

高速動作に適したプリント基板の研究，試作

木島 一広・吉村 千秋・石田 正文・清水 誠司

Investigation of the printed wiring boards suitable for high-speed operation

Kazuhiro KIJIMA, Chiaki YOSHIMURA, Masafumi ISHIDA and Seiji SHIMIZU

要 約

高速動作に適したプリント基板設計に関する要素技術を得るため、4種類の基板材料および11種類の基板パターン形状を用いてプリント基板を試作し、それぞれの基板に対して1GHz~3.8GHzの周波数帯域における伝送利得（S21）と、同周波数帯域の正弦波信号伝送時における近傍磁界を測定した。伝送利得測定の結果、材質の誘電率、グランド線の配置や配線の取り回しなどの条件が伝送特性に与える影響を実験的に確認し、経験的に伝えられているものも含め、高品質な信号伝送特性をもつ基板パターンの形状を把握した。近傍磁界測定では線路の形成するループの面積、線路の直線部分の配線長さのうち片方、あるいは双方が減少すると近傍磁界放射が抑制されることを確認した。

以上のことから、伝送利得を向上させると近傍磁界強度は基板法線方向に急激に減衰することが確認され、高周波の伝送において放射による損失が伝送特性に大きな影響を与えることがわかった。

1. 緒 言

今日、パソコンや携帯電話などの情報機器が急速に普及し、高度情報化社会へ向けて急激な変化が起こっている。これに伴い情報機器の扱うデータは文字などの比較的小容量のものから、音声・静止画像・動画といった大容量のものまで多岐に渡るようになり、通信回線の高速・大容量化、情報処理装置の高速化が要求されるようになってきている。その結果、情報処理装置に組み込まれる中央演算処理装置（CPU）は急速に高速化し最近では3GHzのものが市販されるようになった。また、CPUやメモリなどの電子部品を実装し、それらの間の信号伝送を行うためのプリント配線板はより高速な信号に対応する必要が出てきた。近年、上記の用途に用いられるプリント基板に対して、インピーダンスの制御を求められるようになってきているが、韓国等東アジア諸国の基板メーカーが非常に優秀な製品を提供しており、日本国内の基板メーカーの優位性はなくなりつつある。一方、電子機器の電磁環境適合性への対応が必須となっているが、機器の扱う周波数が上がると、遮蔽などの従来からの対策では対応することが困難となってきており、基板自体の材質、パターン設計など根本的な対策が迫られるようになってきている。

以上の背景のもと、県内のプリント基板製造メーカーからも高周波伝送特性の測定とそれに関連した技術指導の要望がよせられるようになってきた。そのため、高周波に対応したプリント基板の設計、測定環境の整備を行い、取り扱

う周波数が上がっても信号歪みを起こしにくくするための方法、漏洩電磁波を遮断するための方法について研究を行った。以下にその内容を報告する。

2. 実験方法

2-1 電磁界シミュレータを用いた基板パターン設計環境の構築

高速動作に適したプリント基板の設計、試作環境を構築した。具体的には、電子回路CADにOrCAD（CADENCE）を用いてパターン設計を行い、並行して同パターン形状に対して1GHz~3.8GHzの周波数帯域で電磁界シミュレータのsonnet Lite（Sonnet Software Inc.）を用い、伝送利得と反

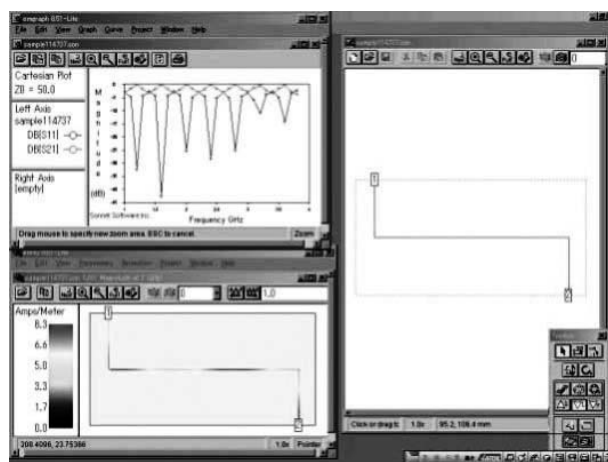


図1 電磁界シミュレータ



図2 プリント基板試作装置

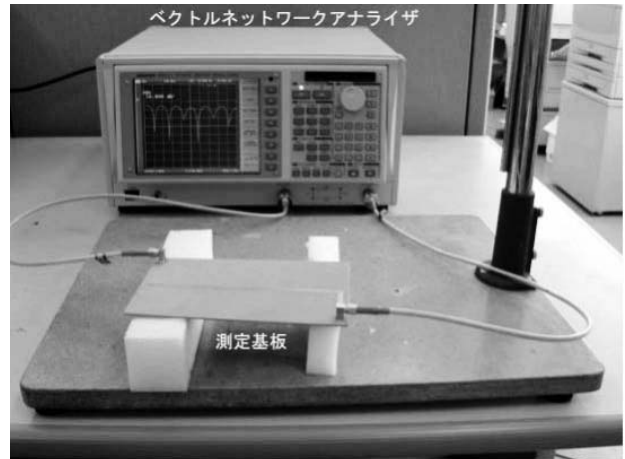


図3 伝送特性評価測定系

射についてシミュレーションを行った(図1)。設計したパターン形状は、切削加工によるプリント基板試作装置FP-21(ミッツ株式会社)を用い試作を行った(図2)。

シミュレーションの妥当性を検討するため試作したプリント基板について、次節と同様の方法で入力反射係数(S11)と伝送利得(S21)を測定し、シミュレーション結果との比較を行った。

2-2 各種基板材料及び複数のパターン形状によるプリント基板の試作と伝送特性の評価

プリント基板材質の誘電率の差違と、配線パターン形状の差違が信号伝送特性に与える影響を検討するため、4種類の基板材料について、それぞれ12種類のパターン形状で基板試作を行い、1GHz~3.8GHzの周波数帯域において伝送利得S21と位相特性の測定を行った。試作に用いた基板材料を表1に、作製したパターンの概略を表2に示す。

表1 試作に用いた基板材料

| 材 質 名 | 比誘電率 | 誘電正接 |
|------------------------------|------|--------|
| ガラスエポキシ樹脂 (FR-4) | 4.9 | 0.025 |
| ガラス熱硬化性PPO樹脂 (高誘電率タイプ R4728) | 10.2 | 0.04 |
| ガラス熱硬化性PPO樹脂 (低誘電率タイプ R4726) | 3.4 | 0.003 |
| ガラスフッ素樹脂 (R4737) | 2.6 | 0.0016 |

表2 試作したパターンの概略

| | |
|--------|---|
| サンプル1 | 2回折り曲げ 基板裏面にベタグランド |
| サンプル2 | 2回折り曲げ 基板裏面にグランド線を信号線に沿って配置 |
| サンプル3 | 2回折り曲げ 基板裏面にグランド線を信号線とずらして配置 |
| サンプル4 | 1回折り曲げ 基板裏面にベタグランド |
| サンプル5 | 2回折り曲げ 表面信号線の両側にグランド線配置 (0.75mm間隔) 両側グランド線は基板上では開放 |
| サンプル6 | 2回折り曲げ 表面信号線の両側にグランド線配置 (0.75mm間隔) 両側グランド線を基板状で短絡 |
| サンプル7 | 2回折り曲げ 表面信号線の片側にグランド線配置 (0.7mm間隔) |
| サンプル8 | 2回折り曲げ 表面信号線の片側にグランド線配置 (4.5mm間隔) |
| サンプル9 | 直線部分が3.8GHzにおける誘電体内の波長 (12mm) 以下になるように折り曲げ 基板裏側にベタグランド |
| サンプル10 | 直線部分が3.8GHzにおける誘電体内の波長 (12mm) 以下になるように折り曲げ 基板裏側に信号線に沿ってグランド線配置 |
| サンプル11 | 直線部分が3.8GHzにおける誘電体内の波長 (12mm) 以下になるように折り曲げ 表面信号線の両側にグランド線配置 (0.7mm間隔) |
| サンプル12 | 2回折り曲げ 基板裏面にベタグランド 線幅0.5mm (参考) |

- 共通の仕様
- ・基板大きさ 縦×横×厚さ 110mm×180mm×1.6mm
 - ・信号線総配線長 250mm
 - ・線路幅 1mm
 - ・銅箔厚さ 35μm

測定はベクトルネットワークアナライザ（アドバンテス トR3765CG）を用いた。また、試作基板と測定ケーブルとの接続は、基板に実装したSMAコネクタを用いた。

2-3 近傍電磁界測定による漏洩電磁界の評価

基板からの漏洩電磁波の評価を行うため、簡易的な近傍磁界測定を行った。SMAコネクタにより設けた試作基板上の2ポートのうちの一つをベクトルネットワークアナライザのポート1側に接続し周波数1GHz~3.8GHz、電力0dBmの正弦波信号を基板に入力し、残りの一つに50Ω終端を取り付けた。ネットワークアナライザのポート2側には磁界プローブ（日本電気真空硝子 CP-2S）を接続し、基板配線-磁界プローブ間の伝送利得を測定した。測定にあたりプローブは信号線の中心位置で、基板表面から1mmの高さで一定に保ち、測定周波数帯域全域に渡って走査し、伝送利得が最大の場所で測定した。また、プローブ高さを5mm、10mmと変化させ測定した。

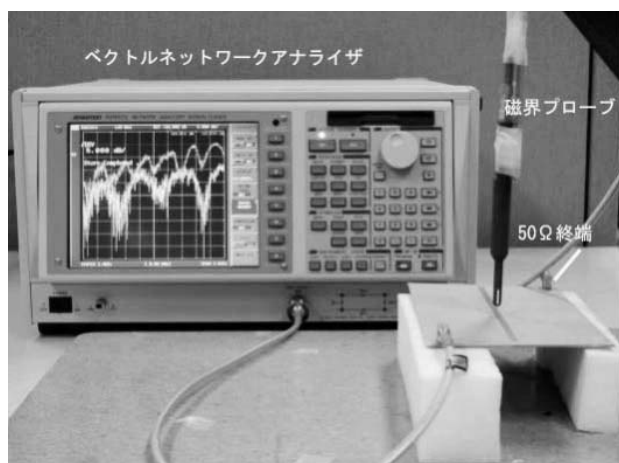


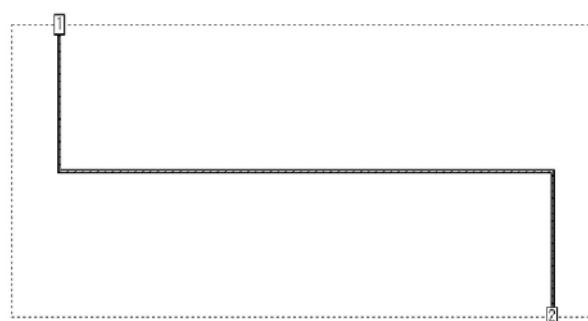
図4 近傍磁界測定系

3. 結果及び考察

3-1 電磁界シミュレータを用いた基板パターン設計環境の構築

試作した基板の入力反射係数（S11）、伝送特性（S21）のネットワークアナライザによる実測値と、シミュレーション結果について比較を行った結果、反射係数のレベルには多少差があるものの周波数特性を良く再現したシミュレーション結果が得られ、回路シミュレーションが高周波回路の設計において非常に有用な手段となりうる事が解った。一例として、図5に示すサンプルについて基板を試作し実測した値を図6に、シミュレーションによって得られた結果を図7に示す。このことにより高周波回路に対応した設計環境の構築が図られた。反射係数のレベル差の原因の一つとして、ネットワークアナライザの校正時の基準面

がケーブルに装着されているコネクタにあり、基板に実装されているSMAコネクタが考慮されていなかったことが考えられる。



- ・ガラスフッ素樹脂（誘電率2.6）
- ・基板大きさ 縦×横×厚さ
- ・110mm×180mm×1.6mm
- ・信号線総配線長 250mm
- ・線路幅 1mm
- ・銅箔厚さ35μm
- ・裏面にベタグラウンド

図5 シミュレータ入力形状
(次節サンプル1と同じもの)

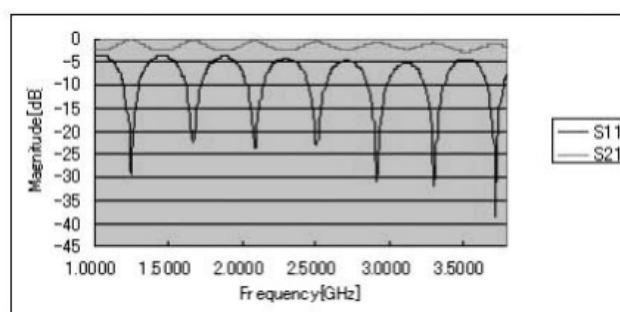


図6 反射係数（S11）及び伝送利得（S21）実測値

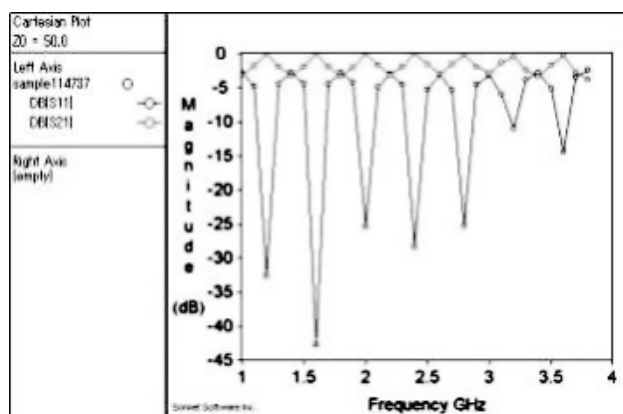


図7 シミュレーション結果

3-2 各種基板材料及び複数のパターン形状によるプリント基板の試作と伝送特性の評価

(1) 基板材質による伝送特性の違い

図8のようなマイクロストリップ線路を作製し4種類の基板について伝送利得 (S21) と群遅延時間 (位相変化の周波数微分) を測定した結果 (図9~図12), 伝送利得, 群遅延時間ともにガラスフッ素樹脂が損失も少なく周波数特性も平坦であり, 最も良い特性を示した。(図9, 図10, 図11, 図12)



- ・横×縦×厚さ 95mm×39mm×1.6 mm
- ・配線 銅箔 (35 μ m厚)
- ・配線幅 1 mm
- ・配線長 83mm

図8 マイクロストリップ形状

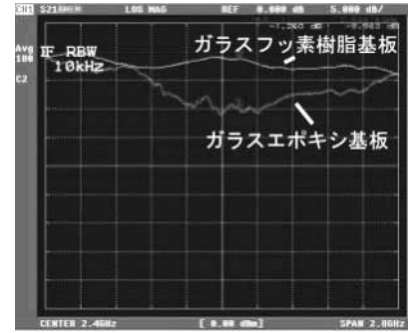


図11 伝送利得 (S21) 測定値

ガラスエポキシ基板とガラスフッ素樹脂基板の比較

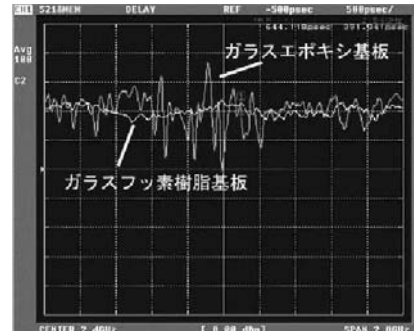


図12 群遅延時間測定値

ガラスエポキシ基板とガラスフッ素樹脂基板の比較

(2) 基板パターン形状の差による伝送特性の変化

次に, (1) の実験で最も良い特性を示したガラスフッ素樹脂基板について, 12種類のパターン形状による伝送利得と位相特性の検討を行った結果, パターンの差により最大10dB程度の伝送利得の違いが現れることを確認した。特に, 以下に示す点で特徴的な結果が得られた。

①グラウンドを信号線の配置されている面の裏面に設置する場合, 面全体にグラウンドを配置した場合 (一般に言うバタグラウンド) (サンプル1) が最も信号の損失が少なく, グラウンドを意図的にずらして配置したもの (サンプル3) と比較して最大8 dB程度の差を生じた。(図13~図15参照)

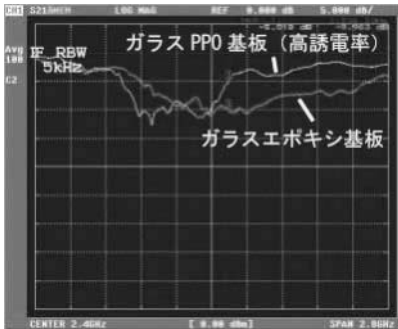


図9 伝送利得 (S21) 測定値

ガラスエポキシ基板とガラスPPO基板 (高 ϵ) の比較



図10 伝送利得 (S21) 測定値

ガラスエポキシ基板とガラスPPO基板 (低 ϵ) の比較



サンプル 1 サンプル 2 サンプル 3

(それぞれ上側が表面 下側が裏面)

- サンプル 1 : 2 回折り曲げ 基板裏面にベタグランド
- サンプル 2 : 2 回折り曲げ 基板裏面にグランド線を信号線に沿って配置
- サンプル 3 : 2 回折り曲げ 基板裏面にグランド線を信号線とずらして配置

図13 測定したパターン形状 (その 1)

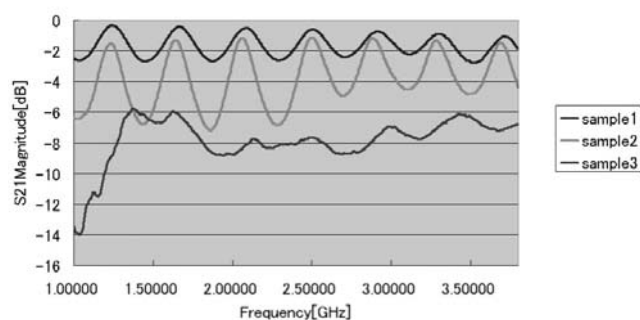


図14 伝送利得測定値

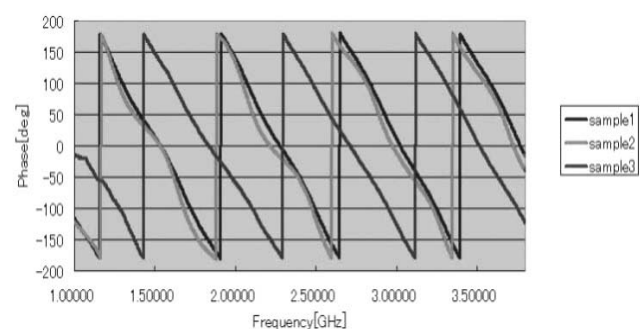
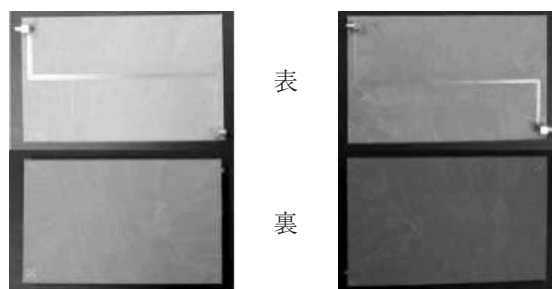
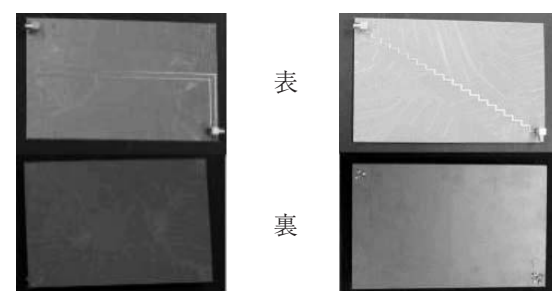


図15 位相特性測定値

②グランド線を信号線が配線されている面と同一面に配置する場合、グランドを両側に配置したもの(コプレナ線路状のもの サンプル 5)が最も損失が少なく裏面にベタグランドを配置したものと比較してもほとんど遜色のない特性を示した。片側に配置したもの(レツヘル線状のもの サンプル 7・サンプル 8)は比較的損失が大きくなり、信号線とグランド線の間隔が大きくなるにつれて損失も大きくなった。(図16～図18参照)



サンプル 1 サンプル 5



サンプル 7 サンプル 8

- サンプル 1 : 2 回折り曲げ 裏面ベタグランド
- サンプル 5 : 2 回折り曲げ 表面信号線の両側にグランド線配置 (0.75mm 間隔)
- サンプル 7 : 2 回折り曲げ 表面信号線の片側にグランド線配置 (0.7mm 間隔)
- サンプル 8 : 2 回折り曲げ 表面信号線の片側にグランド線配置 (4.5mm 間隔)

図16 測定したパターン形状 (その 2)

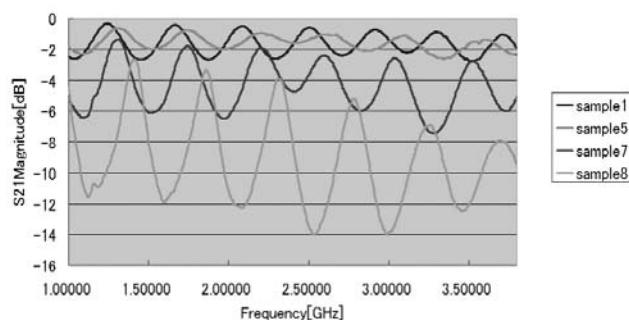


図17 伝送利得測定値

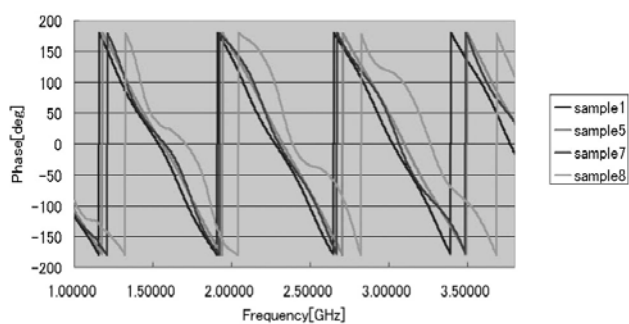
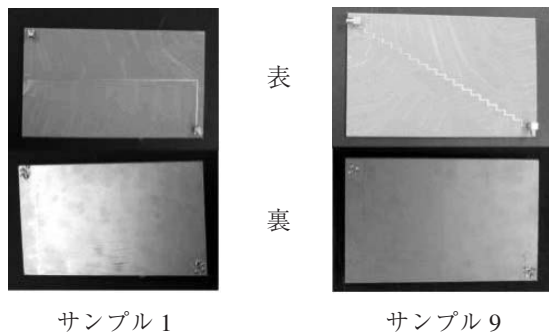


図18 位相特性測定値

③配線の直線部分の長さを基板材質中の信号波長と同程度以下に抑えたもの（サンプル 9）は、直線部分を長く引き回したもの（サンプル 1）と比較して、伝送利得が若干（最大1.5dB程度）向上した。また、伝送利得の周波数特性はより平坦なものになり、周波数変化に対する位相変化も若干小さくなった。（図19～図21参照）



サンプル 1：2 回折り曲げ 基板裏面にベタグラウンド
 サンプル 9：直線部分が3.8GHzにおける誘電体内での波長以下（12 mm）になるように折り曲げ 基板裏面にベタグラウンド

図19 測定したパターン形状（その 3）

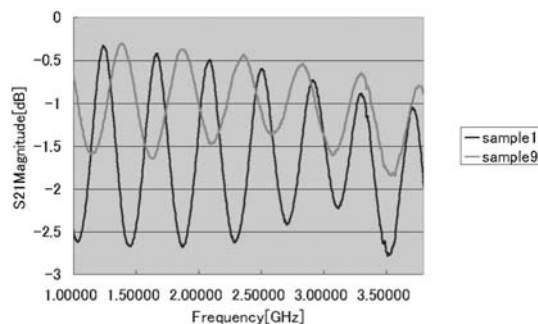


図20 伝送利得測定値

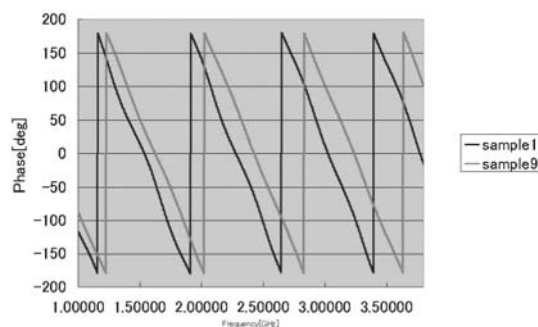


図21 位相特性測定値

3-3 近傍電磁界測定による漏洩電磁界の評価

伝送特性を測定したサンプルについて近傍磁界測定を行った。得られた結果はあくまでも配線-プローブ間の空間を介した伝送利得の測定値であり、近傍磁界強度を直接表したのではない。また、磁界プローブと磁界との結合係

数による補正が施されていないため、強度の傾向を把握することしかできないが、パターン形状及びグランドの配置で近傍磁界の強度が変化し、基板-プローブ間距離が10mmの時はその変化は伝送損失が大きくなるにつれて、近傍磁界の強度が大きくなる傾向を示した（図24）。基板により近い距離ではその傾向はなくなり、基板-プローブ間距離が1 mmの時には伝送利得の高いものの方がより近傍磁界強度が強くなる結果となった（図22）。これらと比較した場合、基板法線方向における近傍磁界の減衰特性が異なり、伝送利得測定値が高いものほど減衰距離が短く、より急峻な減衰を示すことが解った（図25）。また、従来から言われているような信号線と帰還する線とで形成されるループ面積が大きくなるほど近傍磁界の放射が増大することを顕著に示すような実験結果が得られた。

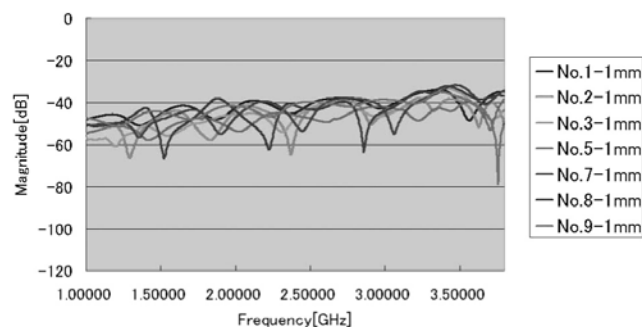


図22 近傍磁界測定値（基板-プローブ間距離 1 mm）

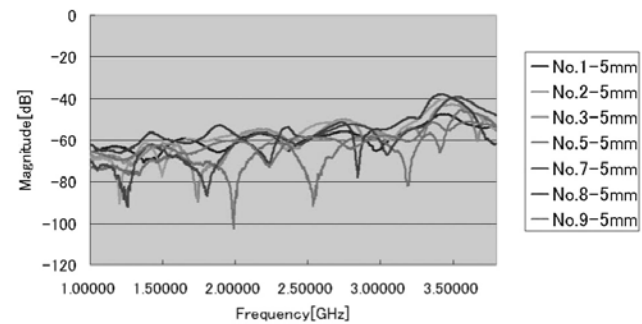


図23 近傍磁界測定値（基板-プローブ間距離 5 mm）

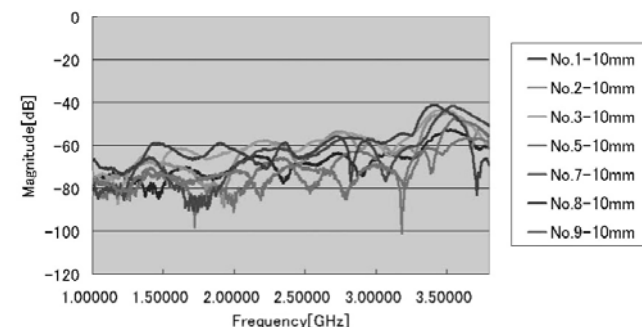


図24 近傍磁界測定値（基板-プローブ間距離10mm）

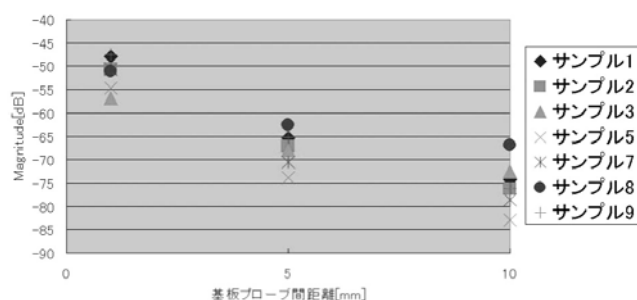


図25 近傍磁界測定値 (周波数 1 GHz)

基板の伝送損失には、表皮効果、誘電損による損失等が考えられる。今回の研究では伝送特性測定と、近傍磁界測定とを組み合わせを行ったが、使用したサンプルは基板材質、配線幅、銅箔厚は、いずれもすべて同一のため、放射損による損失が大きな原因となっているものと考えられる。そのため、信号線と帰還する線とで形成されるループの面積、基板の直線部分の長さの変更によって伝送利得の向上がみられ (図16～図21参照)、近傍磁界の測定結果にもその傾向が現れたものと思われる。

4. 結 言

今回の研究でプリント基板を高速動作に適応させるための手法について単純なモデルを用いて検討を行い、実験した結果、以下の結果が得られた。

- ①伝送利得、位相特性についてはガラスフッ素樹脂基板のような低誘電率、低誘電損失のものが優れている。
- ②同じ基板材質、配線長、導体材質、線路幅、導体厚の条件下では、線路の配置の違いのみで伝送利得は最大10dB程度変化する。(配置によっては、より悪化することもあり得る)
- ③ノイズ対策等で行われている、いわゆるベタグラウンドは伝送利得の向上にも有益である。
- ④グラウンド線をコプレナ線路状に信号線の両側に配置することで、伝送利得に関してベタグラウンドと同等の効果がある。
- ⑤伝送線路の直線部分を基板材質内の信号波長程度に抑えることで若干の伝送利得の向上が認められる。
- ⑥同じ基板材質、導体材質、線路幅、線路長の条件下において、伝送利得の高いものは近傍磁界強度の距離に対する減衰が急峻である。

実際の基板では、隣接する線路の影響等も考慮しなければならないが、今回用いた形状は非常に要素的で単純なものであるため、今後はより実際の基板に近いモデルについて引き続き検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 大森・横島・中根共著、高周波・マイクロ波測定、コロナ社、(1992)
- 2) M. I. Montrose：プリント基板のEMC設計、オーム社、(1997)