



光を 99.98%以上吸収する至高の暗黒シート



国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター
雨宮 邦招

はじめに

唐突ですが、みなさんの好きな色は何色でしょうか。光の三原色は RGB (Red, Green, Blue)、色材の三原色は YCM (Yellow, Cyan, Magenta)、そしてそれらの混色は無数にありますね。その中には、無彩色と呼ばれる白、グレー、黒もあります。読んで字のごとく、彩度がゼロの色ですから、無彩色の種類は少ないと思われるでしょう。でも、実はとても奥が深いです。テレビで、「白は 200 色、黒は 300 色ある」と言っている方もいました。これはあながち誇張とも言えず、特に黒さの違いに関して人間の目はとても敏感です。

黒は何物にも染まらない唯一の色であり、裁判官の法服が黒いのも公正の象徴だからと言われます。黒色に仕上げたモノの外観は、格調や高級感を感じさせます。筆者はそんな黒の魅力に取りつかれた人間の一人です。歴代の愛車は全て黒色ですし、飼っているネコも黒猫です。名前は「あんこ」。暗黒にちなんで名づけました。

黒好きは、筆者に限らないでしょう。10 年ほど前、Vantablack (ベンタブラック) という名の配向カーボンナノチューブ (CNT) が世界一黒い材料として注目を集めました。また、2020 年に登場した世界一黒い塗料「黒色無双」でボルシェを全塗装した「世界一黒い車」も SNS やテレビを賑わせました。「世界一黒い鳥」ことタンビカンザシフウチョウなども話題になりましたね。一般的な黒いものは、可視光に対する半球反射率 (= 鏡面反射率 (ぎらつき) と拡散反射率 (くすみ) の和。以下「反射率」という) が 3~5% 程度ありますが、黒色無双は 0.6%、ベンタブラックは 0.035% で、それぞれ 1 桁/2 桁も低く、確かにとても黒いです。空間に穴が開いたような異様な絵面は、実に「映え」ました。

ただ、実際にはさほど黒くないものでも、紙面や画面の限られた階調 (2~3 桁) では容易に黒つぶれしがちで、実物は案外黒く見えなことがあります。それほど、肉眼視の黒の識別能力は高いです。例えば反射率が 0.2% 以上の黒と、0.1% 以下の黒の比較でも、肉眼で十分に識別できます。数字の「差」こそ、ごくわずかですが、視覚は反射光量の多寡 (たか) で黒さを感じるので、「比」で 2 倍もの光が返ってくれば、違いを知覚できるのです。逆に言うと、現在の表示技術では黒レベルが圧倒的に不十分なので、リアルな視覚表現が困難となっています。

これまで、反射率が 0.1% を下回る、超黒色と呼べる素材は配向 CNT くらいしか存在しませんでした。ですが、配向 CNT (ベンタブラック) を実際に目にした方はまずいまいでしょう。配向 CNT は接触などにより低反射率性能が損なわれたり、基材から剥離したりしやすく、取扱が困難なためです。

筆者らは最近、漆に似た成分であるカシューオイル黒色樹脂に着目し、その表面に微細な凹凸を形成して光を閉じ込めることで、可視光を 0.02% しか反射しない (99.98% 以上を吸収する) 「至高の暗黒シート」を開発しました。レーザーポインターの光が消えるほどの深い黒であり、触れる素材では黒さ世界一です。ここでは、筆者らが暗黒シートで黒さを極めるに至った経緯、暗黒シートの作り方、そして将来用途の展望について解説します。

暗黒シートの登場

あらゆる光を完全に吸収する仮想的物体、つまり「黒体」は現実には存在しません。黒体を模擬的に実現したものとして、空洞黒体と呼ばれるものがあります。大きな中空の空洞に小さな穴を設けたものです。

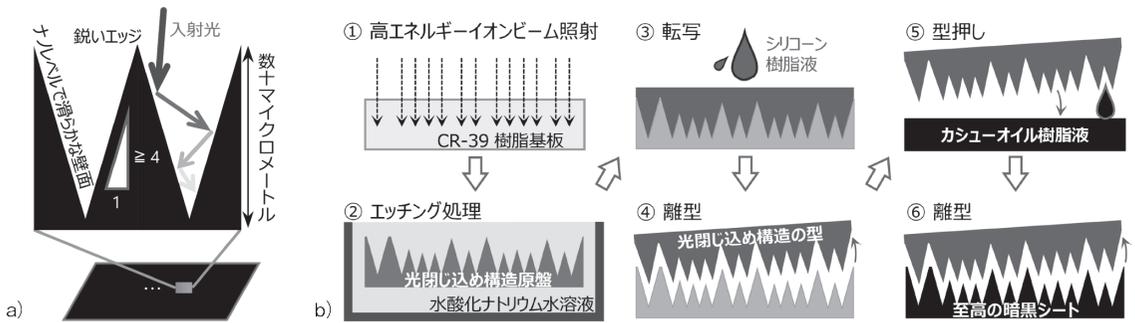


図1 a) 暗黒シートの光閉じ込め構造による反射低減と光吸収の原理 (産総研提供), b) 至高の暗黒シートの作製方法 (Science Advances 誌に掲載された論文¹ (DOI: 10.1126/sciadv.ade4853) の図 (CC-BY 4.0) を改変)

小さな穴から空洞に入った光は、内部で反射・吸収を繰り返していくうちに減衰し、再び穴から出ていく確率は非常に低くなります。そのため、孔を覗くと真っ暗闇に見えます。一方、産業技術総合研究所（以下「産総研」という）が開発した「暗黒シート」は、この空洞黒体の原理がぎりぎり成り立つサイズのマイクロな円錐状の孔（光閉じ込め構造）をシート表面上に敷き詰めたものです（図1a）。原理は実に単純です。ただ、正味の反射率が0.1%を下回るには、光閉じ込め構造の要件がとても厳しいです。孔の側面の勾配は急峻にしつつも、隣接する孔同士のエッジは鋭く、孔の内壁面はナノレベルで滑らかでないと光閉じ込め効果が十分に機能しません。また、幅広い波長で反射を抑えるには、光閉じ込め構造の深さは数十マイクロメートル程度が必要です。従来の微細加工技術では、このような構造を丈夫な素材上に形成することは困難でした。

筆者らはこのような難加工を、サイクロトロン加速器からのイオンビームを用いることで解決しました。イオントラックエッチング法と呼ばれる本技術では、樹脂基板に高エネルギーイオンビームを照射して、各イオンの通過痕跡（飛跡）に沿って樹脂中に高分子の切断を生じさせ、それを選択的に化学エッチングすることでイオン飛跡を円錐孔に拡大形成します（図1b, ①～②）。基板として、メガネレンズの材料にも使われるアリルジグリコールカーボネートをモノマー（重合の基本分子）とする熱硬化性樹脂 CR-39 樹脂を用いることで、エッチング処理後でも極めて表面粗さの小さい加工面が得られ、精巧な円錐孔を敷き詰めることができます。これを光閉じ込め構造に利用します。ただ、CR-39 樹脂基板は元々が無色透明なため、光閉

じ込め構造の加工をただけでは黒色素材にはなりません。そこで、作製した微細な円錐状の凹凸構造は原盤として用い、別の黒色樹脂表面に光閉じ込め構造を転写しました。繰り返し転写可能な方式のため量産も期待できます。カーボンブラック顔料（炭素の粉）を混練したシリコンゴムに光閉じ込め構造を転写した「暗黒シート」は、紫外～可視～赤外の全域で光吸収率99.5%以上を実現し、特に熱赤外線（波長の長い赤外線）領域では世界一の吸収率99.9%以上を達成しました。暗黒シートは非常に黒いだけでなく触っても性能が損なわれず、一般環境でも使用できるため、2019年4月の成果公開後は大きな反響がありました。

くすみ（散乱反射）との闘い

しかし、初代の暗黒シートは可視域の反射率が0.3-0.5%程度にとどまっていた、超黒色と呼ぶには少し物足りませんでした。またほどなくして、反射率0.1-0.5%のかなり黒い植毛布素材が市販で出回りました。撮影用の黒背景や、ちょっとした乱反射防止の目的には十分な性能です。それゆえ、暗黒シートが生き残るには差別化が必要でした。筆者らは、コスト面での競争は取敢えず避け、「至高の黒さ」を追求することにしました。筆者の中で、「原理的には、暗黒シートはもっと黒くなるはずだ」との確信があったからです。光閉じ込め構造は設計通りに作製できているので、表面反射率は0.1%以下に抑えられているはず。このことは計算機シミュレーションでも確かめられています。つまり、光閉じ込め構造の下側の基材部分に反射率低減を制約する要因があるということです。

結論から言うと、黒色顔料のカーボンブラックによ

る光の散乱が原因とわかりました。カーボンブラックは炭素のナノ粒子ですが、可視光の波長と同じサイズかそれ以上の凝集体を作りやすいです。このようなマイクロな粒子は、光のミー散乱（波長程度の大きさの粒子で生じる光の散乱、雲が白く見える一因）を生じるため、光閉じ込め構造から散乱光が一部逃げてしまいます（図2）。このような散乱反射（くすみ）は、基材が均質な組成となっていれば理論上生じないはずのもので、これまでの検討で見落としていたのです。顔料粒子と基材の2成分系をモデル化して計算機シミュレーションを行ったところ、実際に無視できない量の光の後方散乱が生じると判明しました。

そこで、カーボンブラック顔料を用いない低散乱な黒色基材の探索を進めました。長い歴史に紡がれた黒い絵の具や塗料にヒントがあると考えて探し求めた結果、筆者らは漆塗りの代用にも用いられるカシューオイル樹脂の塗料にたどり着きました。ホームセンター

でも手に入る塗料であり、カシューナッツの殻を圧搾して得られる成分（ポリフェノール類）からなっています。主成分のカルダノールは、漆の成分（ウルシオール）と類似しており、鉄と錯体を作ると、顔料を加えなくてもポリマー自体が黒くなります。顔料粒子がないため、カシューオイル黒色樹脂は基材内部からの散乱反射が極めて少ないことがわかりました。「漆黒」と言う通常は鏡面に磨いた光沢のある黒を指しますが、同時にくすみの少ない「深みのある黒」も意味すると言えそうです。

その後、微細な凹凸構造を転写製造する方法も改良して（図1b, ③～⑥）、カシューオイル黒色樹脂に光閉じ込め構造を形成した「至高の暗黒シート」を作製しました（図3）。その結果、鏡面反射（ぎらつき）も散乱反射（くすみ）も抑えられ、従来の暗黒シートと比較して可視光の反射率が一桁以上低い0.02%以下（光吸収率99.98%以上、図4）をついに実現しました。筆者が黒い素材の研究を開始してから至高の黒にたどり着くまでに、10年の月日経っていました。レーザーポインターの光をあててもほとんど見えない様子（図5）を初めて目の当たりにした時は、筆者も思わず声が出てしまいました。ちなみに、これほど黒い至高の暗黒シートでも、肉眼で見ていると目が慣れてくるにつれ、レーザーポインターの光のわずかな反射がうっすらと見えてきます。それほどまでに、人間の目は黒さに敏感なのだと驚かされると同時に、至高の黒さを追い求めることの意義も感じさせます。

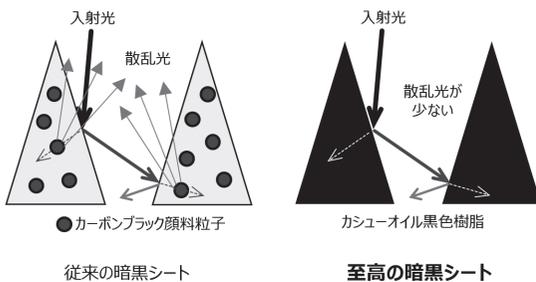


図2 光閉じ込め構造中の顔料粒子の有無と散乱光発生との関係。論文¹に掲載された図（CC-BY 4.0）を改変。

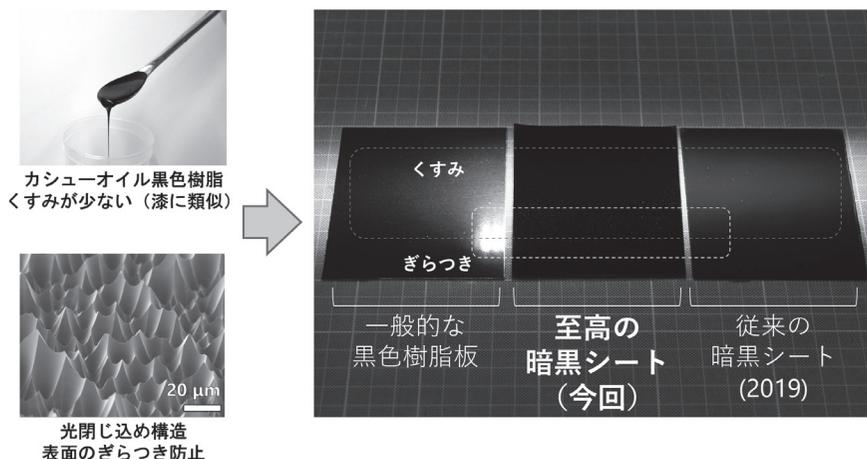


図3 開発した光吸収率99.98%以上の「至高の暗黒シート」。右の写真は、上からライン状の照明をあてた様子。「至高の暗黒シート」では、くすみ（散乱反射）もぎらつき（鏡面反射）も少ない深い黒を実現している。※産総研提供。

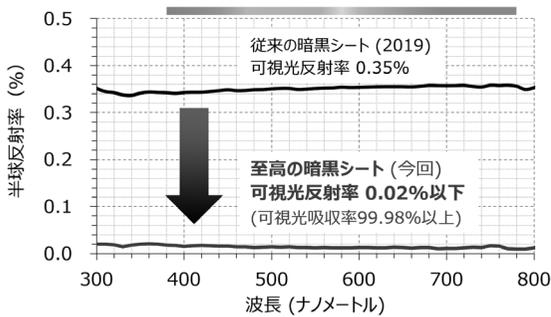


図4 至高の暗黒シートの反射率の波長特性（可視光領域）。論文¹に掲載された図（CC-BY 4.0）を改変。

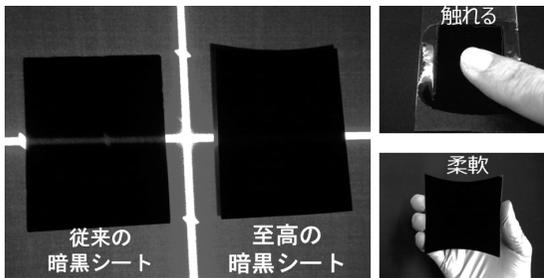


図5 暗黒シートにクロスラインレーザーをあてている様子（左、産総研提供）、指で触れても性能劣化しづらく（右上）、柔軟なシートにもできる（右下）。※右上、右下は、論文¹に掲載された図（CC-BY 4.0）を改変。

暗黒シートの応用

開発した至高の暗黒シートは背景の映り込みを防止して圧倒的に沈む黒さを実現でき、視覚表現に従来にない高いコントラストを提供可能です。黒色材料は、「映え」以外にも、カメラなど光学機器内の迷光や乱反射の防止、光センサーの吸収体、太陽熱エネルギー利用、熱放射体など幅広い目的で用いられています。精密な分光分析など、用途によっては100%に近い光吸収率も必要とされます。至高の暗黒シートなら、余計な迷光や乱反射を最大限防ぐことができるため、分光分析装置のゼロレベル信号の基準などに用いることで、高精度な光学計測や分析が可能になると期待されます。

ところで、筆者も単に黒が好きだけで、ここまで黒いモノを追い求めてきたわけではありません。筆者の本業は、実は素材開発ではなく、光の計量標準です。照明の明るさなどの光の量について、日本で最も正確な基準値を決めるが仕事です。そのためには、光を全て吸収して検知し、計測の不確かさをできるだけ小さくしなくてははいけません。この時、光吸収体は黒

ければ黒いほどよいのです。実際、超黒色材料の研究開発は、世界的にも各国の国家計量標準機関がリードしています。筆者の所属する産総研の計量標準総合センターは、日本の国家計量標準機関なのです。暗黒シートも、光の計量標準の高度化に貢献すべく、応用を検討しています。

暗黒シートは、表面の光閉じ込め構造分の数十 μm の厚みが少なくとも必要ですが、柔軟なシートにすることが可能です（図5）。触っても性能が損なわれにくいことから、実用に適した素材と言えます。これほど黒く、有用な「至高の暗黒材料」は他に例がありません。さらに、カシューオイル黒色樹脂ほどではないものの、カーボンブラック顔料を用いない複合組成で低散乱な黒色基材が他にもいくつか見つかっています。必要な反射率や用途に応じて基材の選択肢があり、光閉じ込め構造を作製できるのも、新しく開発した暗黒シート技術の特長です。

代わりに

高エネルギーイオンビームを用いた微細加工法を通じて、丈夫な黒色素材上に微細な凹凸（光閉じ込め構造）を作ることで、あらゆる光を吸収しつつ、耐久性も併せ持つ、光吸収材料の研究開発に取り組みました。その結果、紫外線～可視光～赤外線全域で世界最高レベルの光吸収率（99.9%以上）を達成できました。この成果は、米国の科学誌サイエンスの姉妹誌であるScience Advancesに掲載されました。2023年1月に成果について記者会見を行ったところ、日本経済新聞、朝日新聞、毎日新聞、読売新聞ほか新聞20紙に掲載され、3件のテレビ報道、1件のラジオ出演、4件の雑誌掲載などにも至りました。多くの問合せも頂戴しており、実用化が期待されています。

理論上はさらなる反射率低減の可能性もありそうですが、製造技術的には黒さの追求はひと段落したと考えています。今後は、具体的な用途開発や実用化に向けた検討を進めたいと考えています。例えばライセンス契約のもと、素材メーカーなどに技術移転を行ってゆきたいです。将来的には光の乱反射を極力抑えたいという専門向け用途だけでなく、身近な場面も含め、光制御・利用技術の格段の性能向上に貢献してゆきます。いずれ、皆さんに手にしていただく機会もあるかも知れませんね。