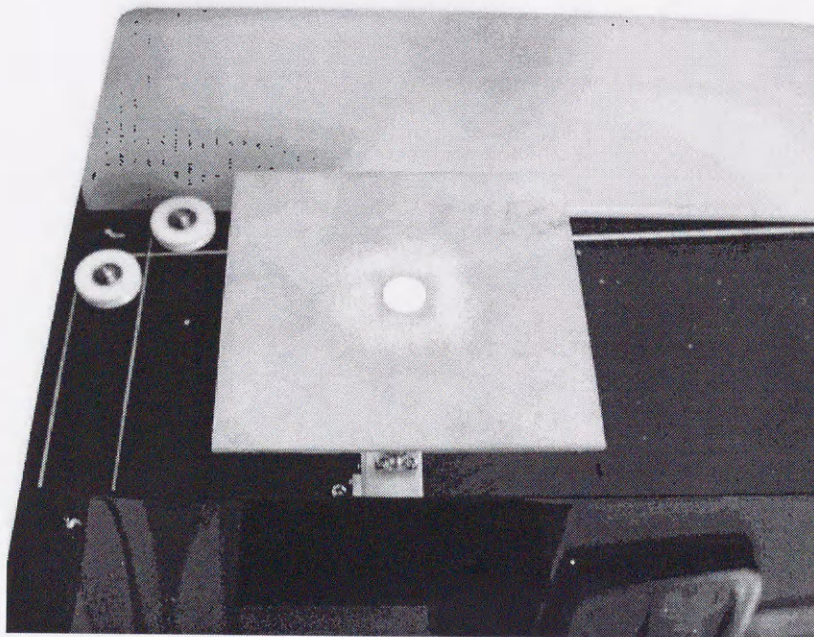


図 3-7 電界プローブ (9x9cm 金属板付き)

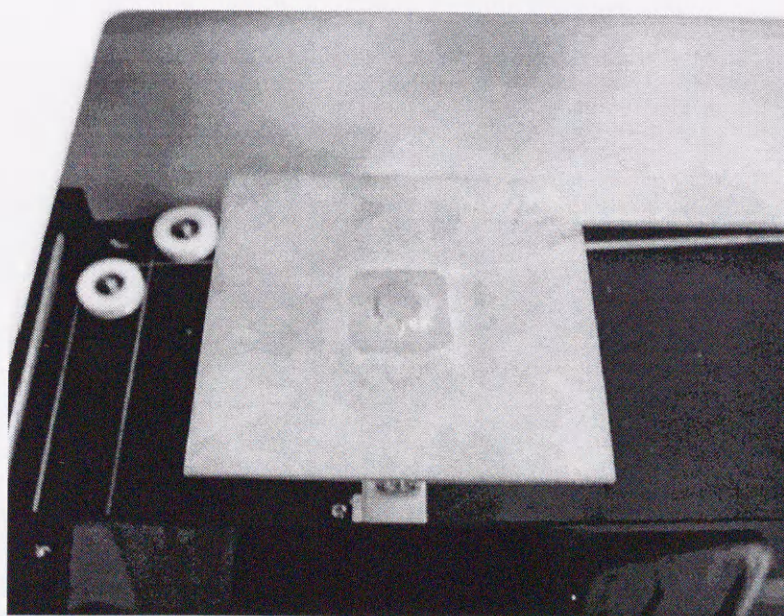


図 3-8 電界プローブ (9x9cm 金属板付き銅箔テープでのカバー付き)

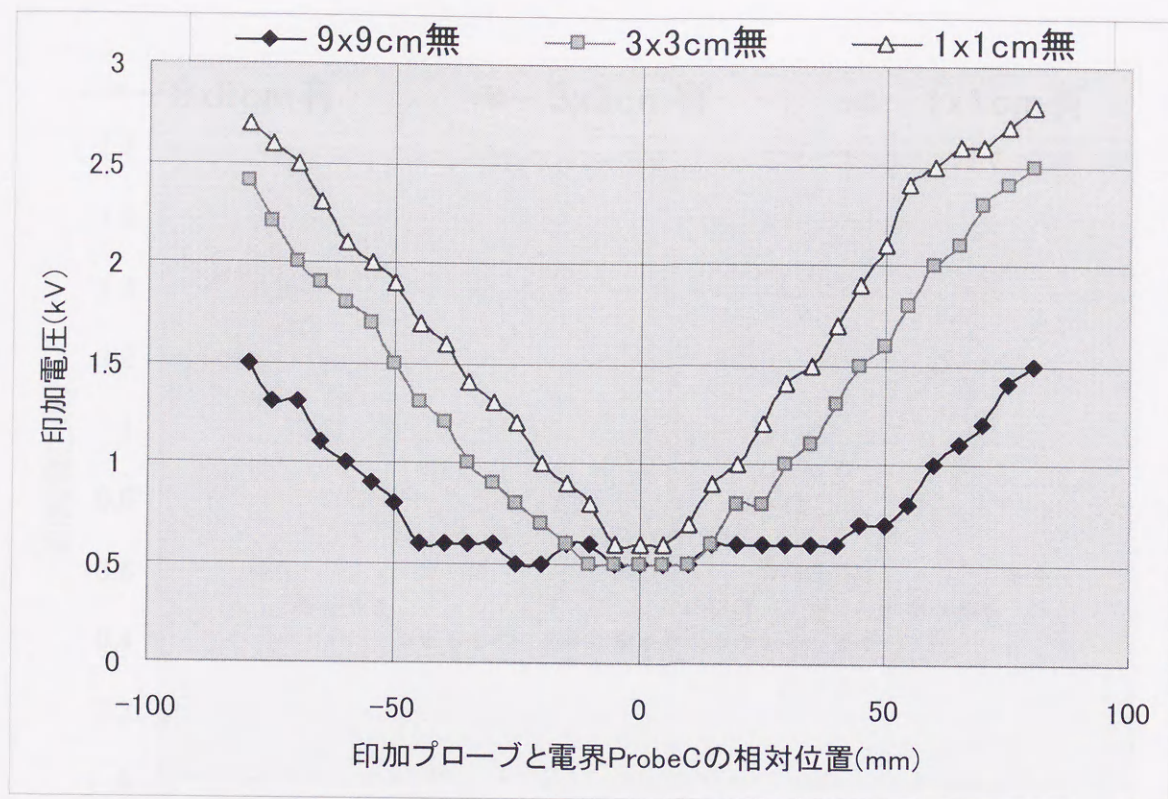


図 3-9 金属板なしの場合

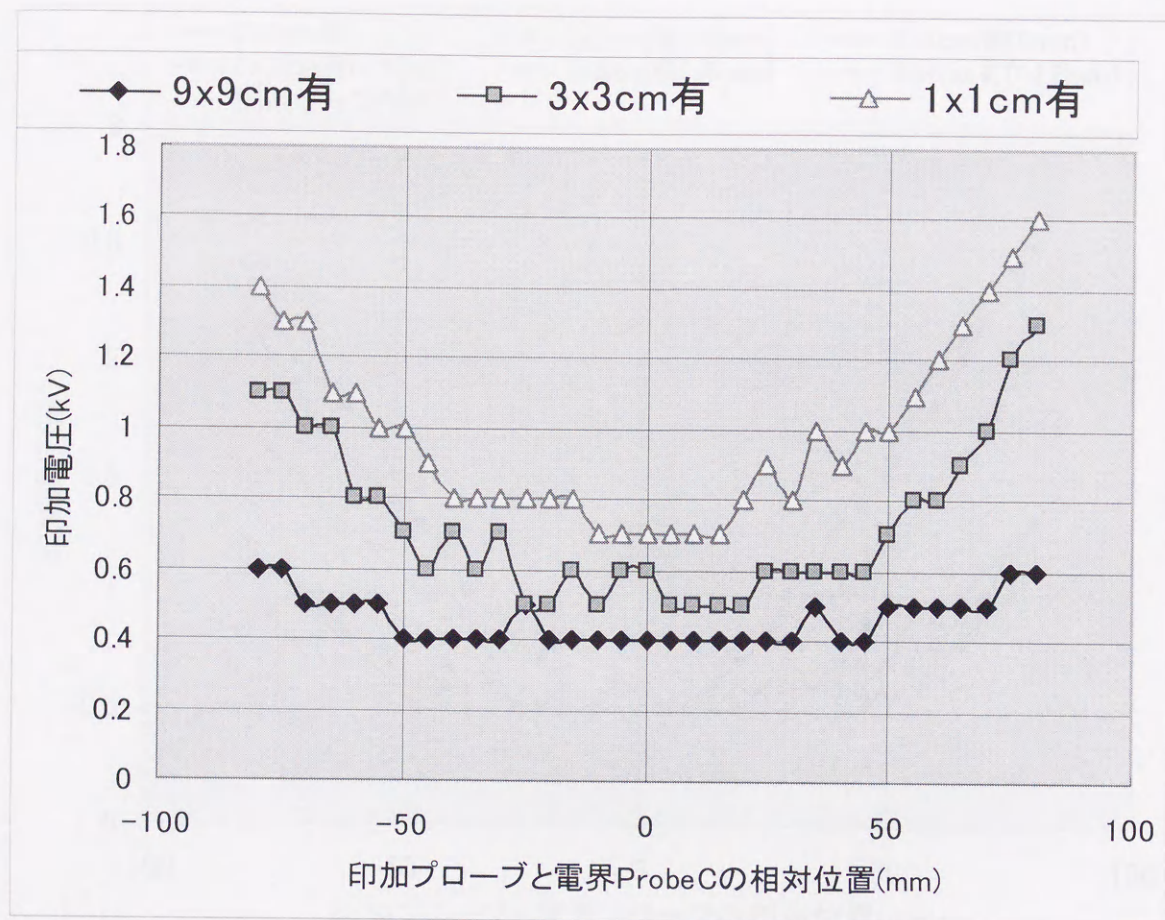


図 3-10 金属板有りの場合

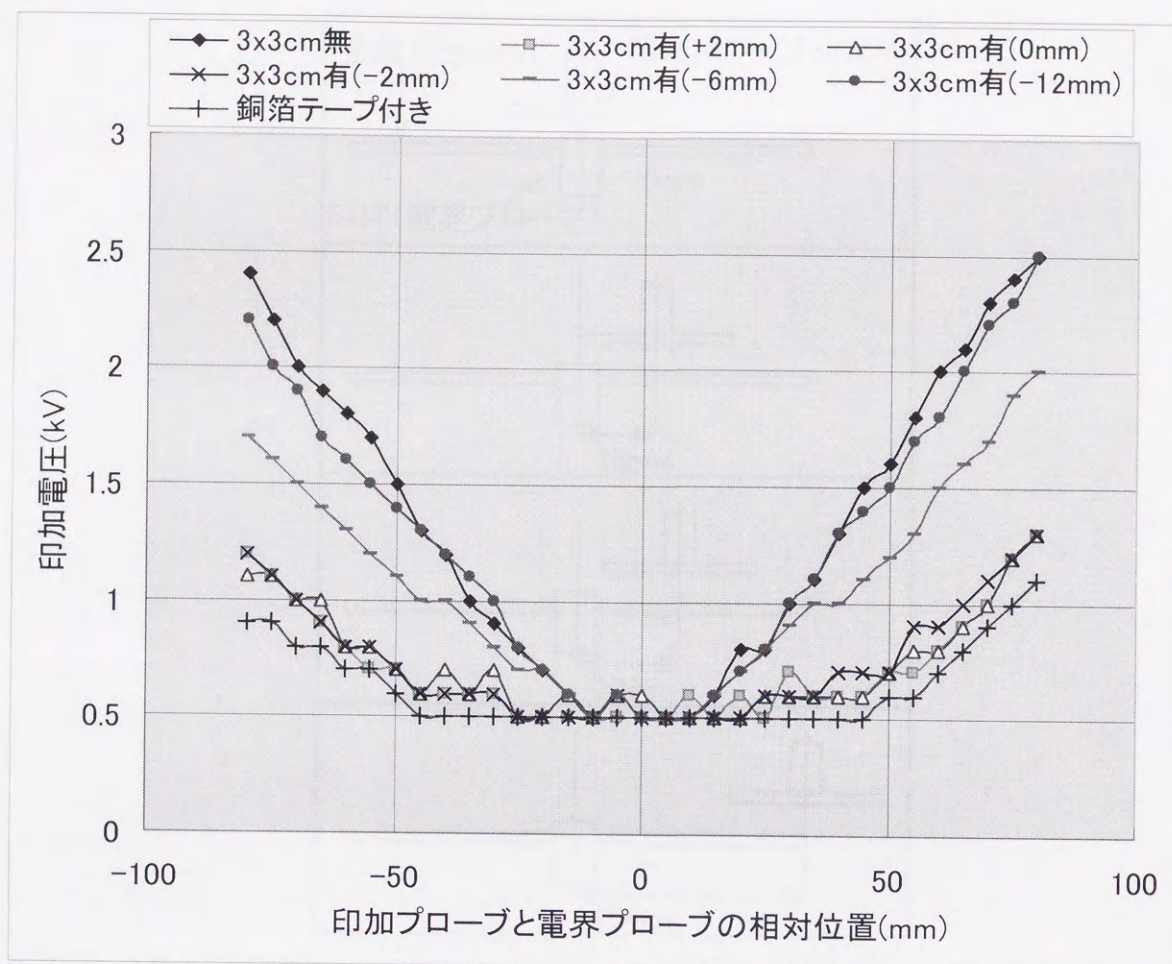


図 3-11 金属板と電界プローブの高さの違いによる影響

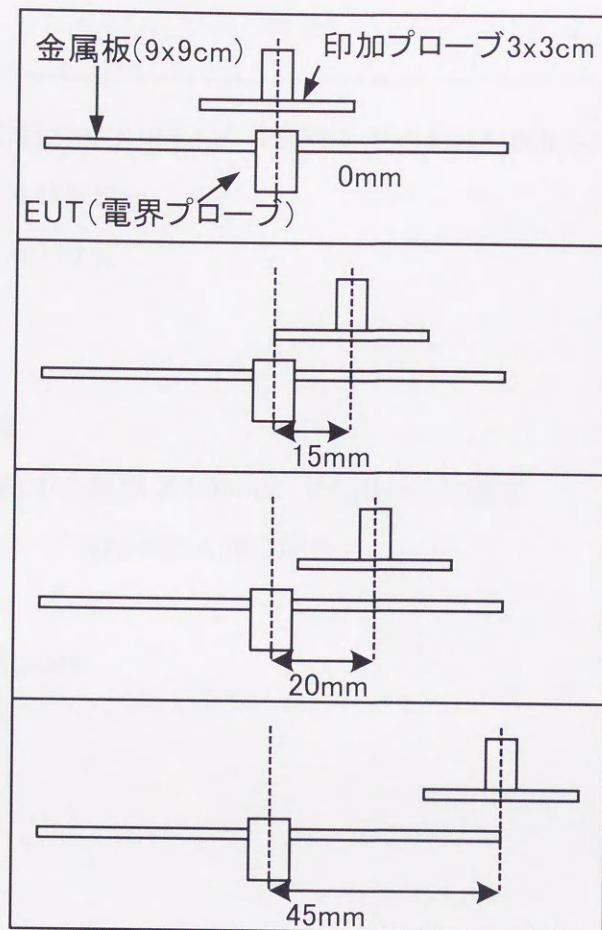


図 3-12 印加プローブと電界プローブの位置関係

表 3-3

(1) 静電気放電試験機:ESS200AX (株)ノイズ研究所 IEC Pub.61000-4-3 準拠試験機)

・印加電圧:0.5~3.0kV 0.5kV Step

・回路定数:C:150pF, R:330 Ω

・極性:+

・平均回数:5 回

(2) 印加プローブ:3cm 角

・試験ボックス中央部(中心座標 X:160mm, Y:120mm)に固定

(3) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株) HP 社)

・周波数帯域:500MHz

・サンプリング周波数:2GHz

・TIME Range:10ns/div

・TRG Level :+0.5V(\uparrow)

・Single TRG Mode

・50 Ω DC 入力

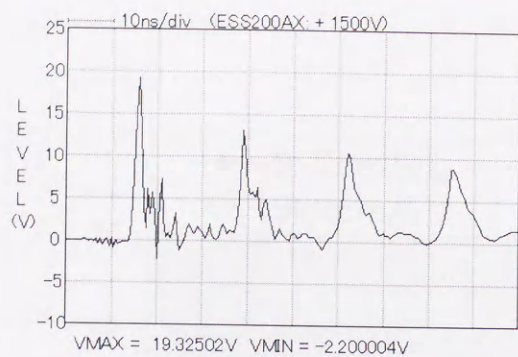


図 A (9cm 角+1.5kV 金属板なし)

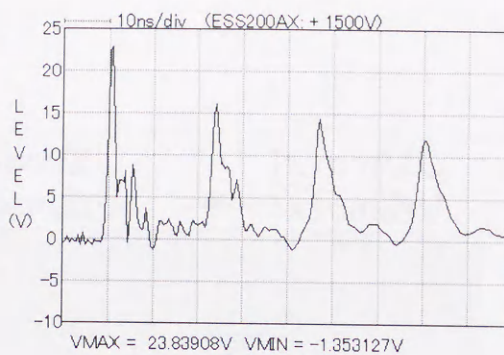


図 D (9cm 角+1.5kV 金属板あり)

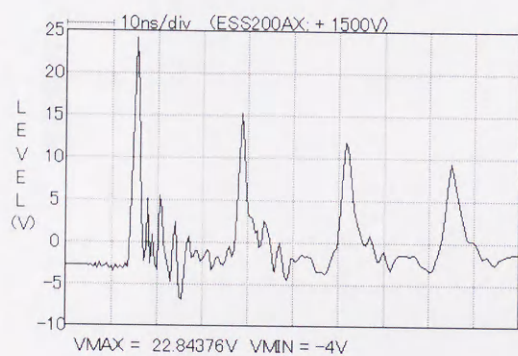


図 B (3cm 角+1.5kV 金属板なし)

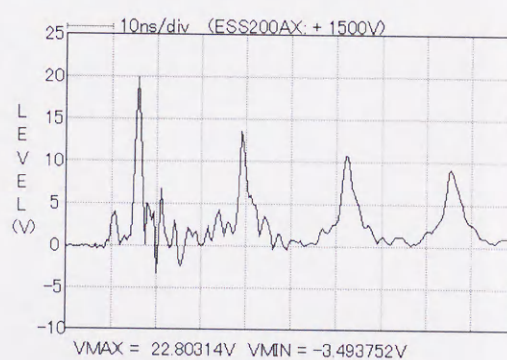


図 E (3cm 角+1.5kV 金属板あり)

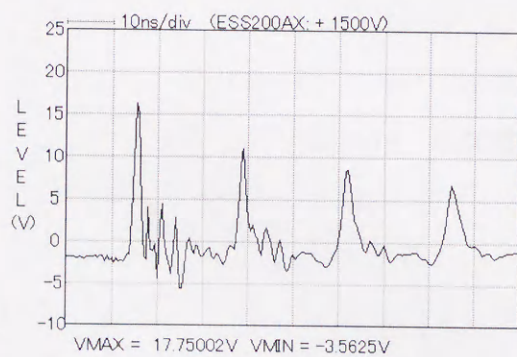


図 C (1cm 角+1.5kV 金属板なし)

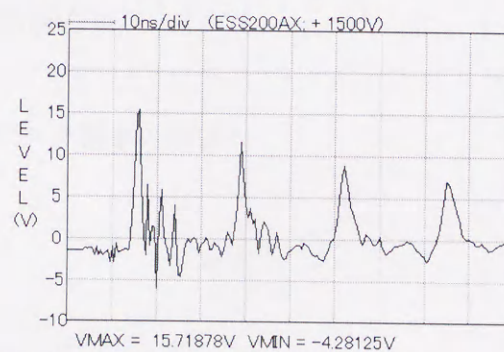


図 F (1cm 角+1.5kV 金属板あり)

図 3-13 誘起波形

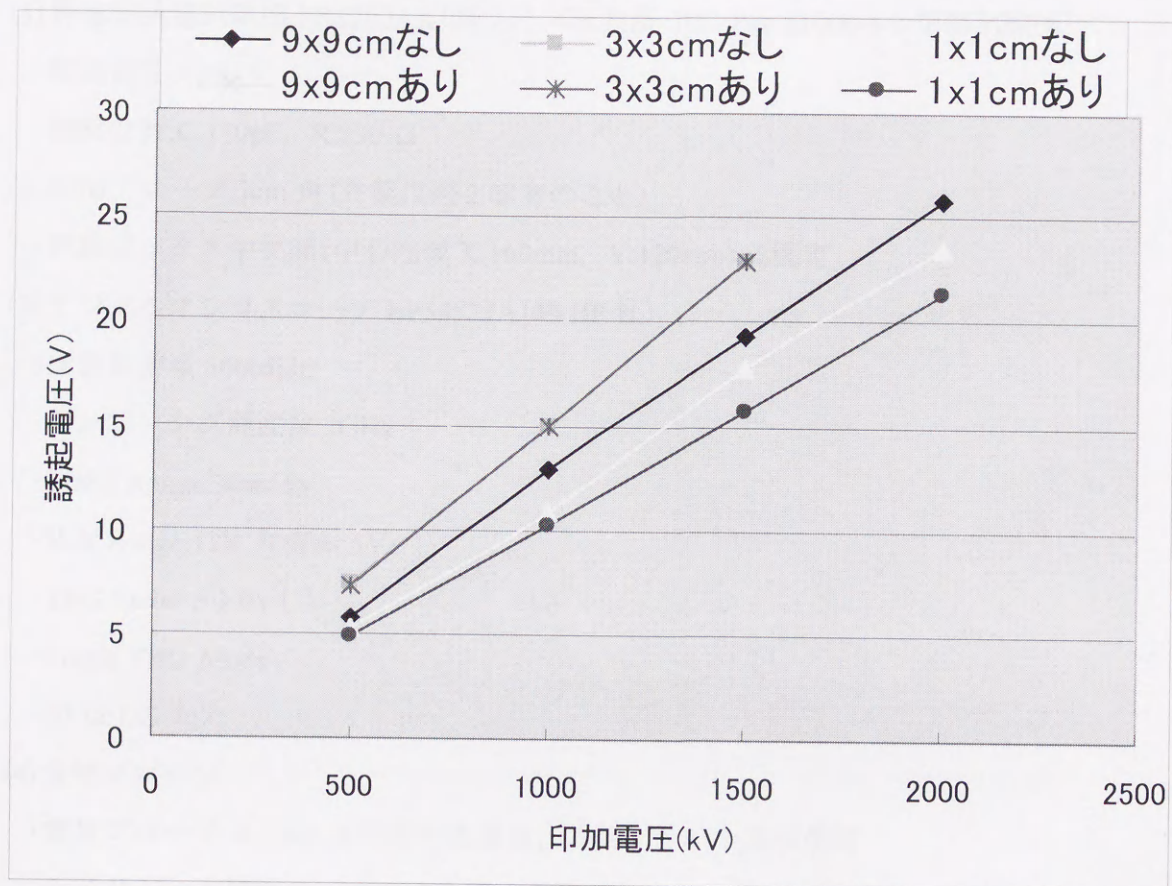


図 3-14 印加電圧と誘起ピーク電圧の関係

表 3-4 試験条件

-
- (1) 静電気放電試験機:ESS200AX (株)ノイズ研究所 IEC Pub.61000-4-3 準拠試験機
- ・印加電圧:+0.6kV
 - ・回路定数:C:150pF, R:330 Ω
- (2) 印加プローブ:3cm 角 (外観は図 2 参考のこと)
- ・試験ボックス中央部 (中心座標 X:160mm, Y:120mm) に固定
- (3) デジタルオシロスコープ:HP54522A (株) HP 社)
- ・周波数帯域:500MHz
 - ・サンプリング周波数:2GHz
 - ・TIME Range:20ns/div
 - ・Volt Range:12V (Offset:5V)
 - ・TRG Level :+1.0V (\uparrow)
 - ・Single TRG Mode
 - ・50 Ω DC 入力
- (4) 受信プローブ
- ・電界プローブ 8.2mm ϕ 円形の金属板, 片面プリント基板使用
 - ・セミリジッド同軸ケーブルの心線を金属板に半田接続。同軸ケーブル部分にフェライトコア装着。
- (5) 印加プローブと受信プローブの間隔:約 5mm
- (6) 電界プローブに対する金属板の高さ:+2, 0, -2, -6, -12, -24mm
- (7) 印加用電界プローブとの間隔:約 5mm
- (8) 設置座標:X:160mm, Y:70mm~170mm を 5mm ステップ
- (9) 金属板:32 μ m ϕ \times 90mm \times 90mm, 片面プリント基板使用
- 中央にプローブ装着用の穴 ϕ 10.5mm
- (10) XY ステージ:プリアンプなし (スルー状態) の受信プローブ取付部を使用
-

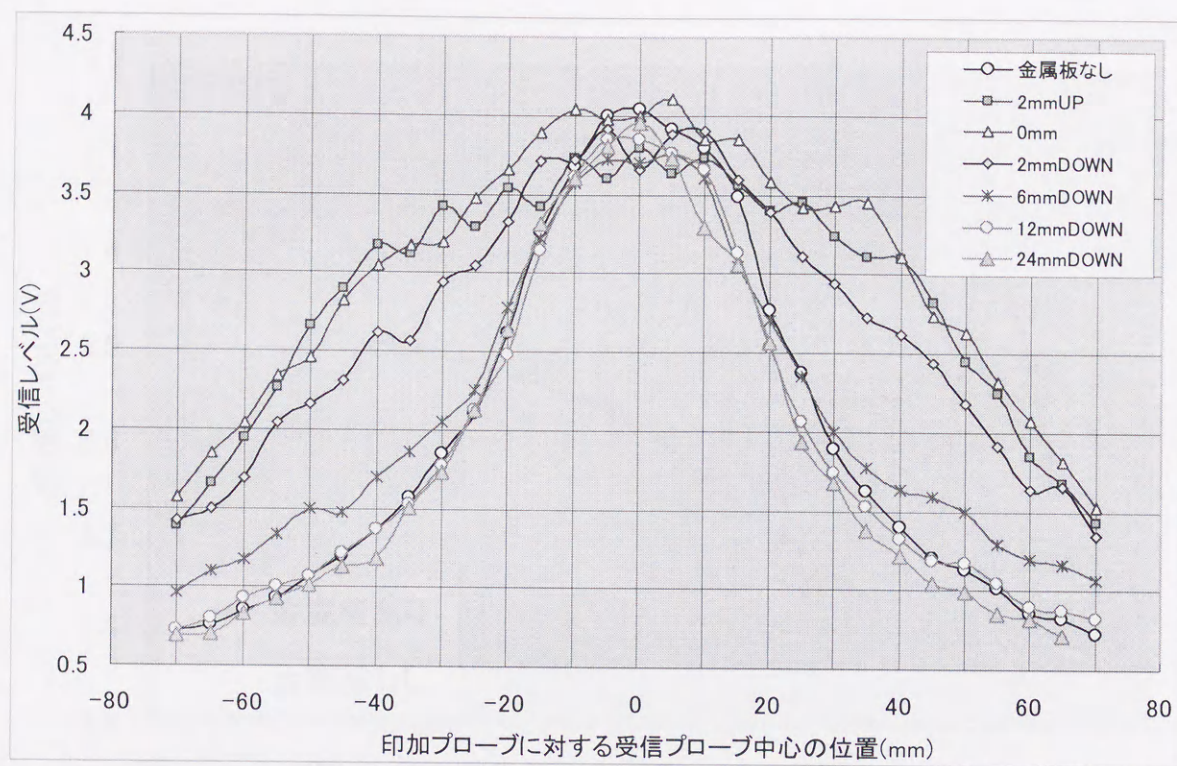


図 3-15 電界プローブ近傍に存在するグランド面が結合に及ぼす影響

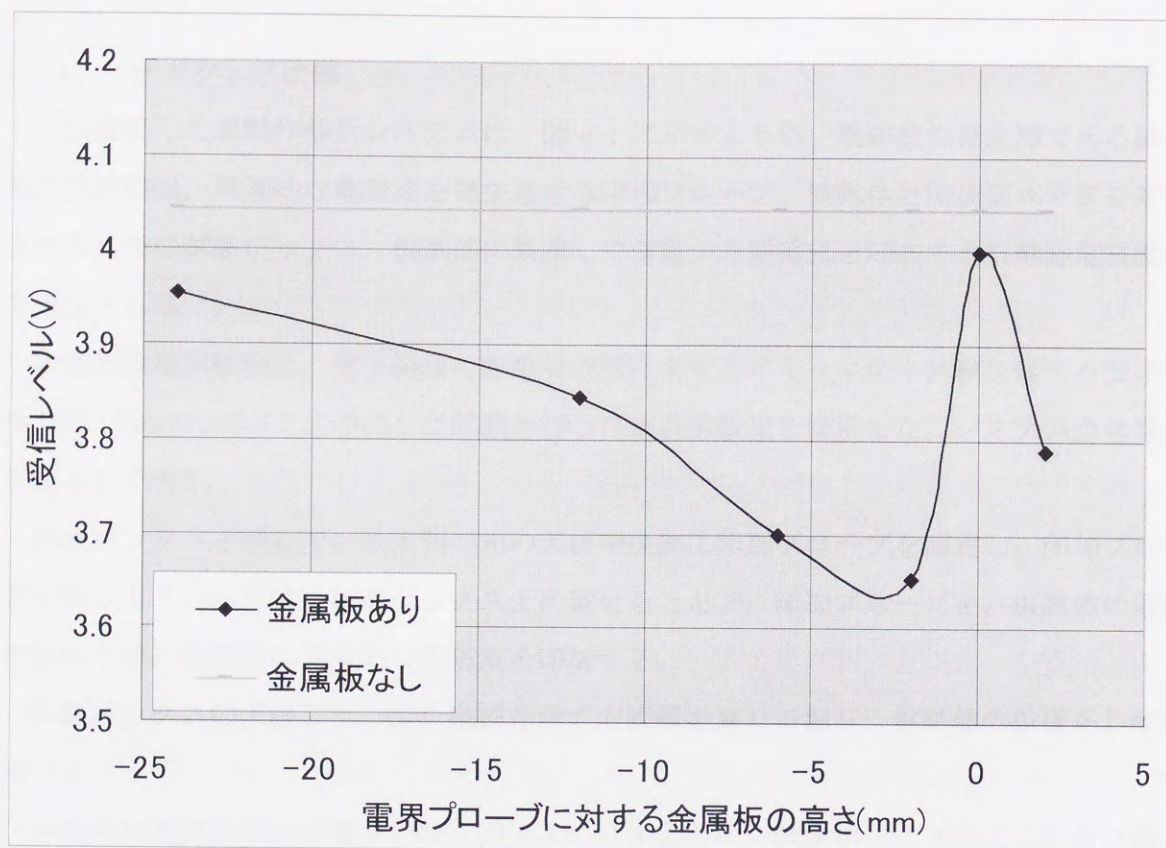


図 3-16 受信プローブに対する金属板の高さの影響

第4章 誤動作解析システムの構築

4.1 ハードウェア仕様

今回構築した誤動作解析システムは、図 4-1 に示すように、電磁波の発生源である静電気放電試験機、局所的な電磁波を発生させる印加プローブ、供試体と印加プローブを対向させるための試験ボックス、供試体に累積して帯電する静電気を除去する自動除電装置等で構成される。

静電気放電試験機は、電子機器の静電気放電に対するイミュニティ試験に関する国際規格 IEC Pub.61000-4-2 に準拠した試験を行うための試験機を使用した。システム全体写真を図 4-2 に示す。

試験ボックスと呼んでいる木製の箱の天板中央部に印加プローブを固定し、印加プローブを跨ぐように供試体を試験ボックス上に載せることで、印加プローブを、供試体の近傍に対向させ、供試体に局所的な電磁波を印加する。

試験ボックスの天板には、XY 座標を示す方眼線を施しており、供試体の位置あわせに用いる。

静電気放電試験機の放電ガンは、図 4-3 に示すように、試験ボックス内に上向きに固定されており、その先端に、印加プローブを接続する。

印加プローブは、図 4-4 に示す 9cm 角、3cm 角、1cm 角のものを用意した。中央に半田付けした 6mm φ のボルトを介して、放電ガンに接続する。

制御用コンピュータは、IBMPC-AT 互換機であり、Microsoft 社の日本語 Windows95 系環境で動作している。

静電気放電試験機と GPIB インタフェースで接続されている。

供試体への電源供給線は、印加プローブの影響を受けないよう、印加プローブから極力離れるよう配置する。アース線についても供試体への影響が少なくなるよう、供試体から極力離れるよう配置する。印加プローブと供試体の間隔については、供試体の部品等と接触しない範囲で極力狭く設定する。その他、誤動作解析システムの詳細仕様については、表 4-1 に示す。

4.2 ソフトウェア仕様

構築したシステムを制御するソフトウェアは、Microsoft 社の Visual Basic6.0 にて開発し、Microsoft 社の日本語 Windows95 系の OS 上で動作する。このソフトウェアを用いて、

測定範囲や印加電圧等の測定条件を設定し、GPIB インターフェースを介して静電気放電試験機を制御する。供試体は X:320mm, Y:240mm の透明なアクリル板の上にボルト等で固定し位置決めする。その後、アクリル板側からデジタルカメラなどで写真撮影し BMP (ビットマップファイル)形式の画像ファイルを作成し、制御ソフトのウィンド内に表示する。試験ボックス上に施された XY 座標を示す方眼線を用いて供試体の載ったアクリル板の位置を調整し、指定された領域に印加プローブを配置した上で、電磁波の印加を開始する。そして、誤動作発生時の電圧と、誤動作現象を記録する。試験結果については、図 4-5 に示すように、ソフトウェアのウィンドに表示されている供試体の映像上に、電磁波を印加した領域を示す四角い枠、誤動作発生時の印加電圧(単位:kV)、誤動作現象を示す識別コード(①, ②等)が表示される。また、誤動作現象については別表で表示される。

4.3 試験手順

試験の手順を図 4-5 に示す。印加プローブの取り付けや供試体の設置後、制御用ソフトウェアを起動し、印加電圧の設定最小電圧値、設定最大電圧値、設定値上昇間隔等の試験条件を設定する。最初の試験領域に印加プローブを配置し、供試体を正常な動作状態にする。印加電圧を設定最小電圧から設定最大電圧まで設定値上昇間隔毎に上昇させ、誤動作しないか作業者が監視する。設定最大印加電圧に至る前に、誤動作が発生した場合、そのときの印加電圧及び、誤動作現象を記録する。設定最大電圧でも誤動作しなかった場合、最大設定電圧値と、誤動作なしと記録する。試験が済んでいない領域が残っている場合、印加プローブを次の試験領域に移動して、同様の作業を行う。

なお、構築したシステムの場合、印加プローブは固定されているので、供試体の方を、試験ボックス天板に描かれた XY 座標線に沿って移動させる。

この際、最初は 9cm 角の印加プローブを使用し、供試体全体について試験を行い、その中からイミュニティレベルの低い領域を大まかに検出し、その領域を 3cm 角の印加プローブで 9 分割して再試験し、その中でイミュニティレベルの低い領域を 1cm 角の印加プローブで更に 9 分割して再試験する。

なお、誤動作現象とは、誤動作と判定したときの現象(音や表示内容、挙動等)と、正常な動作状態への復帰手順(リセットボタンを押す、電源再投入、メモリ内容再登録)を含めたもので、誤動作現象ごとに分類して記録する。各誤動作現象には、識別コードが割り当てられる。識別コードは①~⑳まで用意しており、識別コード①は「誤動作なし」を割り当

てている。供試体上で発生した誤動作現象は試験中に、新たな誤動作現象が発生した度に、②以降に順次記録する。

4.4 試験条件による試験結果への影響

電子機器の誤動作は、電子回路の動作タイミングと深い関係があると言われている。特に、信号の立ち上がり、立ち下がりタイミングが合ったり、イミュニティレベルの低い箇所が機能しているかしていないかで、同じ強さの電磁波を印加しても、誤動作する場合としない場合があり、イミュニティ試験の再現性を悪くする一因となっている。

特に、静電気放電試験の場合、単発現象であるので、繰り返し複数回、印加することが、国際規格の場合にも規定されている。(1秒間隔で10回以上)

繰り返し回数が多いほど、より厳密な試験が可能ではあるが、その分、試験時間が長くなり、また、供試体に蓄積される電氣的ストレス等も増大するので、なるべく短時間で、誤動作現象の発生漏れを防ぎ、供試体への負担が少ない試験条件を検討した。検討事項を表4-2に示す。ここでは、実際に市販されているワンボードコンピュータの一部に対して局所的な電磁波を印加する試験を条件1~4まで1回ずつ行う作業を10回繰り返し、試験結果のバラツキについて調べた。

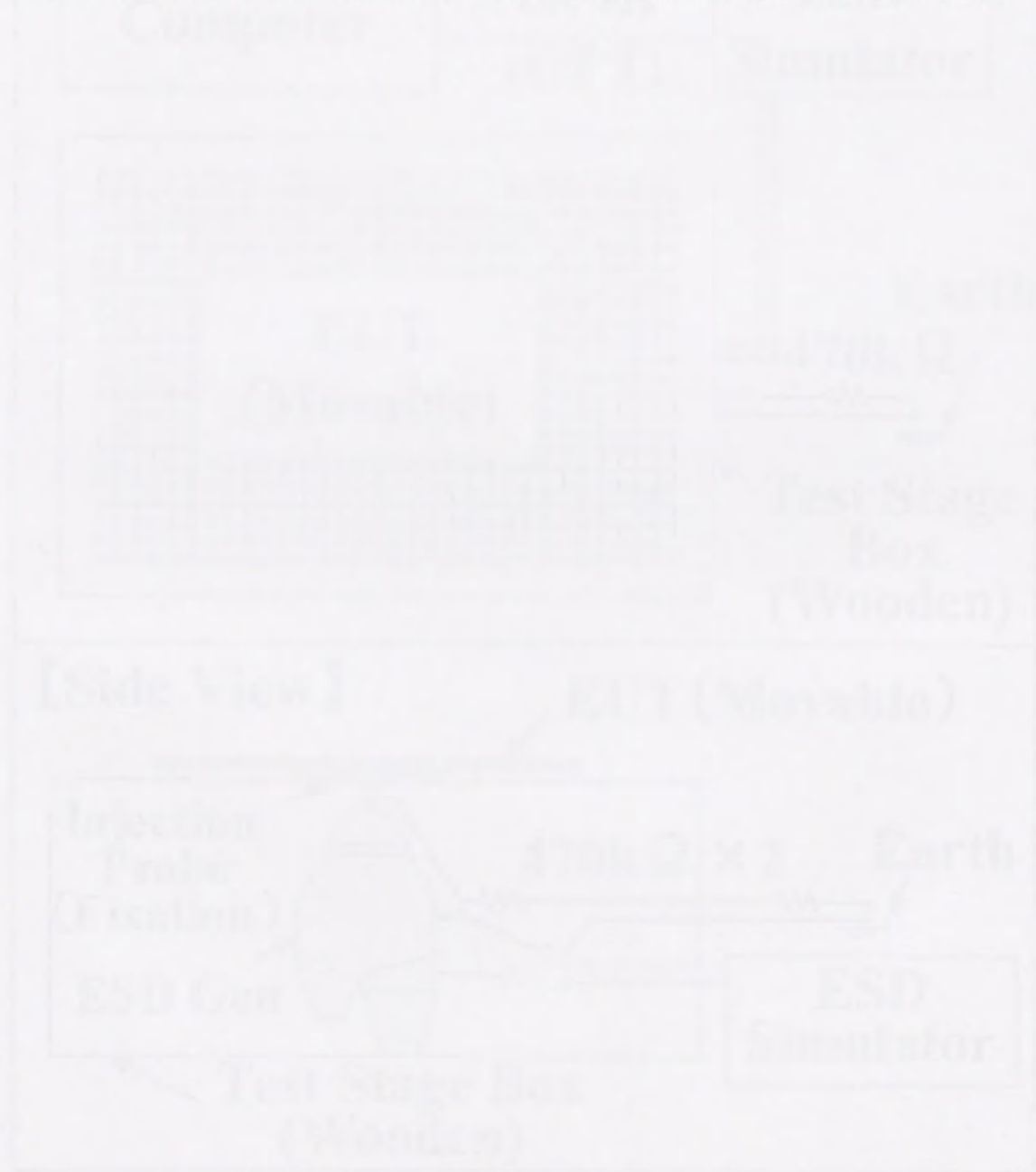
印加回数や除電等の条件を変えた、条件1~4で10回試験した結果と、そのバラツキ(標準偏差)を表4-3に示す。印加回数の影響(条件2と3)で比較すると、条件2の標準偏差は0.42、条件3の標準偏差は0.52となり、印加回数が多い方(条件2)がバラツキが少なく、除電の影響(条件3と4)で比較すると、条件3の標準偏差は0.52、条件4の標準偏差は0.79で、除電した方(条件3)がバラツキが少ないことが分かった。ちなみに、国際規格で定められている試験法(条件1)が4つの条件の中では、最もバラツキが大きく(標準偏差:0.88)、条件2での試験結果が最もバラツキが少なかった(標準偏差:0.42)。以上の結果から、試験をなるべく短時間で効率良く、試験結果の再現性を高めるには、単位時間の印加回数を増やし、その分印加回数を増やす方が良く、更に、印加試験の合間に除電する方法が、よりバラツキの少ない試験結果を得られることが分かった。

4.5 結言

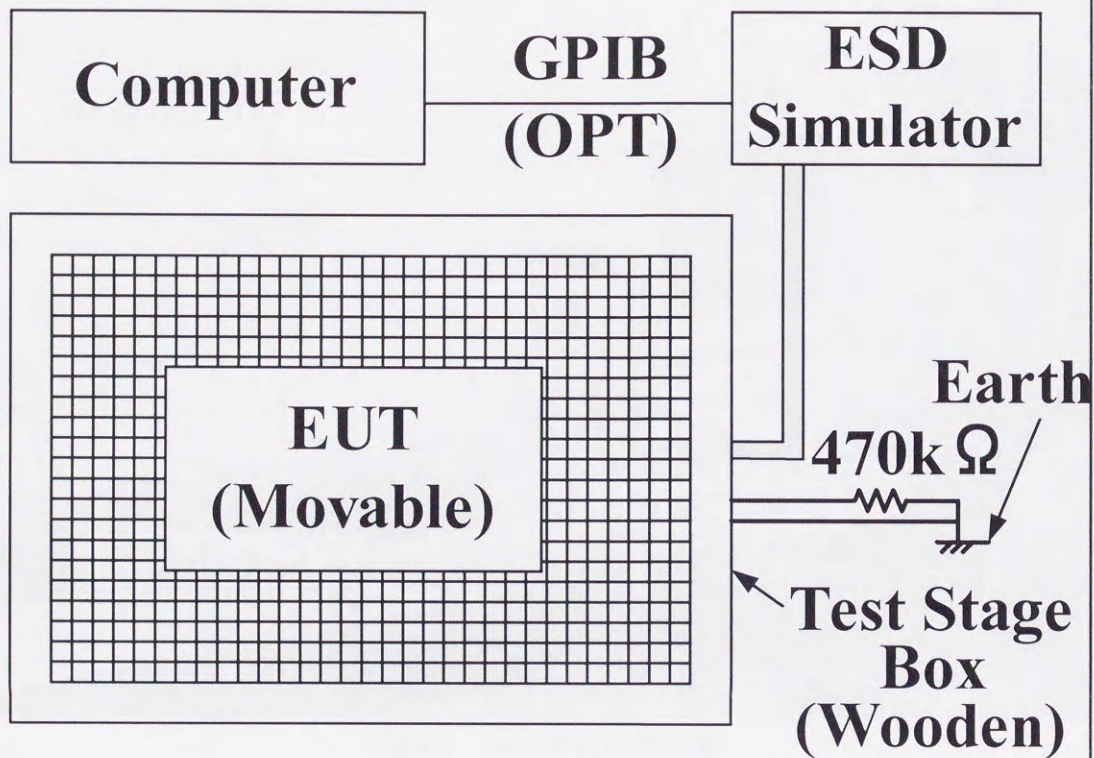
静電気放電試験機を用いた誤動作解析システムを構築し、バラツキの少ない試験条件について検討した結果、試験をなるべく短時間で効率良く、試験結果の再現性を高めるには、

単位時間の印加回数を増やし，その分印加回数を増やす方が良く，更に，印加試験の合間に除電する方法が，よりバラツキの少ない試験結果を得られることが分かった。

また，今回構築した誤動作解析システムの場合，，XY ステージ等へ取り付けの事が困難なため，供試体を手動で移動させる必要があり，試験の作業性が悪い。放電ガンの小型化を図り，XY ステージなどに取り付けられるよう検討する必要があると思われる。



【Top View】



【Side View】

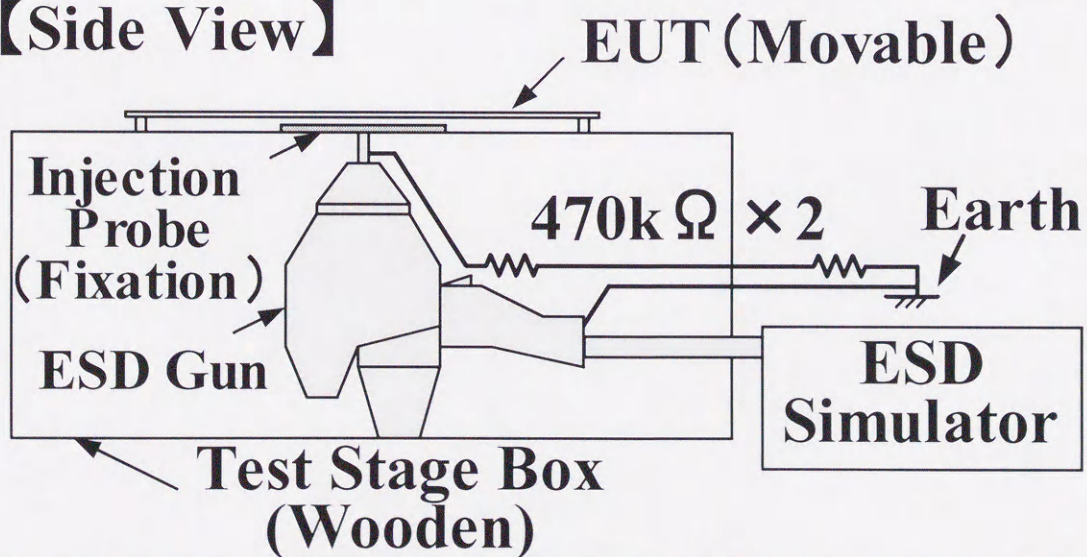


図 4-1 システム構成



図 4-2 システム全体写真

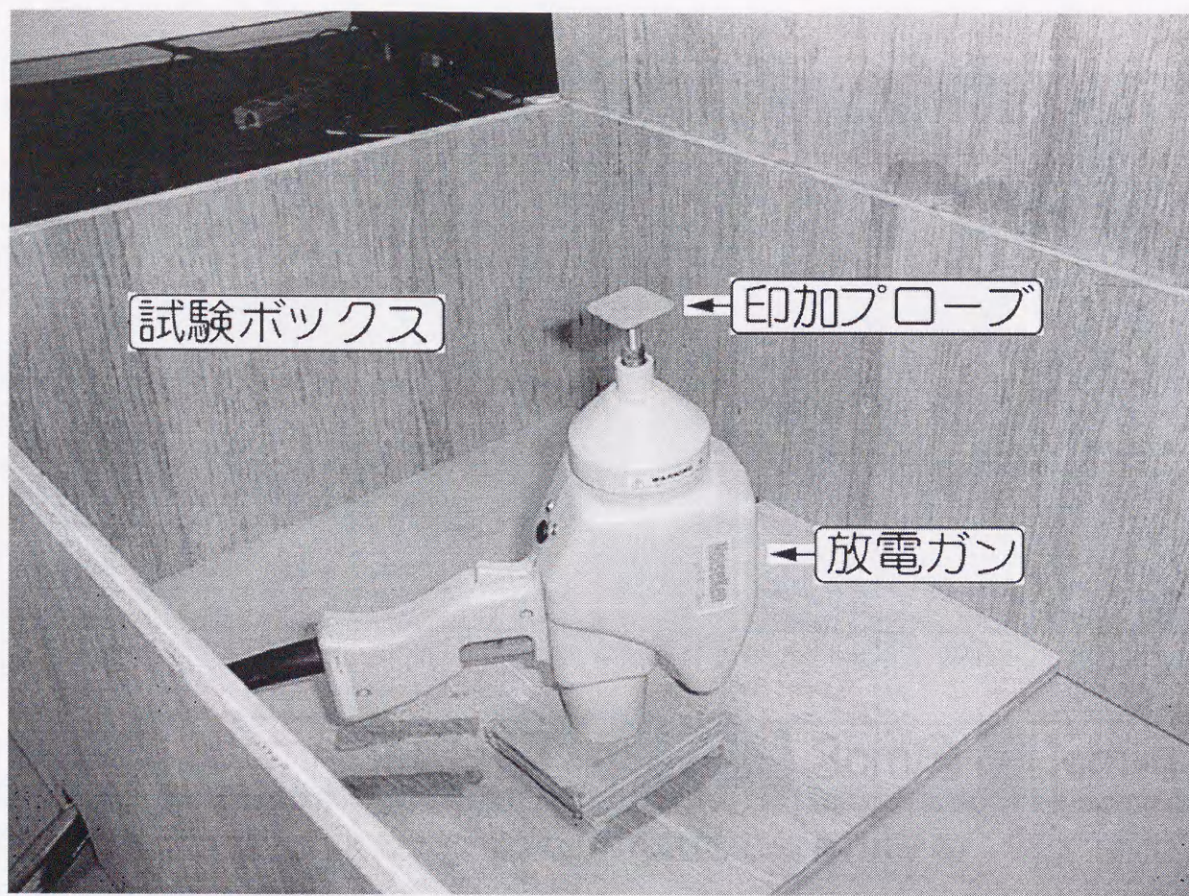


図 4-3 試験ボックス内部

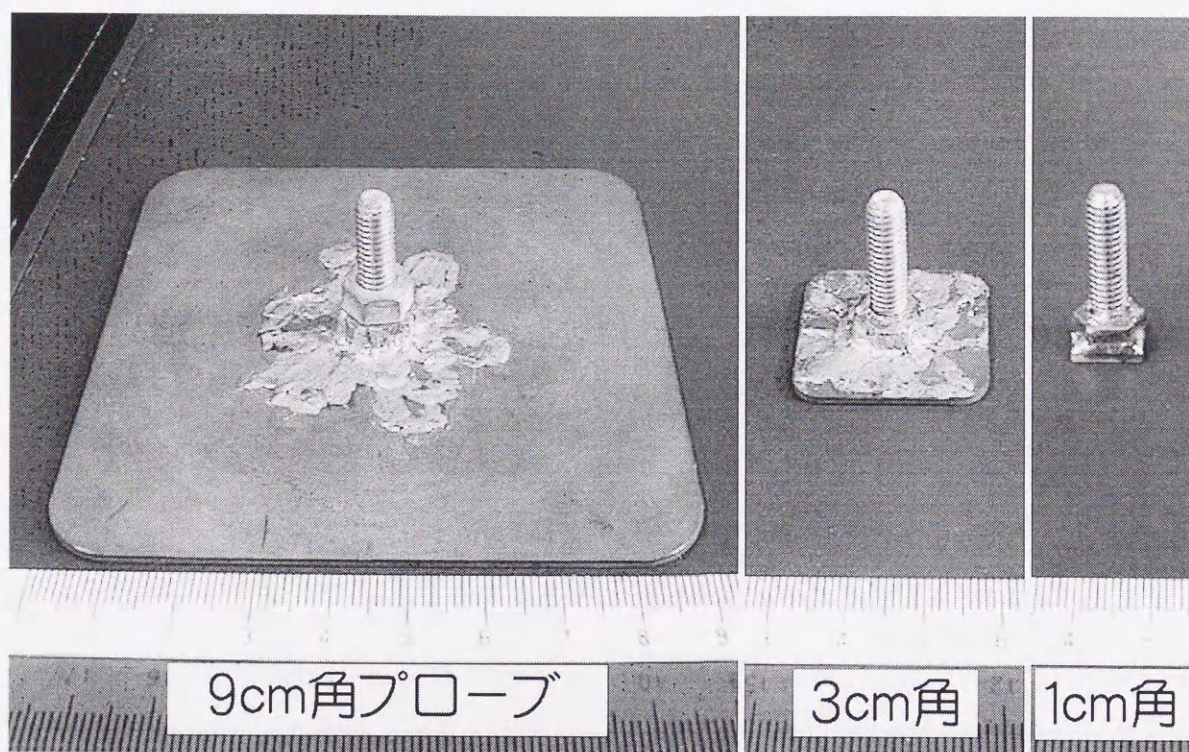


図 4-4 印加プローブ (左から 9cm 角, 3cm 角, 1cm 角)

表 4-1 誤動作解析システムの詳細仕様

(1) ノイズ源: 静電気放電試験機 (ESS200AX (株)ノイズ研究所)

- ・回路定数: C:150pF, R:330 Ω
- ・設定電圧: 0~30kV
- ・極性: +, -
- ・繰り返し周波数: 0.05~600.0s
- ・繰り返し回数: 1~60000 回

(2) 試験ボックス

- ・木製
- ・最大供試体サイズ: X:320mm, Y:240mm

(3) 印加プローブ: 9cm 角, 3cm 角, 1cm 角

- ・試験ボックス中央部 (中心座標 X:160mm, Y:120mm) に固定
-

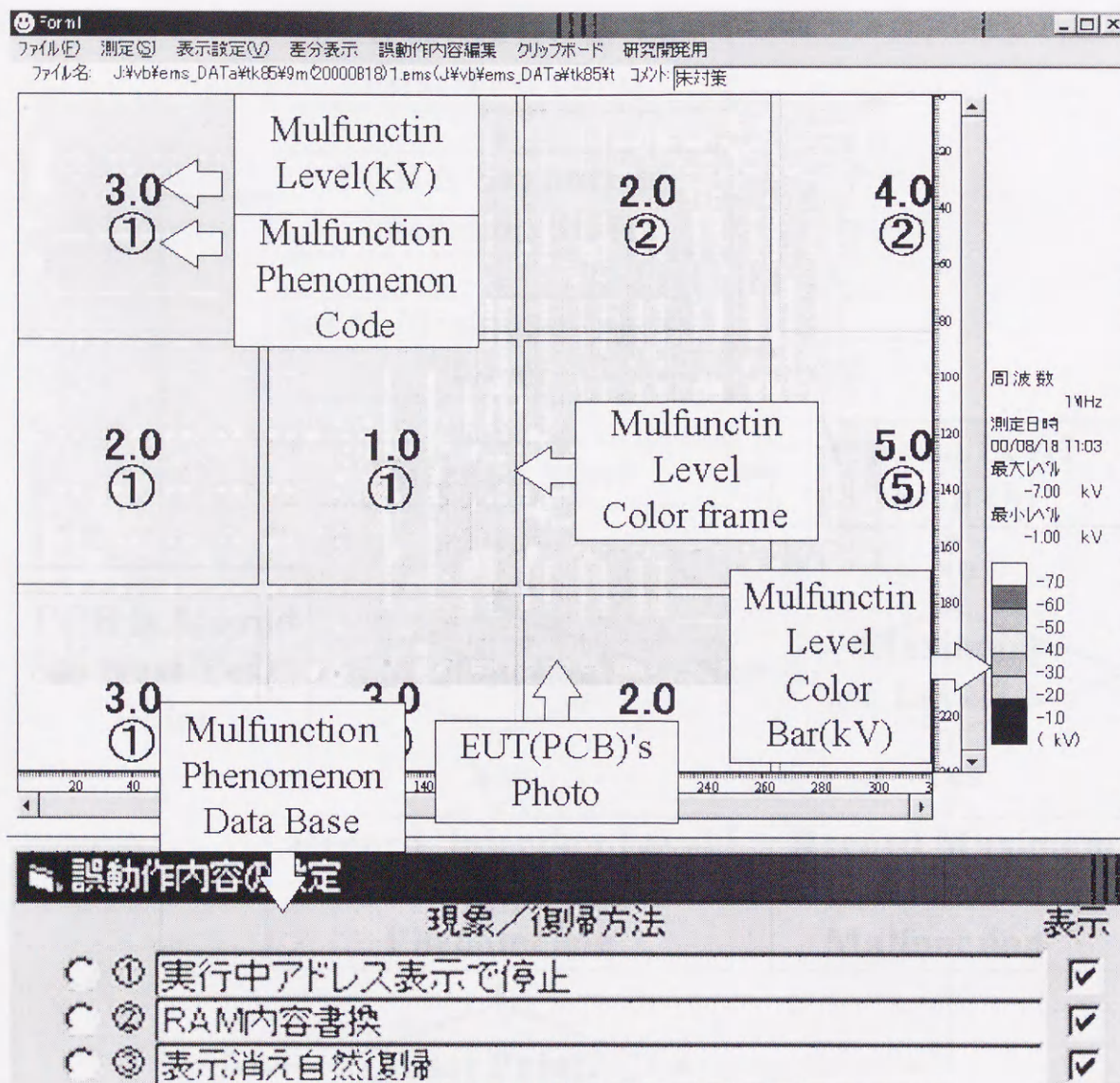


図 4-5 解析画面のレイアウト

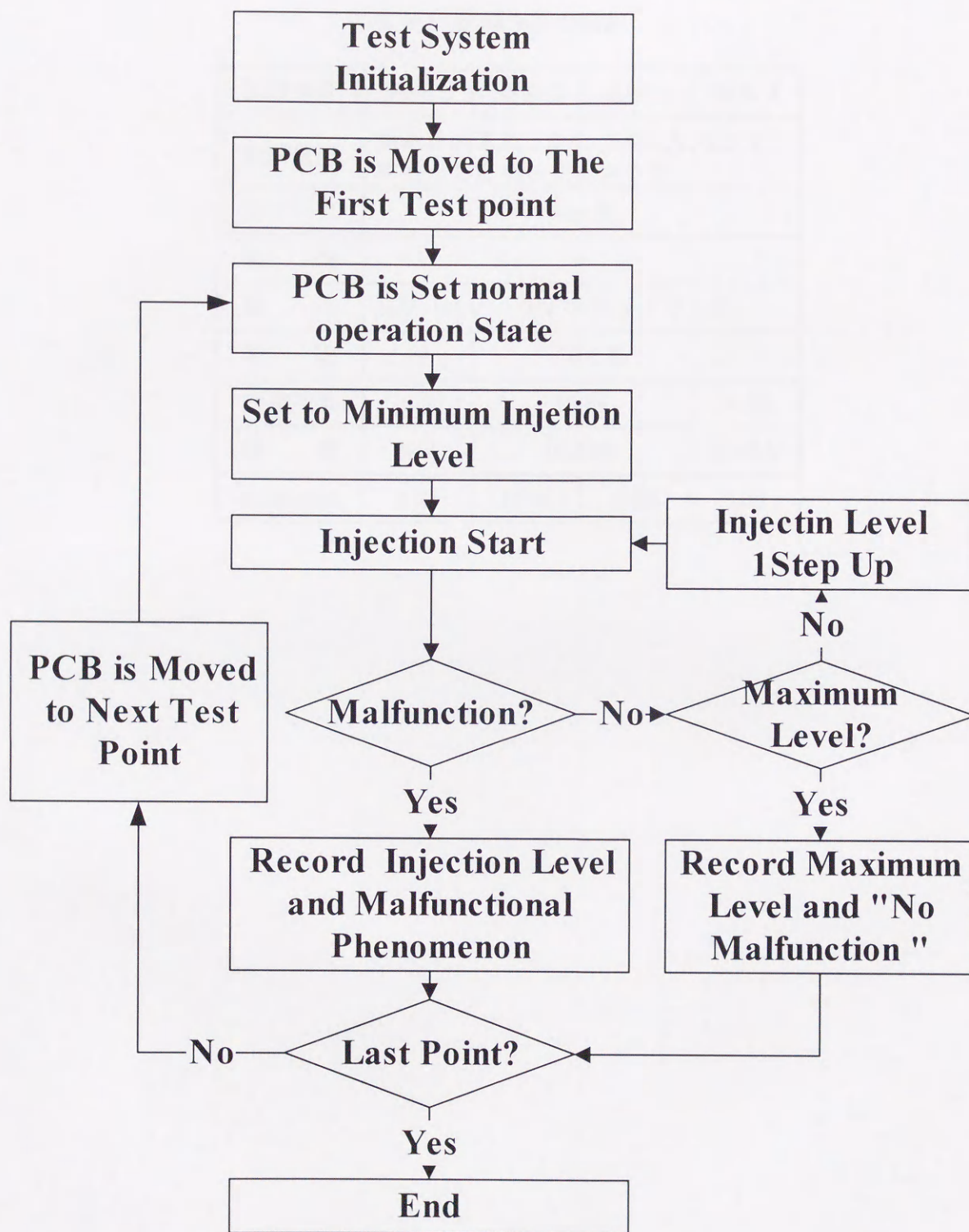


図 4-6 試験手順

表 4-2 試験条件の検討

試験条件	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
試験箇所	供試体裏面左上から X:4cm,Y:4cm を中心とした 9cm 角のエリア			
プローブ	9cm 角			
極 性	+			
電 圧	1kV~10kV 1kV ステップで上昇			
間 隔	1 秒	0.1 秒		
放電回数	10 回	10 回	50 回	
除 電	毎回	10 回毎	50 回毎	
最大繰返回数	1 回	10 回	5 回	1 回

表 4-3 試験条件の違いによる誤動作電圧 (kV)

実験No.	条件1	条件2	条件3	条件4
1	5.0 kV	3.0 kV	4.0 kV	3.0 kV
2	3.0	4.0	3.0	4.0
3	5.0	4.0	4.0	5.0
4	5.0	3.0	3.0	3.0
5	5.0	3.0	4.0	5.0
6	3.0	3.0	4.0	4.0
7	4.0	3.0	3.0	4.0
8	4.0	3.0	4.0	3.0
9	3.0	3.0	4.0	3.0
10	4.0	3.0	3.0	4.0
平均	4.1 kV	3.2 kV	3.6 kV	3.8 kV
標準偏差	0.88	0.42	0.52	0.79

第5章 実機に対する静電気放電試験と国際規格試験との相関性

5.1 緒言

第4章で構築した誤動作解析システムを用い、実際に市販されている電子機器のプリント基板に対する静電気放電試験を行い、誤動作箇所を検出するとともに、国際規格 IEC Pub.61000-4-2 との相関性について考察した。

5.2 供試体について

市販のワンボードコンピュータ 2 機種について実機試験を行った。

1 機種目は、CPU:8085A, 入力キー:16 個, 7 セグメント LED:8 個のワンボードコンピュータである[12](以後, 7 セグメント LED 表示板用制御ボードと表記)。機器の写真を図 5-1 に示す。今回の試験では, 8 個の 7 セグメント LED を左側から右方向に向けて 1 個ずつ"-(マイナス)"表示させる処理を繰り返し実行するプログラムを実行し, 「表示が消える」, 「表示が止まる」等, LED 表示の異常を目視で誤動作判定した。このボードは負論理で動作している。従って, ESD 試験機からの印加電圧は負極性とし, -1kV~8kV まで 1kV 間隔で下降させた。

2 機種目は, CPU が Z80(CMOS)のマイコン学習用ワンボードコンピュータで, ステッピングモータ制御用のサブ基板を有している[13](以後, ステッピングモータ制御用ボードと表記)。機器の写真を図 5-2 に示す。今回の試験では, ステッピングモータを回転させ, モータの停止や表示異常等で誤動作を判定した。このボードも負論理で動作しているので, ESD 試験機からの印加電圧は負極性とし, -0.5kV~5kV まで 0.5kV 間隔で下降させた。

5.3 試験手順

5.3.1 イミュニティレベルの低い箇所の系統的絞り込み

7 セグメント LED 表示板用制御ボードの場合, 最初に, 9cm 角印加プローブを用いて供試体全体を走査試験する。このとき供試体は動作させておき, 走査点において印加電圧を負電圧で順次高めて行きながら(1KV ステップとしている), 供試体が誤動作を発生するときの電圧値と誤動作現象の種類を記録する(供試体上で構成されている論理回路が負論理で動作しているため, 誤動作の発生し易い負電圧を印加した)。この結果を図 5-3 及び

表 5-1 に示す。図 5-3 ではそれぞれの走査領域(A, B, 等で表示)で誤動作が発生したときの電圧を数字 1, 2, 等で示し、符号は省略しているが負電圧で単位は KV である。丸印で囲んだ数字は誤動作現象の分類番号である。例えば、走査領域 A では印加電圧を -1KV に設定して電圧を印加したとき誤動作①の現象が発生したことを示しており、現実には-1KV 以下の印加電圧で誤動作が発生することを示している。同様に走査領域 C では、-1KV から-2KV の範囲で誤動作現象⑥が発生していることを示している。

ここでは誤動作現象①と⑥について誤動作の原因を解明することを目的として試験をすすめる。誤動作現象①については走査領域 A 及び B で最もイミュニティレベルが低い。また⑥については走査領域 C 及び D である。そこで、この 4 箇所の領域について印加プローブの大きさを 3cm 角に交換した印加プローブで各領域を 9 分割し、より詳細に試験を行う。その結果を図 5-4 に示す。

図 5-4 では、図 5-3 に示した領域 A で発生した誤動作現象①が印加電圧-1KV で領域 A を 9 分割した小領域 A-7 において発生している。同様、B-1, B-2, B-3, B-4 及び B-5 において領域 B で発生した誤動作現象①が同じ条件で発生している。領域 C 及び D についても同様のことが言える。ここで重要なことは、この二つの領域では図 5-3 において誤動作現象⑥が印加電圧-1KV から-2KV の間で発生していたが、図 5-4 に示す小領域における試験結果においても、同じ誤動作現象⑥が同一の印加電圧で発生しており(C-7, D-1 及び D-2)、誤動作現象を引き起こす供試体上の結合箇所の絞り込みが行われていることである。さらに、小領域に分割して試験を行っても、図 5-3 に示す誤動作現象発生電圧と同じ印加電圧で同じ誤動作現象が発生する小領域が必ず存在し、図 5-3 に示す誤動作現象発生電圧以下の電圧(絶対値)では図 5-4 の小領域試験でも誤動作現象が発生していないことである。また、誤動作現象⑥は B 領域の中の小領域 B-9 においても同じ印加電圧で発生しているが、この小領域の現象は B 領域全体の走査試験(図 5-3 の結果)では誤動作現象①が-1KV の印加電圧で発生していたために隠ぺいされていたものである。

この実験ではさらに印加プローブを小さくし 1cm 角印加プローブとし、図 5-4 でイミュニティレベルの低い A-7, B-1~B-5, B-9, C-7, D-1 及び D-4 について、各々の領域を 9 分割して微小領域として試験を行った。その結果を図 5-5 に示す。この場合も前述の結果と同様のことが言え、イミュニティレベルの低い箇所をさらに絞り込むことができている。ステッピングモータ制御用ボードの場合も、7 セグメント LED 表示板用制御ボードの場合と同様の手順で、絞り込みをイミュニティレベルの低い箇所の系統的絞り込みを行った。

最初に、9cm 角印加プローブを用いて供試体全体を走査試験した結果を図 5-6 及び表 5-2 に示す。走査領域 A, B, C, D のイミュニティレベルが低かった。そこで、この 4 箇所の領域について印加プローブの大きさを 3cm 角に交換した印加プローブで各領域を 9 分割し、より詳細に試験を行った。その結果を図 5-7 に示す。図 5-7 では、図 5-6 に示した領域 B で発生した誤動作現象④が印加電圧-1.0KV で領域 B を 9 分割した小領域 B-7 において発生している。同様に、C-3 では領域 C と、D-1 では領域 D と同じ条件で誤動作が発生している。さらに印加プローブを小さくし 1cm 角印加プローブとし、図 5-7 でイミュニティレベルの低い A-9, B-7, C-3, C-6, D-1, D-3 について、各々の領域を 9 分割して微小領域として試験を行った。その結果を図 5-8 に示す。この場合も前述の結果とほぼ同様のことが言え、イミュニティレベルの低い箇所をさらに絞り込むことができています。

5.3.2 誤動作原因となった配線パターンの特定

7 セグメント LED 表示板用制御ボードの場合、図 5-5 において、誤動作現象①で -1kV で誤動作した領域、誤動作現象⑥で-3kV で誤動作した領域に存在する配線パターンについて、それに接続されているデバイスの端子の役割や動作規定等をボードの仕様書 [12]で確認した。誤動作現象①については、CPU の割込用端子(RST7.5 割込)が 1 ステップモード切替用スイッチに接続されていたので、実際にスイッチを ON/OFF し、誤動作現象①と同じ現象となることを確認した。さらに、CPU の端子部分で同端子の配線を切断したり、RST7.5 割込を無視するようプログラムを修正して再試験を行い、誤動作①の現象が発生しなくなることを確認した。誤動作現象⑥については、仕様書[12]において CPU の RST6.5 , RST5.5 割込用の配線があることがわかったので、誤動作①の時と同様に、CPU の端子部分で同端子の配線を切断したり、RST6.5, RST5.5 割込を無視するようプログラムを修正して再試験を行い、誤動作⑥の現象が発生しなくなることを確認した。

以上の作業で明らかになった誤動作現象①、⑥の原因となった配線パターンを図 5-9 に示す。図 5-5 において、イミュニティレベルが最も低かった領域の形状とほぼ一致していることが確認できた。誤動作現象①の場合、配線の形状が L 字状だったため、L 字コーナー内側部分のイミュニティレベルが低くなり、配線形状がわかりにくくなることがわかった。

ステッピングモータ制御用ボードの場合、図 5-8 において、誤動作現象④で-0.4kV や -0.6kV で誤動作していた領域に存在する配線パターンについて、それに接続されている

デバイスの端子の役割や動作規定等をボードの仕様書[15]で確認した。その結果、

CPU の NMI(ノンマスクابل)割り込み用の配線が存在することが分かった。NMI 割り込み端子を VCC に直結することで機能を無効化し、再試験したところ、誤動作現象④が発生しなくなったので、同割り込みが誤動作の原因であると特定した。NMI 割り込み用配線の位置は、図 5-10 に示すように、5-8 において、イミュニティレベルが低かった領域の形状とほぼ一致していることが確認できた。

以上のことから、9cm 角印加プローブでイミュニティレベルの低い領域を荒く特定し、その中をさらに小さな面積の印加プローブで精査することによりイミュニティレベルの低い伝送路の形状や位置をより正確に特定できることを実機評価でも確認できた。

なお、7 セグメント LED 表示板用制御ボードの場合、誤動作現象①、⑥について誤動作しないようプログラムを修正した際に 9cm 角印加プローブで再試験した結果を図 5-11 に示す。誤動作現象①、⑥とも発生しなくなっており、その領域のイミュニティレベルが-4kV あるいは-6kV まで向上した。誤動作現象②については、何ら対処しなかったため、初期状態(図 5-3)の時と誤動作電圧に変化はなかった。また、9cm 角印加プローブで試験した領域 A, B, C, D について、3cm 角印加プローブで 9 分割して試験したの試験結果(図 5-4)の中で、最もイミュニティレベルが低い領域の試験結果と、イミュニティレベル、誤動作現象ともほぼ一致していることが判明した。(例えば、図 5-3 の領域 A と図 5-4 の領域 A-7)。3cm 角印加プローブの試験結果と、1cm 角印加プローブの試験結果についても同様の関係となっており、9cm 角印加プローブで大まかに試験するだけで、9cm 角範囲での最も弱いイミュニティレベルや誤動作現象を効率良く把握できることがわかった。

ステッピングモータ制御用ボードの場合で、NMI 割り込みを無効化した状態で再試験した結果を図 5-12 に示す。誤動作現象④は発生しておらず、それらの領域のイミュニティレベルは-2.5kV まで向上している。

5.4 IEC Pub.61000-4-2 準拠試験との相関性について

今回、供試体として使用したワンボードコンピュータは2機種とも、金属筐体を持っていなかったため、IEC Pub.61000-4-2 で規定された水平結合板への間接放電試験を行った。

7セグメント LED 表示板用制御ボードの場合の試験結果を表 5-3 に示す。

この結果、市販されているままの状態(以後、初期状態と表記)では-1kV で誤動作現象

①が発生した。

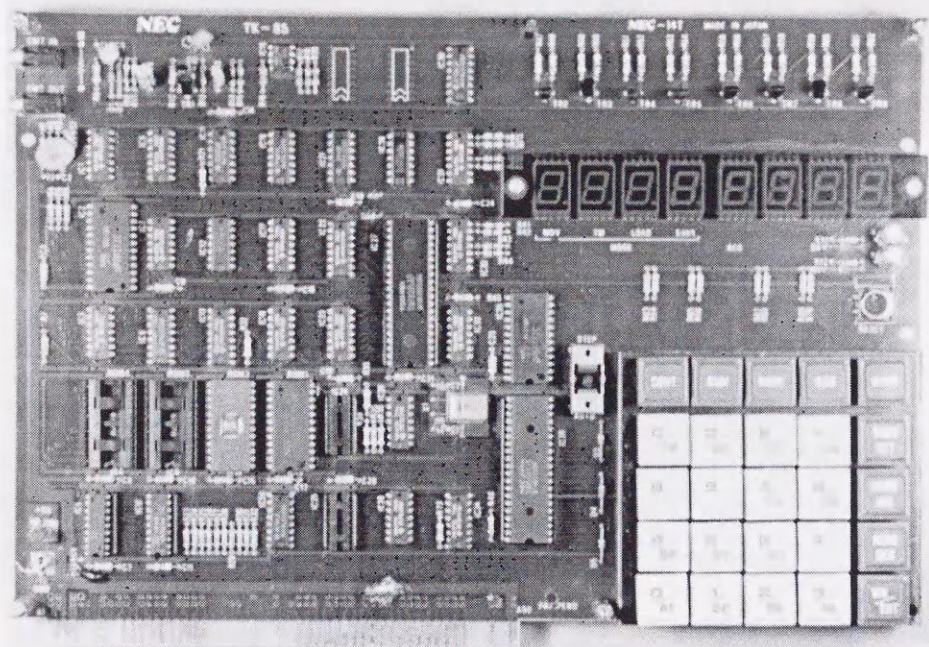
そこで、5.3.2 と同様に、全割り込み機能をソフト的に無効化して再試験したところ、-4kV までイミュニティレベルが向上した。この際、発生した誤動作現象は RAM 内容の破壊であり、5.3.2 での試験結果と同じであった。次に、RST7.5 と、RST6.5, 5.5 それぞれ単独での影響を確認するため、初期状態から RST7.5 入力だけを無効化(VCC 直結)し再試験したところ、-2kV で誤動作現象②で誤動作することを確認した。そこで、RST7.5 を無効化した状態で、RST6.5, 5.5 用配線部にシールドを施した結果、基板全体での誤動作発生電圧が-4kV まで向上し、全割り込み機能をソフト的に無効化した状態と同じ結果になることを確認した。

ステッピングモータ制御用ボードの場合の試験結果を表 5-4 に示す。この機器の場合も、NMI 割り込みが誤動作の原因となっており、-0.5kV で誤動作することが分かった。

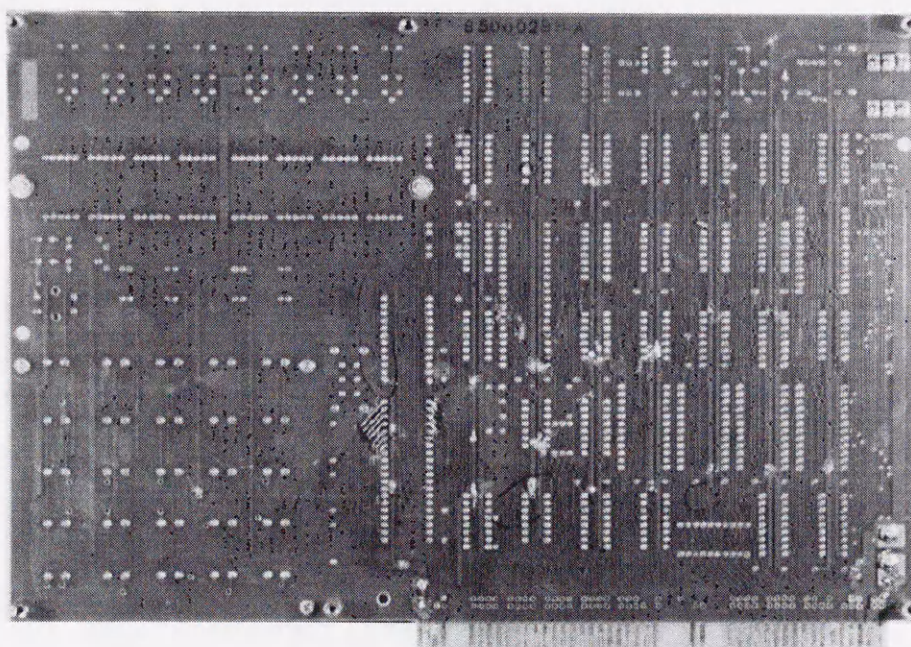
これらのことから、今回開発したシステムでの試験結果は、キャビネットに入らないワンボードコンピュータという限られた条件については、IEC Pub.61000-4-2 規格準拠の試験結果と相関性があることが実験的に確認された。

5.5 結言

実機評価においては、9cm 角印加プローブでイミュニティレベルの低い領域を荒く特定し、その領域を、より小さな印加プローブで再試験していくことで、供試体上に存在する複数の誤動作現象について、電磁波の侵入した配線パターンを検出することができた。また、検出された誤動作箇所(誤動作を発生させる外部電磁波と結合を起こした箇所)は、IEC Pub.61000-4-2 に準拠した水平結合板への間接放電試験とも相関性があることを明らかにした。

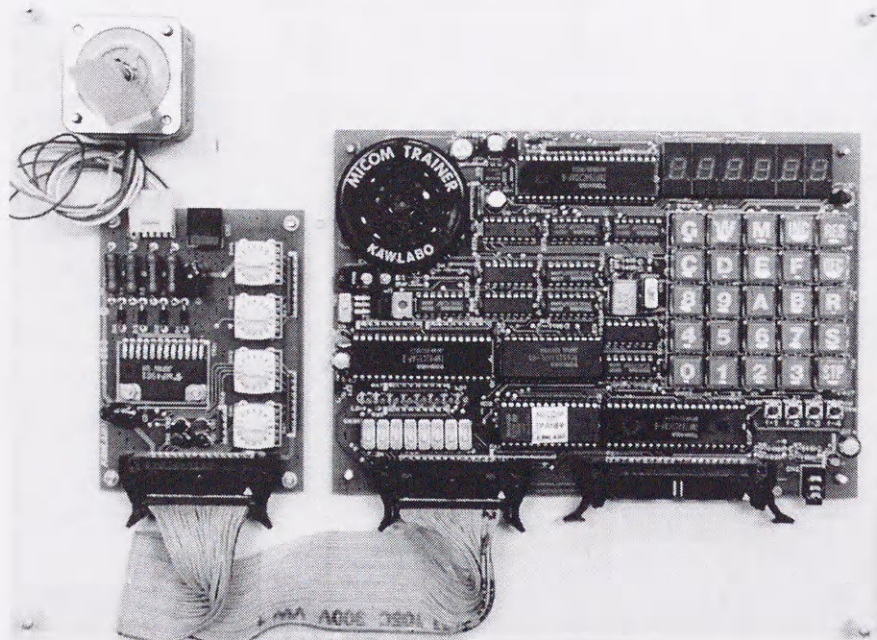


表面

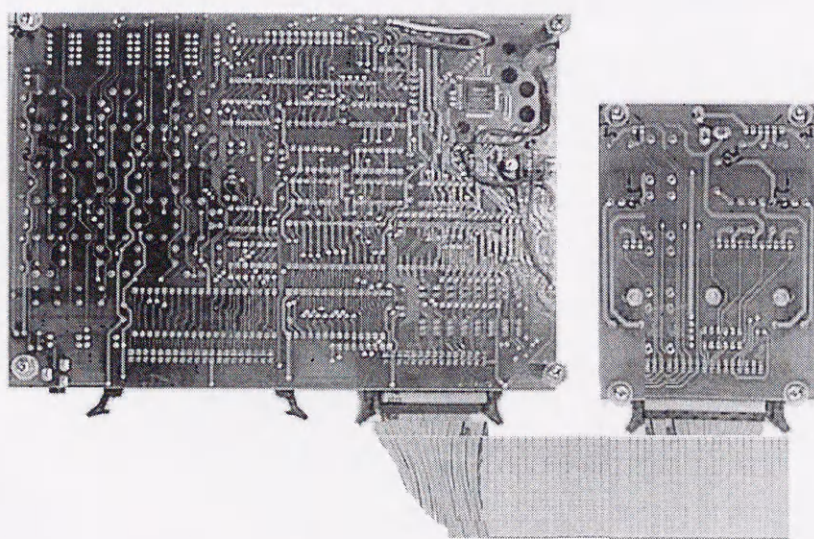


裏面

図 5-1 7セグメント LED 表示板用制御ボード



表面



裏面

図 5-2 ステッピングモータ制御用ボード

3.0 ①	Area A 1.0 ①	2.0 ②	4.0 ②
2.0 ①	B 1.0 ①	C 2.0 ⑥	5.0 ⑤
3.0 ①	3.0 ①	D 2.0 ⑥	7.0 ①

9x9cm

↑ EUT (PCB)

図 5-3 イミュニティレベル分布 (9cm 角印加プローブ)

表 5-1 誤動作現象

識別 コード	誤動作現象	印加 電圧
①	実行中のアドレス表示で停止→[RUN]キーで復帰	-1kV
②	RAM 内容破壊→プログラム再入力し、再実行で復帰	-2kV
③	表示が消え、しばらくすると自然復帰	-3kV
④	リセット状態で停止→再実行で復帰	-4kV
⑤	"0"表示で停止→[RESET]キー，再実行で復帰	-3kV
⑥	"-"表示で停止→[RESET]キー，再実行で復帰	-2kV

(※再実行:プログラム先頭アドレス入力し[RUN]キー押す)

	Area A			
Area A-7→	1.0 ①	B-2 ↓	B-3 ↓	
B-1→	1.0 ①	1.0 ①	1.0 ①	
B-4→	1.0 ①	1.0 ①	←B-5	
	B-9→		2.0 ⑥	2.0 ⑥ ←C-7
				2.0 ⑥ ←D-1
	↑ EUT (PCB)			2.0 ⑥ ←D-4
				↑ 3x3cm

図 5-4 イミュニティレベル分布(3cm 角印加プローブ)

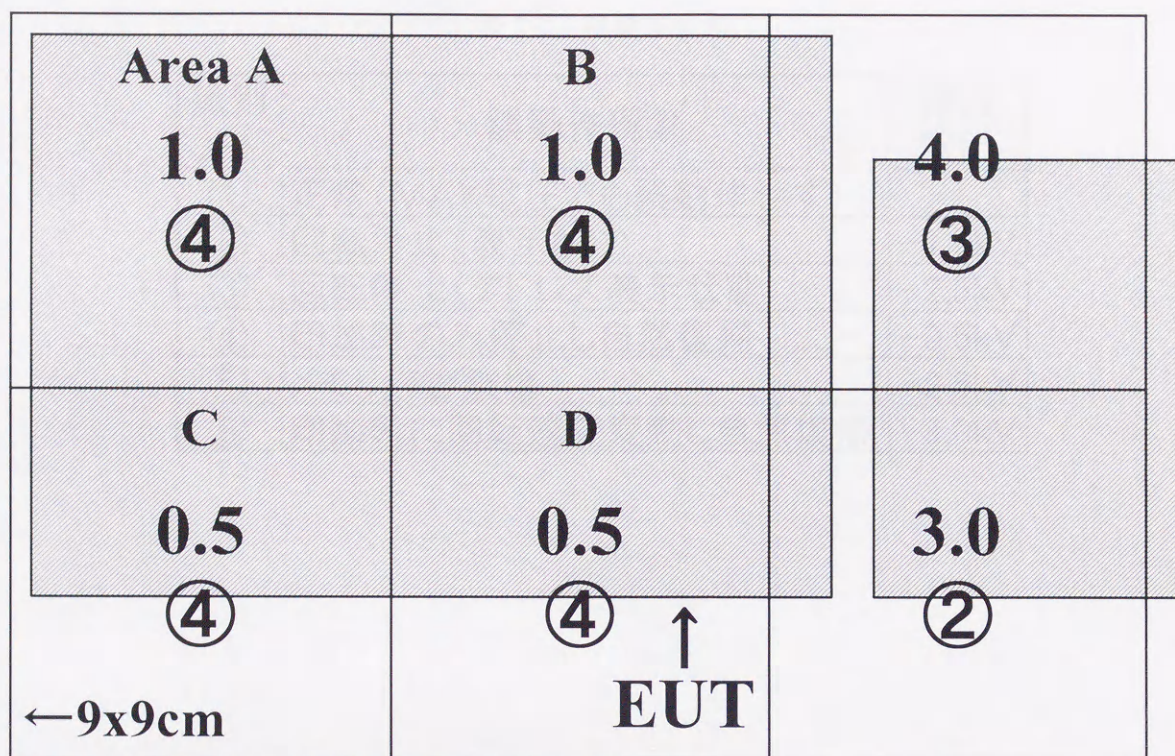


図 5-6 イミュニティレベル分布(9cm 角印加プローブ)

表 5-2 誤動作現象

識別 コード	誤動作現象	印加 電圧
①	正常 (MAX電圧でも誤動作せず)	
②	回転停止 (表示なし)	-1.5kV
③	回転停止 (アドレス表示状態)	-2.5kV
④	印加時のみ停止し自然復帰	-0.5kV
⑤	メモリ内容破壊	-2.5kV
⑥	印加時に回転速度変動し自然復帰	-3.0kV

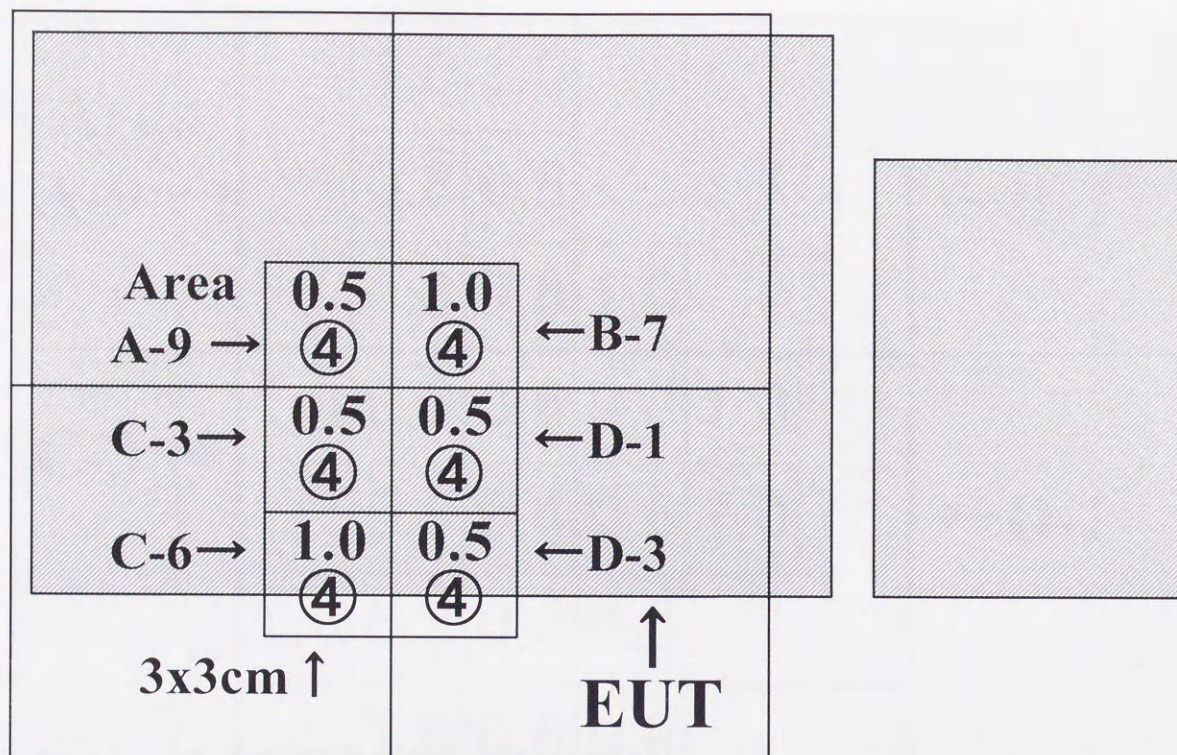


図 5-7 イミューニティレベル分布 (3cm 角印加プローブ)

Area A-9 →		1.0	1.0				← B-7	
		0.8	0.6					
		0.8	0.6	1.0				
C-3 →	1.0	0.6	0.6	0.8	1.0	← D-1		
		0.6	0.4	0.6	1.0			
	1.0	0.8	0.6	0.6				
C-6 →		1.0	0.6	0.8			← D-3	
		1.0	0.8	1.0				
	1x1cm ↑			↑ EUT				

図 5-8 イミューンティレベル分布(1cm 角印加プローブ)

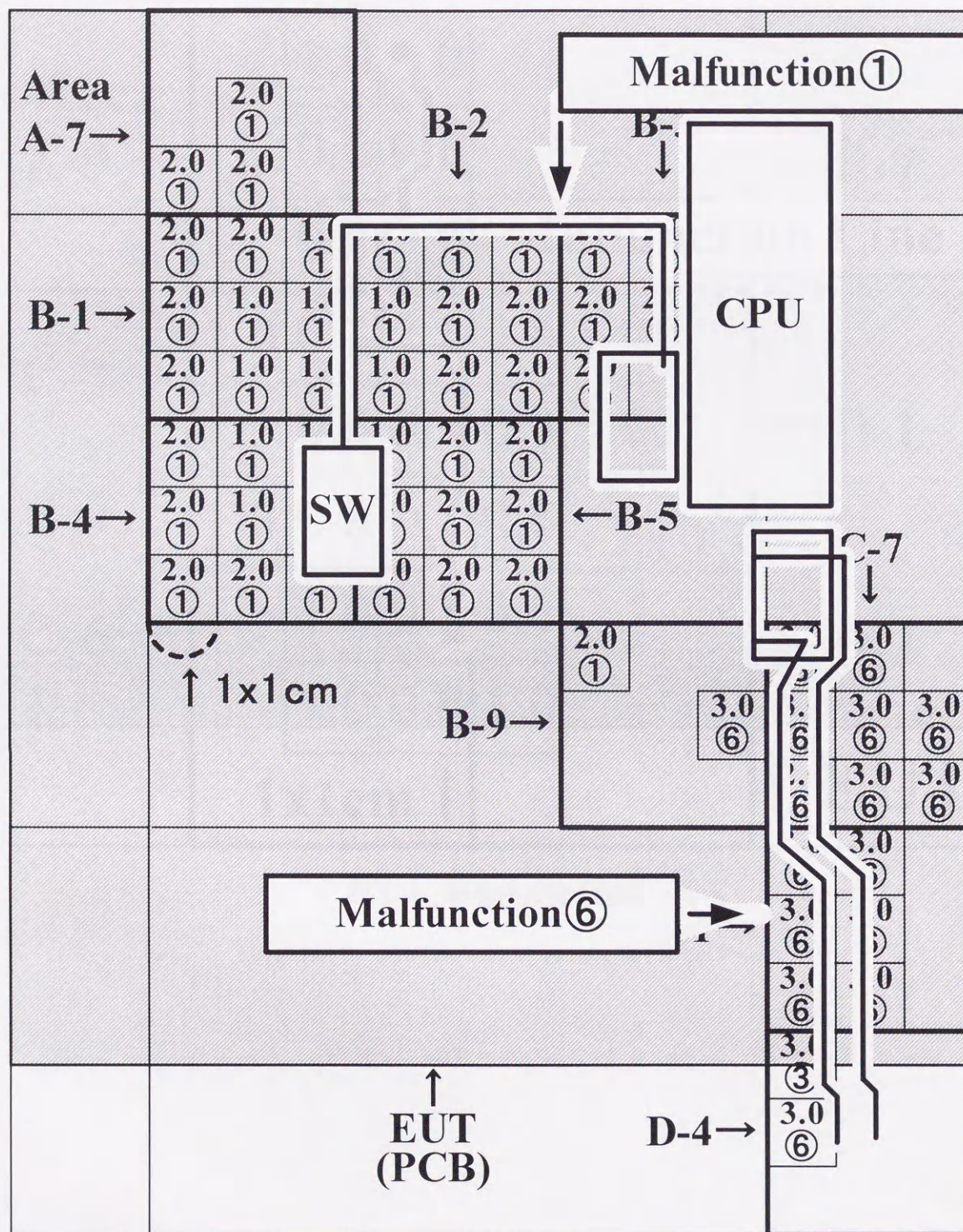


図 5-9 誤動作原因の配線

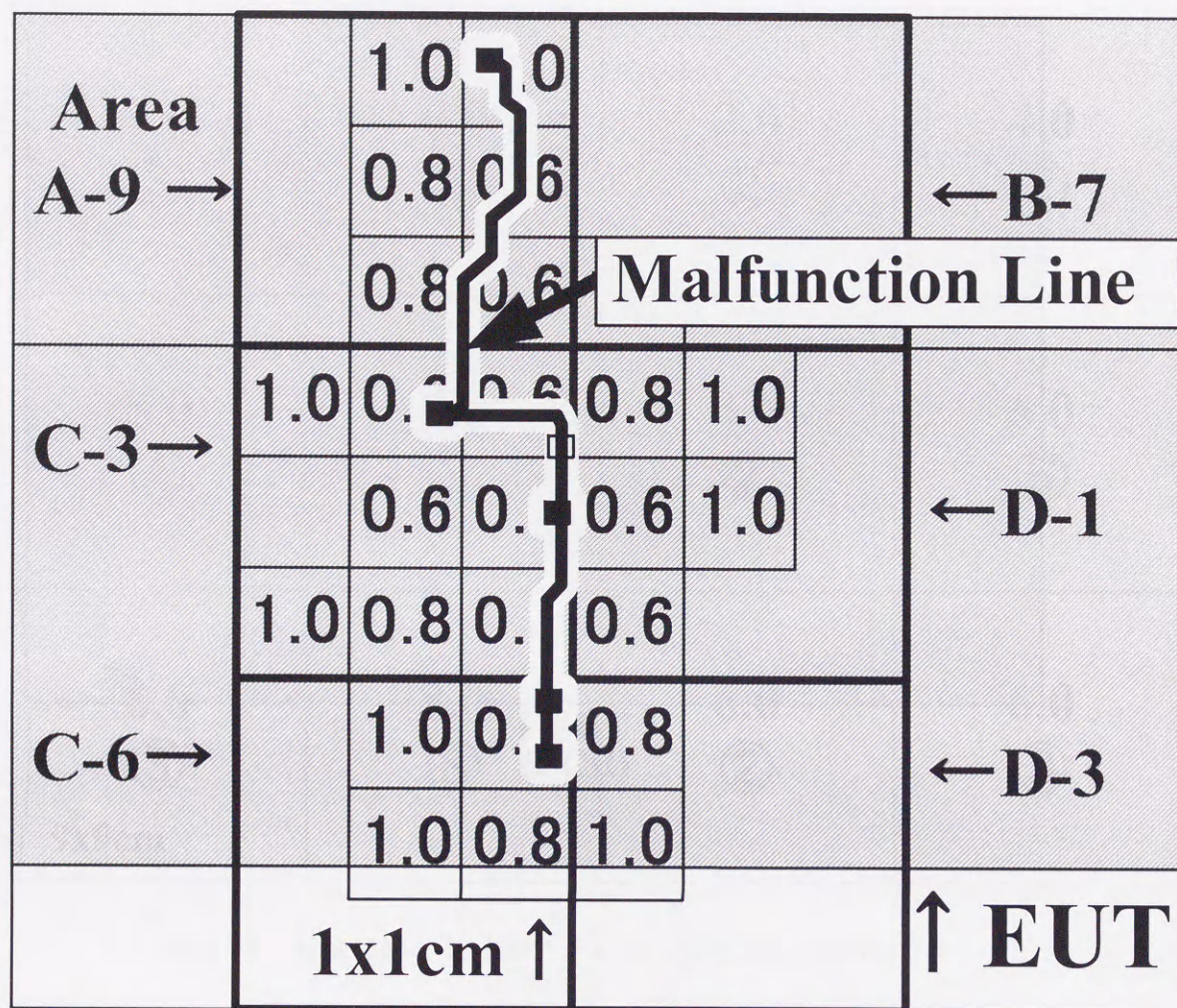


図 5-10 誤動作原因の配線

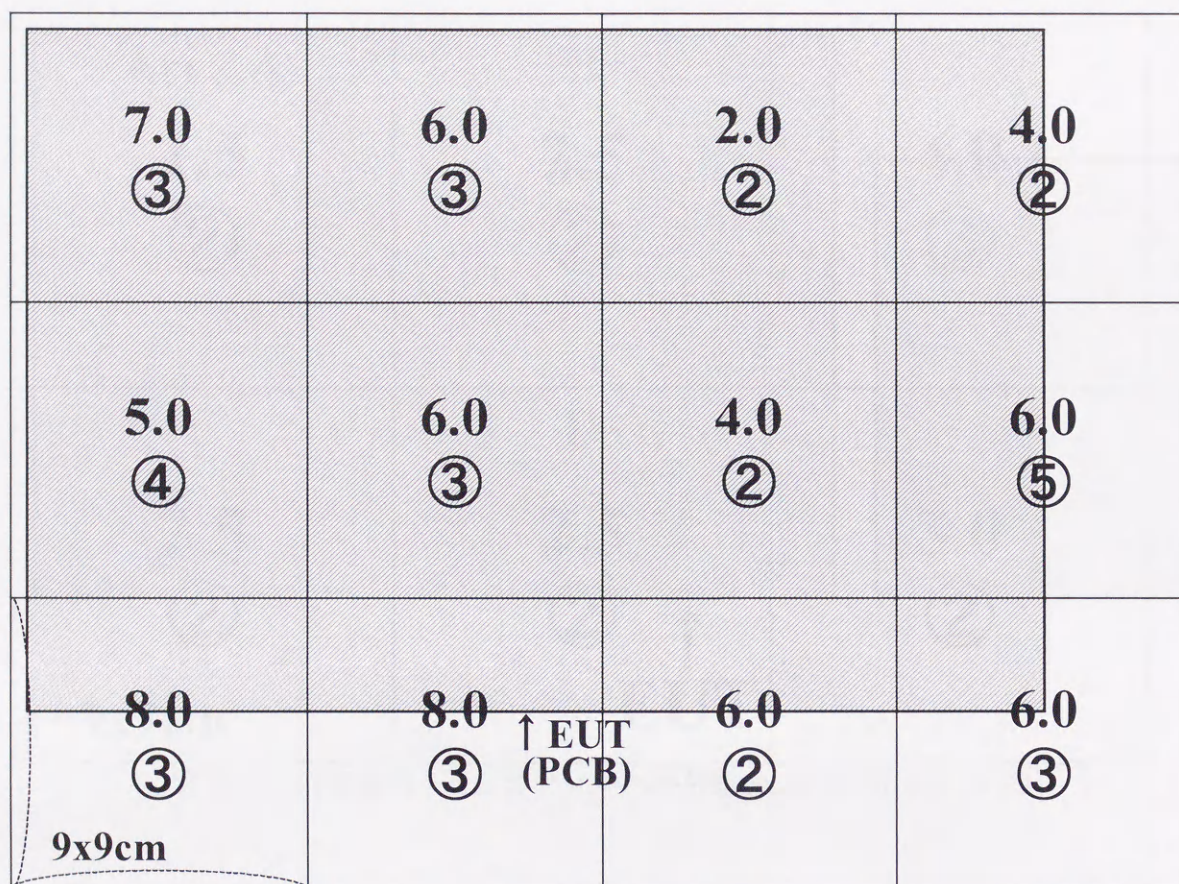


図 5-11 対策後のイミュニティレベル分布 (9cm 角印加プローブ)

Area A 1.5 ②	B 2.5 ②		4.0 ③
C 2.5 ②	D 2.5 ②	↑ EUT	3.0 ②
←9x9cm			

図 5-12 対策後のイミュニティレベル分布(9cm 角印加プローブ)

表 5-3 IEC Pub.61000-4-2 準拠試験での試験結果

実施内容		誤動作現象	印加 電圧
A	初期状態	実行中のアドレス表示で 停止→[RUN]キーで復帰	-1kV
B	状態 A から全割 込処理をソフト 的に無効化	RAM 内容破壊→プログ ラムを再入力し，再実行 で復帰	-4kV
C	状態 A から RST7.5 入力を無 効化(VCC 直結)	"-"表示で停止→[RESET] キー，再実行で復帰	-2kV
D	状態 C から RST6.5, 5.5 用 配線部をシールド	RAM 内容破壊→プログ ラム再入力し，再実行で 復帰	-4kV

(※再実行:プログラム先頭アドレス入力し[RUN]キー押す)

表 5-4 IEC Pub.61000-4-2 準拠試験での試験結果

状態	実施内容	誤動作現象	印加電圧
A	初期状態	印加時のみ停止し自然復帰	-0.5kV
B	NMI割込を無効化	メモリ内容破壊	-4.0kV

第6章 総括的結論

本論文は、この誤動作解析システムについて、実際に実現可能であるか確認するため、任意の領域に局所的な電磁波を均一に印加できるかの検討、供試体であるプリント基板近傍の金属物などの影響を検討するとともに、実際に誤動作解析システムを試作し、再現性の高い試験条件を検討するとともに、市販されている供試体を用いて、その有用性を確認したことについてまとめたものである。

静電気放電に対する誤動作解析システムを、新しい測定手法に基づいて構築し、その有用性をモデルシステムで確認すると同時に、実機に対しても適用を試み、システムの有用性を確認した。なお、同じ実機に対し、国際規格に基づく静電気放電試験結果と比較することで、イミュニティ解析結果には相関があることも確認できた。

第1章では、不要電磁波電子機器の誤動作問題の歴史的経緯や、誤動作問題に関する法規制化の動向、誤動作解析に関する研究の経緯を述べると同時に、今回、考案した解析手法について解説し、本研究の意義や、背景及び目的について述べた。

第2章は、局所的な電磁波を加えるために試作した各種印加プローブについて、プローブ全面から印加される電磁界分布の均一性について様々な周波数を用いて評価した。その結果、9cm 角印加プローブで 20MHz~300MHz、3cm 角と 1cm 角印加プローブでは 20MHz~500MHz において、印加プローブと対向する部分のほぼ全面が均一な電磁界(最大レベル-3dB 以内)となり、印加プローブの正面からはずれた部分では、急速にレベルが下がっていることがわかった。

それ以上の周波数については、分布の偏りが発生しており原因を検討する必要があるが、少なくとも 20MHz~300MHz 程度の範囲については、印加プローブを当てた範囲だけに強い電磁波が均一に放射されることが確認できた。

また、マイクロストリップ線路の位置が印加プローブの設置範囲内に存在している場合は、結合が強く(低い印加電圧で高い誘起電圧が発生)、印加プローブの位置が少しでも外れると、急速に結合が弱くなることを実験的に確認した。これらの事から、印加プローブのサイズが、そのまま伝送路の位置を示す分解能となり、印加プローブのサイズを段階的に小さくすることで、伝送路の位置を効率的に絞り込めることを明らかにした。

第3章は、供試体であるプリント基板の条件として、信号ラインとアース面の構成条件の差異による結合状態を調べた。マイクロストリップ線路を供試体とし、線路を横切る直

線上で、片方は全面アース有り、もう片方は無しの状態での結合状態を調べた。静電気試験器を発生源とし、線路の誘起電圧を調べた結果、印加プローブのどこか一部がマイクロストリップ線路と重なり合っている際の結合状況はほぼ同レベルであった。

また、全面アース有りの場合、マイクロストリップ線路から離れると急速に結合状況が悪化するが、全面アース無しの場合は前者より結合状況の悪化が緩やかとなることが分かった。

第4章では、静電気放電試験機を電磁波源とする誤動作解析システムを構築し、その等価回路及び、試験手順や、試験条件等、その性能について検討した。

第5章は、第4章で構築した誤動作解析システムを用いて、実機プリント基板に対する静電気放電試験と、国際規格との相関性について考察した。市販のワンボードコンピュータ2機種について、プリント基板上に存在するイミュニティレベルの異なる複数の誤動作現象について、それぞれ電磁波の侵入する配線パターンの形状を視覚化し、実際に誤動作しているデバイスの端子を特定することができることを明らかにした。また、検出された誤動作箇所は、IEC61000-4-2に準拠した水平結合板への間接放電試験とも相関性があることを明らかにした。

以上の結果から、本研究で開発評価した誤動作箇所検出システムは、これまで開発担当者の勘や経験に頼っていたプリント基板の電磁波に対する感受性の強弱を、再現性良く客観的データとして解析できる事を明らかにし、効率的な誤動作対策が可能となるとともに、より電磁波に強い製品開発に必要な要素技術の研究など幅広い分野へ利用される可能性が高いと思われる。

最後に今後の課題として下記のことが考えられる。

- (1) 各印加プローブから発生している電磁波の電圧波形の違いによる、プリント基板への影響の違いや、複数の配線パターンが隣接したり、交差していることが試験結果に結合状況に及ぼす影響などについて検討する。
- (2) 電子機器の動作周波数は急速な勢いで高周波化しつつあり、一般的なパソコン等で使用されるCPUも既に1GHz以上の動作周波数となっている。また、携帯電話やPDA等のモバイル機器と呼ばれている装置などの小型軽量化も年々進んでおり、プリント基板の配線も細密化される一方である。このような電子デバイスの高周波化や配線の細密化に対応するため、印加領域の細密化や、印加電磁波の高周波化等について検討する。
- (3) 印加プローブを用いて局所的な電磁波を印加する方式の場合、隣接する複数の配線等

への影響もあるため、イミュニティレベルの低い領域の中から、どの配線が誤動作の原因となっているかを特定するには、更に、回路設計図や動作仕様書などの情報も必要とする場合が多いと思われる。そこで、現在の印加方式で、誤動作原因候補の配線を数本まで絞り込んだのち、それらの配線1本1本に直接、微弱電磁波を接触印加させることで誤動作原因となっている配線を特定する方法を検討する。

(4) 誤動作判定の自動化技術、被供試体を正常動作状態へ自動復帰させる方法等の検討。

文献

- [1] "エレクトロニクスライフ", "日本放送出版協会, pp27-74, Nov.1993.
- [2] "IEC1000 シリーズ(1994 年版)", "(社)関西電子工業振興センター, 1994.
- [3] 半杭英二, 原田高志, "プリント基板のイミュニティ評価装置の検討", "1994 信学春季全大, SB-3-2, 1994.
- [4] 半杭英二, 原田高志, "磁界印加形プリント基板用イミュニティ評価装置", "信学技報, EMCJ94-17, pp.65-72, Jun.1994.
- [5] 大竹登志男, 富山勝己, "ノイズ印加誘導装置によるプリント基板のノイズ耐量評価法", "信学技報, EMCJ98-102, pp.49-54, Jan.1999.
- [6] 尾前宏, 長澤庸二, "静電気放電試験機によるプリント基板の誤動作箇所検出法", "信学技報, EMCJ96-48, pp.1-6, Dec.1996
- [7] 尾前宏, 長澤庸二, "回路実装プリント基板の誤動作箇所検出法及び検出装置(特開平10-319071)", "1998.
- [8] 尾前宏, 伊藤博雅, 石田武志, 江口次雄, 長澤庸二, "ノイズ印加用プローブの供試体への印加電磁界特性評価実験", "信学技報, EMCJ98-57, pp.53-60, Oct.1998.
- [9] 石田武志, 江口次雄, 尾前宏, 伊藤博雅, 長澤庸二, "電子機器の誤動作発生箇所推定システムの実用化について", "信学技報, EMCJ98-58, pp.61-66, Oct.1998.
- [10] H.Oonomae, H.Ito, T.Ishida, T.Eguchi and Y.Nagasawa, "Electromagnetic Field Characteristics of Injection Probes, " Proc.1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility in Tokyo, Japan, 18P212, pp.55-58, May. 1999.
- [11] 岡安良一, 阿倍努, 高木国主男, 雨宮不二雄, "卓上型通信機器の回路基板実装方向による静電気イミュニティ特性", "信学技報, EMCJ91-62, pp.31-37.1991.
- [12] "TK-85 トレーニングブック", 日本電気株式会社, 1980.
- [13] "ノイズ対策用語辞典", 日刊工業新聞社, 1996
- [14] 長野洋一, "はじめて学ぶノイズ対策", 工業調査会, 1995
- [15] "マイコントレーナユーザーズマニュアル", (株)河内研究所, 1996.

本学位論文に関連する発表論文

- (1) 全著者名 尾前 宏, 長澤 庸二

論文題目 「電子機器用プリント基板の誤動作箇所検出システムの開発」

電子情報通信学会論文誌B ((採録決定:平成 13 年 1 月 29 日)) (第 2 章, 第 5 章)

- (2) 全著者名 H.ONOMAE, H.ITO, T.ISHIDA, T.EGUCHI and Y.NAGASAWA

論文題目 「Electromagnetic Field Characteristics of Injection Probes」 1999 年 5 月

1999 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC

COMPATIBILITY IN TOKYO, JAPAN, 18P212, pp.55-58.(第 2 章)

本学位論文に関連するその他の論文等

- (1) 全著者名 尾前宏, 長澤庸二

論文題目 「静電気放電試験機によるプリント基板の誤動作箇所検出法」

1996 年 12 月 電子情報通信学会技術報告, EMCJ96-48, pp. 1-6 (第 4 章, 第 5 章)

- (2) 全著者名 尾前宏, 長澤庸二

論文題目 「回路実装プリント基板の誤動作箇所検出法及び検出装置」

1997 年 5 月 特開平 10-319071 (第 1 章, 第 4 章)

- (3) 全著者名 尾前宏, 伊藤博雅, 石田武志, 江口次雄, 長澤庸二

論文題目 「ノイズ印加用プローブの供試体への印加電磁界特性評価実験」

1998 年 10 月 電子情報通信学会技術報告, EMCJ98-57, pp. 53-60. (第 2 章)

- (4) 全著者名 石田武志, 江口次雄, 尾前宏, 伊藤博雅, 長澤庸二

論文題目 「電子機器の誤動作発生箇所推定システムの実用化について」

1998 年 10 月 電子情報通信学会技術報告, EMCJ98-58, pp. 61-66. (第 2 章)

- (5) 全著者名 石田 武志, 江口 次雄, 尾前 宏, 伊藤 博雅, 長澤 庸二

論文題目 「電子機器の誤動作発生箇所推定システムの実用化について」

1999 年 8 月 電磁環境工学情報 EMC, No136, pp. 52-63. ミマツデータ

システム (第 4 章)

参考論文等

(1)全著者名 尾前 宏

論文題目 「電子機器のノイズ対策技術に関する研究-プリント基板ノイズ
解析システムの開発-」

1992 年 11 月 鹿児島県工業技術センター研究報告 第 5 号, pp.83-88.

(2)全著者名 尾前 宏

論文題目 「電子機器における電磁ノイズ発生源解析技術の研究」

1994 年 11 月 鹿児島県工業技術センター研究報告 第 7 号, pp.43-48.

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、終始変わらぬ御指導、御助言を賜りました鹿児島大学工学部 長澤庸二教授に深く感謝の意を表します。

本論文の作成に当たって、この研究の端緒以来、数多くの有益な御教示、御助言を賜りました鹿児島大学工学部 広岡繁教授、湯ノ口万友教授に心から御礼申し上げます。

本研究を遂行するに当たり、終始激励と多くの適切な御助言をいただきました熊本大学 廣末英晴教授、鹿児島県工業技術センター 清藤純一所長、水元弘二副所長、伊藤博雅電子部長、神野好考化学部長に感謝の意を表します。

本研究の実験に協力していただいた㈱ノイズ研究所の江口次雄氏、石田武志氏に厚く御礼申し上げます。

鹿児島県工業技術センターの仮屋一昭主任研究員、久保敦主任研究員、上菌剛研究員をはじめとする職員の方々にもあらゆる面で御協力、御助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

