

# WBFC法による半導体イミュニティ測定に関する実験的検討

香川直己

Experimental Study of WBFC method for testing electromagnetic immunity of integrated circuits

Naoki KAGAWA

## ABSTRACT

The author made a workbench faraday cage, WBFC, in order to estimate performance of the WBFC method for the measurement of common mode noise immunity of integrated circuits. In this report, characteristics of the constructed workbench faraday cage and results of experimental study of effects of the common mode noise on a circuit board including an electronic device are shown. Selected DUT, LM324 is popular operational amplifier for electrical circuits in vehicles.

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

Keywords: WBFC method, common mode, operational amplifier, immunity, integrated circuits

## 1. まえがき

病院や航空機内での携帯電話や電子機器の使用が制限されるのはEMI ( Electromagnetic Interference ) を危惧するためであり, これは同時にその現象の不明瞭さの証といえる。従って, 携帯電話などの高周波通信機器などが発する様々な電磁波の影響を受けた電子機器が予期せぬ動きをし, 我々が不利益を被ることを事前に防ぐために, 「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, 医療, 車載機器のような高度な電子・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, いくつかの簡便な測定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<sup>1)</sup>。

これらの測定法の一つとして, 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) 法があり, 現在の規格化が進められている<sup>1)</sup>。WBFC法は, 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の耐性を評価するものであり, WBFCとは金属箱 (筐体) の名称である。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<sup>2)</sup>。

今回, WBFC法を検討するためにWBFCを製作し, これを用い, WBFC法による集積回路のコモンモード雑音に対するイミュニティに関する基礎的な考察をオペアンプを実装した回路基板のイミュニティ測定を通じて行った。そこで, 本報告では, 製作したWBFCの基本構造および特性を示し, 更に, オペアンプのイミュニティ測定の結果について報告する。

実験の対象としたオペアンプはLM324とした。これは, 低消費電流であり, 土両電源1.5V~16Vで動作可能, 更に単電源3~32Vでの動作が可能という特徴から車載装置の中によく使用されるオペアンプの一つである<sup>3)</sup>。このオペアンプを用いたRFノイズ耐性の検討は服部らにより行われており, これはオペアンプの各端子から大振幅のRF信号を注入した場合のアンプの直流出力電圧変動を評価し, その誤動作要因を検討したものである<sup>3)</sup>。そこで, 本報告では, 基本的な回路構成, 測定条件および誤作動の判断も服部らの手法

に倣い、その上で、WBFC法により印加したコモンモード雑音に対するオペアンプの直流出力電圧とIC端子に流れるRF電流に着目し、両者の因果関係を調べ、その結果からコモンモード雑音がICに与える誤動作の要因を考察する。

## 2. WBFC (Workbench Faraday Cage) の概要

図1に示すように、作成したWBFCは厚さ1mmの鉄板を電気溶接し、側面と底面を形成し、厚さ5mmの鉄板で天蓋を設けた構造をしている。寸法は500mm x 350mm x 150mmであり、蓋の裏面と内側面に電波吸収シートを貼った。被測定基板は、WBFCの床上30mmの場所に置けるように、支持台を設けた。これには絶縁性が要求されるため、装置では30mmの高さの非金属製スペーサを立てこれを支持台とした。

直流電源のような外部装置とICとの配線は、側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基板に接続した。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(2.5 kΩ @ 10 MHz に相当)、FSRH190285RT000T (村田製作所) に対して2回巻き(800 Ω @ 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。

駆動信号、RF信号の供給端子および、測定端子には、非貫通形のBNCコネクタを使用し、WBFCの側面に底板から30mmの位置に取り付けた。壁面には5つのBNCコネクタを準備した。これらのコネクタは、対面する箱長辺の一方に三つ、他方に二つ配した。

コモンモードインピーダンスとしては、150 Ωが目

標値となる。これを実現するために、WBFCの底板から30mmの位置に固定した直径13 mm ± 1 mm、長さ100mmのガスケットを内導体に用い、これをワニ口クリップで被測定対象のコモンモードポイントに接続した。これらの線路と50 Ω系周辺計測機器のインピーダンス整合には390 Ωの抵抗素子を4本並列接続したものを使用した。従って、それぞれの線路の一端は約100 Ω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100 Ωの純抵抗を介して、50 Ω 終端に接続される構造になっており、50 Ω - 150 Ωのインピーダンス変換ケーブルを構成することになる。図2に作成したインピーダンス変換ケーブルを示す。測定対象の大きさが異なることを想定し、50mm、100mm、130mmのものを準備した。

## 3. インピーダンス変換ケーブルの特性評価

自作したインピーダンス変換ケーブルで形成される伝送線路の特性インピーダンスを評価した。図3に線路の特性インピーダンスの測定におけるWBFC内の構成を示す。自作した2本の変換ケーブルでガスケット導体を挿むことで直列接続した。一端を入力端とし、ここに広帯域オシロスコープ(86100A: Agilent)のTDR (Time Domain Reflectometry) モジュール(54754A: 同)、およびネットワークアナライザ(8753E: 同)の2種類の測定機器を接続し、それぞれの計測器によって、時間領域と周波数領域における特性インピーダンスを測定した。なお、ここでは以下の実験でも使用し、特に使用頻度の高い100mmの変換ケーブルの結果を示す。

TDRにより測定した特性インピーダンスを図4に示す。横軸は伝播時間から算出した距離を示しており、

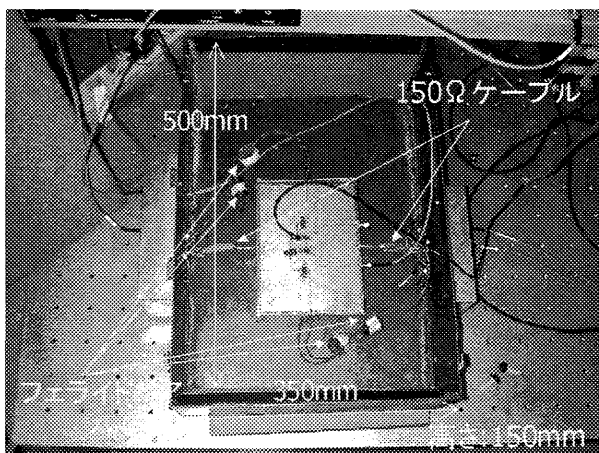


図1 WBFCの俯瞰  
Fig.1 Top-view of constructed WBFC.

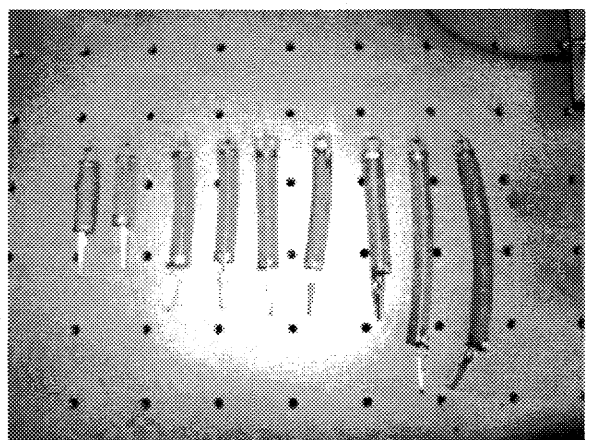


図2 自作したインピーダンス変換ケーブル群  
Fig.2 Trance impedance lines made of gasket cables.

WBFC 前後の各地点における特性インピーダンスとなる。図4は100mmの変換ケーブルの測定結果である。直列接続の場合、100Ωの抵抗と線路の特性インピーダンスを併せた250ΩがWBFC内の伝送線路部分に安定に現れることが望ましい。測定の結果から、WBFC内部の平均値において全体的に目標値より低い値を示し、ワニ口クリップによる接続部分と思われる個所においてややインピーダンスの上昇が見られる。IECにおいて協議されている変換ケーブル部の特性インピーダンスはガasketケーブル一本の周波数特性により指針が示されつつある。そこで、ネットワークアナライザにより、伝送線路部分の特性インピーダンスの周波数特性を測定し、IECによる指針と比較した。測定では対抗する2本のガasketケーブルを用いている

ため、奨励基準との比較にあたっては、入力側の100Ωの抵抗を差し引く必要がある。図5にその結果を示す。図中の実線が奨励されている特性インピーダンスの許容範囲である。これより、ほぼ許容範囲内にあると判断し、製作したWBFCを用いて、オペアンプの雑音耐性を測定した。

#### 4 LM324 実装基板の雑音耐性測定

##### 4.1 被測定基板

オペアンプLM324を実装したプリント基板の共通モードノイズに対する電磁波耐性測定を行った。この実験では、150mm x 200mmの両面基板を用い被測定基板を作成した。基板は、裏面全面をグランドプレーンとし、表面はコプレーナー形状としている。

対象としたオペアンプLM324はDIPパッケージを使用した。各素子は、バイポーラ型トランジスタ入力で形成されている。このオペアンプは低消費電流であり、±両電源1.5V～16Vで動作可能、更に単電源3～32Vでの動作が可能という特徴から車載装置の中によく使用されるオペアンプの一つである<sup>3)</sup>。また、利得帯域幅は1MHzである。

試験回路の配線図を図6に示す。これは、ICパッケージに含まれる4素子の中の1つを用いており、回路構成は服部らの実験に倣い、100倍の反転増幅回路を構成した上で反転入力、非反転入力端子ともに1kΩのチップ抵抗を介して基板GNDに接続することで入力電圧を0Vとした<sup>3)</sup>。

この実験基板では更に図6①～④で示す位置に測定用電流プローブ(Tektronix CT-6:High Frequency AC Current Probe:B011177)で各端子に流れるRF電流を測定することができるようにジャンパーラインを配している。電流プローブを配置させない箇所は、

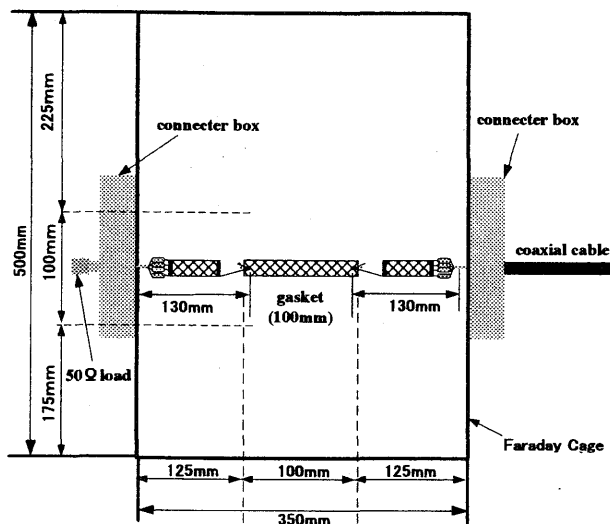


図3 インピーダンス変換ケーブルの特性評価測定系  
Fig.3 Schematic diagram of inside of the WBFC for estimation of trace impedance cables.

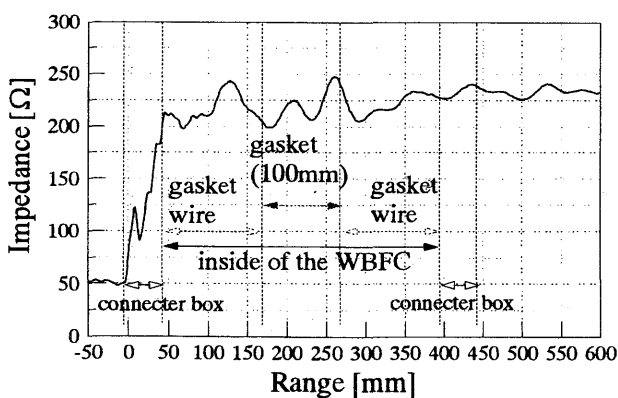


図4 インピーダンス変換ケーブルの特性インピーダンスの時間領域測定の結果  
Fig.4 Time domain characteristics of a trace impedance line.

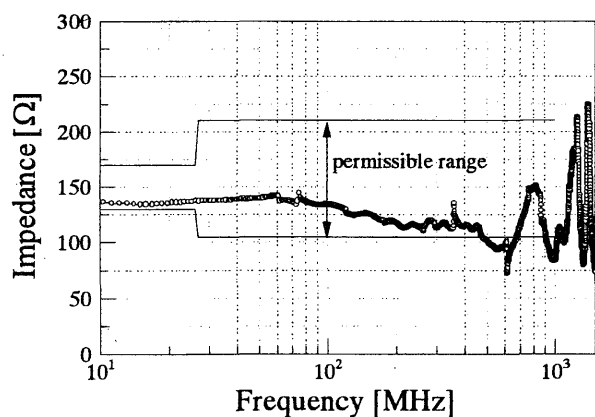


図5 インピーダンス変換ケーブルの特性インピーダンスの周波数特性  
Fig.5 Frequency characteristics of a trace impedance line.

ジャンパー線だけで配線した。この時のジャンパー線の長さは、約15mmとした。図中 $C_1$ 、 $C_2$ は1000pFのバイパスコンデンサであり、実験ではこれらのコンデンサを実装した場合と取り外した場合で測定を行った。コンデンサを実装位置はICパッケージピンのごく近傍とした。

#### 4.2 測定方法

図7に測定配線図を示す。被測定基板はWBFCの底から30mmの高さに設置した。励振源として信号発生装置 (HEWLETT PACKARD :8648B) を用いRF信号をBNCコネクタ、50Ω-150Ω変換ケーブルを介して基板のグラウンドとWBFC間に印加した。また、今回測定器を接続しないもう一方の変換ケーブルには50Ω終端を接続した。

RF信号は10MHz~1.5GHzまで10MHz間隔で変化させ、入力パワーは14.5dBmとした。オペアンプの駆動には2台の直流電源 (KIKUSUI ELECTRONICS CORP : 49288094/49288095) を用い、それぞれ前述のπ型ローパスフィルタおよび、コモンモードコイルを介して+7V、-7Vを供給した。

測定対象は反転増幅器の出力信号の直流成分 (平均値) と交流成分 (実効値) とし、同時にコモンモード励振時に各ICピンに流れる高周波電流を電流プローブ (CT-6:High Frequency AC Current Probe: B011177:Tektronix) で測定した。これらの信号はデジタルオシロスコープ (infinium digital oscilloscope US41080113 54845A:Agilent) を用

いて測定した。オシロスコープの入力インピーダンスは50Ωである。なお、本実験では、コモンモードポイントを基板の200mmの辺の端の対向する地点とし、かつ部品面を上に向けて測定を行った。

#### 4.3 測定結果および考察

図8に注入RF信号の周波数に対するオペアンプの直流出力の変化を示す。破線は $C_1$ 、 $C_2$ のバイパスコンデンサーを外した場合であり、実線は実装した場合の

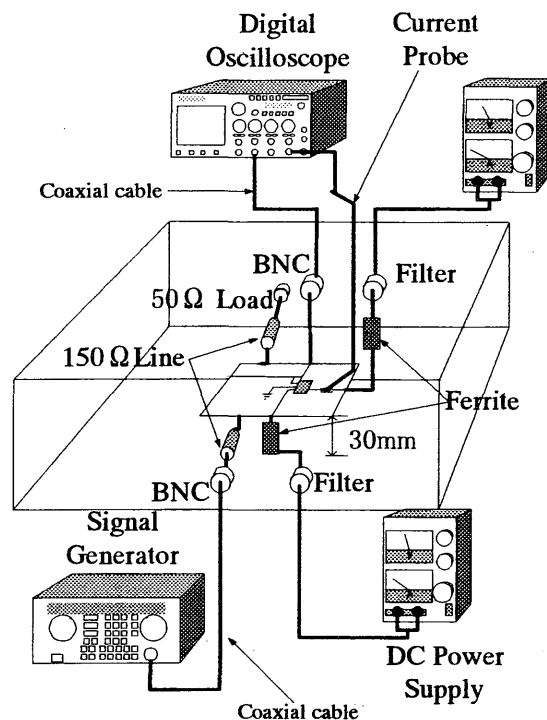


図7 評価実験の構成概略図  
Fig.7 Setup for experiments.

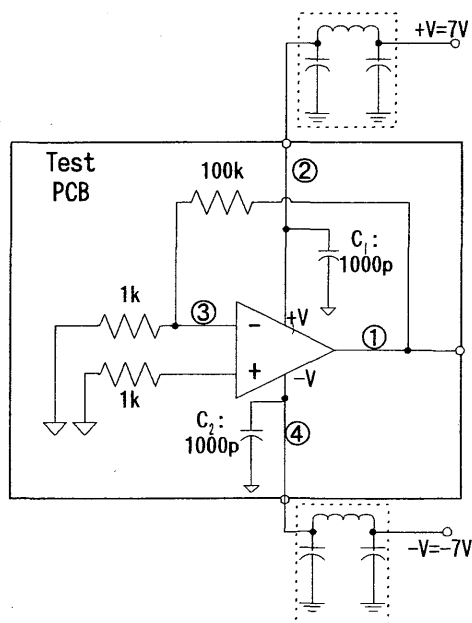


図6 被測定回路の概略  
Fig.6 Schematic diagram of the equipment under test.

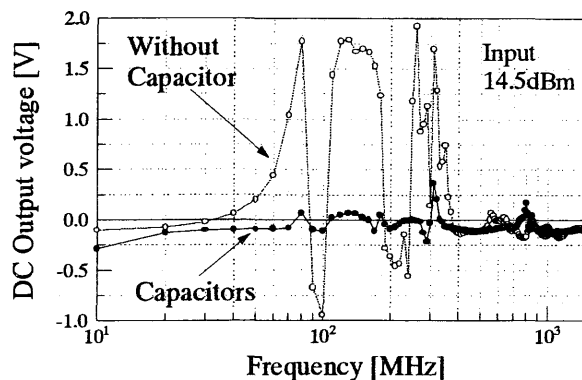


図8 オペアンプの直流出力値の周波数特性。実線はコンデンサー実装、破線は非実装。入力14.5dBm。  
Fig. 8 DC output voltage from the Op-Amp. under testing.

結果である。バイパスコンデンサを電源ラインに実装しない場合は、400MHz以下のRF信号周波数に対して、直流成分の変動が著しく現れるが、コンデンサの付加により、この帯域の直流成分の変動が抑えられている。

この時の注入RF信号の周波数に対する各端子に流れるRF電流に対する電流プローブの出力実効電圧値の周波数特性を図9～図12に示す。これらの値を50で除したものが電流実効値に相当する。図9が図6②で示す+電源端子、図10が④の-電源端子、図11が③の-入力端子そして、図12が①の出力端子における測定結果である。

いずれの図においても、破線がバイパスコンデン

サーが無い場合であり、実線がバイパスコンデンサーを実装した場合である。これらの結果より、図6で示した直流成分に対して抑圧効果が顕著に現れた400MHz以下の帯域に注目すると、RF電流交流の顕著な変化は+電源の電流からは認められないが、250MHz近辺の変化は-入力端子の電流から、また、80MHz、150MHz近辺の変化は-入力端子、出力端子のRF電流にも現れる傾向がある。しかし、端子により流れる電流の絶対量が異なるため、どの端子の影響が支配的であるかは現状では明らかではない。なお、増幅器出力の直流成分に対する電流プローブの影響は、それを入力端子に付加する場合において顕著に表れるが、それ以外の端子では少ない事を確認している。

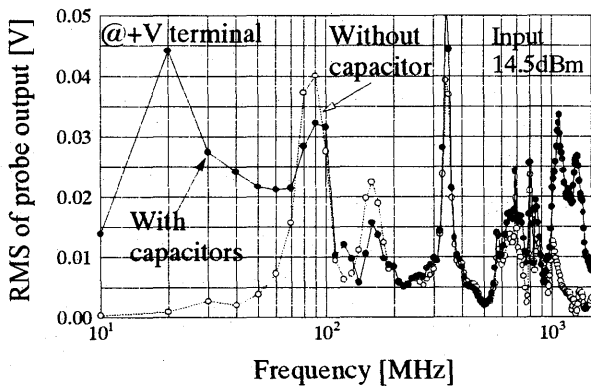


図9 +電源端子に流れるRF電流の電圧変換実効値の周波数特性。実線：コンデンサー実装、破線：非実装。  
Fig.9 Current probe output voltage at the positive power supply pin.

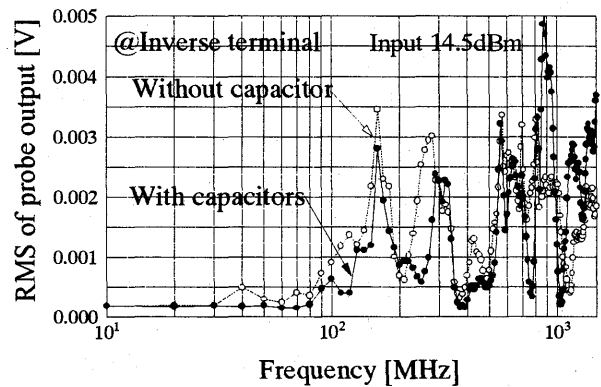


図11 -入力端子に流れるRF電流の電圧変換実効値の周波数特性。実線：コンデンサー実装、破線：非実装。  
Fig.11 Current probe output voltage at the negative input pin.

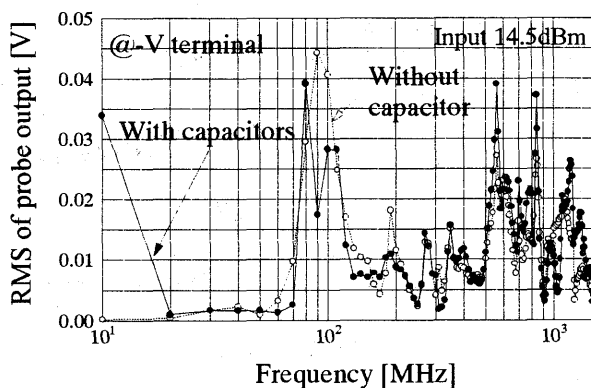


図10 -電源端子に流れるRF電流の電圧変換実効値の周波数特性。実線：コンデンサー実装、破線：非実装。  
Fig.10 Current probe output voltage at the negative power supply pin.

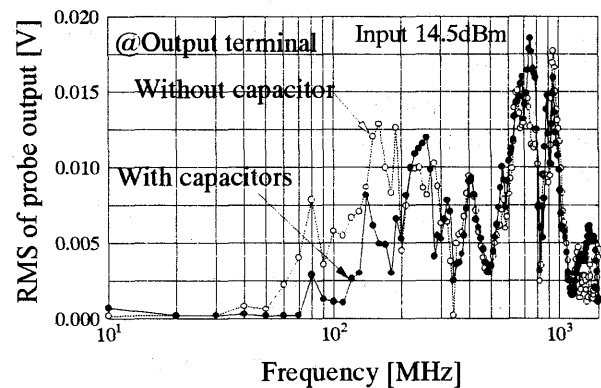


図12 出力端子に流れるRF電流の電圧変換実効値の周波数特性。実線：コンデンサー実装、破線：非実装。  
Fig.12 Current probe output voltage at the output pin.

今回、コモンモード雑音に起因するオペアンプの誤動作を仮定し実験を行ってみたが、コモンモード雑音の印加により、アンプの端子に流れるRF電流と誤動作の明白な関連性を見出すことはできなかった。しかし、バイパスコンデンサの実装により、直流成分の出現は明らかに抑圧されており、コモンモード雑音に起因するRF電流の回避経路がバイパスコンデンサにより確保されている可能性は認められた。WBFC法を用いる場合、被測定基板の形状により結果が左右される可能性は否めない。しかし、服部ら報告に依れば、誤動作の原因となる注入電流はアンプ内部の経路を通り、入力回路に至り誤動作を引き起こすと結論づけている<sup>1)</sup>。その観点から考察すれば、電流プローブで観察した位置よりもパッケージ寄りの領域、即ち、電流プローブで現象を捉えることができない場所で誤動作が引き起こされていることも考えられる。加えて、バイパスコンデンサの有無に関わらず、入力端子、出力端子に付加した電流プローブの指示値の変化は直流出力電圧の変化に比べて小さいことから、誤動作に直接影響を与える雑音源はパッケージ内、あるいは、ピンを含めたICの物理的構造内で生じている可能性がある。

実験で観測された直流出力電圧がピンを含めたICの物理的規模以内の構造に起因すると考えられる一つの事象として、コモンモードポイントの相違が実験結果にそれほど大きく影響しない点が挙げられる。図13は実験で用いたものと同じ大きさ(150mmX200mm)、材質の基板に裏面をグランド面、表面をコプレーナ形状

とした50Ωの単純な信号線を作り、この基板をWBFC内に置きコモンモード雑音を印加し、そこに流れるRF電流実効値を電流プローブを用いて測定した結果である。信号線は基板の150mmの辺の中央を通るように引き、信号線全長(200mm)の3分の1の地点に電流プローブを実装した。次に、コモンモードポイントは以下の3個所とした。即ち、基板の200mmの辺の中央の対向する地点(図13:Center)、電流プローブの実装位置から離れた端の対向する地点(図13:Edge(A))、電流プローブの実装位置に近い端の対向する地点(図13:Edge(B))である。これらの結果より、300MHz付近を中心に信号線に流れる電流の大きさに相違を生じていることが認められ、コモンモードポイント選択の影響が現れていると云える。

これに対し、図14は図8~図12で結果を示したオペアンプを実装した基板を再び測定対象として、コモンモードポイントを基板端にした場合と基板中央にした場合のオペアンプの出力直流分の変化を示している。これは、先に行った一連の測定の後、改めて測定をした結果である。ここで、破線で示すものが基板における200mmの辺の端の対向する地点をコモンモードポイントとした場合の結果であり、これは図8~図12に示した測定の条件に相当する。また、実線で示すものが、200mmの辺の中央の対向する地点をコモンモードポイントとした結果である。これらの結果は、150MHz付近の出力の極性が先の実験結果とは逆になっており、絶対的評価としては、再現性の無い結果となった。これは、基板の脱着が原因と考えられ、IC

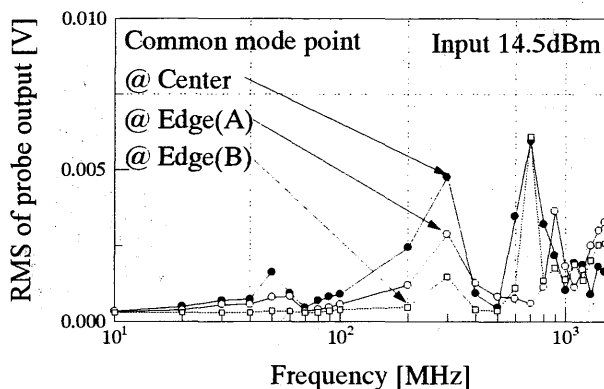


図13 異なるコモンモードポイントに対し、50Ω信号線に流れるRF電流。入力14.5dBm。

Fig.13 Current probe output voltage at a point of a 50 ohm co-planer line in three different positions of common mode points.

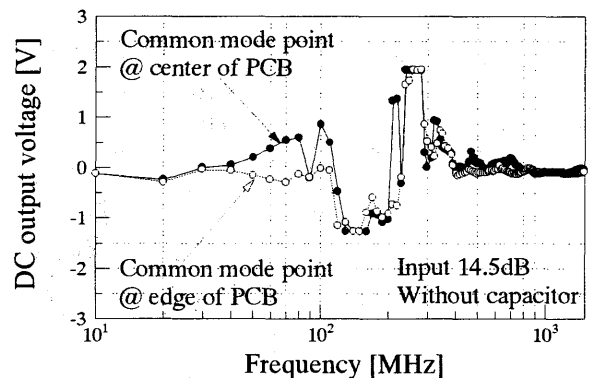


図14 異なるコモンモードポイントに対する直流出力結果。入力14.5dBm、コンデンサー非実装。

Fig.14 Current probe output voltage at the output pin in two different positions of common mode points.

の誤動作の状態が僅かな条件の違いで生じる可能性を示唆している。しかし、相対的な評価としては、図12で示したコモンモードポイントの違いによるRF電流の周波数特性の相違に関わらず、オペアンプを実装した場合、両者の周波数特性はほぼ等しくなっており、特徴的な誤動作が、400MHz以下で同じく生じていることが分かる。これは、回路の誤動作が半導体素子外部の要因よりも、半導体内部での要因が支配的であることを示唆していると考えられる。

## 5. むすび

ワークベンチファラデーケージ (WBFC: Workbench Faraday Cage) を製作し、50 Ω - 150 Ω インピーダンス変換ケーブルを含めた測定系の特性を評価した。更にこのWBFCを用い、WBFC法による汎用オペアンプLM324のコモンモード雑音耐性の評価実験を行い、コモンモード雑音に対するオペアンプの誤動作とIC端子に流れるRF電流の因果関係を調べることを試みた。

その結果、オペアンプ回路のコモンモード雑音に対する特徴的な応答が観測され、入力端子および出力端子に流れるRF電流との因果関係が認められた。コモンモード雑音の印加による誤動作とアンプの端子に流れるRF電流との明白な関連性を結論づけることはまだできない。しかし、バイパスコンデンサの実装により、直流成分の出現は明らかに抑圧されており、コモンモード雑音に起因するRF電流の回避経路がバイパスコンデンサーにより確保されている可能性は認められた。以上のことと、単純な構造の基板に対して行ったコモンモードポイントの相違とこれにより基板上に生じるRF電流の比較実験の結果より、本報告におけるオペアンプの誤動作に直接影響を与える雑音源はコモンモード雑音の印加によりパッケージ内、あるいは

は、ピンを含めたICの物理的構造内で生じている可能性がある事を示した。

今後は、これらのことをより詳しく調べるため、基板や配線に対する無侵襲性が高い、磁界プローブを用いて、コモンモード雑音によって基板レイアウト上に誘起される電流の経路を策定してゆくことを考えている。また、同様な測定をJFET入力回路を持つLF356に対しても行い、ICの内部構造の相違による影響も検討する予定である。

更に、WBFC法に関しては、コモンモードポイントの位置、個数などの寄与も無視することができず、これらの点に関しても現在検討中である。

## 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、小田原吉隆氏、桐木平智史氏、佐々木健氏、山岡浩孝氏に謝意を表します。本実験に使用した測定機器の一部は岡山大学工学部通信ネットワーク工学科、古賀隆治先生のご厚意により使用させて頂きました。また、WBFC法に関するご助言を同 和田修己先生に賜り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).
- [3] 服部佳晋, 只野 博, 長瀬 宏, 糸魚川貢一, " オペアンプのRFノイズ耐性の検討," 信学論(B-II), Vol. J83-B, No. 7, pp.1034-1042(2000).