

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03753

研究課題名（和文）イオンビーム加工に基づく光閉じ込め構造型完全暗黒シート材料の開発

研究課題名（英文）Perfect blackbody sheets having optical confinement structures fabricated with swift heavy ion beam

研究代表者

雨宮 邦招（Amemiya, Kuniaki）

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・研究グループ長

研究者番号：60361531

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：世界一黒く、接触耐性も併せ持つ素材「至高の暗黒シート」を開発した。漆類似成分のカシューオイル樹脂は鉄錯体になるとポリマー自体が黒くなり、顔料粒子が存在しないためにMie散乱がほとんど生じないことを見出し、イオンビーム加工をベースに作製した微細な表面凹凸構造「光閉じ込め構造」をカシューオイル黒色樹脂上に転写して表面反射を抑制することで、ざらつき（鏡面反射）もくすみ（散乱反射）も極めて少ない深い黒「至高の暗黒シート」が得られた。半球反射率は0.1%未満（光吸収率99.9%超）であり、従来の接触耐性のある超黒素材と比べて1～2桁も低かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「至高の暗黒シート」の光閉じ込め構造はイオンビーム加工による型に基づいて繰り返し転写製造できるため、今後の大面積化・量産化が期待される。また、暗黒シートは触っても性能が損なわれにくいため、取り扱いも容易である。この至高の暗黒シートにより、明るい場所でも沈む圧倒的な黒さを実現でき、背景の映り込みを防止できるため、視覚表現にこれまでにない高いコントラストを提供可能である。将来的には光の乱反射を極力抑えたいプロ用途だけでなく、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得る。

研究成果の概要（英文）：We have developed “supreme black sheet,” a material that is the blackest in the world and also has contact resistance. The cashew oil resin, which is similar to lacquer, becomes a black polymer when made into an iron complex, and Mie scattering hardly occurs due to the absence of pigment particles. By transferring the “light confining structure,” a fine surface texture fabricated based on ion beam fabrication, onto cashew oil black resin to suppress surface reflection, a deep black “supreme black sheet” with extremely little glare (specular reflection) and dullness (scattering reflection) was obtained. The hemispherical reflectance was less than 0.1% (light absorption >99.9%), one to two orders of magnitude lower than that of conventional contact-resistant ultra-black materials.

研究分野：計量標準

キーワード：暗黒シート イオンビーム 光吸収体 黒体 極低反射率 光閉じ込め構造

1. 研究開始当初の背景

低反射な黒色材料は、装飾、映像、太陽エネルギー利用、光センサ、熱輻射体など、光の応用分野で幅広く用いられている。特に、カメラ内部や分光分析装置内の乱反射防止、迷光除去などの用途では、理想的には無反射の「黒体」材料が切望されている。また、人間の眼は、実は黒さに大変敏感であり、反射率 0.2 %以上の黒と、0.1 %以下の黒を十分に識別できる。反射率<0.1 %で耐久性も高い究極の黒があれば、光を極力制御したい様々な場面、例えば不快な照返し(グレア)の防止や、映像の高鮮明化などにおいて、利用価値が高い。

完全な黒体は現実には存在せず、古くは大きな空洞に小さな孔を設け、光を逃げにくくすることで黒体を模擬していた(空洞黒体)。しかしここ 10 数年のうちに、シート状でも黒体に近い材料が登場してきた。本研究代表者らもこれまで、黒体材料開発に取り組み、極低反射率を達成するには、表面反射の抑制/媒質内散乱の低減/十分な光吸収、の三要素が必須との結論に至った。研究開始時点で、世界一黒い材料として知られていた配向カーボンナノチューブ(CNT)は、その三要素を全て実現する例であった[J. Lehman, Appl.Phys.Rev. 2018]: 空隙が多く実効屈折率がほぼ 1 となり、フレネル反射が低い/高い配向性により光の散乱が少ない/丸めたグラフェンであり、広帯域に光吸収性が高い。これにより、あらゆる光を 99.9 %以上吸収する(反射率 0.1 %)。しかし、配向 CNT は接触耐性が低く、一般環境での利用は困難であった。

近年は、世界一黒い鳥や蝶[S. Dou, Adv.Mater. 2020]、深海魚[A. Davis, Curr.Bio. 2020]などの研究発表が相次いで注目を集め、生体模倣の黒体材料開発を触発している。サブ波長サイズの表面凹凸を用いるモスアイ(蛾の眼)構造や、プラズモン・メタマテリアル等のナノ光学技術はその一例である。しかし、これらは黒体材料となるための三要素のいずれかが不十分とならざるを得ず、配向 CNT の極低反射率を凌ぐ報告はなかった。市販で手に入る黒色塗料や、多孔性・起毛性の黒色布等で低反射なものも同様で、配向 CNT の反射率とは一桁以上の開きがあった。

2. 研究の目的

本研究代表者らは、あらゆる光を吸収して、なおかつ高い耐久性も併せ持つ新しい光吸収材料、「暗黒シート」の研究開発に取り組んできた。サイクロトロンからの高エネルギーイオンビームを用いた微細加工法によって、丈夫な素材の表面に微細な凹凸構造を作製し、その鋭さや、サイズ、組成の条件次第で、光吸収率を極限まで高められることを見出してきた。本手法(イオントラックエッチング法)では、基板表面に鋭いエッチピット構造を自在に形成できるので、対象とする光の波長域に合わせてピット構造のアスペクト比やサイズを最適化できる。これを原盤として黒色シリコンゴムに転写作製した「暗黒シート」は、紫外線~可視光~赤外線の全域で 99.5 %以上の光を吸収し、特に熱赤外線に対しては 99.9 %以上という世界最高レベルの光吸収率を達成していた。

「暗黒シート」は、赤外域では随一の性能を誇る一方、黒体材料の需要の特に多い可視域では反射率が 0.3%から 0.5%程度にとどまっていた。そこで本研究では、これまで暗黒シートの反射率低減を制約してきた「散乱」を抑制することで、可視域でも反射率 0.1 %未満(光吸収率 99.9 %以上)の実現を目指して研究開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 光閉じ込め構造の原理

素材表面に形成した微細な円錐状空洞構造に光が閉じ込められる原理を図 1 に示す。微細な空洞(光閉じ込め構造)に光が入射すると、壁面で何度も反射・吸収を繰り返して、最終的に正味の反射率がゼロ近くまで低減し、光吸収率は 100 %に近くなる。この原理は、いわゆる空洞黒体と同じである。ただし、通常空洞黒体の構造は奥行き長い円筒であり、大面積の平面を作るのには向かない。そのため、暗黒シートでは空洞黒体の原理が成立するぎりぎり小さい穴を、平面上に敷き詰めるというアプローチを採用している。一方、このような微細空洞構造(光閉じ込め構造と呼ぶ)により、100 %近い光吸収率を達成するには、空洞壁面の傾斜を急峻にしつつ、その表面はナノメートルレベルで滑らかにし、かつ、円錐状の空洞同士のエッジは十分に鋭くする必要もある。また、紫外線~可視光~赤外線の全てを吸収させるには、空洞の深さは数十マイクロメートル程度にする必要もある。こうした超精密な空洞構造は、通常微細加工技術では作製が困難である。

(2) 光閉じ込め構造の作製(イオンビーム加工)

このような難加工性の光閉じ込め構造は、サイクロトロン加速器からのイオンビームを用いて作製した。これは、樹脂材料基板にイオンビームを照射して、高分子切断の痕跡を生じさせ、

続く化学エッチングでその痕跡を円錐孔に拡大形成する技術(イオントラックエッチング法)である。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る、CR-39樹脂を基板に用いることで、設計通りの精巧な微細空洞構造を実現できる。手順はまず、CR-39樹脂基板(100mm×100mm程度、厚さ0.8mm)に、量研高崎量子応用研究所イオン照射研究施設TIARAのAVFサイクロトロンからのNeイオンビーム(200MeV)を 10^6 /cm²程度照射した。照射後のCR-39基板は70%の6.4N NaOH水溶液中で数時間エッチングし、表面に円錐状エッチピットが敷き詰められ、平坦部のない状態にした。

こうしてマイクロ空洞加工したCR-39樹脂素材自体は、元々が無色透明であり、そのままでは黒色素材とはならない。そこで、マイクロ空洞構造を作製したCR-39樹脂基板を原盤とし、まずシリコンゴムの表面に微細構造を転写した。このシリコンゴム転写体を二次モールドとし、様々な黒色基材の表面に光閉じ込め構造を型押しする方法を開発した(図2)。また、これまで暗黒シートはカーボンブラック顔料を混練することで基材を黒色にしていたが、カーボンブラック粒子は可視光の波長と同じサイズかそれ以上の凝集体を作り、光の散乱が生じやすくなるため、光閉じ込め構造から散乱光が一部逃げてしまうこともわかった。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行い、漆塗りの代用にも用いられるカシューオイル樹脂に着目した。カシューオイル樹脂を構成するポリフェノール類は、漆の成分と類似しており、鉄と錯体を作ることでポリマー自体が顔料を加えなくても黒くなる。このため、カシューオイル黒色樹脂膜は散乱反射(くすみ)の量が極めて少ないことがわかった。

4. 研究成果

こうして、カシューオイル黒色樹脂に光閉じ込め構造を形成した「暗黒シート」を作製した(図3)。その分光反射率値は、紫外～可視域～近赤外において分光光度計(PerkinElmer LAMBDA 1050)により計測した。鏡面反射成分だけでなく拡散反射成分も含む半球分光反射率を評価するため、積分球を備えた測定ポートに試料を設置した。反射率の値は、標準反射板(Spectralon: 反射率約99% UV-VIS-NIR用)との比較を通じて算出した。その結果、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)であることを確認した。鏡面反射(ぎらつき)も散乱反射(くすみ)も抑えられた「至高の暗黒シート」の深い黒はレーザーポインターの光が消えて見えるほどであり、触れる素材で世界の黒さを達成した。

今回開発した暗黒シートは、原盤からシリコンモールドを介して繰り返し作製できるため、量産性もよい。また、触っても性能が損なわれず取り扱いが容易で、ちりなどを簡単に除去できる。これほど黒く、有用な黒体材料は他に例がない。「至高の暗黒シート」は明るい場所でも沈む圧倒的な黒さを実現でき、背景の映り込みを防止できるため、視覚表現にこれまでになく高いコントラストを提供可能である。

本成果は、サイエンス誌の姉妹誌 Science Advances に掲載され、同誌公式ツイッターでもピックアップされた。成果のプレス発表も行い、日本経済新聞、朝日新聞、毎日新聞、読売新聞などをはじめとして、新聞20紙に記事が掲載されたほか、テレビ報道(4件)、ラジオ出演(1件)、雑誌掲載(4件)などにつながった。

今後は、可視域での用途開発や実用化に向けた検討を進める。例えば、光源の明るさの基準となる絶対光放射計の光吸収体部への実装、迷光除去用の光トラップとしての活用など、各種先端光技術への応用を進める。将来的には光の乱反射を極力抑えたいプロ用途だけでなく、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する。

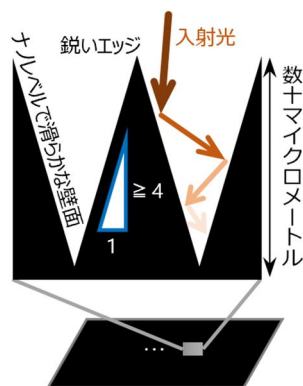


図1. 光閉じ込め構造の原理 ©産総研

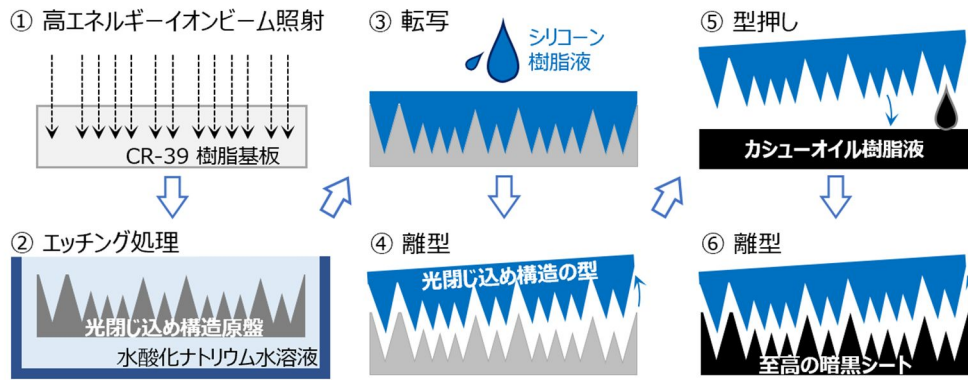


図 2. 光閉じ込め構造の作製（イオンビーム加工）および暗黒シートの製造方法
 (Science Advances 誌に掲載された論文¹ (DOI: 10.1126/sciadv.ade4853)の図 (CC-BY 4.0) を改変)

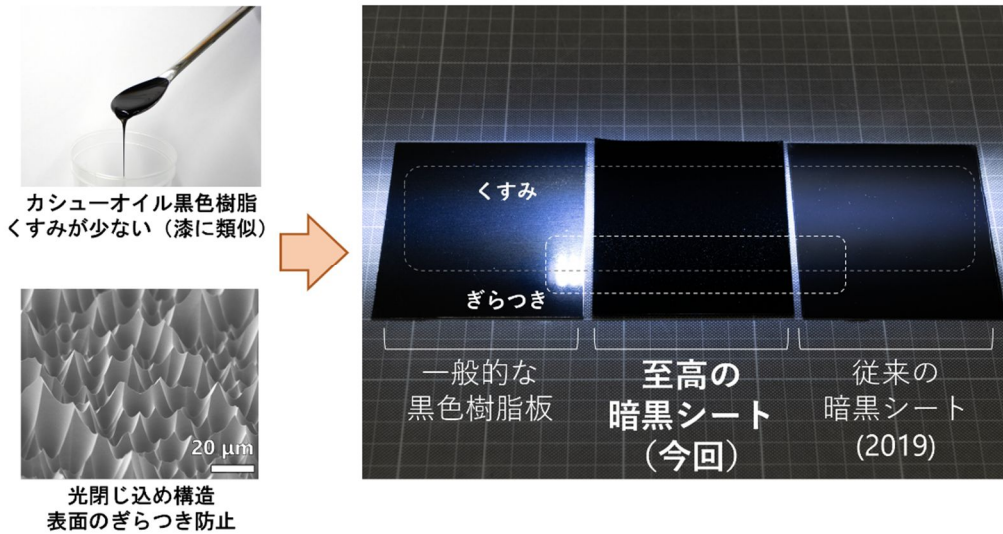


図 3. 本研究で開発した「至高の暗黒シート」©産総研

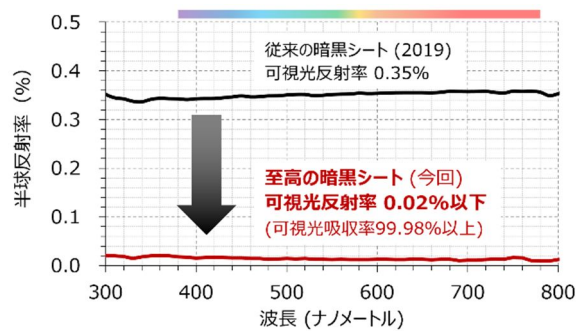


図 4. 「至高の暗黒シート」の分光半球反射率
 (論文¹に掲載された図 (CC - BY 4.0) を改変)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 雨宮 邦招、清水 雄平、越川 博、八巻 徹也	4. 巻 116
2. 論文標題 可視光を99.98%以上吸収する至高の暗黒シート	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 放射線化学	6. 最初と最後の頁 21-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 雨宮 邦招	4. 巻 78
2. 論文標題 【解説】光を99.98%以上吸収する至高の暗黒シート 触れる素材で黒さ世界ーを実現した光閉じ込め構造とは？	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 37-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 雨宮 邦招	4. 巻 93
2. 論文標題 光を99.98%以上吸収する至高の暗黒シート	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 科学	6. 最初と最後の頁 542-545
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Amemiya Kuniaki、Shimizu Yuhei、Koshikawa Hiroshi、Shitomi Hiroshi、Yamaki Tetsuya	4. 巻 9
2. 論文標題 Supreme-black levels enabled by touchproof microcavity surface texture on anti-backscatter matrix	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eade4853
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.ade4853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Yuhei, Imbe Masatoshi, Godo Kenji, Sasajima Naohiko, Koshikawa Hiroshi, Yamaki Tetsuya, Amemiya Kuniaki	4. 巻 61
2. 論文標題 High-precision flat-plate reference infrared radiator using perfectblackbody composite with a microcavity structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 517 ~ 517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.446426	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Yuhei, Koshikawa Hiroshi, Imbe Masatoshi, Yamaki Tetsuya, Godo Kenji, Sasajima Naohiko, Amemiya Kuniaki	4. 巻 46
2. 論文標題 Micro-cavity perfect blackbody composite with good heat transfer towards a flat-plate reference radiation source for thermal imagers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 4871 ~ 4871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.433028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 光を99.98%以上吸収する至高の暗黒シート
3. 学会等名 2023年度第1回光部品生産技術部会Web講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 高い光吸収率と接触耐性を併せ持つ暗黒シート
3. 学会等名 赤外線アレイセンサフォーラム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 雄平、井邊 真俊、神門 賢二、笹嶋 尚彦、越川 博、八巻 徹也、雨宮 邦招
2. 発表標題 High-emissivity flat-plate reference infrared radiator for reliable noncontact fever screening with thermal imagers
3. 学会等名 Emerging Scientist Workshop (ESW) 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水雄平、井邊真俊、神門賢二、笹嶋尚彦、越川博、八巻徹也、雨宮邦招
2. 発表標題 非接触検温の信頼性向上に貢献する高精度平面黒体装置の開発
3. 学会等名 第17回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会、日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構 施設利用共同研究、弥生研究会成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水雄平、井邊真俊、神門賢二、笹嶋尚彦、越川博、八巻徹也、雨宮邦招
2. 発表標題 非接触発熱者検知の信頼性向上を目指した高精度温度基準用黒体プレートの開発
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 雨宮邦招
2. 発表標題 全ての光を吸収し、耐久性も併せ持つ究極の暗黒シート
3. 学会等名 色材アドバンスセミナー 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kuniaki Amemiya
2. 発表標題 Accurate on-site calibration of fever-screening thermography using novel flat-plate perfect blackbody
3. 学会等名 ITRI-AIST Joint Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 雨宮邦招、清水雄平、越川博、井邊真俊、八巻徹也、蔀洋司
2. 発表標題 Novel perfect blackbody sheet having nano-precision surface microtextures for a planar standard radiator
3. 学会等名 14th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>光を99.98%以上吸収する至高の暗黒シート https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230118/pr20230118.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	越川 博 (Koshikawa Hiroshi) (00354936)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹技術員 (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清水 雄平 (Shimizu Yuhei) (90828005)	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・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関