

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11940

研究課題名（和文）あらゆる光をとらえて逃がさない、完全黒体シートをイオンビーム加工でつくる

研究課題名（英文）Broadband Perfect Blackbody Sheets via Ion Beam Fabrication

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、表面反射がゼロに近い黒体材料を製造する技術を開発した。高エネルギーイオンビーム加工により形成したマイクロ空洞構造を原盤として、黒体材料のシートを転写する技術を確立した。製造した黒体シートは、紫外～可視～近赤外～中赤外の波長範囲で、0.5%の非常に低い反射率を示した。特に、中赤外域での反射率は0.1%と極めて低いため、接触、繰返し曲げ、引っかきを行っても性能を維持していた。また、本黒体材料は100 mm×80 mmの大面积にしても高い均一性を有していることを確認した。これにより分光分析における迷光除去や熱画像検知など、光計測技術の格段の性能向上に貢献できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「暗黒シート」はシリコンゴムの柔軟性を保っており、曲げても触っても、粘着テープを貼りつけて剥がしても、表面の微細空洞構造が損なわれないため、性能が劣化せず、高い光吸収率を維持できる。このように、耐久性と、極めて高い光吸収率を併せ持つ黒色素材は世界初である。また、この暗黒シートは原盤から繰返し作製できるため、量産性もよい。また、他の素材への拡張性の高さも示すことができた。美しい黒が映える新素材として、例えば高級感ある黒の演出や、黒が沈む高鮮明映像への貢献のほか、サーモグラフィーでの熱赤外線乱反射の防止など、一般環境での幅広い応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have been developed novel broadband ultralow reflectance optical absorbers having microtextured surface using etched ion tracks. Poly allyl diglycol carbonate (CR-39) plastic plates were irradiated by swift heavy ions from AVF cyclotron, followed by being etched in NaOH solution to produce etch pits filled on all over the surface; after that they were replicated into elastomeric blackbody sheets. The fabricated optical absorbers exhibited very low reflectance of 0.5% in wavelength ranging from UV, VIS to near-IR and mid-IR. In particular, their reflectance at the mid-IR was as low as 0.1%, while maintaining their high resilience against direct contact, repeated bending and scratching. We also confirmed that a blackbody sheet had high uniformity even with a large area of 100 mm × 80 mm.

研究分野：光計測

キーワード：暗黒シート 光吸収体 黒体 極低反射 イオンビーム 表面微細加工 高耐久 フレキシブル

## 1. 研究開始当初の背景

黒色材料は、太陽熱エネルギー利用、迷光・乱反射防止、光センサーの吸収体、熱放射体など、幅広い目的で用いられており、用途によっては 100% に近い光吸収率も必要とされている。従来の黒色材料のうち、配向カーボンナノチューブ(VACNT) やブラックシリコン、ニッケルリン(NiP)ブラックなどは、平板型でありながら可視域から近赤外域において吸収率 99.5% 以上を誇る。VACNT は CNT が低面密度に配向することで表面での実効屈折率変化を小さくし、表面反射を抑えつつ、CNT 自身の光吸収性も生かして 0.1% 未満の極低反射率となっている。ブラックシリコンや NiP ブラックでは、表面にミクロなピット/スパイク構造が形成されており、そこで入射光が多重反射する間に吸収が促進され、正味の反射率が抑えられる。一方で、VACNT は基板から剥離しやすく、またブラックシリコンや NiP ブラックも表面構造が損なわれると低反射率でなくなる。すなわち、極低反射材料はいずれも機械的に脆く、取扱が困難という課題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、高エネルギーイオンビームを用いたマイクロ加工技術を駆使し、材料表面を反射ゼロの完全黒体とする技術の開発を目的とした。材料表面の無反射黒色化技術には、上述の他にもモスアイ(蛾の目)ナノ構造や金黒などがあったが、適応波長範囲が狭かったり、損傷しやすかったりした。研究代表者らは、丈夫かつ、広帯域(紫外～中赤外)にわたる無反射黒色表面の実現には、数十  $\mu\text{m}$  程度の「大き目な」表面凹凸構造が有効なこと、及びこうしたマイクロ空洞構造はイオントラック技術でのみ加工可能なことを見出し、開発に取り組んできた。本研究では、従来技術では作製が特に難しかった、長波長(中赤外域)用途も含めて実用的な完全黒体シートを開発し、分光分析や熱画像検知など、光計測技術の格段の性能向上に貢献することを目指した。

## 3. 研究の方法

研究代表者らはこれまでに、光吸収率の高い材料の研究開発を行い、材料の表面に微細な凹凸構造を作製して、その鋭さや、サイズ、組成の条件を調整すると、光吸収率を極限まで大きくできることを見いだしていた。そこで、サイクロトロン加速器のイオンビームを用いた微細加工技術を駆使して、丈夫な素材上に微細な凹凸構造を作ること、あらゆる光を吸収して、高い耐久性も併せ持つ、新しい光吸収材料の研究開発に取り組んだ。イオントラックエッチング法を応用すれば、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。今回、これを原盤として黒色シリコンゴムに転写することで、紫外線～可視光～赤外線全域で極低反射な「暗黒シート」の作製を行った。

## 4. 研究成果

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。微細な空洞に光が入射すると、壁面で何度も反射を繰り返して、最終的に正味の反射率がゼロ近くまで低減するので光吸収率は 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。微細空洞構造により、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、円錐状空洞構造のエッジは十分に鋭くする必要がある。また、紫外線～可視光～赤外線の全てを吸収させるには、空洞の深さは最大波長以上の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、通常の微細加工技術(リソグラフィや超精密機械

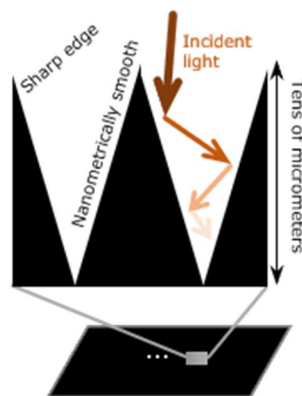


Figure 1. Mechanism of perfect optical absorption with microtextured surface.

加工など)では作製できない。今回は、サイクロトロン加速器からのイオンビームを用いて、この難しい構造を作製した。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、均質で非晶質性の樹脂(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た。手順はまず、CR-39樹脂基板(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(260 MeV)を $10^6$  / $\text{cm}^2$ 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することで、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。ピット開口径は平均10 $\mu\text{m}$ 程度であった。こうしてマイクロ空洞加工したCR-39樹脂素材はしかし、元々が無色透明なため、そのままでは黒色素材とはならない。また、別の素材に同じ加工を直接高精度に施すのは難しい。

そこで、別の黒色材料に拡張して可視域でも黒いシートを作成するために、微細空洞構造を転写する方法を開発した(図2)。今回、微細空洞構造を作製したCR-39樹脂基板を原盤として利用し、カーボンブラックを混練したシリコンゴムの表面に微細構造を転写することで、可視域でも黒い「暗黒シート」を作成した(図3)。その分光反射率値は、分光光度計(PerkinElmer LAMBDA 900)、及びFTIR(JASCO FT/IR-6300typeA)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全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、Infragold: 反射率約90% MIR用)との比較を通じて算出した。その結果、紫外線~可視光~赤外線のあらゆる光を99.5%以上も吸収することが確認できた(図4)。特に熱赤外線の波長域では、世界最高水準となる99.9%以上の光吸収率が得られた。この「暗黒シート」はシリコンゴムの柔軟性を保っており、曲げても触っても、粘着テープを貼りつけて剥がしても、表面の微細空洞構造(図5)が損なわれないため、性能が劣化せず、高い光吸収率を維持できる。このように、耐久性と、極めて高い光吸収率を併せ持つ黒色素材は世界初である。

今回開発した暗黒シートは、原盤から繰り返し作製できるため、量産性もよい。また、他の素材への拡張性の高さも示すことができた。美しい黒が映える新素材として、例えば高級感ある黒の演出や、黒が沈む高鮮明映像への貢献のほか、サーモグラフィーでの熱赤外線の乱反射の防止など、一般環境での幅広い応用が期待される。

本成果は、英国王立化学会の論文誌J. Mater. Chem. Cに掲載され、Outside back coverにも採択された。本件技術について、国際出願も含め3件の特許を出願済みである。また、成果のプレス発表も行ったところ、大きな反響が得られ、読売新聞、日本経済新聞、朝日新聞をはじめとして、新聞23紙に記事が掲載されたほか、テレビ報道(2件)、ラジオ出演(1件)、雑誌掲載(6件)、招待講演(2件)などにつながった。

今後は、可視光に対しても99.9%以上の光吸収率を目指す。また、広く一般用途に使用できるよう、実用化のための研究開発を進める。

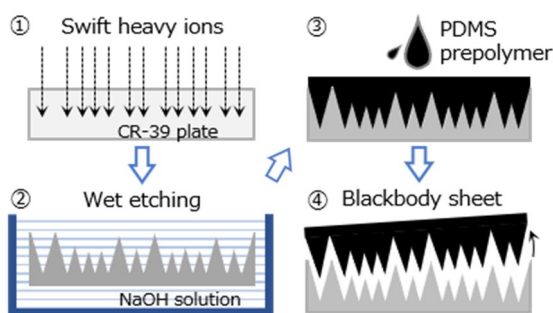


Figure 2. Fabrication process of a perfect blackbody sheet from microtextured elastomer.

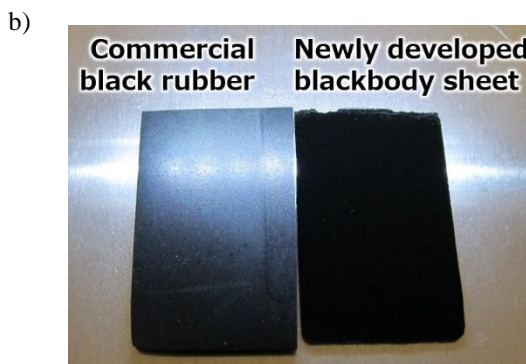
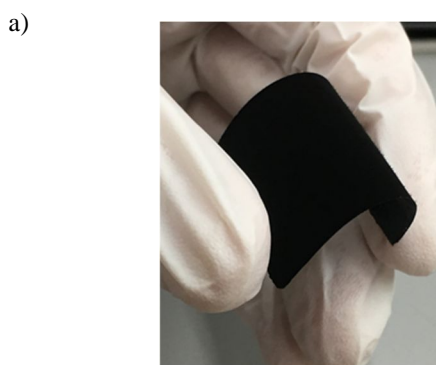


Figure 3. Newly developed perfect blackbody sheet from microtextured elastomer. a) bendable.

b) comparison with commercial black rubber.

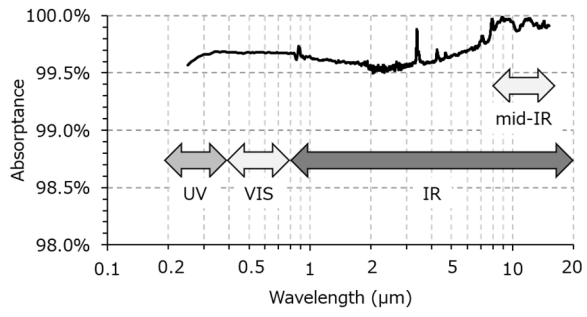


Figure 4. Spectral absorbance of the perfect blackbody sheet.

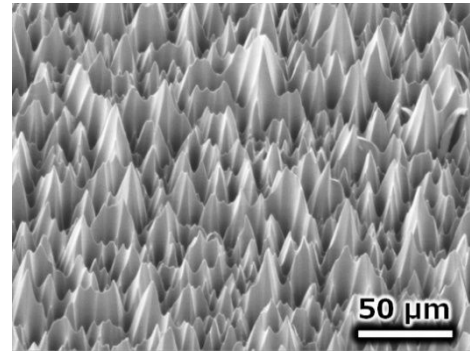


Figure 5. SEM image of the surface of the perfect blackbody sheet.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kuniaki Amemiya, Hiroshi Koshikawa, Masatoshi Imbe, Tetsuya Yamaki, Hiroshi Shitomi	4. 巻 7
2. 論文標題 Perfect blackbody sheets from nano-precision microtextured elastomers for light and thermal radiation management	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 5418-5425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/C8TC06593D	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 Yuhei Shimizu, Hiroshi Koshikawa, Masatoshi Imbe, Tetsuya Yamaki, Kuniaki Amemiya	4. 巻 28
2. 論文標題 Large-area perfect blackbody sheets having aperiodic array of surface micro-cavities for high-precision thermal imager calibration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22606-22616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.397136	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 雨宮 邦招、清水 雄平、越川 博、井邊 真俊、八巻 徹也、部 洋司
2. 発表標題 Large-Area Perfect Blackbody Sheets from Nano-Precision Microtextured Elastomers
3. 学会等名 Frontiers in Optics + Laser Science（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 「光吸収率99.5%以上」と「高い耐久性」を両立した「暗黒シート」開発への挑戦
3. 学会等名 ものづくりパートナーフォーラム東京2019（招待講演）
4. 発表年 2019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、薮 洋司
2. 発表標題 マイクロ空洞加工による面状黒体（暗黒シート）の開発と大面積化の検討
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 TIARAサイクロトロンでのイオンビーム加工で実現 「全ての光を吸収」×「高い耐久性」を両立した「究極の暗黒シート」
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ201（招待講演）
4. 発表年 2019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、薮 洋司
2. 発表標題 全ての光を吸収し、耐久性も高い究極の暗黒シート
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 雨宮 邦招、越川 博、井邊 真俊、八巻 徹也、薮 洋司
2. 発表標題 高エネルギーイオントラックエッチング法に基づく完全黒体材料の開発
3. 学会等名 第13回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会 および原子力機構・量研施設利用一般共同研究、原子力専攻施設共同利用（弥生研究会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 あらゆる光をとらえて逃さない黒い材料
3. 学会等名 産総研・NEDO合同フォーラム
4. 発表年 2019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 あらゆる光をとらえて逃がさない黒い材料の開発
3. 学会等名 2018年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 雨宮 邦招
2. 発表標題 測光・放射標準（光の標準）- 精密計測と関連技術
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 光吸収体の製造方法	発明者 雨宮 邦招	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、WO/2019/087439	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 光吸収体およびその製造方法	発明者 雨宮 邦招	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-149055	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 赤外線吸収体、その製造方法、黒体輻射装置および放射冷却装置	発明者 雨宮 邦招、清水 雄平	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021- 27602	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究ハイライト 全ての光を吸収する究極の暗黒シート  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/highlights/2019/vol3/index.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/highlights/2019/vol3/index.html)  
【1分解説】全ての光を吸収する究極の暗黒シート【産総研公式】  
<https://www.youtube.com/watch?v=TVuU90MiFVU&feature=youtu.be>  
世界中の“暗黒”の裏側には「計量標準」の人間がいる！ 吸収率99.5%！究極の暗黒シートができた  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/bluebacks/no25/](https://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/bluebacks/no25/)  
全ての光を吸収する究極の暗黒シート - 世界初！高い光吸収率と耐久性を併せ持つ黒色素材 -  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2019/pr20190424/pr20190424.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2019/pr20190424/pr20190424.html)

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------