

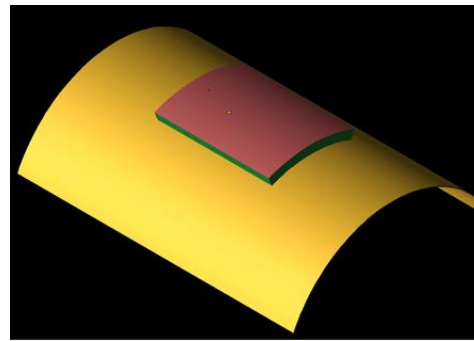
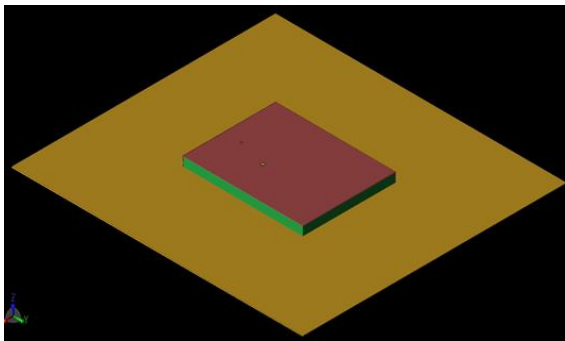
# 湾曲したウェアラブルデュアルバンド MIMOアンテナの電磁界解析による 人体影響評価

## 概要

ウェアラブルアプリケーションで使用するための、柔軟性を持つ繊維素材で作られたデュアルバンドアンテナの解析事例です。アンテナと性能評価は論文[1]を引用しています。

アンテナは、導電性テープと繊維素材で構成される長方形パッチです。

パッチには、性能向上のためと、デュアルバンドの特性を持たせるための短絡壁とチューニング用ビアがあります。このアンテナは形状の柔軟性があるため、平板の状態と湾曲した状態の両方でシミュレーションを行い、性能への影響を測定します。人体ファントムを用いたアンテナの放射解析は、比吸収率（SAR）が許容値であることを確認するために実施します。また、MIMOアプリケーションでの使用を想定し、パッチ二個を使用するアレイの構成を可変し、性能を評価します。



## モデルとシミュレーション

### シングルアンテナフラットモデル

この例は、ウェアラブルアプリケーションで使用するための、繊維素材で作られた形状の柔軟性があるデュアルバンドパッチアンテナに焦点を当てています。アンテナの概要を図1a（上面図）および1b（斜視図）に示します。パッチは長方形で、柔軟性を持つ薄い導電性テープが貼られたフェルト生地製の3mm基板で構成されています。黄色の大きなプレートはグラウンドです。基板側面の隣接する2面は短絡壁となっていて、アレイとして使用するとき隣接するアンテナ間のアイソレーション効果を補っています。ビアは、キャビティの共振モードを変更してデュアルバンド性能を実現するために利用します。アンテナ詳細と性能評価は、論文[1]にあるものに倣っています。

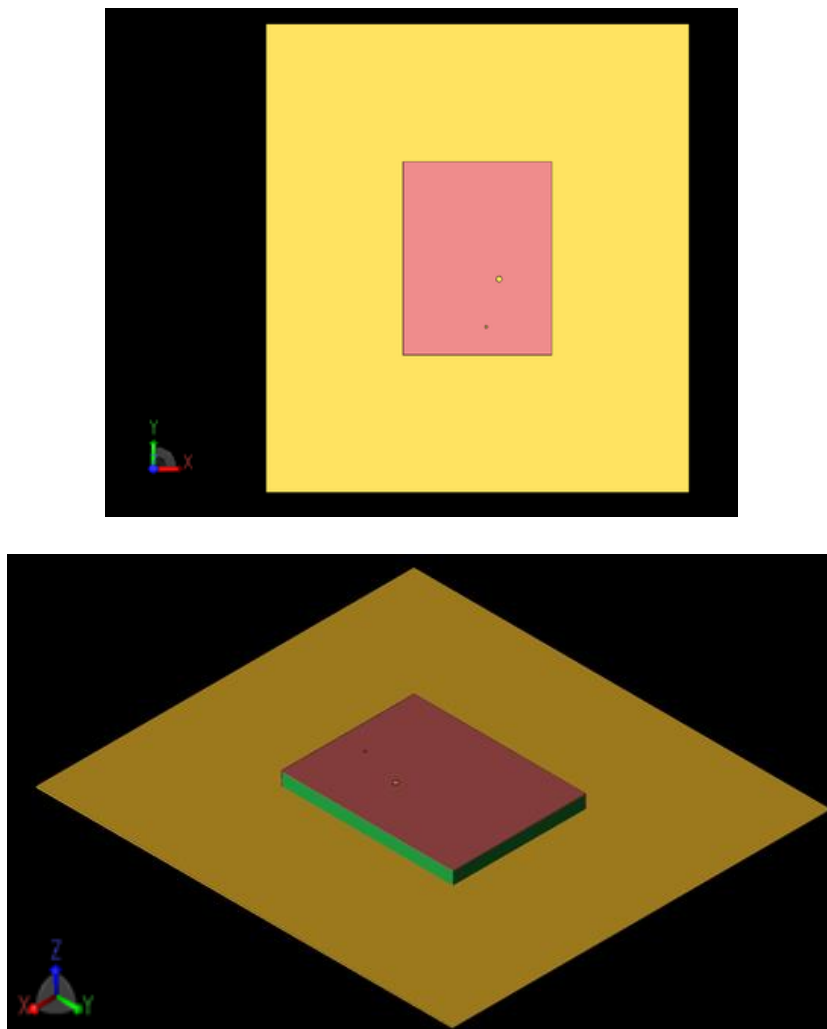


図1：アンテナ形状の上面図（上、1a）と斜視図（下、1b）  
 同軸給電ピンとビアは、パッチ上にそれぞれ大と小の点として表示されている。基板側面の-X側と-Y側は、グラウンドに短絡される短絡壁となっている。

このアンテナのXFDTDによる最初のシミュレーションは、2.5GHzおよび5.5GHz帯域でのリターンロスは納得できる結果で、5.5GHz帯でより広い帯域が得られています（図2）。  
 図3では、いくつかの周波数における定常状態のパッチ表面での磁界が示されています。2.45GHzで最初のモード（図3a）が、他のモードは5.2 GHz（図3b）および5.8 GHz（図3d）に示されています。図3cは5.5GHzにおける磁界を示しています。利得のパターンは球形で（図4）、2.45GHzで約3.4dBi、5.5GHzで6.7dBiのピーク値となっています。

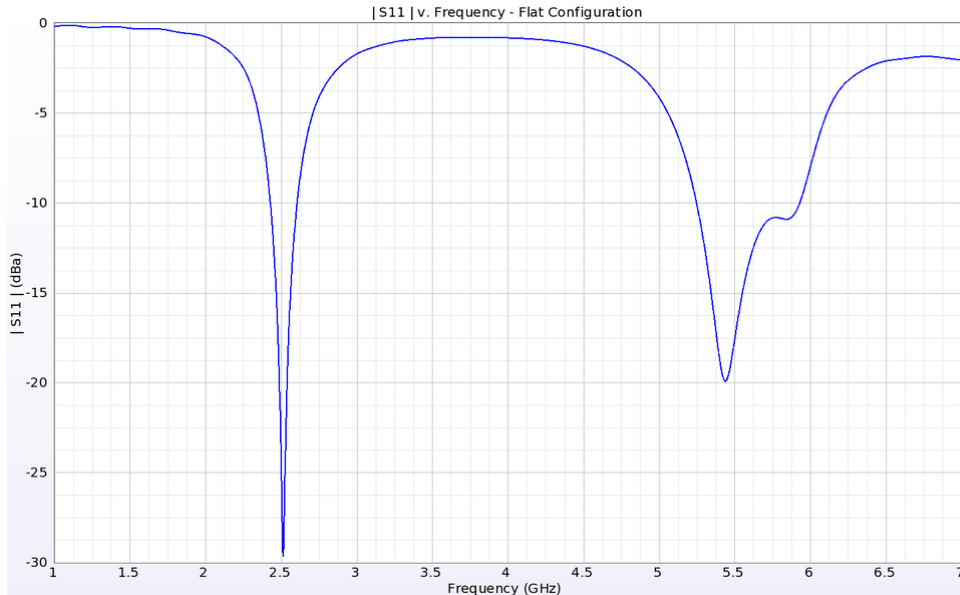


図2：シングルアンテナのリターンロス。2.5 GHz付近の深い共振と、5.4および5.8 GHz付近でそれぞれ-20dB、-10dB程度の二つの共振が現れており、5.5GHz帯域でより広い動作領域が得られている。

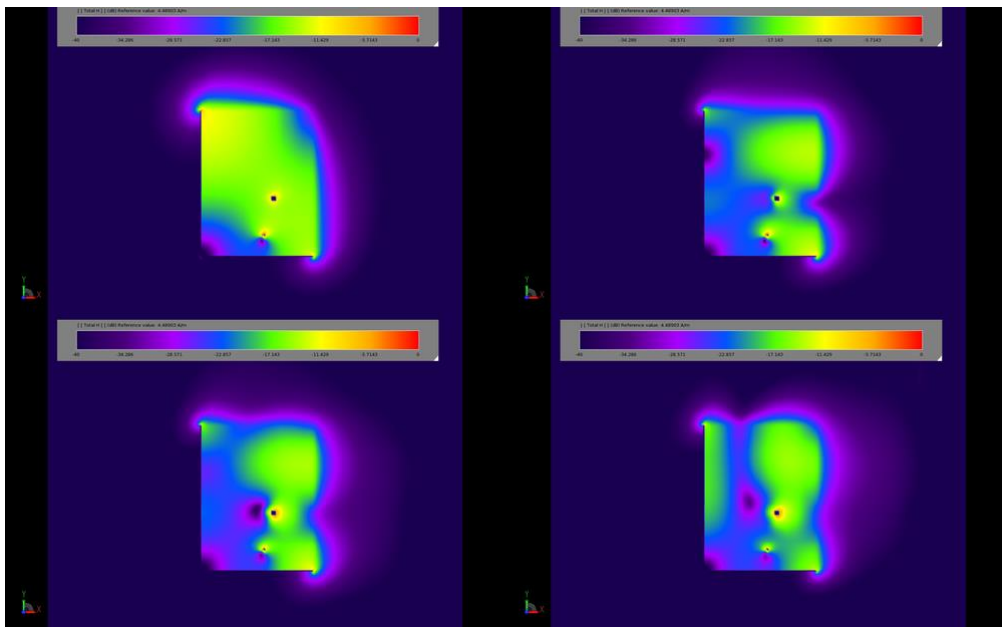


図3：定常状態の磁界分布のプロットは、アンテナのさまざまな動作モードを示している。左上の画像（3a）は2.45 GHzで、右上の画像（3b）は5.2GHz。下の2つの画像（3cと3d）は、それぞれ5.5GHzと5.8GHzにおける応答を示している。

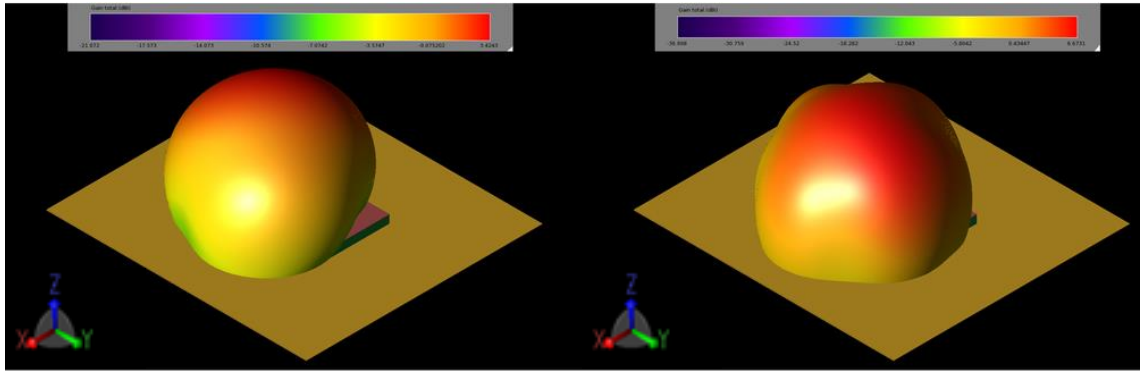


図4：アンテナの利得パターンを示している。2.45 GHz（左、4a）利得のピーク3.4dBi、5.5 GHz（右、4b）利得のピーク6.7dBi

比吸収率（SAR）を評価するために、アンテナを図5に示す皮膚、脂肪、筋肉で構成される層状ファントムの5mm上に配置します。0.5Wの入力電力に対するピーク1グラムの平均SARレベルがXFDTDで計算され、2.45GHzで0.113W/kg、5.5GHzで0.18W/kgであり、基準で許可されている最大値をはるかに下回っています。10グラムの平均SAR分析機能を使用すると、0.5Wの入力電力のSARレベルは2.45GHzと5.5GHzで0.058W/kgと0.082W/kgであり、これも最大許容値をはるかに下回っています。各周波数の10グラムの平均SAR値の分布を図6に示します。

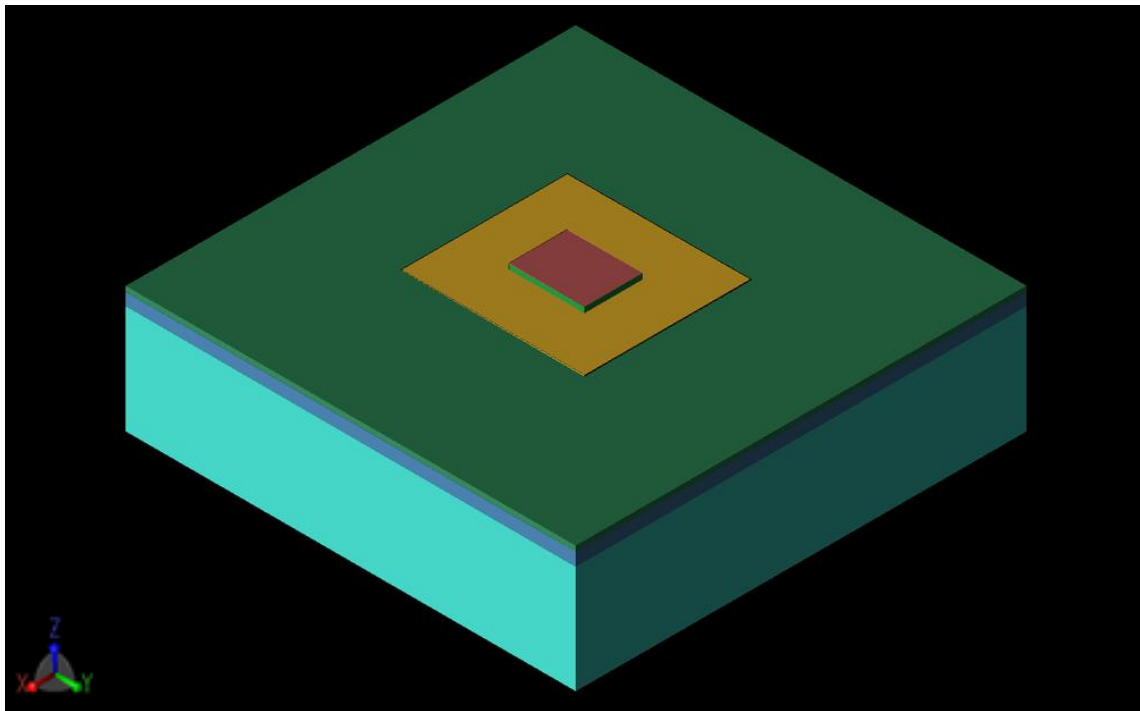


図5：人体の皮膚、脂肪、筋肉組織に相当する3層ファントムの上でシミュレーション。

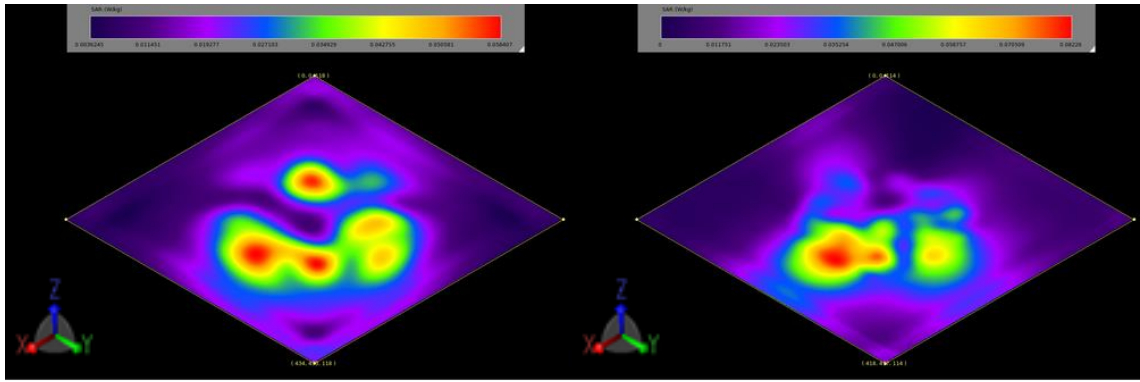


図6：画像は2.45 GHz（左、6a）および5.5 GHz（右、6b）での10gの平均SARプロットで、ファントム内で最も吸収が高い領域を示している。値は0.5Wの入力電力に対するものであり、許容基準を大幅に下回っている。

### シングルアンテナ湾曲モデル

次に、アンテナが身体に装着され湾曲している設定で、より現実的な使用条件下での性能について評価します。モデルは、アンテナの長辺の曲げ（X軸回転）および短辺の曲げ（Y軸回転）のそれぞれ40mmと80mmの曲げ半径でテストされます。半径40mm曲げた構成を図7に示します。図8に示すリターンロスの特性は、2.45GHz帯域ではすべての曲げのケースで良く一致していて、5.5GHz帯域では若干の特性変動があります。すべてのケースにおいて、性能は許容範囲を維持しています。

曲げ半径40mmでは、2.45 GHzでの利得パターンはフラットモデルと良く一致しますが、最大利得は3.4dBiから2.2dBi（X軸回転）および1.8 dBi（Y軸回転）に低下します。5.5 GHzの利得パターンは放射の均一性が低くなり、最大利得はフラットモデルから約2dBi減少します。

半径40mm曲げの利得パターンを図9に示します。半径80mm曲げでは、利得パターンの形状はフラットモデルに近くなりますが、2.45 GHzの最大利得は2.8 dBi（X軸回転）および2.5dBi（Y軸回転）に減少します。5.5 GHzの最大利得は、両方の曲げのケースで約1 dBi減少します。曲げ半径80mmの利得パターンを図10に示します。

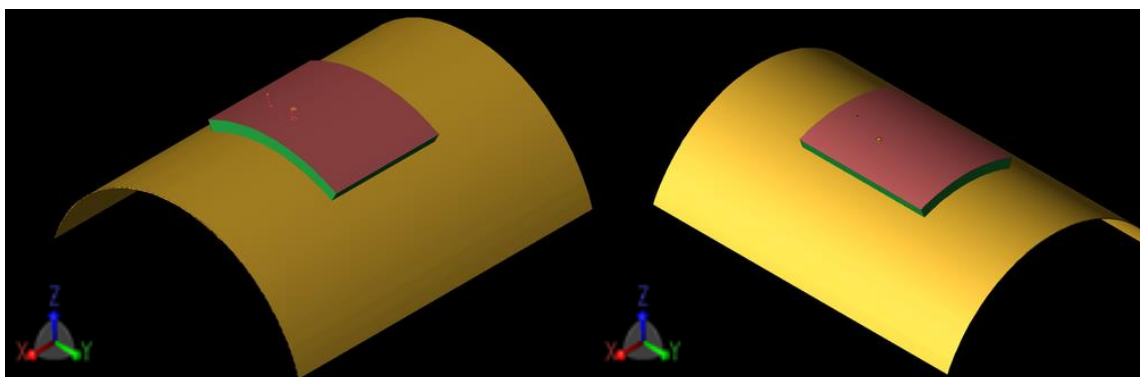


図7：曲げ半径40mmのモデル。左側（7a）はX軸回転、右側（7b）はY軸回転。

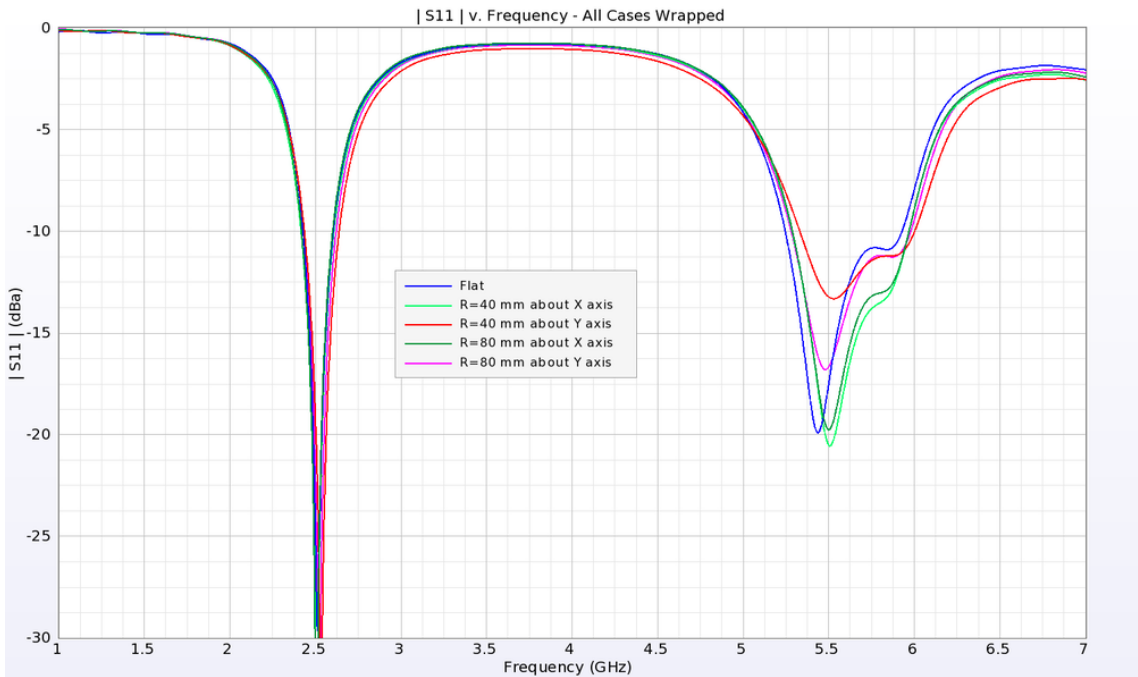


図8：湾曲モデルのリターンロス特性は、すべての曲げ半径と曲げ方向の構成で同様の結果を示している。5.5GHz帯でわずかな変動があるが、動作帯域はすべてのケースで同様。

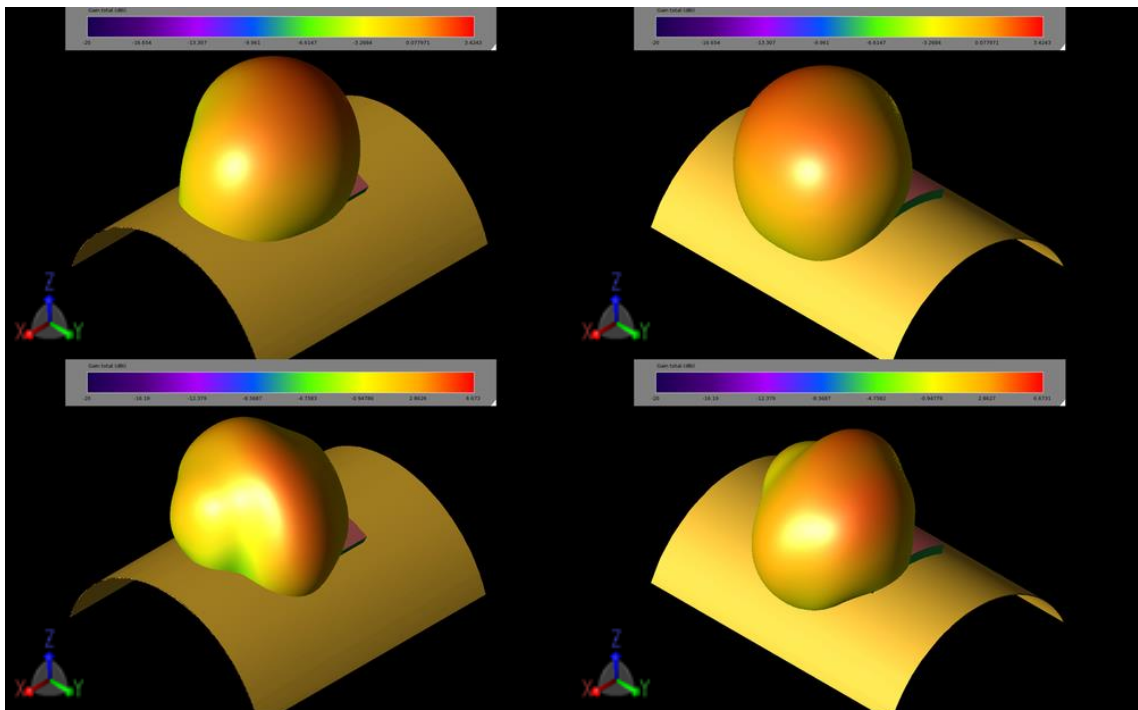


図9：曲げ半径40mm湾曲モデルの利得パターン。フラットモデルと比べ、パターンのわずかな変動と最大利得の低下を示している。画像は、2.45 GHzにおけるX軸回転（左上、9a）とY軸回転（右上、9b）、5.5 GHzにおけるX軸回転（左下、9c）、とY軸回転（右下、9d）。

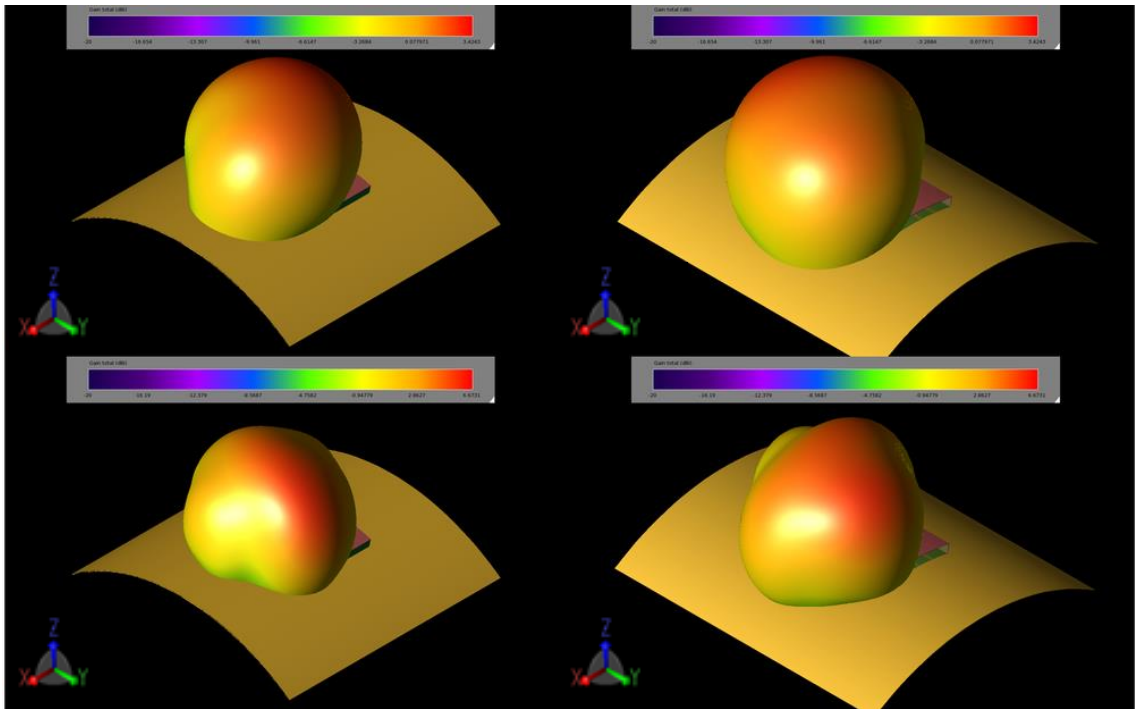


図10：曲げ半径80mm湾曲モデルの利得パターン。フラットモデルと比べ、パターンのわずかな変動と最大利得の低下を示している。画像は、2.45 GHzにおけるX軸回転（左上、10a）とY軸回転（右上、10b）、5.5 GHzにおけるX軸回転（左下、10c）とY軸回転（右下、10d）。

## MIMOアレイ

次に、MIMOで使用するための1 x 2 アンテナアレイ構成です。2個のパッチの向きは、一方または両方が回転する、6ケースの異なる組み合わせです。すべての構成でパッチ間に10mmの間隔があり、相互の影響を最小限に抑えるために、互いに向き合うパッチの側面は常に短絡壁側とします。6ケースの組み合わせを図11に示します。図12に示すように、アレイのリターンロスは、2個のパッチの向きの組み合わせに関係なく、非常に一貫しています。S12パラメーターによって測定されるパッチ間の相互の影響は、-17 dB以下に留まっています。（図13）。

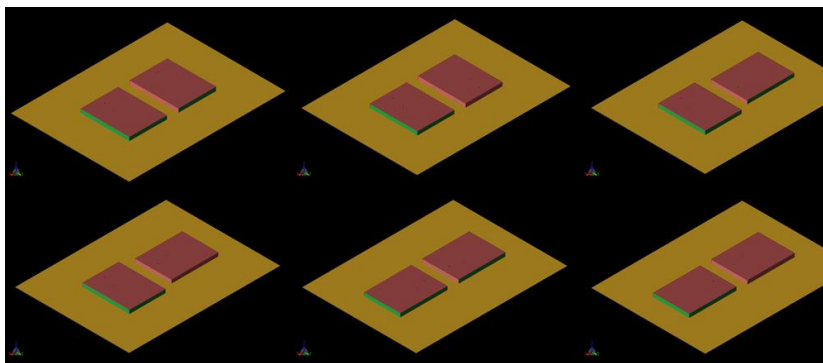


図11：1x2 MIMOアレイの、構成の異なる6ケースのパフォーマンスを評価。全てのケースでパッチ間の間隔は10 mmであり、互いに対向するパッチ側面は短絡壁としている。各ケースにはラベルが付けられ、画像上段の構成左から A、B、C、下段左から D、E、F としている。いずれの場合も、要素を回転させて、給電ポイントと短絡壁の位置を変更する。

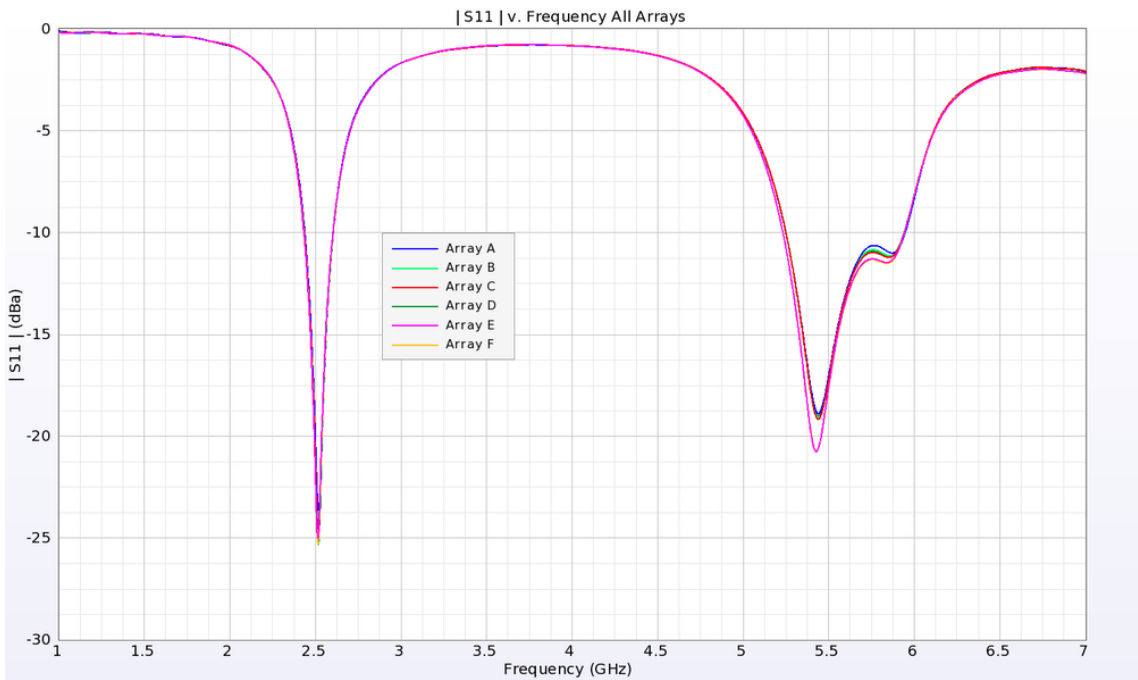


図12：MIMOアレイのすべてのケース（6ケース）のリターンロス表示（図11のAからF）  
 6ケースの値はほぼ同じ。

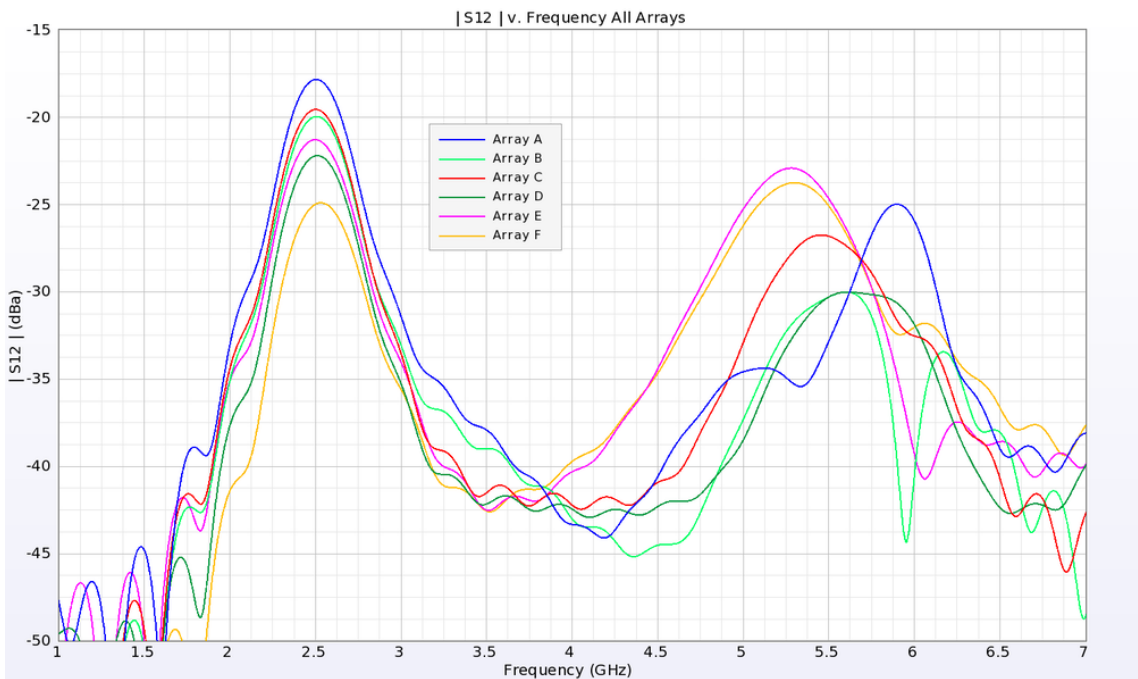


図13：MIMOアレイの2つのパッチ間の相互の影響は、S12の値の大きさによって説明できます。  
 すべてのケースで、アイソレーションは-17dB未満です。

図11に示す6ケースの構成の利得パターンは、それぞれパッチ毎に個別に計算され、図14に示すような同様のパターン形状とピークゲインを持つことがわかります。2つのパターンの相互作用は、アレイに許容可能なダイバーシティがあるかどうかを判断するために、エンベロップ相関係数と複素相関係数を計算することによって考慮されます。すべてのアレイ構成のそれらの係数は、許容できると見なされる0.5の値をはるかに下回っており、表1に詳細が示されています。



表1：MIMOアレイ構成6ケースのエンベロープ相関係数と複素相関係数。

	Array A	Array B	Array C	Array D	Array E	Array F
Env Cor 2.45	8.77e-2	5.01e-2	5.4e-2	2.87e-2	3.12e-2	1.37e-2
Env Cor 5.5	2.41e-5	3.99e-4	6.83e-4	2.01e-4	4.67e-4	2.42e-4
Comp Cor 2.45	2.96e-1	2.24e-1	2.32e-1	1.69e-1	1.7e-1	1.17e-1
Comp Cor 5.5	4.91e-3	2.0e-2	2.61e-2	1.42e-2	2.16e-2	1.56e-2

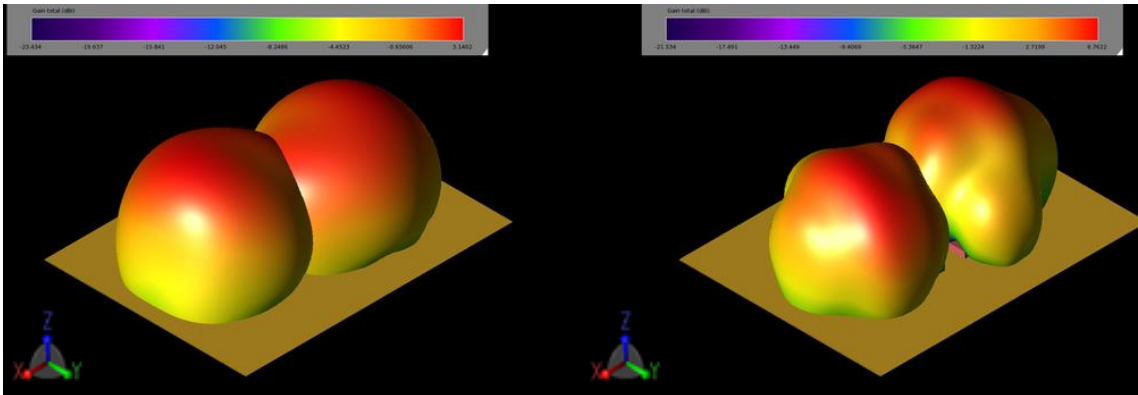


図14：アレイ構成B（図11b）の各パッチの利得パターン。2.45 GHz（左、14a）および5.5 GHz（右、14b）この利得パターン表示は、2つのパッチそれぞれを個別に給電して得た結果。

アレイのカバレッジを測定するために、同等の（または実効）等方性放射電力（EIRP）が一般的に測定値として使用されます。図11bの構成を使用して、EIRPの累積分布関数がプロットされ、図15の23 dBmWの入力電力に対してマークされます。グラフは、2.45 GHzで（1 - 0.69755）または球の30.2%のカバレッジを示しています。（1 - 0.62423）または5.5 GHzで球の37.6%。図11の6つの構成では、平均して2.45 GHzで28.6%、5.5 GHzで38.3%のカバレッジが得られました。

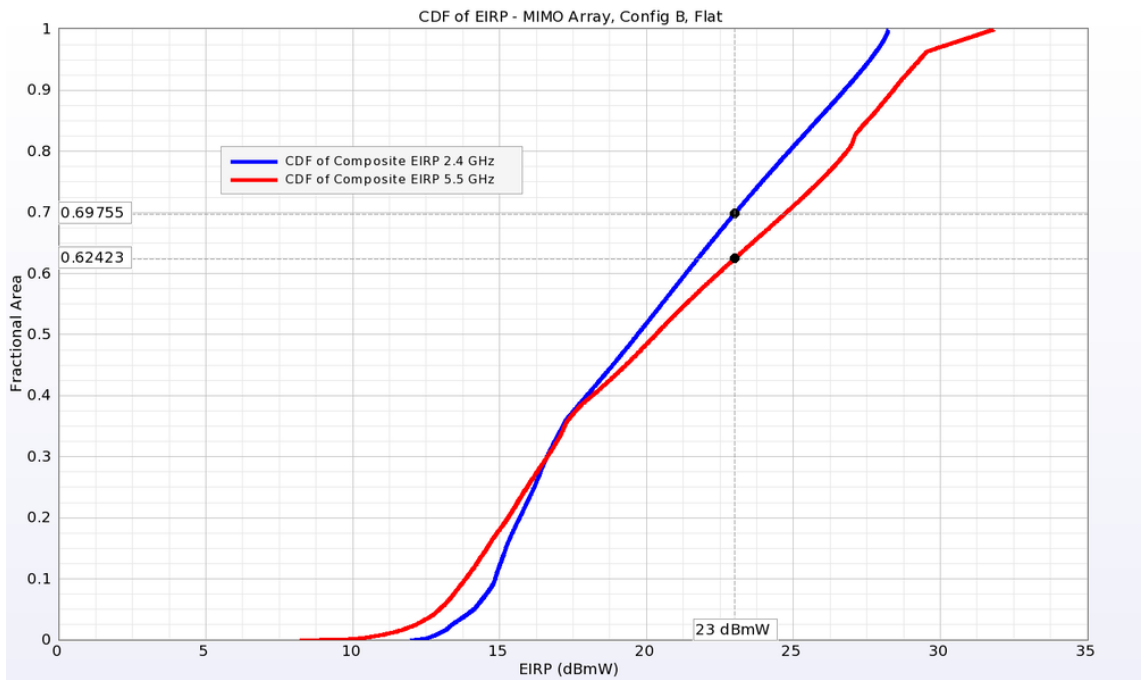


図15：等価等方放射電力（EIRP）の累積分布関数は、特定の入力電力に対してアレイから可能なカバレッジを示します。図11bのアレイの場合、23 dBmWの入力電力が選択された場合、カバレッジは2.45 GHz（1-0.69755）で30.2%、5.5 GHz（1-0.62423）で37.6%です。

### MIMOアレイー湾曲モデル

次に、図11bのアレイ構成（ラベルB）について、前述のシングルアンテナの場合と同様に、曲げ半径40mmに湾曲させます。アレイは図16のようにY軸回転による湾曲で示されています。シミュレーションの結果、Sパラメータは両方のパッチで良好なリターンロスを示し、周波数範囲全体でパッチ間のアイソレーションが-27 dBを下回っています（図17）。2.45GHzと5.5GHzでの個々のゲインパターンは、同様のパターン形状を示していますが、湾曲していないフラットアンテナと比較してゲインが低下しています（図18）。EIRP分析では、湾曲したアレイの包絡線相関係数は、2.45 GHzの場合は $6.0e-3$ 、5.5GHzの場合は $5.1e-5$ で非常に良好です。複素相関係数は、同じ周波数で $7.8e-2$ と $7.1e-3$ です。

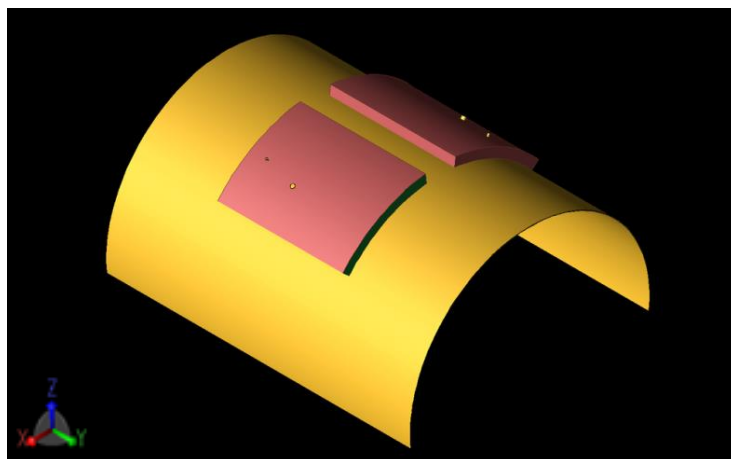


図16：図11bのアレイ構成は、Y軸回転による曲げ半径40mm

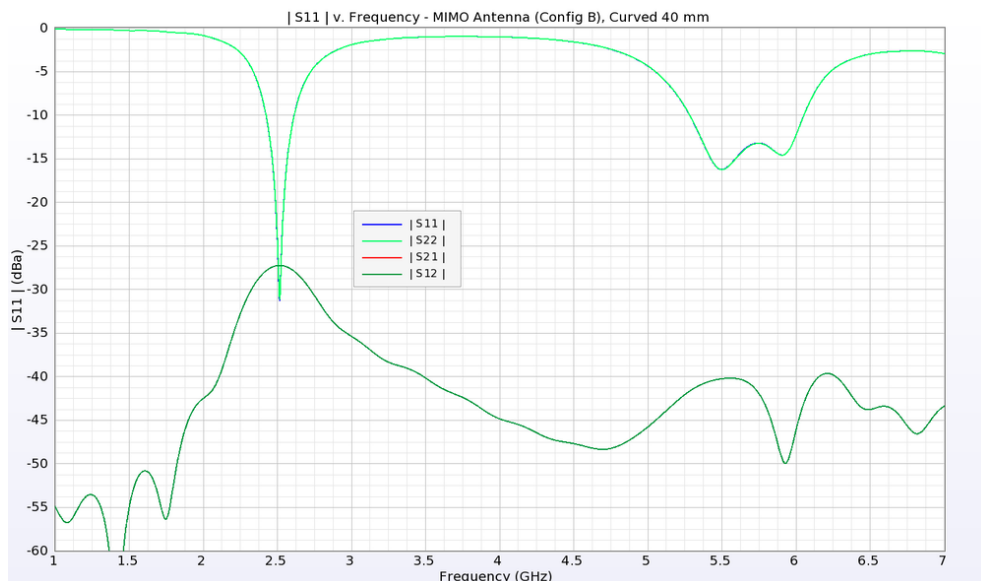


図17：図16の湾曲したMIMOアレイのリターンロスとアイソレーション。  
2.5 GHzおよび5.3～5.6 GHz付近の帯域で良好なパフォーマンスを示している。

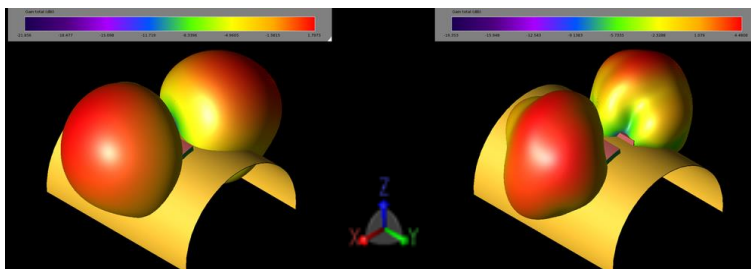


図18：図16の曲線構造のアレイ要素の利得パターンは、湾曲によって十分に分離されており、より広い空間領域をカバーできる。

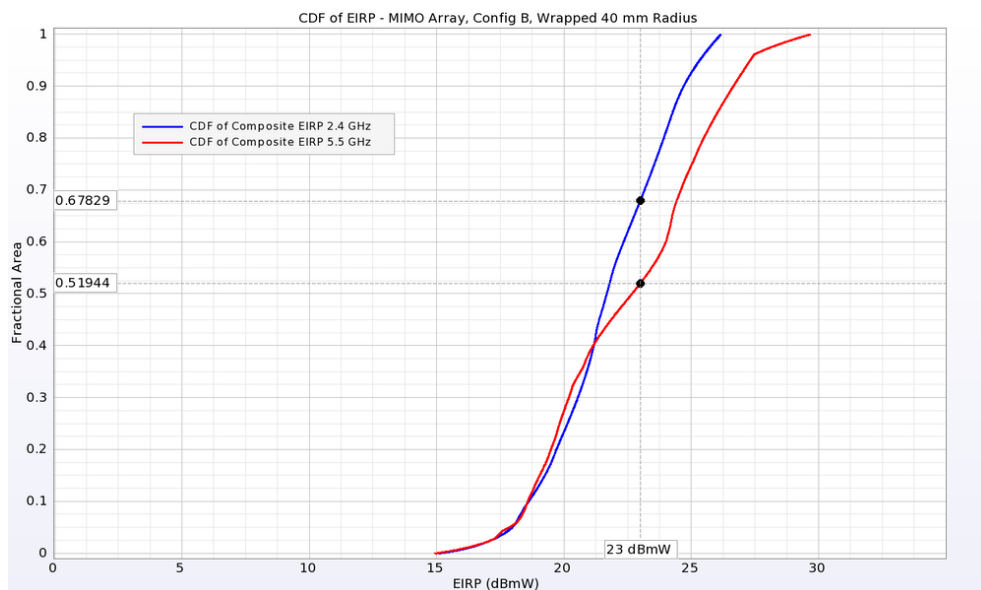


図19：等価等方放射電力（EIRP）の累積分布関数は、特定の入力電力に対してアレイから可能なカバレッジを示します。図16のアレイの場合、23 dBmWの入力電力でカバレッジは2.45GHzで32.2%、5.5 GHzで48.1%であり、図11bのフラットアレイよりも改善されています。

## 結論

この事例は、繊維材料で作られたデュアルバンドで使用するウェアラブルアンテナのデザイン例を示しています。実際の使用でウェアラブルデバイスに起こりうる変形を想定した評価において、アンテナの性能は許容範囲内に留まっています。また、MIMOアレイで組み合わせると、アンテナは良好なアイソレーションと納得できるアンテナ性能を示します。

[1] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, “Dual-Band Textile MIMO Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide (SIW) Technology,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 63, no. 11, p. 4640-4647, Nov. 2015.

[全ての事例はこちら](#)  
[お問合せ等はこちら（製品HP）](#)