

[21007]

イオンビーム加工による光閉じ込め構造型完全暗黒シート材料の開発 Development of Light-Confined Structured Perfect Blackbody Sheet by Ion Beam Fabrication

雨宮邦招^{#A)}, 清水雄平^{A)}, 越川博^{B)}, 井邊真俊^{A)}, 神門賢二^{A)}, 笹嶋尚彦^{A)}, 八巻徹也^{B)}

Kuniaki Amemiya^{#A)}, Yuhei Shimizu^{A)}, Hiroshi Koshikawa^{B)},

Masatoshi Imbe^{A)}, Kenji Goudo^{A)}, Naohiko Sasajima^{A)}, Tetsuya Yamaki^{B)}

^{A)} National Metrology Institute of Japan, AIST

^{B)} Department of Advanced Functional Materials Research, QuBS, QST

Abstract

We have been developing perfect blackbody sheets having microtextured surface based on etched ion tracks. Poly (allyl diglycol carbonate) plastic plates were irradiated by swift heavy ions from AVF cyclotron of TIARA, followed by being etched in NaOH solution to produce etch pits filled on all over the surface. Then the fabricated micro texture was transferred by replica molding to form the blackbody sheets. We mounted the blackbody sheet on a temperature controller to build a flat-plate reference infrared radiator. As a result, we achieved high-precision temperature calibration of fever screening thermographs at an unprecedentedly small uncertainty (~ 0.1 °C).

Keyword: blackbodies, perfect absorbers, microstructures, surface modification, infrared

1. はじめに

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。従来まで世界一黒い材料として知られる、配向カーボンナノチューブ(VACNT) [1,2]は、可視域から赤外域にわたり吸収率 99.9 %以上を誇る。しかし、VACNT は基板から剥離しやすく、また表面構造が損なわれると低放射率でなくなるため、取扱が困難という課題があった。

そこで筆者らは、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いる。量研・高崎研 TIARA サイクロトロン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[3,4]。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[4,5]。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できた[5,6]。

この暗黒シートは平面状の黒体とみなせるため、プランクの黒体放射の法則に基づき、シートの温度だけで放射スペクトルが決まる、基準赤外線放射体となりえる。新型コロナウイルス感染症のパンデミックに伴い、非接触型の体温計やサーモグラフィが普及してきたが、暗黒シートを実装した平面黒体装置は、これら非接触体温計用の極めて高精度な温度基準になると考えられる。これまで、暗黒シートの平面黒体応用を見据え、大面積化したシートの特性評

価などを進めていた[7]。2021 年度は、暗黒シートの高い放射率を保ちながら熱的特性も高め、平面黒体装置に実装、性能評価を行ったので報告する。

2. 実験方法と結果

2.1 高い放射率及び温度制御性を両立する黒体プレートの開発[8]

非接触で高速に表面温度分布を取得できる熱画像装置は、感染症まん延防止策の一つとして発熱者検知に利用されている。平面黒体装置(温度基準)は、発熱者検知の現場で熱画像装置の測定誤差の補正に用いられ、より高精度な測定を可能とする。平面黒体装置には高放射率が求められるが、従来の高放射率材料では機械的耐久性に課題があり、現場使用が困難であった。我々は、高エネルギーイオントラックエッチング法により、多数の微小円錐状空洞構造(アンチリフレクション (AR) 構造、図 1)を形成した樹脂シート(暗黒シート)を開発し、放射率 > 0.998 と耐久性の両立を実証した[5,7]。この暗黒シート開発の知見を応用し、平面黒体装置の温度基準面用の黒体プレートを開発した。

高い放射率、及び温度制御性を両立するこの黒体プレートは、表面に AR 構造をもつ樹脂をアルミニウム基板上に形成したものである。量研のイオン照射研究施設(TIARA)の azimuthally varying field (AVF) サイクロトロンを用いたイオントラックエッチングにより、ポリアリルジグリコールカーボネート (CR-39) 板表面に AR 構造を形成し、それをトレースしたレプリカをシリコン (PDMS) で作製した。樹脂の AR 構造はこのレプリカを型とした形状転写により形成した。黒体プレートを実装する場合、基板(裏面)側で温度が制御される。表面の輝度温度の不確かさを小さくするには、表裏面の温度差が小さい方が良いため、樹脂は薄く(厚み約 150 μm)形成した。

[21007]

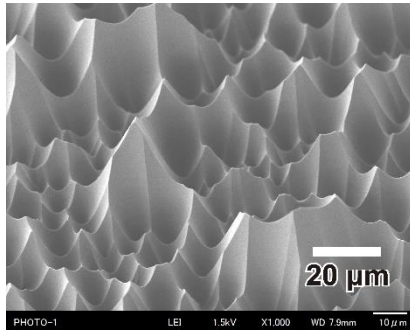


Figure 1. Anti-reflection surface micro texture of the perfect blackbody plate.

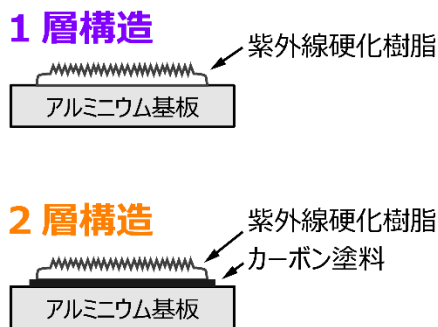


Figure 2. Schematic of the perfect blackbody plate configuration.

代表的な2種の暗黒プレートの構造を図2に示す。試料Ⅰ（1層構造）：アルミニウム基板上にAR構造の紫外線硬化樹脂層を形成した。試料Ⅱ（2層構造）：アルミニウム基板上にカーボン塗料層及びAR構造の紫外線硬化樹脂層を形成した。フーリエ変換赤外分光法（FTIR）により試料の半球反射率を測定し、放射率を評価した。また、樹脂部の表裏面の温度差を一次元熱伝達モデルで計算し、温度制御性を評価した。

熱画像装置で測定される波長 $7\ \mu\text{m}$ から $14\ \mu\text{m}$ における反射率（ $=1-\text{放射率}$ ）が低いほど、光学的に優れた黒体プレートといえる。1層構造の場合、樹脂の光吸収係数が低い波長では樹脂内で光を吸収しきれず、基板で反射することにより反射率が上昇した（図3）。一方、2層構造ではカーボン塗料層が光吸収をアシストすることで、広い波長域で <0.002 の反射率（放射率 >0.998 ）を達成した。カーボン塗料層を含めた樹脂層厚みを $250\ \mu\text{m}$ としたとき、周囲温度 22.0°C 、裏面温度 37.0°C のときの表裏温度差は、約 0.15°C と計算された。高い放射率と、小さい表裏温度差を実現できたことで、輝度温度の不確かさ 0.1°C 以下の高精度平面黒体装置の開発につながると期待される。

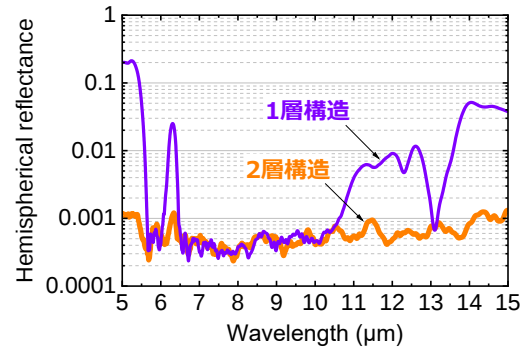


Figure 3. Infrared hemispherical reflectance of the perfect blackbody plate.

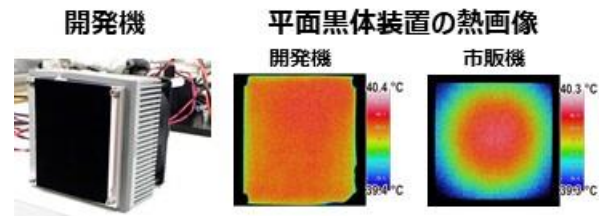


Figure 4. Prototype of the flat-plate blackbody infrared radiator.

2.2 黒体プレートの平面黒体装置への実装[9]

前述の黒体プレートを用いて平面黒体装置試作機を作製した。温度調節ステージに単純にマウントした黒体プレートの面内温度分布は、ステージの温度分布を反映して中央部が高く周辺部が低くなっていた。暗黒プレートとステージ間に、面内方向に熱伝導率の高い黒鉛シートを挟むことで面内温度均一性を向上させ、面内の最大・最小の温度差を約 0.1°C に改善できた。この温度均一性のほか、放射率、温度安定性、上位標準による校正の不確かさを評価し、試作機の輝度温度の拡張不確かさ $U\sim 0.1^\circ\text{C}$ （信頼の水準約95%）を達成した。市販品の平面黒体装置は放射率が不十分のため、他の性能が同じと仮定しても $U\sim 0.4^\circ\text{C}$ であるので、今回開発した高放射率平面黒体装置では精度を大幅に向上できた（図4）。これを温度基準として、熱画像装置による精確な表面温度計測が実現でき、発熱者スクリーニングの信頼性向上に繋がると期待される（図5）。

3. まとめ

2021年度は、暗黒シートの高い放射率を保ちながら熱的特性も高め、平面黒体装置に実装、性能評価

[21007]

を行った。その結果、放射率 >0.998 で、かつ表面温度を約 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内に制御できる黒体プレートの作製に成功した。この黒体プレートを実装した平面黒体装置の試作機は、輝度温度の拡張不確かさ $U\sim 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ というこれまでにない精度を達成した。

暗黒シートの成果は、2019年4月のプレス発表[10]以降、大きな反響が得られており、2021年度も引き続き、多くの問い合わせや、国内外の招待講演、特許出願・登録[6,11,12]などにつながった。

今後は、開発した高精度平面黒体装置を非接触発熱者検知用サーモグラフィ等の精確な温度基準として社会実装していく。また、現状では性能が限定的な可視域における光吸収性能も今後さらに高め、用途開発を進めていく。

謝辞

本研究の一部は、AMED 令和2年度ウイルス等感染症策技術開発事業(JP20he0822011)、及び科研費(JP21H03753)の支援を受けた。

参考文献

- [1] Z.P. Yang et al., Nano Lett. 8 (2008) 446.
- [2] K. Mizuno et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 106 (2009) 6044.
- [3] K. Amemiya et al., Appl. Opt. 51 (2012) 6917.
- [4] K. Amemiya et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 356–357 (2015) 154.
- [5] K. Amemiya et al., J. Mater. Chem. C 7 (2019) 5418
- [6] 特許第 6961255 号 光吸収体の製造方法 (2021.10.15)
- [7] Y. Shimizu et al., Opt. Express 28 (2020) 22606.
- [8] Y. Shimizu et al., Opt. Lett. 46 (2021) 4871.
- [9] Y. Shimizu et al., Appl. Opt. 61 (2022) 517.
- [10] プレス発表, 産総研・量研共同, 「全ての光を吸収する究極の暗黒シートー世界初! 高い光吸収率と耐久性を併せ持つ黒色素材ー」, 2019.4.24
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2019/pr20190424/pr20190424.html
- [11] PCT/JP2021/030293 (WIPO) 光吸収体およびその製造方法 (2021.8.19)
- [12] PCT/JP2022/003824 (WIPO) 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 (2022.2.1)

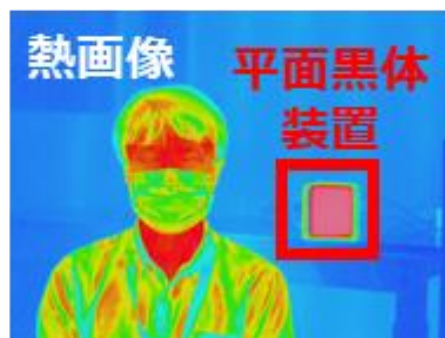


Figure 5. Demonstration of the real-time calibration of a fever screening thermograph.