

知っておきたいキーワード

メタサーフェス

正会員 信川輝吉[†][†] NHK 放送技術研究所

"Metasurface" by Teruyoshi Nobukawa (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo)

キーワード：メタサーフェス，メタレンズ，メタマテリアル，一般化スネルの法則，位相変調

まえがき

『メタサーフェス』と呼ばれる光学デバイスの研究開発が急速に進展しています。メタサーフェスは、レンズ、プリズム、偏光素子など、複数の光学素

子の機能を統合して1枚の薄いデバイスで実現できます。特に、レンズとして機能するメタサーフェス、通称『メタレンズ』には、光学系の小型、軽量化への寄与が期待されています。今後、光学素子が必要なあらゆる機器・技術

でメタサーフェスが活躍する可能性があり、映像情報メディアを支える撮像、表示、伝送技術などへの広い波及が期待できます。ここでは、メタサーフェスの原理、材料、設計と作製、応用について概説します。

メタサーフェスとは

『メタ』はギリシャ語で『超越した』という意味があり、『メタサーフェス』を直訳すると『超越した面』ということになります。図1(a)にメタサーフェスの概念図を示します。メタサーフェスは、光の波長よりも小さな人工構造である『メタ原子』が、基板材料の2次元平面上に配列された光学デバイスです¹⁾。ここに光が入射すると、微視的な視点から、入射光はメタ原子の中の電子を揺さぶり、その電子の揺れで、振幅、位相、あるいは偏光が変化した光が新たに発生します。電子の揺れ方は、メタ原子の構造に応じて変化します。したがって、メタ原子の構造を適切に設計すれば 所望の振幅・位相・偏光の変調が可能で、種々の光学素子として機能させることができます。

メタサーフェスと一緒に頻出する

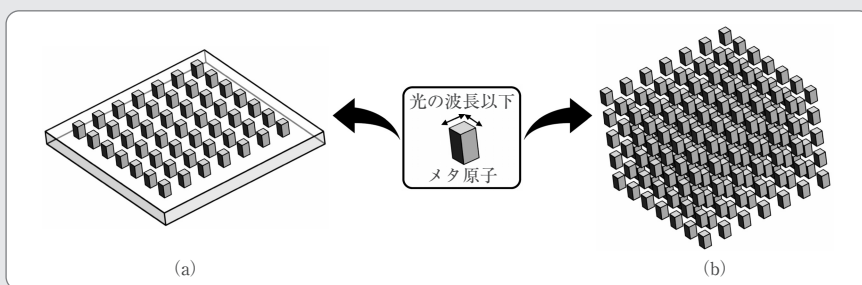


図1 メタ原子と (a) メタサーフェスと (b) メタマテリアル
メタサーフェスはメタ原子の2次元配列で、メタマテリアルはメタ原子の3次元配列で構成されます。

キーワードに『メタマテリアル²⁾』があります。メタマテリアルでは、図1(b)で示すようにメタ原子が3次元空間内に配列されます。つまり、メタマテリアル(3次元配列)とメタサーフェス(2次元配列)の関係があります。メタサーフェスの方が、新しい専門用語ですが、メタサーフェスは、メタマテリアルよりも次元が一つ小さく、自然界にはない負の屈折率や、回折限界

を超える分解能を実現可能な完全レンズなど、メタマテリアルに特有の現象・機能を実現できません。しかし、メタサーフェスの作製方法は、既存の微細加工技術や半導体製造プロセスと親和性が高く、作りやすさという観点からの障壁が比較的低いという長所があります。さらに、既存の光学素子にはない魅力的な機能を実現できるため、活発に研究が行われています。

メタサーフェスによる光変調：一般化スネルの法則

メタサーフェスによる光変調の考え方を、位相変調の場合に限定し、巨視的な視点から概説します。唐突ですが、スネルの法則を覚えているでしょうか？屈折率の異なる二つの媒質の境界面に、光が入射したときの光の振る舞いを知るための法則です。メタサーフェスによる位相変調を理論的に考える際には、次式の一般化スネルの法則³⁾が使用されます(図2)。

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}$$

従来のスネルの法則の右辺に、メタ原子の配列によって生じる位相分布 Φ の微分が加算されています。この微分量に応じて、従来のスネルの法則

に縛られることなく、メタ原子の作用で光の進行方向を変えることができます(図2)。例えば、位相分布を空間座標の1次関数にすればプリズムの機能を、2次関数にすればレンズの機能をそれぞれ実現できます。

上述の光変調の考え方は、回折光学素子のそれと類似しており、アプリケーションに応じては、回折光学素子で位相分布を実装する方が良い場合もあります⁴⁾。しかし、回折光学素子では、通常、変調可能なパラメータは位相だけであり、斜入射の光に対する変調特性は、メタサーフェスよりも劣ることが知られています⁵⁾。

ここで、あらためてメタサーフェスとメタマテリアルとの差異の観点で述べると、メタマテリアルでは、 Φ が一定で右辺の第2項は消失し、メタ原子

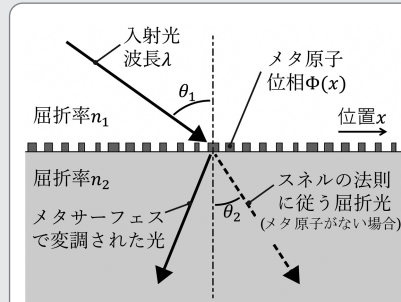


図2 メタサーフェスによる光の変調
メタ原子による位相変調を受け、スネルの法則に縛られることなく、光の進行方向を変更可能です。

の3次元配列で屈折率 n_2 を変化させて自在に光を制御しますが、メタサーフェスでは、屈折率を変化させることはできず、2次元平面内で位相分布を変調することにより自在に光を制御します。

メタ原子の材料

メタ原子の材料として金属や誘電体利用されます。可視光帯域(380nm～780nm)であればAu、Ag、AlやSi、SiO₂、Si₃N₄、GaN、TiO₂などが利用されます。

金属のメタサーフェスは、プラズモニク・メタサーフェス⁶⁾とも呼ばれ、金属の自由電子と光の共鳴を利用して光を変調します。共鳴を利用するため、変調する光の波長に応じた材料の選定が重要です。一方、誘電体のメタサーフェスでは、材料中の束縛電子と光の相互作用を制御して光を変調します。屈折率が高く、吸収の少ない材料の選定が重要です。

金属と誘電体を比較すると、光利用効率の観点では、金属は抵抗損失があり、光利用効率が低いため、誘電体の

方が優れています。デバイスの作製難易度の観点では、金属のメタ原子(図3(a))は、その高さが数十nm程であるため、リフトオフで容易に作製できるメリットがあります。一方、誘電体のメタ原子(図3(b))は、数百～千nmの高さの微細構造をドライエッチングで作製する必要があり、作製難易度は高くなります。

各材料の短所を緩和する方法もあります。金属のメタ原子では、金属-誘電体-金属の反射型の多層構造によって生じるギャッププラズモン⁷⁾の利用によって、光利用効率を向上できます。また、誘電体のメタ原子として、電子線描画・現像後のレジスト材料そのものを利用すること⁸⁾や、ナノインプリントで作製した高分子とTiO₂の複合材料を利用すること⁹⁾が提案されており、エッチングのプロセスを省略できます。

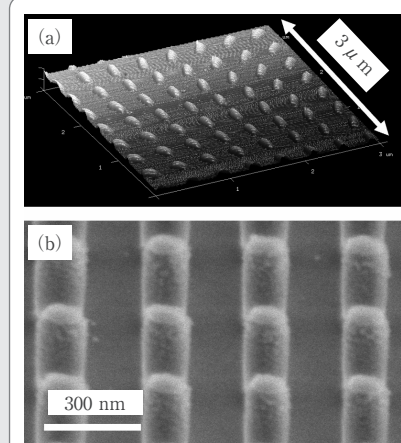


図3 メタ原子の例
(a) 金属のメタ原子の原子間力顕微鏡像と(b) 誘電体のメタ原子の走査型電子顕微鏡像。金属のメタ原子は高さ数十nm程、誘電体のメタ原子の高さは数百～千nm程です。

メタサーフェスの設計と作製

メタ原子の材料が決まると、次に目的の位相分布 Φ を得るためのメタ原子の構造・配列の設計が必要です。しかし、これらを解析的に導き、設計する

ことは困難です。通常、時間領域差分法、有限要素法、厳密結合波理論などの電磁波の数値シミュレーションによる帰納的な設計が必要です。

作製に関して、可視光帯域のメタサーフェスであれば、数十～数百nm

オーダの微細加工技術が必要で、通常、電子線リソグラフィやナノインプリントを利用します。また、メタ原子の材料に依存しますが、製膜やリフトオフ、エッチングなどのプロセスも必要です。

メタサーフェスの応用

メタサーフェスの応用として、メタレンズが注目を浴びています。メタレンズは、ガラスのレンズより、薄くて軽量です(図4)。さらに、メタレンズは、焦点距離の波長依存性を制御できます¹⁰⁾。光利用効率や集光力とトレードオフの関係にあります。既存のレンズにない波長分散特性を実現できます。以上の特徴から、メタレンズの導入でレンズ系の収差を効率的に低減できる可能性があり、種々の光学系の小型、軽量化が期待されています。

他には、3次元像の表示技術であるホログラフィ¹¹⁾への応用も活発に研究されています。ホログラムとして機能するメタサーフェスである、『メタ

ホログラム¹²⁾』は、メタ原子により光の波長以下の細かさで位相を変調するため、回折角度が大きく、広い視域で3次元像を表示できます。

上述のメタレンズとメタホログラムの両方を使った応用例として、スマートフォンのタイムオブフライトに基づく3次元センシング技術があります。現行のスマートフォンでは、面発光レーザ、複数枚の樹脂製レンズ、回折光学素子で近赤外光のビームアレイを計測対象に照射し、その反射光を複数枚の樹脂製レンズと単一光子アバランシェダイオードセンサで受光して計測対象までの距離を計測します。これに対し、照明部のレンズと回折光学素子をメタホログラムで、受光部のレンズをメタレンズで実装し、3次元センシ

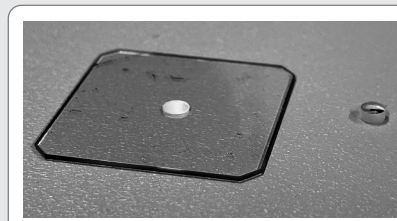


図4 直径3 mmで同じ集光力をもつメタレンズ(左)とガラスのレンズ(右)
基板の厚さを除いて、各レンズの厚さは320 nm, 1.5 mm。

ングモジュールの小型、高精度化を実現することが検討されています¹³⁾。

上述の事例以外に、多岐にわたる光学機器・光学技術でメタサーフェスを活用することが提案されています。他の応用例についてはレビュー論文¹⁴⁾をご覧ください。

むすび

映像情報メディアの技術分野でメタサーフェスを利用するためには、可視光の波長域で機能するメタサーフェスの作製が重要です。その課題として、

ナノスケールの微細構造の大面積加工、量産化、低コスト化が挙げられますが、半導体製造プロセスの進展も相まって着実に解消されることが期待できます。メタサーフェスの意義は、これまでにない光学素子を設計・作製できる点に

あり、既存の光学機器のさらなる小型化や多機能化へ寄与するだけに留まらず、新たな光学機器や技術を創出できる可能性も秘めています。今後のさらなる研究の展開が期待されます。

(2023年12月5日受付)

参考文献

- 1) N. Yu and F. Capasso: "Flat optics with designer metasurfaces", *Nature Materials*, **13**, 139 (2014)
- 2) 田中拓男: "知っておきたいキーワード: メタマテリアル", *映像学誌*, **65**, 10, 1395 (2011)
- 3) N. Yu, P. Genevet, M.A. Kats, F. Aieta, J. Tetienne, F. Capasso and Z. Gaburro: "Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction", *Science*, **334**, 333 (2011)
- 4) S. Banerji, M. Meen, A. Majumder, F.G. Vazquez, B. Sensale-Rodriguez and R. Menon: "Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses?", *Optica*, **6**, 6, 805 (2019)
- 5) J. Engelberg and U. Levy: "The advantages of metalenses over diffractive lenses", *Nature Communications*, **11**, 1991 (2020)
- 6) N. Meinzer, W.L. Barnes and I.R. Hooper: "Plasmonic meta-atoms and metasurfaces", *Nature Photonics*, **8**, 889 (2014)
- 7) F. Ding, Y. Yang, R.A. Deshpande and S.I. Bozhevolnyi: "A review of gap-surface plasmon metasurfaces: fundamentals and applications", *Nanophotonics*, **7**, 6, 1129 (2018)
- 8) D. Andr n, J. Mart nez-Llin s, P. Tassin, M. K ll, R. Verre: "Large-scale metasurfaces made by an exposed resist", *ACS Photonics*, **7**, 885 (2020)
- 9) G. Yoon, K. Kim, D. Huh, H. Lee and J. Rho: "Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible", *Nature Communications*, **11**, 2268 (2020)
- 10) W.T. Chen, A.Y. Zhu and F. Capasso: "Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces", *Nature Reviews Materials*, **5**, 604 (2020)
- 11) 高木康博: "知っておきたいキーワード: ホログラフィ", *映像学誌*, **61**, 12, 1722 (2007)
- 12) L. Huang, Z. Zhang and T. Zentgraf: "Metasurface holography: from fundamentals to applications", *Nanophotonics*, **7**, 6, 1169 (2018)
- 13) R. Gobron: "Flat lenses made of nanostructures transform tiny cameras and projectors" (May 21, 2023), <https://spectrum.ieee.org/metalens-2660294513>
- 14) S. Zhang, H. Zhou, B. Liu, Z. Su and L. Huang: "Recent advances and prospects of optical metasurfaces", *ACS Photonics*, **10**, 7, 2045 (2023)



のぶかわ てるよし
信川 輝吉

2015年、日本学術振興会特別研究員DC2。2017年、和歌山大学大学院博士後期課程修了。同年、産業技術総合研究所特別研究員、NHK放送技術研究所ポストドクター研究員を経て、2019年、NHK入局。同放送技術研究所に勤務し、現在に至る。コンピューショナルフォトグラフィ、ホログラフィ、メタサーフェスの研究に従事。博士(工学)。正会員。