

メタマテリアルの応用による等方性ミリ波フィルタの開発

齋藤 隆之, 宮崎 俊之, 坂村 喬史, 本間 稔規, 米田 鈴枝*

Development of the Isotropic Millimetric Wave Filters by Application of Metamaterials

Takayuki SAITOU, Toshiyuki MIYAZAKI
Takashi SAKAMURA, Toshinori HONMA, Suzue YONEDA*

抄 録

メタマテリアルの応用による、ミリ波W-bandの特定の周波数を透過・遮断するフィルタ開発を試みた。単位要素として、正方形の二重環の分割リング共振器：The split ring resonator (SRR) を、平面上に等間隔に配列した構造体を作製した。このとき、単位要素の寸法と配列について複数の条件で作製を行った。環の切れ目がすべて同一方向になるように配置した「正配列」の構造体では、入射の偏波面に対し平行と垂直の各方向において、ミリ波透過特性に異方性があることが分かった。単位要素が 4×4 個または 2×2 個の範囲内で、環の切れ目の向きが上下左右の方向に同一頻度でかつ周期的に配置した「循環」と「完全循環」のそれぞれの構造体を作製した。これら構造体のミリ波透過特性は等方性で、循環と完全循環での単位要素の寸法が1.75mmにおいて89GHz付近を選択的に透過するバンドパスフィルタとなっていた。さらに寸法が異なるこれらの配列の特性を互いに比較したところ、スケーリング則が成立していた。また、ミリ波透過特性は導体の厚さには大きな影響を受けなかった。

キーワード：メタマテリアル, W-band, ミリ波フィルタ, 等方性, 分割リング共振器 (SRR)

Abstract

A development of filters was conducted to achieve performance of transmittance at a specific frequency of millimetric wave W-band by using metamaterials. Filter structures were designed to arrange "unit element" on a plane at even intervals, where the unit element was the split ring resonator (SRR) which was the double rings of the square. Samples that have several conditions of the unit element dimensions and arrangement were prepared. With the "regular arrangement" that is arranged unit elements so that all the splits of the ring became the same direction, anisotropy was seen in a transmission characteristic of millimetric wave by the parallel and orthogonal configuration of the direction for the incidence of polarized wave. The filter structures which were arranged the direction of the split of the ring at right, left, up and down at the same frequency and periodically within 4×4 unit elements or 2×2 were fabricated. The characteristic of these structure bodies was isotropy, and there were the band pass filters that transmit selectively around 89GHz on the dimensions of the unit element 1.75mm. Furthermore, scaling law was confirmed when it was compared the characteristic of these various arrangement with different dimension each other. In addition, the characteristic was little influence of conductor thickness.

KEY-WORDS : metamaterials, W-band, millimetric wave filters, isotropic, the split ring resonator (SRR)

事業名：経常研究

課題名：光・電波境界領域における電磁メタマテリアルの設計・作製・評価技術の開発 (H30～R1年度)

*北海道大学大学院工学研究院 Hokkaido University Graduate School Faculty Engineering

1. はじめに

メタマテリアル(Metamaterials)とは、必ずしも明確な定義が確立していないが、多くの場合「電磁波(光)の波長よりも細かな構造体を利用して、物質の電磁気学(光)的な特性を人工的に操作した疑似物質¹⁾」を指している。最初にその概念が提唱されたのは、イギリスの理論物理学者 J.B.Pendry らが、1999年に発表した論文とされている²⁾。この知見を発展させ、D.R.Smith らが最初に実験的に負の透磁率と誘電率を示す微細構造を実際に作製し³⁾、さらにその後、マイクロ波に対する負の屈折率を実現している。マイクロ波に対する負の透磁率の構造は、既にWi-Fi用無線ルータに応用されている⁴⁾。

著者らはメタマテリアルに着目し、ミリ波帯域において波長より小さな導体構造を平面上に配列した1枚のシート状材料によって、任意の波長を透過または遮断する電磁波フィルタを目指している。メタマテリアルをシート状の構造とすることは、従来の立体的なメタマテリアル構造に比べて、作製の容易さや実装時の利便性を有し、実用上大きなメリットがある。ミリ波帯は現在、スマートフォンなどの情報通信が5G段階に入り利用され始めたことで、混信やノイズの除去の目的で特定の周波数のみを通す簡易で低コストのフィルタが必要とされつつある。本報告では、ミリ波帯域で等方性(ミリ波の進行方向に対する回転により特性が不変)で特定の波長を透過するバンドパスフィルタや逆に遮断するバンドストップフィルタの開発について述べる。

2. 既知のメタマテリアル構造とミリ波フィルタのためのメタマテリアル構造設計

これまで開発・提唱されたメタマテリアルはその構成としては立体的な導体(金属)構造がほとんどで、またその要素となる平面構造は環状で環の一部が途切れた構造を持たせたものが多い。その例を図1に示した。金属は自由電子が存在するため、電磁波の入射によりその振動に電荷が追随し、様々な応答が起こり得る。この途切れた環は、電磁気的な応答をする回路と見なしたとき分割リング共振器:The split ring resonator (SRR) と呼ばれる³⁾。この内外環はコイルの特性を有しその全体のインダクタンス(誘導容量)を L 、環どうしのギャップ及び一つの環の切れ目はコンデンサの特性を有し全体のキャパシタンス(静電容量)を C とすると、電磁気的な共振周波数 $f(\text{Hz})$ は $1/(2\pi\sqrt{LC})$ となる。なお、環が一重でも環同士のキャパシタンスが存在しないだけで定性的には同様で、単環のメタマテリアル要素も提唱されている。

本開発では、ミリ波帯などの電磁波に対するフィルタであるとともに視覚的な装飾性を兼ね備えた用途を想定した。そして実際のSRRとしては図1の右側の外形が正方形を用い

た。その理由は、作製上の観点から切れ目の向きを正確に縦横に配置し易いためと、金属装飾の観点から平面状をなるべく密に敷詰めるためである。今後、この正方形の2重SRRを単位要素と呼び、単位要素の形状を規定する変数とそれらの間隔は図2のような比率に固定し、その単位要素の並べ方と外形の寸法を変化させることとした。ミリ波はその名称の通り波長が1~10mm(周波数では300~30GHzに対応する)であり、現在普及しつつある5G通信がほぼ30GHzの周波数であるため、次世代を想定しその少し上で、かつ現在、自動車レーダーで頻用される80GHz付近を含むW-band(75~110GHz)をターゲットとした。波長で表すと4~2.72mmであるため、単位要素の外形を3mm以下に設定した。ただし作製上の制約から、今回の最小外形寸法は1.5mmとなった。



図1 メタマテリアルに用いられる導体形状の例

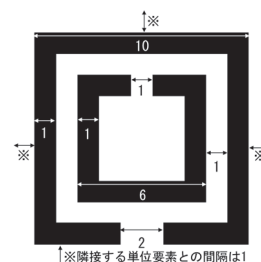


図2 単位要素の間隔の比率

3. 実験・結果及び考察

3.1 正配列とちどり配列の構造体作製と評価

単位要素の最も単純な配列である、図3(a)の配列の構造体作製と評価を行った。実際にはこれらを、60mm以上の正方形となるよう多数個を配列した。この配列を正配列と呼ぶ。また、同時に図3(b)のちどり配列の構造体も作製・評価し

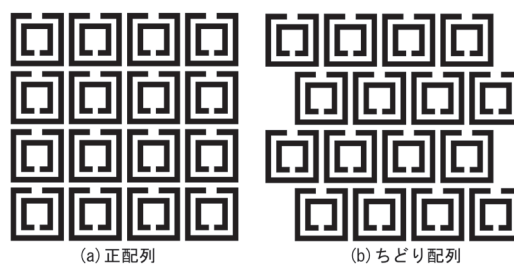


図3 単位要素の正配列とちどり配列

た。ちどり配列は、環の切れ目が上下に隣接する単位要素と単位要素の空隙の線上に位置しており、正配列とは違う隣接要素との相互作用での特性変化が予想された。本節では主に正配列の作製と評価結果を示し、簡単にちどり配列にも触れる。

3.1.1 作製方法

シート状のフィルタとするためには、非金属の基板の上に図3のような導体パターンを形成する必要がある。本開発では、プリント基板の製造など用いられる紫外線を用いたフォトレジスト法を用いた。ここでのフォトレジスト法はパターンが印刷されたマスクを用意し、紫外線感光剤の塗布された銅などの金属薄膜を有する樹脂基材に、マスクをかぶせ紫外線露光した後、現像・エッチングにより金属の所定の構造を作製する方法である。現像とは、露光されたまたはされなかった感光剤を溶解することを指す。前者の露光で溶解する感光剤をポジ型、後者をネガ型と呼ぶ。エッチングとは感光剤が溶解し露出した金属を溶解する操作を呼ぶ。最後に金属を溶解から保護していた感光剤を剥離すると、樹脂基板上の金属パターンができる。図4にこのプロセスの模式図を示した。

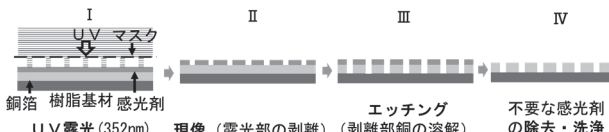


図4 構造体作製に用いたフォトレジスト法のプロセス

最初に、マスクを市販のインクジェットプリンタにより黒インクでPETフィルムに印刷した。このとき、外形1.5, 2.0, 2.5, 3.0mmの単位要素のパターンマスクを作製した。単位要素を敷詰めた範囲は、60×60mm以上とした。外形2.0mmのパターンの場合、単位要素は約30×30個である。感光剤の塗布された銅箔を張った樹脂は、市販のサンハヤト製クイックポジ感光基板 NZ-G33Kを用いた。これは厚さ100μmのポリイミド (PI) に厚さ35μmの純銅箔が張られ、その上にポジ型紫外線感光剤が塗られている。現像液とエッチング液も同製品用の専用品を用いた。最初に2mm正配列パターンで、適正な金属構造が得られるように、露光時間・現像時間・エッチング時間の最適化を行った。現像時間は材料と現像液の組み合わせに対しほぼ指定されているが、露光時間とエッチ

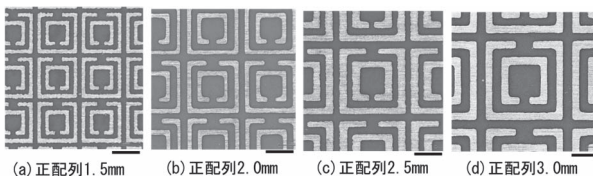


図5 作製した構造体の実体顕微鏡画像 (下部スケールバー：1.0mm)

ング時間で線幅と導体の除去量に変化する。他の寸法の構造体も同一条件で作製した。得られた構造体 (正配列) の実体顕微鏡画像を図5に示す。得られた構造体を60×60mmに切り取り、窓の開いたプラスチックまたは紙製のホルダにより平坦に保持し試験体とした。

3.1.2 ミリ波透過性評価とその結果

作製した試験体について、高周波ネットワークアナライザ (キーサイト・テクノロジ製E8362C) によりミリ波W-band領域の透過性を評価した。本装置では、電場が垂直で磁場が水平に振動する縦偏波が照射される。評価時の装置と試験体の配置を図6に示す。手前のホーンアンテナ1が送信側で、奥の2が受信側であり受信側に入射する電場振幅の減衰量 (S2I 試験体) [dB]を測定した。アンテナの間隔は60mmとし、試験体はその中間に置いた。ノイズとなる多重反射を乱反射させSN比を向上させるため、アンテナ付近にしわを寄せたアルミ箔を置いた。何も無い空間の減衰量 (S2I 空間) も測定し、各周波数で、

$$\text{透過率} = 10^{[S2I\text{試験体} - S2I\text{空間}]/20}$$

として空間を1に規格化した透過率に変換した。正配列・ちどり配列とも偏波に対して原理的に異方向性が考えられるため、環の切れ目が垂直な配向である“縦配向”と、水平に配向する“横配向”で測定した。今後、この測定条件を縦、横と簡略に表現する。

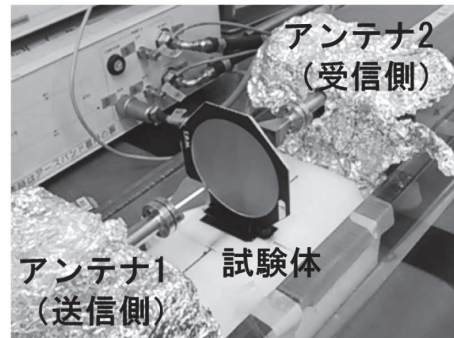


図6 ミリ波透過性評価時の装置と試験体の配置

正配列で単位要素1.5, 2.0, 2.5, 3.0mmの試験体のミリ波透過特性を図7(a), (b), (c), (d)に示した。図7(a)1.5mmの結果は、3.1.3の考察で触れる。まずそれぞれの単位要素の寸法では、縦と横で全く異なる結果が得られた。例えば図7(b)の2.0mmでは、横は94GHzと105GHzに急峻な遮断が存在する特性であるが、縦では94Hz付近になだらかな遮断が一つだけ存在する特性となっている。いずれも特定の周波数を透過または遮断するフィルタといえるが、縦と横で特性が全く異なるので実用上は利用しにくい。2.5mmの図7(c)でも図7(b)と透過・遮断の位置は異なるが、定性的には同様だった。一方、3.0mm図7(d)では縦横で互いにわずかに異

なるのみといえるが、フィルタという意味では明確な透過または遮断特性が見られないため利用価値は低い。単位要素の寸法が異なる試験体間の比較では、特性は縦配向でも横配向でも単位要素の寸法により変化することも明瞭となった。

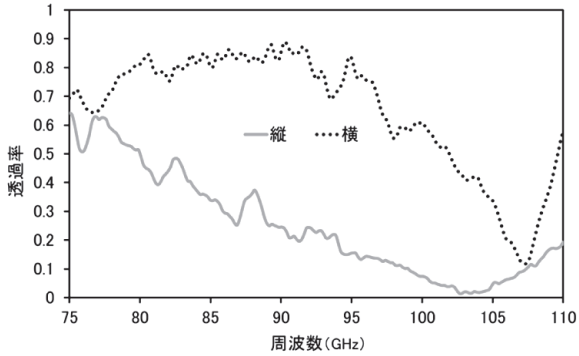


図7 (a) 正配列・単位要素 1.5mm のミリ波透過特性

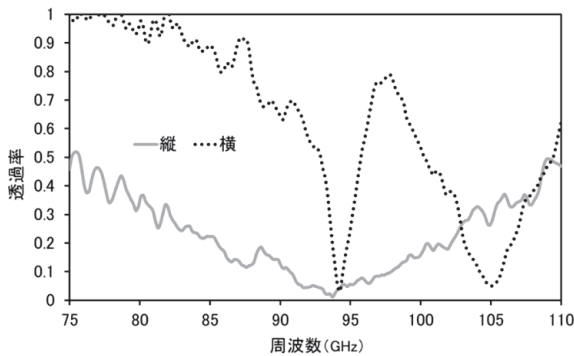


図7 (b) 正配列・単位要素2.0mmのミリ波透過特性

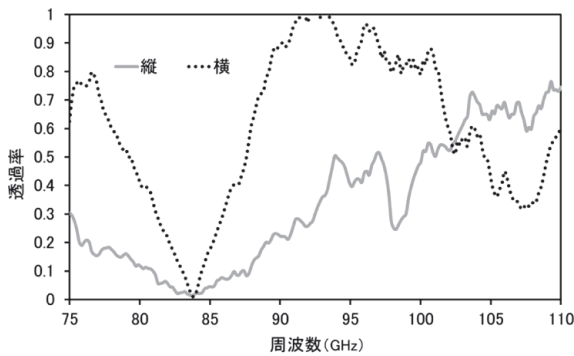


図7 (c) 正配列・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性



図7 (d) 正配列・単位要素 3.0mm のミリ波透過特性

ちどり配列の単位要素が2.0mmと2.5mmの試験体についての結果を図8 (a), (b)に示す。横配向では寸法が2.0mmと2.5mmにおいて透過・遮断の周波数は異なるが、比較的急峻な特性であった。この横配向の特性において、単位要素の寸法が同一の正配列との類似性と違いが認められる。類似性として単位要素2.0mm同士 (図7 (b)と図8 (a)) では、100~105GHzに比較的急峻な遮断があり、単位要素2.5mm同士 (図7 (c)と図8 (b)) では、80~85GHzに比較的急峻な遮断がある。違いとしては単位要素2.0mm同士で正配列の94GHzの急峻な遮断はちどり2.0mmでは見られず、単位要素2.5mm同士でちどりの93GHz付近の透過率0.5程度の明確な遮断は正配列2.5mmでは見られない。この違いは、行同士でのずれの有無 (図3) による隣接行との相互作用の変化のためと思われたが、十分に考察できていない。正配列とちどりの縦で同じ寸法同士での周波数特性は、比較的なだからでほとんど一致していた。

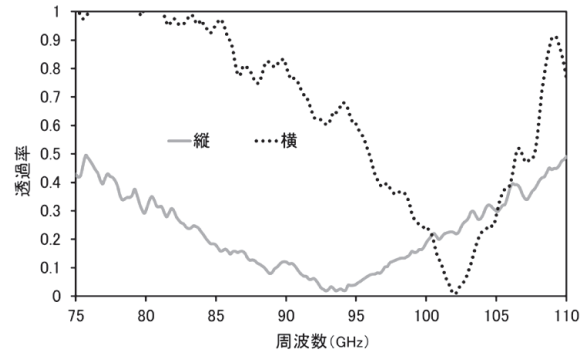


図8 (a) ちどり・単位要素 2.0mm のミリ波透過特性

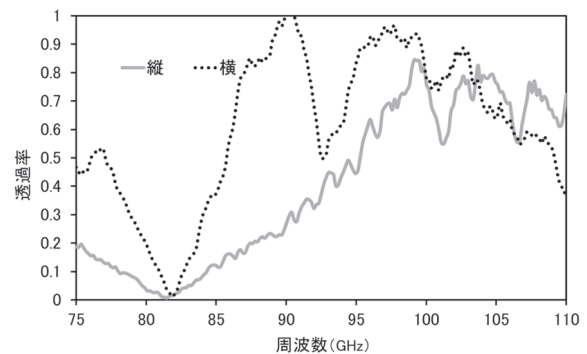


図8 (b) ちどり・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性

3.1.3 正配列及びちどり配列構造体の特性に関する考察

いずれの配列でも、縦と横で透過特性に異方性が存在し、実用的なフィルタとしては利用しにくいことが明らかとなったが、今後の設計指針を得るため単位要素の寸法が特性にどのような影響を与えるか解析を行った。メタマテリアルでは、微細構造の寸法を変更すると周波数特性は寸法比に反比例するスケール則が理論的には成立する。例えば、単位要素の寸法が S で周波数 ω_s の共振特性が見られたとき、寸法を

より大きな L とした場合、共振周波数 ω_L が、

$$\omega_L = (S/L)\omega_s \dots\dots(1)$$

に変換される。これは周波数に反比例する波長側から考えると容易に理解できる。つまり構造が大きくなれば、同じ比率だけ長い波長と共振するためである。例えば2.0mmと2.5mmを比較すると、前者に対して後者では対応する遮断、あるいは透過ピークは周波数が低い方に移動することになる。正配列2.0mm横(図7(b))の遮断ピーク105GHzは(1)式から、正配列2.5mm横では $105 \times 2.0/2.5 = 84\text{GHz}$ に変換されることが予測されるが、実際に図7(c)では、その周波数に遮断ピークが存在する。ちどり2.0mm横(図8(a))と2.5mm横(図8(b))の構造体の横配置同士の特性比較でも、遮断周波数のこの変換関係が非常に良い一致で確認できる。以上のことから、正配列とちどり配列の構造体はミリ波W-band領域ではスケーリング則(1)式が成立すると考えられる。なお、正配列1.5mmの特性である図7(a)でも、横配向で107.5GHzにやや鋭い遮断が存在する。これは正配列2.0mmの94GHzの遮断に対応すると見られるが、スケーリング則から予測される125GHzからはかなりはずれている。1.5mmと単位要素が小さく、寸法誤差の比率が構造に対し大きくなったことが影響していると思われる。

3.2 等方性フィルタとなる構造体作製と評価

3.2.1 等方性の構造体の設計

正配列では、ミリ波透過特性において縦と横配向で異方性が見られたため、新たに等方性の配列を目指した。単位要素は変更せず、その配列法を変えた図9(a),(b)のような2種類の構造体を設計した。考え方としては、環の切れ目の向き上下左右の出現頻度が、 4×4 個または 2×2 個を配列したときに同一となるようにした。便宜的に図9(a)を循環(配列)、図9(b)を完全循環(配列)と呼ぶ。循環は左から右にたどると環の切れ目の向きが90度ずつ右回りに回転している。下にたどると左回りで同様である。完全循環は1行目などの奇数行で切れ目が左、上、左、上を繰り返す、2行目などの偶数行で下、右、下、右を繰り返す構造である。いずれの配列も周期的であるが、循環は4単位要素で1周期、完全循環は2単位要素で1周期となっている。

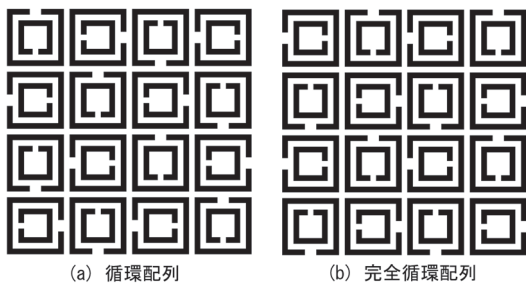


図9 単位要素の循環及び完全循環配列

3.2.2 作製方法

二つの配列について単位要素が1.75と2.5mmの構造体を作製した。循環については2.0mmも作製した。作製法は3.1.1に示した方法と同様である。出来上がった構造体は、いずれも図5に示した正配列とほぼ同様な形成状態であった。

3.2.3 ミリ波透過性評価結果

図10(a),(b),(c)に循環の単位要素1.75, 2.0, 2.5mmのミリ波透過特性を示した。測定方法は3.1.2に既に示した方法と同様である。図10(b)2.0mmと図10(c)2.5mmについては単位要素の任意の一边を縦(垂直)に向けた配向(0度)及び、そこから構造体の平面をミリ波の入射側から見て時計回りに90度回転させた配向を測定した。図10(a)1.75mmではそれに加えて、45度及び135度でも測定した。180度は初期0度の配向の上下を反転した状態で、原理的に0度と変わらないため省略した。図10(a)を見ると、すべての回転角度でほぼ異方性は無く、等方性であった。かつ、89GHz近辺に透過率が0.9程度となるピークを持ち、この近辺を選択的に透過するバンドパスフィルタといえる。図10(b),(c)を見ると2.0及び2.5mmにおいても、0度と90度の2方向で異方性はほとんど認められなかった。

図示は省略するが、完全循環の単位要素1.75, 2.5mmの透過特性は、寸法が同一の循環の特性、図10(a)及び図10(c)と非常に類似していた。ただし、循環1.75mmの89GHz付近の透過ピークが0.9程度であるのに対し、完全循環1.75mmのそれはやや低周波数側で、透過率も0.8以下となっていた。

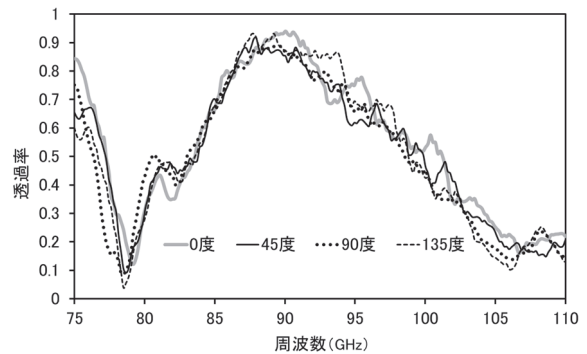


図10(a) 循環配列・単位要素1.75mmのミリ波透過特性

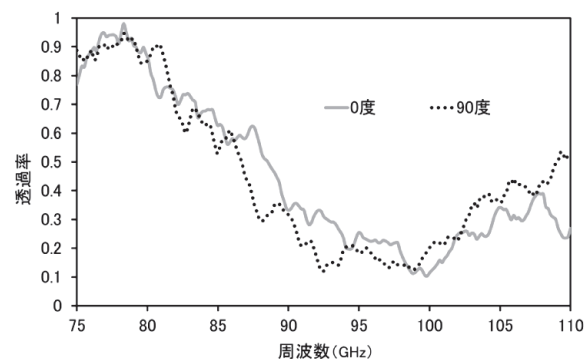


図10(b) 循環配列・単位要素2.0mmのミリ波透過特性

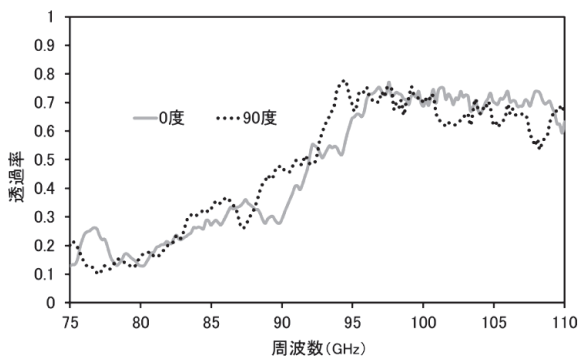


図 10 (c) 循環配列・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性

寸法誤差などでこの差が生じるとも解釈できるが、最大ピークの透過率に関しては複数回の確認で循環が常に0.9程度、完全循環が常に0.8以下である現象を再現した。従って、このことは配列方法の差に由来する本質的な特性と考えられた。

3.2.4 等方性構造体の特性に関する考察

図10(b)2.0mmの78GHz付近の透過ピークは、図10(a)の89GHzを基準にすると、 $89 \times 1.75 / 2.0 = 77.9$ となりスケーリング則を満たしている。さらに図10(b)の100GHzの遮断のピークは、2.5mmに対してはスケーリング則により $100 \times 2.0 / 2.5 = 80$ GHzに変換され、実際に図10(c)のその付近に遮断らしきピークが存在する。以上のことから本単位要素を用いたミリ波W-band近傍のフィルタでは、正配列及びちどり配列も含めスケーリング則が成り立ち、これを利用すればピークなどの透過特性を任意の周波数に変換することができると考えられる。例えば図10(b)2.0mmで認められる100GHzの遮断を90GHzに変換するためには、その比で寸法を大きくすなわち $2 \times 10 / 9 = 2.22$ mm程度の単位要素と対応する間隔とすれば良い。この寸法を挟む循環2.0mm(図10(b))と循環2.5mm(図10(c))の特性から、循環2.22mmの構造体は比較的緩やかな特性ではあるが90GHzを遮断するバンドストップフィルタとなると推測できる。

3.3 等方性構造体の拡張の試み

3.2で見出されたように、今回用いた単位要素を循環と完全循環配列に配置することで、ミリ波W-bandの等方的なバンドパスまたはバンドストップフィルタを実現できることが分かった。他にも、これを実現できるような配列方法がないかを考察し、波長より小さな単位要素がある狭い範囲内でその環の切れ目の向き上下左右が、同一頻度で出現すれば良いと考えた。循環と完全循環は、それぞれ単位要素が 4×4 及び 2×2 の範囲でこれらが成立しているからである。多数個並べた時でも、前者はどの隣接する 4×4 個を選んでも上下左右が4回ずつ、後者はどの 2×2 個を選んでも1回ずつ出現する。図示を簡単にするため、単位要素の外側の環の切れ目を矢印で表すと、循環と完全循環は図11(a), (b)のようにな

る。ここで新たに、 4×4 個内で上下左右が4回ずつ出現する新たな配列4つC, D, E, Fを設計した。これらを図11(c), (d), (e), (f)に示した。単位要素の寸法は1.75mmとした。CとDは人為的に偏りを与えながらも条件を満たすようにした。EとFは条件を満たしつつ、完全にランダムな配列を生成した。これらは多数敷詰めたとき、どのような選び方をしてもかならず上下左右が4回ずつとなるわけではない。しかし、 8×8 個以上の広い範囲ではほぼ同じ頻度で出現する。

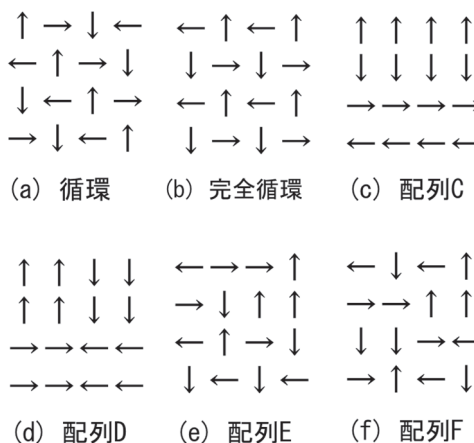


図 11 各配列の矢印表現

特性評価の結果、配列Cでは明らかな異方性があった。また、配列D, E, Fでは異方性のあるなしは判然としなかった。しかし4つの配列の特性はいずれもなだらかで、かつ透過率が0.7~0.2の範囲で同じ単位要素寸法の循環と完全循環で見られた特定周波数を透過(または遮断)する性質はなく、フィルタとしての利用価値は乏しいことが分かった。循環および完全循環との特性の違いは、配列C, D, E, Fの波長程度の範囲での対称性の低さに起因していると思われるが、十分な考察はできていない。ただこれら結果から、さらに広い範囲で環の切れ目の向き上下左右が同一頻度で出現しても、等方性のバンドパスまたはバンドストップフィルタにはならないと考えられる。

3.4 異なる作製方法と導体形状による特性の比較

ここまでの構造体は、すべて図4のフォトレジスト法で作製した。ここまで示したデータだけでは、作製方法や形状の違いが特性に与える影響は不明である。これらの知見を得るために、異なる方法で正配列2.0mmの構造体を作製し評価を行った。最初に厚さ $50 \mu\text{m}$ のPETフィルム上に、銀ナノインクで正配列2.0mmのパターンをインクジェット印刷した。このインクは乾燥すると銀が主成分の金属薄膜となる。この薄膜の上に無電解銅めっきを行い、銅の厚さを約 $3 \mu\text{m}$ とした。この二法で作製された、正配列2.0mmの実体顕微鏡画像を図12に示した。フォトレジスト法の方がやや銅の線が細く、銀ナノインクめっき法は線の太さ・形状とも設計

に近かった。なお、フォトレジスト法の基材には厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド(PI)が、銀ナノインク-めっき法にはプロセスの都合上、厚さ $50\mu\text{m}$ のPET樹脂が用いられている。また、前者での銅箔の厚さは $35\mu\text{m}$ であり、後者では無電解めっきのためあまり厚くできず $3\mu\text{m}$ であった。すなわち銅の厚さは10倍以上異なっている。

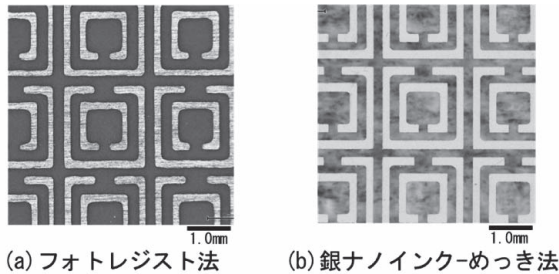


図12 異なる作製法の正配列2.0mmの実体顕微鏡画像

(b)銀ナノインク-めっき法で作製した正配列2.0mmの構造体のミリ波透過特性を図13に示した。(a)フォトレジスト法の正配列2.0mmの特性は既に図7(b)に示している。樹脂の種類を含む作製方法と導体形状の違いに関わらず、特性は非常に類似していた。特に導体の厚さは $3\sim 35\mu\text{m}$ の範囲で特性に大きな影響を与えないことが分かった。これらのことは、ちどり2.0mmの構造体でも確認された。

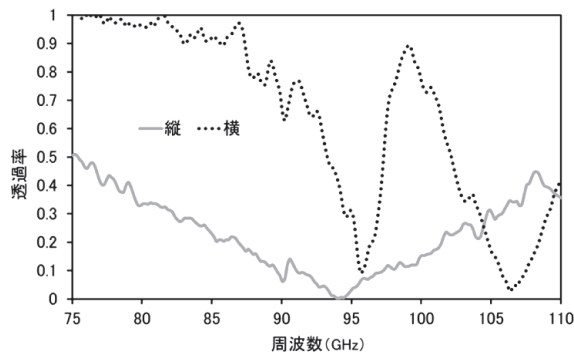


図13 銀ナノインク-めっき法での正配列2.0mmの特性

3.5 ミリ波透過特性の理論計算の試み

本開発の中では、構造設計データを用いてその構造体の透過特性を、FDTD法による電磁界シミュレーションで理論計算することも試みた。正配列2.0mmの縦配向と横配向の実測値に対し、ミリ波帯での樹脂基材の誘電率に妥当な仮定を用いることで理論計算はよく一致した。しかし他の寸法・配列の実測値に対し理論計算がまだ得られていないため、引き続き検討する予定である。複数の実測値との良い一致が確認されれば、ミリ波及びより高周波数のテラヘルツ波帯も含めて、透過特性の理論設計が可能になると考えられる。

4. まとめ

メタマテリアルを応用した、ミリ波W-bandの特定の周波数を透過・遮断するフィルタ開発を試みた。最も小さな構造である単位要素として、正方形の二重環の切れ目が互いに反対となっている分割リング共振器：The split ring resonator (SRR)を用い、この単位要素の寸法と配列を変え平面上に等間隔に配列した構造体を作製した。これらのミリ波透過特性を評価した結果、以下のことが分かった。

1. 環の切れ目がすべて同一方向になるように配置した「正配列」の構造体では、縦偏波の入射に対し縦配向と横配向ではミリ波透過特性に異方性が見られた。
2. 単位要素が 4×4 個または 2×2 個の範囲内で、環の切れ目の向きが上下左右の方向に同一頻度でかつ周期的に配列した「循環」と「完全循環」配列のそれぞれの構造体を作製したところ、これらのミリ波透過特性は等方性であった。
3. 2のいずれの構造体でも、単位要素の寸法が 1.75mm において 89GHz 付近を選択的に透過するバンドパスフィルタとなっていた。
4. 寸法が異なる同じ配列のミリ波透過特性を互いに比較したところ、スケーリング則が成立していた。これにより、循環 2.22mm の構造体は、 90GHz 付近のゆるやかなバンドストップフィルタとなることが推測された。
5. ミリ波透過特性は、導体の厚さが $3\sim 35\mu\text{m}$ の範囲で大きな影響を受けなかった。

参考文献

- 1) 日本化学会ホームページ：<https://www.chemistry.or.jp/division-topics/2015/02/post-36.html> (2021.6.22時点)
- 2) J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Vol.47, No.11, NOVEMBER p.2075(1999)
- 3) D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 84, No. 18, p.4184(2000)
- 4) 鳥屋尾博 他, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン No.33 夏号, p.27(2015)

