

WBFC法によるイミュニティ試験の最適条件に関する検討

香川直己

Study on the optimum conditions of immunity test by the WBFC method

Naoki KAGAWA

ABSTRACT

Shape, arrangement, scale of the test substrate and the number of impressed points of the common mode noise are examined for the optimum conditions of the immunity test by the workbench faraday cage, WBFC, method. According to analytical and measurement results of the input impedance to the WBFC and the characteristic impedance on the transmission line, the scale installed on all sides 20mm is the best for the test object. When the number of common mode points is increased, the impedance matching is able to be aimed at, and if it is 100mmx100mm substrate, it became a result that the case to assume the number of common modes in which the terminal is assumed to be 3 pieces is excellent. On the other hand, in case of 100mmx100mm substrate, the surface current of the substrate is homogeneous when the number of common mode points is two.

キーワード: EMC, WBFC法, コモンモード, イミュニティ, 集積回路

Keywords: EMC, WBFC method, common mode, immunity, integrated circuits

1. まえがき

我々を取り巻く現在の生活環境は携帯電話やモバイル機器の普及による電磁波環境の混沌があり、なおかつ、自動車に代表されるように、精密な制御を掌る電子回路を物理的、電磁的に劣悪な環境で使用することを要求している。即ち、電磁波干渉 (EMI: Electromagnetic Interference) は身近な問題であり、そのために電子機器が電磁波の影響で予期せぬ動きをし、我々が不利益を被ることを事前に防ぐための「電磁環境との共存」即ち EMC (Electromagnetic compatibility) に関する知見を得ることは、電子・電気機器の開発技術に不可欠になっている。

EMCは放射 (emission) と耐性 (immunity) に分けることができる。EMI が注目され始めてから現在までは主に電磁波の発生を抑圧する前者の研究が主流であったが、近年、後者への関心が高まりつつある。電磁波雑音に関する耐性試験法においても現行では、大型電波暗室を用いた大規模な手法が施行されているが、試験期間の短縮やコストの低減のため、いくつかの簡便な試験法が提案されており、IEC (International Electro-technical Commission) で規格化が進められている¹⁾。

これらの試験法の一つとして、周波数 1 GHz までの集積回路のコモンモード雑音耐性の試験法として WBFC (Workbench Faraday Cage) 法がある¹⁾。この試験法は、WBFC と呼ばれる金属筐体を利用して試験対象にコモンモード電圧あるいは電流を加えそれに対する回路、あるいは素子の感受性を評価するものである。

測定対象は WBFC 内に設置され、これを特殊なワイヤケーブルで摘み、これを介して外部から電氣的擾乱を与える²⁾。測定対象を摘む点を「コモンモードポイント」と呼ぶ。

本研究では、この WBFC を用いた電磁波雑音耐性試験法が電波暗室に相当するためには「どのような電氣的擾乱を与えると公正かつ効果的に試験が行えるか？」を検討している。具体的には、試験結果に対する

- (1) 被測定基板の形状 (配置) および規模の影響。
 - (2) コモンモードポイントの位置と数の影響。
- である。

本稿では、これらの項目を明らかにするために、実験用プリント基板を用い、その表面電流を実測と計算機シミュレーションを用いて検討したので、その結果について報告する。

2. WBFC (Workbench Faraday Cage) 法の概要

図1はWBFC法における試験対象に対するコモンモード雑音の印加の概念図である。この図が示すように、外部に存在する雑音源からの電磁波が試験対象に容量的、あるいは誘導的に結合する構造となっている。回路基板(PCB)、ICなどの被試験対象内にある雑音源より生じるディファレンシャルモード雑音と異なり、コモンモード雑音は試験対象外にある電磁波放射源に端を発し、基板と外部導体からなる線路を介して伝播する不要電磁波である。これは一般的に形成されやすい電磁波環境といえ、WBFC法はこの環境を模擬する試験法である。図2に示すように、金属筐体と被試験基板で構成された線路に外部雑音源と終端を設け、被測定基板に一樣な電磁波雑音、即ち、コモンモード雑音を印加する構造となっている。なお、試験対象は試験電磁波に対して集中定数回路として振舞う必要があるため、試験対象の規模あるいは、試験周波数帯域が制限される。IECにおける規格作業においては、本試験法は1GHzまでの雑音耐性を調べることを目的としているため、試験対象の大きさは一辺100mm程度の規模が限界と考えられている。

本研究では厚さ1mmの鉄板の電気溶接で側面と底面を形成し、厚さ5mmの鉄板を天蓋としたWBFCを製作し、これを用いている。図3は自作WBFCの俯瞰図である。寸法は500mm x 350mm x 150mmであり、蓋の裏面と内側面には印加電磁波の不要反射を抑えるために電波吸収シートを貼っている。

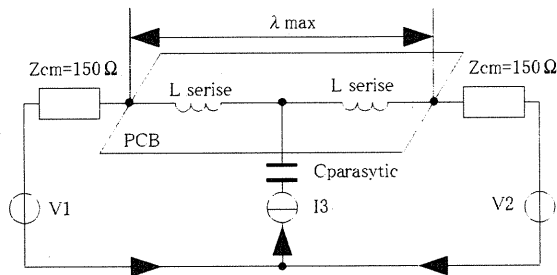


図1 WBFCにおけるコモンモード雑音の結合
Fig.1 Coupling mechanism of common mode noise.

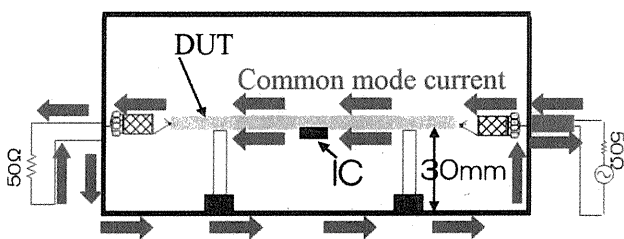


図2 WBFC内のコモンモード電流の経路
Fig.2 Route of common mode current in WBFC.

被試験基板は、WBFCの床上30mmの場所に置けるように支持台を設けている。これには絶縁性が要求されるため、装置では非金属製スペーサを立てこれを支持台とした。この高さは規格化されている150Ωのコモンモードインピーダンスを決定する。

また、高周波発振器、計測器のような50Ω系の外部装置との整合をとるためのインピーダンス変換が必要となる。これには底板から30mmの位置に固定した直径13mm±1mm、長さ100mm程度のガスケットを利用したケーブルの一端に390Ωの抵抗素子を4本並列接続したものを使用している。従って、それぞれの線路の一端は約100Ωの純抵抗を介して高周波発振器やスペクトルアナライザなどの機器に接続され、他方は同じく約100Ωの純抵抗を介して、50Ω終端に接続される構造になっており、50Ω-150Ωのインピーダンス変換ケーブルを構成することになる。また、ケーブルの他端はワニ口クリップを付け、試験対象を摘み固定する。

被試験回路を駆動するための直流電源のような外部装置と被試験回路の結線は、側壁面に設けた貫通フィルタ(ZFN5205-00R:TDK)、および、2つのコモンモードコイルを直列を介して行う。各コイルはフェライトコアFSRB250120RT000T(村田製作所)に対して8回巻きを施したものと(2.5kΩ@10MHzに相当)、FSRH190285RT000T(村田製作所)に対して2回巻き(800Ω@100MHzに相当)施したものを使用した。これらのフェライトコアの材質はいずれもNiZnであり、被透磁率 $\mu_r > 1000$ を満たす。

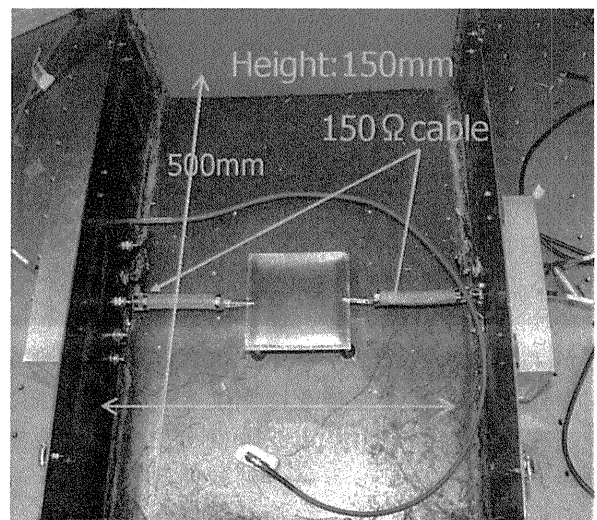


図3 製作したWBFCの俯瞰
Fig.3 Top-view of constructed WBFC.

3. 試験基板の形状、配置および規模に対する検討

被試験基板の形状、配置および規模について実験的に検討した。実験は、WBFC内に図4に示す形状の試験対象を設置し、これに入力1ポート、出力1ポートとなるようにガスケットワイヤを接続し行った。それぞれ、①100mm×100mmの未加工の両面基板の対向する辺の中点を接続した場合、②①の基板の対向する頂点を接続した場合、③20mm×100mmの未加工の両面基板の短辺の中央を接続した場合④ワイヤと同質の100mmのメッシュ状導電ガスケットを接続した場合の4つの条件で行った。それぞれの条件について、10MHz～1.5GHzまでのインピーダンスの周波数特性をネットワークアナライザ(8753E:Agilent)を用いて測定した。

図5に各試験対象のWBFCへの入力インピーダンスの周波数特性を示す。実線および破線はそれぞれ、条件①、②の結果を示す。また、細実線および細破線はそれぞれ条件③、④の結果を示している。ガスケットを用いた条件④では、100MHz～1GHzに亘り、225Ω程度のインピーダンスを示している。これに対し、100mm×100mm基板を用いた場合、条件①では600MHz、条件②では500MHzに共振と思われるインピーダンスの上昇が見られる。また、いずれの場合にも共振周波数直前のインピーダンスが低下しており、反共振現象を示しているといえる。

条件③はガスケットの場合と良く一致しており、

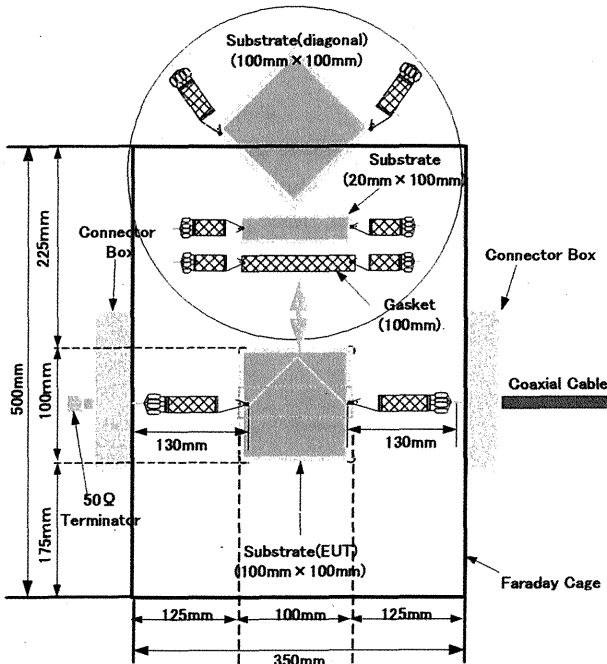


図4 WBFC内の実験基板の配置

Fig.4 Arrangement of experiment substrate in the WBFC.

ケーブルとのインピーダンス整合が最もよい条件であるといえる。

図6は広帯域オシロスコープ(86100A:Agilent)のTDR(Time Domain Reflectometry)モジュール(54754A:同)を用いて測定したWBFC内の伝送線路に沿った特性インピーダンスである。この結果からは100mm×100mmの基板を用いた場合、その部分の特性インピーダンスが150Ω程度に減少することが確認できる。一方、100mm×20mmの長方形基板である場合は特性インピーダンス225Ωを維持しており、従って、前後のワイヤ部分とのインピーダンス整合がなされている。この測定においても試験対象をガスケットとした場合とよく一致している。

基板材料と構造に基づく概算では、100mm×100mm基板のインピーダンスは約63Ω、20×100mm基板のそれは149Ωとなる。図6の測定結果には整合用にワイヤに直列に接続した100Ωの抵抗が加算されることから、測定結果はこれらの概算結果と概ね一致する。従って、100×100mm基板における共振、反共振は150Ω系ワイヤと基板とのインピー

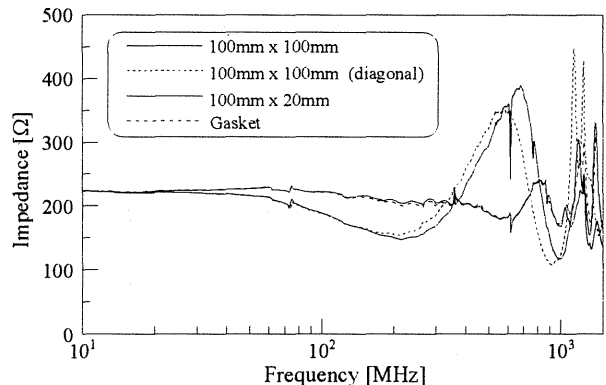


図5 各基板条件に対するWBFCの入力インピーダンスの周波数特性

Fig.5 Frequency response of the input impedance of the WBFC.

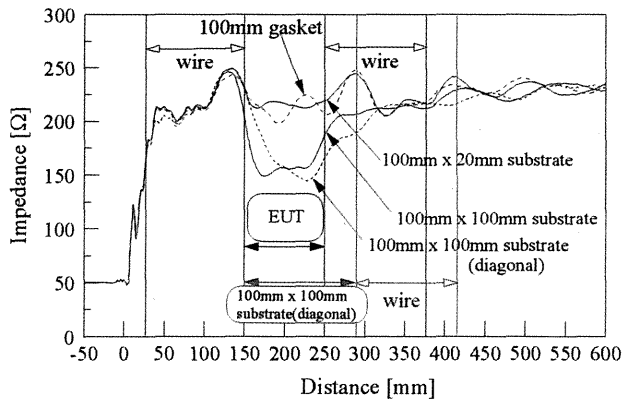


図6 各基板条件に対するWBFC内の特性インピーダンスの位置分布

Fig.6 Positional distribution of the characteristic impedance in the WBFC.

ダンス不整合により生じたと判断できる。結果として、IEC規格の周波数帯域内での有効な試験を行うためには試験対象を20mm四方の規模に納める必要があるといえる。

一方、同じ正方基板用いた正方形配置①とひし形配置②の条件の特性インピーダンスを比較した場合、位置特性においてひし形に配置した方がワイヤと基板の境界領域のインピーダンスの変化が緩やかになっている。これにより、周波数特性においては共振、反共振の影響の改善が認められる。

4 コモンモードポイント数の検討

前章の検討において、100mmx100mmの規模の基板においても有意な試験が行えない可能性があることを示した。しかしながら、実際の試験においては100mmx100mm規模の試験が行えなければ実用的とはいえない。IECの規格化作業において、広がりを持つ基板に均一かつ定常なコモンモード雑音を印加する一手法として先験的にコモンモードポイントを複数設けることが提案されている²⁾。もっとも、ポイント数の増加に伴い、コモンモードインピーダンスが低下するため、最大5点とする指針がある。そこで、本章ではコモンモードポイント数について検討した結果を述べる。

4.1 インピーダンスによる検討

WBFCへの入力インピーダンスの周波数特性をスペクトルアナライザを用いて実測した。100x100mm

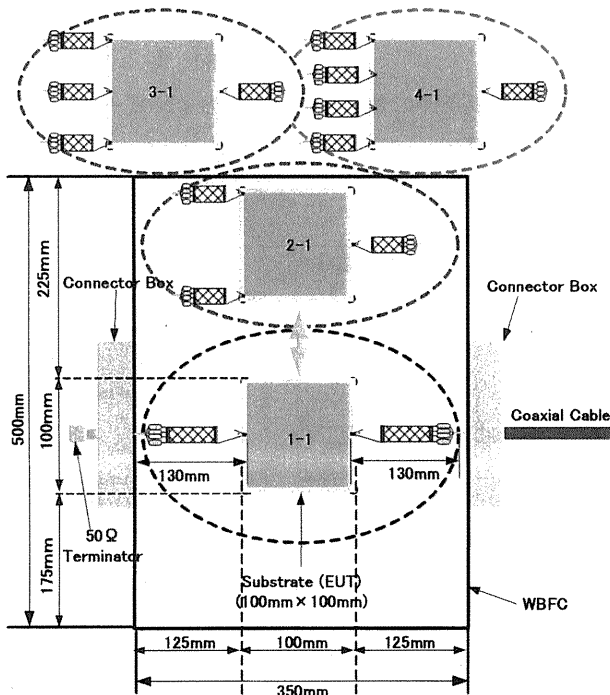


図7 コモンモードポイントの配置
Fig.7 Arrangement of common mode points.

の正方基板に対し、図7に示すようなポイント数と配置の条件でコモンモードポイントを設けた。コモンモードポイントは基板のある辺の midpoint を印加点とし、終端はその辺に対向する辺上の中央1点（ポイント数2）、両端2点（同3）、中央および両端の3点（同4）の3つの条件とした。図8の実線、点線、破線は各条件の実測結果を示す。図よりコモンモードポイント数の増加に伴い入力インピーダンスの共振特性が安定化することが認められる。

また、図9はTDRを用いて測定したWBFC内の特性インピーダンスの位置分布である。この測定においては、終端を4として、コモンモードポイントを5つとした場合も測定した。この結果より、100mmx100mmの正方基板を用いた場合は、終端を3つとしたコモンモードポイント数を4個とした場合に終端側でのインピーダンス整合が行えることがわかる。整合の観点からいえば、基板の規模に応じてコモンモードポイント数を決定すべきであるといえる。

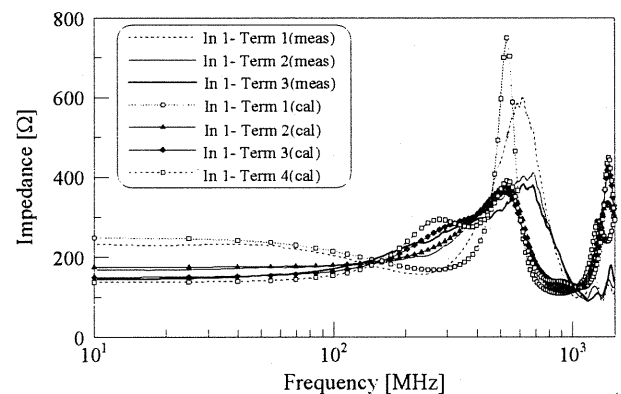


図8 各コモンモードポイント条件に対するWBFC入力インピーダンスの実測および解析結果
Fig.8 Measurement and analytical result of WBFC input impedance to each common mode point condition.

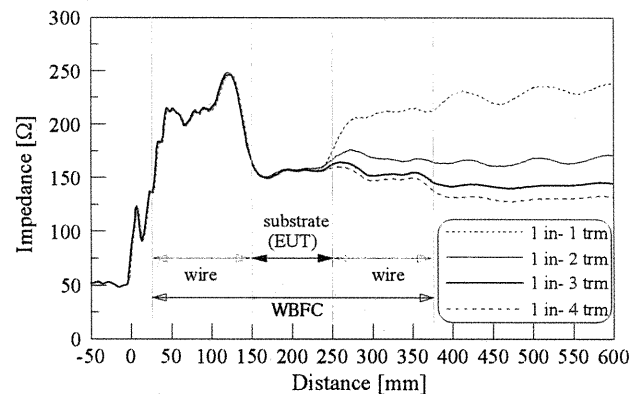


図9 各コモンモードポイント条件に対するWBFC内の特性インピーダンスの実測結果
Fig.9 Measurement result of the characteristic impedance in the WBFC under each common each mode point condition.

4.2 表面電流分布の推定

基板表面のコモンモード電流の分布状態を入力インピーダンスから判断することは困難である。そこで、FDTD法を用いた解析と磁界プローブによる基板近傍磁界分布計測の結果から、被試験基板表面上の電流分布を推定した。

まず、FDTDによる数値解析を行うために、ガスケットを用いたワイヤのモデル化を検討した。図5の測定結果より、ガスケットは20x100mmの両面基板の入力インピーダンスと一致することから幅20mmの導体板によりガスケットを表現できると判断した。次に、このガスケットモデルを用い、先の実験条件の入力インピーダンスを計算した。結果を図8中に併せて示す。完全ではないが実測と

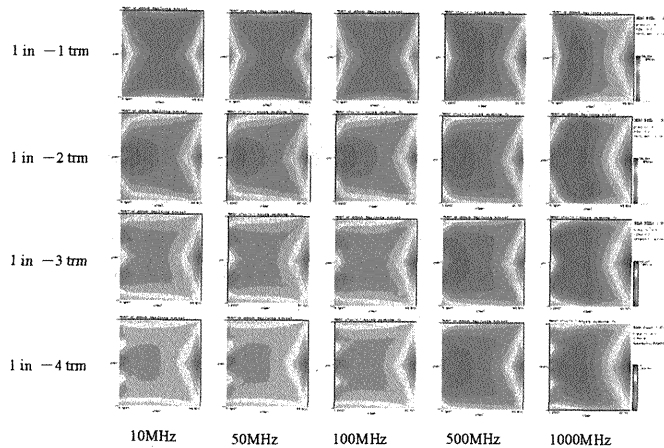


図10 各コモンモードポイント数に対する正方基板表面近傍の磁界分布の計算結果

Fig.10 Calculation result of magnetic near field distribution on surface of substrate for each number of common mode point

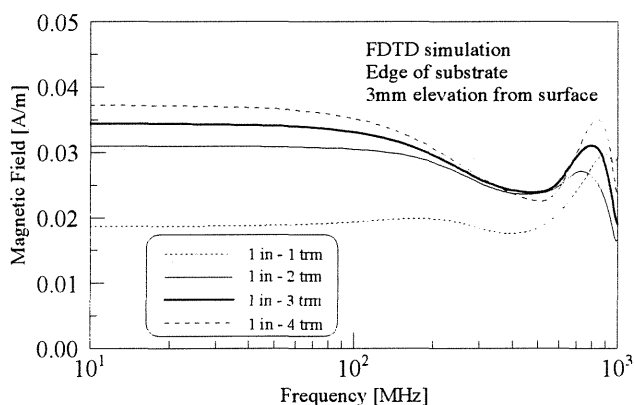


図11 各コモンモードポイント数に対する基板端中点近傍の磁界強度の周波数特性の計算結果

Fig.11 Calculation result of frequency response of magnetic field on edge of substrate for each number of common mode point.

の一致を認め、これらのモデルを用いて基板近傍の磁界分布の周波数特性を計算した。

計算結果を図10から図12に示す。図10はいくつかの周波数に対する各コモンモードポイント数における基板近傍磁界分布であるが、基板の縁への電流の集中が示されている。図11および図12はそれぞれ基板中央および基板の縁近傍の磁界強度の周波数特性である。これらの結果より、位置と周波数全体に互って均一な磁界分布を示すのは入力1対終端1の場合であり、基板の縁への電流の集中が少ないことを示している。然しながら、基板中央に着目すれば磁界強度の差異はコモンモード条件に関わらず僅かであるといえる。インピーダンスの解析結果に現れたほどの差異が生じないのは基板上のエッジ電流と面電流のバランスに起因すると考えられる。

次に、磁界プローブ (MP-10L : NEC) を用いて、基板の基板近傍磁界の実測を行った。実験は、xyステージによる自動測定系を構築し、ネットワークアナライザを用いて100mm四方の未加工の両面基板につき、対向する辺の中点をコモンモード接続した場合 (入力1-終端1) と、対向する辺に対し1対2 (入力1-終端2) および1対3 (入力1-終端3) とした場合につき、基板上の磁界分布を測定した。図13から図15に測定結果を示す。なお、各測定結果は磁界プローブの指向性と極性の偏りの影響を補正したものである。

図13の磁界分布測定結果より、低い周波数に対しては図10のシミュレーションと良く一致しているが、500MHz以上では特に基板中央部の磁界分布が不明瞭になっている。ここで、ある観測点に着目した場合の基板の縁の磁界強度の周波数特性を示

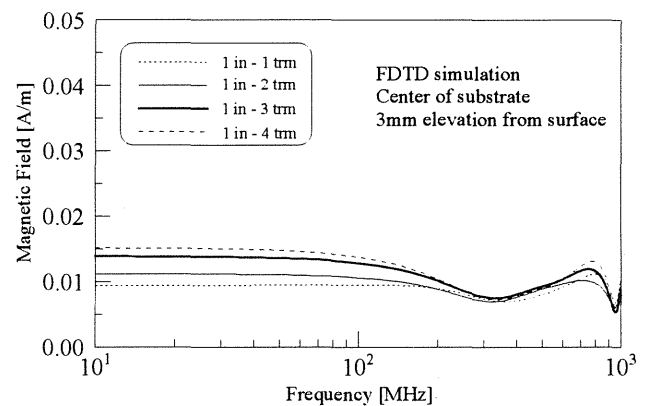


図12 各コモンモードポイント数に対する基板中央の表面近傍の磁界強度の周波数特性の計算結果

Fig.12 Calculation result of frequency response of magnetic field at center of substrate for each number of common mode point.

す図14は、図11のシミュレーション結果と一致している。一方、図15に示す基板中央部の磁界強度の周波数特性では、磁界強度が基板の縁のそれより弱くなる傾向はシミュレーション結果と定性的に一致するものの、各コモンモード条件間の差異が明確でない結果となっている。また、300MHz以上ではシミュレーションには現れていない磁界強度の上昇が認められる。これらの結果は実際の基板上における表面電流分布の複雑さを示すものと考えられる。

5. むすび

製作したワークベンチファラデーケージ (WBFC: Workbench Faraday Cage) を使用し、WBFC法における試験基板の形状、配置、規模そして、コモンモードポイントの数に対するコモンモード雑音の印加効率を検討した。

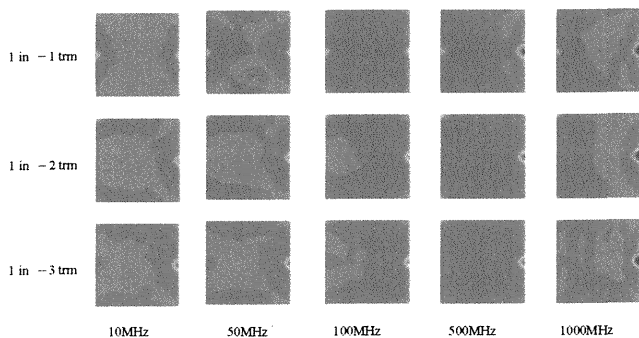


図13 各コモンモードポイント数に対する正方基板表面近傍の磁界強度分布の測定結果

Fig.13 Measurement result of magnetic near field distribution on surface of substrate for each number of common mode point.

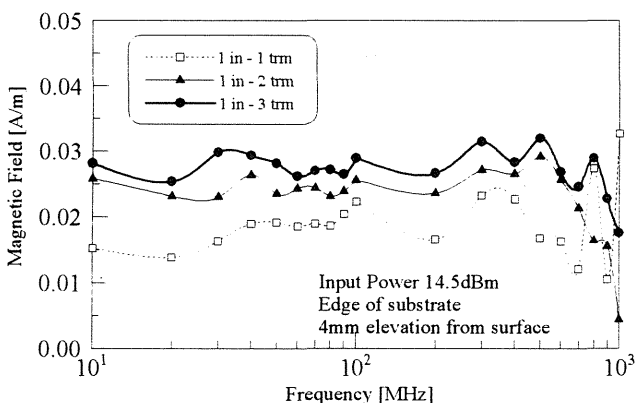


図14 各コモンモードポイント数に対する基板端中点近傍磁界強度の周波数特性の測定結果

Fig.14 Measurement result of frequency response of magnetic field on edge of substrate for each number of common mode point.

WBFC への入力インピーダンスと伝送線路上の特性インピーダンスの解析および実測の結果から、全体のインピーダンスの整合性を指標とした場合、試験対象は20mm四方に収まる規模が最適であり、それ以上の規模の試験基板である場合は終端のコモンモードポイント数を増加させると整合が図れ、100mmx100mmの正方基板であれば終端を3個としたコモンモード数を4とする場合が良好であるという結果となった。

一方、基板の表面電流に注目した場合、100mmx100mmの正方基板であれば基板全体に亘って表面電流が一様であるのは終端を1つとしたコモンモードポイント数が2の場合であるという結果を得た。

以上の結果より、コモンモード数などの試験条件は試験の目的に応じて選ぶことになることが予測される。今後は実際の回路の耐性試験を通じてWBFC法の最適試験条件を明らかにする予定である。

謝辞

実験に協力して頂いた、電子機器学研究室EMCグループの歴代学生諸氏、佐々木健氏、森本敏光氏、天野稔久氏に謝意を表します。また、本実験に使用した測定機器の一部は岡山大学大学院古賀隆治先生のご厚意により使用させて頂きましたことを記して深謝いたします。

参考文献

- [1] IEC 62132-1: General conditions and definitions(2003).
- [2] IEC 62132-5: Measurement of conducted immunity, 150kHz to 1GHz Part 5: Workbench Faraday cage method(2003).

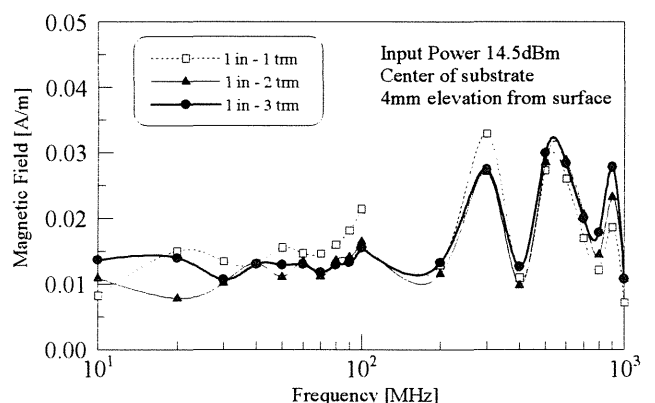


図15 各コモンモードポイント数に対する基板中央の表面近傍磁界強度の周波数特性の測定結果

Fig.15 Measurement result of frequency response of magnetic field at center of substrate for each number of common mode point.