

メタマテリアルの応用による 面内回転しても等方的な電磁波フィルタ

北海道立総合研究機構

工業試験場	材料技術部	主査	斎藤 隆之（発表）
	産業システム部	主査	宮崎 俊之

2025年9月25日

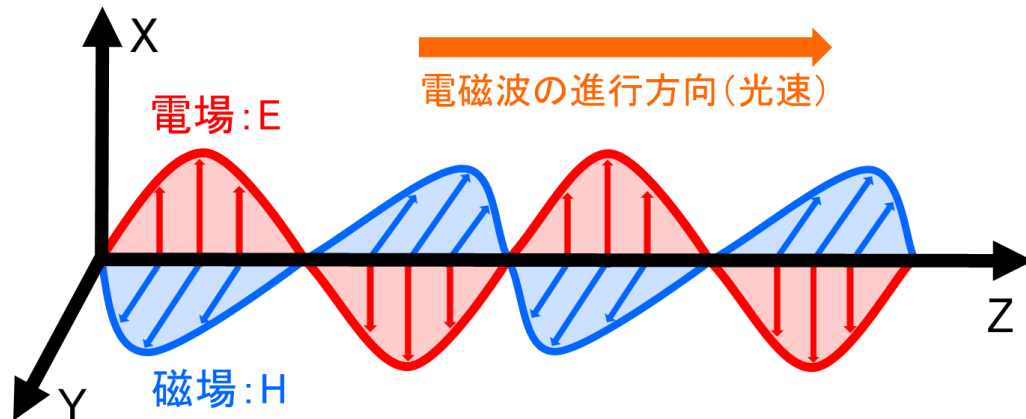
メタマテリアルと電磁波

メタ（より高いor越えた）＋マテリアル（材料）：

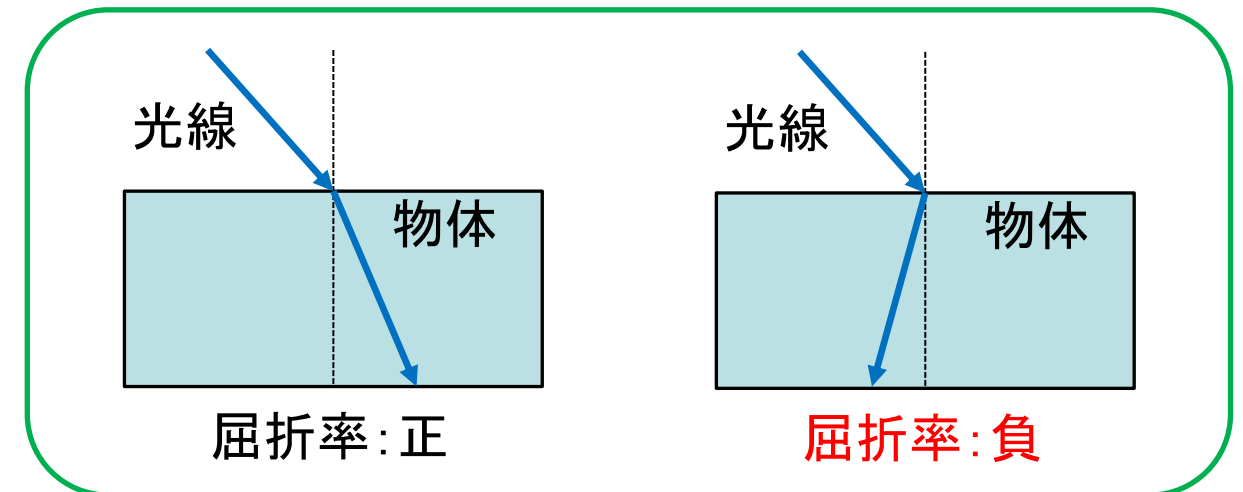
電磁波（光）の波長よりも細かな構造体を利用して、
物質の電磁気学（光）的な特性を人工的に操作した疑似物質（日本化学会ホームページより）

電磁波

直交して振動する電場と磁場が伝わる現象
（電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線…）

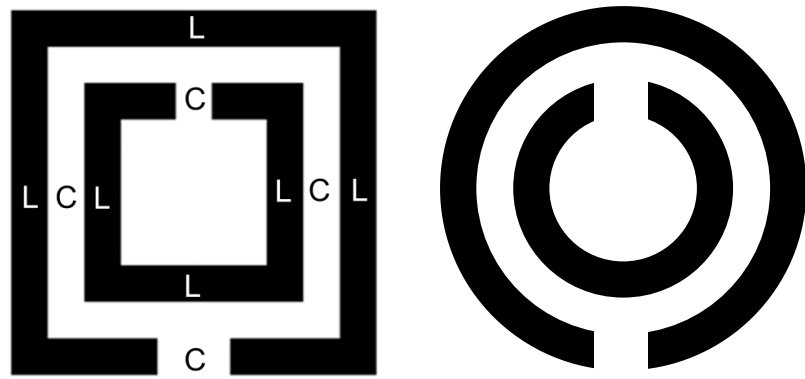


特性の例：理論的に**負の屈折率**が可能



実現されているメタマテリアルや応用製品

○世界初のメタマテリアル(2000年): マイクロ波に対し負の屈折率を持つ構造体



Split Ring Resonator: SRR
(このような形状の金属)
を三次元的に組み合わせて作製

D. R. Smithらにより実現

<https://people.ee.duke.edu/~drsmith/metamaterials.htm>

SRRの共振周波数 f :

コイルのインダクタンス(誘導容量): L

コンデンサのキャパシタンス(静電容量): C

$$f \text{ (Hz)} = 1 / (2 \pi \sqrt{LC})$$

○負の誘電率を応用したWi-Fi無線ルータ(2013年)

負の誘電率の構造により電磁ノイズを抑制したWi-Fi無線ルータがNECから市販化

https://jpn.nec.com/techrep/journal/recommend_year/2013/05.html

従来技術とその課題

電磁波の一種である電波は、現代社会を支え日常を便利にするため様々な領域で用いられている（通信、放送、探査・観測、距離測定、遠隔制御、加熱、分析など）。

その送受信にあたり、電子回路で必要な周波数を選別して利用されるが、その電子部品の追加によりコストを要し、信頼性を低下させている側面があると考えられる。

周波数を選別する電子部品とは：

スマートフォン、その他通信機器、各種レーダシステムの内部で使われているSAW(Surface Acoustic Wave)フィルタやBAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタ

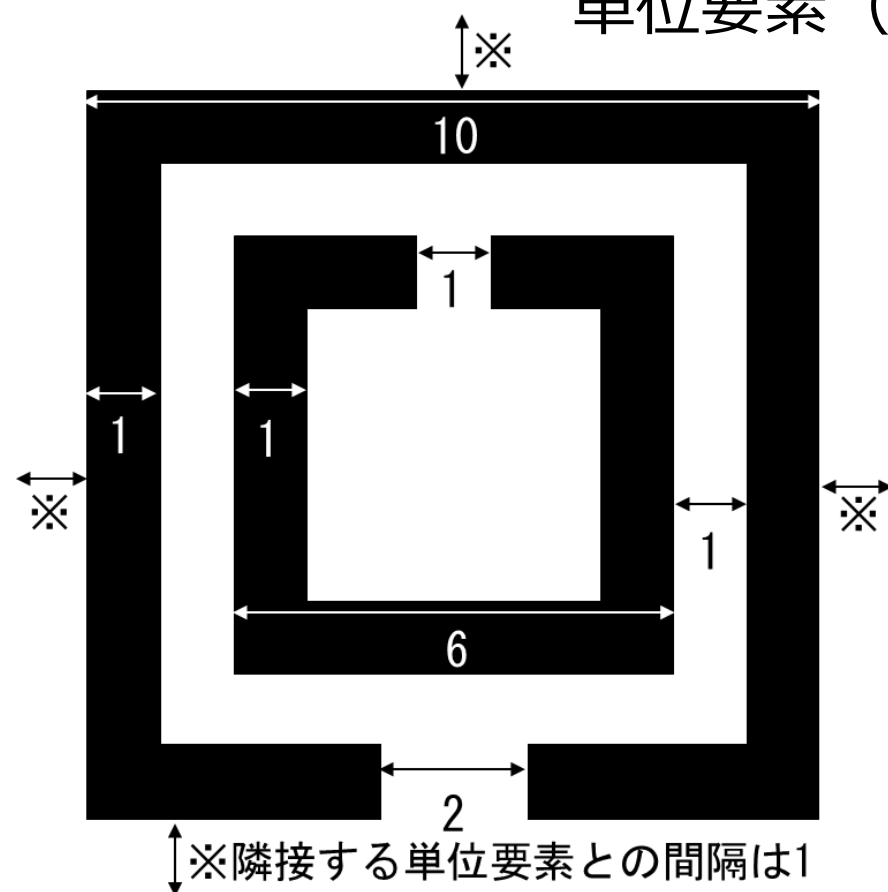
開発の具体的内容(骨子)

- SRR構造を平面上に敷き詰めることで、特定の周波数のみを透過・遮断できるシート状フィルタができると考えられ、まずはミリ波（W-band）をターゲットとした。
- 作製しやすさから正方形のSRRを選択し、この金属構造の単純な平面配列について作製・評価の結果、偏波に対しフィルタの面内回転により特性が変化し異方性のあることが判明。
- これを回避するための配列を考案し、回転しても等方的な電磁波フィルタを開発した。

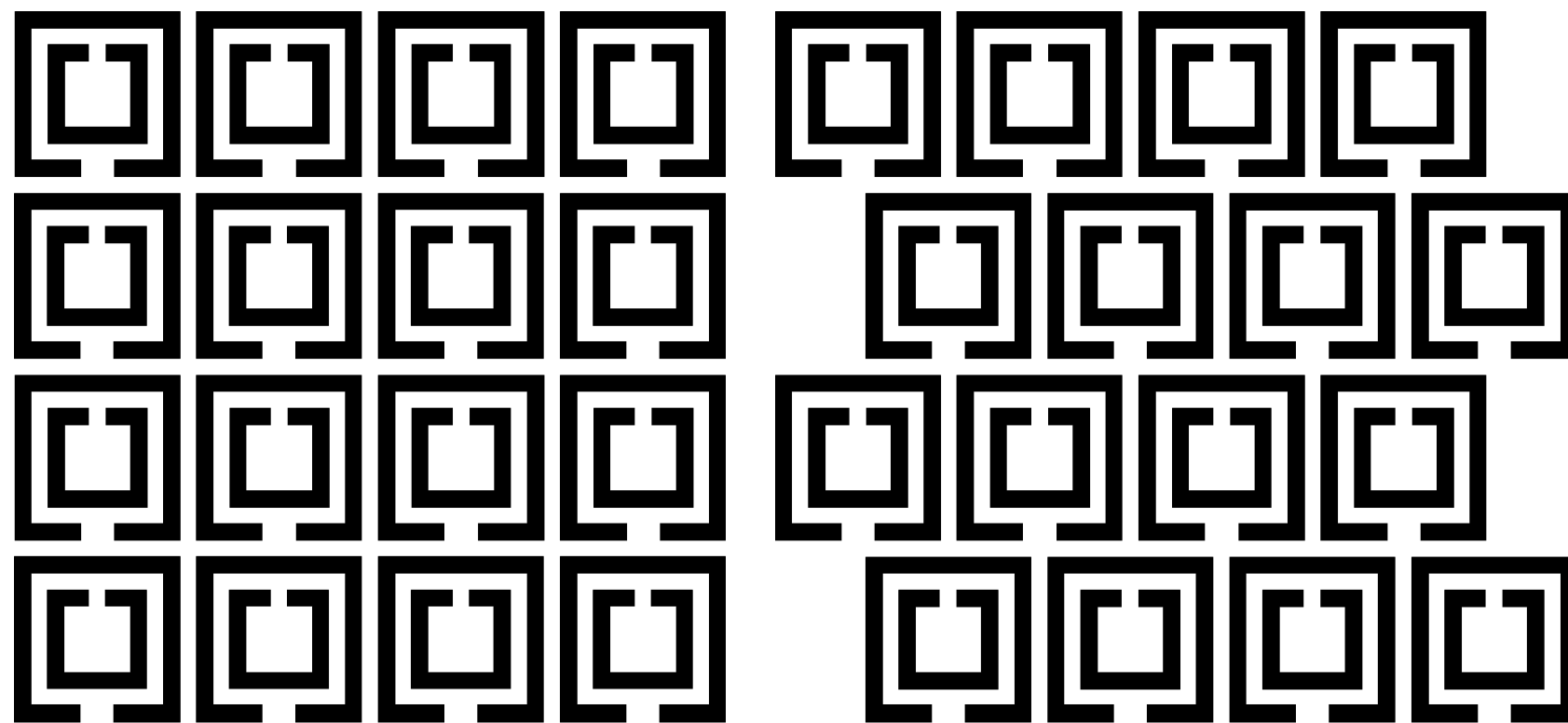
開発の具体的内容①

正方形SRRの金属を単純配列したフィルタ作製と評価 (1)

単位要素（外寸2.0mm）を設定し、単純な2通りの配置を作製



単位要素（メタ原子）
の各部の寸法比率



正配列

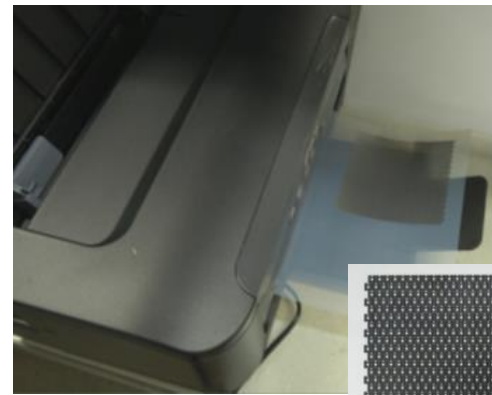
ちどり配列

※実際にはこの配列を平面に多数敷き詰めている

開発の具体的内容②

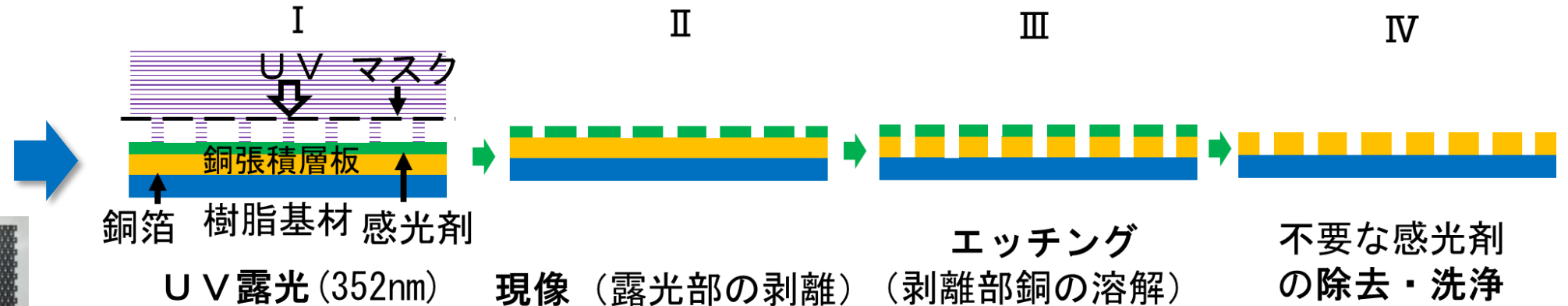
正方形SRRの金属を単純配列したフィルタ作製と評価 (2)

作製：フォトリソ法



マスク作製

正配列とちどりの画像を
PCで作成し、市販のイ
ンクジェットプリンタで
透明樹脂シートへ印刷



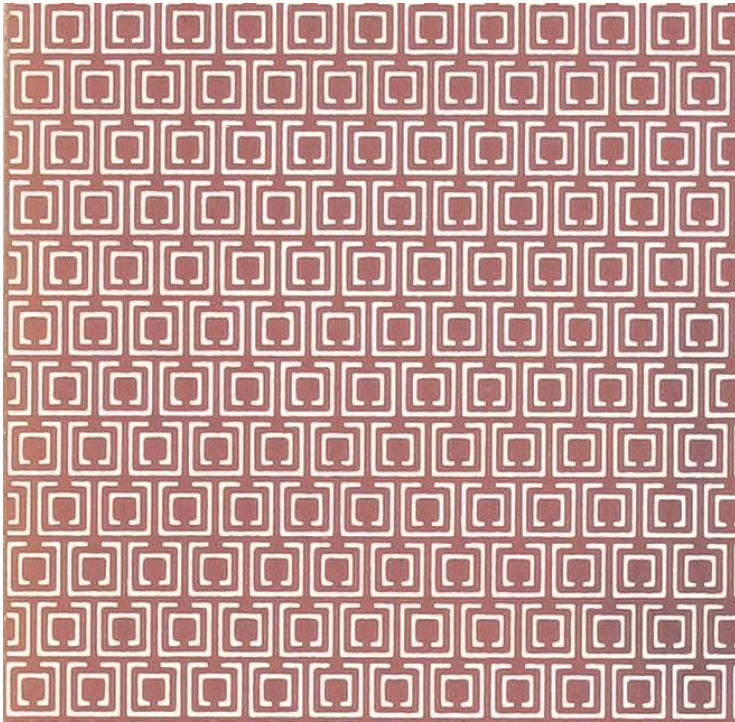
市販のプリント基板の作製用品

銅張積層板：サンハヤト社製 クイックポジ感光基板NZ-G33K
(銅箔：30 μ m、基板：100 μ m厚みポリイミド)
UV露光装置：同社製 BOX-S3000
現像液：同社製 専用現像液
エッチング液：同社製 専用エッチング液

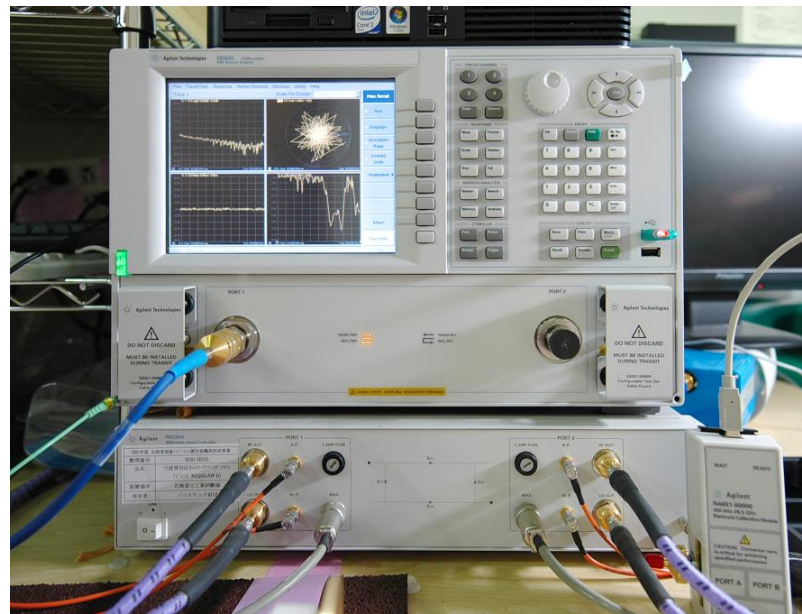
開発の具体的内容③

正方形SRRの金属を単純配列したフィルタ作製と評価 (3)

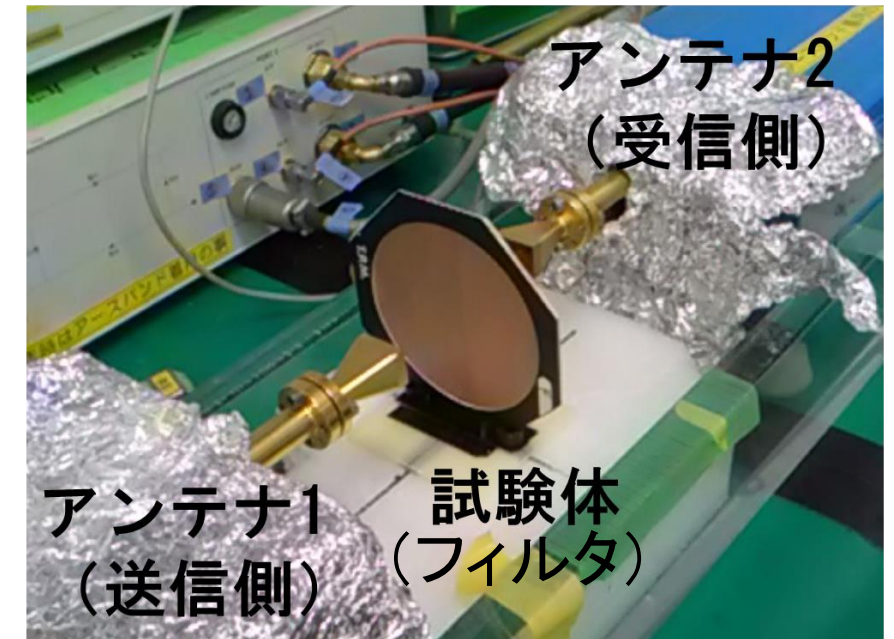
作製したフィルタとミリ波透過性評価方法



フィルタ (ちどり2.0mm)



測定機：高周波ネット
ワークアナライザ
キーサイト・テクノロジス製E362C

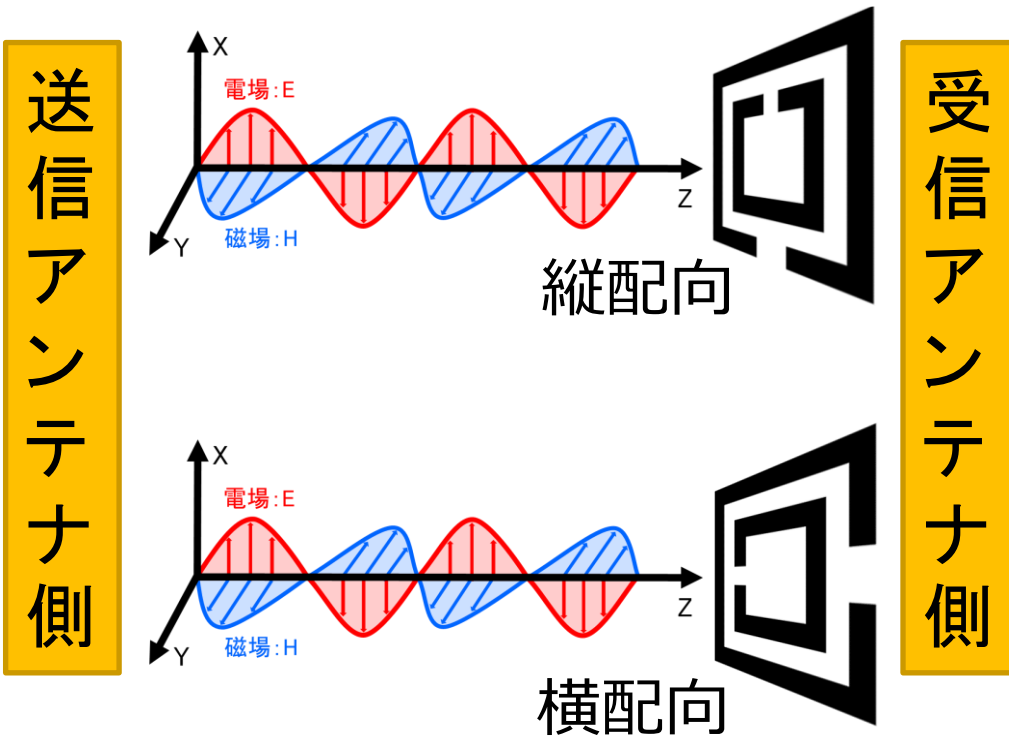


測定方法
周波数範囲：75～110GHz (W-band)
アンテナホーン間隔：60mm
送信波：縦偏波 (電場が垂直に振動)

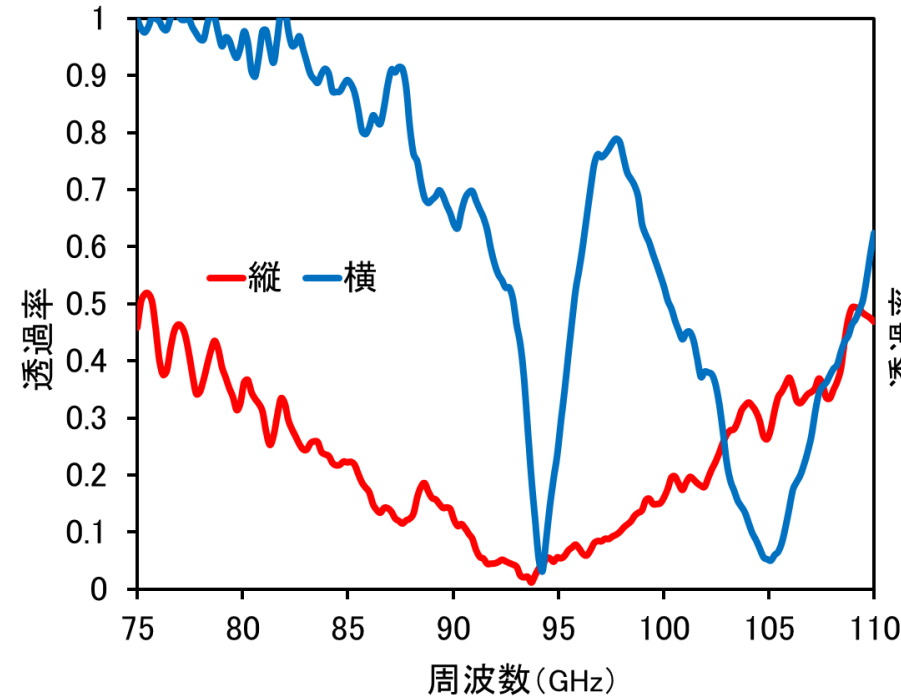
開発の具体的内容④

正方形SRRの金属を単純配列したフィルタ作製と評価 (4)

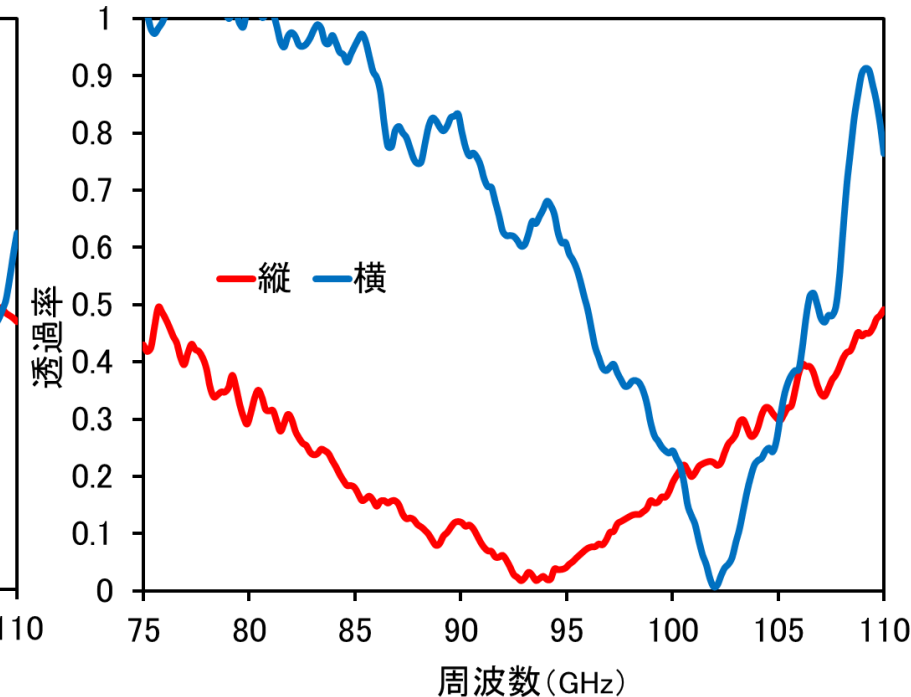
ミリ波透過性評価方法とその結果



測定での単位要素の向き



正配列2.0mmの透過性

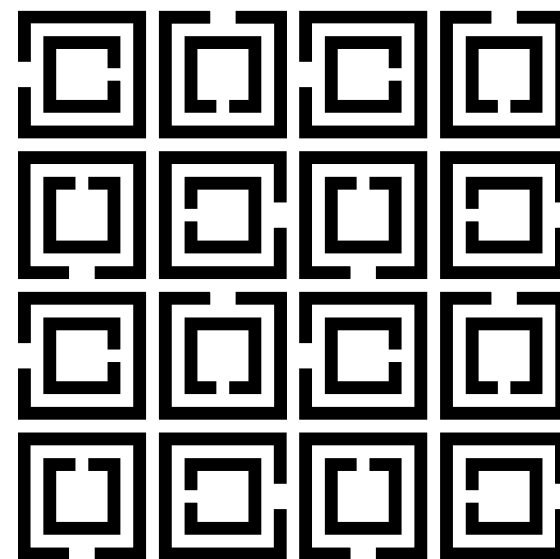
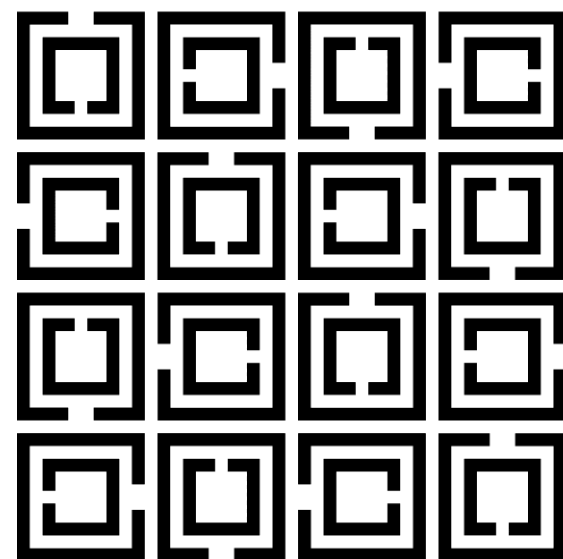
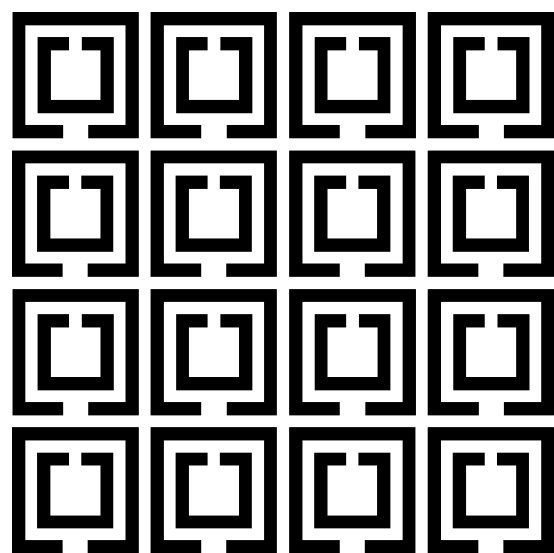


ちどり2.0mmの透過率

いずれも縦と横で特性が異なり、偏波に対し面内回転すると異方性がある

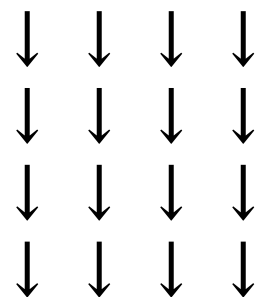
開発の具体的内容⑤

面内回転しても等方的なフィルタの作製と評価 (1)

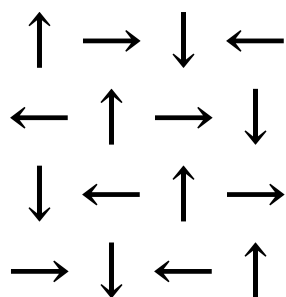


開口位置が上下
左右の4方向に
、等方的な頻度
で出現すること
で、異方性が無
くなると予測し
2種の配列を考案

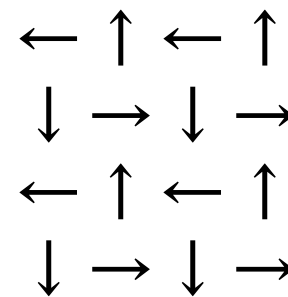
矢印表現
SRRの外側
の開口位置
を矢印によ
り表現



正配列



循環配列



完全循環配列

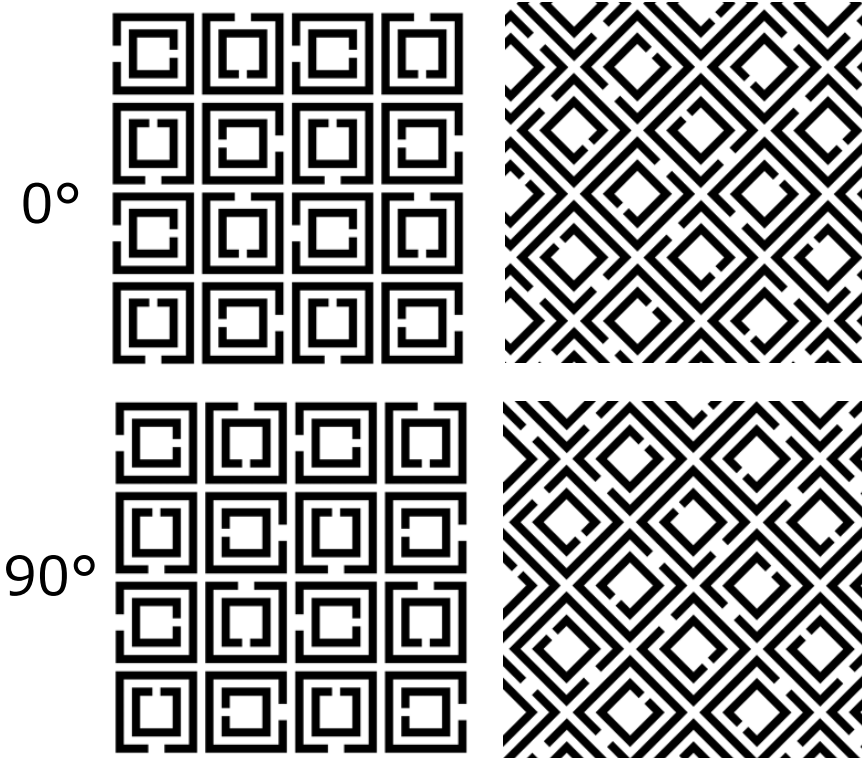
開発の具体的内容⑥

面内回転しても等方的なフィルタの作製と評価 (2)

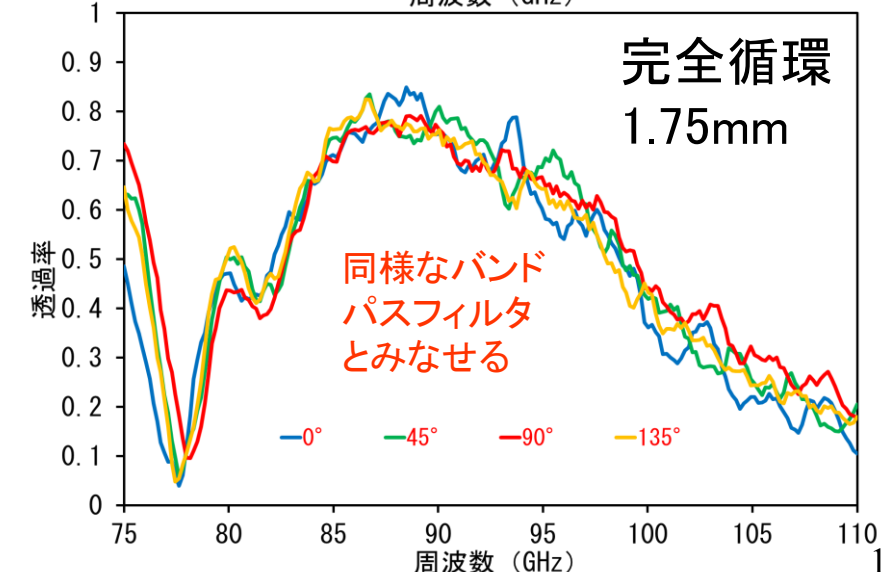
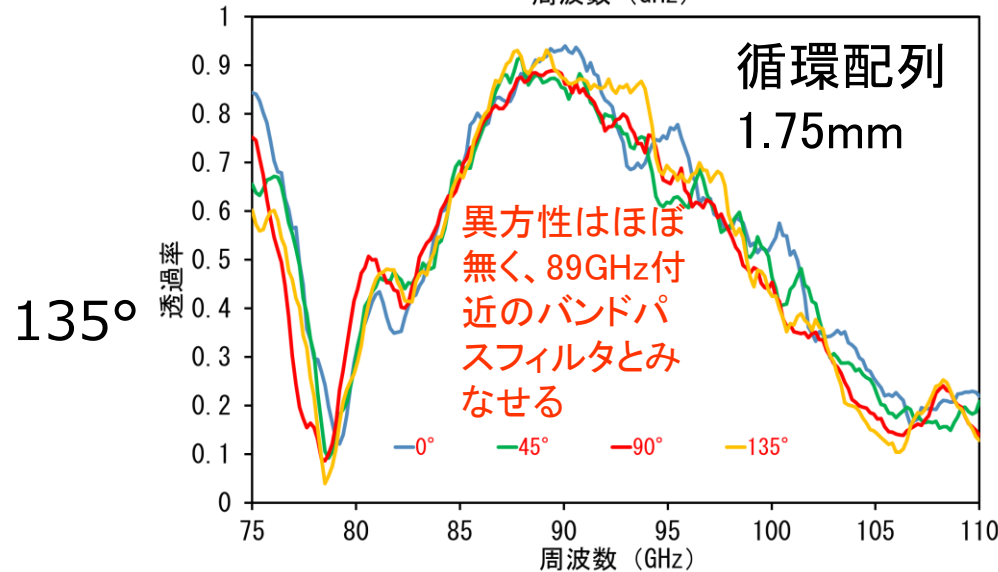
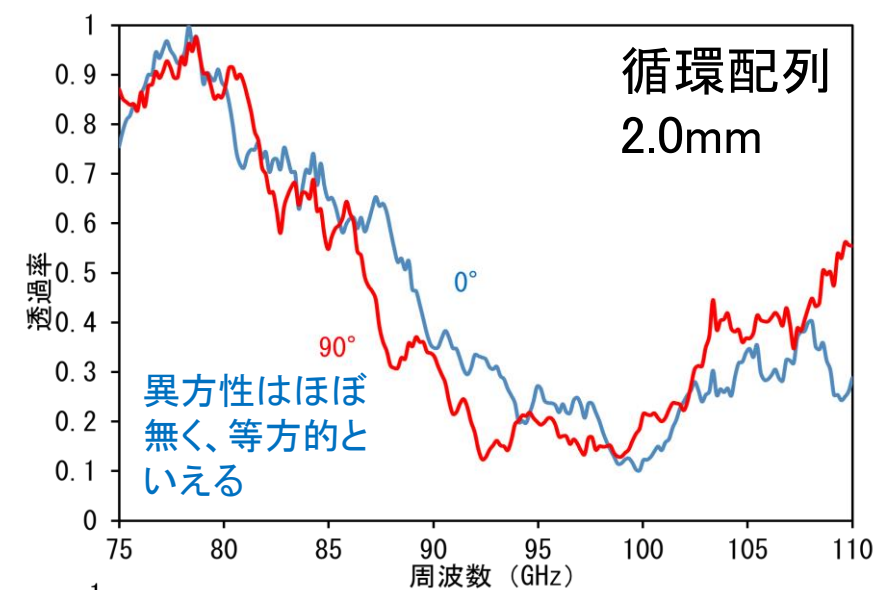
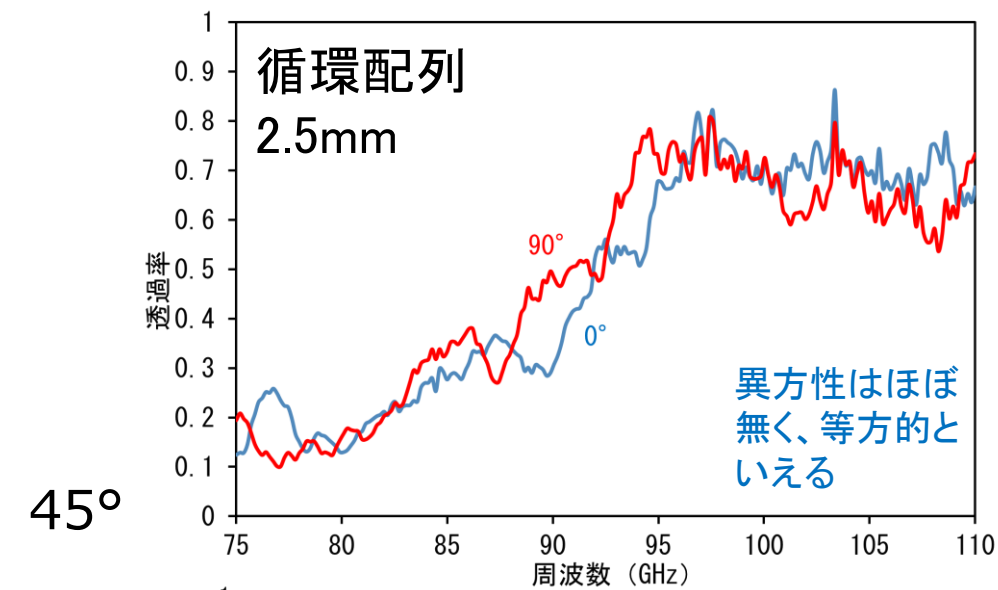
循環配列と完全循環の
1.75~2.5mmを作製



ミリ波透過性測定



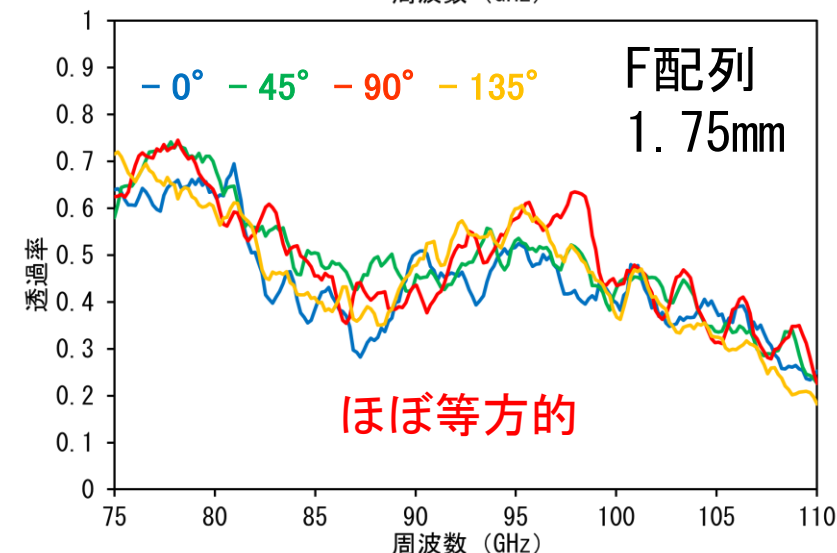
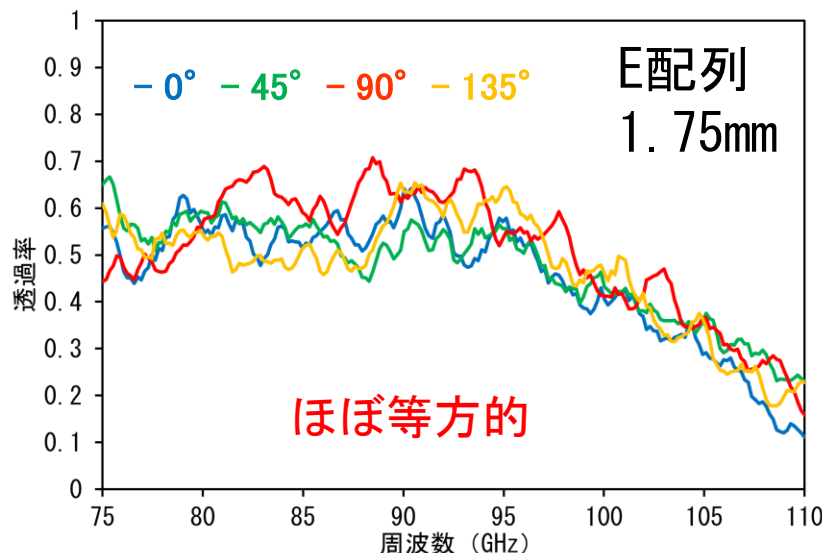
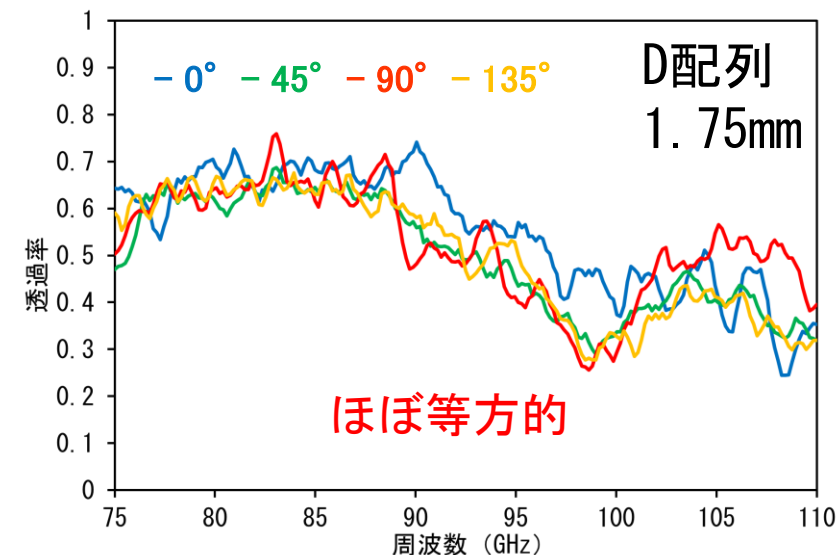
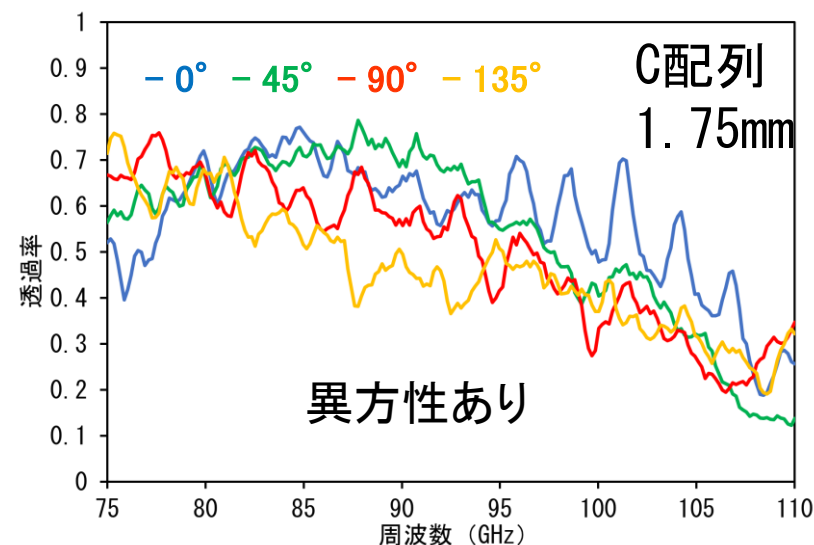
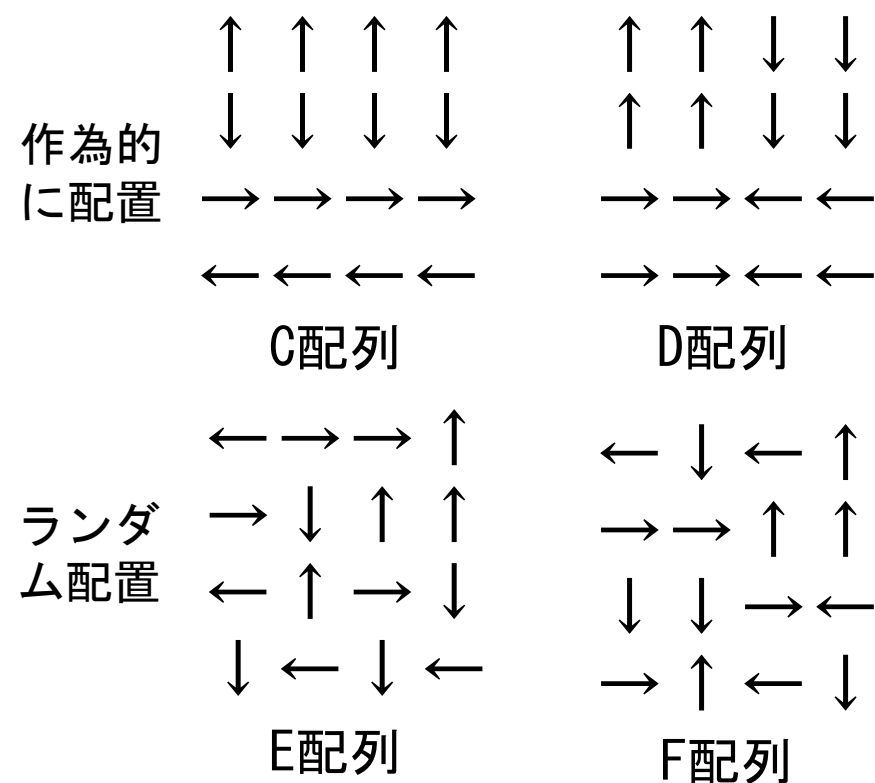
フィルタ面内で回転



開発の具体的内容⑦

面内回転しても等方的なフィルタの作製と評価 (3)

さらに狭い領域で、開口部の向きが等しい頻度で出現すれば他の配列でも可能ではと予測



これらも等方的フィルタとして特許の請求項に含む(表現はやや抽象的)

開発の具体的内容⑧

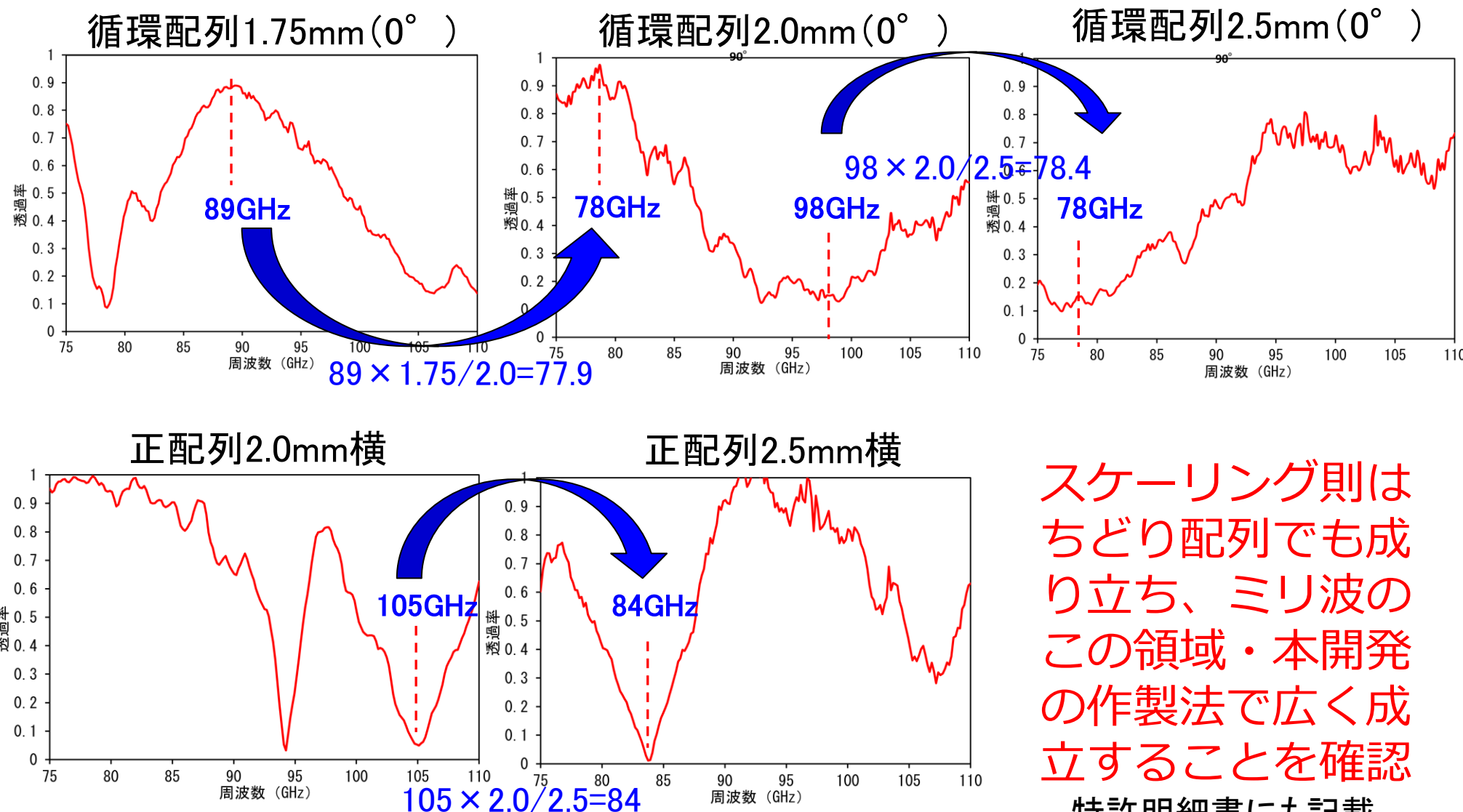
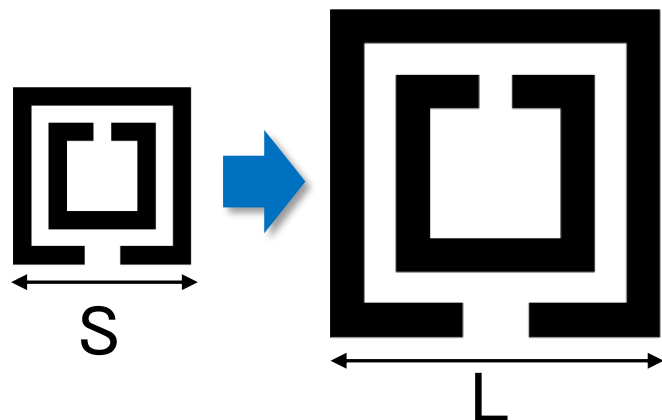
スケーリング則の確認

スケーリング則：

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

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

に変換される。



スケーリング則は
ちどり配列でも成
り立ち、ミリ波の
この領域・本開発
の作製法で広く成
立することを確認

特許明細書にも記載

開発の具体的内容⑨

作製方法や導体厚みの特性への影響

別法でフィルタを作製

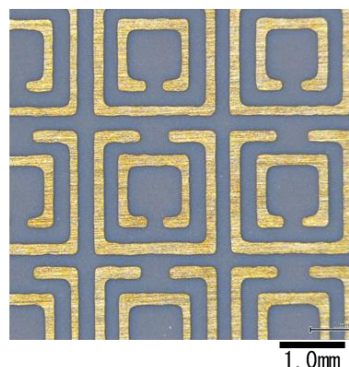
PETフィルム(50 μ m)に
銀ナノインクで印刷



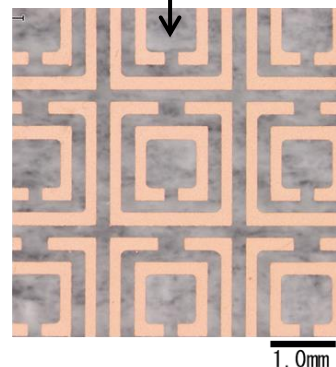
乾燥 (加熱)



無電電解銅めっき(3 μ m)

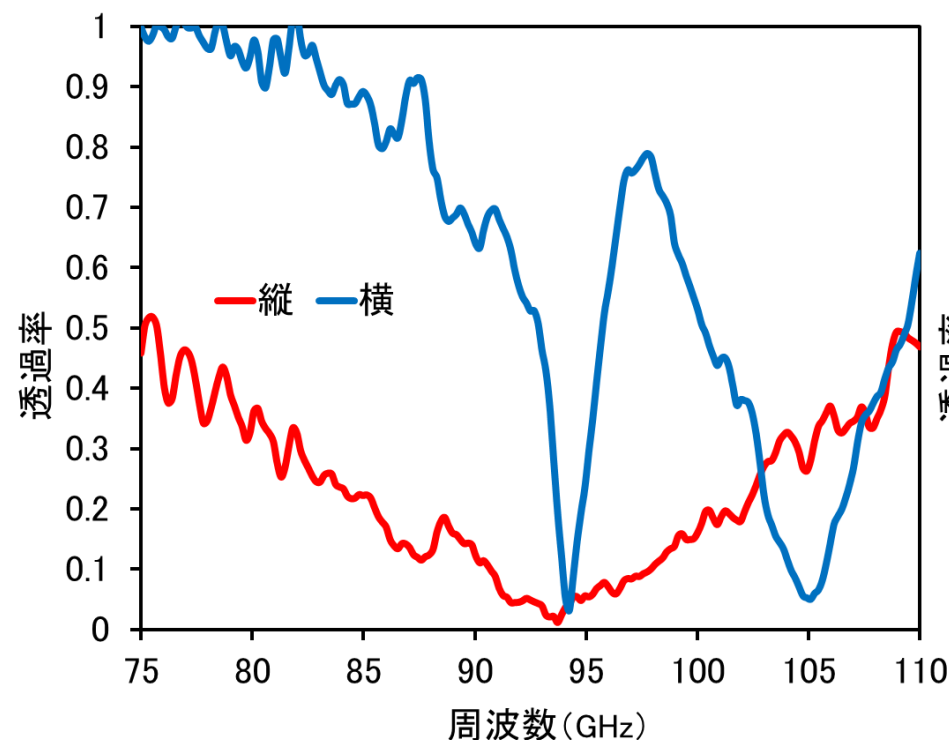


(a) フォトリソ法

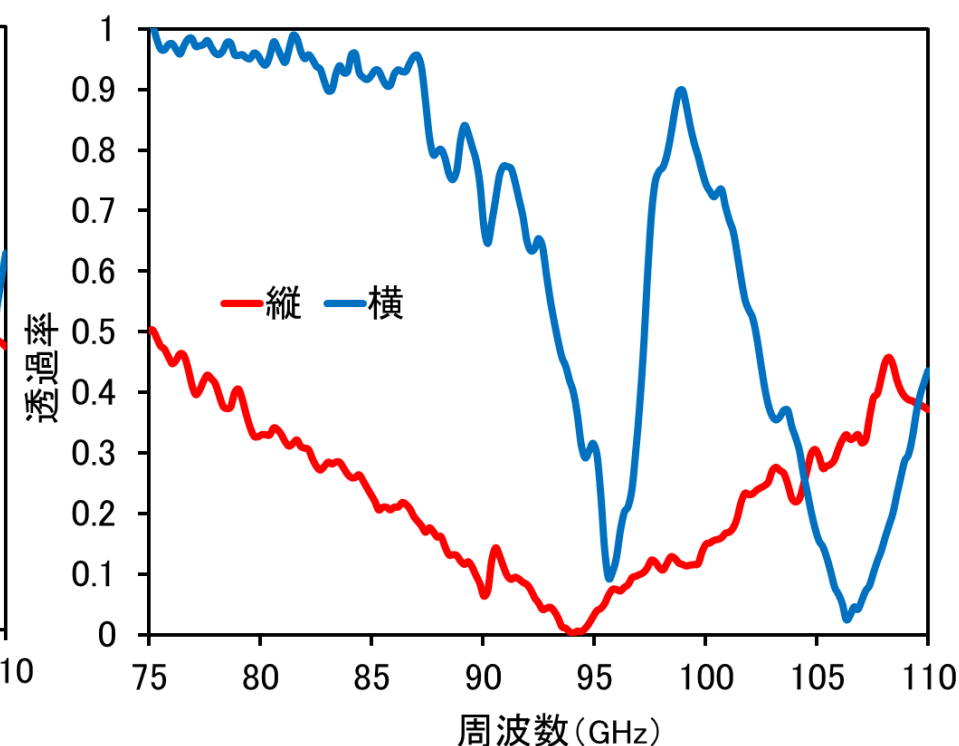


(b) 銀ナノインク-めっき法

正配列2.0mmの二作製法での外観



フォトリソ法の正配列の特性



銀ナノインク-めっき法の正配列の特性

フォトリソ法での銅の膜厚は50 μ mで線幅は設計よりやや細く、銀ナノインク-めっき法での銅の膜厚は3 μ mで線幅はほぼ設計どおりであったが、ほぼ同じ特性だった。

まとめと従来技術に対する優位性

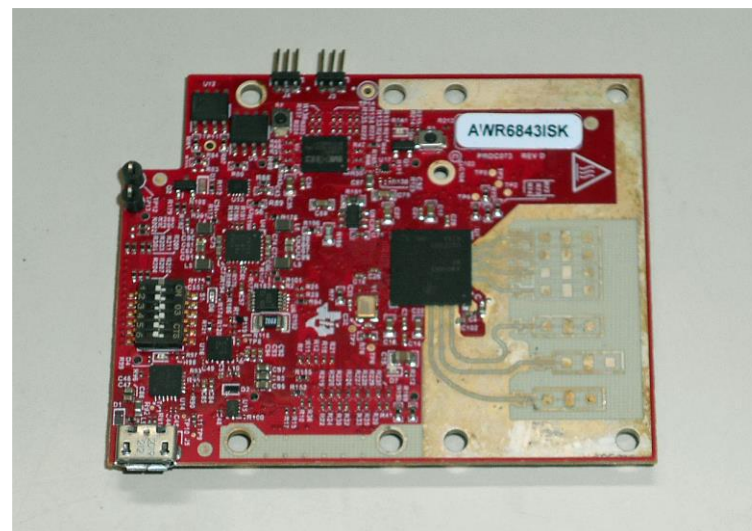
- 外寸2mm程度のSRRを平面上に敷き詰めることで、W-band帯での周波数を選別するフィルタが得られた
- 考案した循環または完全循環配列を用い、フィルタを面内で回転しても偏波への特性が変化しない等方的フィルタを開発した
- ミリ波W-band帯では、これらのフィルタはスケーリング則が成り立つことも確認された。これは周波数の調整に利用できる
- **このフィルタを電磁波の発生・受信アンテナの外側に配置することで、従来必要だった周波数を選別する電子部品が簡略化でき、コスト低減や信頼性向上が期待される**

想定される用途

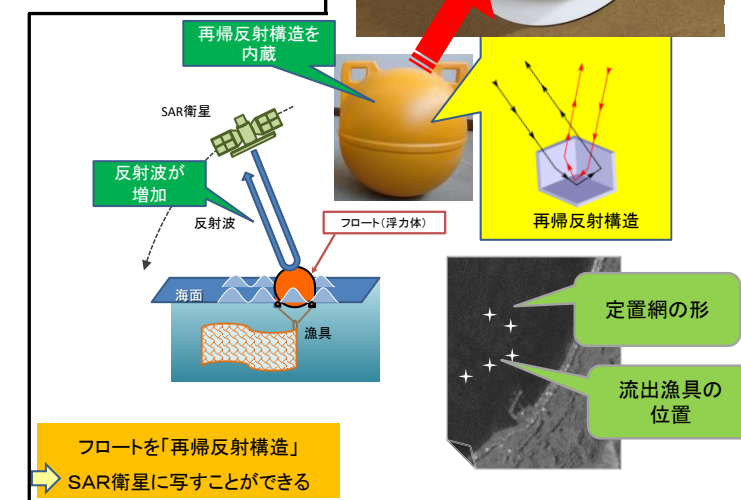
- ・ レドームと一体化し、電子回路のコスト低減や信頼性の向上が期待される（マイクロ波帯は未検証）①②
- ・ 再帰反射体の機能付与となる可能性③



①レーダやアンテナのレドーム（外殻部）
左：気象庁ホームページより（下） 右：北海道開発局（札幌）
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>
一部トリミング



②ミリ波レーダレドーム
（画像は市販本体のみ）

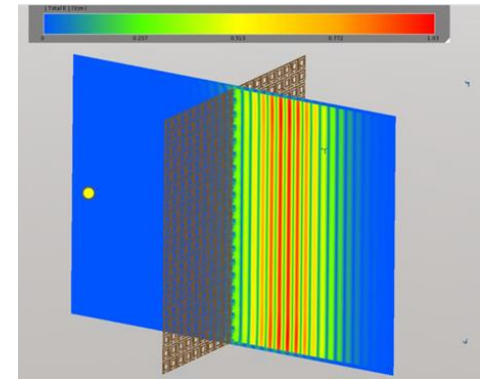
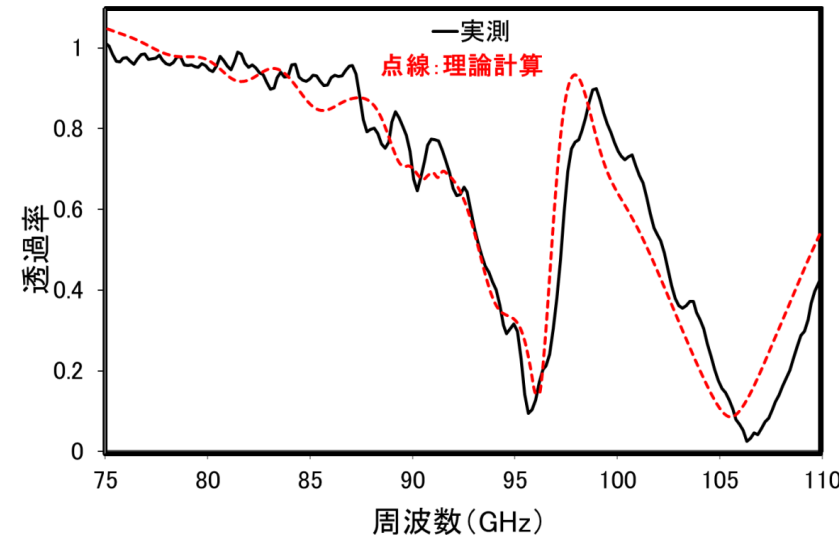


③SAR衛星からの判別性を有する
再帰反射体（海洋フロート）
SAR衛星から検出できるフロートにそれぞれ異なる
フィルタを用い、各フロートの判別ができる可能性

実用化に向けた課題

- 透過特性の理論計算（設計）技術の確立

FDTD(Finite Difference Time Domain)法で正配列2.0mmについてのみ実測に近い理論計算がされているが、他の配列・寸法では一致を見ておらず計算（設計）技術が未確立⇒確立すれば特性予測が可能になる



正配列2.0mm縦配向のFDTD計算結果

- 未だ可能性のある用途の提案段階で、実現性の高い用途開発が必須
- 波長のより長いマイクロ波および短いテラヘルツ帯でも原理的に適用可能だが、実証が必要

社会実装のための企業への期待

- 構造作製技術については概ね確立できた。未解決の計算技術については、適切な予算規模と実施期間を設定した共同研究の実施により確立できると考えている。
- ご関心のある企業様との共同研究を希望
- 加えて、用途は様々な可能性が考えられるため、皆様の多角的な視点からも用途をご提案頂きたい

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 電磁波フィルタ
- 出願番号 : 特願2021-152401
- 特許番号 : 特許7687674
- 出願人 : 北海道立総合研究機構
- 発明者 : 斎藤隆之、宮崎俊之、本間稔規
他 1名 (現在、他機関に所属)

お問い合わせ先

北海道立総合研究機構

本部 研究推進部 知的財産グループ

T E L 0 1 1 - 7 4 7 - 2 8 0 6

e-mail : h q - i p @ h r o . o r . j p