

## 不可視を科学する

東京工業大学 雨宮智宏\*<sup>1</sup> トヨタ自動車株式会社 高木茉佑\*<sup>2</sup>

## 1. 透明であること、不可視であること

戦前の物理学者であり、文筆家・俳人として夏目漱石の門下生でもあった寺田寅彦は、自身の随筆集で、1933年公開の映画『透明人間』について以下のような感想を残している<sup>1)</sup>。

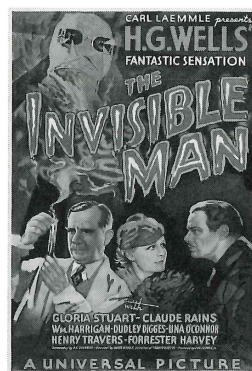
『この映画を見ているうちに自分には瑣末な疑問がおこった。第一には、この「透明人間」という訳語が原名の「インヴィジブル・マン」(不可視人間)に相当していないではないかという疑いであった。「透明」と「不可視」とは物理学的にだいたい意味がちがう。たとえば、極上等のダイヤモンドや水晶はほとんど透明である。しかし、決して不可視ではない。それどころか、たとえ小粒でも適当な形に加工彫琢したものは燦然として遠くからでも「見える」のである。これは、これらの物質がその周囲の空気と光学的密度を異にしているためにその境界面で光線を反射し屈折するからであって、たとえその物質中を通過する間に光のエネルギーが少しも吸収されず、すなわち、完全に「透明」であっても立派に明白に顕著に「見える」ことには間違いなく、見えないわけにはどうしてもゆかないのである。こう考えてみると「透明人間」という訳語が不適当なことだけは明白なようである。』

映画は純粋なエンターテインメントであり、フィクションとして素直に楽しめば良さそうなものだが、寺田寅彦の物理学者としての側面がそれを許さなかったようである。科学者というのは難儀なもので、どのような事象に対しても科学的根拠や合理性を求めてしまう向きがある。かく言う筆者も悲しいかな、寺田寅彦の感想に両手を挙げて賛同したいところである。

\*1 あめみや ともひろ 未来産業技術研究所 助教



(a) 寺田寅彦



(b) 映画「透明人間」のポスター

注) 戦前の物理学者であり文筆家  
夏目漱石とは師弟関係にあった

注) 1933年公開  
©Universal Pictures

図1 寺田寅彦と「透明人間」のポスター

日本語では、「透明人間」「透明マント」などの言葉が独り歩きしているが、なるほど、英語では「invisible man」「invisible mantle」であり、透明を意味する transparent という単語はどこを探しても見当たらない。文学的には美しい翻訳も科学的には美しくないように思えてくる。本稿では、その辺りから話を始めてみたい。

## 2. 科学的に正しい“不可視”の実現手法

先ほどの寺田寅彦の感想で、『たとえ透明なものでも境界面では光線を反射し屈折するので、決して不可視ではない』というくだりがあるが、この意味するところを科学的に考えてみる。空間において光の反射が生じるかどうかは、以下の式で与えられる波動インピーダンス $z$ によって決まってくる。

$$z = \sqrt{\mu} / \sqrt{\epsilon} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon$ 、 $\mu$ は各々、空間中の媒質の誘電率および透磁率である。空間全域において、上記の波動

\*2 たかぎ まゆ モビリティ材料技術部 プロジェクト材料創生室

インピーダンスが一定であった場合、光は一切の反射を生じることなく、空間を進むことができる。たとえば、空気中 ( $\epsilon=1$ ) から、ある媒質に光を入射した場合、その媒質中でも空気と同じ  $\epsilon=1$  を保ち続ける限りは、たとえ境界面であろうと、どこであろうと光の反射が生じることはない。しかし、可視光においては、すべての物質の透磁率は一定 ( $\mu=1$ ) であることから、誘電率が異なる媒質の境目では必ず波動インピーダンスが空間的に変わってしまう。これにより、寺田寅彦が指摘した『たとえ透明なものでも境界面では光線を反射し屈折するので、決して不可視ではない』という現象を産むことになる。

では、“不可視”とはいったいどのような現象を言うのだろうか。その答えは、「光が一切の反射を生じることなく綺麗に対象物を迂回すること」、これが科学的に極めて正確な“不可視”の定義である。これにより、背景が歪みなく投影されて対象物は完全に視界から消える。まさに不可視！科学的にも正しい透明人間の完成である。

極端な例として、図2のようなモデルを考えることにする。ここでは対象物の周りに8個のプリズムが配置されており、これらの屈折率 ( $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ ) を上手く設計することで、スネルの方式に従って、左側から入射した光線がきれいに右側に抜けるようになっている。しかし、このままだと空気とプリズムの境界で必ず反射が生じてしまう。そこで、追加でもう1つ、以下の条件を課すことにする。

$$\epsilon = \mu = n \quad (2)$$

これにより、空間全域で波動インピーダンスが1

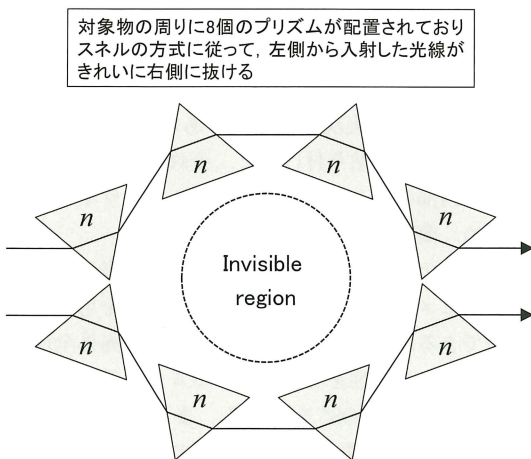


図2 不可視化の極端な例

となり、反射が一切生じない状況を作り出すことができる。

図2の例では、特定の方向に対して対象物は完全に不可視となっているものの、見る角度を少しでも変えると、その限りではない。そのため、上記議論を全方位にわたって成立するように拡張したものが、本当の意味での不可視といえる。はたして、そのような条件は存在するのであろうか？ 答えは Yes であり、2006年に提案された「変換光学」にもとづく理論により、その条件は既に定式化されている。答えを最初に示しておこう<sup>2)</sup>。

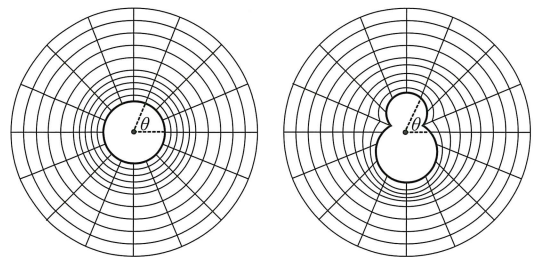
$$\epsilon^{ij}(\mathbf{r}) = \mu^{ij}(\mathbf{r}) = \pm \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\gamma}} g^{ij}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

ここで、左辺の  $\epsilon^{ij}$  と  $\mu^{ij}$  ( $i, j = x \text{ or } y \text{ or } z$ ) は、各々、誘電率テンソル、透磁率テンソル（異方性を考慮した誘電率・透磁率と考えて間違いはない）であり、ともに空間の位置  $\mathbf{r}$  を変数とした関数である。一方、右辺の  $g^{ij}$  は、不可視領域の形状（要するに透明人間の形）を決めると定まるテンソル値であり、こちらも空間の位置  $\mathbf{r}$  に依存した関数となっている ( $g$  は  $g_{ij}$  の行列式、 $\gamma$  は平坦計量  $\gamma_{ij}$  の行列式であり、 $g^{ij}$  が決まれば一意に定まるスカラー値)。

まず、不可視領域の形状を決めたら、図3に示すように、平坦な空間の一点を各方向に引き延ばして、その形状に応じた曲がった空間を作ることを考える。このとき、空間の一点を引き伸ばす際の座標変換が  $g^{ij}$  そのものであり、これは極座標系を用いることで比較的簡単に計算できる<sup>3)</sup>。あとは式(3)を用いて、不可視化する対象物周囲の誘電率と透磁率の空間分布を求めれば良い。

さて、ここでのポイントは、対象物を不可視化す

極座標系において、それぞれの偏角 ( $\theta$ ) に対して動径 ( $r$ ) 方向の空間の引き伸ばし率を変えれば理論上、あらゆる種類の形状に応じた曲がった空間を作ることができる



(a) 円形

(b) 雪だるま

図3 座標変換



る際に用いられるパラメータとして、“誘電率”と“透磁率”の2つが要求されていることである。つまり、上記設計をもとにして、実際に対象物を不可視化する際には、物質の誘電率および透磁率を人工的に制御することが必須となる。特に、可視光のような高周波においては、物質の巨視的な磁化が高周波磁界に追従できないことから、比透磁率は1で固定される。そのため、何らかの方法を用いてこれらの制約を打破することが必要不可欠となる。

物質固有ともいえる誘電率や透磁率の値を人工的に変えることは容易ではなさそうだが、近年の目覚ましい技術の進歩はそれを可能にする。このような物質を総称して、メタマテリアルと呼ぶが、これらは、負の屈折率をはじめとした古典的な電磁気学の枠組みにとらわれない光学現象を発現する<sup>9)</sup>。このようなメタマテリアルの発展があったからこそ前述の設計が意味をもち、“科学的な透明人間”は衆目を集めるようになったといえる。

### 3. 不可視化に必要とされるメタマテリアル

前章までの議論で、不可視化に必要な誘電率と透磁率の空間分布を求めた後、実際にそれらの値をもつメタマテリアルを空間の適切な箇所に配置すれば良いことは分かった。では、肝心のメタマテリアルは、具体的にはどのような物質なのだろうか。「物質固有の誘電率や透磁率を変化させるのだから、さぞかし複雑な構造をしているに違いない」と思われる方々も多いかもしれない。否、メタマテリアル自体は、実は非常に単純な構造をしている。その典型的な構造を図4に示そう。一目でわかるように、何のことはない、ただの“金属（または誘電体）で構成されたRLC回路の集合体”である。光（電磁波）の周波数が回路の共振周波数に一致すると、RLC回路内に強い自由電子の振動が現れ、それに伴って回路周囲の電磁界分布が大きく変化する。これらの空間的に偏った電磁界分布をマクロ的な電気分極・磁気分極とみなすことで、誘電率・透磁率の値を人工的に変化させることが可能となる。メタマテリアルの最大の特徴、それは、構成要素であるRLC回路が、光（電磁波）の波長に対してそれなりに小さいサイズとなることであろう。対象とする光（電磁波）にも依るが、たとえば、視覚に対して不可視化を行う場合は200–500 nm程度、熱に対して不可視化を行う場合は2–5  $\mu\text{m}$ 程度のサイズまでRLC回路を小さくする必要がある。

金属（または誘電体）で構成された微細なRLC回路の集合体

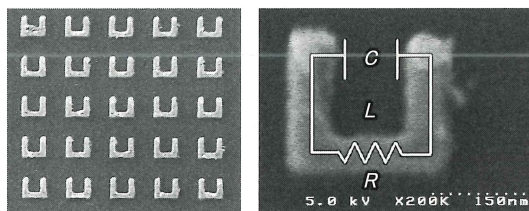


図4 典型的なメタマテリアルの走査電子顕微鏡画像<sup>5)</sup>

さて、このようなメタマテリアルを不可視化に用いる際には、“3次元配置”と“誘電率・透磁率の高精細な制御”という2つの留意事項がある。以下、当グループの取り組みを中心にそれらについての詳細を述べる。

#### 3.1 3次元配置技術

可視・赤外のような高周波帯で動作するメタマテリアルを用いて不可視化を目指す場合、サブマイクロオーダーの金属構造体を3次元的に配置することが必要不可欠となる。しかし、微細な金属構造体の作製手法としてよく用いられる“電子ビーム描画によるリフトオフプロセス”や“収束イオンビームによる金属ナノ加工”は、いずれも2次元平面内にメタマテリアルを実現する上では優れた技術であるものの<sup>6,7)</sup>、ビーム焦点距離の問題から3次元的な作製には適していない。

そこで、当グループでは、メタマテリアルの3次元配置を目的として、メタマテリアルを内包した有機薄膜フィルム（メタマテリアルフィルム）を三井化学㈱と共同開発した<sup>8)</sup>。メタマテリアルフィルムの特徴は、膜厚500 nmから20  $\mu\text{m}$ の有機薄膜内に様々な種類のメタマテリアルを内包することで、所望の光学特性（誘電率・透磁率）を持ったフレキシブルフィルムを実現できる点にある（図5）。本フィルムを曲面に貼り付けると、それに沿った形でフィルム内部のメタマテリアルがセルフアラインに並ぶため、簡単に3次元配置が可能となる。

メタマテリアルフィルム作製には、従来の2次元平面内にメタマテリアルを配置する手法を用いることができる。ホスト材料には、可視・近赤外全域に対して高い透明性を有するノルボルネン系のポリイミドであるECRIOS<sup>®</sup>を用いる。まず、支持基板上にECRIOS<sup>®</sup>の前駆体であるポリイミド酸（N-メチル-2-ピロリドンで希釈）を塗布し、熱処理に

有機薄膜内にメタ材料を内包することでメタ材料の3次元配置が可能となる

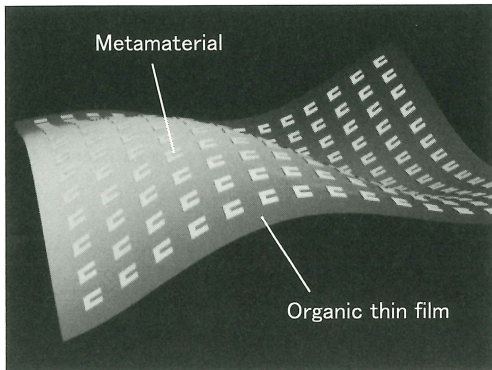


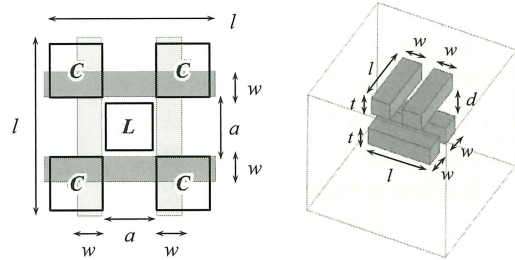
図5 メタ材料フィルム<sup>8)</sup>

より硬化させる。その後、電子ビーム描画およびリフトオフプロセスを用いて、金属（主に Au, Ag など）から構成されるメタ材料を二次元的に形成する。再度、ポリアミド酸を塗布・硬化させてメタ材料を埋め込んだ後、支持基板から剥離を行うことで完成となる。

できあがったメタ材料フィルムの誘電率および透磁率については、顕微分光を用いて測定したフィルム本体の透過/反射スペクトルに理論フィッティングをかけることで、おおよその値を知ることができる<sup>9)</sup>。

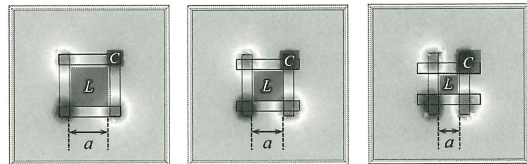
### 3.2 誘電率・透磁率の高精細な制御技術

一般的に、対象物を不可視化させる際には、その周囲の誘電率と透磁率の値を空間位置に対して極めて精細に制御することが要求される。前述したように、メタ材料は構成要素となる金属構造体を適切にデザインすることで、誘電率や透磁率の値を人工的に制御している。このとき、構造体の寸法に対して誘電率や透磁率の値が大きく変化しようだと、精細な値の制御が困難となる。可視・赤外のような高周波帯で動作するメタ材料構造として、現在までに多分割スプリットリング共振器<sup>10)</sup>やフィッシュネット構造<sup>11)</sup>などが提案されているが、いずれも寸法が数ナノメートル変化しただけで透磁率が大きく変化するため、不可視化を実現する上で適当とはいえない。そこで、当グループでは、高周波において透磁率の値を精密に制御可能なメタ材料構造を提案している。



(a) 井桁構造のメタ材料

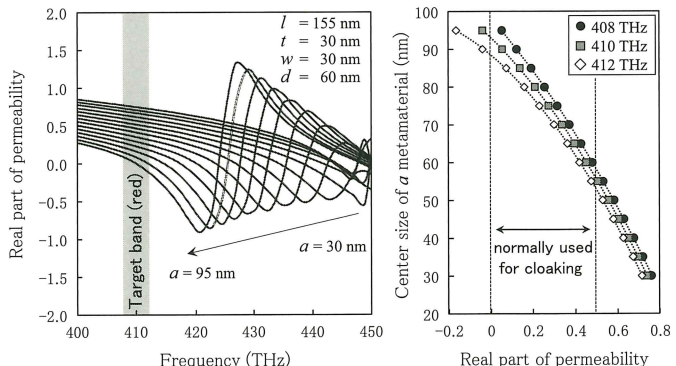
$a$  を変化させると、 $L$  と  $C$  の値が相反して変化するため、透磁率の値を精密に制御可能



(b) 各層における金属構造体の寸法  $a$  の変化例

図6 メタ材料の構造

具体的なメタ材料の構造を図6(a)に示す。本構造は4本の金属細線を積層した井桁構造となっており、構造の中央がリアクタンス( $L$ )として、1層目と2層目の金属細線が重なっている箇所周辺がキャパシタンス( $C$ )として機能する。ここで、図6(b)に示すように、各層における金属構造体の寸法  $a$  を変化させると、 $L$  と  $C$  の値が相反して変化する。これにより、メタ材料の共振周波数  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  (透磁率をもっとも大きく変化する周波数) は  $a$  に対して極めて小さい変化量を示すことになり、それはすなわち、寸法に対して透磁率を高精細に制御できることを意味する。



(a) 井桁構造のメタ材料における透磁率の周波数依存性

(b) 410 THz 近傍での透磁率の構造依存性

図7 可視用に設計された本メタ材料の理論特性



一例として、可視（赤色）用に設計された本メタ材料の理論特性を図7に示す。図7(a)は、透磁率の周波数依存性を示したものであり、寸法  $a$  を 30 nm から 95 nm まで変化させた際に、共振周波数は 30 THz 程度シフトした。本結果により、金属構造体の寸法に対して、極めて精細に共振周波数が変化していることが見て取れる。

上記結果をもとに、透磁率を導出した結果を図7(b)に示す。対象周波数を 410 THz に設定した場合、透磁率を 0 から 0.5 まで変化させるために、 $a$  には約 40 nm の変化幅が許容されており、これにより透磁率の値を高精細に変化させることが可能となる（一般的なメタ材料構造である多分割スプリットリング共振器を用いて同様の透磁率変化を得る場合、サイズとして 2–3 nm の変化幅しか許容されない）。

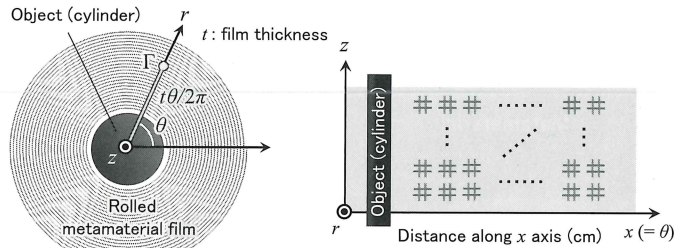
#### 4. メタ材料フィルムを用いた不可視化

前章で述べた技術を用いて不可視化を実現するために、当グループでは、あらかじめフィルム内に特定の誘電率と透磁率分布をもつように井桁構造のメタ材料を内包させておき、それを対象物に巻きつける手法を提案している。本手法は汎用性のある技術であり、様々な周波数帯への適用が可能である。

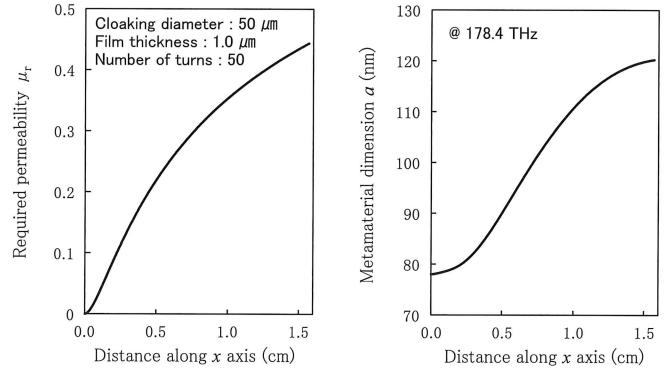
その概要を図8(a)に示す。対象物として円柱形状を仮定した場合、極座標系においてフィルム内の誘電率・透磁率分布を以下の式で与えると、特定の偏光に対してフィルムを巻き付けた領域が不可視化される（本結果は、式(3)から得られる。詳しい導出過程については、参考文献3, 12)などを参照のこと）。

$$\varepsilon_z = \left( \frac{R_2}{R_2 - R_1} \right)^2 \mu_r = \left( \frac{t}{2\pi\theta - R_1} \right)^2 \mu_\theta = 1 \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_z$ ,  $\mu_r$ ,  $\mu_\theta$  はフィルム内における各方向の誘電率と透磁率、 $t$  はフィルム膜厚、 $R_1$  は対象物である円柱の半径、 $R_2$  は円柱にフィルムを巻き付けた状態での半径である。式(4)におけるパラメータ  $\theta$  は、巻き付けたフィルムを平面展開した際の左端からの



(a) 概要



(b) 近赤外において直径  $50 \mu\text{m}$  の円柱形状の対象物を透明化するためのフィルム内の透磁率分布  
(c) 必要な透磁率分布を実現するためにあらかじめフィルム内に内包すべき井桁構造のメタ材料の寸法

図8 メタ材料フィルムを用いた不可視化

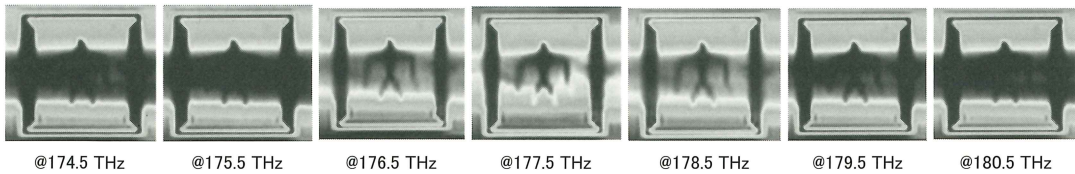
距離  $x$  と以下の関係式で結ばれている。

$$x = \sqrt{\left( \frac{d}{d\theta} \left( \frac{t}{2\pi} \theta \cos\theta \right) \right)^2 + \left( \frac{d}{d\theta} \left( \frac{t}{2\pi} \theta \sin\theta \right) \right)^2} d\theta \quad (5)$$

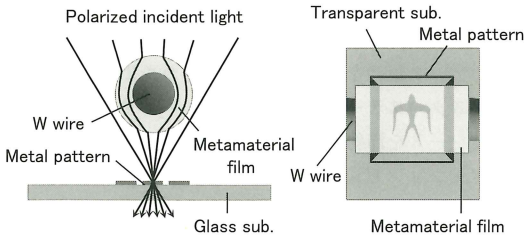
式(4), (5)を用いて、近赤外 (178.4 THz) において直径  $50 \mu\text{m}$  の円柱形状の対象物を不可視化するための、フィルム内の透磁率分布を計算した結果を図8(b)に示す（本計算では、メタ材料フィルムの膜厚は  $1 \mu\text{m}$ 、円柱への巻き数は 50 と仮定した）。この透磁率分布を実現するために、あらかじめフィルム内に内包すべき井桁構造のメタ材料の寸法を、図8(c)に併せて示す。

上記設計にもとづいて、実際にメタ材料フィルムを作製した（井桁構造のメタ材料を作製する際には、電子ビーム描画装置の位置合わせ露光を用いている）。できあがったメタ材料フィルムは、直径  $50 \mu\text{m}$  のタングステンワイヤとともにスライドガラスに挟み、滑走させることで巻きつけを行った。

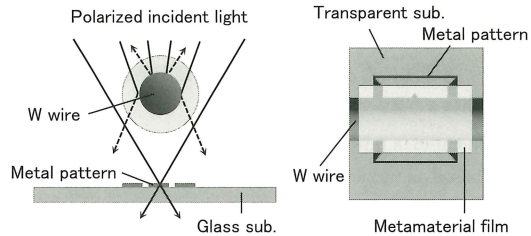
金属パターン（本研究では東京工業大学のロゴマーク）が形成された透明基板の上部に前述のデバイ



(a) 金属パターン（東京工業大学のロゴマーク）が形成された透明基板の上部に前述のデバイスを配置し顕微分光によるイメージングを行った結果



(b) 設計周波数における光の軌跡



(c) 設計周波数外における光の軌跡

図9 メタマテリアルフィルムによる不可視化

スを配置し、顕微分光によるイメージングを行った結果を図9(a)に示す。設計周波数(178.4 THz)近傍において、巻きつけられたメタマテリアルフィルムが不可視化に寄与し、タングステンワイヤ下部のパターンが観測できている。本結果は、図9(b)のように入射光が迂回して、金属パターンが形成された透明基板に焦点を結んでいることを示唆している。逆に、設計周波数外においては、巻きつけられたメタマテリアルフィルムが機能せず、図9(c)のように入射光がタングステンワイヤで散乱されていることが見て取れる。

## 5. おわりに

メタマテリアルを用いた不可視化技術については、多くの研究機関から様々な報告がなされている。本稿では、主に当グループで開発しているメタマテリアルフィルムを用いた手法を解説したが、これをもとに不可視化技術への興味・理解が広がれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 寺田寅彦, 自由画稿, 青空文庫 (2017).
- 2) J. B. Pendry et al., "Controlling Electromagnetic Fields," *Science* **312**, 1780 (2006).
- 3) U. Leonhardt and T. G. Philbin, *Geometry and Light: The*

*Science of Invisibility*, Dover Books on Physics (2012).

- 4) S. A. Ramakrishna and T. M. Grzegorzczak, *Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials*, CRC Press and SPIE Press (2008).
- 5) H. Kagami, T. Amemiya, M. Tanaka, Y. Wang, N. Nishiyama, S. Arai, "Metamaterial infrared refractometer for determining broadband complex refractive index," *Optics Express* **27**, 28879 (2019).
- 6) F. Capolino, *Metamaterials Handbook*, Taylor & Francis (2009).
- 7) X. Ni, Z. J. Wong, M. Mrejen, Y. Wang, and X. Zhang, "An ultrathin invisibility skin cloak for visible light," *Science* **349**, 1310 (2015).
- 8) 浦上達宜, 岡崎真喜, 福川健一, 雨宮智宏. メタマテリアルフィルム及びその製造方法, 特願2016-055866, 特開2017-175201, 特許6719237.
- 9) D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Phys. Rev. E* **71**, 036617 (2005).
- 10) C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. F. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies," *Phys. Rev. Lett.* **95**, 203901 (2005).
- 11) C. García-Meca, J. Hurtado, J. Marti, A. Martínez, W. Dickson, A. V. Zayats, "Low-Loss Multilayered Metamaterial Exhibiting a Negative Index of Refraction at Visible Wavelengths," *Phys. Rev. Lett.* **106**, 067402 (2011).
- 12) 雨宮智宏, 瀧 雅人, 金澤 徹, 平谷拓生, 荒井滋久. 変換物理学とカモフラージュ, 電子情報通信学会論文誌 C, J99-C, 67 (2016).