

高周波 (GHz) における電磁雑音低減技術の開発

— プリント回路基板の電源プレーンにおける雑音低減化の検討 —

濱口 聡*, 山口裕史*

Development of Noise Reduction Techniques in the GHz Frequency Range

— Studies of Noise Reduction in Power and Ground Planes of Printed Circuit Board —

Akira HAMAGUCHI* and Yuji YAMAGUCHI*

Keywords: Electromagnetic compatibility (EMC), Electromagnetic interference (EMI), Printed circuit board, Noise reduction, Resonance of power and ground planes

1. はじめに

電気製品から発生する電磁雑音は、他製品の正常動作を妨害することから、各国においては雑音レベルを抑制するために電磁環境規制が実施されている¹⁾。近年、製品の小型化や高周波化が進展したことに伴い、電磁雑音の抑制は困難になりつつある。特に、雑音の波長が製品の物理的寸法と同様またはそれ以下となるケースにおいては、集中定数回路理論や分布定数回路理論だけで製品設計を行うことが困難となる^{2,3)}。ため、回路設計者が雑音の抑制に取り組む際には相当の苦労を強いられる。このような状況の下、情報技術装置に対する我が国と欧州の放射エミッション規制が平成 23 年 10 月 1 日より 1 GHz 超の周波数へ適用範囲が広げられ^{4,5)}、各国の電磁環境規制はますます厳しくなる傾向にある。

当所では、これまでに高周波測定装置や電磁界シミュレーションを用いた実験や解析を実施しており⁶⁻⁸⁾、前述の背景を鑑み、前年度はプリント回路基板における GHz 帯の高周波雑音について発生状況等の検討を実施した⁹⁾。今年度は、プリント回路基板の面状配線パターン(プレーン)における GHz 帯の電磁雑音について、様々なプレーン形状の試作基板(計 98 枚作成)の放射電界強度を測定することより、前年度の課題であった雑音低減化を目指して

取り組んだので、本報ではその一部について結果を報告する。

2. 実験方法

電気製品のプリント回路基板においては、電源のインピーダンスを低く抑える目的で、電源(VCC)やグラウンド(GND)の配線を面状とし、多層プリント回路基板の特定層全面にそれらを割り当てる設計手法が多用される¹⁰⁾。これら VCC プレーンと GND プレーンは、プレーン間に挟まる基板材料を含めて平行平板共振器を形成し、この構造下で電源回路に高周波電流が流れた場合、当該共振器の共振周波数において高いレベルの電磁雑音が発生し、プレーン端部から外部へ放射される¹¹⁾。横幅 a [m]、縦幅 b [m] の矩形平行平板共振器の共振周波数 f_{mn} [Hz] は式 1 のとおり算出される^{3,11)}。ここで、 m 及び n は共振モード番号、 c_0 は真空中の光速、 ϵ_r 及び μ_r はそれぞれ基板材料の比誘電率及び比透磁率である。(ただし、一般的な基板材料では $\mu_r = 1$ と考えても差し支えない。)

$$f_{mn} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2} \quad (\text{式 1})$$

電気製品の小型化と高周波化の進展は極めて著しいが、小型化よりも高周波化のほうが桁違いに高い

* ものづくり研究課

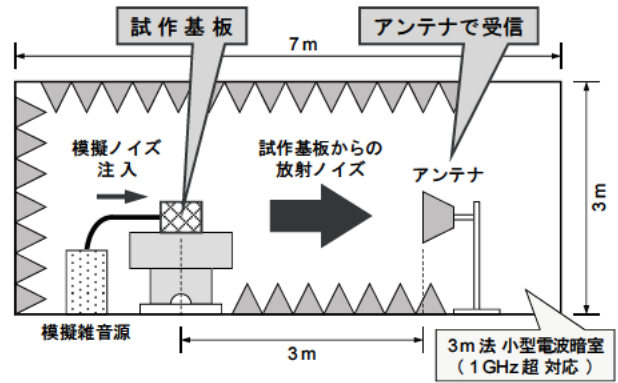
進展率で推移したため、近年の製品は過去の製品と比べて雑音の波長がプリント回路基板の物理的寸法と同様またはそれ以下になってしまっている。例えば、寸法 100 mm 程度のプレーンを有するプリント回路基板の場合、最も低い周波数の共振点は式 1 から約 0.7 GHz と算出される。このことから、近年の製品においては前述の平行平板共振が原因で GHz 帯の電磁雑音が容易に発生し得ることが推察できる。このような背景から、平行平板共振をいかに抑制するかが雑音低減化の重要なポイントの 1 つと言える。そこで、本研究事業では、平行平板共振器の構造を成す様々なパターンの試作基板を作成し、そこから放射する電界強度（放射電界強度）を測定する実験を中心に検討を進めた。

実験では、当所の放射エミッション測定システムを用いて図 1 に示す測定系を構築、試作基板は、厚さ 0.6 mm、基板材料 FR-4、2 層構成（両面基板）で作成し、外部から模擬雑音を注入するための SMA コネクタを配置、模擬雑音源はスペクトラムアナライザ（Rohde & Schwarz 社製 FSL 3/13）のトラッキングジェネレータ機能を用い、その出力レベルは 0 dBm とした^{9,12)}。なお、模擬雑音を試作基板へ伝搬させる接続ケーブルと試作基板との間のインピーダンス不整合を改善するため、接続ケーブルと試作基板との間には固定減衰器 10 dB を挿入したうえで測定を行った。作成した各種試作基板については次節以降で説明する。

2. 1 基本形状の確認

前述の測定系が正常に機能しているかどうかを確認することを目的に、横幅 100 mm、縦幅 80 mm の矩形の VCC プレーンと GND プレーンで構成される試作基板（図 2 (a)）と、直径 80 mm の円形の VCC プレーンと GND プレーンで構成される試作基板（図 2 (b)）を作成し、放射電界強度の測定を行った。

なお、半径 a [m] の円形平行平板共振器の共振周波数 f_{mn} [Hz] は式 2 のとおり算出される³⁾。ここで、 m 及び n は共振モード番号、 c_0 は真空中の光速、 ϵ_r 及び μ_r はそれぞれ基板材料の比誘電率及び比透磁率、 k_{mn} は、 J_m を m 次の第 1 種ベッセル関数とすると、 $[(\partial/\partial r) J_m(kr)]_{r=a}=0$ の n 番目の k の根である。（ただし、一般的な基板材料では $\mu_r=1$ と考えても差し支えない。）



(a) 概要図



(b) 写真

図 1 試作基板の放射エミッション測定系

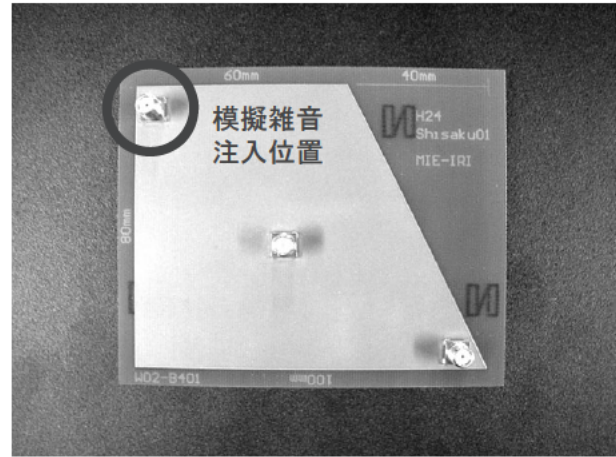
$$f_{mn} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} k_{mn} \quad (式 2)$$

2. 2 プレーン外形の影響

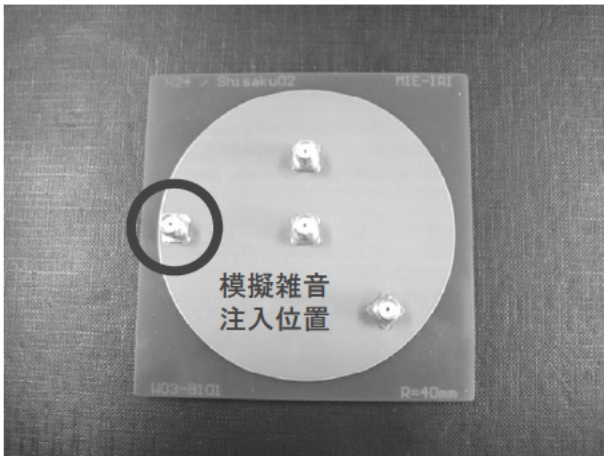
平行平板共振器は、矩形の場合はその横幅と縦幅の寸法から、円形の場合はその直径の寸法から算出される特定の共振点において高いレベルの雑音が発生する。この共振点を意図的に分散させることにより雑音低減化を図れないか確認するため、プレーン外形を台形にした試作基板を作成し、放射電界強度の測定を行った。また、矩形プレーンの四隅の形状を角丸状または面取状にすることにより、四隅が角のままの場合よりも雑音低減化を図れないか確認するため、矩形プレーンの四隅を丸めたり面取したりした試作基板を作成し、放射電界強度の測定を行った。試作基板の作成例として、横上辺幅 60 mm、横下辺幅 100 mm、縦幅 80 mm の台形プレーンのものを図 3 (a) に、横幅 100 mm、縦幅 80 mm の矩形



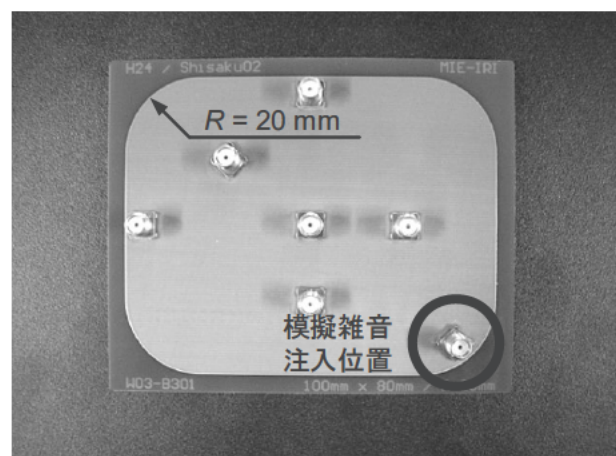
(a) 矩形平行平板共振器
(横幅 100 mm, 縦幅 80 mm)



(a) 台形プレーン
(横上辺幅 60 mm, 横下辺幅 100 mm, 縦幅 80 mm)



(b) 円形平行平板共振器
(直径 80 mm)



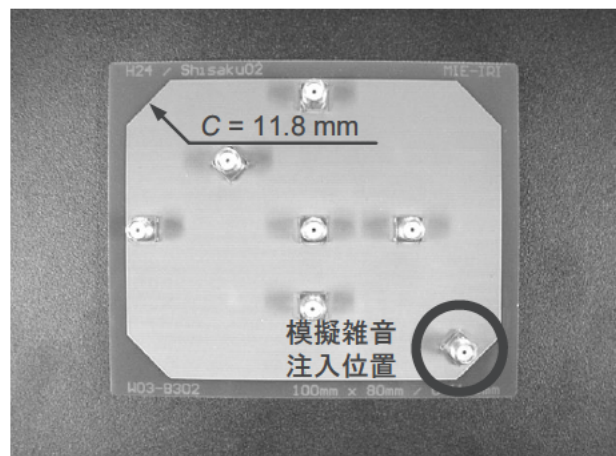
(b) 角丸状プレーン
(横幅 100 mm, 縦幅 80 mm, 角丸 $R = 20$ mm)

図 2 基本形状確認用試作基板

プレーンの四隅を半径 20 mm で角丸状にしたもの (以下、『角丸 $R = 20$ mm』という.) を図 3 (b) に、横幅 100 mm, 縦幅 80 mm の矩形プレーンの四隅を 11.8 mm で面取したもの (以下、『面取 $C = 11.8$ mm』という.) を図 3 (c) に示す. なお, 四隅を角丸にした試作基板の R の値については 10 mm, 20 mm, 40 mm の計 3 種類を, 四隅を面取した試作基板の C の値については 5.9 mm, 11.8 mm, 23.5 mm の計 3 種類を準備した.

2. 3 雑音発生源位置の影響

矩形平行平板共振器において, ある共振モードの定在波について電界分布の節となる箇所を励振した場合には当該共振モードの定在波が発生しないことが報告されている¹³⁾. このことは, 雑音発生源とな



(c) 面取状プレーン
(横幅 100 mm, 縦幅 80 mm, 面取 $C = 11.8$ mm)

図 3 プレーン外形影響確認用試作基板

る部品をプリント回路基板上的特定の位置にうまく配置できれば雑音低減化に効果がある可能性を示している。一方、プリント回路基板上に実装する部品の大きさはゼロではなく有限の大きさがあることから、特定の共振モードを励振しない箇所に雑音発生源となる部品をどの程度の位置精度で配置すべきかについては検討の余地がある。そこで、矩形平行平板共振器について、模擬雑音注入位置をプレーン中央部から意図的に徐々にずらしていった場合に放射電界強度がどのように変化するか測定を行った。なお、試作基板の矩形プレーンの寸法は横幅 100 mm、縦幅 80 mm、模擬雑音注入位置のプレーン中央部からの『ずれの大きさ』については、本報では『プリント回路基板の横方向または縦方向にずらした寸法』と定義し、今回の試作基板では横方向と縦方向のずれの大きさが同一寸法となるように設計・作成し、ずれの大きさ 0 mm～13 mm の計 15 種類を準備した。試作基板の作成例として、ずれの大きさ 5 mm 及び 10 mm のものを図 4 に示す。

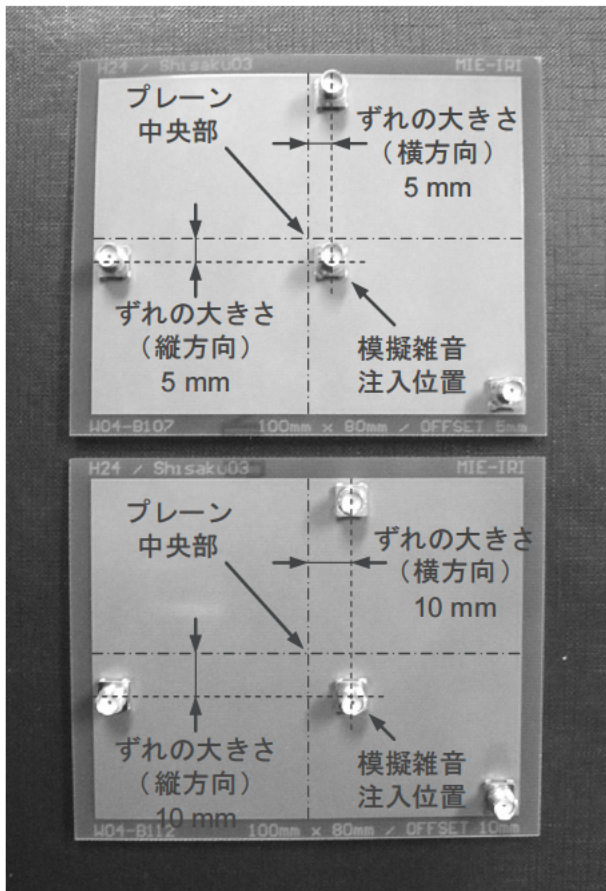
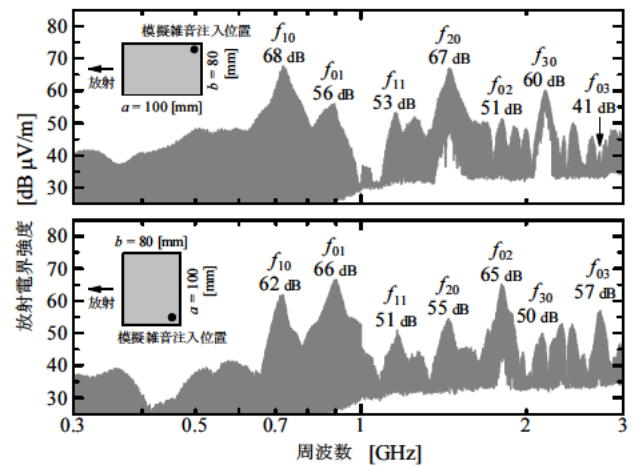


図 4 雑音発生源位置影響確認用試作基板 (上図は ずれ 5 mm, 下図は ずれ 10 mm)

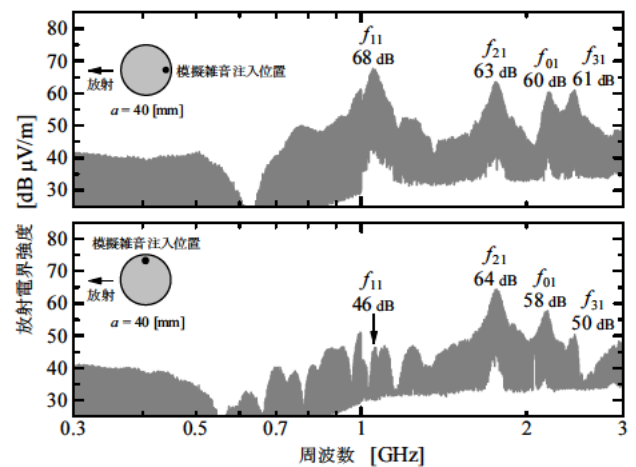
3. 結果及び考察

3. 1 基本形状の確認

矩形平行平板共振器 図 2 (a) において写真左上の SMA コネクタから模擬雑音を注入したときにおける放射電界強度の測定結果を図 5 (a) に、円形平行平板共振器 図 2 (b) において写真左側の SMA コネクタから模擬雑音を注入したときにおける放射電界強度の測定結果を図 5 (b) にそれぞれ示す。なお、図 5 (a) 上段のグラフは基板を横向きにして測定 (矩形プレーン短辺側を受信アンテナ側へ向けて測定) したもので、下段のグラフは基板を縦向きにして測定 (矩形プレーン長辺側を受信アンテナ側へ向けて測定) したものである。また、図 5 (b) 上段のグラフは模擬雑音注入位置と円形プレーン中央部を通る直線をアンテナ方向と平行に、下段のグラフは模擬雑音注入位置と円形プレーン中央部を通る直線をア



(a) 矩形平行平板共振器



(b) 円形平行平板共振器

図 5 基本形状の放射電界強度測定結果

ンテナ方向と垂直に配置して測定したものである。今回の測定周波数帯域における基板材料の比誘電率 ϵ_r は 4.3 ~ 4.4 程度と推定され¹⁴⁾、矩形平行平板共振器及び円形平行平板共振器の主な共振点は式 1 及び式 2 から表 1 のとおり算出される。これらの結果から、今回の測定結果と計算値とは極めてよく一致しており、測定系が問題なく正常に機能していることを確認できた。

なお、測定系の調整時において、模擬雑音を試作基板へ伝搬させる接続ケーブルから無視できない強度の電磁波放射が確認できたため、当該ケーブルを床置用電波吸収体の予備品で包み込んで改めて測定し直したところ、うまく測定できるようになった。

表 1 試作基板 図 2 の主な共振点 (計算値)

(a) 試作基板 図 2 (a)	
共振点	共振周波数
f_{mn}	[GHz]
f_{10}	0.72
f_{01}	0.90
f_{11}	1.2
f_{20}	1.4
f_{02}	1.8
f_{30}	2.2
f_{03}	2.7

(b) 試作基板 図 2 (b)	
共振点	共振周波数
f_{mn}	[GHz]
f_{11}	1.1
f_{21}	1.7
f_{01}	2.2
f_{31}	2.4

3. 2 プレーン外形の影響

プレーン外形を台形にした試作基板について、図 3 (a) 写真左上の SMA コネクタから模擬雑音を注入したときにおける放射電界強度測定結果を図 6 (a) に示す。なお、図 6 (a) 上段のグラフは基板を横向きにして、下段のグラフは基板を縦向きにして測定したものである。プレーン外形を台形にしたことにより、プレーンの横方向 (長辺方向) には最小 60 mm (横上辺幅) から最大 100 mm (横下

辺幅) まで複数の長さを有することになったので、基板横向きの場合の測定結果 (図 6 (a) 上段) については矩形のままの場合 (図 5 (a) 上段) と比較して放射スペクトルがやや分散し共振点におけるピークの鋭さは狙いどおり緩和されたものの、共振点における雑音低減効果は若干にとどまり、逆に共振点以外の周波数の放射電界強度は増加した。

矩形プレーンの四隅を角丸にした試作基板及び面取した試作基板について、図 3 (b) 写真右下及び図 3 (c) 写真右下の SMA コネクタからそれぞれ模擬雑音を注入したときにおける放射電界強度測定結果をそれぞれ図 6 (b) 及び図 6 (c) に示す。最大限まで角丸状にした角丸 $R=40$ mm の場合 (図 6 (b) 上段) 及び最大限まで面取した面取 $C=23.5$ mm の場合 (図 6 (c) 上段) については矩形のままの場合 (図 5 (a) 上段) と比較してある程度の雑音低減効果が認められた。しかし、特に最も低い周波数の共振点である 0.7 ~ 0.8 GHz 付近についてはわずかな雑音低減効果しか得られなかった。一方、角丸 $R=20$ mm (図 6 (b) 中段), 角丸 $R=10$ mm (図 6 (b) 下段), 面取 $C=11.8$ mm (図 6 (c) 中段), 面取 $C=5.9$ mm (図 6 (c) 下段) の場合については矩形のままの場合 (図 5 (a) 上段) とほぼ同様の測定結果となった。この結果から、雑音低減効果を得るには雑音の波長と同程度またはそれ以上の寸法で丸めたり面取する必要があるものと推察される。

3. 3 雑音発生源位置の影響

矩形平行平板共振器について、模擬雑音注入位置を意図的にプレーン中央部から徐々にずらしていった場合の放射電界強度測定結果を図 7 に示す。なお、

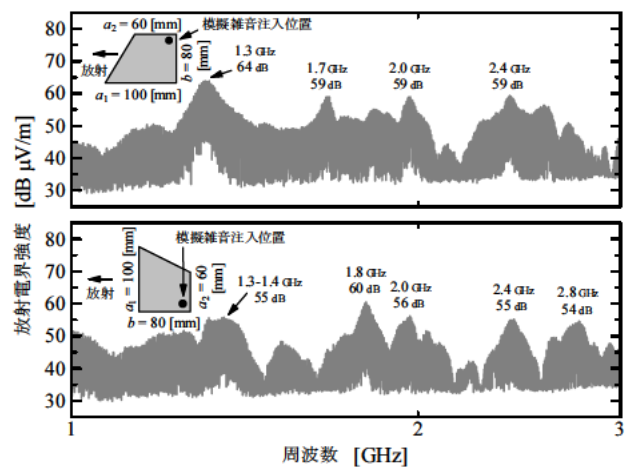


図 6 (a) プレーン外形を台形にした試作基板の放射電界強度測定結果

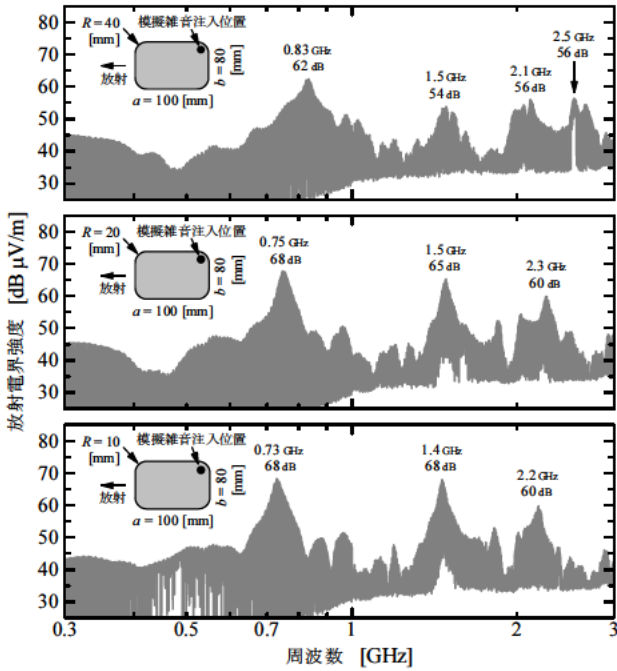


図 6 (b) 矩形プレーンの四隅を角丸にした試作基板の放射電界強度測定結果

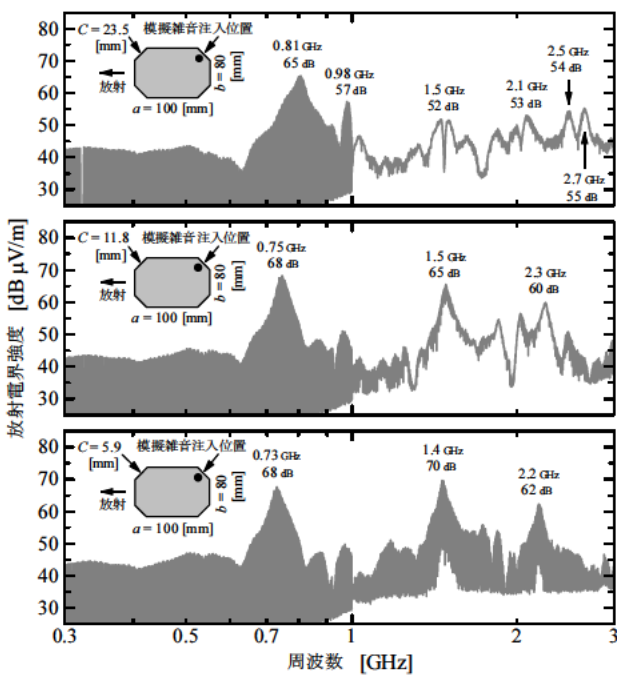


図 6 (c) 矩形プレーンの四隅を面取した試作基板の放射電界強度測定結果

図 7 (a) は基板を横向きに、図 7 (b) は基板を縦向きにして測定したものである。図 7 (a) 図 7 (b) とともに、ずれの大きさが 0 mm の場合は既報¹³⁾のとおり奇数モード共振点 f_{10} , f_{01} , f_{30} , f_{03} の放射電界強度は観測できないほど小さいが、ずれの大きさが大きくなるに従って奇数モード共振点の放射電界強

度が徐々に大きくなっている。特に、図 7 (a) の場合(基板横向き)は共振点 f_{10} 及び f_{30} の、図 7 (b) の場合(基板縦向き)は共振点 f_{01} 及び f_{03} の放射電界強度の増加率が大きい。一方、偶数モード共振点 f_{20} , f_{02} については、ずれの大きさが大きくなるに従って若干ではあるが放射電界強度が徐々に小さくなっている。

次に、奇数モードの各共振点 f_{10} , f_{01} , f_{30} , f_{03} について、各ずれの大きさにおける放射電界強度の値をプロットした結果を図 8 (a) に、更に、図 8 (a) について、横軸の値を各共振点の波長で正規化し、縦軸の値を各共振点の最大強度で正規化した結果を図 8 (b) に示す。図 8 (b) を見ると、ずれの大きさの変化に伴う放射電界強度の変化は f_{10} , f_{01} , f_{30} , f_{03} の各共振点で極めて良く一致していること、模擬雑音注入位置がプレーン中央部から約 2% 以内のずれの場合には放射電界強度が最大強度に比べて少なくとも 15 dB 程度小さく観測されることがわかる。こ

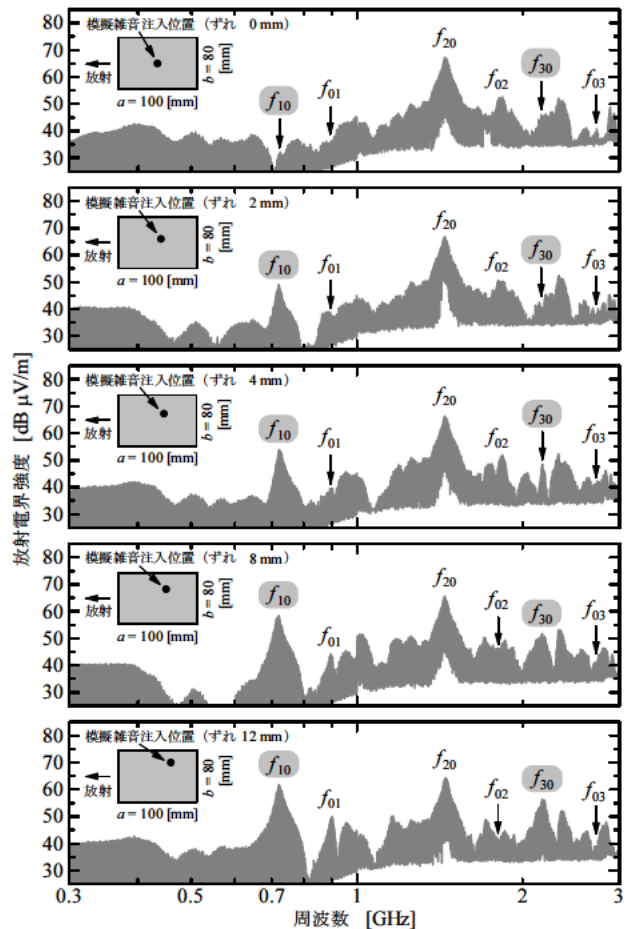


図 7 (a) 雑音発生源位置のずれによる放射電界強度測定結果の影響 (基板横向き)

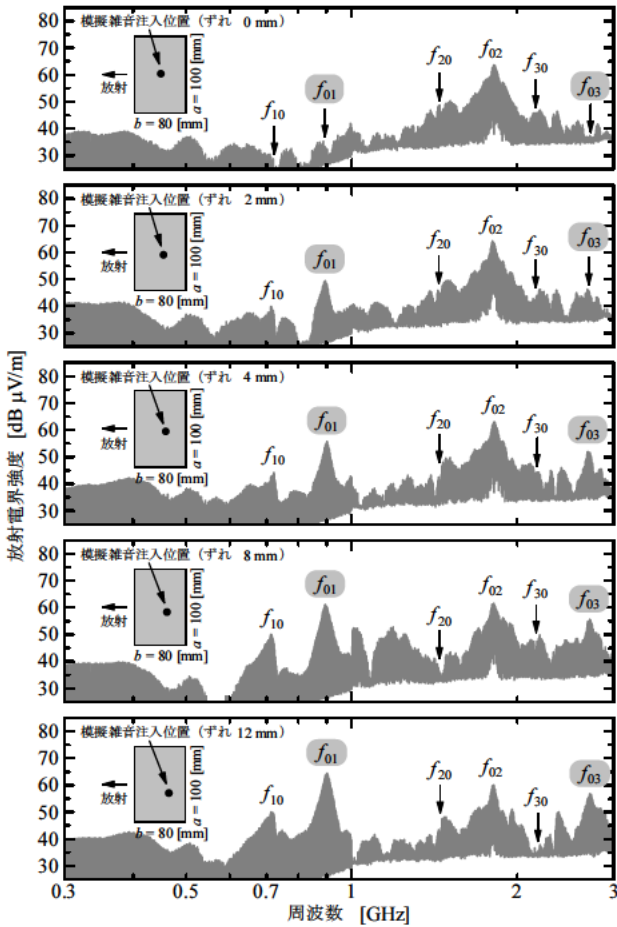


図 7 (b) 雑音発生源位置のずれによる放射電界強度測定結果の影響 (基板縦向き)

のことから、雑音発生源をプレーン中央部から雑音波長の約 2% 以内の位置に配置すると、少なくとも 15 dB 程度の雑音低減効果が得られることがわかった。

なお、この雑音低減化手法については、雑音発生源となる部品をプリント回路基板上に実装して更に実験・検討を重ねることが望ましいため、部品実装実験による検討を次年度の課題としたい。

4. まとめ

電気製品のプリント回路基板における GHz 帯の電磁雑音について、VCC プレーンと GND プレーンで形成される平行平板共振に着目し、主に試作基板の放射電界強度を放射エミッション測定システムで測定することにより、雑音低減化を目指して取り組んだ。その結果、プレーン外形に変化を加えて雑音低減化を目指した実験では大きな雑音低減効果が得られなかったものの、雑音発生源の位置をプレーン

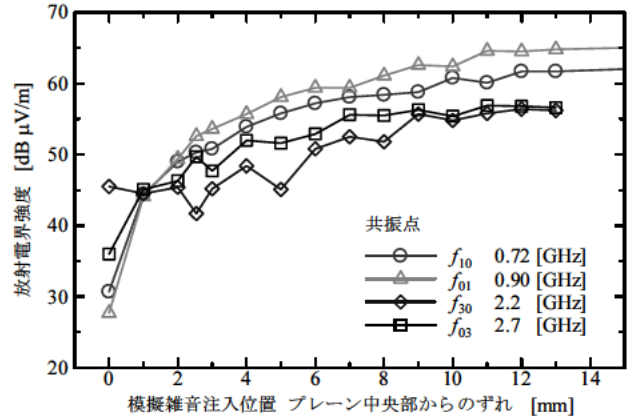


図 8 (a) 模擬雑音注入位置のプレーン中央部からのずれと放射電界強度の相関

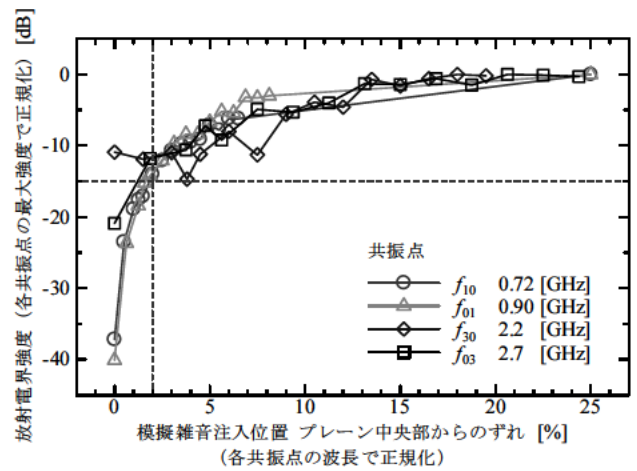


図 8 (b) 模擬雑音注入位置のプレーン中央部からのずれと放射電界強度の相関 (各軸 正規化後)

中央部に配置した場合について雑音発生源の配置ずれの影響を測定により明らかにし、雑音低減化の手法として活用できる可能性を示した。また、プリント回路基板から放射する電磁雑音の測定方法について、試作基板と放射エミッション測定システムによる測定系を構築し、正確に評価できることを確認した。本研究事業の最終年度となる次年度は、雑音発生源となる部品を実際にプリント回路基板上に実装した場合においても本報の成果を活用できるかどうか等について検討する。

謝辞

本報の実験に用いた 1 GHz 超放射エミッション測定システムは、平成 22 年度電源立地地域対策交付金交付事業 (経済産業省) により機器設備の整備を行いました。関係各位に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤利三郎ほか：“EMC 電磁環境学ハンドブック 資料編 EMC 規格規制”. 三松 (2009)
- 2) 石飛徳昌：“波長による高周波の分類とそれぞれの性質 高周波に取り組む前に知っておくべき概念”. ソネット技研 (2011)
- 3) 大越孝敬ほか：“平面回路”. オーム社 (1975)
- 4) Official Journal of the European Union, 52 (C197), p3 (2009)
- 5) VCCI 協会：“適合確認試験における 1GHz 超放射妨害波測定施行のお知らせ”. <http://www.vcci.jp/topics/detail.php?n=81> (2011)
- 6) 小磯賢智ほか：“シールド材評価装置の電磁波シミュレーション解析”. 平成 20 年度三重県工業研究所研究報告, 33, p44-47 (2009)
- 7) 小磯賢智ほか：“EMI 抑制と電磁界シミュレーションの活用”. 平成 21 年度三重県工業研究所研究報告, 34, p62-66 (2010)
- 8) 小磯賢智ほか：“電子回路基板の EMI ノイズ対策技術”. 平成 22 年度三重県工業研究所研究報告, 35, p15-21 (2011)
- 9) 小磯賢智ほか：“高周波 (GHz) における電磁雑音低減技術の開発 —プリント回路基板における高周波雑音発生状況の検討—”. 平成 23 年度三重県工業研究所研究報告, 36, p41-43 (2012)
- 10) 遠矢弘知：“はじめてのノイズ対策技術”. 工業調査会 (1999)
- 11) 和田修己：“プリント基板からの電磁波放射 (その 2)”. エレクトロニクス実装学会誌, 4 (4), p322-327 (2001)
- 12) 芳賀知：“高速・高密度実装時代におけるプリント基板の最適 EMC 設計”. ティー・エム研究所 (2011)
- 13) 大力賢次：“プリント配線板の EMI への影響について —シミュレーション活用によるノイズ低減技術の研究 第一報—”. 茨城県工業技術センター研究報告, 28 (1999)
- 14) “電子回路基板材料 総合カタログ”. パナソニック 電子材料ビジネスユニット (2013)