

# メタサーフェス構造を利用した 新機能電磁材料の最適設計法の開発

所 京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

助成対象者：山田崇恭

## 概要

異なる材料特性を持つ材料が周期的に配置された平面構造に電磁波が入射すると、特異な物理特性の実現が可能であることが知られている。この人工的な平面構造は、電磁メタサーフェスと呼ばれ、近年注目を集めつつある。この特異な特性を自由自在に設計できれば、特定の電磁波を薄い領域で遮蔽する電磁材料の実現、高効率な環境適用型太陽光発電素子の開発などが可能になる。しかしながら、複数の要求を同時に高い水準で満たす必要があるため、所望の機能を持つような形状の設計は極めて困難である。そこで本研究では、研究代表者が独自に開発した最適設計理論に基づき、高性能あるいは新しい機能を持つ革新的な電磁材料及び電磁デバイスの最適構造創成設計法の構築を目的として、機能を持ったメタサーフェスに対するトポロジー最適化法を有限要素法に基づいて開発した。

## abstract

In this research, we construct the optimum design method for the functional metasurface by using the level set-based topology optimization method.

The metasurfaces have the potential to drastically improve the performance, due to their unusual properties. However, almost all metasurfaces to date have been designed by trial and error, using

simple geometrical shapes, hence the need for general design methods that are based on mathematical and physical principles. On the other hand, topology optimization allows changes not only in shape but also the topology of designed configurations during optimization process. It has been successfully applied to a variety of optimization problem, such as fluid dynamics problem, thermodynamic problem and vibration problems. Therefore, the objective of this research is to propose and construct a topology optimization method for the design of the metasurfaces.

## 研究内容

異なる材料特性を持つ材料が周期的に配置された平面構造に電磁波が入射すると、特異な物理特性の実現（例えば、負の屈折率など）が可能であることが知られている。この人工的な平面構造は、電磁メタサーフェスと呼ばれ、近年注目を集めつつある。この特異な特性を自由自在に設計できれば、特定の電磁波を薄い領域で遮蔽する電磁材料の実現、高効率な環境適用型太陽光発電素子の開発などが可能になる。しかしながら、複数の要求を同時に高い水準で満たす必要があるため、所望の機能を持つような形状の設計は極めて困難である。

このような課題を解決する方法として、構造最適化の適用が考えられる。構造最適化は、物理学的観点と、数学的観点に基づいて構造物の最適な形状を同定する方法である。中でもトポロジー最適化は、構造の形状だけではなく、孔の数などの形状形態をも変更可能とする最も設計自由度の高い構造最適化手法である。現在、3Dプリンター等の積層造形装置の普及により、工業製品の新しい設計基盤技術としても注目を集めている。学术界においては、熱、流体、電磁気など、構造力学分野を超えた新しい物理領域への展開や、材料設計法への展開が海外の主要な研究グループから報告されている。このような動向の中、今後のトポロジー最適化の展開が期待される分野は、複数の物理領域の連成を利用したマルチフィジクス問題、さらには異なるスケールを考慮したマルチスケール問題であると考えられる。事実、世界の多くの研究グループは研究課題の焦点をこのような方向におきつつある。

他方、トポロジー最適化は、幾何学的に極めて複雑な構造や、外形形状を明示的に表現できないグレースケール（中間領域）を最適設計解として許容しているため、工業製品への展開には多くの問題を抱えている。この問題の解決を目的として、新しい方法論の開発に関する研究も近年、活発に行われている。これに対して研究代表者は、従来法の問題点を抜本的かつ本質的に解決し、最適形状の幾何学的複雑さを設定可能な方法論を世界に先駆けて開発することに成功[1]し、国際的に高い評価を受けている。さらには、構造力学、熱力学、流体力学、電磁気学、音響学などの多くの領域の最適設計問題へ展開し、工業製品へ展開可能な方法として注目を集めている。

そこで本研究では、研究代表者が独自に開発した最適設計理論に基づき、高性能あるいは新しい機能を持つ革新的な電磁材料及び電磁デバイスの最適構造創成設計法の構築を目的として、機能を持ったスマート平面構造（メタサーフェス）に対するトポロジー最適化法を有限要素法に基づいて開発した。

最適設計例として、完全吸収メタサーフェスの例を示す。完全吸収メタサーフェスとは、入射した電磁波が表面上で吸収され、透過や反射がほとんど零になるような表面構造である。目的関数として、透過と反射を最小化した。

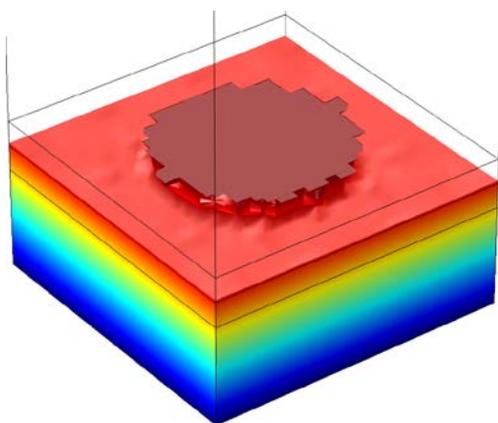


図 1 得られた表面構造  
(周期構造の単位構造)

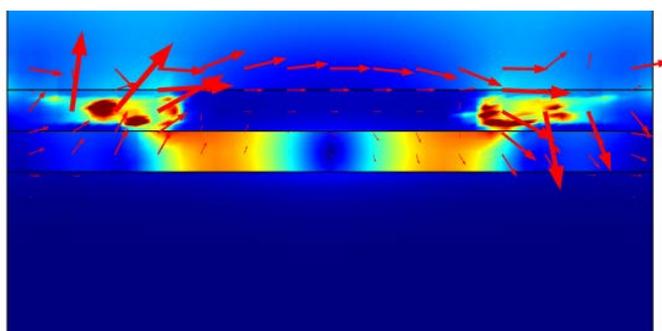


図 2 特定の周波数における断面電場強度分布

図 1 と図 2 に得られた結果の一例を示す。ここでは、メタサーフェスは周期的な形状をしていると仮定し、その単位構造の最適化を図った（図 1）。図 2 には、電磁場強度分布の断

面を示す．表面の吸収層における電場強度が高く，表面で吸収されていることが確認できた．すなわち，特定の周波数において，表面上の電界モードが発生するような構造がトポロジー最適化によって得られることがわかった．なお，この成果は国際会議で発表を行った．課題としては，特定の周波数のみに限定しており，広帯域の電磁波に対しての吸収ができない問題を持つ．この課題を解決するためには，複数のモードを有機的に利用する必要があり，複数モードの同時最適化が可能な方法論の構築を，今後の予定として計画している．

#### 引用文献

[1] Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Takezawa, A., A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface energy, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.199, No.45-48, (2010.11), pp.2876-2891.

#### 本助成に関わる成果物

##### [論文発表]

Miyata, K., Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Optimum design of a multi-functional acoustic metasurface using topology optimization based on Zwicker's loudness model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.331, No.1, pp.116-137, (2018).

##### [口頭発表]

Takahashi, H., Yamada, T., Nishiwaki, S., Izui, K., Level set-based topology optimization method for the design of a perfectly absorbing metasurface, 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSM012), June 5-9, 2017, Braunschweig, Germany, No.245.

Noguchi, Y., Miyata, K., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level set-based topology optimization for a soundproofing acoustic metasurface using Zwicker's loudness

model, 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSM012), June 5-9, 2017, Braunschweig, Germany, No.218.

野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 音響構造連成系における負の質量密度を有する音響メタマテリアルの最適設計, 第 22 回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2017 年 5 月 31 日-6 月 2 日, 埼玉, No.F-13-1.

[ポスター発表]

なし

[その他]

なし