TSUBAME 共同利用　令和7年度　学術利用　成果報告書

利用課題名　電磁メタサーフェスの周期・非周期大規模解析
英文：Periodic and acyclic large-scale analysis of electromagnetic metasurfaces

利用課題責任者　若土 弘樹
First name Surname

所属　名古屋工業大学　電気・機械工学類
Affiliation
URL　電磁界研究ラボ　若土弘樹

邦文抄録（300 字程度）
本研究では、電磁メタサーフェスの空間的設計自由度を拡張することを目的として、完全非周期かつ非対称なメタサーフェス構造の大規模電磁界解析を行った。構造単位には、非周期充填が可能な「ハット」形状を用い、その回転および反転により得られる複数のパターンへ異なる共振特性を持つ金属構造を導入した。TSUBAME を用いることで、多数のサブ波長構造からなる二次元メタサーフェスに対し、照射位置および周波数に依存した反射特性を効率的に評価した。その結果、各領域で異なる反射強度および周波数応答が得られ、非周期非対称構造を用いることで、空間的に一意な電磁応答を設計できる可能性が示された。

英文抄録（100 words 程度）
This study investigates large-scale electromagnetic analysis of a perfectly aperiodic and asymmetric metasurface to enhance the spatial degree of freedom in electromagnetic response design. The proposed structure is based on “hat” tiles, including rotated and mirrored patterns, into which metallic resonant elements with different resonance frequencies are embedded. Using the TSUBAME supercomputer, reflection characteristics of a two-dimensional metasurface composed of many subwavelength elements were evaluated under Gaussian beam illumination. The numerical results showed spatially dependent reflection intensities and frequency responses. These findings indicate that aperiodic asymmetric metasurfaces can provide uniquely identifiable electromagnetic responses depending on the illuminated position.

Keywords: 5つ程度
電磁メタサーフェス、非周期構造、非対称構造、大規模電磁界解析、反射特性

背景と目的

電磁メタサーフェスは、金属パターンと誘電体基板などから構成される人工電磁材料であり、構成要素の形状や配列を適切に設計することで、反射、透過、吸収、散乱などの電磁応答を制御できる。従来のメタサーフェス設計では、解析および設計の容易さから、周期的かつ対称的な単位セルを二次元的に配列する方法が広く用いられてきた。このような周期構造は、均一な電磁応答の実現に有効である一方、面内位置に応じた応答の多様性や、空間的に非一様な機能の付与には制約がある。

近年、メタサーフェスには、単なる均一媒質としての機能に加え、位置依存的な電磁応答、空間符号化、波面制御、識別可能な散乱応答など、より高度な機能が求められている。このような機能を実現するには、周期性や対称性に依存しない新しい構造設計が重要となる。

そこで本研究では、完全非周期かつ非対称な二次元構造を基盤としたメタサーフェス設計に着目した。具体的には、非周期充填を可能とする「ハット」と呼ばれる十三角形構造を用い、その回転・反転パターンに異なる金属共振構造を導入することで、面内位置に応じて異なる反射特性を生じるメタサーフェスを構成した。TSUBAME を用いた大規模電磁界解析により、非周期非対称構造がもたらす空間的応答の多様性を評価し、電磁特性設計における自由度拡張の可能性を明らかにすることを目的とした。

概要

本研究で対象としたメタサーフェスは、完全非周期非

対称構造を有する二次元平面構造である。基礎となる幾何形状には「ハット」と呼ばれる十三角形タイルを用いた。図 1 に示されているように、基準となるハット形状を 60 度ずつ回転させた 6 種類の構造と、それらを反転させた 6 種類の構造を合わせ、合計 12 種類のタイルパターンを構成している。これらの各パターンに対して、異なる共振周波数を持つ金属形状を導入することで、幾何学的な非周期性と電磁的な非一様性を同時に付与した。

構造の拡張には、非周期性を保持したまま小さな集合体を新たな単位セルとして扱い、それらをさらに組み合わせてより大きな集合体を形成する階層的な手法を用いた。この手順を繰り返すことで、周期的な繰り返しに依存せず、二次元平面内に大面積の非周期非対称メタサーフェスを構成できる。

電磁界解析では、メタサーフェスにガウシアンビームを照射し、反射電界強度を評価した。照射領域を十分に含む面積を基準として二次元平面を 6×6 のグリッドに分割し、各グリッドにおける反射電界強度を遠方界データとして取得した。各グリッド内には複数の異なるハット構造が含まれるように設計し、サブ波長構造としての性質を維持しつつ、位置ごとの反射応答の違いを評価した。

TSUBAME の利用により、多数の微細構造を含む大規模な非周期メタサーフェスについて、周波数依存性を含む電磁界解析を効率的に実施した。特に、周期境界条件に依存しない非周期構造では解析領域が大きくなりやすく、計算負荷が増大するため、スーパーコンピュータを用いた並列計算が有効であった。

結果および考察

数値解析の結果、非周期非対称メタサーフェスでは、面内の観測位置に応じて異なる反射特性が得られることを確認した。図 2(a)では、各グリッドにおける反射電界強度が示されており、グリッド位置によって反射強度が変化していることが分かる。これは、各領域に含まれるハットタイルの配置、回転・反転状態、および導入された金属共振構造の組み合わせが異なるため、局所的な電磁応答が空間的に変化した結果と考えられる。

一方で、図 2(b)に示された単一周波数における反射強度では、複数のグリッドで近い値を示す場合も確認された。このことは、ある一つの周波数での反射強度だけでは、すべての照射位置を完全に識別することが難しい可能性を示している。しかし、図 2(b)に示されるように、周波数依存性まで含めて反射特性を評価すると、同程度の反射強度を示す領域であっても、周波数応答の形状に差異が現れることが確認された。したがって、複数周波数での応答を組み合わせることにより、各位置に固有の電磁的特徴量を抽出できる可能性がある。

この結果は、非周期非対称構造を用いることで、従来の周期メタサーフェスでは得にくい空間的に一意な反射応答を設計できることを示している。周期構造では、同一単位セルの繰り返しにより面内応答が均質化される傾向があるのに対し、本構造では幾何学的配置そのものが位置ごとに異なるため、反射強度および周波数特性に空間的な多様性を付与できる。

また、TSUBAME を用いた大規模解析により、非周期構造全体を明示的にモデル化した評価が可能となった。周期境界条件を仮定できない構造では、単位セル解析による簡略化が困難であり、実際の面内配置を含めた大規模計算が必要となる。本研究では、6×6 グリッドでの位置依存応答を評価することで、非周期非対称メタサーフェスの設計指針を得るための基礎的な知見を得た。

以上より、提案構造は、位置識別可能な反射体、空

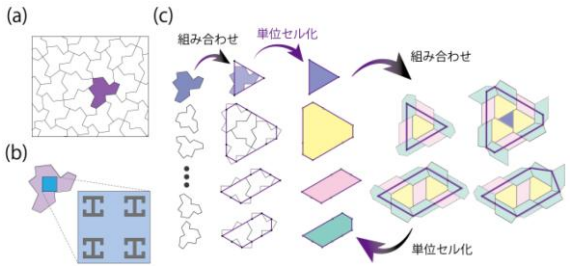

図 1. 設計法. (a)非周期構造と(b)ユニットセルの挿入イメージ及び(c)構造の拡張方法.

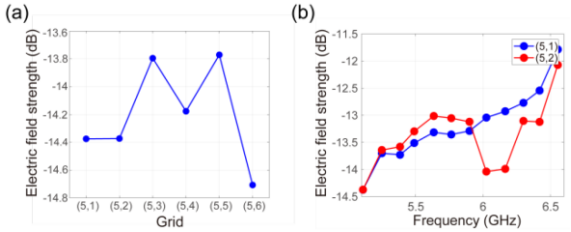

図 2. 解析結果. (a) 各マス目における反射強度(5.11 GHz)と(b)周波数依存性.

間符号化メタサーフェス、電磁波を用いたセンシング、散乱応答制御などへの応用可能性を有すると考えられる。一方で、現段階では、グリッド間の反射強度差が十分に大きくない場合もあり、より高い識別性を実現するには、金属共振構造の形状、共振周波数の割り当て、タイル配置と照射条件の最適化が重要である。

まとめ、今後の課題

本研究では、「電磁メタサーフェスの周期・非周期大規模解析」の一環として、完全非周期かつ非対称なメタサーフェス構造の設計および電磁界解析を実施した。ハット形状に基づく 12 種類の回転・反転パターンを用い、それぞれに異なる共振特性を持つ金属構造を導入することで、従来の周期的・対称的なメタサーフェスとは異なる、空間的に多様な電磁応答を持つ構造を構成した。

TSUBAME を用いた大規模数値解析により、ガウシアンビーム照射時の反射電界強度および周波数依存性を評価した。その結果、メタサーフェス上の各位置において異なる反射応答が得られ、非周期非対称構造が空間的に一意な電磁特性の実現に有効である可能性を確認した。特に、単一周波数での反射強度だけでなく、周波数応答全体を特徴量として用いることで、照射位置の識別性を高められることが示唆された。

今後の課題としては、第一に、各グリッド間の反射強度差をより明確にするための構造最適化が挙げられる。具体的には、金属パターンの形状、寸法、共振周波数の割り当て方法を検討し、位置ごとの応答差を増大させる必要がある。第二に、照射ビーム幅、入射角、偏波、観測距離などの条件が反射特性に与える影響を体系的に評価することが重要である。第三に、より大面積かつ高分解能なメタサーフェスを対象とした解析を行い、実用的な空間識別機能や波面制御機能への展開可能性を検証する必要がある。

さらに、周期構造、準周期構造、完全非周期構造を同一条件で比較することで、非周期非対称性が電磁応答に与える本質的な効果を明確化できると考えられる。これらの検討を通じて、非周期メタサーフェスに基づく新しい電磁波制御デバイスの設計指針を確立することを目指す。