

Bluetooth® Low Energy マイコン

パターン・アンテナ設計ガイド

要旨

本書は、アンテナの概論と Bluetooth® Low Energy 技術対応マイコン（以降 Bluetooth Low Energy マイコン）向けにパターン・アンテナを設計される場合の設計手順と設計例を紹介しています。

対象デバイス（Bluetooth Low Energy マイコン）

RL78/G1D（型名：R5F11Axxxxx）

RX23W（型名：R5F523Wxxxxx）

RA4W1（型名：R7FA4W1xxxxx）

RE01B（型名：R7F0E01Bxxxxx）

目次

1. アンテナ概要	3
1.1 ダイポール・アンテナ	3
1.2 モノポール・アンテナ	4
2. パターン・アンテナと小型化アンテナ	5
2.1 パターン・アンテナ	5
2.2 小型化パターン・アンテナ	5
2.2.1 逆L化	5
2.2.2 横型ミアンダ化	6
2.2.3 縦型ミアンダ化	6
3. アンテナ要求仕様の導出方法	7
3.1 指向特性	7
3.2 偏波特性	7
3.3 許容されるアンテナ領域の面積	8
3.4 要求される通信距離	8
4. アンテナ特性パラメータと評価方法	9
4.1 電圧定在波比（VSWR）	9
4.2 インピーダンス特性（スミス・チャート）	9
4.3 放射特性	10
5. 小型パターン・アンテナの設計例	11
5.1 縦型ミアンダ（実測）	11
5.1.1 特徴	11
5.1.2 基板層の構成	11
5.1.3 寸法図（Top View）	12
5.1.4 VSWR と放射特性	13
5.2 細型ミアンダ（シミュレーション）	15

5.2.1 特徴.....	15
5.2.2 基板層の構成.....	15
5.2.3 エレメント部の寸法.....	16
5.2.4 VSWR と放射特性.....	17
5.3 横型ミアンダ（シミュレーション）.....	18
5.3.1 特徴.....	18
5.3.2 基板層の構成.....	18
5.3.3 エレメント部の寸法.....	19
5.3.4 VSWR と放射特性.....	19
6. アンテナ・マッチングの調整例.....	21
6.1 基板の角へのアンテナのモデリング（試作）.....	22
6.1.1 セミリジッド・ケーブルの取り付けとネットワーク・アナライザへの接続（基板試作）.....	24
6.1.2 VSWR の確認と共振周波数の調整、放射特性の確認.....	25
6.2 基板の辺の中央へのアンテナのモデリング（試作）.....	27
6.2.1 VSWR の確認と共振周波数の調整.....	28
6.2.2 インピーダンスの測定と集中定数によるマッチング.....	29
6.2.3 分布定数によるマッチング.....	33
7. アンテナの試作例.....	36
7.1 アンテナ試作基板の層構成.....	36
7.2 アンテナ・エレメント寸法図（Top View）.....	37
7.3 アンテナ試作基板寸法図（Top View）.....	39
7.4 アンテナ試作基板外観写真.....	39
7.5 アンテナ試作基板評価結果.....	40
7.5.1 VSWR.....	40
7.5.2 放射特性.....	40
8. まとめ.....	41
8.1 アンテナ設計環境の確認.....	41
8.2 アンテナ仕様の明確化.....	41
8.3 GND サイズの確保.....	41
8.4 設計例を用いた電磁界シミュレーションまたは試作.....	41
8.5 マッチング調整とそのパラメータ.....	41
8.6 放射特性.....	41
9. ツール情報（参考）.....	42
9.1 電磁界シミュレータ.....	42
9.2 スミス・チャート.....	42
改訂記録.....	43

Bluetooth® のワードマークおよびロゴは、Bluetooth SIG, Inc. が所有する登録商標であり、ルネサス エレクトロニクス株式会社はこれらのマークをライセンスに基づいて使用しています。その他の商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1. アンテナ概要

アンテナは一般的に磁界放射型と電界放射型に大別されます。前者の代表例はループ・アンテナで、比接触 IC カードなどで使用されています。後者は長距離の通信などに用いられ、その代表例は Bluetooth や Wireless LAN などです。

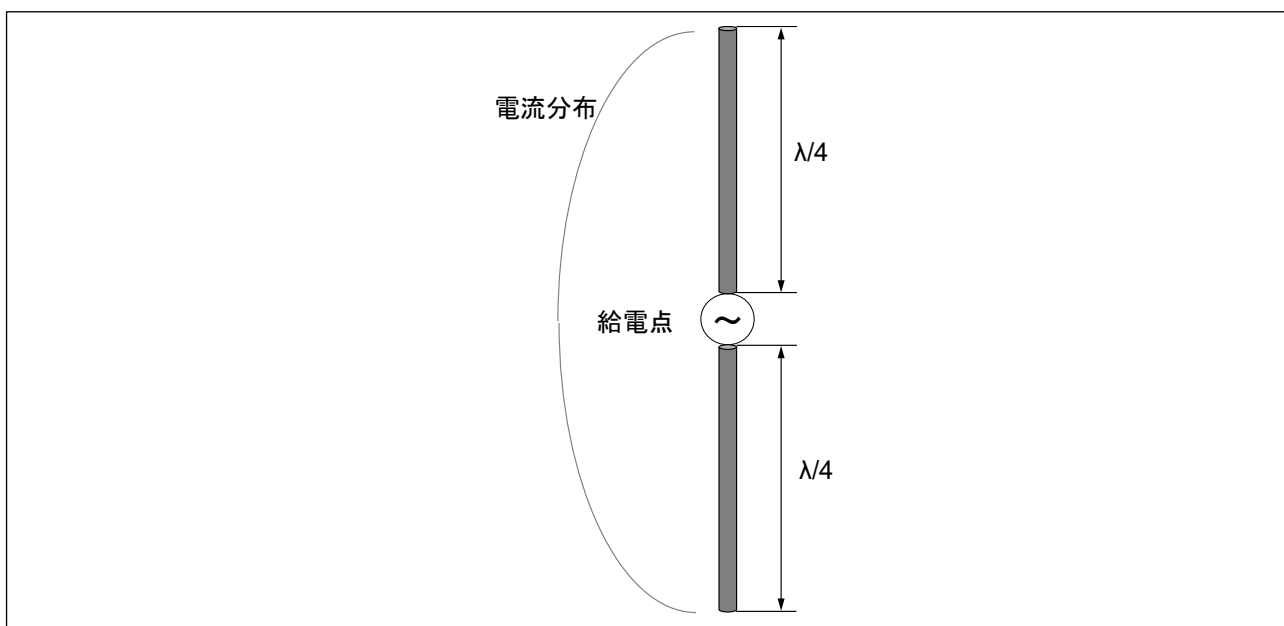
本書では、電界放射型で基板パターンによって形成され、最も良く用いられる、後者の線状アンテナについて説明します。

1.1 ダイポール・アンテナ

一般的な逆 F (PIFA) やミアンダ形状のアンテナは、いずれもダイポール・アンテナの原理が基本です。

図 1 - 1 にその原理図を示します。

図 1 - 1 ダイポール・アンテナの原理



ダイポール・アンテナは半波長アンテナとも呼ばれ、信号源（給電点）に対して $\lambda/4$ の導体（エレメント）が接続された構造です（ λ は波長）。

$f = 2.4 \text{ GHz}$ の場合、 λ の値は次のとおりです。

$$\lambda = c/f = 0.125 \text{ [m]} = 125 \text{ [mm]}$$

λ : 波長 [m]

c : 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$

f : 周波数 $= 2.4 \times 10^9 \text{ [Hz]}$

1.2 モノポール・アンテナ

1.1 のダイポール・アンテナを半分に切った形状をモノポール・アンテナと呼びます。

これは図 1-2 のように、ダイポール・アンテナの下半分を地面（GND）に接続します。この構成でも上半分の電流分布は変わらず、図 1-2 と図 1-3 は等価特性となります。

これをイメージ効果またはミラー効果と呼びます。

図 1-2 モノポール・アンテナ

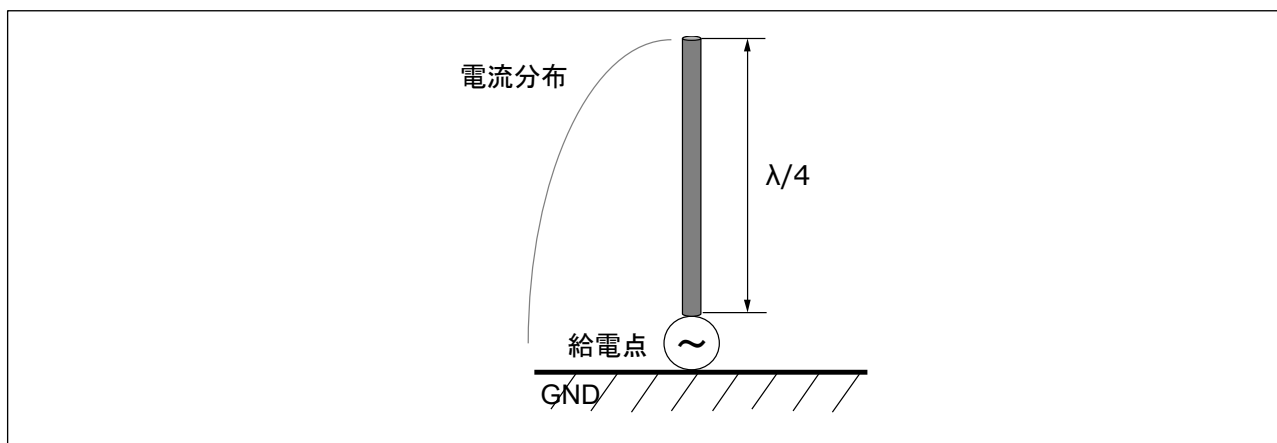
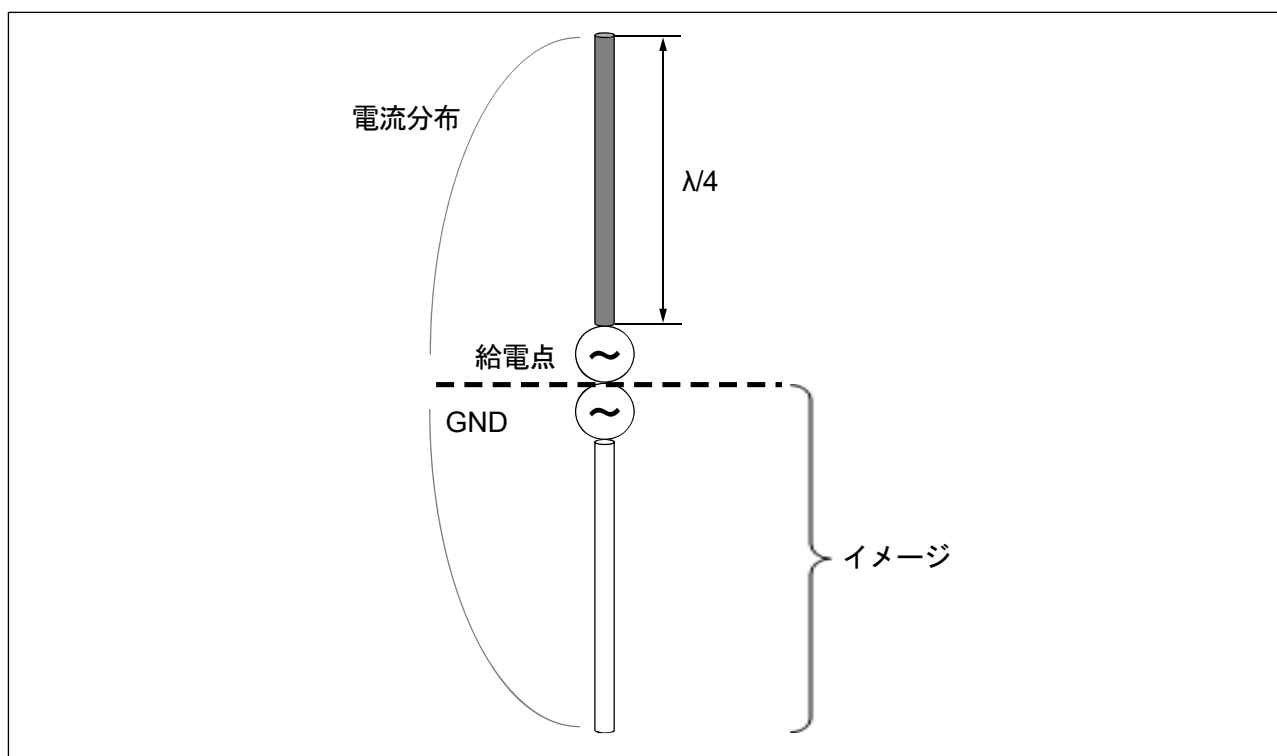


図 1-3 イメージ効果



アンテナを小型化するため、ほとんどのパターン・アンテナやチップ・アンテナが、このイメージ効果を利用しています（「2.2 小型化パターン・アンテナ」参照）。

注意 イメージ効果を得るには、波長に対して十分な長さで広い面積の GND が必要です。

2. パターン・アンテナと小型化アンテナ

2.1 パターン・アンテナ

最も単純なアンテナ設計方法として、1.1, 1.2 で説明したダイポール・アンテナやモノポール・アンテナを基板の配線パターンで形成することが考えられます。

推奨 ダイポール・アンテナは、GND サイズの影響を受けずに特性を確保できるので、アンテナ・パターンの形状や面積に制約がなければ、採用をお勧めします。

2.2 小型化パターン・アンテナ

実際には、システム形状などの制約で、2.1 のダイポール・アンテナやモノポール・アンテナを採用できないことが考えられます。その場合、モノポール・アンテナを変形させ、小型化を検討する必要があります。

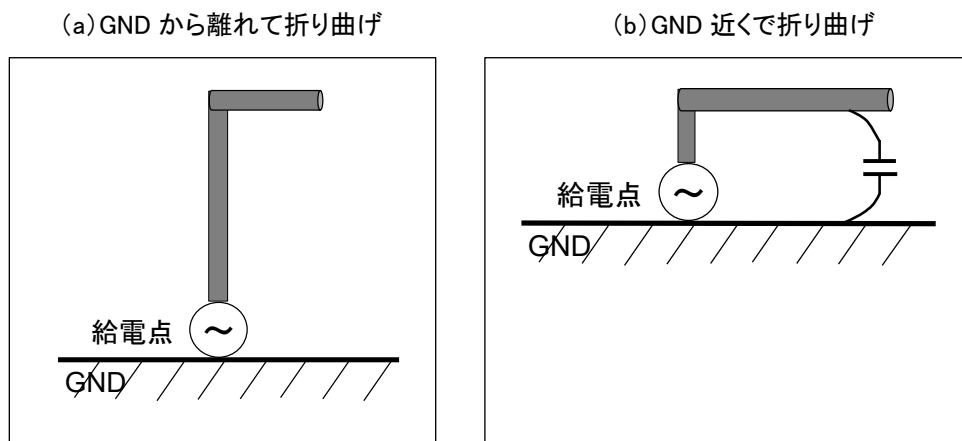
以下に、小型化の検討例を説明します。

2.2.1 逆 L 化

図 2-1 (a) に、モノポール・アンテナの先端を曲げた形状を持つ、逆 L モノポール・アンテナの例を示します。逆 L 型形状になるので、アンテナの高さを低くすることができます。

また図 2-1 (b) のように、折り曲げ位置によっては、さらに低くできます。ただし、GND とエレメントの近接で容量成分が形成されます。これはアンテナのインピーダンス（以下 Z ）低下の原因となるので、集中定数や T 整合回路によるマッチングが必要になることがあります（「6.4.3 ②集中定数によるマッチング、③T 整合追加によるマッチング」参照）。

図 2-1 逆 L モノポール・アンテナ



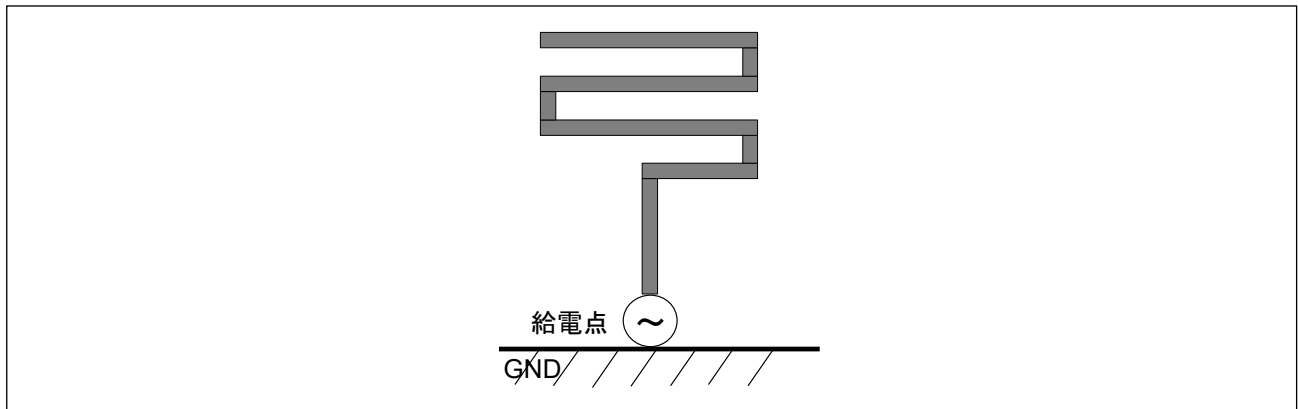
2.2.2 横型ミアンダ化

図 2-2 に横型ミアンダ・モノポール・アンテナの例を示します。

2.2.1 の逆 L 形状の折り曲げを繰り返して、さらに低くできます。

逆 L 化と同様に、Z 低下によるマッチングが必要になることがあります。

図 2-2 横型ミアンダ化モノポール・アンテナ



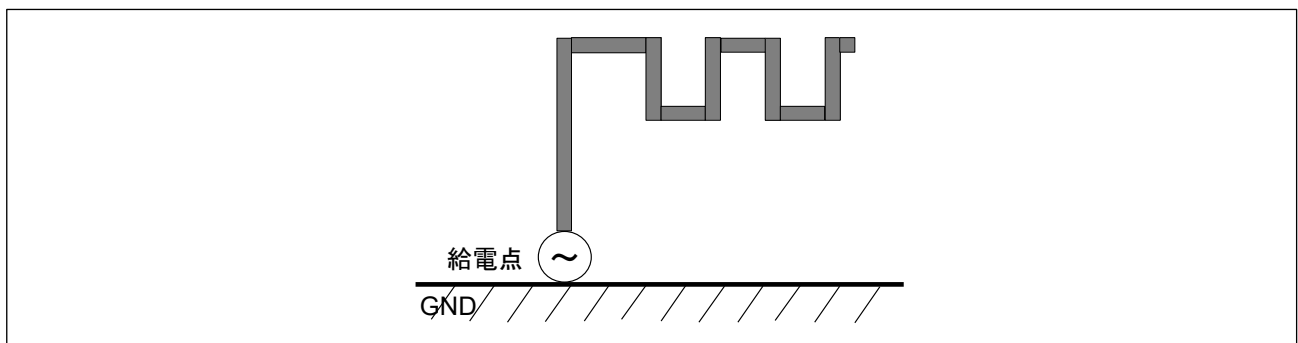
2.2.3 縦型ミアンダ化

図 2-3 に縦型ミアンダ・モノポール・アンテナの例を示します。

2.2.2 では GND に対して平行に折り曲げていましたが、このアンテナでは GND に対して垂直に折り曲げを繰り返して、低く小型化できます。

逆 L 化と同様に、Z 低下によるマッチングが必要になることがあります。

図 2-3 縦型ミアンダ化モノポール・アンテナ



3. アンテナ要求仕様の導出方法

アンテナ設計の前に、要求される仕様を整理しておく必要があります。システムの用途や使用条件などによって、最適なアンテナ構造を選択することにより、アンテナ設計を適正化できます。

3.1 指向特性

システムの用途によって、指向特性を考慮する必要があります。

たとえば、設置方向が固定できない携帯機器なら、無指向特性が必要かもしれません。

また、固定設置で長距離通信が必要なら、指向特性を持たせて、アンテナ利得を確保する必要があるかもしれません。

3.2 偏波特性

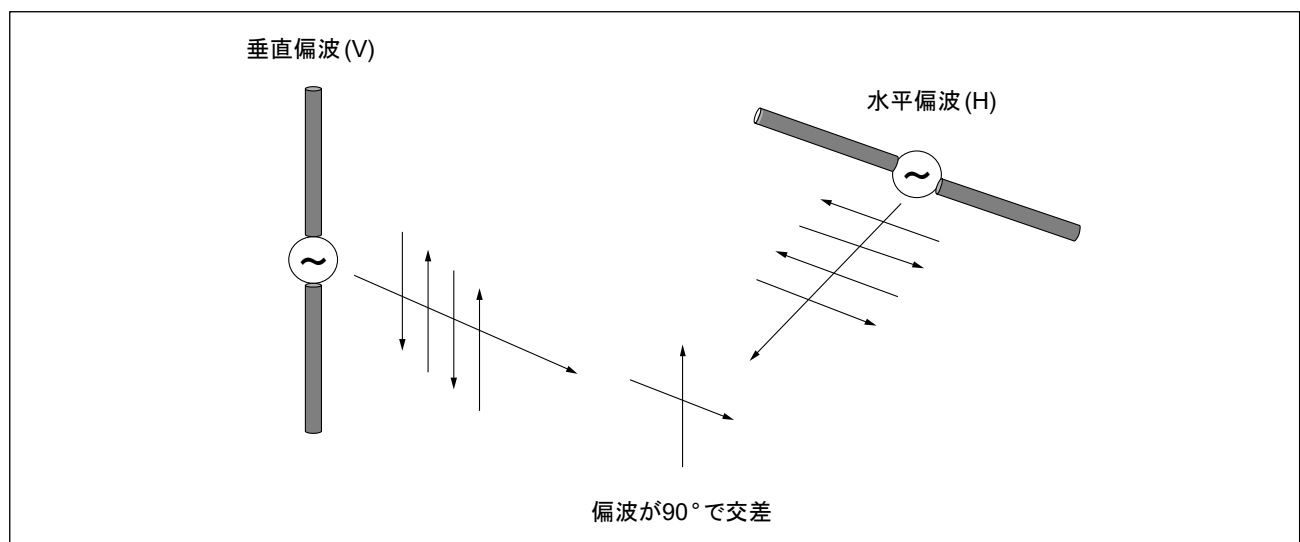
システムが固定設置の場合、偏波方向を考慮する必要があります。

電波が空間を伝播するとき、磁界と電界が直交して進行します。電界だけを考えると、大地 (GND) に対して電界が作り出す平面を偏波面と呼び、垂直に電界が発生する場合は垂直偏波、水平に発生する場合は水平偏波です。

図 3-1 に垂直偏波と水平偏波の関係を示します。もし対向するシステムの偏波面が 90° に直交している場合、アンテナ利得を得られないことになります。

固定設置機器の場合、十分なアンテナ特性を得るには、対向するシステムの偏波面を合わせる必要があります。

図 3-1 垂直偏波と水平偏波



本書で説明する線状アンテナの偏波面はこのような直線状ですが、偏波面が回転する円偏波という方式を用いたアンテナも実用化されています。

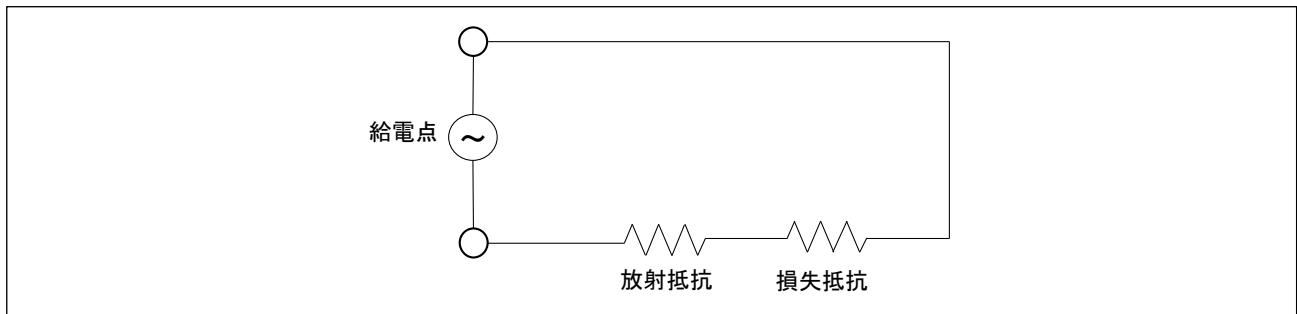
3.3 許容されるアンテナ領域の面積

システムの IC 実装基板の寸法やアンテナ実装位置などにより、アンテナに与えられる面積は様々です。

システムの構造設計の段階から、アンテナの搭載位置、面積を確保しておくべきです。

図 3-2 に示すとおり、アンテナの等価回路は、放射抵抗と損失抵抗の直列接続です。アンテナは小型になると損失抵抗が増え、放射効率が低化します。したがって、利得を得たい場合は、大きなアンテナを設計されることをお勧めします。

図 3-2 アンテナの等価回路



ただし、アンテナと筐体の位置関係に注意が必要です。たとえば、一般的な ABS 製筐体の場合、筐体の近接によってアンテナ特性が変化します。最も簡単な回避策は、筐体からアンテナを離すことです。そのため、アンテナの面積だけでなく、容積にも注意が必要です。

3.4 要求される通信距離

無線システムの通信距離は、机上で計算できます。

通信距離を決める具体的な要素例には、次の項目があります。

- ① IC の送信電力【Pout】、受信感度【Min_sens】
- ② 基板上の電力損失【ILTx, ILRx】
- ③ アンテナ利得【GT, GR】
- ④ 伝搬空間損失【PL】
- ⑤ 空間反射【PL】（マルチパス）

①は IC のデータシートから得られます。

②は基板設計に左右されます。

③は測定で得られます（「4.3 放射特性」参照）。

④はフリスの公式で得られます。

⑤は使用環境で大きく変わるので、計算は困難です。ただし、④と⑤を含めた室内環境での一般的な計算方法が、ITU-R P.1238 で提案されています。

4. アンテナ特性パラメータと評価方法

アンテナの設計と評価をする上で、理解しておくべきパラメータについて説明します。

4.1-4.3 いずれも、アンテナに同軸ケーブルを直接接続して評価します。またシステムは、通電したり動作させる必要はありません^{注1}。

注1 一部の Over The Air 測定では、通電して試験することがあります。本資料では割愛します。

4.1 電圧定在波比 (VSWR)

電圧定在波比 (VSWR: Voltage Standing Wave Ratio) は、アンテナ給電点へ入力した電力が、どれだけの割合でアンテナへ入力されているかのパラメータです。実際には、ネットワーク・アナライザを用いて VSWR を測定します。

Bluetooth Low Energy マイコンに適用される周波数帯域は 2400-2480 MHz なので、この帯域で $VSWR < 2$ または < 3 の共振周波数特性を得るように、アンテナの設計と調整を行います。

なお、 $VSWR = 2$ のとき、アンテナに入力される電力は約 89% になります。また $VSWR = 3$ のとき、その電力は約 75 % になります。

図 4 - 1 に測定結果の例を示します。

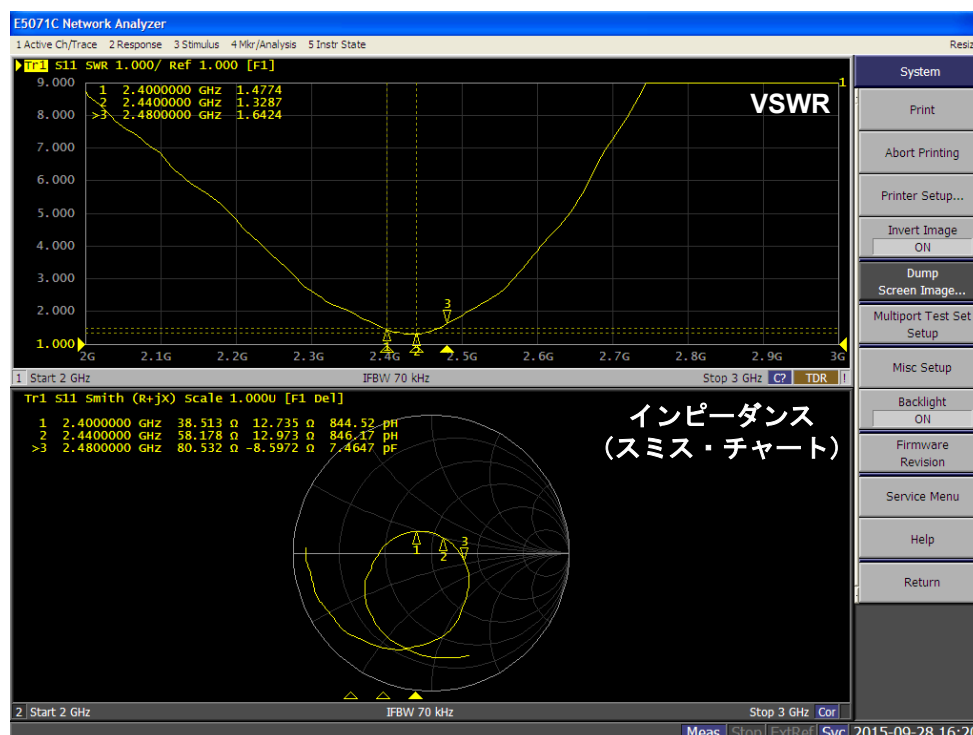
4.2 インピーダンス特性 (スミス・チャート)

インピーダンス特性は、ネットワーク・アナライザで S11 特性を測定して得られます。

インピーダンスは $Z = R + jX$ で表され、実部の値は R、虚部の値は X です。VSWR 値が高い場合、共振周波数のピークが目標の周波数帯域にあって、一般にインピーダンスが 50 Ω からずれます。この場合、スミス・チャートを用いて、インピーダンス Z を 50Ω に近づける (アンテナ・マッチングを取る) ことが必要です。

図 4 - 1 に測定結果の例を示します。

図 4 - 1 VSWR とインピーダンスの測定例

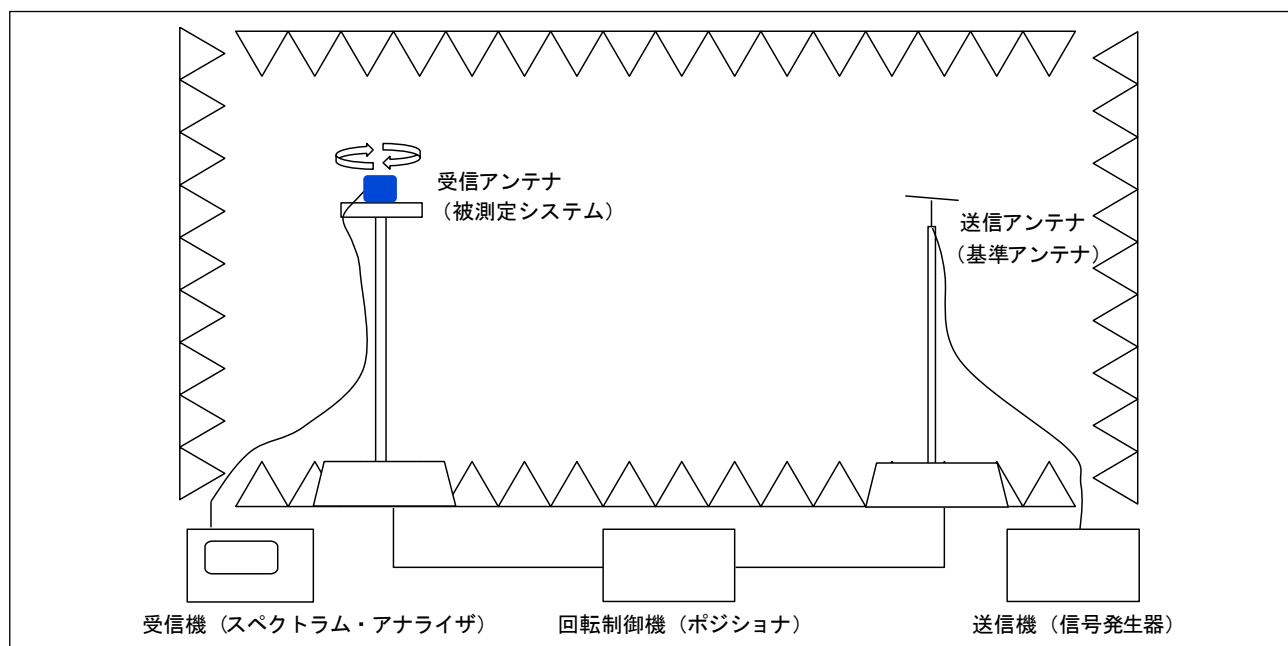


実際は、VSWR とインピーダンスは等価であり、スミス・チャートに等 VSWR 円を描けば VSWR が得られます。

4.3 放射特性

アンテナの放射は、図 4-2 のような測定環境で測定します。

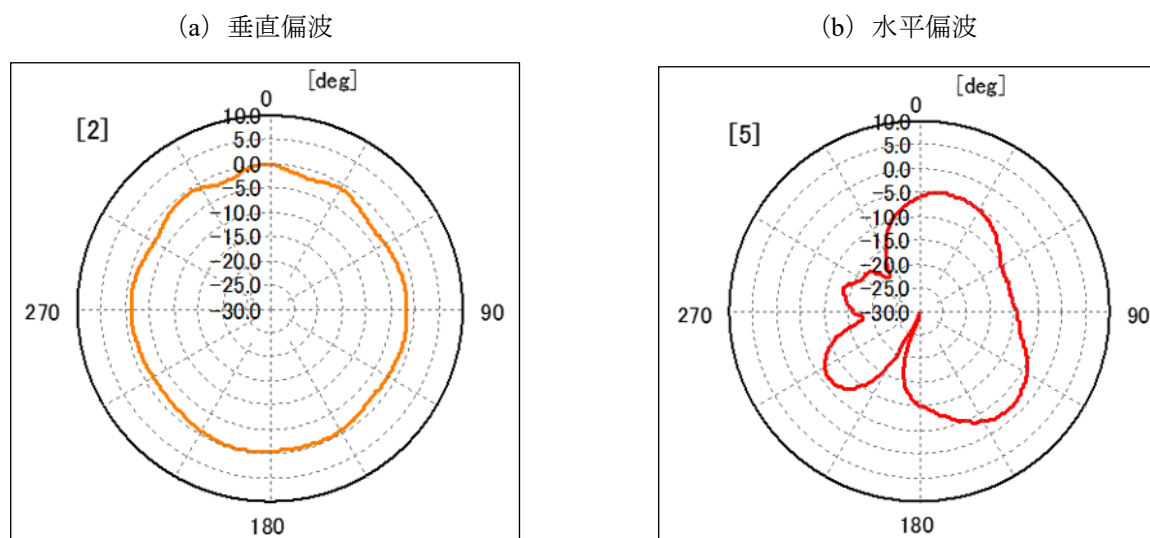
図 4-2 放射特性の測定環境



このような測定環境を 6 面電波暗室と呼び、全方向の電波反射を防いだシールド・ルームになっています。このような設備は、民間の EMC 測定会社や公的な産業技術センタなどで利用できます。

6 面暗室で得られた放射特性測定結果の例を図 4-3 に示します。

図 4-3 放射特性測定結果の例



これらの放射特性が設計どおりか確認し、また平均利得や最大利得などを検証します。

5. 小型パターン・アンテナの設計例

ここでは、3 種類のパターン・アンテナについて、構造と特性を説明します。

システムの構造要件から選択できます。

5.1 縦型ミアンダ（実測）

5.1.1 特徴

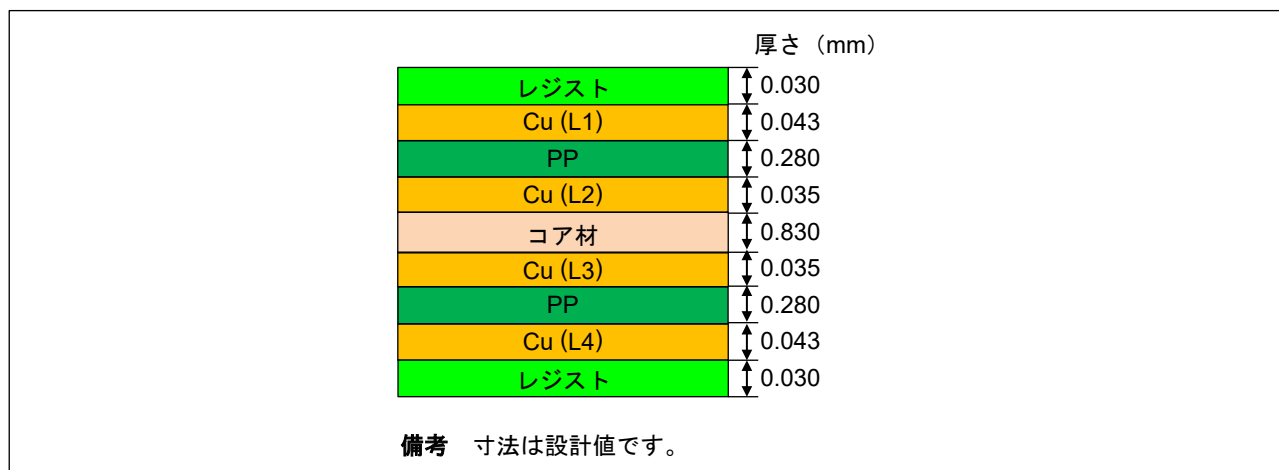
高さが低く、広いアンテナ面積を確保できる場合に最適です。

アンテナ・エリア寸法：7×33 mm

VSWR<2、帯域幅：約 115 MHz

5.1.2 基板層の構成

図 5－1 縦型ミアンダの基板層の構成



- 基材：MCL-E-67 (FR4)（日立化成株式会社製）

- 厚さ

- ・ 基板：1.6 mm
- ・ アンテナ部導体

L1, L4 (Cu)：43 μm

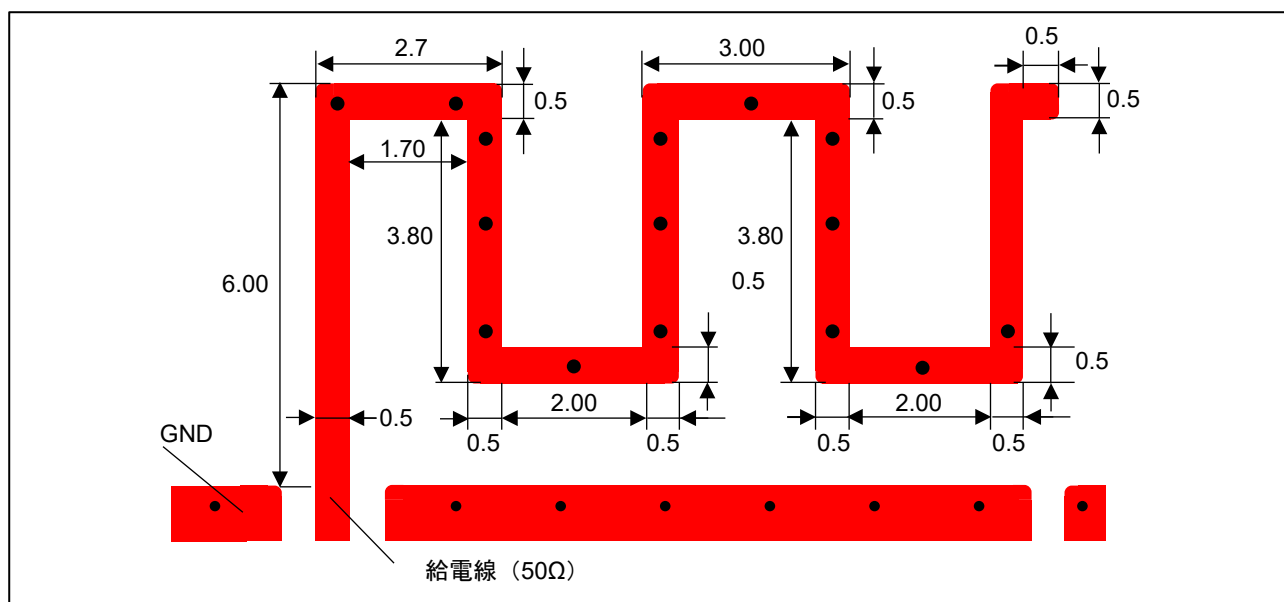
L2, L3 (Cu)：35 μm

5.1.3 寸法図 (Top View)

本項で表記している寸法は設計値です（単位：mm）。

图 5-2 寸法图 (1/2)

(a) パターン・アンテナ寸法 (L1)



(b) パターン・アンテナ寸法 (L4)

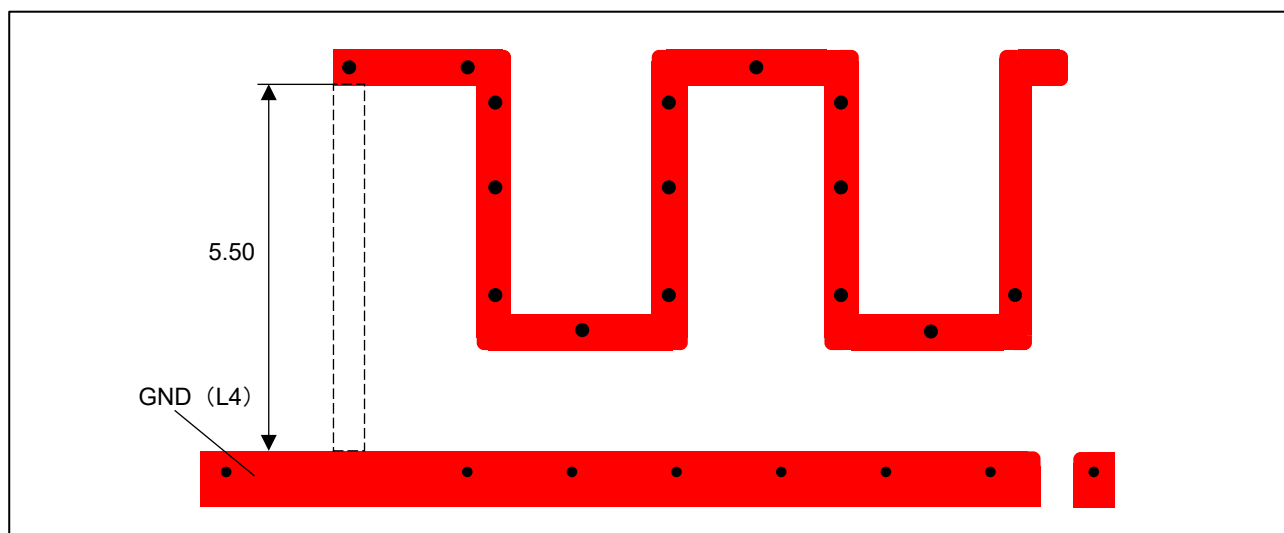
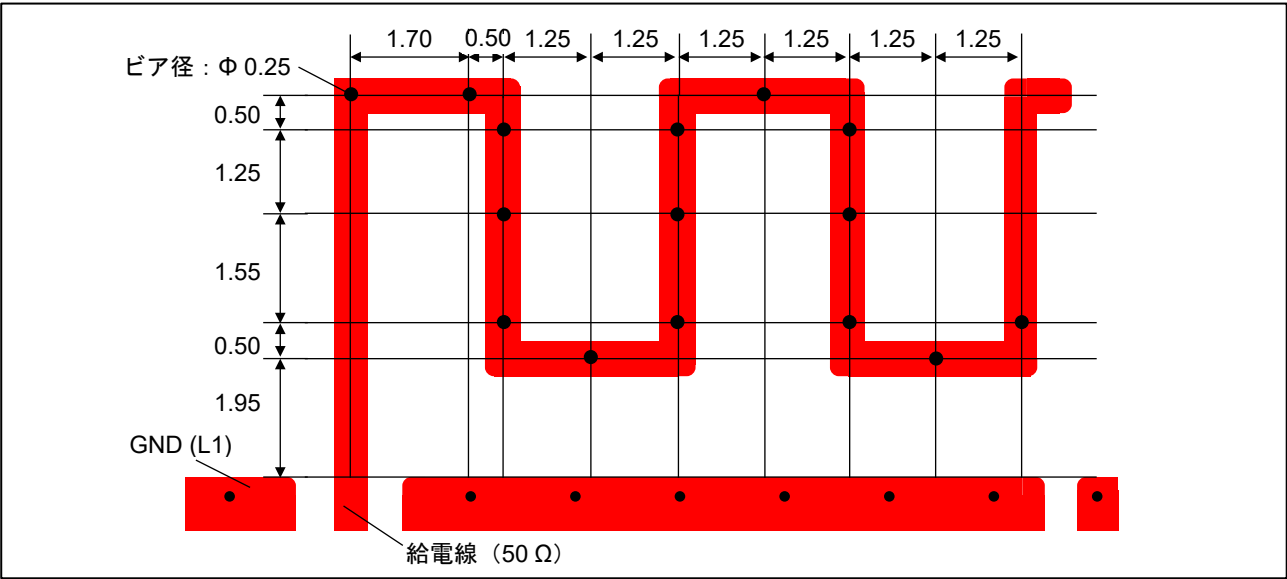
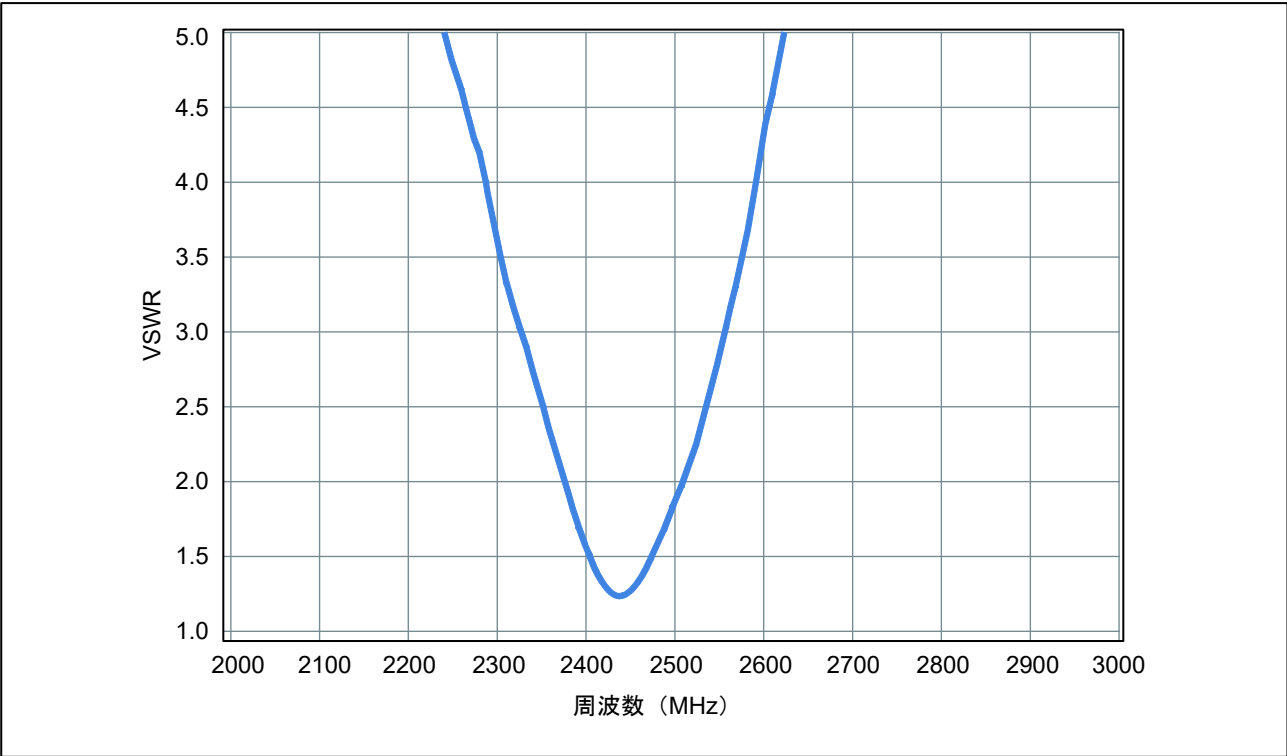


図 5-2 寸法図 (2/2)
(c) ビア位置



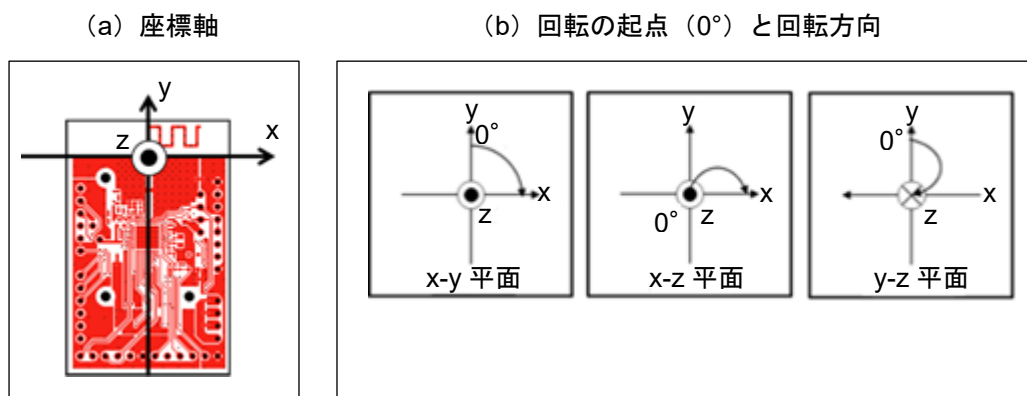
5.1.4 VSWR と放射特性

図 5-3 VSWR 特性



評価ボードの座標軸と回転の起点 (0°)、回転方向を図 5-4 に示します。座標軸は図 5-4 (a) のように定義しています。各平面の放射パターンを表示する際の回転の起点 (0°) と回転方向は、図 5-4 (b) のように定義しています。

図 5-4 評価ボードの座標と回転 (Top View)



アンテナ間の距離 3 m の 6 面電波暗室で測定した放射パターンと平均利得を表 5-1 に示します。x-y 平面、y-z 平面、x-z 平面の 3 平面について測定しています。

表 5-1 リファレンス・アンテナの放射パターンと平均利得

項 目	x-y 平面 (水平偏波)	x-z 平面 (垂直偏波)	y-z 平面 (水平偏波)
リファレンス・アンテナの放射パターン	XY_2440 MHz	XZ_2440 MHz	YZ_2440 MHz
平均利得	-2.30 dBi	-1.79 dBi	-2.30 dBi

本リファレンス・アンテナの詳細は、アプリケーションノート (R01AN2652) をご参照ください

5.2 細型ミアンダ（シミュレーション）

5.2.1 特徴

細長いアンテナ・エリアを確保できる場合に最適です。

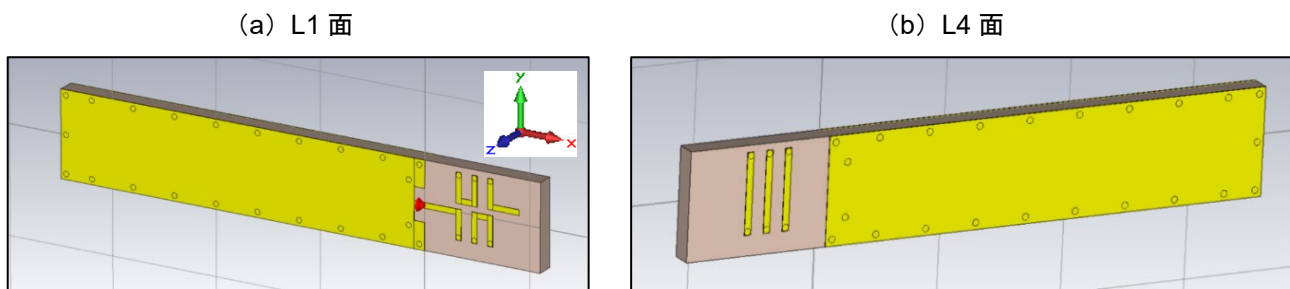
基板両面のミアンダ構造により、アンテナの小面積化ができます。

極めて広帯域幅です。

アンテナ・エリア寸法：8×11 mm

VSWR < 2、帯域幅：約 325 MHz

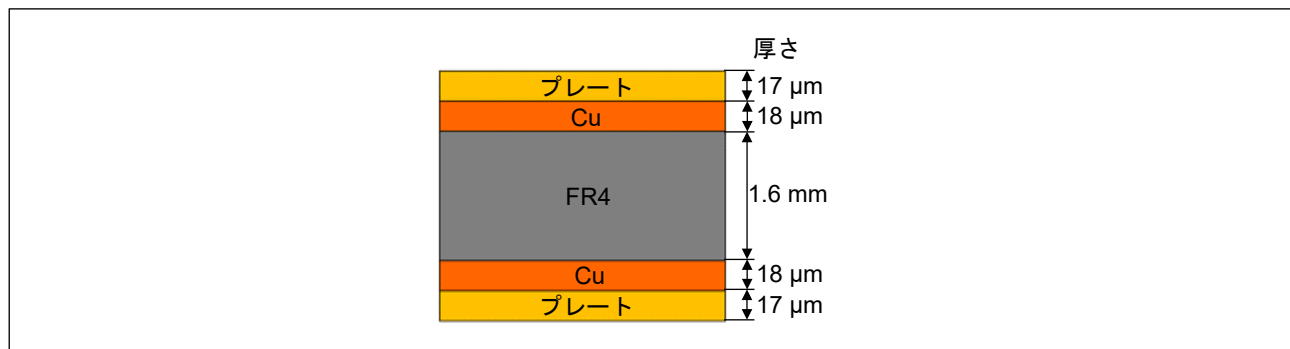
図 5-5 細型ミアンダの外観



5.2.2 基板層の構成

図 5-6 の基板構成を前提に設計しています。

図 5-6 細型ミアンダの基板層の構成



5.2.4 VSWR と放射特性

図 5-8 VSWR 特性

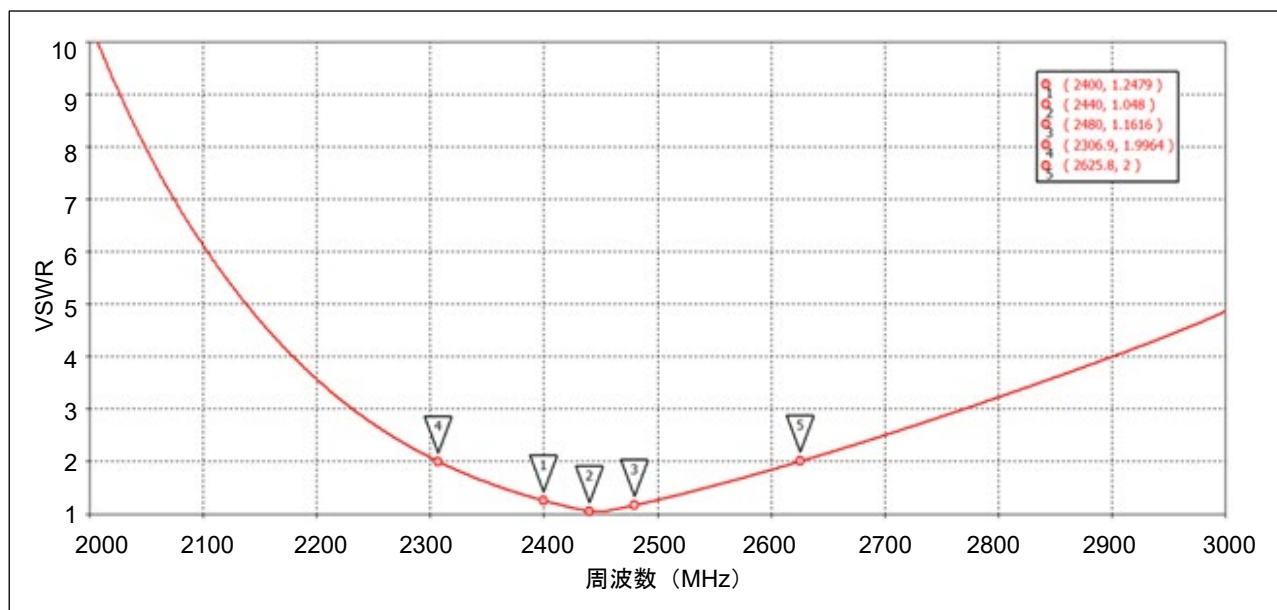
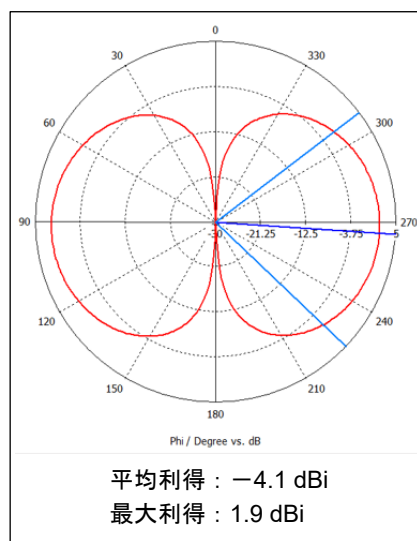
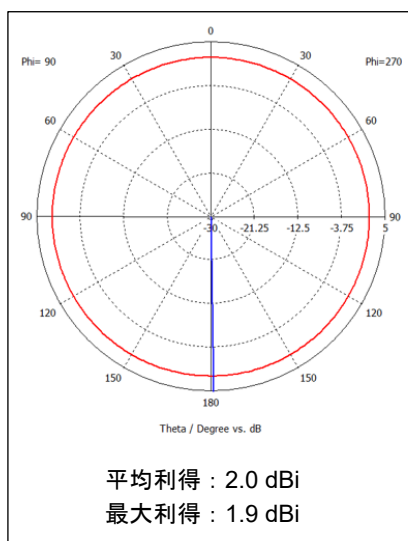


図 5-9 放射特性

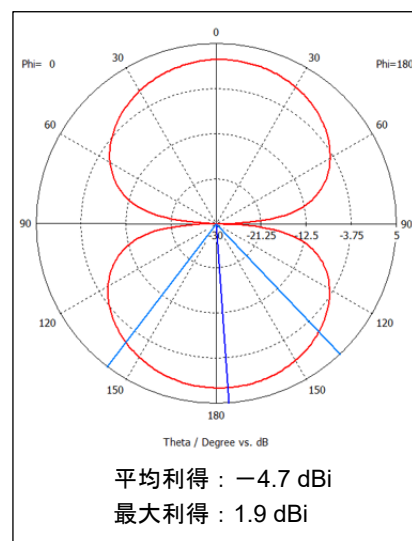
(a) x-y 平面 (水平偏波)



(b) y-z 平面 (垂直偏波)



(c) x-z 平面 (水平偏波)



5.3 横型ミアンダ（シミュレーション）

5.3.1 特徴

低く小型のアンテナです。

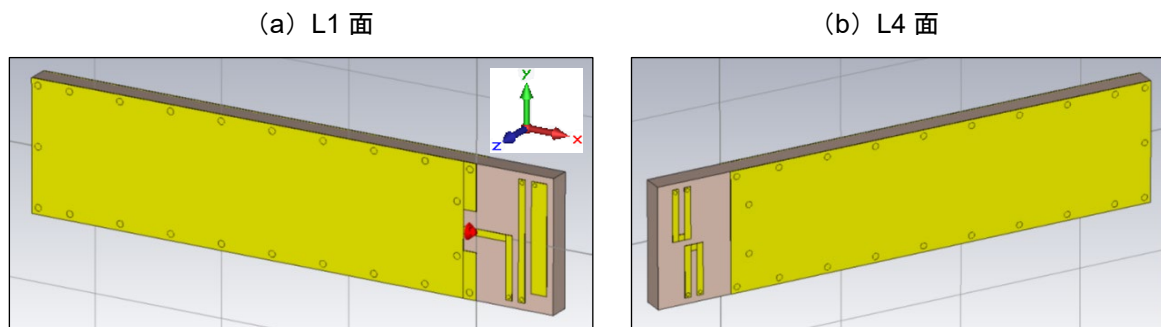
基板両面のミアンダ構造により、アンテナの小面積化ができます。

装荷型構造により、さらに小面積化をしています。

アンテナ・エリア寸法：6×10 mm

VSWR<2 帯域幅：約 320 MHz

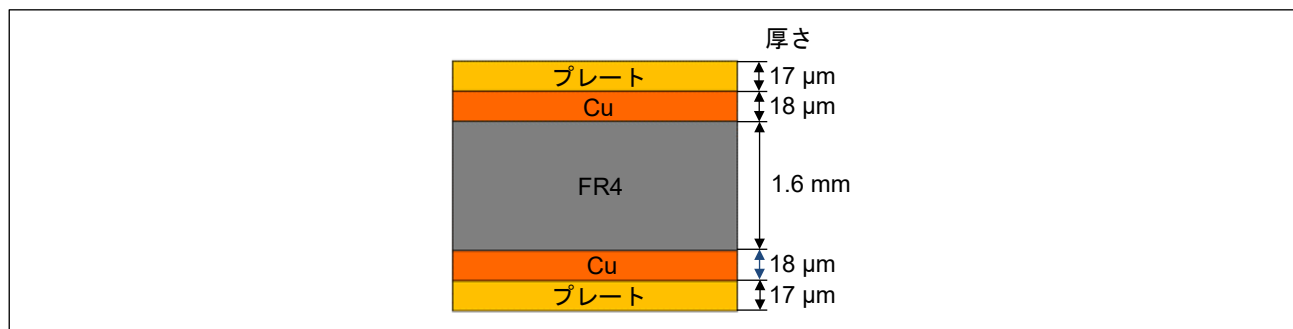
図 5－10 横型ミアンダの外観



5.3.2 基板層の構成

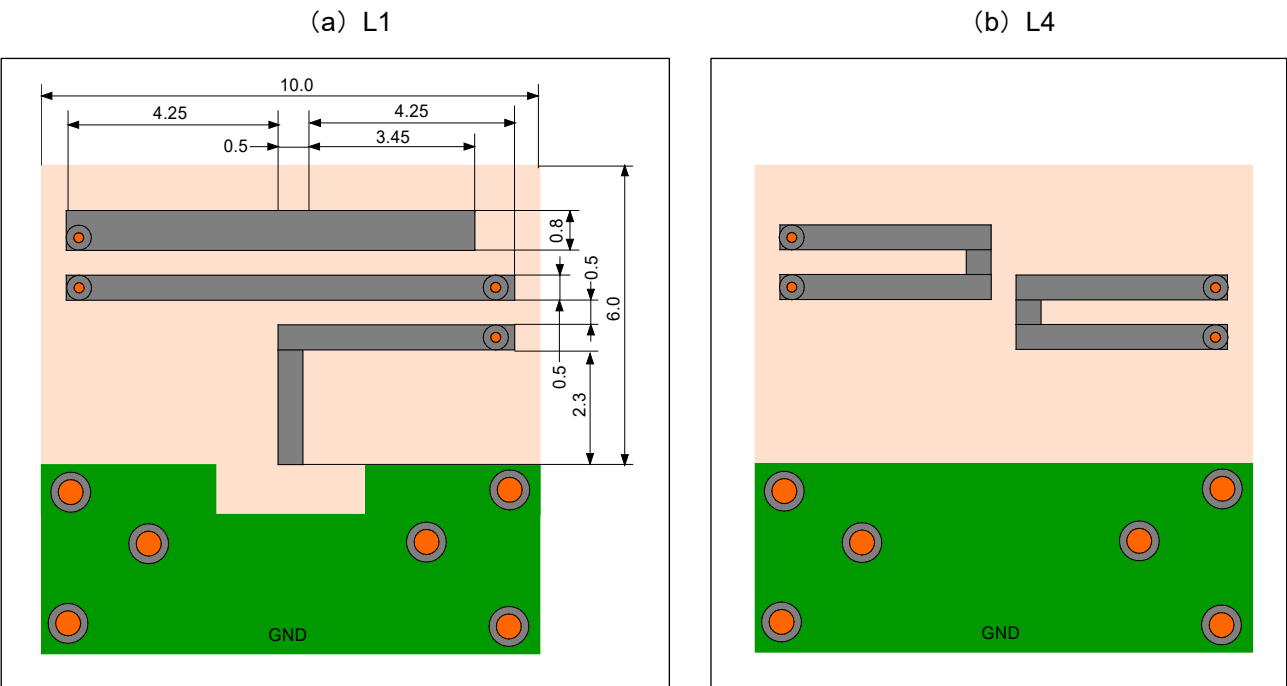
図 5－11 の基板構成を前提に設計しています。

図 5－11 横型ミアンダの基板層の構成



5.3.3 エレメント部の寸法

図 5 – 12 アンテナ・エレメントの寸法図



5.3.4 VSWR と放射特性

図 5 – 13 VSWR 特性

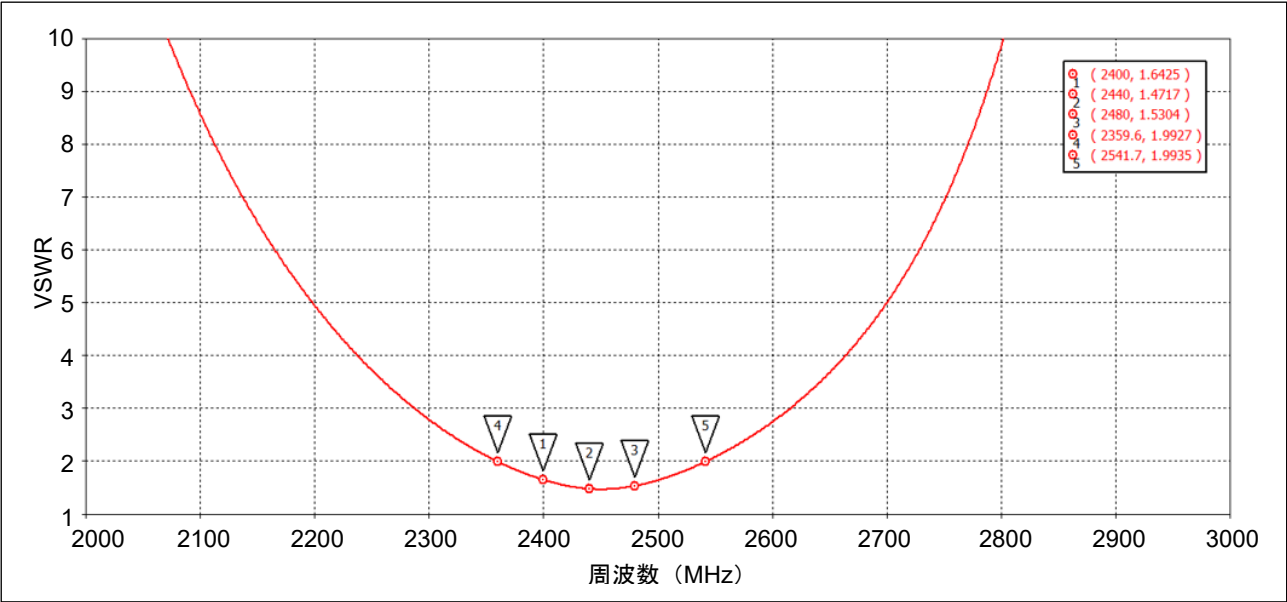
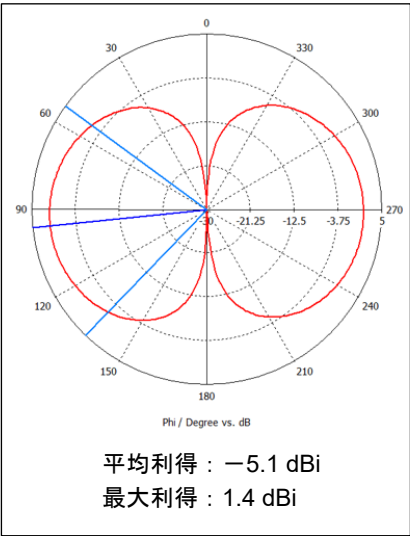
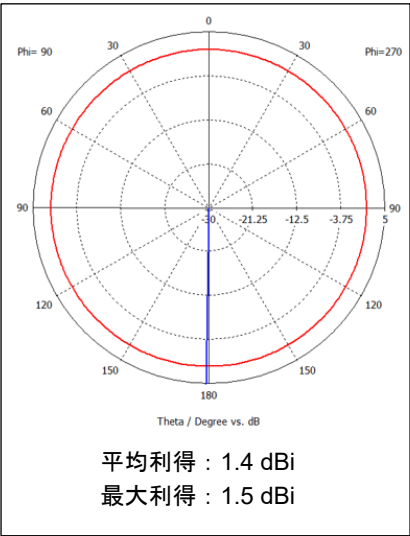


図 5 – 14 放射特性

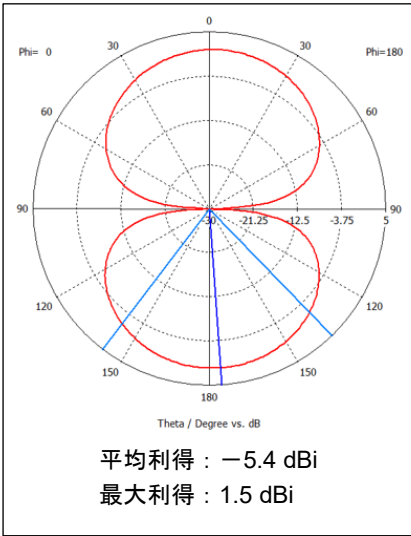
(a) x-y 平面（水平偏波）



(b) y-z 平面（垂直偏波）



(c) x-z 平面（水平偏波）



6. アンテナ・マッチングの調整例

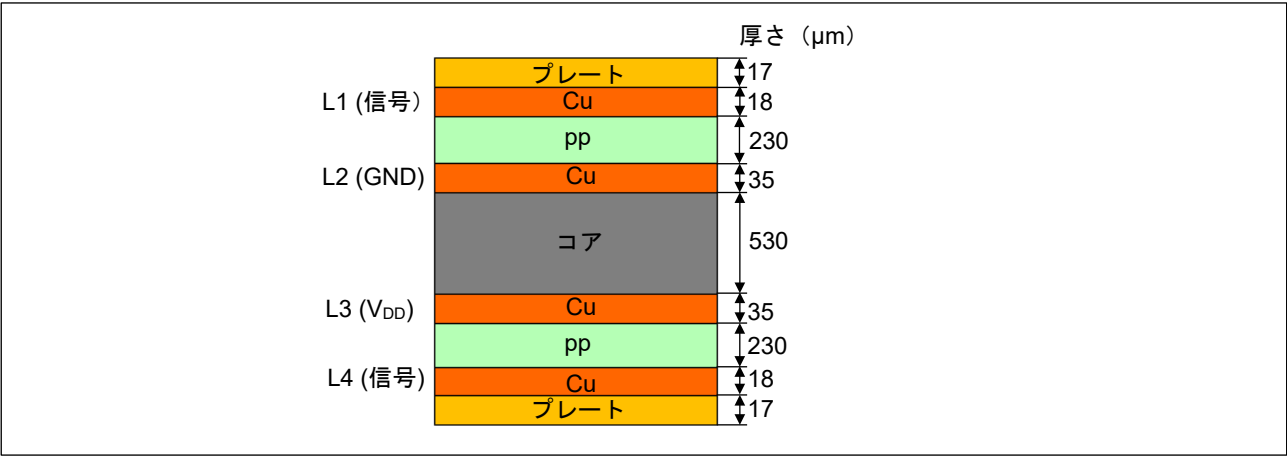
ここでは、「5. 小型パターン・アンテナの設計例」に示した例を用いて、システム基板にアンテナを実装したときに、どのように調整と最適化を行うか、具体的な手順を示します。

なお、システム基板を次の条件で設計すると仮定します。

- 基板層構成：4 層、1.2 mm 厚（図 6 - 1 参照）
- 基材：FR4（比誘電率 $\epsilon_r = 4.3$ 、誘電正接 $\tan\delta = 0.025$ ）
- 基板外形：50×50 mm

また本説明では電磁界シミュレータを用いていますが、実際に製品基板にアンテナを実装した試作を行った場合も同様の手順になります。

図 6 – 1 マッチング調整の基板層の構成



6.1 基板の角へのアンテナのモデリング（試作）

「5.3.3 エレメント部の寸法」を参考にして基板にアンテナをモデリング（試作）します。「5.3 横型ミアンダ（シミュレーション）」では 1.6 mm 厚の基板で設計しましたが、ここでは基板が薄くなるため、板厚方向にミアンダ構造をした部分の電気長が短くなることを考慮し、エレメントは長めにしておきます。

図 6 - 2 基板外形とアンテナ位置（単位：mm）

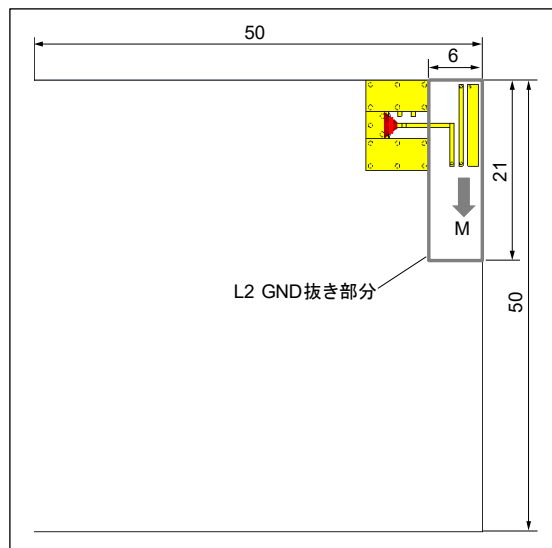
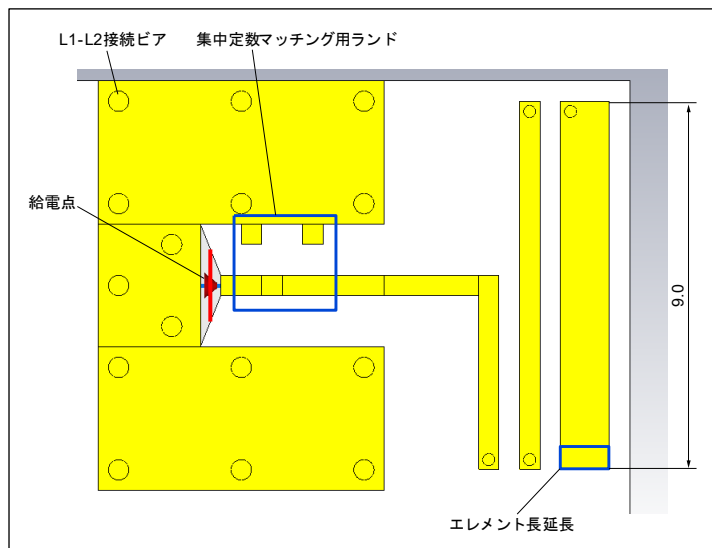
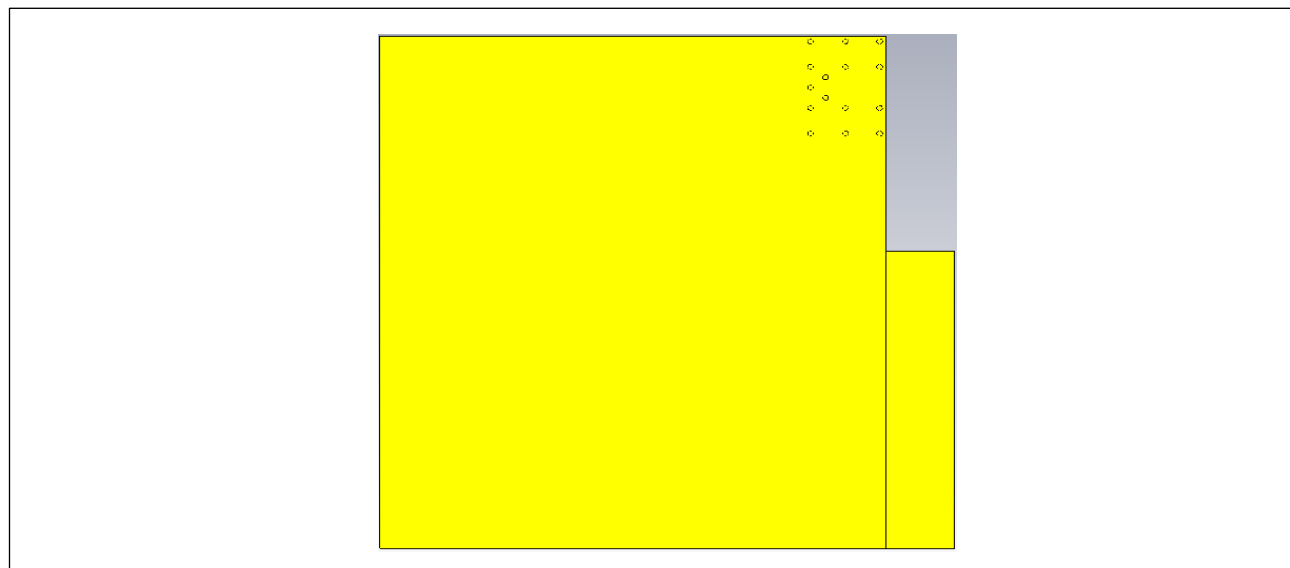


図 6 - 3 アンテナ部拡大図（単位：mm）



ここでは、5.3 の設計より大きなシステム基板で、図 6 - 2 のようにアンテナを角に配置した場合を想定しています。

図 6 - 4 L2 GND 層



アンテナのイメージ効果を形成する層を考慮します。今回の例では、図 6-3 に示すように、L1-L2 間を多数のビアで接続して、L2 にイメージ・アンテナを形成するようにしています。

アンテナ下部の L2-L4 間は、銅はくを抜いてください。また、図 6-2 の M 方向の GND 付近も特性に悪影響を与えるので、L2 GND をできるだけ削除します。

また L2 は、図 6-2 の L2 GND 抜き部分以外を「ベタ GND」にします。図 6-5 のように、スリットなどで GND が分断されていると、「1.2 モノポール・アンテナ」で説明したイメージ効果が形成されないの
で、アンテナ特性が悪化します。

図 6-5 GND の分断

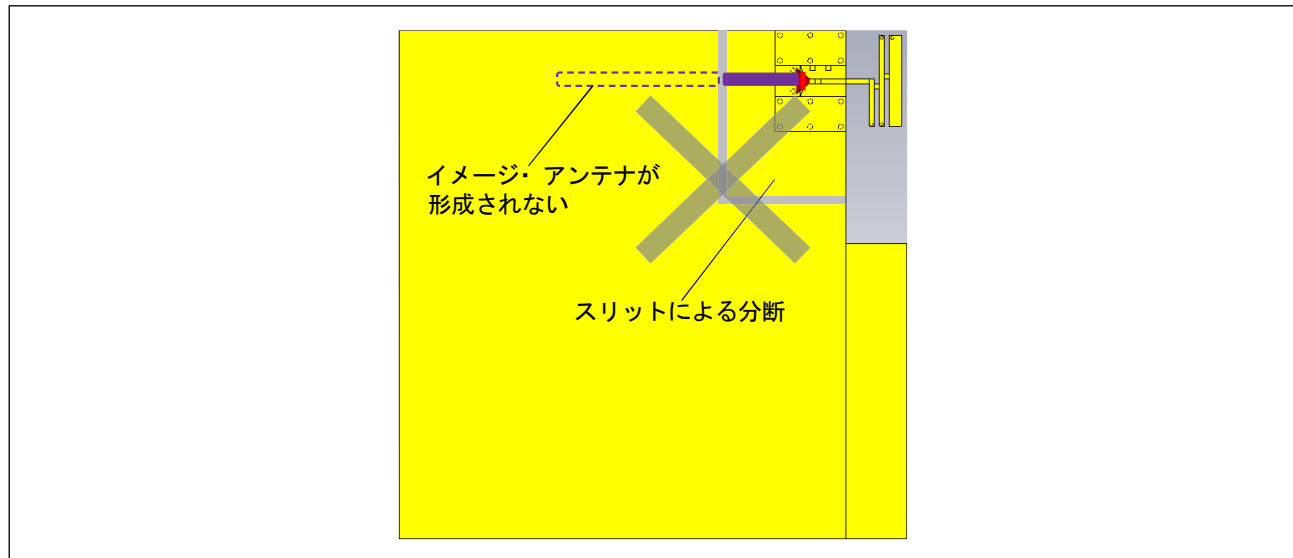
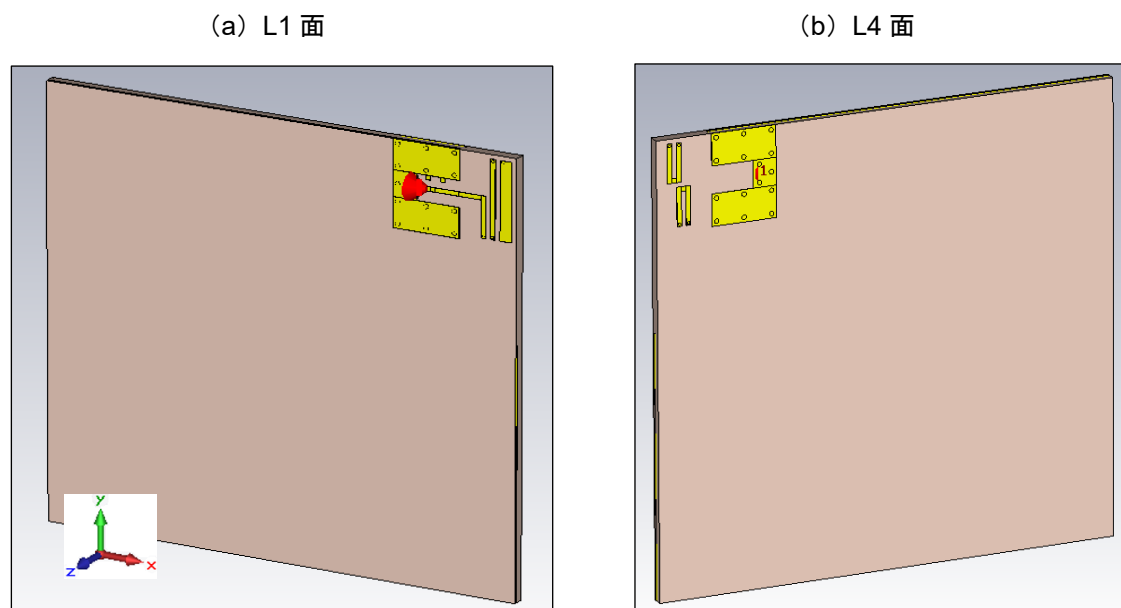


図 6-6 に、作成した基板の外観を示します。

実際の設計では、L1, L3, L4 に部品ランドや信号パターン、電源パターンなどを配置しますが、アンテナ特性には影響度が低いので、本設計では省略しています。

図 6-6 基板の外観



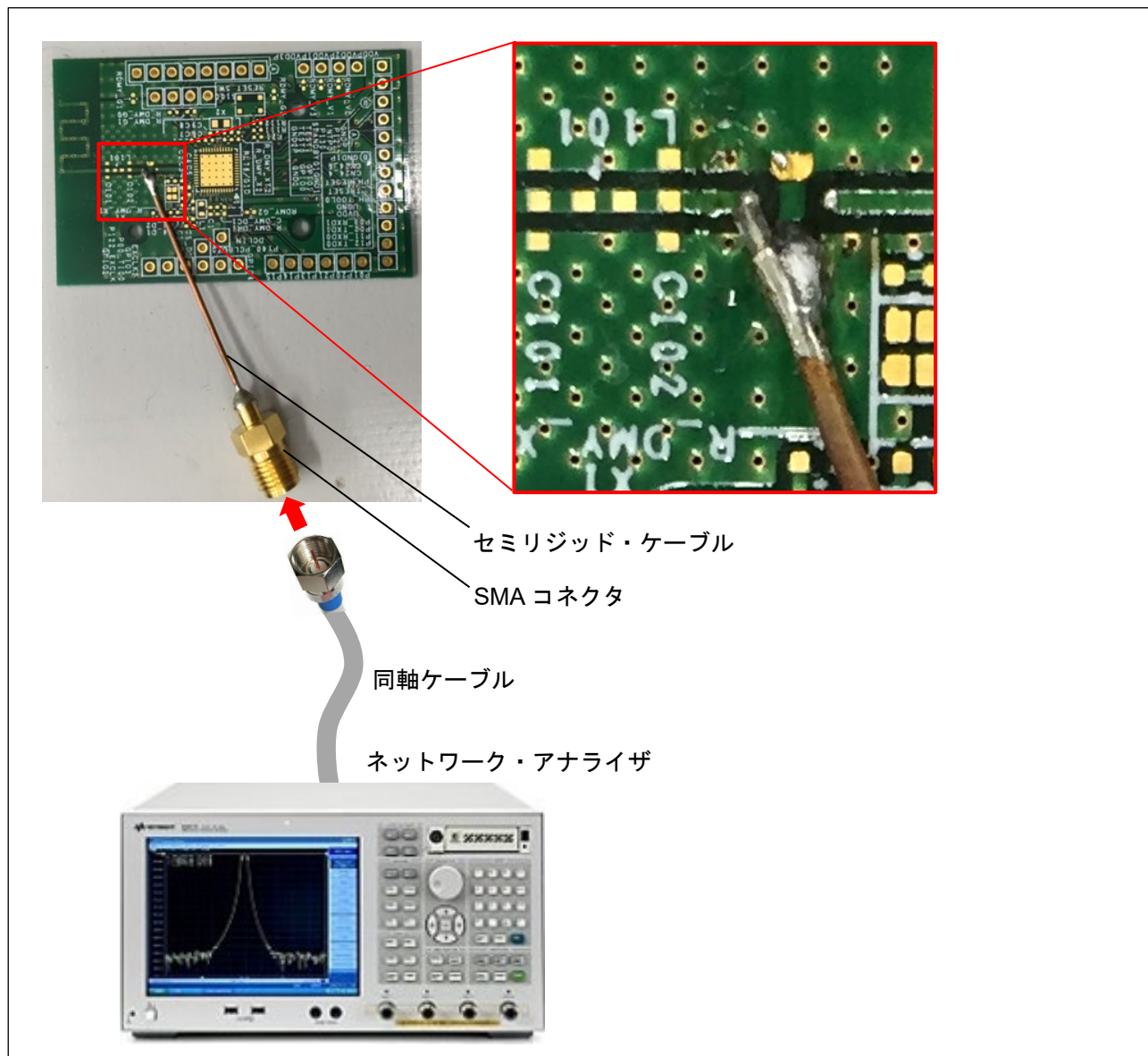
6.1.1 セミリジッド・ケーブルの取り付けとネットワーク・アナライザへの接続（基板試作）

基板の試作が完了したら、図 6-7 のようにアンテナにセミリジッド・ケーブルをはんだ付けします。

中心導体をアンテナ給電点に、外部導体を GND に、それぞれはんだ付けします。レジストで L1 GND をコーティングしている場合、カッタなどでレジストを削ってはんだ付けします。

その後、セミリジッド・ケーブルの SMA コネクタをネットワーク・アナライザに接続します。

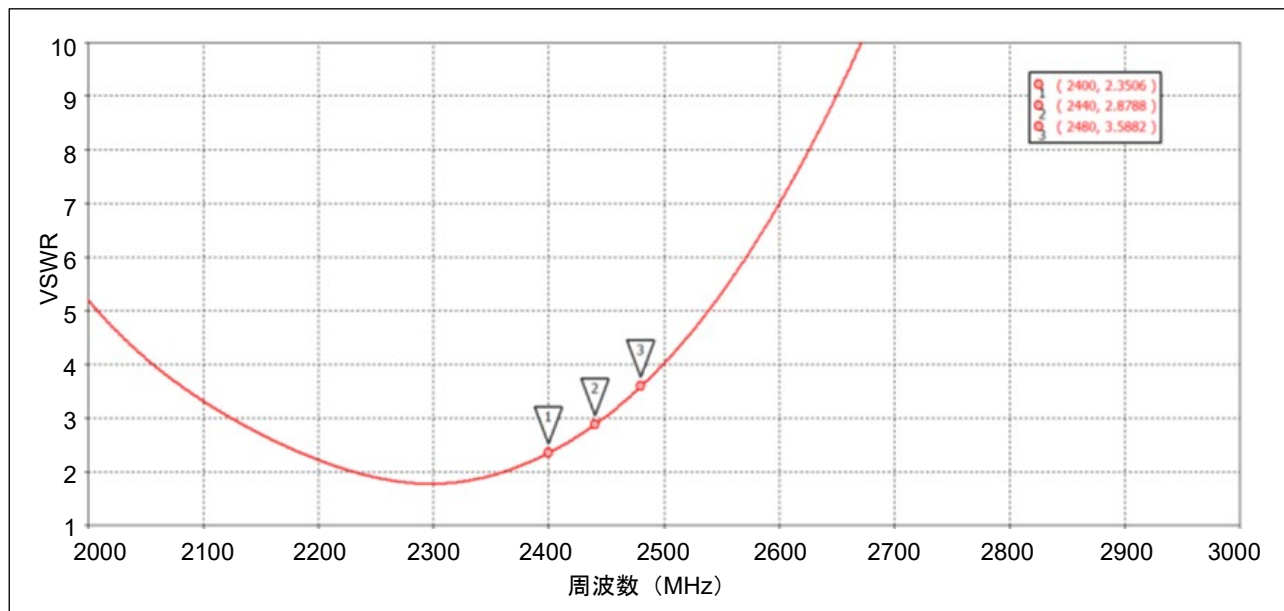
図 6-7 基板とネットワーク・アナライザの接続



6.1.2 VSWR の確認と共振周波数の調整、放射特性の確認

VSWR の確認結果を図 6 - 8 に示します。5.3.4 の電磁界シミュレーション結果と比較すると、共振周波数が約 2300 MHz に下がり、2400-2480 MHz の帯域で VSWR が悪化しています。これは、アンテナが装荷型構造なので、GND の拡大により装荷が増加して、共振周波数が下がっていると考えられます。

図 6 - 8 VSWR の確認結果

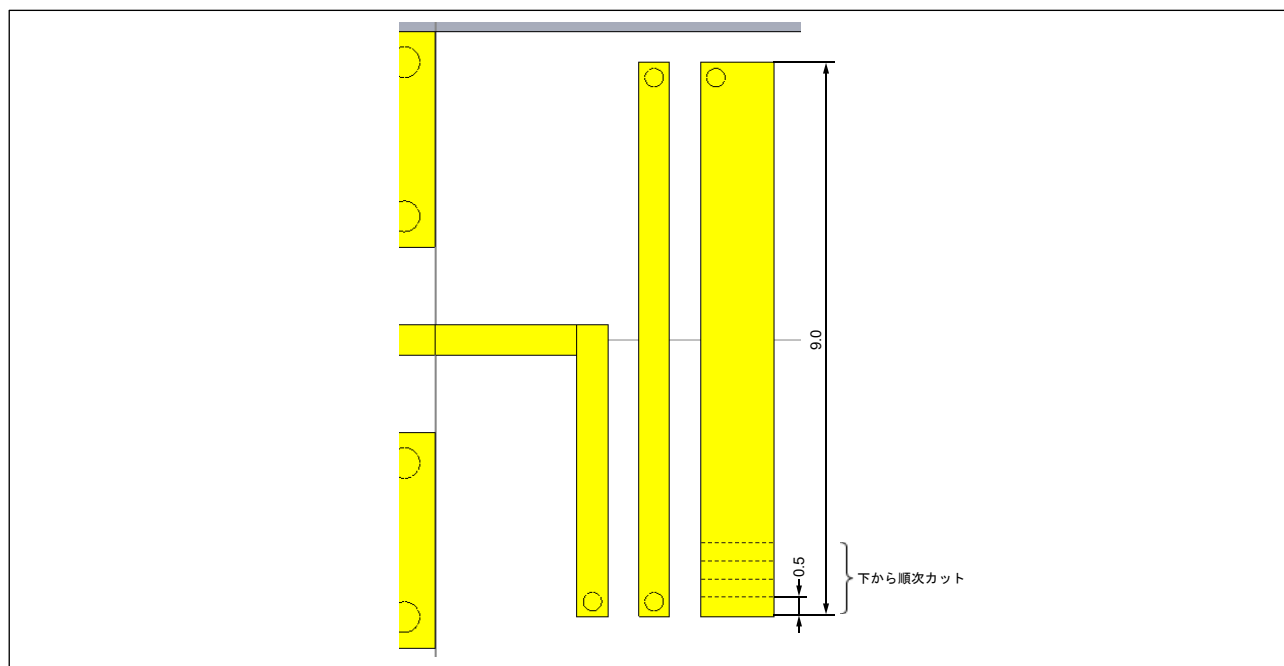


ここで、共振周波数を上げるために、アンテナ・エレメントをカットします。

図 6 - 9 に電磁界シミュレータでのカット例を示します。

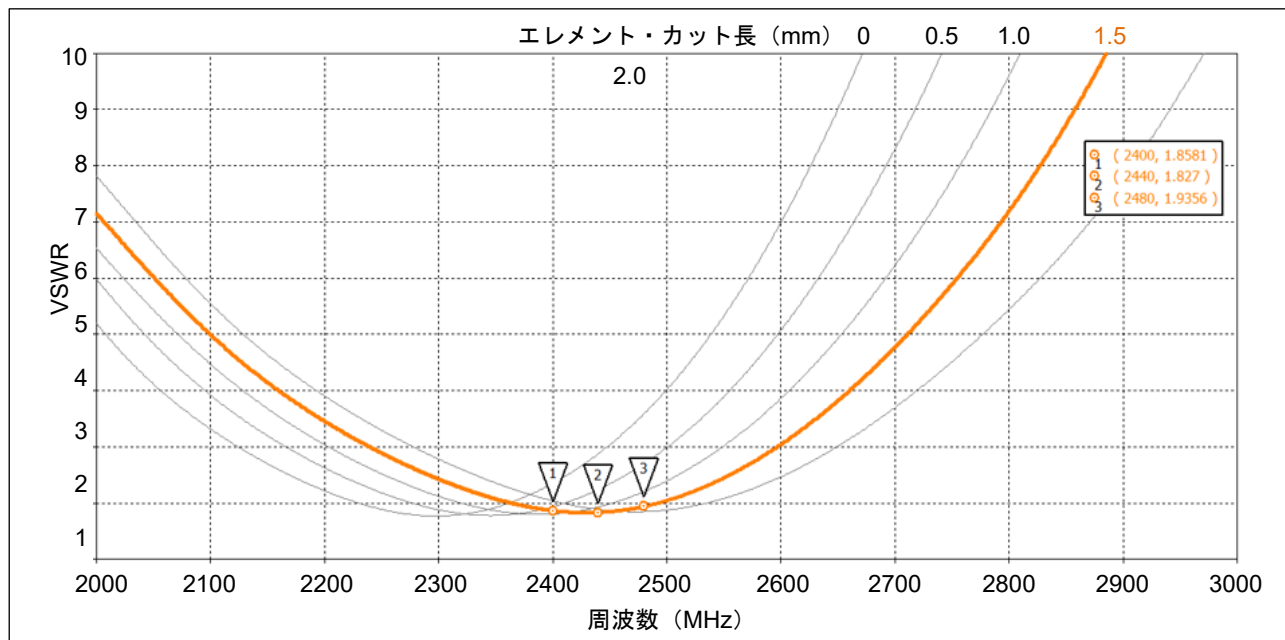
基板試作の場合は、実体顕微鏡などで見ながら、デザイン・ナイフやカッタ・ナイフでパターンを少しずつカットし、そのつどネットワーク・アナライザで VSWR を確認します。

図 6 - 9 エレメント・カット (単位 : mm)



今回の評価では、エレメントを 0.5 mm ずつカットしました。図 6 - 10 にこのときの VSWR の変化を示します。

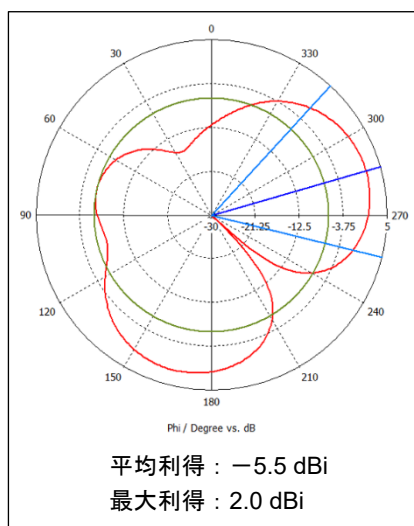
図 6 - 10 エレメント・カットと VSWR



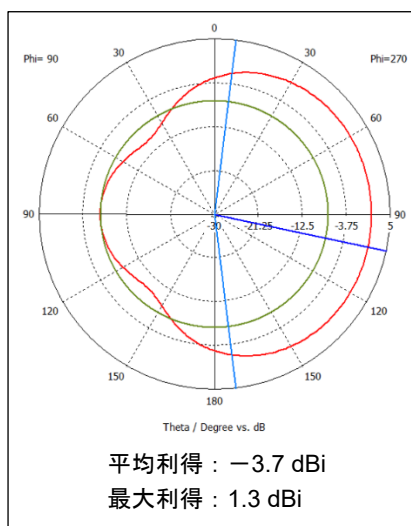
エレメントを約 1.5 mm カットすると、2400-2480 MHz の帯域に収まりました。図 6 - 11 にこのときの放射特性を示します。

図 6 - 11 エレメント・カット時の放射特性

(a) x-y 平面 (水平偏波)



(b) y-z 平面 (垂直偏波)



(c) x-z 平面 (水平偏波)

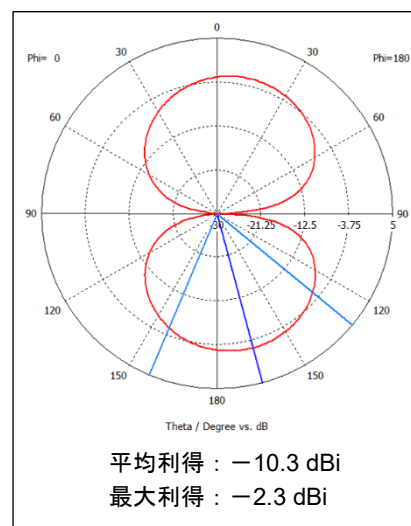


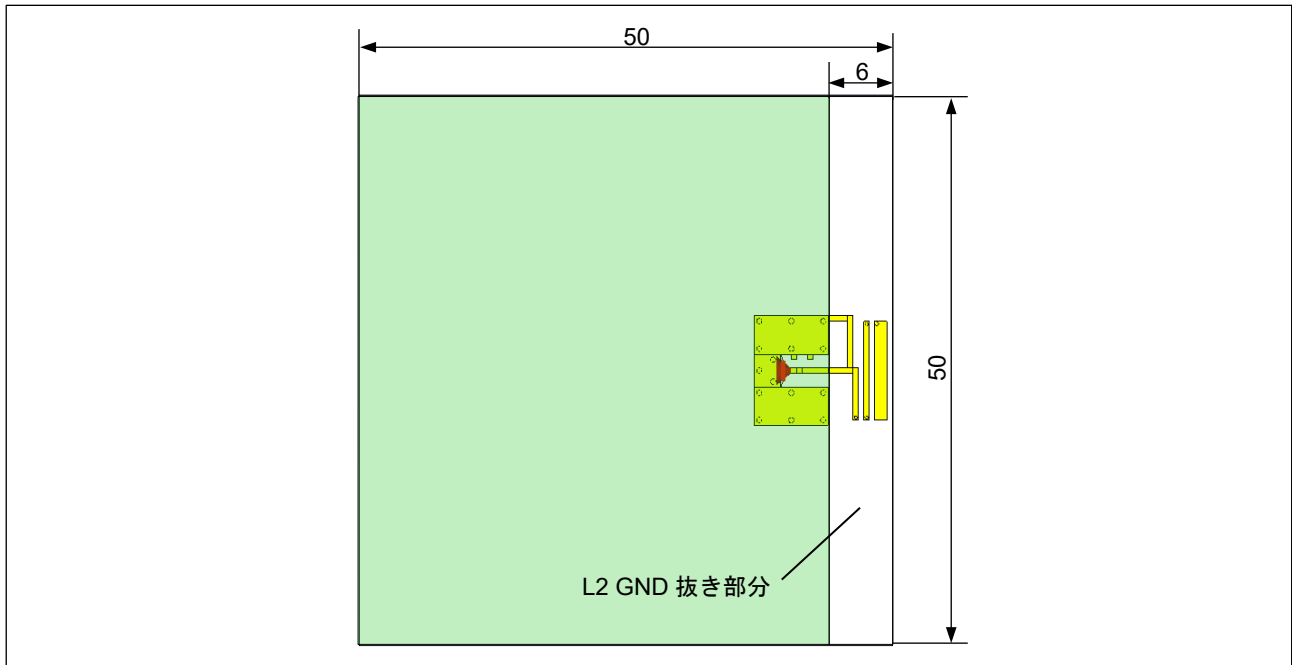
図 5 - 14 の放射特性に対して、放射形状の変化や平均利得の劣化が見られます。

GND サイズやアンテナ位置によって、このように特性が変わるので、意図した方向に利得が得られているか、設計に注意が必要です。

6.2 基板の辺の中央へのアンテナのモデリング（試作）

6.1 と同様に基板にアンテナをモデリング（試作）します。ここでは図 6 - 12 に示すように、基板の辺の中央にアンテナを配置します。

図 6 - 12 基板外形とアンテナ位置（単位：mm）



6.1 と同様に、アンテナ下部の銅はくも削除し、L1-L2 間を多数のビアで接続して、L2 にイメージ・アンテナを形成するようにしています。

図 6 - 13 L2 GND 層

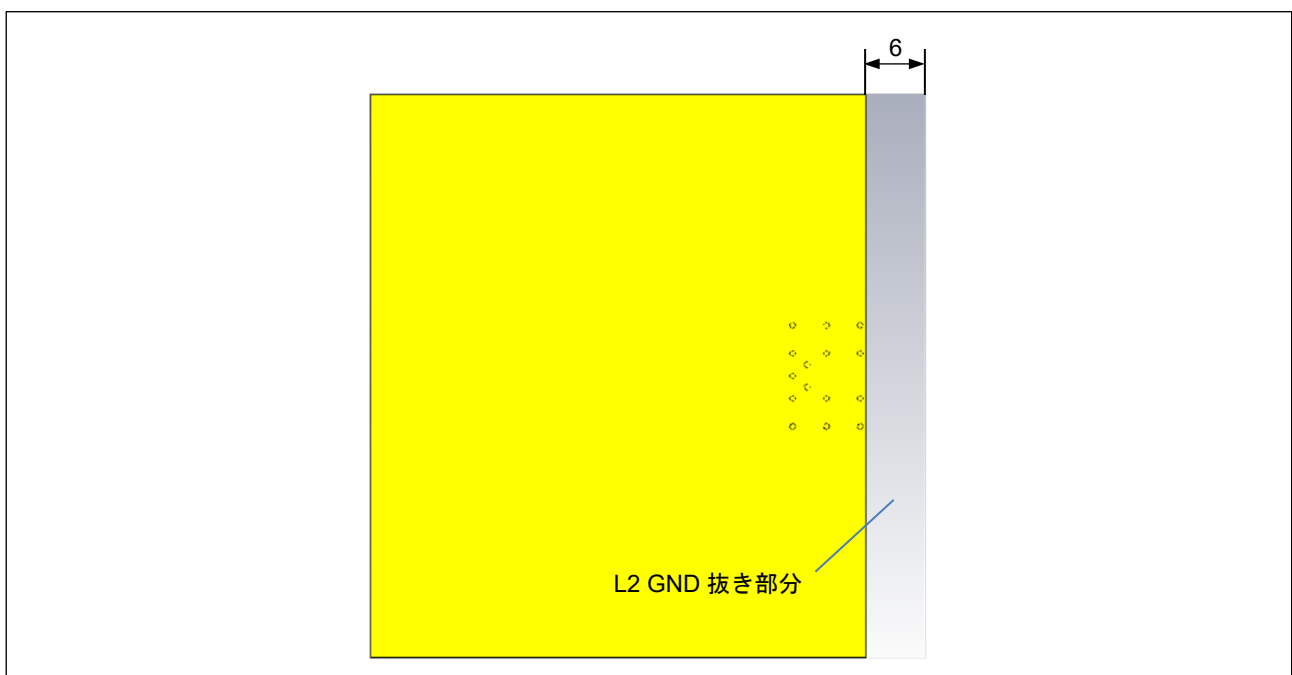
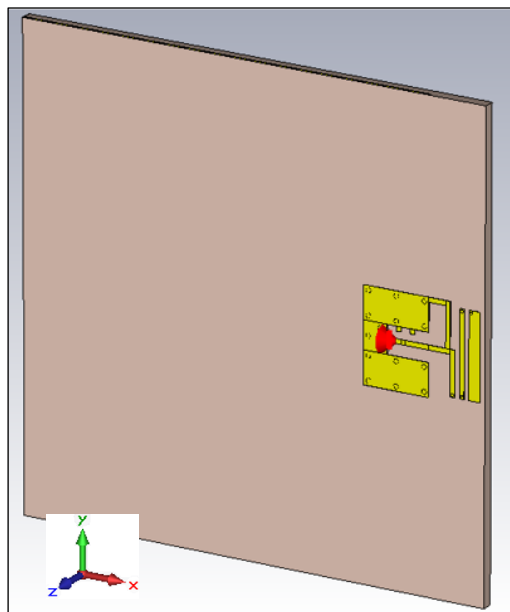
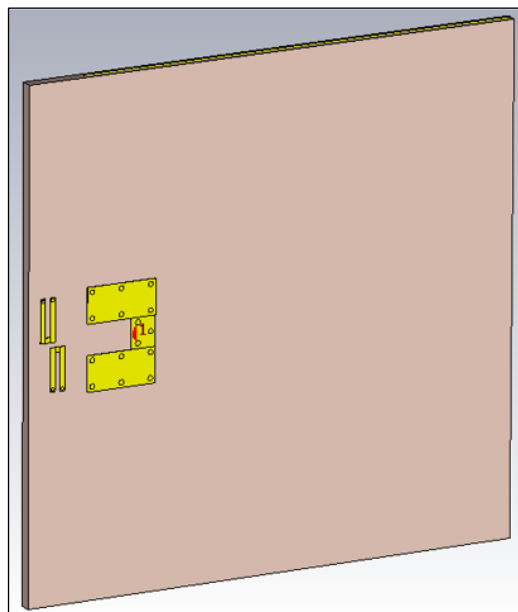


図 6 - 14 基板の外観

(a) L1 面



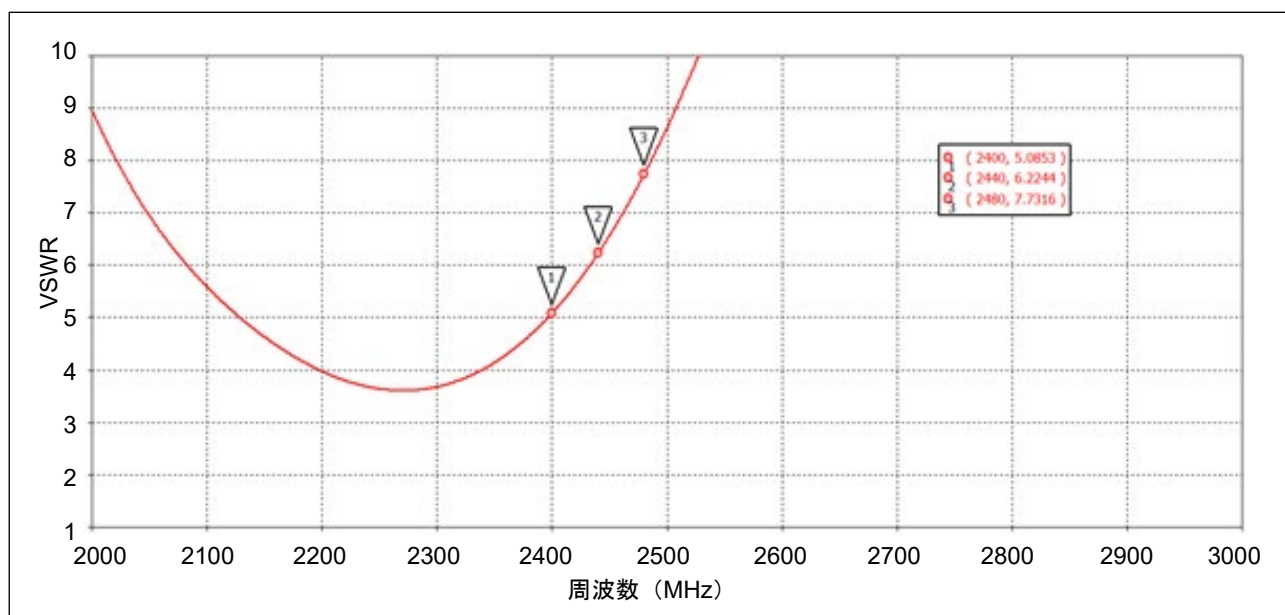
(b) L4 面



6.2.1 VSWR の確認と共振周波数の調整

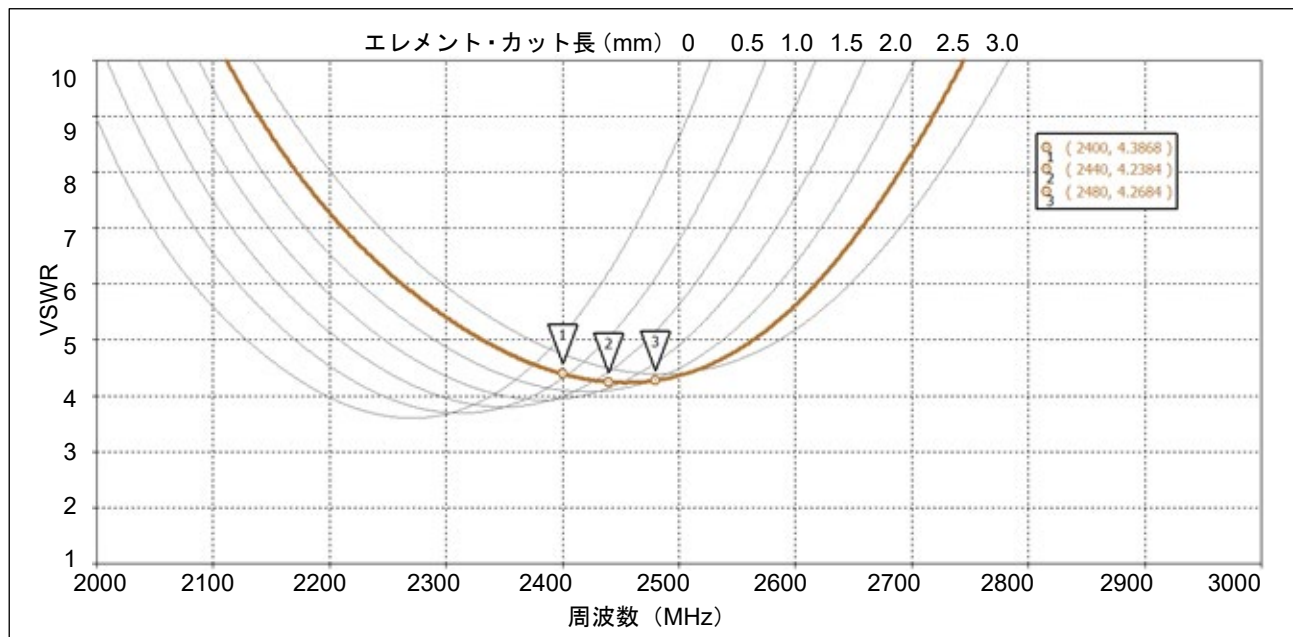
VSWR の確認結果を図 6 - 15 に示します。図 6 - 8 と同様に共振周波数が下がり、2400-2480 MHz で VSWR が悪化しています。

図 6 - 15 VSWR の確認結果



ここで共振周波数を上げるため、図 6-9 と同様にアンテナ・エレメントをカットします。図 6-16 にこのときの VSWR の変化を示します。

図 6-16 エレメント・カットと VSWR



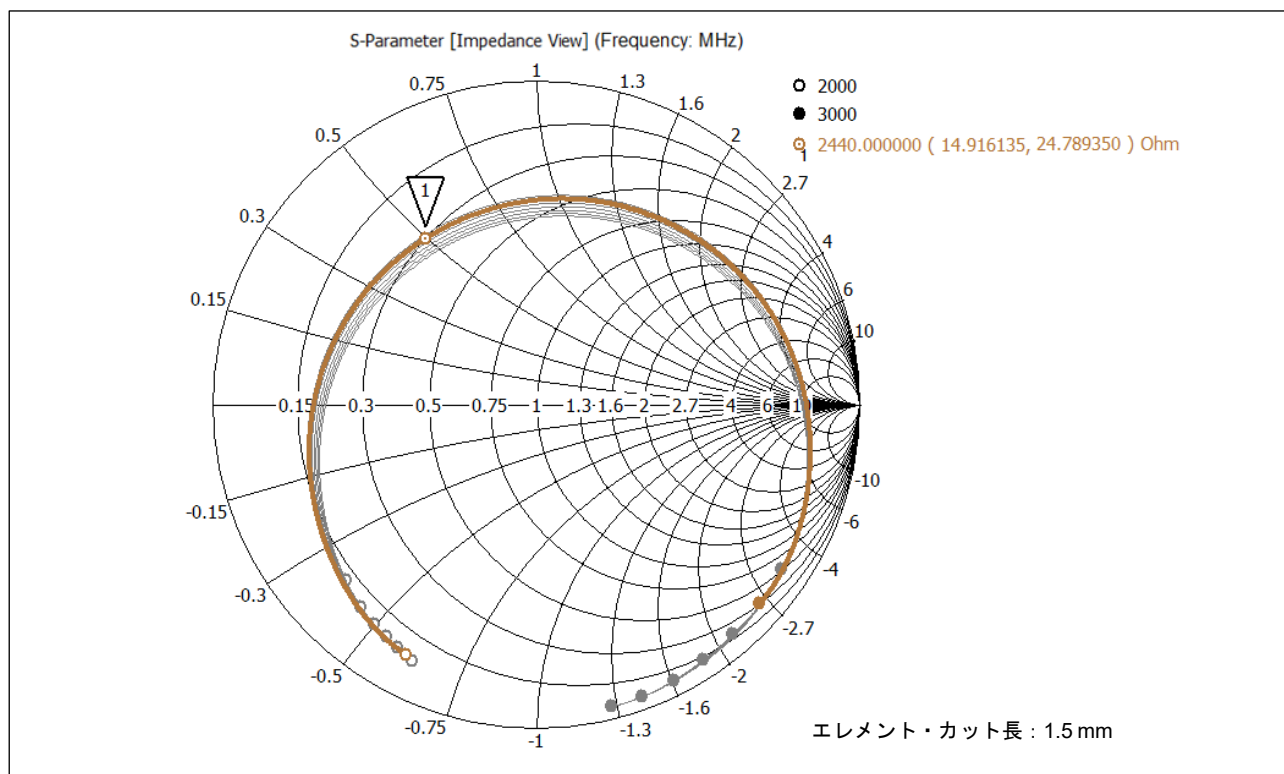
エレメントを約 2.5mm カットすると、共振周波数が約 2400-2480 MHz になりました。しかし、VSWR は目標とする 2 以下になっていません。

6.2.2 インピーダンスの測定と集中定数によるマッチング

図 6-16 のように共振周波数ピークで VSWR が悪化した場合、アンテナ・インピーダンスが 50Ω になっていないことが原因として考えられます。

その確認とマッチングのために、スミス・チャートを用います。図 6-17 に 6.2.1 で得られた、エレメント・カット後のスミス・チャートを示します。

図 6 - 17 エレメント・カット後のスミス・チャート



ここで、2440 MHz のインピーダンスが $Z = R + jX$ の形で得られます。この測定では、およそ $R = 15 \Omega$ 、 $X = 25 \Omega$ です。

この Z をスミス・チャートの中心に持っていくことが、マッチングさせることになります。

このとき、次の手順で Smith-Chart というソフトウェア・ツールを用いると便利です。

- (1) 「ToolBox」 「DataPoint」 に 2440 MHz と上記 R, X を入力。
- (2) 「ToolBox」 「SHUNT」 のキャパシタを選択、軌跡に沿って移動。
- (3) 「Schematic」 内の回路トポロジ、マッチング定数を確認して使用。

図 6 - 17 から Smith-Chart でマッチング定数を導出した結果を図 6 - 18 に示します。この結果、2.0 pF のコンデンサを GND との間に挿入すればマッチングすることが分かります。

図 6 - 18 Smith-Chart によるマッチング定数の導出

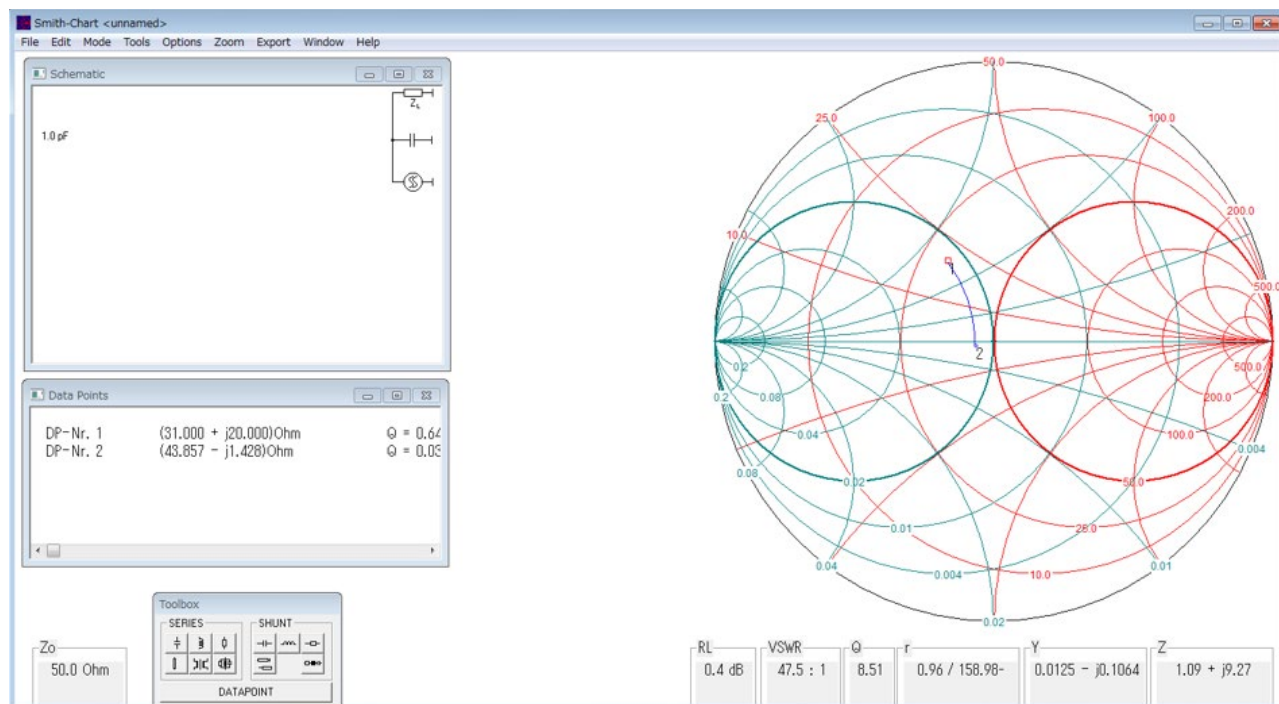
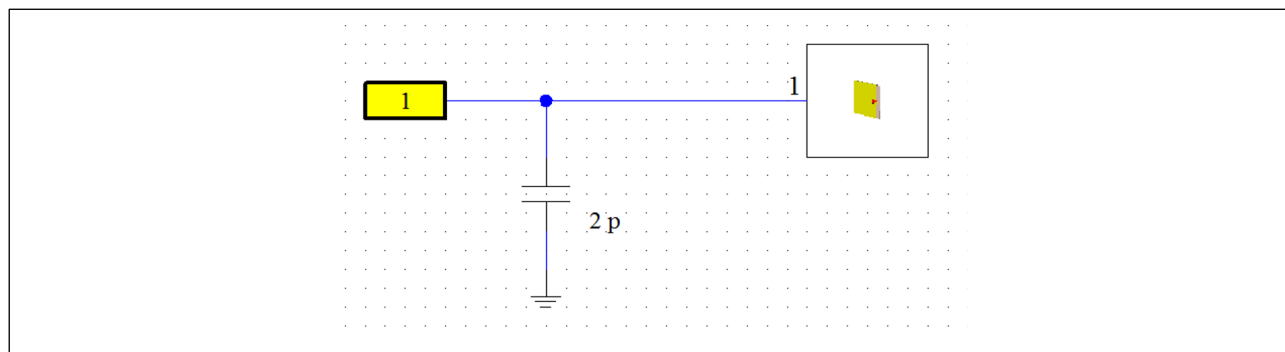


図 6 - 18 で得られた集中定数を図 6 - 19 のように電磁界シミュレータに入力します。

試作基板の場合は、図 6 - 3 に示した集中定数マッチング用ランドに部品をはんだ付けします。

図 6 - 19 電磁界シミュレータへの集中定数入力



2.0 pF でマッチングさせた VSWR を図 6 - 20 に、スミス・チャートを図 6 - 21 に示します。

図 6 - 20 エレメント・カット+2.0 pF でマッチング時の VSWR

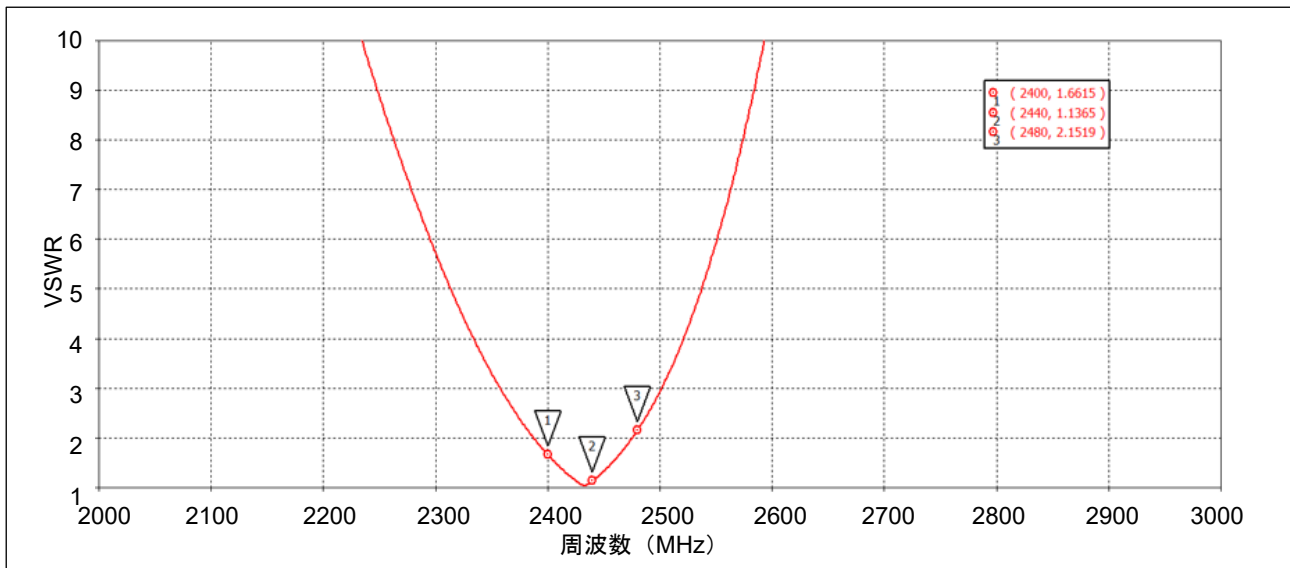
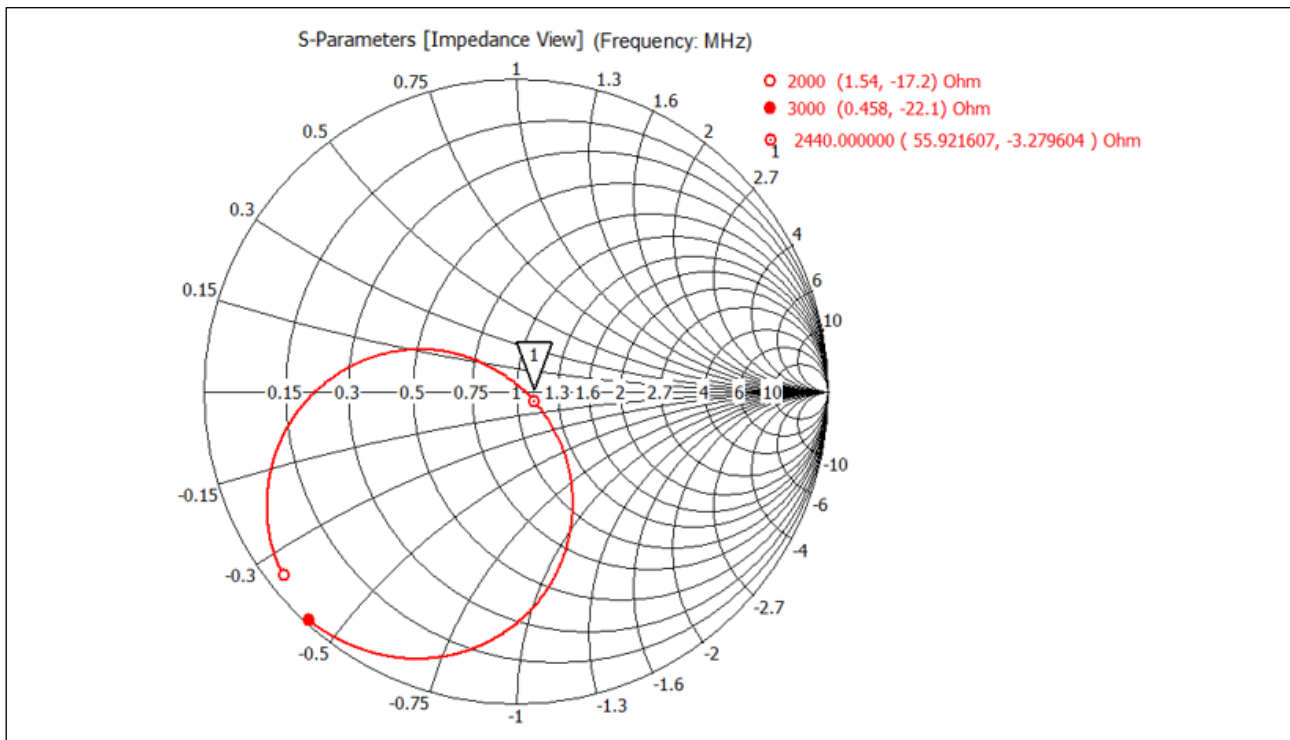


図 6 - 21 エレメント・カット+2.0 pF でマッチング時のスミス・チャート



VSWR が目標値のほぼ 2 以下になり、Z が約 $50\ \Omega$ になっていることが分かります。

また、このときの放射特性を図 6 - 22 に示します。

図 6 - 22 エレメント・カット+2.0 pF でマッチング時の放射特性

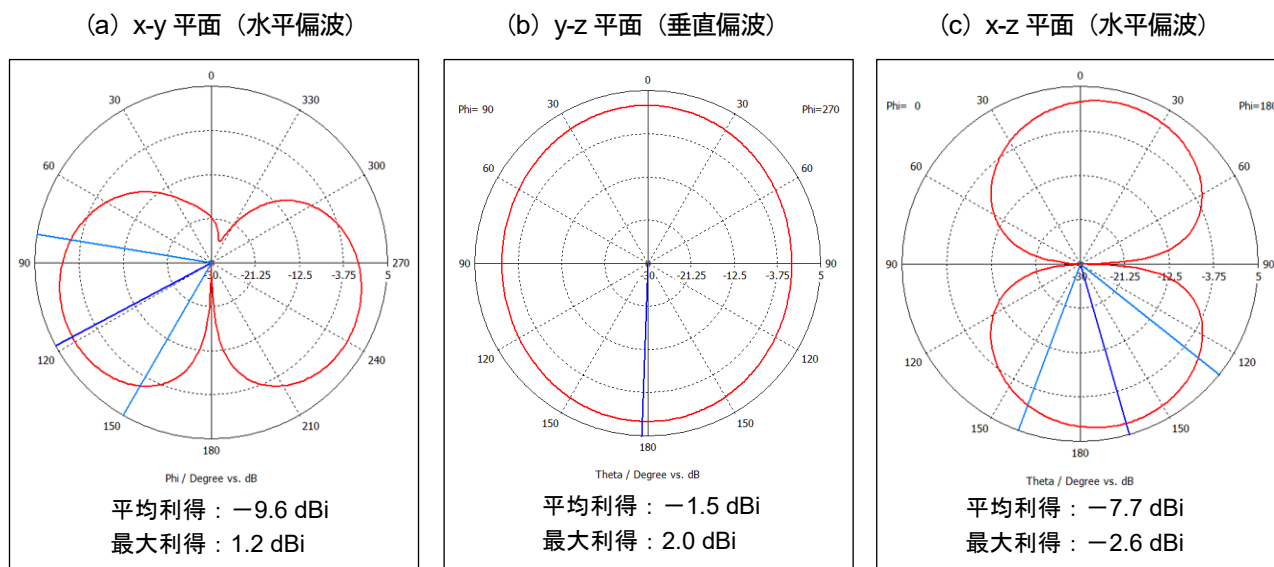


図 5 - 14 と同等の放射特性が得られています。

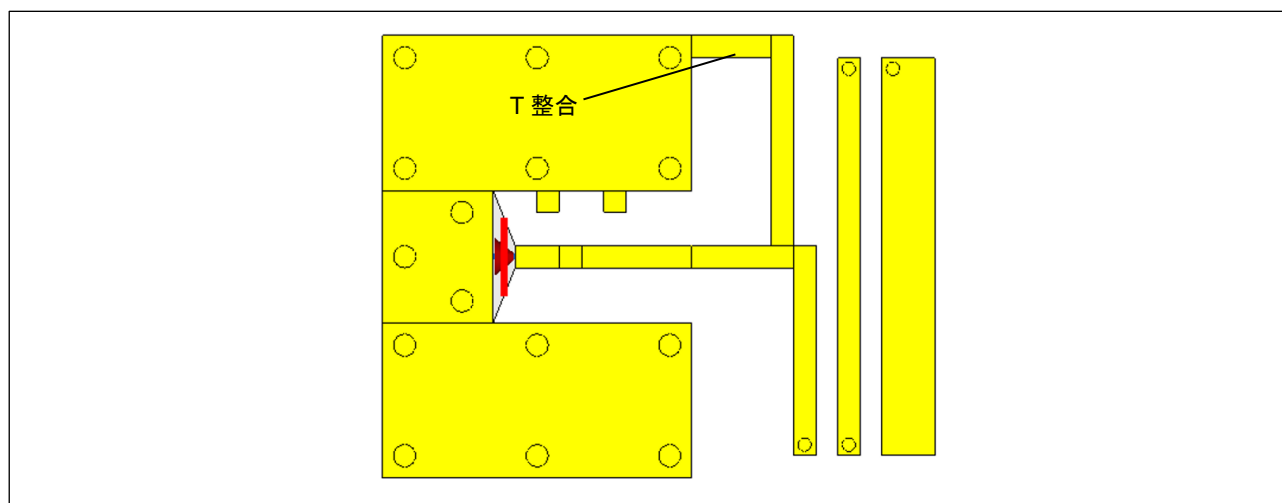
一方、利得は少し劣化しています。

6.2.3 分布定数によるマッチング

6.2.2 と同等のマッチング調整は、分布定数でも可能です。ここでは、T 型整合を用いた調整例を示します。ただしこの場合、試作前の電磁界シミュレーションや複数回の試作評価が必要になります。

T 整合を追加した例を図 6 - 23 に示します。

図 6 - 23 T 整合の追加 (単位：mm)



T 整合を追加することで、アンテナ・エレメントの電気長が変わります。このため、エレメント・カットによって共振周波数を調整しています。

電磁界シミュレータを用い、T 整合位置とアンテナ・エレメントカット量を掃引しながら、最適な条件を導き出した VSWR を図 6-25 に、スミス・チャートの結果を図 6-26 に示します。

図 6-24 エレメント・カット+T 整合でのマッチング

(a) 掃引方向

(b) 掃引結果の最適な条件

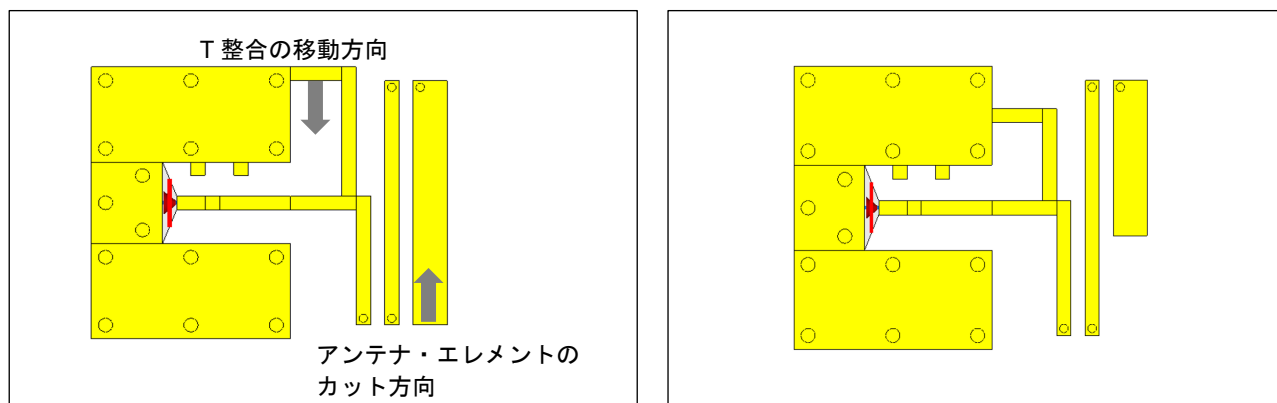


図 6-25 T 整合位置 1.5 mm 移動+アンテナ・エレメント 3.5 mm カット時の VSWR

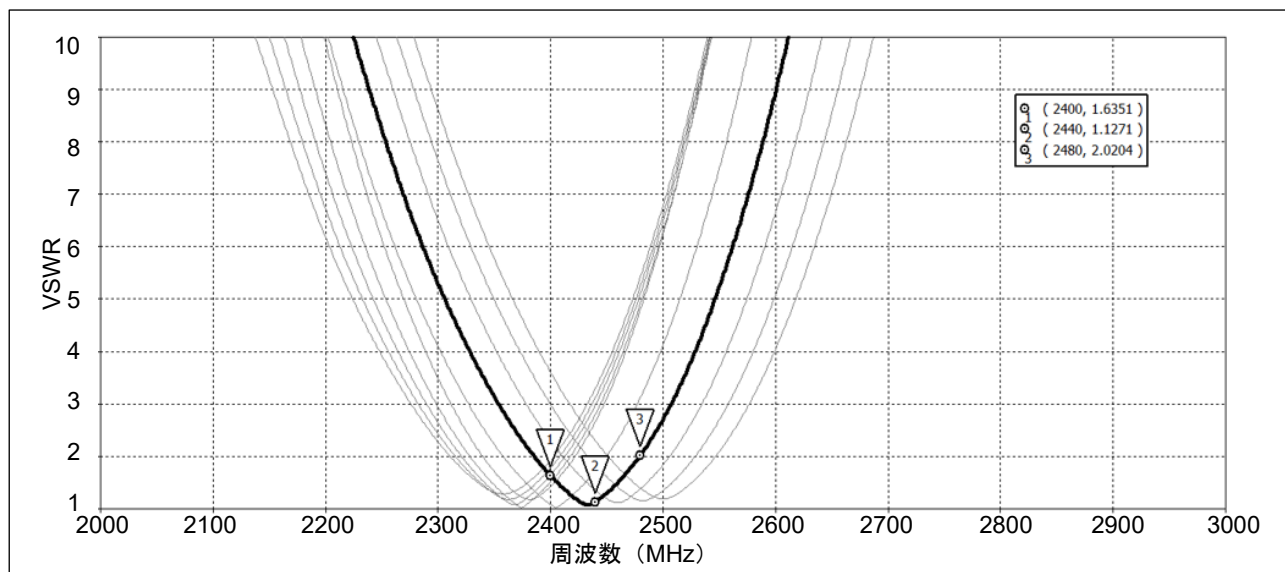


図 6 - 26 T 整合位置 1.5 mm 移動+アンテナ・エレメント 3.5 mm カット時のスミス・チャート

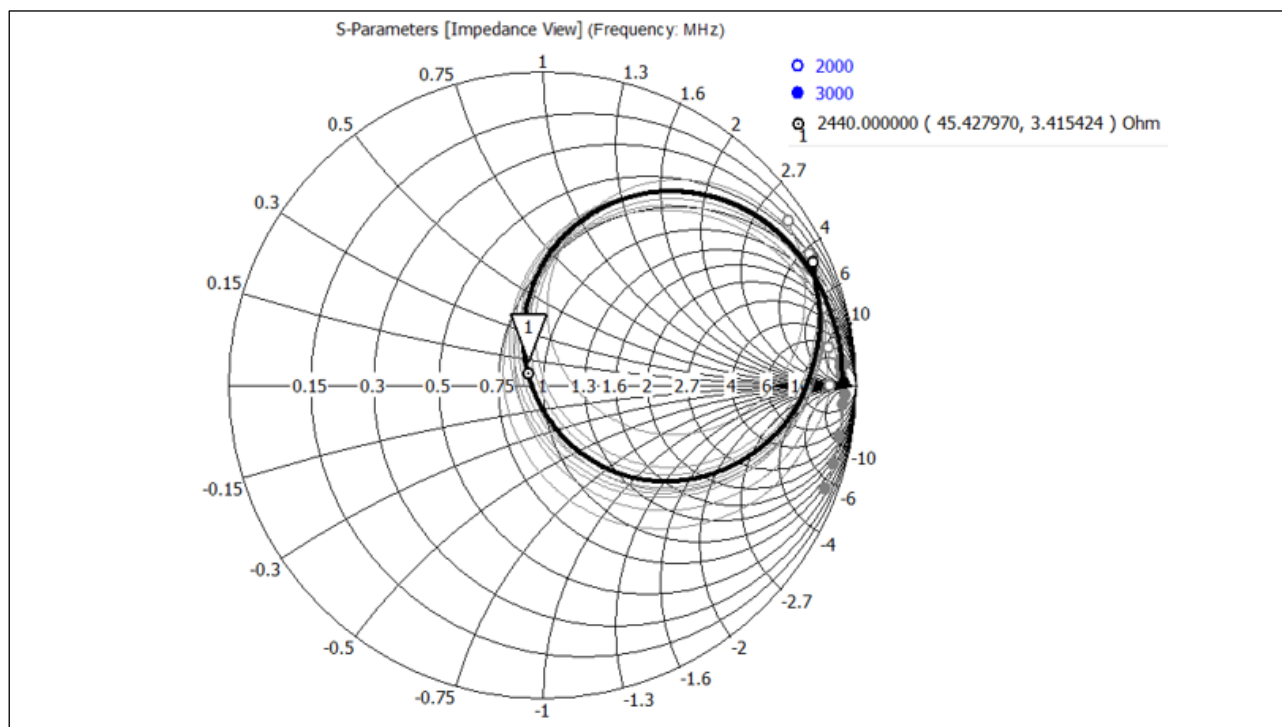
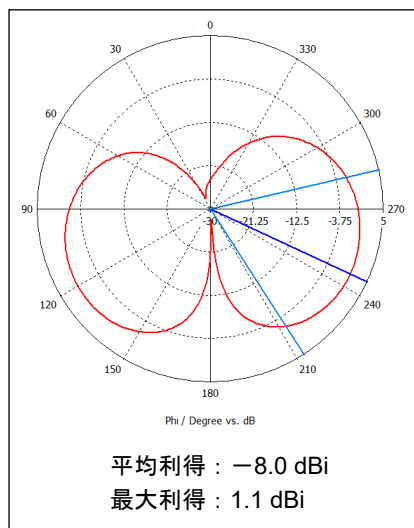


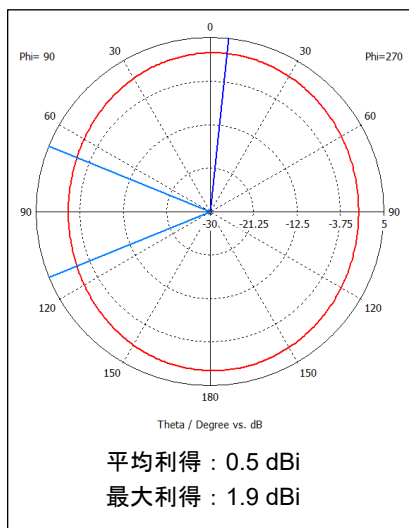
図 6 - 27 に放射特性を示します。

図 6 - 27 エレメント・カット+T 整合でマッチング時の放射特性

(a) x-y 平面 (水平偏波)



(b) y-z 平面 (垂直偏波)



(c) x-z 平面 (水平偏波)

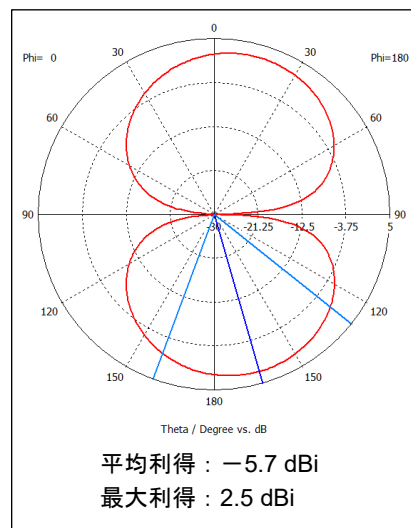


図 5 - 14 と同等の放射特性が得られています。

また、利得もほぼ同じ値が得られています。

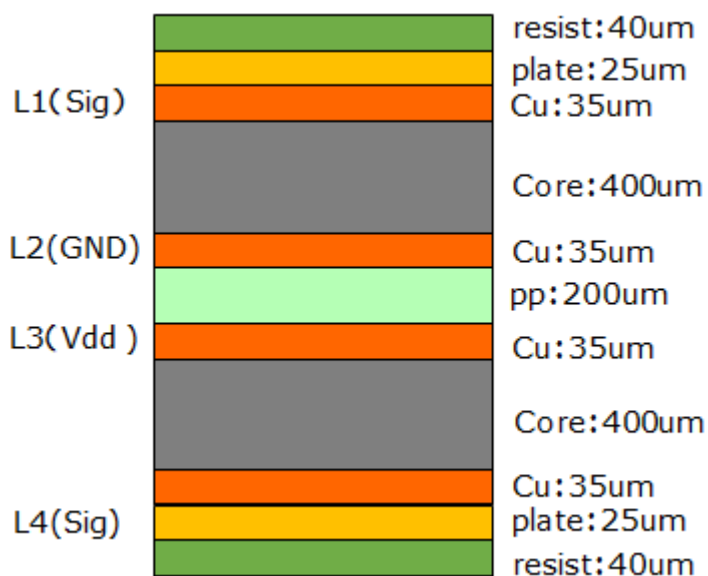
7. アンテナの試作例

ここでは 5.3 及び 6. で設計したアンテナを実際に試作し、集中定数によるマッチングを行なった評価結果を説明します。

7.1 アンテナ試作基板の層構成

図 7-1 にアンテナ試作基板の層構成を示します。

図 7-1 アンテナ試作基板の層構成



基材 : MCL-E-67(日立化成)

基板厚さ : 1.3mm

7.2 アンテナ・エレメント寸法図 (Top View)

L1 ~ L4 のアンテナ・エレメント寸法図を図 7-2~7-4 に示します。

図 7-2 L1

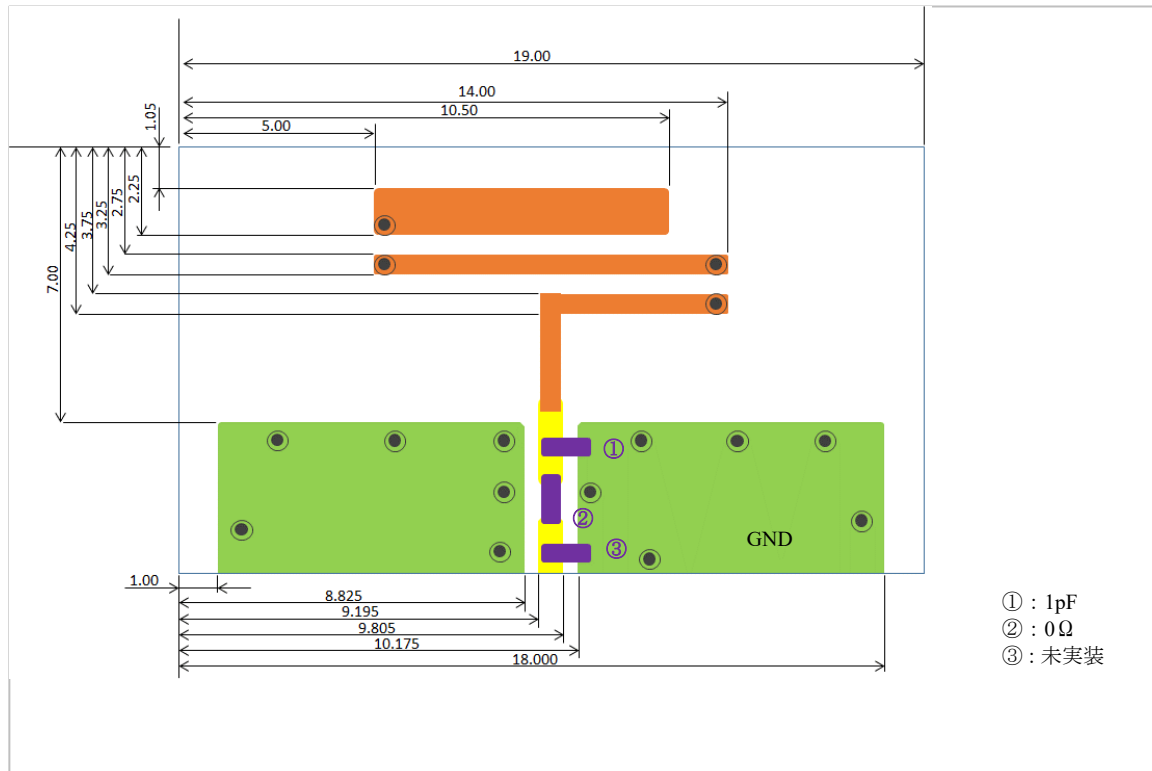


図 7-3 L2, L3

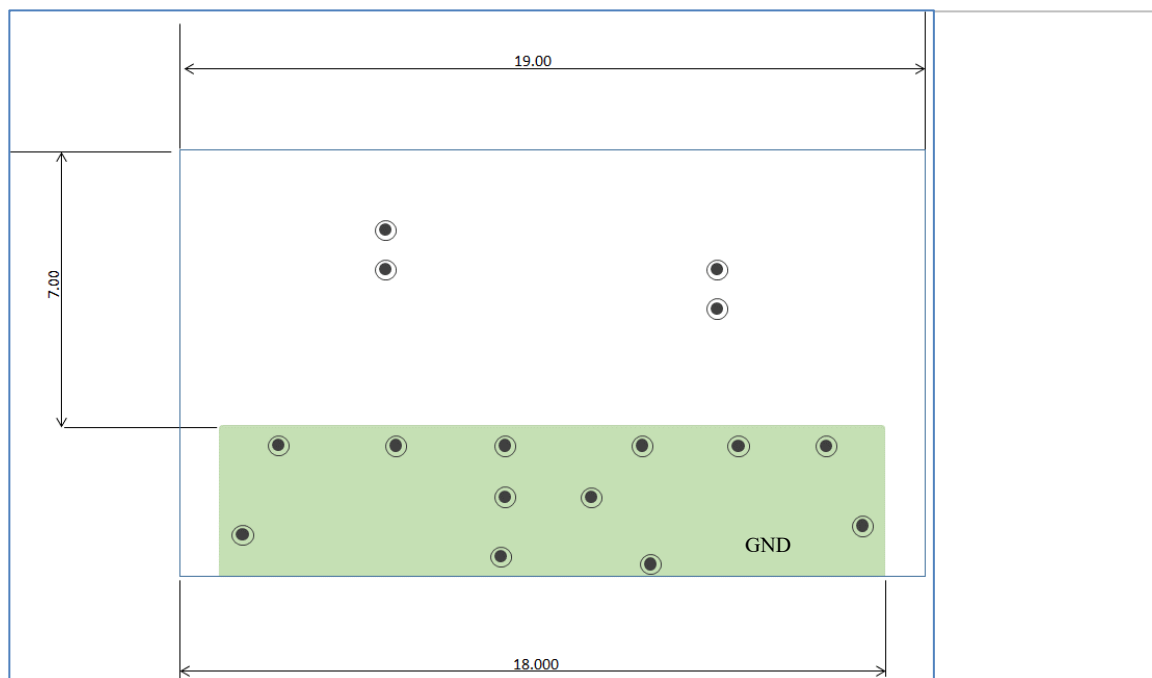
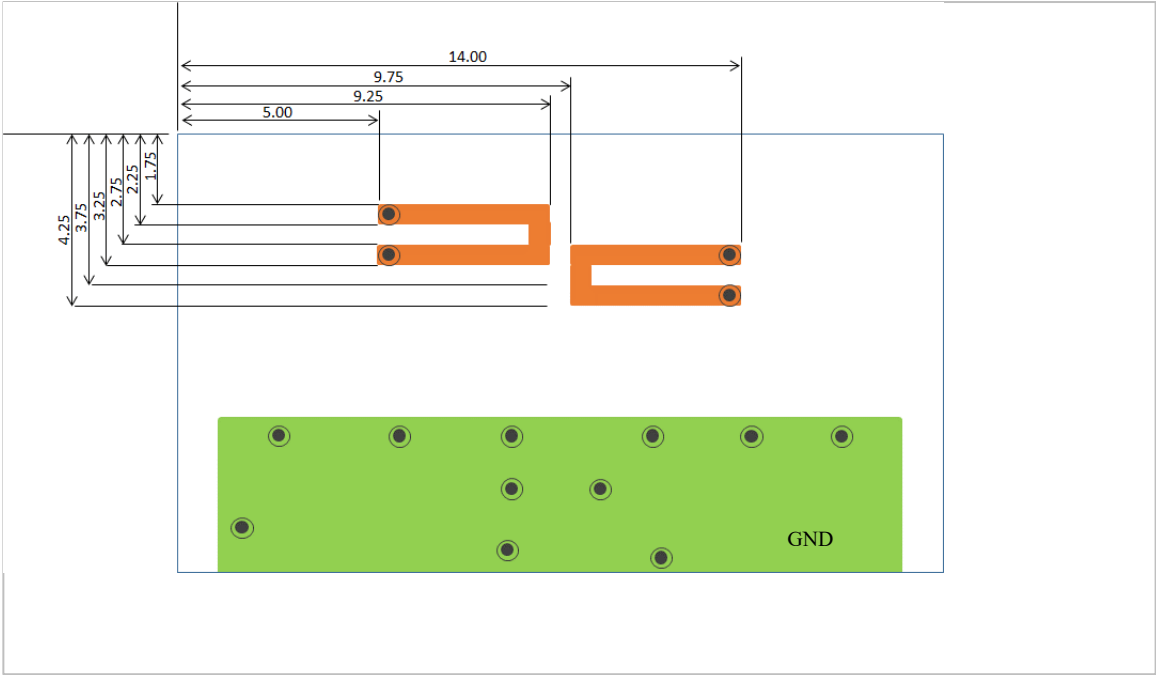


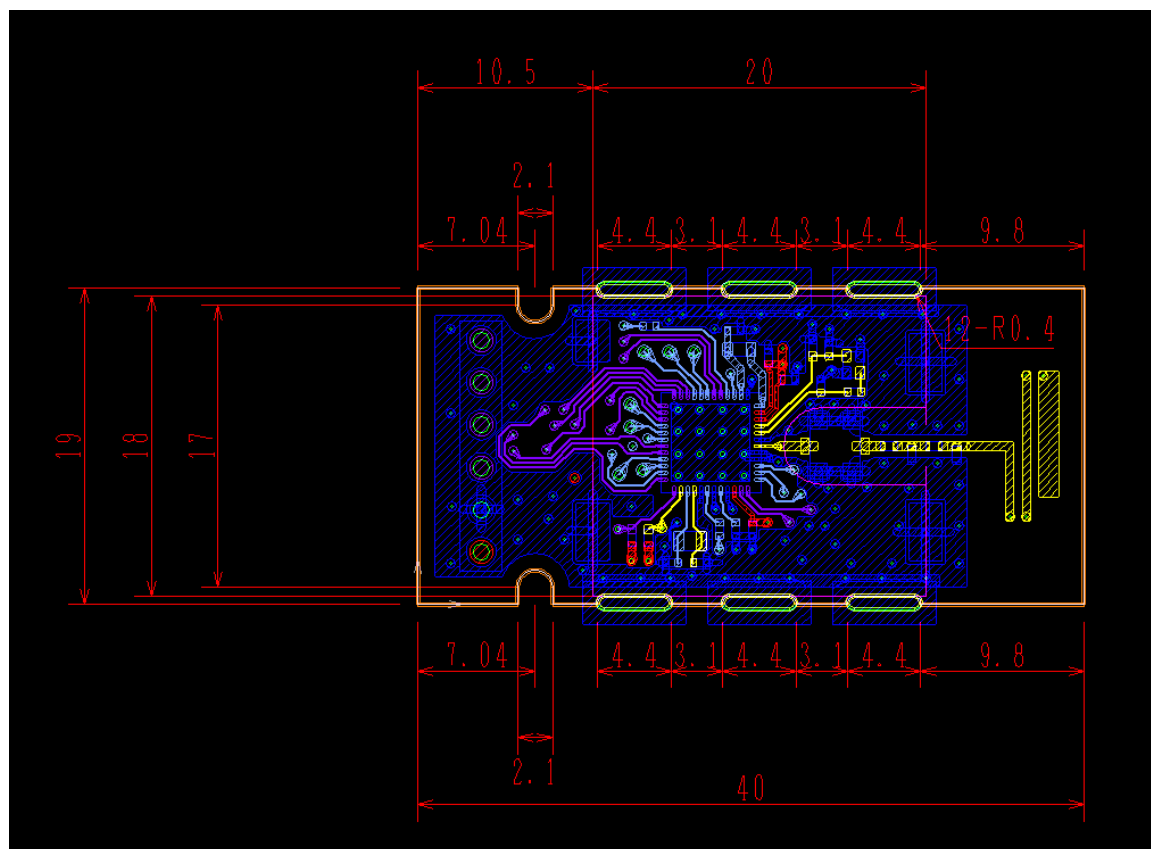
図 7-4 L4



7.3 アンテナ試作基板寸法図 (Top View)

アンテナ試作基板寸法図を図 7-5 に示します。

図 7-5 アンテナ試作基板寸法図



7.4 アンテナ試作基板外観写真

アンテナ試作基板外観写真を図 7-6 に示します。

図 7-6 アンテナ試作基板外観写真

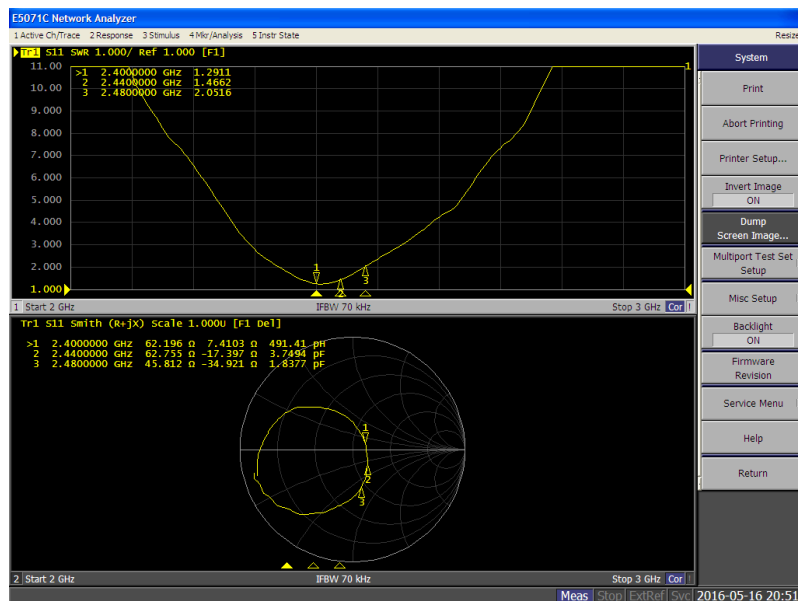


7.5 アンテナ試作基板評価結果

7.5.1 VSWR

アンテナ試作基板の VSWR、スミス・チャート評価結果を図 7-7 に示します。

図 7-7 VSWR、スミス・チャート



7.5.2 放射特性

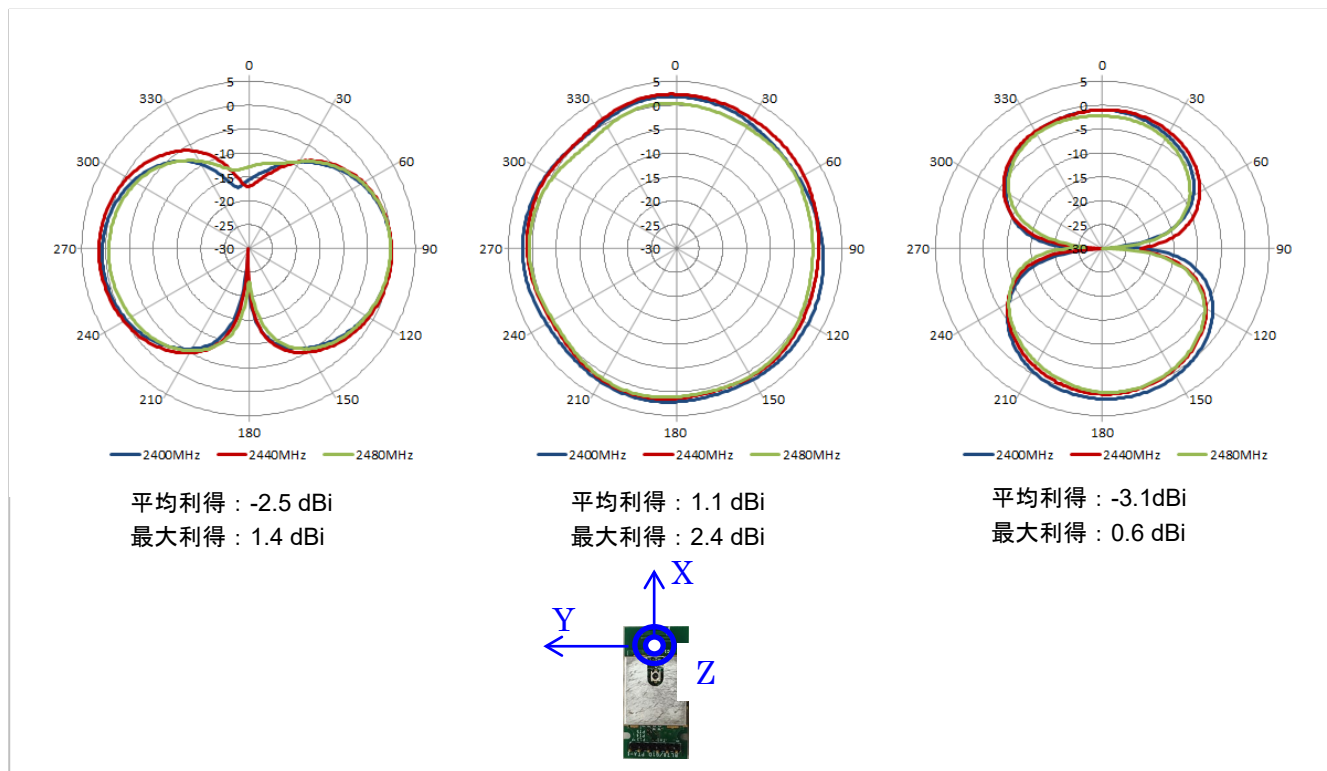
アンテナ試作基板の放射特性評価結果を図 7-6 に示します。

図 7-8 放射特性

(a) x-y 平面 (水平偏波)

(b) y-z 平面 (垂直偏波)

(c) x-z 平面 (水平偏波)



8. まとめ

以下に、アンテナ設計に関する注意点をまとめます

8.1 アンテナ設計環境の確認

以下の設備などを準備します。

- ・ネットワーク・アナライザ（VSWR, S11 スミス・チャート測定環境）
- ・6面電波暗室（放射特性の測定環境）
- ・電磁界シミュレータ（試作前の検証）^{注1}

注1 必須ではありませんが、使用した方が設計効率を上げることができます。

8.2 アンテナ仕様の明確化

システムについて以下の仕様を検討し、最適なアンテナを選定します。

指向特性、偏波特性、アンテナ領域の面積と容積、通信距離

8.3 GND サイズの確保

モノポール・アンテナを基本とする線状アンテナ（逆L、逆F、ミアンダなど）とチップ・アンテナの場合、イメージ効果を形成するために、波長に対する十分な大きさの連続したGNDが必要です。

また、イメージ効果を形成することを考慮して、システム基板にベタGNDを配置してください。

8.4 設計例を用いた電磁界シミュレーションまたは試作

小型パターン・アンテナの設計例を用いて、電磁界シミュレータへのモデリングまたはアンテナを実装したシステム基板を試作します。

システム基板のGNDサイズ、アンテナの配置位置、アンテナへの筐体近接、金属の近接などが、アンテナ特性に影響する可能性がありますので、筐体材質の選定やアンテナ近傍への部品配置を十分に考慮します。

8.5 マッチング調整とそのパラメータ

ほとんどの場合、システム基板にアンテナを実装後、マッチング調整が必要です。

VSWR, S11 スミス・チャートを評価し、 $VSWR < 2$ または < 3 を目標にマッチングさせます。

アンテナ・エレメント長の調整や、集中定数または分布定数の追加による方法で、マッチングさせることができます。

また、筐体まで含めたシステムの組立状態でマッチングさせます。

8.6 放射特性

マッチング調整後、放射特性を測定します。最大利得、平均利得、放射方向を評価し、意図する通信距離を得られるか確認します。

また最大利得は、電波法申請時にも必要になります。

9. ツール情報（参考）

ここに掲載のツールは、当社が動作検証をしたものではありません。

また各ツールは、ライセンス規約に沿って、お客様の責任でご使用ください。

9.1 電磁界シミュレータ

CST Studio Suite（株式会社エーイーティ）

HFSS（アンシス・ジャパン株式会社）

9.2 スミス・チャート

Smith（Bern University）

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	Jan.26.16	—	初版発行
1.01	Oct.01.16	36-39 23,28	試作品評価結果追記 図 6-6, 図 6-14 XYZ 座標定義図変更
1.02	Dec.25.17	—	ご注意書き追記
1.03	Dec.26.19	—	ターゲットデバイスを RL78/G1D から Bluetooth Low Energy マイコン(RL78/G1D, RX23W)に変更 製品ご使用上の注意事項とご注意書きを最新に差し替え
1.04	May.07.20	—	ターゲットデバイスに RA4W1 を追加
1.05	Mar.25.21	—	ターゲットデバイスに RE01B を追加

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 静電気対策

CMOS 製品の取り扱いの際は静電気防止を心がけてください。CMOS 製品は強い静電気によってゲート絶縁破壊を生じることがあります。運搬や保存の際には、当社が出荷梱包に使用している導電性のトレイやマガジンケース、導電性の緩衝材、金属ケースなどを利用し、組み立て工程にはアースを施してください。プラスチック板上に放置したり、端子を触ったりしないでください。また、CMOS 製品を実装したボードについても同様の扱いをしてください。

2. 電源投入時の処置

電源投入時は、製品の状態は不定です。電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. 電源オフ時における入力信号

当該製品の電源がオフ状態のときに、入力信号や入出力ブルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力ブルアップ電源からの電流注入により、誤動作を引き起こしたり、異常電流が流れ内部素子を劣化させたりする場合があります。資料中に「電源オフ時における入力信号」についての記載のある製品は、その内容を守ってください。

4. 未使用端子の処理

未使用端子は、「未使用端子の処理」に従って処理してください。CMOS 製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI 周辺のノイズが印加され、LSI 内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。

5. クロックについて

リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

6. 入力端子の印加波形

入力ノイズや反射波による波形歪みは誤動作の原因になりますので注意してください。CMOS 製品の入力がノイズなどに起因して、 V_{IL} (Max.) から V_{IH} (Min.) までの領域にとどまるような場合は、誤動作を引き起こす恐れがあります。入力レベルが固定の場合はもちろん、 V_{IL} (Max.) から V_{IH} (Min.) までの領域を通過する遷移期間中にチャタリングノイズなどが入らないように使用してください。

7. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。アドレス領域には、将来の拡張機能用に割り付けられている リザーブアドレス（予約領域）があります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

8. 製品間の相違について

型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。同じグループのマイコンでも型名が違うと、フラッシュメモリ、レイアウトパターンの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ幅射量などが異なる場合があります。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含みます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 当社製品または本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害またはこれらに関する紛争について、当社は、何らの保証を行うものではなく、また責任を負うものではありません。
3. 当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を組み込んだ製品の輸出入、製造、販売、利用、配布その他の行為を行うにあたり、第三者保有の技術の利用に関するライセンスが必要となる場合、当該ライセンス取得の判断および取得はお客様の責任において行ってください。
5. 当社製品を、全部または一部を問わず、改造、改変、複製、リバースエンジニアリング、その他、不適切に使用しないでください。かかる改造、改変、複製、リバースエンジニアリング等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
6. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。

標準水準： コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等

高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通制御（信号）、大規模通信機器、金融端末基幹システム、各種安全制御装置等

当社製品は、データシート等により高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（宇宙機器と、海底中継器、原子力制御システム、航空機制御システム、プラント基幹システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、これらの用途に使用することは想定していません。たとえ、当社が想定していない用途に当社製品を使用したことにより損害が生じて、当社は一切その責任を負いません。

7. あらゆる半導体製品は、外部攻撃からの安全性を 100%保証されているわけではありません。当社ハードウェア／ソフトウェア製品にはセキュリティ対策が組み込まれているものもありますが、これによって、当社は、セキュリティ脆弱性または侵害（当社製品または当社製品が使用されているシステムに対する不正アクセス・不正使用を含みますが、これに限られません。）から生じる責任を負うものではありません。当社は、当社製品または当社製品が使用されたあらゆるシステムが、不正な改変、攻撃、ウイルス、干渉、ハッキング、データの破壊または窃盗その他の不正な侵入行為（「脆弱性問題」といいます。）によって影響を受けないことを保証しません。当社は、脆弱性問題に起因またはこれに関連して生じた損害について、一切責任を負いません。また、法令において認められる限りにおいて、本資料および当社ハードウェア／ソフトウェア製品について、商品性および特定目的との合致に関する保証ならびに第三者の権利を侵害しないことの保証を含め、明示または黙示のいかなる保証も行いません。
 8. 当社製品をご使用の際は、最新の製品情報（データシート、ユーザーズマニュアル、アプリケーションノート、信頼性ハンドブックに記載の「半導体デバイスの使用上の一般的な注意事項」等）をご確認の上、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他指定条件の範囲内でご使用ください。指定条件の範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障、誤動作の不具合および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
 9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は、データシート等において高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、耐放射線設計を行っておりません。仮に当社製品の故障または誤動作が生じた場合であっても、人身事故、火災事故その他社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
 10. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。かかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
 11. 当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。当社製品および技術を輸出、販売または移転等する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他日本国および適用される外国の輸出管理関連法規を遵守し、それらの定めるところに従い必要な手続きを行ってください。
 12. お客様が当社製品を第三者に転売等される場合には、事前に当該第三者に対して、本ご注意書き記載の諸条件を通知する責任を負うものいたします。
 13. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。
 14. 本資料に記載されている内容または当社製品についてご不明な点がございましたら、当社の営業担当者までお問合せください。
- 注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社が直接的、間接的に支配する会社をいいます。
- 注 2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注 1 において定義された当社の開発、製造製品をいいます。

(Rev.5.0-1 2020.10)

本社所在地

〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-24（豊洲フォレシア）

www.renesas.com

商標について

ルネサスおよびルネサスロゴはルネサス エレクトロニクス株式会社の商標です。すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

お問合せ窓口

弊社の製品や技術、ドキュメントの最新情報、最寄の営業お問合せ窓口に関する情報などは、弊社ウェブサイトをご覧ください。

www.renesas.com/contact/