



## ブラックシリコンの光機能

大阪市立大 理学研究科 坪井泰之

光—物質・エネルギー変換の効率向上において、「光子の有効利用」は重要なアプローチの一つであろう。光子と物質の相互作用確率を向上させる手段として、貴金属の局在表面プラズモンの利用が真っ先に思い当たる。確かにプラズモンが発揮する、千倍以上の電場増強効果能は魅力的であるし、これを用いた光—物質・エネルギー変換研究も先端的でハイレベルなものが多い。一方、貴金属の利用という点で、企業の方々が尻込みするのも現実である。また、プラズモンが最大限に電場増強機能を発揮するには、10ナノメートル程度の空隙構造（ナノギャップ）を持つように貴金属をファブリケーションしなければならないが、大面積かつ低コストでこのようなナノ構造を貴金属に付与する簡便な加工手段は存在しない。これらがプラズモンによる光—物質・エネルギー変換研究が、今後超えるべきハードルであろう。企業の方々がおっしゃるには「数千倍とかの増強とかでなくて、数倍の増強でいいですから、まぜるだけ、塗るだけとかの簡単な方法で、光電変換効率が上がるのはいませんか？」。これが本音だろう。

そのような方法の候補になるのが、ブラックシリコンである。ブラックシリコンとは、単結晶シリコンウエハをプラズマドライエッチングし、その表面にサブミクロンサイズの針状のナノ構造を高密度に付与した材料である。図1に、私たちが実験に用いているブラックシリコン

の電顕写真を示した。この針状ナノ構造はその近傍に屈折率の空間勾配を生みだし、光の反射を著しく抑制することができる。ちなみに、漆黒の闇のような黒い（スーパーブラック）羽を持つ極楽鳥の羽も、複雑なマイクロ構造により反射を抑制している<sup>1)</sup>。ブラックシリコンは、光を反射せず効率よくシリコンに吸収させるため、太陽電池への応用が期待された。当初は、その大きな表面積のために電荷再結合による光電変換効率の低下が問題となったものの、それも解決されてきたようである<sup>2)</sup>。

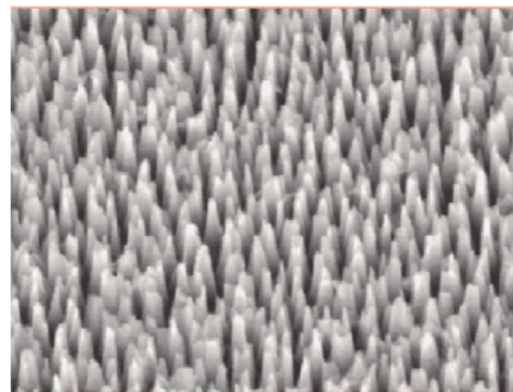


図1 ブラックシリコン表面の電顕写真

このブラックシリコンは「反射抑制」しか光学機能はないのであろうか？ 太陽電池応用とは逆の発想で、シリコンが殆ど吸収しない光（近赤外域以上の波長の光）をブラックシリコンに照射した場合の、針状ナノ構造近傍の光電場の空間分布をシミュレーションすると、僅か4—5倍ながら不均一な電場 ( $E^2$ ) 増強効果を有することがわかった。おそらくは光の多重散乱による効果だろうと思う。さ

て、私たちは微小な物体（夢は分子）を操れる光ピンセットの研究を展開してきた。光ピンセットが物体を掴む“握力”を増強させるために、プラズモン光ピンセットの可能性を探ってきた。しかし、プラズモン光ピンセットは貴金属電子の実励起を伴うため、局所的な発熱を伴い、これが物体の捕捉を大きく妨げるという欠点があった<sup>3)</sup>。

そこで、このブラックシリコンの持つ僅かながらの電場増強機能に縋ってみた。ブラックシリコンに非共鳴レーザー光（熱が出ない！）を照射し、ポリマービーズの光捕捉実験を行ったところ、プラズモン光ピンセットを凌駕する握力を発揮する安定な捕捉ができることがわかった。私たちはこれを **Nano-Structured Semiconductor Assisted (NASSCA)** 光ピンセットと呼び、現在その機能と機構、特徴を探る研究に夢中になっている。**NASSCA** 光ピンセットには、光増強効率はや低いものの、プラズモンにはない利点を備えている。ナノ加工はとても簡単で低コストであり、大面積化も簡単なこと。材料も安いこと。それに、光ピンセットとしてとても大切な事だが、熱が出ない事である。

私たちがこの **NASSCA** 光ピンセットを昨年報告した論文<sup>4)</sup>は、**Sci. Rep.**誌の **Top 100 read paper**（2017年物理学部門三千報の中から）に選ばれた。関心を集めるということは、ライバル登場の日も近いことを意味する。見えないライバルの足音に怯えながら、素晴らしい教え子たちと研究を楽しむ毎日です。

1) D. E MaCoy et al., *Nature Communications* 9, 1 (2018).

2) H. savin et al., *Nature Nanotechnology* 10, 624–628 (2015) .

3) Y. Tsuboi, *Nature Nanotechnology* 11, 5 (2016).

4) T. Shoji et al. and Y. Tsuboi, *Scientific Reports* 7,12298 (2017).