

# メタサーフェスによる平面光学素子の産業化へ向けて



研究室紹介

高原 淳一\*

Towards Industrialization of Flat Optics by Metasurface

Key Words : metasurface, meta-optics, Mie resonance, radiative cooling, perfect absorber

## はじめに

当研究室は2010年にフォトニクス先端融合研究センター（現 工学研究科附属フォトニクスセンター）に私が着任して誕生した。現在は物理学系専攻応用物理学講座に所属してナノエレクトロニクス領域として研究室を運営している。和文名はナノエレクトロニクスであるが、英語名の Nano Electronics and Photonics の頭文字をとり NELPH（ネルフ）と称している。設立年が特務機関 NERV と同じなのは単なる偶然と思いたい1)。

私の専門はナノフォトニクス、特に金属ナノフォトニクスであるプラズモニクスである。プラズモニクスは原理的に光の回折限界を超えるナノ空間への強い光の閉じ込め効果を有し、これを利用すると光集積回路の大幅な微細化が可能となる。最近は金属の他にも高屈折率の誘電体を使ったメタマテリアルの研究を行っている2)。この10年間でメタマテリアルはメタ原子を全誘電体化することにより無損失の透過型光学素子が実用化された。これはメタオプティクス（meta-optics）ともよばれ、平面光学素子のいわば「半導体産業化」がはじまっている3,4)。

本研究室では近年、ミートロニクス（Mie-tronics）をベースとしたメタサーフェスの研究を推進している。我々のアプローチのユニークな点は、光だけに注目するのではなく光と熱を融合させ、光で熱を熱で

光を相互に制御する点である。本稿ではシリコンメタサーフェスに関する最新の研究の状況について紹介する。

## メタサーフェスとは

メタマテリアル（metamaterial）は光の真空波長（ $\lambda_0$ ）より十分小さな構造（ $\ll \lambda_0$ ）をもつメタ原子（meta-atom）とよばれる人工的な光共振器を3次元的に配列した光学的な有効媒質である。メタマテリアルではメタ原子の構造を設計することにより誘電率と透磁率を独立に制御して、負の屈折率をはじめとする自然の物質にはない光学特性をもつ材料を作り出すことができる。メタ原子を基板上に2次元的に並べたものがメタサーフェス（metasurface）である。

メタサーフェスは2次元のメタマテリアルとよばれることもあるが、メタマテリアルとは動作原理が異なる。メタマテリアルはメタ原子が波長より十分小さいために光に対して有効媒質としてふるまい、有効屈折率をもつ。一方、メタサーフェスではメタ原子は波長より小さい（ $< \lambda_0$ ）ものの、平均化して有効屈折率として扱えるほど十分小さくはないので、個々のメタ原子による光の散乱振幅と位相を制御する。このためメタ原子は光のアンテナに例えられる。波長より薄い構造でありながら偏光・分散も含めた多様な光機能が出せるのがメタサーフェスの特徴の一つである。

## ミー共振を利用した高解像度カラーピクセル

誘電体メタサーフェスを利用すると極めて解像度の高い構造色を実現できる。これは周期構造による光干渉効果を利用しない新しいタイプの構造色である。図1にシリコンのメタサーフェスで作製した画像の例を示す5,6)。これは透明な石英基板上に単結

### \* Junichi TAKAHARA

1967年8月生まれ  
大阪大学大学院基礎工学研究科 物理系  
専攻修了（1995年）  
現在、大阪大学 大学院工学研究科 物  
理学系専攻 教授  
博士（工学）  
専門／プラズモニクス、メタマテリアル  
TEL : 06-6879-8503  
E-mail : takahara@ap.eng.osaka-u.ac.jp



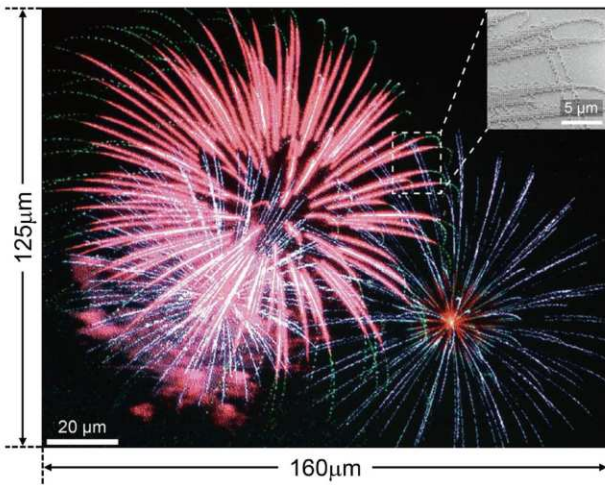


図1 Siメタサーフェスによる構造色を用いた花火のカラー画像5) スケールバーは20μm  
挿入図:単結晶シリコンの円柱型メタ原子の走査型イオン顕微鏡画像

晶シリコン (c-Si) のメタ原子をカラーピクセルとして配列したものである。図1挿入図に示すように石英基板上に c-Si を直方体形状に微細加工した誘電体光共振器 (高さ 150nm、一辺 60~200nm) が並んでいる。c-Si の高い屈折率 ( $n \sim 3.8$ ) による光の閉じ込め効果により、高い解像度 (86000dpi) のカラーピクセルを実現している。

高屈折率材料 ( $n > 2$ ) の構造体にサイズと同程度の波長の光を当てるとミー共振がおきる。このとき共振波長において後方散乱が増強されるのでサイズを変えると反射光スペクトルの色を制御できる。これはミー共振を利用した構造色といえる。このメタサーフェスカラーピクセルは CMOS 整合性も高く、透過型のフィルターとしても応用できる。

### 放射冷却素子

放射冷却は物体の熱が熱輻射により環境に逃げることでおきるので、エアコンなどと異なりエネルギーを消費することなく物体を冷却できる (これは受動冷却とよばれる)。近年、日本でもベンチャー企業による放射冷却シートの実用化がすすんでいる7)。メタ原子に金属を用いるプラズモニックメタサーフェスでは金属表面に発生する表面プラズモンの高い光吸収効果を利用して完全吸収体 (perfect absorber) を実現できる。完全吸収体は完全輻射体でもあるので、熱輻射制御にも応用できる。ここでは放射冷却への応用を紹介する。

放射冷却は高温物体から低温物体へ熱輻射による伝熱によってエネルギー移動を行うものである。このうち地球上の物体 ( $T=300\text{K}$ ) と宇宙空間 (宇宙背景放射の温度は  $3\text{K}$ ) との間の温度差を利用して放射冷却を行うものをスカイラジエータとよぶ。大気には水などの吸収をほとんど受けない透過率の高い波長帯域がいくつも存在し、「大気の窓」とよばれている。もし地球上の物体が出す熱輻射の帯域を制御して、大気の窓である波長  $8\text{--}13\mu\text{m}$  帯の中赤外域に整合させると、宇宙空間に熱を効率良く放熱できる。

図2にアルミニウム (Al) をベースとしたプラズモニックメタサーフェスによる大面積 ( $10\text{cm}$  角) の放射冷却素子を示す8)。これはシリコン基板上に Al・酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )・Al の3層からなるサイズの異なるディスク型メタ原子を配列して、大気の窓に整合させて広帯域の完全吸収体にしたものである。我々の開発した放射冷却素子は理論的には  $200\text{W}/\text{m}^2$ 、実験室内の環境下で  $100\text{W}/\text{m}^2$  以上の冷却能力を示す。高温多湿の日本の夏の夜間での実験では電力供給なしに平均  $2^\circ\text{C}$  の冷却を達成することができた8)。また、我々はメタ原子の材料に金属・絶縁体相転移材料 ( $\text{VO}_2$ ) を用いることで、温度が室温付近では低放射率であるが、高温になると冷却機能が ON となる適応型放射冷却素子を実現している9)。

### 熱を介した全光制御

将来、フォトンクスのもつ超高速性・低消費電力性を最大限に生かすためには、光により光を制御 (全光制御) できるアクティブなメタサーフェスが必要である。しかし、ここで問題となるのが、メタサーフェスは縦型素子であり、厚さが波長以下のため光との相互作用長が短い点である。既存の全光制御素子である非線形光学デバイスの多くは横型であり、光導波路を伝搬させて相互作用長を稼ぐことができるが、薄い縦型素子ではそれが難しい。我々はアクティブメタサーフェスの全光制御に適した方法として熱光学効果および2次元ナノ材料 (グラフェンなど) という2つのアプローチで研究を行っている。

図3は c-Si ミー共振器の熱光学効果を利用した光スイッチングのコンセプトである。c-Si の固有

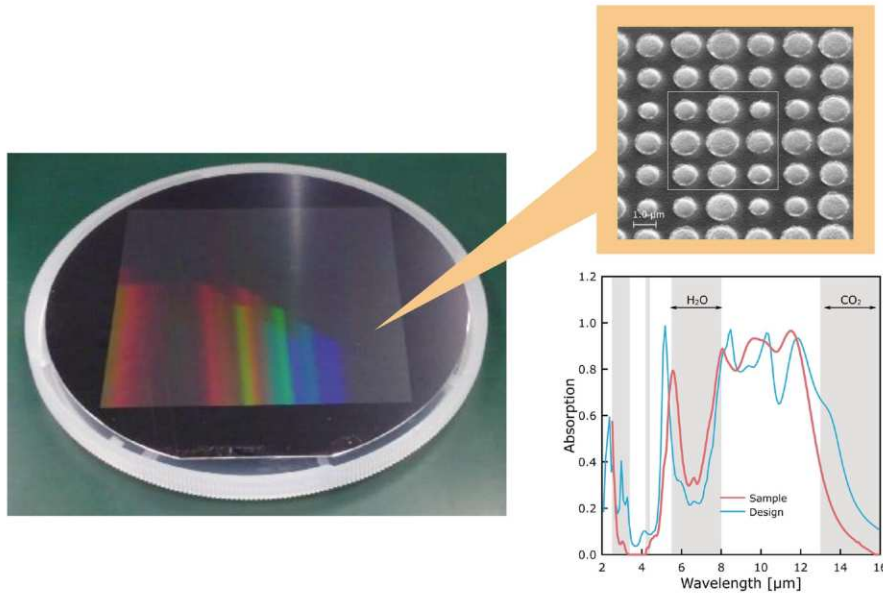


図2 プラズモニックメタサーフェスによる放射冷却素子 8) 右上図: Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al からなるメタ原子の走査型イオン顕微鏡画像 右下図: 光吸収率スペクトル

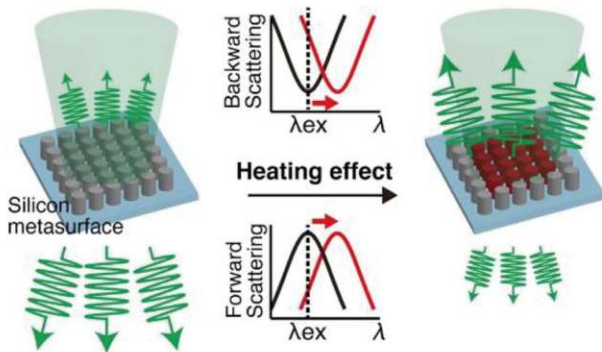


図3 Si メタサーフェスを用いた完全吸収体による光制御 10) 熱光学効果による光の前方散乱から後方散乱への切り替え

損失と放射損失を整合させることで縮退臨界結合を起こし、可視光域で完全吸収体を実現できる。これを利用すると制御光照射によりミラー共振器の温度がナノ秒オーダーで 500℃ 以上に上昇し、屈折率が変化することで信号光の方向を切り替えることができる 10)。

図4に単層グラフェンと c-Si メタサーフェスの結合系による光完全吸収体の模式図を示す 11)。我々はミラー共振器上にグラフェンを近接させて結合させ、縮退臨界結合の原理を応用することにより近赤外域の完全吸収体を実現できることを理論的に示した。単層グラフェンの小さな固有損失をミラー共振

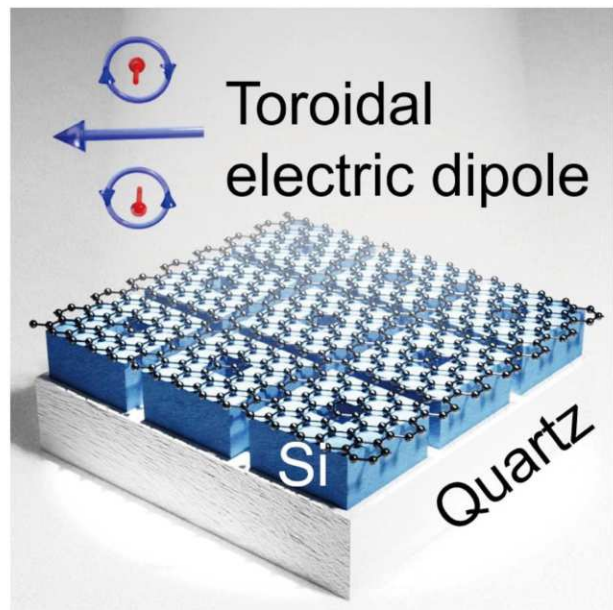


図4 単層グラフェンと Si メタサーフェスのハイブリッド型素子 11)

器のトロイダルダイポールのもつ小さな放射損失と整合させることで縮退臨界結合を起こし、c-Si の光吸収がおきない近赤外域においても完全吸収体を実現できる。このとき光エネルギーは全てグラフェンに移行するから、近赤外域において単層グラフェンを完全吸収体化したとみることができる。

## メタオプティクスの産業化

メタオプティクスの勃興により、今後はメタレンズやメタホログラムにより従来のバルク光学系の置き換えがすすむと考えられる。これはレンズ系を用いた古典的な分厚い光学素子の大幅な薄型化 ( $<\lambda_0$ ) と軽量化であるだけでなく、レンズ産業の半導体産業化とみるのが良い。研磨や金型など従来のレンズの製造に必要であった職人芸的な工程は半導体のプレーナプロセスに置き換えられようとしている。米国や中国を中心として、ベンチャー企業が続々と誕生している。我々も日本光学会の中にメタオプティクス研究グループ (MORG) を立ち上げて、この分野の技術交流を強化している<sup>12)</sup>。興味をもつ企業の方には賛助会員として参加いただきたい。

## おわりに

工学部に来て以来15年間にわたり、ずっとフォトニクスセンター (P3棟) の2階に研究室 (ネルフ本部) を構えていた。P3棟は理工学図書館とAR棟の間にあり、奥まってお場所がわかりにくいので、センターの来訪者はよく迷子になった。昨年末に教授室と学生居室をセンターからGSEコモニースト (U1E棟) 10階に移転した。吹田キャンパスの方はよくご存じと思うが、U1E棟は小高い丘の上にある15階建ての高層棟で、天気によければ千里中央のタワーマンションや梅田のビル群を一望できる。今年は移転も終わり、私にとっても15年は一つの区切りである。新しい環境でメタサーフェスの産業化とフォトニクスによるイノベーション創出を推進してゆきたい。

## 参考文献

- 1) <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%96%B0%E4%B8%96%E7%B4%80%E3%82%A8%E3%83%B4%E3%82%A1%E3%83%B3%E3%82%B2%E3%83%AA%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%81%AE%E7%94%A8%E8%AA%9E%E4%B8%80%E8%A6%A7#%E7%B5%84%E7%B9%94>
- 2) 高原淳一：電子情報通信学会誌, 105(1), 39 (2022).
- 3) A. I. Kuznetsov et al. : ACS Photonics 11, 816 (2024).
- 4) 高原淳一他 (分担) : 「メタマテリアル / メタサーフェス 実用展開の可能性」、情報機構 (2025).
- 5) Y. Nagasaki, I. Hotta, M. Suzuki, and J. Takahara: ACS Photonics 5, 3849 (2018).
- 6) 高原淳一、長崎裕介、堀田郁人：応用物理, 88(4), 276 (2019).
- 7) <https://spacecool.jp/>
- 8) 大塚節文、君野和也、江畑恵司、井上武、高原淳一：第67回応用物理学会春季学術講演会 15p-B415-8 (2020年3月15日).
- 9) 高原淳一：光学, Vol.52, No.7, 274 (2023).
- 10) K. Nishida, K. Sasai, R. Xu, T.-H. Yen, Y.-L. Tang, J. Takahara, S.-W. Chu: Nanophotonics 12(1): 139 (2023).
- 11) R. Xu, J. Fujikata, and J. Takahara: Opt. Lett. 48(6), 1490 (2023).
- 12) <https://meta-optics.jp/>