

【研究論文】

【令和4～5年度 県単独試験研究】

## メタサーフェスデバイスの研究

小松 迅人、佐藤 裕高  
機械電子情報技術部

無線通信の利用は、スマートフォン等の通信機器の普及に伴い、通話だけでなく情報検索、娯楽、決済手段として生活様式にまで拡大されQOL (Quality of life) の向上に貢献している。一方、急速なスマートフォンなどの携帯端末の普及は、データ量の世界的な利用増加、情報のボーダレス化も重なり、4Gの規格の周波数帯域の利用のままでは、データ通信に係る速度遅延による質の低下が考えられる。この課題には、高速データ通信化および大容量化技術が欠かせなく、5Gに見られる新たな周波数帯の活用としてミリ波の研究および応用展開が急がれている<sup>1)</sup>。

しかし、5G等に使用される高い周波数帯域の電波は、到達距離が数十から数百メートル<sup>2)</sup>などと短いことと、指向性が増すことから建物などの陰の部分に電波の回り込みが出来ない特有の課題がある。これらに対応には、目的の角度に反射する機能を持ったアンテナをある間隔ごとに必要であると言われており、この機能性を持たせるには、メタサーフェスを活用したアンテナが有効との研究報告がされている<sup>3), 4), 5)</sup>。また、応用展開には、メタサーフェスの機能を発現するためには何が寄与しているかなどの関係性の把握が必要である。本研究では、メタサーフェスの機能を発現するためのディメンジョンと反射角度の関係性を明らかにすることを目的とする。

今年度は、各論文からグラジエントメタサーフェスをモチーフとして、電磁界シミュレーション (HFSS) を用いて機能が発現するパターンを推測し、その結果から機能評価用サンプルを作製し、フリースペース法によりサンプルに垂直に電波を照射し反射された角度を計測した結果、目的どおりの機能が確認できたので報告する。

キーワード: 5G、メタサーフェス、電磁界シミュレーション、光反応メタロイド材料、光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム

## 1 緒言

近年、スマートフォン等のモバイル端末は、携帯電話の通話機能に加え手のひらでインターネットに繋がる情報収集・発信、娯楽や決済の手段となり利用増加の傾向が見られる。ある通信会社のデータでは、2010年数%台であった普及比率が2022年には90%台になるなどの大幅な普及が報告されている<sup>1)</sup>。

携帯端末による無線通信の利用は、生活様式に欠かせない技術のひとつとなってきており、個々の生活の向上に貢献しているが、急速なスマートフォンなどの無線携帯端末の普及は、データ量の世界的な利用増加、情報のボーダレス化も重なり、4Gの規格の周波数帯域のままでは、データ通信速度遅延による質の低下が考えられるまでになってきている。

この課題には、高速データ通信化および大容量化技術が欠かせなく、5Gに見られる新たな周波数帯の活用

としてミリ波の研究および応用展開が急がれている。

5G等に使用される高い周波数帯域の電波は、波長が短いことや指向性が高いことなどの特徴があるため、長い距離を伝播させるにはどうするか、建物などの陰になる部分への電波の回り込みをどう回避するかなどの課題がある。これらの課題に対応するには、複数の機能性を持ったアンテナが必要と考えられており、また、機能性を持たせるには、メタサーフェス(図1)を活用したアンテナが有効との研究報告がされている<sup>3), 4), 5)</sup>。

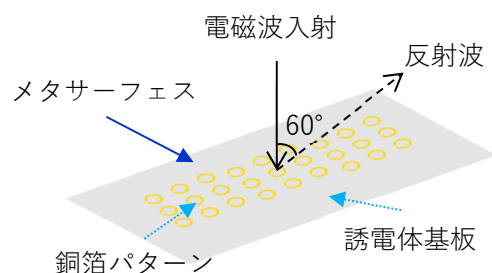


図1 メタサーフェスの反射イメージ

本研究では、高い周波数帯域の電波に対して、設計者が意図する反射方向の制御などの機能性が付与できるとされているメタサーフェスにおいて、機能が発現するためのディメンジョンと反射角度の関係性を明らかにすることを目的とする。

今年度は、各論文からグラジエントメタサーフェスをモチーフとして、HFSS(電磁界解析)シミュレーションを用いて機能が発現するパターンを推測し、その結果から機能評価用サンプルを作製、フリースペース法によりサンプルに垂直に電波を照射し反射された角度を計測した結果、目的どおりの機能が確認できたので報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 メタサーフェス論文検索から計測までの一連の検証について

メタサーフェスとは、自然界の現象には存在しない反射の特性を備えた人工表面のことである。微細な形状パターンにより、通常の物質とは異なる反射・屈折を発現させることが出来る。計算で割り出した目的に合う形状パターンは、目的通りの電波の反射や屈折が可能となる。メタサーフェスは、ジオメトリとディメンジョンの緻密な設計が必要である。そこで、メタサーフェスとなる条件を、報告されている研究論文から把握し、目的の屈折を発現させる形状の設計研究を行った。

今年度は、研究論文<sup>6)-10)</sup>からモチーフ形状を割り出し、電磁界シミュレーション、パターン作製、反射計測までの一連の検証を、下記の手順で行った。

- ① メタサーフェスに関する論文検索
- ② 論文からモチーフ形状の割り出し・データ作成
- ③ 電磁界シミュレーション
- ④ アンテナパターンサンプル作製
- ⑤ サンプルの反射特性評価

### 2.2 モチーフ形状の決定と電磁界シミュレーションについて

メタサーフェスの形状は、Split Ring Resonance(SRR)など様々あるが、任意の角度に形状で反射制御が可能とする報告があるグラジエントメタサーフェスをモチーフ形状に決め論文を元に検証を進めた。

電磁界シミュレーションは、Ansys HFSS(Ver 13.0)を使用した。

28 GHzにおける60度反射のグラジエントメタサーフェスのユニットセルを論文<sup>7)</sup>に基づき設計した。

ユニットセル(図2)の周期は、 $D_x = \lambda_0 / \sin\theta_R$  および  $D_y = \lambda_0 / 2$  ( $\lambda_0 = 10.7\text{mm}$ ) から  $D_x = 12.35\text{ mm}$ 、 $D_y = 5.35\text{ mm}$ とした。

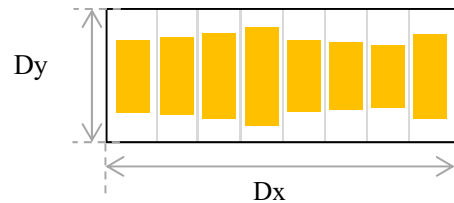


図2 ユニットセルのイメージ

また、ユニットセル内のパッチエレメントの数は8とした(図3)。

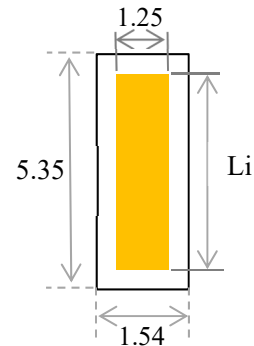


図3 パッチエレメントのイメージ

シミュレーションで用いたPETの材料パラメータは、比誘電率3.2、誘電正接 $\tan\delta = 2.0 \times 10^{-2}$ とし、基材(PET)の厚みを188  $\mu\text{m}$ 、パッチおよびグランドプレーンの厚みをそれぞれ100 nmとした。

まず、自由空間インピーダンス( $\eta_0$ )、i番目のパッチエレメントの中心座標を( $x_i$ )として、局所位相が下記のRの位相と一致させるようにLiの値を決めた。

$$R(x_i) = (Z_s(x_i) - \eta_0) / (Z_s(x_i) + \eta_0)$$

ここで、複素表面インピーダンス( $Z_s$ )は次式で求まる。

$$Z_s(x) = \frac{\eta_0}{\sqrt{\cos 60^\circ}} \frac{\sqrt{\cos 60^\circ} + \exp(-j k_0 x_i \sin 60^\circ)}{1 - \sqrt{\cos 60^\circ} \exp(-j k_0 x_i \sin 60^\circ)}$$

$k_0$  は自由空間波長(m)

次に、上記の局所反射位相設計で決められたLiの値を初期値として準Newton法に基づく最適化を行い、メタサーフェス反射板の構造最適化を実施した。

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 メタサーフェスの電磁界シミュレーションについて

パッチの長さ(Li)とその長さでの位相の関係を、図3のパッチモデルを作成し、Wは固定した条件で、パッチの長さを0.1から5.35 mmまでスイープさせシミュレーションにより求めた(図4)。

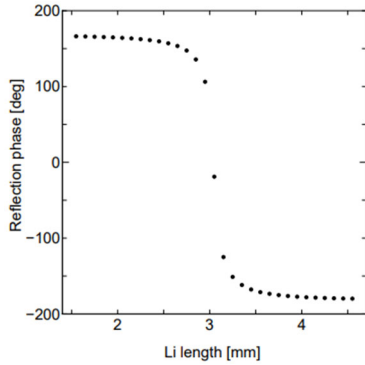


図4 シミュレーションによる Li 長さと位相の関係

この位相とパッチ長さの関係を求めたシミュレーション結果から、それぞれの長さや位置が決定されたパッチをセルに配置し、28 GHzに対応する60度反射のグラディエントメタサーフェスモデルを作成した(図5)。

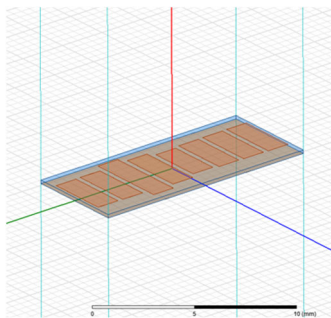


図5 グラディエントメタサーフェスモデル

基材の材質はポリエチレンテレフタレート(PET)、パッチ部およびグランドプレーン部の材質は銅とし、ユニットセルを5×5の縦横配置にして、28 GHzの周波数の電波をメタサーフェス面に垂直に入射させた際の、面から反射する電波の位相を求めるシミュレーションを行った。

ユニットセルの長手方向面を-90~90度の範囲で10度ごとの位相でのアンテナ特性(ゲイン値)のシミュレーションを行った(図6)。

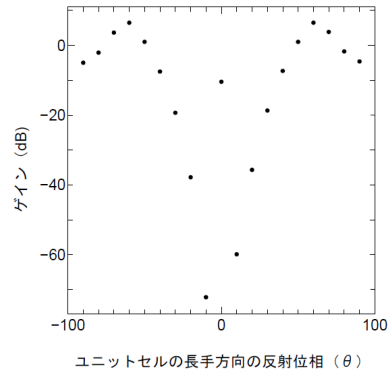


図6 ユニットセルの長手方向に関する位相とアンテナのゲインのシミュレーション結果

また、ユニットセルを5×5の縦横配置のアンテナの遠方界の電場の特徴を求めるシミュレーションを行った。

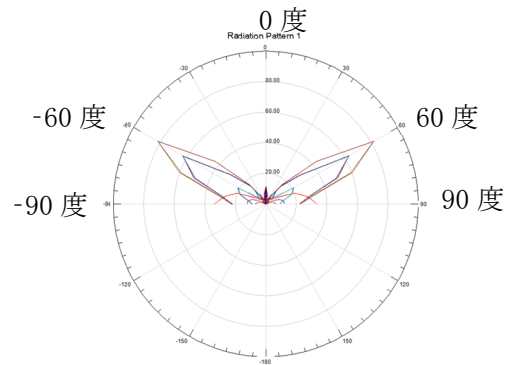


図7 ユニットセル長手方向の遠方界シミュレーション結果

28 GHzの周波数を垂直方向(0度)から入射させた際に、電場がサーフェス面から60度にピークとなる特徴を持ったシミュレーション結果であった(図7)。

ところで、位相と長手方向の配置距離(Dx)の関係性を把握するためシミュレーションによる検証を行った。

28 GHzで45度反射の機能を持つDx'を求め28 GHzで60度反射を発現するDxの間隔でセルを配置して、どちらの傾向が強いのかを検証した。

具体的には、短手方向は、 $\lambda/2$ の関係式からDyは5.35 mmと一定とし、45度の反射を発現する長手方向の長さ(Dx'=15.12 mm)を持ったセルを、HFSSのコマンド「Antenna Array Setup」の「Distance Between Cells のIn U Direction」を用いて、60度反射を発現するセルの距離での配置(Dx=12.35 mm)にして、ユニットセルを5×5の縦横配置したアンテナの遠方界の電場の特徴を

求めるためシミュレーションを行った(図8)。

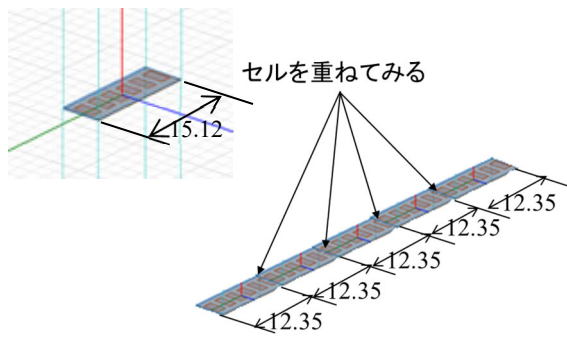


図8 45度反射用のユニットセルの配置間隔を60度反射のセル長の間隔に配置したイメージ

45度反射のパッチ配置でのユニットセルの配置間隔を、60度反射のセル長の間隔に配置すると、電場がサーフェス面から60度にピークとなる特徴を持ったシミュレーション結果であった(図9)。

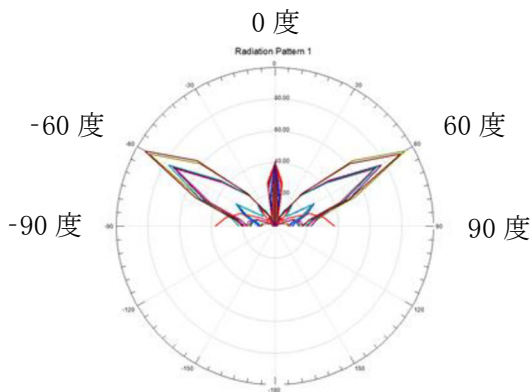


図9 45度反射用のユニットセルの配置間隔を60度反射のセル長の配置間隔にした場合の遠方界シミュレーション結果

このことにより、パッチ寸法やパターンの違いがあっても、条件を満たせばスネルの法則( $Dx = \lambda_0 / \sin\theta_R$ )が有効と推測できた。

### 3.2 アンテナパターンサンプル作製について

評価用サンプルには、厚さ188  $\mu\text{m}$ のPET<sup>(11)</sup>(東レ株式会社製)を基材に用いて、パッチ部およびグランドプレーン部には光反応メタロイド材料<sup>(12)</sup>(株式会社イオックス社製)を塗布したシートを使用した。光反応メタロイドは、UV照射された部分のメッキ特性が失活する材料である。

パターン露光には、フィルムマスクと露光ユニット

(ESKO社製 XPS CRYSTAL5080)の高精度な露光機を使用した。

パターン露光後にパッチの厚みを1  $\mu\text{m}$ になるよう無電解メッキを行い評価用28 GHz60度反射メタサーフェスサンプルの作製を行った(図10)。

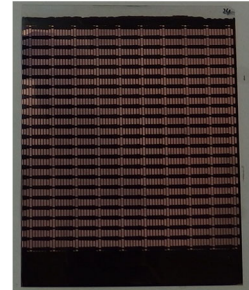


図10 評価用28GHz60度反射メタサーフェスサンプル例

### 3.3 サンプル反射測定について

測定には、京都府中小企業技術センター<sup>(13)</sup>保有の光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システムを使用した(図11)。評価サンプルを中心に配置し、左側は電波を入射するアンテナ、右側は反射波を受信するアンテナ、入射波から角度60度に受信アンテナを設置し計測を行った。



図11 光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム

作製した4枚の28 GHz 60度反射メタサーフェスを評価した。サンプルごとのばらつきは見られるが27.5 GHz付近での反射特性が得られた(図12)。

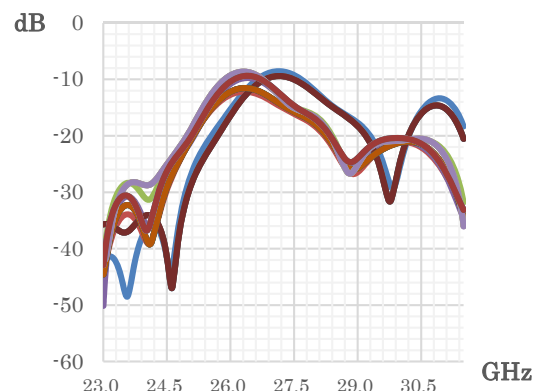


図12 4サンプルを測定した反射特性のグラフ



メタサーフェス面を90度として受信側のアンテナの角度のみを5度ずつ45度まで変化をさせて、角度による反射強度を測定した(図13)。

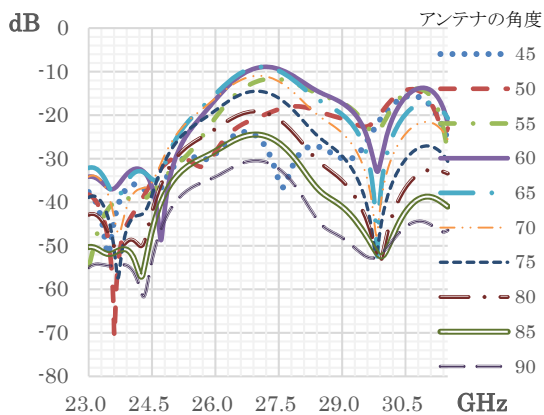


図 13 受信側アンテナの角度を変更した際の反射特性のグラフ

受信側のアンテナが60度の時にピークが見られ反射の特性が確認できた。

表 1 周波数から計算される波長およびセルの長さ

周波数 (GHz)	波長(mm)	60度反射のセルの長さDx(mm)
26	11.53	13.27
26.5	11.312	13.04
27	11.103	12.81
27.5	10.901	12.58
28	10.706	12.35

ところで、反射特性のグラフ(図13)でそれぞれのピークが、28 GHzから下方の周波数帯にシフトしている。また、0.5 GHzごとに200  $\mu\text{m}$ の寸法差で影響が出ると推測される(表1)。パターン露光で200  $\mu\text{m}$ の寸法差が発生すると考えられたが、表面粗さ・形状測定機(テラーホブソン社製 フォームタリサーフPGI1250A)を用いて、27.5 GHz付近にピークが出現したサンプルを計測した結果では、パッチの位置および配置で200  $\mu\text{m}$ の寸法差は見られなかった。

#### 4 結言

本年度は、下記のとおり、論文からモチーフとするメタサーフェスの形状を割り出し、シミュレーションによる検証、メタサーフェス作製、測定までの一連の流れの検証を行った。

- (1) 研究論文からモチーフ形状の割り出し
- (2) 電磁界シミュレーション
- (3) パターン作製
- (4) 反射計測

結果、140GHzの帯域で任意の反射角度を発現するメタサーフェス形状を元に、スネルの法則や論文に掲載されている式からHFSSを活用したメタサーフェスモデルのディメンションの決定、シミュレーションによる事前の機能検証が可能となった。

また、光反応メタロイドを用いたサンプル作製とマイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システムでの測定で、実際のメタサーフェスの機能とシミュレーションの結果が同等となる結果が得られた。

今後は、形状の測定方法やシミュレーションに使用する各パラメータ含めシミュレーションと実測値の精度を高める手法の検討を行っていく。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、メタサーフェスの設計、シミュレーション技術に関しては、産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター センサ基盤技術研究チーム 日下研究チーム長、物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ 加藤主任研究員、マスク作製、パターン露光およびサンプル作製に関しては、株式会社イオックス中澤様、測定に関しては、京都府中小企業技術センター小山様には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 株式会社 NTTドコモ モバイル社会研究所 データで読み解くモバイル利用トレンド2022-2023 ―モバイル社会白書―  
<https://www.moba-ken.jp/whitepaper/>, (参照 2024-05-29).
- 2) Yaniv Azar, George N. Wong, Kevin Wang, Rimma Mayzus, Jocelyn K. Schulz, Hang Zhao, Felix Gutierrez, Jr., DuckDong Hwang, and Theodore S. Rappaport "28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city", 2013 IEEE International Conference on

- Communications (ICC), 09-13 June 2013, DOI: 10.1109/ICC.2013.6655399
- 3) 株式会社KDDI総合研究所、“世界初、5G本格展開時代に向けた28GHz/39GHz帯デュアルバンド透明メタサーフェス反射板の開発に成功”、2021年1月20日、  
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/012001.html>, (参照 2024-05-29).
  - 4) 株式会社NTTドコモ AGC株式会社、“メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功-屋外から屋内へ効率的にミリ波を誘導-”、2021年1月26日、  
[https://www.docomo.ne.jp/info/news\\_release/2021/01/26\\_00.html](https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2021/01/26_00.html), (参照 2024-05-29).
  - 5) (株)R&D支援センター、“メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術”、2020、ISBN 978-4-905507-46-8
  - 6) 村上 靖宜、“メタ・サーフェス反射板を用いたアンテナの高性能化に関する研究”、福井大学学位論文、September 2015
  - 7) Yuto Kato, Kohei Omori, Atsushi Sanada, “D-Band Perfect Anomalous Reflectors for 6G Applications”、IEEE Access、vol. 9、23 November 2021、157512-157521、DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130058
  - 8) A. Díaz-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. Tretyakov, “From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors”、Sci. Adv., vol. 3, no. 8, Aug. 2017, Art. no. e1602714.
  - 9) Shulin Sun, Kuang-Yu Yang, Chih-Ming Wang, Ta-Ko Juan, Wei Ting Chen, Chun Yen Liao, Qiong He, Shiyi Xiao, Wen-Ting Kung, Guang-Yu Guo, Lei Zhou, and Din Ping Tsai, “High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces”、Nano Lett. 2012, 12, 6223-6229, DOI: 10.1021/nl3032668
  - 10) Olli Luukkonen, Constantin Simovski, Member, IEEE、Gérard Granet、George Goussetis、Member, IEEE、Dmitri Lioubtchenko、Antti V. Räsänen、Fellow、IEEE、and Sergei A. Tretyakov, Fellow, IEEE, “Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches”、IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 56, Issue: 6, June 2008, 1624 – 1632
  - 11) ルミラーU4 東レ株式会社  
[https://www.films.toray/products/lumirror/lum\\_009.html](https://www.films.toray/products/lumirror/lum_009.html), (参照 2024-05-29).
  - 12) メタロイド 株式会社イオックス  
<https://www.iox.co.jp/>, (参照 2024-05-29).
  - 13) 光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム 京都市中小企業技術センター  
[https://www.kptc.jp/mtc/wp-content/uploads/2016\\_09-20.pdf](https://www.kptc.jp/mtc/wp-content/uploads/2016_09-20.pdf), (参照 2024-05-29).