解説 プリント回路の電磁特性研究における最近の進展 —電磁特性研究会活動紹介—

越地 耕二^{*1}, 林 昌世^{*2}, 澤佐 博行^{*1}, 和田 修己^{*3}, 高橋 丈博^{*4}, 堀田 幸雄^{*5},
松永 茂樹^{*6}, 諸橋 欣一^{*7}, 勅使河原 治^{*8}

Advances in Research for Electromagnetic Characteristics of Printed Circuits -Recent Activity of Research Group for Electromagnetic Behavior-

Kohji KOSHIJI^{*1}, Sho-se HAYASHI^{*2}, Hiroyuki SAWASA^{*1}, Osami WADA^{*3}, Takehiro TAKAHASHI^{*4},
Yukio HOTTA^{*5}, Shigeki MATSUNAGA^{*6}, Kinichi MOROHASHI^{*7} and Osamu TESHIGAWARA^{*8}

- *1 東京理科大学理工学部電気工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)
- *2 株式会社NEC情報システムズ科学技術部 (〒213 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1)
- *3 岡山大学工学部電気電子工学科 (〒700 岡山県岡山市津島中3-1-1)
- *4 拓殖大学工学部情報工学科 (〒193 東京都八王子市館町815-1)
- *5 株式会社トーキン, EMC事業部 (〒213 神奈川県川崎市高津区子母口398)
- *6 株式会社トクヤマ電子基材事業部 (〒243 神奈川県厚木市田村町8-8柳田ビル1F)
- *7 株式会社シイエムケイ回路設計センター (〒354 埼玉県入間郡三芳町藤久保1106)
- *8 日本無線株式会社研究所 (〒356 埼玉県上福岡市福岡2-1-4)
- *1 Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo (2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278)
- *2 Scientific & Engineering Analysis Dept., NEC Informatec Systems, Ltd. (3-2-1 Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 213)
- *3 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Okayama University (3-1-1 Tsushima-Naka, Okayama-shi, Okayama 700)
- *4 Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Takushoku University (815-1 Tatemachi, Hachioji-shi, Tokyo 193)
- *5 EMC Division, Tokin Corporation (398 Shibokuchi, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 213)
- *6 Electronics Dept., Tokuyama Corp. (Yanagida Build., 8-8 Tamura-cho, Atsugi-shi, Kanagawa 243)
- *7 Circuit Design Center, CMK Corp. (1106 Fujikubo, Miyoshi-machi, Iruma-gun, Saitama 354)
- *8 Laboratory, Japan Radio Co., Ltd. (2-1-4 Fukuoka, Kamifukuoka-shi, Saitama 356)

1. まえがき

電子機器類の回路実装は、軽・薄・短・小を合言葉に高密度化の一途をたどってきた。高密度実装は単に回路や部品類の小型化によって実現されるというものではなく、製品が必要とされる性能を発揮するためには、電磁気学的な視点に立った研究・開発・設計がきわめて重要となる。ここでは、本学会電磁特性研究会における、過去4年間のプリント回路の電磁気学的な視点に立った研究の進展について紹介する。同研究会では、運営委員会(年6回程度)および公開研究会(年3回)を開催し、公的印刷物として公開研究会論文集、研究会活動報告書を発行している。これらの印刷物における報告または論文の掲載件数は100件を上回る。この数字は4年間の積み重ねとはいえ、会員諸氏のこの分野への関心の深さと、アクティビティの高さを物語っている。

本稿は、EMC対策の理論(解析, 測定), EMC対策の実

践(部品, 材料, 回路設計), その他として分類され、記述されている。また、本会以外の報告や論文も重要と思われるものについては引用・紹介を行っている。

2. EMI対策の理論

EMI対策とは不要電磁波を低減する対策である。基礎電磁界理論、伝送線路理論とアンテナ理論を勉強することは、EMI対策の理論を導くことに役立つことが多い^{A1)}。しかしながら、実機は製品ごとに電磁的条件が違うため、各々の問題を定式化して記述するには基本的電磁現象を記述する支配方程式までさかのぼって検討する必要がある場合がよくある。実機の対策には、ほとんどの場合実機の現状を把握する測定がまず必要である。それと平行に、解析手法を用いて電磁特性を表す変数間の関係を定量的に表すことができる。実機の電磁特性を理解しやすくする。したがって、EMI対策を開発するときに「測定」と「解析」の手法を併用すると、非常に有利になるといえる。

○執筆担当: 越地 耕二 (1節, 5節), 林 昌世 (2節, 2.1節), 澤佐 博行 (2.1節), 和田 修己 (2節, 2.2節), 高橋 丈博 (2節, 2.2節), 堀田 幸雄 (3節, 3.1節), 松永 茂樹 (3節, 3.2節), 諸橋 欣一 (3節, 3.3節), 勅使河原 治 (4節)

次の2節では最近4年間の電磁特性研究会で発表された論文のうち、普遍的な対策を発見しようと図る研究で、測定と解析に関連ある論文を網羅して、解説を試みた。2.1では解析手法を用いて行った研究およびEMIシミュレータに関連する研究を主体に、最近の解析についての研究進展について解説する。2.2では各種測定手法、および測定によって明らかになった電磁特性に関する研究の進展について解説する。

2.1 解析理論関連

「解析」という用語は、一般にはよく電磁界解析、すなわち電磁波、電磁界の計算法のことをさすことが多い^{A2),A3)}。しかし、本節ではもっと広い意味で使うことにする。

実機のEMI対策を考えると、本質的には3次元の電磁界は、周波数分布と境界条件が複雑であるため、実機の電磁界の時空間分布は複雑であるといえる。そのような状況では、実機の電磁特性を数学的に定式化することは決して容易ではない。対策を導くために、どのような電磁的物理量をどう計算すればいいかわからないことが多い。そこで、普遍的な対策を導出するためによく興味ある物理関係だけを抽出したモデルを作って、変数間の関係を解明する調査手法が使われる。ここではこのようにモデルを設定し、解を算出するプロセスを「解析」と定義する。

このようにモデルを使った電磁特性の解析はEMI対策を開発する基礎となる。それと同時に、蓄積された解析の結果は、後日利用されて普遍的な法則の導出に結びつく可能性が潜む。したがって、モデルを基に解析することは、実機の対策の導出にアプローチする1つの有効な手段である。

EMI対策の開発には、以上のようにモデルを構築し、EMI対策と関連ある物理を明らかにする解析の手法によってアプローチする攻め方がある。一方、最近は実用性を目的に、低ノイズ基板を設計するためのシミュレータに関する研究調査も目覚ましい。シミュレータは物理モデルがすでに正しいという仮定から出発し、既知の変数を入力して、知りたい変数を計算する数値実験（シミュレーション）である。通常、シミュレータのアルゴリズムは発表論文に詳細な記述をしないことが多い。そのため、残念ながら、効果評価についての正確な情報の入手は非常に難しい。本研究会では以下に述べるごとく、このような情報を交換する機会も提供された。

西方敦博¹⁴⁾は無限平板の遮蔽効果を解析した。この論文は微小ダイポール波源に対する無限平板導体遮蔽の解析を拡張して多層基板モデルである多層無限平板のGreen関数を定式化し、近傍電磁界の定式化を行った。長尾泰司、他⁸⁷⁾は平板シールドに影響された近傍電磁界の解析を行った。シールド通過後の電磁界は多重極展開による波源で表現されている。ここで用いたモデルは微小電気ダイポールと微小磁気ダイポールの2種類の波源、材質は銅の平板、100 μ mと1GHzの周波数である。このモデルでは厳密解は既知

であるので、多重極展開式の未定係数は一意的に決められた。解析結果によると、波源が微小電気ダイポールの場合、仮想波源は微小磁気ダイポールであるとわかった。一方、微小磁気ダイポールの場合、仮想波源は磁気四重極子と微小電気ダイポールの重ね合わせになることがわかった。

プリント回路のEMI対策に対する関心は高く、次の2件はクロストークを2本線路モデルを用いて解析した報告である。森崎慎也、他⁹⁾はプリント回路のクロストークを低減するため、2本の線路の中央に遮蔽導体を配置した遮蔽効果を解析し、測定値と比較して低減効果があることを示した。古谷親生、他⁶⁸⁾は高速デジタル回路パターンのクロストークを解析するため、結合2本線路をモデルに用いた。ステップ電圧入力時の遠端結合と線路長による遠端結合の変化を定式化し、測定と比較した。モデルが単純化しすぎたためによる誤差なども論議されている。

共平面形線路の曲がりの電磁特性を系統的に調べている研究に次のものがあった。これらの解析結果は最近、実用化に応用されている⁹¹⁾。越地耕二³⁰⁾はプリント回路の回路要素の内伝送線路の直角ベンドの電磁界特性を空間回路網法によって解析し、反射特性などを示した。澤佐博行、他⁴²⁾は共平面形線路の円形曲がり部の周波数による電磁界特性を空間回路網法によって解析し、透過特性などを示した。篠塚隆、他⁵⁷⁾は曲がったプリントパターンからの放射の計算式を相反定理を用いて、曲がった線路を直線の線路が継続接続したものとして導いた。計算値と実測とよく合うので、基板の損失を検討するのに活用できると期待される。澤佐博行、他^{58), 62)}は共平面線路の曲がり部の高周波数における放射特性を調べるために、様々な曲がり角を有する共平面線路を製作し、放射特性の測定を行って比較した。久保田達也、他⁸¹⁾はプリント配線板のグランドなどによる信号伝送特性の劣化を調べた。グランド導体の種々の寸法のスロットが存在するときの信号伝送特性を測定し、スロット部の等価回路パラメータを算出した。スロットがストリップ線路と直交する場合は信号伝送特性は影響されるが、平行する場合は影響されない。太田義昭、他⁹⁵⁾は角形曲がりを有する共平面形線路のクロストークを解明するため、直線線路のスロットと曲がり線路のスロットの電界を空間回路網法によって計算した。2本の共平面形線路が近いほど結合が強く、近端結合よりも遠端結合の方が大きいという結論を得た。実用化について、越地耕二⁹¹⁾は透過特性を改善するのに内導体オフセットのある曲がり部を使用することを提案した。

近傍実測磁界分布から波源表面の電流分布を求める数値的解法を逆問題を解く手法を用いて解いたものに次のものがある。林昌世^{19),26)}は漏洩をもつ金属筐体を用いて、その近傍の実測磁界分布から筐体表面の電流分布を計算し、漏洩位置を決めるのが可能と示した。また逆解析で得た表面電流分布から、順解析で半径3 m円筒面の電磁界を予測し

た⁷⁸⁾。方程式が積分形式で、電流の項が積分核の一部であることから逆解析という。解の数学的吟味が重要であるが、実用上先験的情報を使うことで信頼性を高めることが可能である。

波源を仮定して、差分法によってマクスウェル方程式から放射する電磁界を時間領域で計算したのが次の発表である。林昌世³⁹⁾は波源を与えた場合の漏洩電磁界をマクスウェル方程式から直接数値的に求めた。開口を持つ金属管体内部に波源を置いた場合の漏洩電磁界を2次元の差分法で求めて、過渡解の空間分布を示した。時間軸で解を求めたのは波源に任意の波形を与えられるようにしたためである。

大西輝夫、他¹⁷⁾は差分法・時間領域計算法を応用し、電界と指向性の解析を行った。彼らはFD-TD法を用いてマイクロストリップアンテナの電界と指向性の解析を行い、FD-TD法を用いたことによって、3次元任意曲面の解析でメモリを大幅に節約できた。

シミュレータの核心ともいえる最適配線を設計するアルゴリズムについて、次の研究発表があった。佐藤政生⁴⁾はLSI自動レイアウト手法として、非スライス構造でブロックの配置に制限のない高集積度で自動化実現可能なBEARシステムを提唱している。中村英博²⁵⁾はマルチワイヤ配線板の電気特性の予測に着目し、必要となる伝搬遅延を代用電荷法で解析した。実測と併せて、伝搬遅延は実効比誘電率に依存することが明らかになった。伝送線路シミュレータにおける配線の電気特性を予測するには、このような基礎的解析と実測を多く要する。佐藤政生³⁸⁾、栗島亨、他³²⁾は回路配線の設計にラバースバンドモデルに基づいた逐次配線手法を用いたグリッドレスルータを考案し、平面配線問題に適用した結果を示した。この方式は柔軟性に富んで配線およびレイアウト設計に有望である。勝山芳郎⁴³⁾はデジタルプリント配線板による放射ノイズをプリントパターンを細かい導体片に分割し、スペクトル領域法によって計算した。他のEMIシミュレータに比べて基板の構造に関する材料定数などパラメータを細かく与えられるので精度が高いようである。

シミュレータの使い勝手とか効果の評価は大変興味ある問題でありながら、それらに関する報告を知る機会が少ない。次の論文はその意味で貴重だった。中村英博^{1),36)}は基板のパターン設計技術は、高周波の電気特性の測定技術の他、パターン設計のソフトウエアの開発およびパターンから出る電磁界をシミュレーションで把握することが重要として、3次元伝送線路シミュレータの電気特性評価方法について考察を述べた。高橋丈博¹²⁾は市販の電磁放射ノイズシミュレータPCPEMSIMを用いて、配線の条件変更時のノイズの強度変化を調査し、設計レベルにおけるシミュレータの有効性の評価を行った。金子俊之、他¹⁵⁾は容量計算のプログラムCALCAPを用いて、平面グラウンドを等価集中定

数回路に置き換え、配線の違いによる帰路電流の計算を行った。柳本太加志²⁹⁾は、特定な回路についてSPICE系のシミュレータを用いて回路設計するときの、デバイスの入出力段のモデル化の問題点を提出した。

シミュレータを利用する設計関係者にとって、「設計完成までに所要時間が長すぎる」とことと「配線経験に依存する」ことがネックになっている。次の論文ではそれらについての解決策を提案している。高橋丈博⁴¹⁾はノイズトラブル事例から得られた知識をノイズ対策に活用できるようにするため、パソコンで既成のデータベースツールとエキスパートシステム構築ツールを利用して、それぞれノイズガイドシステムとノイズエキスパートシステムの構築を試みた。樽井勇之、他⁵⁹⁾は伝送線路シミュレータの実用化に必要なと思われる部品配置支援ツールを開発した。次の2つの特徴がある。(1)部品配置段階から配線長を仮定し、反射ノイズや遅延時間の警告を設計者に知らせる。(2)設計段階でノイズに関する情報をデータベース化し、効率を向上する。高橋丈博、他⁷⁶⁾はプリント配線板上の線路からの放射ノイズを等価回路網法を用いて計算するツールを開発した。配線を等価集中定数線路に置き換える等価回路網法は他の放射ノイズシミュレータに比べて、基板の損失および部品モデル化の扱いが容易になった利点がある。

シミュレータを開発者から解説が聞けるというのは、なかなか貴重な機会であった。松井則夫^{21),27)}は回路設計で配線・接続部でのノイズを考慮したシミュレーション・システムを開発した。回路シミュレータContec SPICEとプリント回路板CADであるHENRYとMETALを結合して、大規模・高速・高密度の回路設計を可能にした。池田三喜夫、他⁵¹⁾はQuad Design Technology社開発の高速デジタル回路設計用ツールであるゲート入出力間の遅延時間を解析するMOTIVEを紹介した。その他、伝送線路の放射・遅延を解析するTLC, PDQ, およびクロストークノイズと損失も考慮して伝送線路効果を解析するXTKの紹介を行った。前田真一⁵²⁾はCadence社開発の伝送線路シミュレータSIAとプリント配線板の設計ツールであるCBDの紹介を行った。CBD (Correct by design) は必要なルールを入力すると自動的に訂正する利点を持つ。

2.2 測定理論関連

プリント配線板(PWB)の電磁特性測定に関しては、信号の高速化に伴いプリント配線板上の配線の伝送特性や反射・クロストークの測定と、プリント配線板からの不要電磁波の放射量の測定—いわゆるEMI測定—、および回路の誤動作に関連したイミュニティ測定が行われている。

堀田幸雄による「EMCの測定と対策」についての解説⁴⁹⁾が参考になる。なお、EMC(電磁環境適合性)はEMI(電磁妨害)とEMS(電磁感受性)の両方を含む。EMSはイミュニティ(耐性)と対になる概念で、イミュニティの大きい機器はEMSは小さいことになる。

まず、伝送特性に関しては、高周波電磁特性を知ることの重要性が認識され、CADとの連動やシミュレーションの必要性が多く語られるようになった^{1),27),29),36),43),72),76),103)}。実際に、伝送線路シミュレータの開発指針を得ることを目的にしてマルチワイヤ配線板の伝搬遅延が測定され、代用電荷法によるシミュレーション結果との比較が報告された²⁵⁾。また、多層基板の比誘電率、特性インピーダンス、信号伝搬遅延時間の測定とシミュレーションとの比較も行われている^{B1)}。MCMの電気特性に関しても、絶縁層にポリイミドを用いた銅配線MCMについて特性インピーダンスと1GHzパルス信号の伝送特性が評価されている²²⁾。

さらに、デジタルプリント配線板のノイズに関連して、電圧波形やグラウンドノイズ、反射ノイズ、クロストークなどが、放射ノイズと共に測定評価されている^{24),44)}。その際に、デジタルICの種類ごとの特性を把握して、設計やノイズ対策をすることが必要であるとの主張が増えてきている^{24),44),45)}。出力の立ち上がり時間や伝搬遅延時間、IC種ごとのノイズスペクトルが測定されている⁵⁰⁾。

最近では設計の現場に伝送線路シミュレータを導入して高速回路の設計支援を行う場合も増えており、これを活用するための波形測定やデータの蓄積も多く行われているはずである。これらの測定手法や結果について、もっと数多くの発表が行われ、これを活用した新しい設計法が共通の財産として発達することが望まれる。

次に、プリント配線板からの不要電磁波放射の測定に関しては、かつては試作品のEMI評価として規格に従った測定が行われてきた。しかし最近ではもっと積極的に、EMIレベルの低いプリント配線板の設計法を検討したり、EMI予測シミュレータの開発や、EMI対策部品の効果を定量化することを目的として、特別の評価用基板を試作してEMI測定を行う例が増えている^{24),34),45),50),64),100)}。その結果、例えば多層基板において表面層の誘電体厚さを薄くすることが放射低減に寄与する⁶⁴⁾などの結果が得られている。

また、オープンサイトや電波無響室での大がかりな測定に代わって、近傍電磁界を測定してEMIレベルの評価を行い、これによりEMI対策を行うことについてもかなり検討されている。規格に定められたEMI測定サイトにおける測定と簡易電波暗室における測定およびEMSCAN（近傍磁界を簡易測定する市販の装置）による測定の相関について検討された例もある^{45),B2)}。さらに進んで、近傍界測定の結果を解析することにより電子機器筐体上のノイズ電流分布を求め、これから遠方への放射を求めようとする試みもある^{19),26)}。

この近傍電磁界の測定については装置も工夫されてきており、工業的な有用性を考え、測定しているプリント配線板のイメージをビデオカメラで撮影し、コンピュータ画面上で磁界分布に重ね合わせるようにしたものが開発されている⁸⁵⁾。

電磁放射に関して、IC種ごとの特性の違いとの関係が評価されている。CMOSデジタルICのスイッチング時間の負荷容量依存性と放射電磁雑音レベルについて測定した例や^{B3)}、さらに進んで同一型番のICの電気特性のメーカー間、ロット間のばらつきによる放射電磁雑音レベル差を評価した例もある^{B4)}。また、パッケージの違いによる放射電磁雑音レベルの差も実測評価されている^{B5)}。実装上の問題に関して、ICの電源・グラウンド系の対策が必要であること、ダンピング抵抗の効果について述べられている⁴⁵⁾。

イミュニティに関しては、TEMセルを用いてパソコンのイミュニティを定量評価する試みが報告された^{3),7)}。機種ごとに特定の周波数でイミュニティが低下するデータが示されており、興味深い。ちなみに、テスト用基板を用いてデジタル回路の誤動作機構を解明しようとする試みもあり^{88),B6)}、やはり特定周波数でのイミュニティ劣化の可能性が示されている。

先に近傍電磁界の測定について述べたが、逆に近傍磁界をプリント配線板に印加することにより、回路の局所的なイミュニティを調べるという報告があり興味深い⁹⁰⁾。2つのループアンテナを対向させてプリント配線板を挟み込むことにより特定方向の磁界の印加を可能にしている。また、新しいタイプのイミュニティ測定システムとして、ある地点でのノイズ環境を測定して記録し、それと同じノイズ環境を電波暗室内に再現するという研究がある^{77),98)}。野外などのノイズ環境での機器動作試験は困難な場合が多く、このようなシステムによって安定した環境で等価な試験が行える。

回路の誤動作に関連して、Tape Carrier PackageのCMOS LSIの同時スイッチングノイズによる内部F/Fの反転誤動作が評価された¹⁰⁾。入出力ピンの配置により結果が大きく違うこと、基板上のパスコンの有無は結果に影響せず、LSIパッケージでのノイズ対策が重要であることが示された。

機器レベルのノイズ問題を扱ったものとしては次のような報告がある。電磁調理器のラジオ放送への干渉が検討されている⁵³⁾。電磁調理器は主に漏洩磁界が大きいため、距離を離すのが最も効果的であるとしている。また、自動車のシートによって発生する静電気の評価試験法に関する報告⁸⁹⁾がある。自動車は様々なノイズ源をかかえる上に安全性が非常に重視されるものだけに、ノイズ問題には慎重に取り組む必要がある。

以上のような測定を行う上で、測定方法の整備や様々な工夫が必要になってくる。最近話題となっているイミュニティの測定場に関する研究が行われている⁵⁴⁾。放射イミュニティの測定には電界強度がある範囲(周波数、場所)で一定になるように調整された測定場が必要である。ここでは、この条件を満たすために金属フェンスを用いた方法が提案されている。次に、放射ノイズを測定する装置として欠かせないのはアンテナであるが、その複素アンテナファクタ

を3アンテナ法により測定する方法について報告されている^{55),56)}。また、電波吸収壁の特性を測定した報告がある⁸⁶⁾。抵抗被膜を格子状に配置し、その間隔、深さ、抵抗値による吸収特性を明らかにした。

3. EMI対策の実践

EMI対策はローパスフィルタやコモンモードチョークなどの部品を使用する他に、シールドのために種々の材料を使用したり、回路設計、実装設計による方法など多岐にわたる。ここでは、EMI対策を部品、材料、回路に分類し、それぞれの技術について解説する。理想的なEMI対策はこれらの技術が効率よく組み合わせられて実現する。

3.1 部品による対策関連

電子機器から放射するEMIは機器ごとに特徴を有している。

スイッチング電源は多くの電子機器の共通のEMI放射源であるが、出口からはスイッチング電源特有のEMI対策をまとめた¹⁶⁾。また、種々の電子機器のEMI対策に共通する手法をまとめた、越地による「電子機器のEMC設計・対策」は、EMI対策の実践面と理論面が扱われている点で参考になる⁴⁷⁾。

ここではこうしたEMI対策のなかで部品、とりわけEMIフィルタを使用した対策について述べる。

ノイズフィルタは一般にEMIフィルタとよばれ、通信用など信号伝送回路に使用される低域通過型フィルタと多くの点で異なっている。

フィルタ回路の基本区間はインダクタンスとキャパシタンスによって構成され、公称インピーダンス $R(\Omega)$ 、遮断周波数 ω_0 を定め各々の素子を決定する。しかしながらEMIフィルタの場合、回路構成はほぼ同一であるものの、公称インピーダンスで整合されて使用されることはなく、特に電源ラインに挿入されるEMIフィルタの場合、通常、挿入損失量は 50Ω 系で測定されるのに対し、電源側のインピーダンスは場所や時間で様々に変化し、負荷側のインピーダンスも装置によって異なり、スイッチング電源を使用している例では、数十 $k\Omega$ にも達することが報告されている^{C1),C2)}。また、負荷の特性に依存する電流、電圧に対するレベル特性も要求される。また、通信用フィルタでは通過帯域での伝搬特性、位相特性およびカットオフ領域でのシャープさなどが要求されるが、EMIフィルタにおいては阻止領域での減衰量や挿入損失量と周波数軸上での広帯域性が要求され、したがって、これらの相違点からもわかるように設計方法や評価の方法に各々相違点がある。

ノイズフィルタを設計したり、利用する場合に、フィルタを挿入しようとする位置でのノイズの伝送モードに適した設計や選択をする必要がある。伝送モードは線間電圧として負荷電圧（または電流）に重畳する形で伝送するノーマルモードと接地系が伝送に寄与するコモンモードに分け

ることができることはよく知られている。ノイズは線間で発生するのでノーマルモードであるが発生源から離れるにしたがって接地系の影響でコモンモードへのモード変換がおき、電源線や信号線をアンテナとした放射性のノイズになるなど、結果的には双方のモードが混在していると考えなければならない。したがって、EMIフィルタとしてはノーマルモードおよびコモンモードに対して低域通過型フィルタの回路構成をもつものが一般的である。

ノーマルモード成分に対してはノーマルモードチョークとXコンとよばれる対線間のコンデンサからなる回路と、コモンモード成分に対してはコモンモードチョークとYコンとよばれる対接地間コンデンサからなる回路が複合した低域通過型フィルタ構成がEMIフィルタの基本回路であるが、電子機器やフィルタの取り付け環境によってノーマルモードが問題にならなかったり、逆にノーマルモードだけが問題になるケースを想定し、この基本回路は様々な形にアレンジされる。

EMIフィルタにおいて重要なのは通過帯域の伝送特性やカットオフ周波数、損失特性の立ち上がりのシャープさなどよりも、むしろ阻止帯域の広さである。この意味でEMIフィルタは低域通過型フィルタ（ローパスフィルタ）ではあるが帯域阻止型フィルタ（バンドエリミネータ）でもあり、阻止帯域の広帯域性を評価しなければならない。EMIフィルタの広帯域性能を決定する要因は低周波領域ではインダクタンス L とコンデンサ容量の積であり、カットオフ周波数から一段当たり $6dB/oct$ の割合で損失量が増加し、高周波領域ではインダクタの持つキャパシタンスおよびキャパシタの持つインダクタンスで決定される。

したがって、この帯域ではEMIフィルタの実装方法により挿入損失特性が大きく左右される。またインダクタンス素子はEMIの伝送モードによりノーマルモード素子とコモンモード素子に分けられる。ノーマルモード素子では電子機器の負荷電流がそのまま流入するために飽和磁束の高い純鉄やパーマロイなどの圧粉磁心（ダストコア）が多く用いられる。一般に圧粉磁心は体積固有抵抗が高く、このために透磁率の周波数特性が純鉄はもちろんケイ素鋼やパーマロイに比べても優れている。また特に鉄の圧粉磁心の場合、ヒステリシスロスが大きく、カットオフ周波数付近での負の挿入損失（挿入利得）の発生を軽減するため、インパルス性のノイズが入力したときのダンピング特性に優れており、サイリスタのノイズ防止部品として古くから用いられてきた^{C3)}。コモンモード用インダクタンス素子にはマンガ系またはニッケル系のフェライト磁心が用いられる。フェライト磁心は透磁率の大きさ、その周波数特性などの点で圧粉磁心よりも数段優れているが、飽和磁界が極端に小さいため、直接、負荷電流を流すような使い方ができない。コモンモード用インダクタンス素子の場合、前述したごとくコモンモード成分、すなわち接地に流れ込む電

流に対してインダクタンス素子となればよいので、負荷電流による磁心内部の磁界を相殺し、電流の影響を受けないバイファイラ巻きで使用している。EMIフィルタの良否を決定するのは挿入損失特性である。挿入損失を測定する方法として、JIS-C-6904やMIL-STD-220Aに定められた方法を用いるのが一般的であるが、次の事情で多くの問題点も含んでいる。

- (1) 測定信号が100dBuV (0.1V) と微小であること。
- (2) 測定系のインピーダンスが50Ωないし75Ωの純抵抗であること。
- (3) 定格負荷電流が流れていない。
- (4) 定格電圧が印加されていない。

などの点で、EMIフィルタの実装環境とはだいぶ異なっている。このためカタログなどで表示されている損失特性と実装特性との間に食い違いを生ずることがある。現実には定格電流や定格電圧が印加されるとインダクタンス素子は電流により、またキャパシタンス素子は電圧により初期値と異なったレベル特性をもち、EMIフィルタから見たときの電源側と電子機器側のインピーダンスは複雑な複素インピーダンスを示し、しかも刻々と変化していると考えなければならない。また、電源に数kVのサージが誘起した場合にも対応しなければならない。

これらの点から、できるだけ実動状態に近い方法での評価が必要である。

堀田らは、EMIフィルタにあらかじめ定格電圧を通电した状態で入力に高電圧パルスを加え、出力側の応答を見る方法を開発した^{C4)}。ここではCISPR Publ. 16などで定められている擬似電源回路網を使用している^{C5)}。これにより前述した問題の大半は解決し、より実装状態に近い特性を観測することができる。より高性能のEMIフィルタ開発のために、種々の方法が考案されている。CISPR Publ. 17「受動形無線妨害波阻止フィルタおよび抑圧素子の特性測定法」では、標準試験法、最悪条件法、実用状態による試験法、擬似装置による試験法の4種類の測定法を提案している^{C6)}。これらのなかで特に興味ある方法は最悪条件法で、これは最悪条件法と近似測定法に分けられ、さらに最悪条件法はインピーダンス変化法と準解析法に分けられている。準解析法はインピーダンスの実測値から最小の減衰量を算出しようとするもので、フィルタのテブナンインピーダンスおよび伝達インピーダンスを定義し、これらの測定値から得られる最小電圧減衰量の $\alpha V_{\min}$ (入力電圧と出力電圧の比) は、

$$\alpha V_{\min} = 20 \log_{10} (Z_0 \times g_0)$$

$$\text{ただし、} g_0 = \frac{R}{R^2 + X^2} \text{ ジーメンズ}$$

Z_0 は伝達インピーダンスの絶対値で、 g_0 はテブナンインピーダンス $R + jX$ より求める。

この方法では、EMIフィルタのテブナンインピーダンス

と負荷回路のインピーダンスがコンジュゲートにあり、減衰量が最小となるため、最悪条件下での測定であるといえるが、高周波における電圧測定、電流測定を伴うので困難が残るとともに測定治具による測定の再現性の問題など検討すべき課題は多い。また同様にCISPR Publ. 17に述べられている近似測定法では、電源-EMIフィルタ負荷のインピーダンスの不整合の影響をみるために、広帯域トランスを使用した0.1Ω/100Ωシステムを提案している。

この方法は、インピーダンスの不整合によりカットオフ周波数で負の挿入損失量、すなわち挿入利得が起こり、不要なリングングを起こす可能性があるため、不整合環境を作り、より悪い環境での伝送特性を測定する方法である。

このように様々な試験方法が検討されているがCISPR Publ.17でも提案している「実用状態による試験法」が現在のところ最良の方法といえよう。

どのように高性能に設計されたEMIフィルタでも、使用方法によってはまったく効果が得られなかったり、逆にシステムの性能が劣化する例が報告されている^{C7)}。電源ケーブルの筐体の入口からEMIフィルタまでの距離が長かったり、EMIフィルタの入力側にヒューズボックス、メインスイッチなどが配線されていると、電源線、EMIフィルタ、筐体を通るループ電流による磁束が他の回路板や回路部品と結合して、EMIフィルタをバイパスする結合ができ、フィルタ効果を劣化させる可能性を生ずる。したがって、フィルタの入力と出力が筐体によって遮蔽されるようレイアウトを検討すべきである。また、EMIフィルタの入出力は分離しなければならない。入出力線が束ねられる場合とインレットソケットにフィルタが封入され、分離が十分に行われている場合との比較では、1MHzあたりにおいて15dB程度の挿入損失の差異が見られ、さらに高い周波数ではこの傾向は増すことが報告されている^{C7)}。

EMIフィルタの接地点と筐体の接地点の位置が大きく異なると、EMIフィルタのリーク電流およびノイズ電流が筐体に流れることになる。これは筐体に電流を流してはならないというノイズ対策の原則を犯すことになり、様々な不具合を誘発する。例えば、筐体輻射の原因になるし、接地電位が揺さぶられ、システムの動作が不安定になる、などである。このような現象は電子装置が大型になるほど顕著に現れる。

EMIフィルタの接地リードや、パターンの微小なインダクタンスが高周波領域の挿入損失特性を劣化させる例も示されている。この例ではAWG #14を5cmの長さにして接地リードとして使用した場合の劣化の程度を示しているが、10MHzで30dBの差異があることが報告されている^{C7)}。

EMIフィルタを回路板上でディスクリットに組んでパターンを使って接地するような場合は、さらに大幅な劣化が起きている可能性がある。

電源におけるEMIフィルタに対して、データラインに使

用するフィルタをデータラインフィルタとよぶ。デジタル信号を取り扱ったデータラインでは、ビーズインダクタや前述の低域通過型フィルタを使用する場合、伝送波形の立ち上がり、立ち下りの特性が少なからず影響を受けるので注意を要する。周波数帯域が限られているアナログ信号ラインやマネージメントパスのように伝送波形の品質があまり問題にされないデータライン、不必要にパルスの立ち上がり、立ち下がりが早い部分、パターンなどのインダクタンスによりリンギングが発生しているようなラインにはビーズインダクタやT型低域通過型フィルタを使用し、高速プリンタやモニタなどに対してはEMIフィルタのコモンモードインダクタンス素子と同様の動作原理をもつ素子を使用する。このタイプのフィルタはカットオフ周波数、チャンネル数、実装構造などによって様々な形のもので商品化されており、ユーザの選択の自由度は広い。通常インダクタ素子には損失の大きいフェライトビーズ、キャパシタンス素子にはセラミックのチップをそれぞれ使用したものが多く、このようなフィルタをコネクタに組み込んだタイプではセラミックの貫通型コンデンサを利用するなどの工夫もなされている。同様の回路で構成された分布定数型のフィルタでは、絶縁膜を挟んだ導電体リボンからなる構造で、内部の複雑な共振から通常のフィルタより広帯域に減衰性能を有する分布定数型フィルタも開発されている。データラインが高速の信号を取り扱っており、前述の低域通過型フィルタの適用ができない場合、電源ラインでのコモンモードインダクタンス素子と同様の考え方に基づく素子を適用する。

個々のラインにフェライトビーズを挿入した場合と1つのフェライトビーズにデータラインをすべて貫通させた場合の違いについて比較すると、それぞれのラインに挿入した場合、ドライバ側から見たレシーバ側のインピーダンスはインダクタンスの影響を受けるが、他方の場合には負荷インピーダンスは変化しないがコモンモードに対してはインピーダンス素子となる。このことは、伝送信号に影響を与えないでコモンモード電流を抑制する効果をもつことを意味している。

最近では、電子機器の小型化や高密度実装化に伴い、前述のデータラインフィルタやインダクタも表面実装用のものでハーフピッチで20ラインまで対応可能なチップが開発され、今後、種々のEMI対策素子が表面実装型化することが期待される。

3.2 材料による対策関連

電子機器のEMI対策は、システム設計・筐体設計・回路設計・使用部品の選定・配線板の材質および構造選定・配線板の設計ルール設定等、多岐にわたる。

高度情報社会の発展が著しい昨今は、プリント配線板に要求される課題として、次に列挙する項目をクリアさせる必要がある。

- (1) 電子部品の高密度実装とパターンの細密化
- (2) 信号伝搬速度の高速化と信号の立ち上がり時間・立ち下がり時間の短縮
- (3) 移動体通信に代表されるGHz領域への高周波対応技術
- (4) EMI規制値をクリアすると共に外来ノイズに対するイミュニティの確保

これらの課題を解決するには、プリント配線板の電気特性である次の事項を明確にして、要求された仕様に適合したプリント配線板を設計・製造する技術を確認することである。すなわち、導体抵抗(R)、表皮抵抗(R_{sk})、基材の比誘電率(ϵ_r)、基材の誘電正接($\tan \delta$)、導体のインダクタンス(L)、線路の特性インピーダンス(Z_0)、クロストーク結合係数(K)等を仕様に適合させることである。

本稿では、電磁特性研究会活動の中で、実践EMI対策として、材料選定を中心に研究発表されたテーマについて、その論旨の要約を紹介する。

諸橋欣一⁸⁾は、プリント配線板のノイズ対策の動向として、当面のノイズ対策は場当たりのカットアンドトライ法であるが、次第にノイズ対策技術が向上し、配線板CADとノイズシミュレータを結合させた配線板設計法が確立することを予測している。

また、低ノイズ配線板の設計の要点は、第1が部品配置、第2が回路ブロックごとの低インピーダンスグラウンド、第3がSMD利用の高密度最短配線技術の確立であるとしている。

須藤俊夫²³⁾は、高密度実装・高速信号処理の方法としてMCMの有効性を確認した。銅/ポリイミド薄膜配線板を製作し、その特性インピーダンス(メッシュグラウンドにて)と1GHzまでの伝送特性を測定。これらのデータを基に、32ビットRISCプロセッサ、SRAMとラッチICを搭載したMCM基板を製作した。この結果RISCプロセッサの今後の高速化に対し、本方式のMCMは十分に機能を果たすことを確認した。

山本裕三²³⁾は、金属の腐食とポリマーの帯電現象について論じている。腐食の大部分は水の介在で発生し、局部電池の形成が腐食を進行させる。腐食の防止策の1方法として、不動態膜の形成という手段もある。ポリマーの帯電防止には、絶縁物の体積固有抵抗を $10^{12} \Omega \text{cm}$ 以下にすること、または、界面活性剤を用い、表面に水を吸着させ、表面固有抵抗を低下させることの2方法が一般的である。

松永茂樹²⁴⁾は、プリント配線板のグラウンド電位に接続した銅ペースト層がEMI対策に大きい効果が発揮できることを実験を主体に報告している。銅ペースト層形成でEMI対策が可能である理由は、PWBのグラウンドインピーダンスの低減、信号線の特性インピーダンスの低減、信号線の対地間ストレーキャパシタンス増加によるノイズ還流効果等によるとしている。

中村英博²⁵⁾は、マルチワイヤ配線板の伝搬時間 (T_d) を代用電荷法によるシミュレーションと実測値の比較を行った。絶縁物体内にワイヤを埋め込み、その埋め込み深さと実効比誘電率の関係をグリーン関数を用いて解いた。この関係から T_d および Z_0 を計算した。このシミュレーション結果と実測値はよく一致した。実際の配線板は単純なマイクロストリップやストリップ構造とはいえず、信号線の交差等がある。これらの3次元解析の必要性を提言している。

福川弘³⁵⁾は、通常使用されるガラスエポキシ多層銅張積層板の電気特性を測定した。その中で、絶縁物の比誘電率、信号線の静電容量、信号線のインダクタンスは周波数依存性が大きい。これに対して、特性インピーダンスはマイクロストリップ線路および、ストリップ線路共に周波数依存性が小さく、 Z_0 に関する定義式・近似式・TDR法は共によく一致することを確認した。

青木正光⁴⁰⁾は、最近の電子機器の動向から銅張積層板の今後について論じている。その主なものは、軽薄短小のハンディ機器用の積層板は、一層当たりの基材厚さは0.1mmの時代に突入、特性インピーダンス等の電気特性の均質化のため積層板の加工精度が厳しく要求される。この他、基材の高周波特性の改良、伝搬遅延時間の短縮、IVHやBVHを利用しての高密度実装化等、課題は多いと論じている。

諸橋欣一⁶⁵⁾は、プリント配線板の伝送特性の改善について、マイクロストリップ、ストリップ、共平面、共平面ストリップの4種の線路を作り、伝送損失 (10kHz~500MHz) と放射ノイズレベルを測定評価した。その結果、伝送損失では共平面回路が損失が少なく、放射ノイズテストでは共平面とマイクロストリップ構造の両面板が良好な成績を収め、実基板では本構造を採用してEMIフィルタを18個削除した。

森元昌平⁷⁰⁾は、ハイブリッドIC等に使用できるディップコート用低粘度銅ペーストを開発した。その施工法は、ハイブリッドICに絶縁物を全面コーティングし、その表面にディップにより銅ペースト層を構成した。なお、銅ペーストは1点または数点GNDピンと接続する方式である。この方式のEMI対策効果は、50MHz以下の周波数領域で約5dB、50MHz以上の周波数領域で10dB程度である。

伊藤健一⁷³⁾は、PCBのEMI対策法として3つの提言をしている。第1はベタVとベタアースの効用、第2は高周波損失の多い基板の採用、第3はスナバー回路の採用に分類できる。

第1の提言は、グラウンドインピーダンスの低減には、ベタアースプラスベタV (V_{cc} 側) の構成にして、ベタVとベタアースを対向させて、かつ両者を等面積にする。この方法で両者間のキャパシタンスが増加し、グラウンドインピーダンスが低減できることを示した。

第2の提言は、安価な紙フェノールや、紙エポキシは $\tan \delta$ が大きい。放射ノイズレベルを同一パターンのPW

Bで実測した結果、上記材質のものはCEM-3材に比べて5~9dB放射ノイズレベルを低減できる。

第3の提言は、ノイズを吸収できるものは抵抗である。たとえばバイパスコンデンサにはL分を含む。大容量コンデンサはLが大きい。大小2個のコンデンサを並列接続するとLは低減できるが、反共振が発生する。反共振点でインピーダンスが増加する。この悪影響を軽減する最良の方法はコンデンサと直列に小さい抵抗を接続し、スナバー回路を構成することである。

森元昌平⁷⁴⁾は、銅ペーストによるEMI対策の動向として、通常のリジッド配線板からFPCへの応用、最近ではハイブリッドICへの銅ペーストコーティングと次第に応用分野が広がり、それぞれの応用例でEMI対策効果を示している。特にデジタル・アナログ基板の対策ではアナログ信号のSN比の向上、メモリカードではイミューニティの向上、FPC部からの放射低減等に大きい効果を発揮していることが報告されている。

3.3 回路設計による対策関連

近年、情報伝達のスピード化の要求は電子回路を従来以上に高速化することになり、したがって、これら電子機器の発展と普及はますます、電磁環境対策 (EMI対策) が重要な課題になっている現在であり、電子回路に対する電磁波障害対策 (EMI対策) の動向は、概略次のように分類でき、それぞれについて研究され改善対策が考えられている。

- (1) ノイズの発生源である電子回路の動作状態の改善
- (2) 信号が伝達される伝送路の構成と伝搬形態の改善
- (3) 電子回路を安定に動作させる電源やグランド回路
- (4) 回路を構成する部品の実装形態と実装方法の改善
- (5) プリント配線板 (PWB) の基材や層構成と回路パターン形成の改善方法

本研究会においても回路に関連する実践的なEMI対策技術の動向は公開研究会および運営委員研究会を含めて過去4年間に106件中で3割以上に及ぶ34事例が講演発表された。その概要を紹介すれば次のような内容である。

高周波回路 (GHz帯周波数) では、衛星放送 (BS) や衛星通信用アンテナなどの回路において高誘電率基材を利用した衛星通信用多層プリントアンテナの改善方法と小型化によるコスト低減化^{33), 69), 101)}や、アンテナの給電線路などの曲がり線路における特性解析や改善方法^{42), 58)}の5件が講演発表された。また移動体通信関係では携帯用電話機の3次元実装技術による電気的特性⁷⁷⁾は特に、各IC回路間の干渉に対するアイソレーション技術が注目される。

一方、デジタル回路の高速化に関連する事例ではLSICの高集積化に対する回路実装のパッケージング方法とその特性改善対策^{10), 22), 96)}や高速デジタル回路の伝送特性と改善対策⁶⁸⁾の4件が講演、論議されている。

最近では実践的な回路設計の早期EMI対策の手法として

コンピュータを利用したシミュレーション技術による検証が定着しつつあり、電子回路の高速化と共に早期EMI対策として不可欠なものになってきている。この応用例として高速デジタル回路設計の検証⁵¹⁾やTDR法によるインターコネクションの電気的特性の検証¹⁰⁴⁾および、伝送線路のノイズシミュレータ^{21), 27), 72)}について5件の紹介説明が行われ、プリント配線板(PWB)の回路設計時点でEMI対策がCADと連動したシミュレーション技術によって、短期間にその概略の検証が可能になってきた。

PWBの伝送線路に関するノイズ対策としてPWBのノイズ対策技術^{5), 8)}ではその対策方法や技術動向について解説がなされた。またプリント回路板の近傍ノイズ対策³⁴⁾では、信号系のバスラインやクロックラインの放射ノイズに関連して問題点を提起した。

マイクロストリップ線路ではグラウンド導体のスロットに対する信号伝送特性と改善方法⁸¹⁾や多層プリント回路板のグラウンド面のスリットによる放射ノイズの低減法⁸²⁾などは信号とリターングラウンドに関する改善対策方法であり、またグラウンド導体の強化対策による放射ノイズの低減方法として銅ペースト処理したプリント回路板も注目され、放射ノイズを低減するデジタルPWBの設計^{24), 83)}や銅ペースト処理したSW電源回路のEMI対策¹⁶⁾が講演、論議された。一般にPWBのグラウンドリターン回路は常に有限のインピーダンスが存在し、それが無視できるかどうかの問題で、その影響力は大きく関係してくるのでPWBのEMI対策として重要な課題となる。その他に電源グラウンド回路の電流ループによる放射ノイズ^{15), 64)}や、バイパスコンデンサの特性改善⁸⁴⁾の提案もなされている。

ノイズ対策と密接に関係するPWBの部品実装レイアウト設計関連では伝送線路シミュレータによるレイアウト設計²⁹⁾と放射ノイズを考慮した部品配置支援ツール⁵⁹⁾やラバーバンド表現によるグリッドレス・レイアウトシステム³⁸⁾およびラバーバンド表現によるグリッドレス・ルータ³²⁾の4事例が提唱された。

一方では電子機器や電子回路が電磁波妨害(EMS対策)を受ける場合もEMI対策と同様に電子回路のノイズ排除能力が重要な課題になってくるわけで、この研究会においても落雷による家電機器の障害²⁾や雷現象と電子機器の障害⁶⁾例と近年の電子機器の筐体(キャビネット)や機構部品のプラスチック化による製品と電子回路に対する静電気の発生と障害³¹⁾のメカニズムと実際の事例について研究紹介があり、PWB回路設計における静電気対策技術として大変参考になるものと思われる、また実際のEMC測定と対策方法⁴⁹⁾および機器のEMC⁷⁵⁾やTEMセルによるパソコンのイミュニティ測定と評価⁷⁾について解説が行われ、最近のEMC早期対策の動向は大がかりなオープンサイトや電波暗室などの設備を利用せずに、簡便なベンチマーク、テストによる早期対策の評価方法が検討されつつあり、今後の

展開が期待されている。

電磁環境対策は、電磁波利用の多様化と共に国際的な見地からより良い電磁環境改善が必要であり、今後共に大きな研究テーマの1つになると考えられ、今後の発展が期待されるところである。

4. その他の研究

電磁特性研究では広い分野の研究がされており、以下に成果を述べる。

- (1) EMC, EMIの理論から対策までを前節で研究しているが、発生している雑音がそのまま情報の漏れであることも事実である。瀬戸信二⁶⁶⁾はパソコンからの雑音が電磁波の放射や伝導放射により外部に漏れていることを指摘、さらにこの雑音を受信してほぼ完全な情報の再現ができることを示した。妨害波としての側面だけでなく、情報管理の面でもこうした不要放射の低減がますます重要になっているといえる。
- (2) 電磁特性を論じていくなかで基本的な概念として、扱う信号の遅延を論じる際の信号の速さに関して、周英明¹³⁾は波動の伝搬を「位相速度」「波頭速度」「信号速度」「群速度」「エネルギー伝送速度」の5通りに分け、解説を加えた。
- (3) 静電気による障害は各種発生するが、そのうちの電磁ノイズによる障害も対策の難しい問題である。電気回路の絶縁性と相反するように静電気が発生しやすい環境が整う。帯電した電荷の放電に際しては、ノイズの発生や破壊を伴うことが多々ある。山本裕三²³⁾は電気絶縁性に優れているポリマーの接触帯電機構について、ポリマー表面にも電子の授受を可能にする電子密度の高い領域が存在すると想定したDukeらのモデルを解説し、帯電防止についても防止技術とその機構について報告した。また、村田雄司³¹⁾は静電気障害の事例を分析しそのメカニズムを論じた。また帯電と放電の機構を解説し、その抑制について事例を上げて報告した。
- (4) 電磁特性の改善や対策等で金属を扱う場合が多々あるが、金属表面の酸化現象をわかりやすく解説したのが山本裕三²³⁾である。ここでは金属面の酸化の進行、すなわち腐食について、水が存在しない乾食と水が存在する湿食について、その機構を解説した。

5. あとがき

以上、本学会電磁特性研究会における、過去4年間のプリント回路の電磁気学的な視点に立った研究の進展について紹介した。本稿が、学会員諸氏のEMC関連の研究や仕事において、かならずや一助になるものと信じている。電磁特性研究会の活動は、これで終わったわけではなく、今後も継続される。研究会等の講演やディスカッション、ま

たWGにおける活動等にできるだけ多くの方々が参加されることを希望し、回路実装技術のなお一層の発展を期待する次第である。

(1995.4.28－受理)

文 献

■電磁特性研究会発表関連

※引用文献に次の略記号を使う。

「B-n委報」：プリント回路学会電磁特性研究会，第 n 回（平成3～4年度）運営委員会

「C-n委報」：プリント回路学会電磁特性研究会，第 n 回（平成5～6年度）運営委員会

「研報B」：プリント回路学会電磁特性研究会活動報告書（平成3～4年度）

「研報C」：回路実装学会*電磁特性研究会活動報告書（平成5～6年度）

「研論」：プリント回路学会電磁特性研究会公開研究会論文集（ISSN 0917-5555）

*：1994年6月より、「プリント回路学会」は「回路実装学会」と名称が変更された。

- 1) 中村英博：“伝送線路電気特性評価方法の隘路についての考察”，B-2委報；研報B, p.9（1993）
- 2) 首藤克彦：“落雷による家電機器の障害”，B-2委報；研報B, pp.10-11（1993）
- 3) 徳重寛吾，他：“TEMセルを用いたパーソナルコンピュータのイミュニティ測定と評価”，B-2委報；研報B, pp.12-13（1993）
- 4) 佐藤政生：“BEAR：次世代ビルディングブロック・レイアウト・システム”，B-2委報；研報B, p.14（1993）
- 5) 渋谷昇：“プリント配線板におけるノイズ対策技術”，研論，Vol.1, No.1, pp.1-6（1991）
- 6) 首藤克彦：“雷現象とそれによる電子機器の障害”，研論，Vol.1, No.1, pp.7-12（1991）
- 7) 徳重寛吾，他：“TEMセルを用いたパーソナルコンピュータのイミュニティ測定と評価”，研論，Vol.1, No.1, pp.13-18（1991）
- 8) 諸橋欣一：“プリント配線板ノイズ対策技術の動向”，研論，Vol.1, No.1, pp.19-24（1991）
- 9) 森崎慎也，他：“プリント回路のクロストーク中央遮蔽導体の接地と遮蔽効果”，研論，Vol.1, No.1, pp.25-30（1991）
- 10) 角憲明：“TCPにおけるCMOS LSIの同時スイッチングノイズの評価”，B-3委報；研報B, p.15（1993）
- 11) 周英明，他：“理科大電気工学科周・越地研究室研究活動紹介”，B-3委報；研報B, pp.16-17（1993）
- 12) 高橋丈博：“電磁放射ノイズシミュレータの評価について”，B-3委報；研報B, p.18（1993）
- 13) 周英明：“信号の伝搬速度について”，研論，Vol.1, No.2,

pp.1-6（1991）

- 14) 西方敦博：“多層基板の近傍電磁界解析のためのGreen関数の定式化”，研論，Vol.1, No.2, pp.7-12（1991）
- 15) 金子俊之，他：“放射ノイズ予測のための電流ループの検討”，研論，Vol.1, No.2, pp.13-18（1991）
- 16) 出口博一，他：“スイッチング電源のEMI対策”，研論，Vol.1, No.2, pp.19-24（1991）
- 17) 大西輝夫，他：“FD-TD法を用いたマイクロストリップアンテナの解析”，研論，Vol.1, No.2, pp.25-32（1991）
- 18) 大滝徹：“テスト基板のEMスキャンdifferentialノイズの測定”，B-4委報（文献44），45）参照）
- 19) 林昌世：“電子機器筐体表面の電流分布解析”，B-4委報（文献26）参照）
- 20) 勅使河原治：“3次元実装の一例と信頼性”，B-4委報；研報B, p.20（1993）
- 21) 松井則夫：“配線・接続部を考慮したノイズシミュレータ”，B-5委報（文献27）参照）
- 22) 須藤俊夫：“マルチチップ・モジュールと電気設計”，B-5委報；研報B, p.19（1993）
- 23) 山本裕三：“導電性複合材料—金属及びポリマーの表面特性について”，研論，Vol.1, No.3, pp.1-8（1992）
- 24) 松永茂樹：“銅ペーストによるEMI対策配線板の放射ノイズ低減特性”，研論，Vol.1, No.3, pp.9-16（1992）
- 25) 中村英博：“マルチワイヤの伝搬特性”，研論，Vol.1, No.3, pp.17-26（1992）
- 26) 林昌世：“電子機器筐体表面の電流分布解析”，研論，Vol.1, No.3, pp.27-34（1992）
- 27) N. Matsui et al.：“Interconnection Noise Simulation”，研論，Vol.1, No.3, pp.35-41（1992）
- 28) 河上功：“プリント基板設計へのシミュレータの利用”，B-6委報（口頭発表）
- 29) 柳本太加志：“伝送線路シミュレータを使用したレイアウト設計”，B-6委報；研報B, p.21（1993）
- 30) 越地耕二：“共平面形線路の直角ベンド”，B-7委報；研報B, p.23（1993）
- 31) 村田雄司：“入門教育講座「静電気の発生と障害」”，研論，Vol.2, No.1, pp.1-6（1992）
- 32) 栗島亨，他：“ラバーバンド表現に基づいたグリッドレス・ルータ”，研論，Vol.2, No.1, pp.7-12（1992）
- 33) 田邊浩介，他：“衛星通信用多層プリントアンテナ”，研論，Vol.2, No.1, pp.13-20（1992）
- 34) 和田修己，他：“高速デジタルプリント回路基板の近傍電磁雑音の要素分解”，研論，Vol.2, No.1, pp.21-28（1992）
- 35) 福川弘：“多層銅張積層板の電気特性”，B-8委報；研報B, pp.24-25（1993）
- 36) 中村英博：“三次元伝送線路シミュレータの適用検討”，B-8回報；研報B, pp.26-27（1993）
- 37) 首藤克彦：“雷害による破壊例”，B-8委報（口頭発表）

- 38) 佐藤政生：“柔軟性の高いレイアウト戦略ーラバーバンド表現に基づいたグリッドレスレイアウトシステムー”，B-9委員報；研報B, p.28 (1993)
- 39) 林昌世：“金属筐体電磁波漏洩数値実験”，B-9委員報；研報B, pp.29-30 (1993)
- 40) 青木正光：“入門教育講座「プリント配線板用銅張積層板」ー材料の種類とその応用例についてー”，研論，Vol.2, No.2, pp.1-12 (1992)
- 41) 高橋丈博,他：“事例を用いたノイズ理解支援システムの開発”，研論，Vol.2, No.2, p.13-16 (1992)
- 42) 澤佐博行,他：“共平面形線路の円形曲がり部の透過特性”，研論，Vol.2, No.2, pp.17-24 (1992)
- 43) 勝山芳郎,他：“EMIシミュレーションで何ができるかーEMI対策からEMI設計への転換ー”，研論，Vol.2, No.2, pp.25-31 (1992)
- 44) 大滝徹：“プリント基板設計に関する現状の課題”，B-10委員報；研報B, p.31 (1993)
- 45) 大滝徹：“放射ノイズの基礎検討”，B-10委員報；研報B, p.32 (1993)
- 46) 河上功：“電気特性考慮のポイント”，B-10委員報（口頭発表）
- 47) 越地耕二：“電子情報通信学会環境電磁工学研究専門委員会主催，電子機器のEMC設計・対策ー理論と実際ーワークショップ（湯沢）”，B-10委員報（口頭発表）
- 48) 周英明：“プリント回路学会技術研究委員会主催，EMI/Cワークショップ（湯河原）”，B-10委員報（口頭発表）
- 49) 堀田幸雄：“入門教育講座「EMCの測定と対策」”，研論，Vol.2, No.3, pp.1-8 (1993)
- 50) 松永茂樹：“ロジックICの特性を考慮したノイズ対策”，研論，Vol.2, No.3, pp.9-14 (1993)
- 51) 池田三喜夫,他：“高速デジタル回路設計の検証”，研論，Vol.2, No.3, pp.15-24 (1993)
- 52) 前田真一：“レイアウトツールとシミュレータの統合化”，研論，Vol.2, No.3, pp.25-31 (1993)
- 53) 島山鶴雄：“電磁調理器よりの漏洩電磁界”，研論，Vol.3, No.1, pp.1-4 (1993)
- 54) 渋谷茂一,他：“EMCサイトの自由空間化（2）ーイミューニティー勧告案の問題点と指定領域の自由空間化ー”，研論，Vol.3, No.1, pp.5-10 (1993)
- 55) 横島一郎,他：“モノポールアンテナの複素アンテナファクタの測定”，研論，Vol.3, No.1, pp.11-16 (1993)
- 56) 横島一郎,他：“三アンテナ法によるグラウンドプレーンのダイポールアンテナのアンテナファクタ測定”，研論，Vol.3, No.1, pp.17-22 (1993)
- 57) 篠塚隆,他：“曲がりのあるプリントパターンからの放射”，研論，Vol.3, No.1, pp.23-28 (1993)
- 58) 澤佐博行,他：“共平面線路の角形曲がり部の放射特性”，研論，Vol.3, No.1, pp.29-34 (1993)
- 59) 樽井勇之,他：“放射を考慮した部品配置支援ツール”，研論，Vol.3, No.1, pp.35-39 (1993)
- 60) 勅使河原治：“シールド効果を強化した高密度実装”，C-2委員報
- 61) 高橋丈博：“抵抗を接続したバスコンの効果”，C-2委員報，研報C, pp.9-10 (1995)
- 62) 澤佐博行：“共平面形線路の曲がり部の透過特性ー角形と円形曲がりー”，C-2委員報，研報C, p.11 (1995)
- 63) 和田修己：“電子情報通信学会環境電磁工学研究専門委員会ワークショップ（湯沢）報告”，C-3委員報
- 64) 和田修己：“ノイズ対策のための配線”，C-3委員報（口頭発表）
- 65) 諸橋欣一：“プリント配線板の伝送特性と改善方法”，C-3委員報，研報C, pp.15-16 (1995)
- 66) 瀬戸信二：“パソコンからの電磁的情報漏洩対策の現状”，研論，Vol.3, No.2, pp.1-8 (1993)
- 67) 松永茂樹：“ICの選択とディジタル配線板の電源系差動モードノイズ低減法”，研論，Vol.3, No.2, pp.9-14 (1993)
- 68) 古谷親生,他：“高速ディジタル回路パターンにおけるクロストーク”，研論，Vol.3, No.2, pp.15-20 (1993)
- 69) 山田茂貴,他：“衛星通信用多層プリントアンテナー特性改善と薄形化ー”，研論，Vol.3, No.2, pp.21-29 (1993)
- 70) 森元昌平：“ディップコートタイプポリマー型銅ペースト”，C-4委員報，研報C, pp.17-18 (1995)
- 71) 松永茂樹：“ノイズ低減のための能動素子の選定”，C-4委員報，研報C, pp.19-20 (1995)
- 72) 松井則夫：“伝送線路と放射雑音のシミュレータ”，C-4委員報（口頭発表）
- 73) 伊藤健一：“バスコンではなく，スナバーだ！ー高損失化，高 ϵ 化こそ本命ー”，研論，Vol.3, No.3, pp.1-24 (1994)
- 74) 森元昌平：“銅ペーストによるEMC対策の動向”，研論，Vol.3, No.3, pp.25-34 (1994)
- 75) 五味久喜：“機器のEMC”，研論，Vol.3, No.3, pp.35-44 (1994)
- 76) 高橋丈博,他：“等価回路網法による放射ノイズ計算”，研論，Vol.3, No.3, pp.45-50 (1994)
- 77) 堀田幸雄：“タイムドメイン・イミューニティ測定システム”，C-5委員報（文献98）参照
- 78) 林昌世：“電磁波源の数値解析とEMC問題への応用ー金属筐体モデルー”，C-5委員報，研報C, pp.21-22 (1995)
- 79) 角憲明：“LSIの出力同時変化の許容値（シミュレーション）”，C-6委員報（口頭発表）
- 80) 中村英博：“転写法による自動検査用PCB”，C-6委員報（口頭発表）
- 81) 久保田達也,他：“マイクロストリップ線路のグラウンド導体のスロットと信号伝送特性”，研論，Vol.4, No.1, pp.1-8 (1994)
- 82) 久保博,他：“多層プリント回路基板のグラウンド面のスリッ

- トにより増加する放射電磁波の低減法”, 研論, Vol.4, No.1, pp.9-16 (1994)
- 83) 松永茂樹: “放射ノイズレベルを低減するディジタルプリント配線板の設計”, 研論, Vol.4, No.1, pp.17-24 (1994)
- 84) 高橋丈博,他: “抵抗つきパスコンによるノイズ低減効果”, 研論, Vol.4, No.1, pp.25-32 (1994)
- 85) 黒内利明, 他: “微小領域におけるノイズセンシング技術の研究”, 研論, Vol.4, No.1, pp.33-38 (1994)
- 86) 沼澤佳宏, 他: “抵抗皮膜を用いた格子状電波吸収壁の解析”, 研論, Vol.4, No.1, pp.39-44 (1994)
- 87) 長尾泰司,他: “平板シールドによる近傍電磁波源の変換作用”, 研論, Vol.4, No.1, pp.45-50 (1994)
- 88) 半田晋之,他: “デジタル回路上の誘起雑音信号と誤動作機の実験的検討”, 研論, Vol.4, No.1, pp.51-58 (1994)
- 89) 上村一司,他: “自動車の静電気制電性能の実験法の開発”, 研論, Vol.4, No.1, pp.59-64 (1994)
- 90) 半杭英二,他: “磁界印加形プリント基板用イミュニティ評価装置”, 研論, Vol.4, No.1, pp.65-70 (1994)
- 91) 越地耕二: “共平面形線路の曲がり部の透過特性の改善”, C-7委報, 研報C, p.23 (1995)
- 92) 山口正憲: “Transient Analysis of Dispersive Signal Line Terminated with CMOS Devices”, C-7委報, 研報C, pp.25-26 (1995)
- 93) 中村英博: “PCB自動検査システム”, C-7委報 (口頭発表)
- 94) 大滝徹: “プリント基板から反射するノイズ”, C-8委報, 研報C, p.27 (1995)
- 95) 太田義昭,他: “共平面形線路のクロストーク”, 研論, Vol.4, No.2, pp.1-12 (1994)
- 96) 高橋丈博,他: “ICパッケージのリードパラメータの検討”, 研論, Vol.4, No.2, pp.13-18 (1994)
- 97) 勅使河原治,他: “携帯電話用3次元実装技術と電気回路特性”, 研論, Vol.4, No.2, pp.19-24 (1994)
- 98) 堀田幸雄: “タイムドメイン・イミュニティ測定システム”, 研論, Vol.4, No.2, pp.25-28 (1994)
- 99) 上芳夫: “Intern. Symp. EMC' 94/Roma”, C-9委報 (口頭発表)
- 100) 柳本太加志: “多層基板の層構造による放射電界強度の違い”, C-10委報, 研報C, p.28 (1995)
- 101) 中村直準,他: “平行ストリップ線路給電による多層プリントアンテナ”, 研論, Vol.4, No.3, pp.1-8 (1995)
- 102) 戸花照雄,他: “有限プリント基板の近傍磁界測定”, 研論, Vol.4, No.3, pp.9-14 (1995)
- 103) 藤尾昇平,他: “シミュレーション技術によるEMC設計の実践”, 研論, Vol.4, No.3, pp.15-20 (1995)
- 104) 猪腰勇: “インターコネクト・パラメータ・アナライザを用いたパッケージの電気的特性評価とモデリング”, 研論, Vol.4, No.3, pp.21-26 (1995)
- 2.1 解析理論関連
- A1) C.R.Paul: “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, John Wiley & Sons Inc. (1992)
- A2) 山下栄吉監修: “電磁波問題の基礎解析法”, 電子情報通信学会, 1987年
- A3) 山下栄吉監修: “電磁波問題解析の実際”, 電子情報通信学会, 1993年
- 2.2 測定理論関連
- B1) 川上功: “プリント配線板の伝送特性のシミュレーションおよび実測”, サーキットテクノロジー, Vol.7, No.3, pp.175-182 (1992)
- B2) 五十嵐力, 柳本太加志: “測定技術—EMIの簡易測定とサイト測定”, サーキットテクノロジー, Vol.9, No.4, pp.243-247 (1994)
- B3) 高谷和宏, 他: “ディジタル回路が構成するループの共振による放射電磁雑音スペクトルの表現”, 信学技報, EMCJ94-55 (1994-11)
- B4) 和田修己, 他: “CMOS論理ICの電気的特性の違いによるプリント回路からの放射電磁雑音量の変動”, 信学技報, EMCJ93-39 (1993-09)
- B5) 和田修己, 他: “ディジタルICのパッケージ種類と放射電磁雑音”, サーキットテクノロジー, Vol.9, No.3, pp.175-182 (1994)
- B6) 松本史生, 他: “ディジタル基板に誘起される電磁雑音と回路の誤動作”, 信学技報, EMCJ92-88 (1993-03)
- 3.1 部品による対策関連
- C1) Y.Hotta, et al.: “Effect of Line Impedance on Radiated Emission”, IEEE EMC Symposium 1992
- C2) Y.Hotta et al.: “EMI from personal computers”, IEEE EMC Symposium Record 1985
- C3) Y.Hotta et al.: “The Magnetic Characteristic of the suppressing noise generated by a phase controlled thyristor”, IEEE EMC Symposium Record 1975
- C4) 堀田幸雄: “パーソナルコンピュータのEMI対策例”, 信学会EMCJ 1983
- C5) CISPR Publication 16
- C6) CISPR Publication 17
- C7) Y.Hotta et al.: “EMI from personal computers”, IEEE EMC Symposium Record 1985

越地 耕二 (こしじ こうじ)

昭和22年生まれ。昭和47年東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在、同大学助教授。工学博士。電波システム、医用電子工学、特に超高周波帯におけるプリント回路の電磁特性解析に関する研究等に従事。

堀田 幸雄 (ほった ゆきお)

昭和24年生まれ。昭和47年、近畿大学理工学部電子工学科卒業。現在、株式会社トーキンにおいて、電磁妨害波やイミュニティ問題に対する計測、対策技術の開発に従事。

林 昌世 (はやし しょうせ)

昭和24年生まれ。昭和57年東京大学理学系地球物理学博士課程中退。現在、株式会社NEC情報システムズにおいて、EMC関連数値解析・シミュレーションの開発に従事。

松永 茂樹 (まつなが しげき)

昭和10年生まれ。昭和29年徳山曹達株式会社(現・株式会社トクヤマ)に入社。昭和38年国立宇部工業短期大学電気科卒業。電気・計装、セメント製造、プラント建設に携わり、昭和63年よりプリント配線板の設計業務に従事。

澤佐 博行 (さわさ ひろゆき)

昭和33年生まれ。平成7年東京理科大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。現在、防衛庁技術研究本部において、通信機の研究開発に従事。

諸橋 欣一 (もろはし きんいち)

昭和8年生まれ。昭和34年、工学院大学電気工学科卒業。現在、株式会社シイエムケイ回路設計センター回路設計部において、PWBの伝送特性の研究とノイズ対策、およびCAD設計、VE設計などに従事。

和田 修己 (わだ おさみ)

昭和32年生まれ。昭和62年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。現在、岡山大学工学部電気電子工学科助教授。デジタルプリント回路板の放射性EMIの予測法に関する研究に従事。

勅使河原 治 (てしがわら おさむ)

昭和23年生まれ。昭和45年、東京理科大学工学部電気工学科卒業。現在、日本無線株式会社研究所において、携帯電話用のデバイスおよび実装技術開発に従事。

高橋 丈博 (たかはし たけひろ)

昭和38年生まれ。昭和62年東京農工大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。昭和63年拓殖大学工学部情報工学科助手。工博。プリント配線板における伝導性および放射性雑音の研究に従事。