

特集

超低反射塗膜を実現する構造漆黒顔料
「LUSHADE BLACK」の開発と応用

石原産業

機能性色材事業部 開発グループ

東 龍誠

1. はじめに

光を効果的に吸収し、反射を最小限に抑える黒色低反射材料は、光学機器をはじめ美術分野、エレクトロニクス、宇宙開発など様々な産業で広く利用・展開されている。また近年の技術革新と産業の高度化による光学機器の高性能化に伴い、カメラやセンサーにおける迷光や不要な反射を極限まで抑える高品質な低反射材料への需要が急速に高まっている¹⁾。これらの材料は、精密な光学測定や高感度センサーの性能向上、さらには宇宙望遠鏡の内部光学系など、幅広い用途で重要な役割を果たしている。

従来、低反射材料として広く用いられてきたのは、カーボンブラックを用いた黒色塗料、黒色アルマイト、植毛布などだ。中でもカーボンブラックは優れた着色力と漆黒性を有し、様々な産業で利用されている。しかし塗膜表面では、空気と樹脂の屈折率差に起因するフレネル反射を完全に抑制することが困難で、塗膜の見た目は黒いものの光沢感がある。この光沢を抑制するために樹脂ビーズやシリカなどの添加剤を加えて光を塗膜表面で散乱させ、光沢感のある程度低下させることができる。しかしながら塗膜は白ボケしてしまい、深い黒色を維持することが難しいというジレンマが存在していた。一方、黒色アルマイトや植毛布の場合、表面に微細な凹凸形状を形成させる方法や、十分な厚みを持たせることで、光を閉じ込める構造を作り出し、反射を抑制している。どちらも塗膜ではなく構造体のため施工面積に限りがあるほか、立体物への適用は難しい。最近では高度な低反射材料が開発されており、例えばカーボンナノチューブの垂直配向膜の研究がある。これは高温・高真空環境下での化学気相成長法によりカーボンナノチューブを垂直配向させ、配向膜の屈折率を疑似的に空気と同等にすることで極めて低い反射率を実現している²⁾。また高

エネルギーイオンビームと化学エッチングにより微細な凹凸パターン（マイクロキャビティ構造）を有する基板を製作することが可能である。このマイクロキャビティ構造は精密な光閉じ込め構造であり、別の材料に転写することで高い低反射性能が得られる報告例もある³⁾。これらの材料は、従来の低反射材料を大きく上回る性能を示し、黒色低反射材料への注目をさらに高めている。しかしながら、共通して基板全体に微細な凹凸を付与するような光閉じ込め構造を要するため、複雑なプロセスが必要となり、大面積への適用が難しいといった課題がある。

当社は特殊な合成技術により顔料粒子そのものに光閉じ込め構造を付与させた低反射構造漆黒顔料「LUSHADE BLACK」を開発した。本製品は顔料分散体であることから一般的な塗料と同様の方法で容易に塗料化・塗装が可能で、従来の低反射材料が抱えていた製造プロセスの複雑さや大面積適用の困難さといった課題を克服している。本稿では、本製品の特徴および塗料化から塗装例、塗膜物性について詳細に説明する。

2. 設計および特徴

本製品は硫化ビスマスという無機材料を用いた顔料分散体である。硫化ビスマスはその電子構造に起因する光吸収特性により可視光域の光を効果的に吸収できる無機材料だが、近赤外域における吸光係数は比較的小さいため、通常硫化ビスマス顔料は赤黒い外観を呈し、黒色度において一般的な黒色顔料であるカーボンブラックに劣っていた。そこで当社は化学組成ではなく、粒子形状の観点から光を制御できないかと構造色に着目した。

自然界には物質の化学的組成ではなく、その微細構造により光を制御し、色を発現する現象が存在する。これは「構造色」と呼ばれ、蝶の羽や孔雀の羽など、多くの生物で観察される⁴⁾。構造色は、干渉、回折、散乱などの光学的現象に基づいており、従来の色素や顔料とは異なるメカニズムで色彩を生み出している。特に当社が注目したのは、フ

問い合わせ

機能性色材事業部 企画グループ

☎ 03-6256-9119

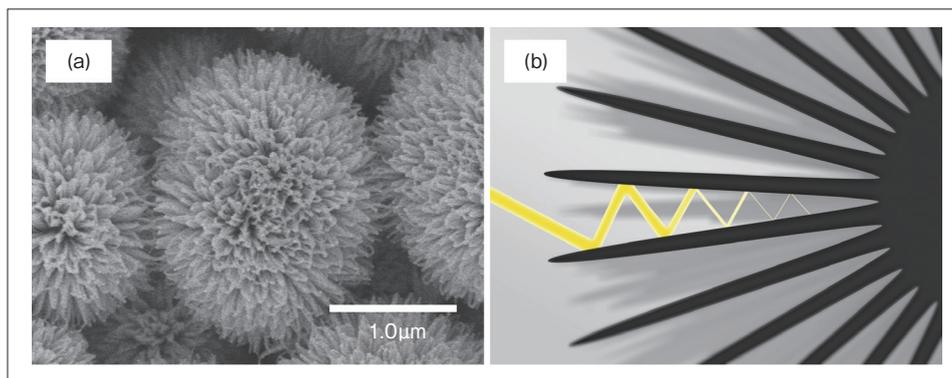


図1 (a)LUSHADE BLACKのSEM像、(b)ウニ棘状構造に入射した光のイメージ

ウチョウ科オナガカンザシフウチョウの羽毛構造である。この鳥は自然界で最も黒い鳥として知られており、その羽毛は極めて微細な周期的配列構造を有している。この特殊な構造により、入射光の最大99.95%を吸収することが報告されている⁵⁾。この驚異的な光吸収メカニズムに着想を得て、硫化ビスマスを材料とする新しい顔料の開発に取り組んだ。

本製品は、硫化ビスマス粒子そのものに光吸収メカニズムを付与するよう形状を工夫した開発品で、図1(a)に示すように、中央から放射状に広がる多数の針状構造を有するウニの棘に似た微細構造を特徴としている。これにより、入射光は針状構造の間に閉じ込められ、その間で多重に散乱しながら効果的に減衰する(図1(b))。

この効果的な光吸収メカニズムにより、従来の黒色顔料を大きく上回る低反射性能を実現している。粒子の大きさは数 μm と従来よりやや大きめで、可視光を効率良く吸収するほか、塗膜表面に微細な凹凸が形成されることで低光沢な塗膜を得ることができる。同時に、針状構造が光を効果的に吸収するため、深い黒色を維持できる。従来の低反射材料が塗膜や基材の構造最適化によって低反射率化を図ってきたのに対し、本技術は顔料そのものの微細構造を最適化することで、容易に優れた低反射特性を発現させることが可能となる。

3. 塗料化・塗装例

本製品は硫化ビスマスをプロピレングリコールモノメチルエーテル(PGME)に分散させた溶剤分散体である。PGMEが相溶する任意の樹脂系へ適用でき、容易に塗料化が可能である。以下、当社で実施した塗料作製例および塗装方法について紹介する。

塗料化にあたっては、市販で入手可能な自動車補修用ベースコートの補正用クリヤ塗料をベースとして選択し、比較

として同用途の黒原色塗料を用いた。塗料作製方法としては本製品とクリヤ塗料を自転・公転ミキサーやラボディスペアにより10分程度溶解分散させることで容易に低反射塗料(本塗料)を作製可能である。ただし一般的な顔料とは異なり、分散方法と顔料濃度に関して注意する必要がある。

まず分散方法について、ガラスビーズやジルコンビーズなどのメディアを用いた分散は推奨しない。これは、メディアによる強力な分散によってウニ棘状構造が破壊され、光吸収性能が低下し、本来の低反射性能を発現できなくなるためである。この点は、一般的に強い分散を必要とするカーボンブラックとは対照的に、比較的簡易な分散方法で優れた低反射塗料が得られるという利点もある。

次に顔料濃度に関する注意点として、本製品は硫化ビスマスを顔料として使用しており、一般的な黒色顔料であるカーボンブラックよりも比重は大きく、また粒径もマイクロオーダーと比較的大きい。そのためカーボンブラックと同じ添加量を用いての単純な置き換えでは顔料濃度が不足し、十分な低反射性能を発現できない可能性が高い。当社の検討では塗膜中の顔料体積比を約50%程度まで上げることで効率良く低反射性能を発現することを確認している。一方、顔料濃度が低い場合は顔料のウニ棘状構造が樹脂に覆われ、塗膜表面は空気-樹脂界面での反射により光沢が出てしまう。ただし見た目の黒さはカーボンブラックと同等の性能を示す。このように適切な分散方法と十分な顔料濃度を確保することで、従来の黒色顔料では達成困難であった低反射性能と黒色を両立する塗膜を形成することが可能となる。

また塗装方法についても特殊な塗布は必要とせず、アプリケーションをはじめ、スプレー、エアブラシ等を用いることができる。そのため曲面や複雑な形状を有する様々な対象物へ塗布が可能だ。表1に示しているスプレー塗装条件で、本塗料をカーシェイプの左半分、比較として自動車

CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH CONVERTECH

表1 LUSHADE BLACK 塗料を用いたスプレー塗装条件

塗料希釈率	15% (クイックシンナー使用)
使用スプレーガン	アネストイワタW-101-BG
口径	1.3mm
パターン調整ネジ	2.0回転
吐出量	1.5回転
手元圧力	0.2MPa
ガン距離	20cm
パターン重ね幅	1/3
塗布回数	2~3回



図2 カーシェイプ(左: LUSHADE BLACK 塗料、右: 自動車補修用黒塗料)

補修用黒塗料を右半分に塗装した(図2)。右半分は見た目の黒さは感じるものの、光沢があるため対象物がどんな形をしているのか曲面部分を把握することができる。一方で本塗料を塗装した左半分に注目すると、対象物から反射する光が少ないためどのような形状をしているのか分かりにくく、まるで平面に錯視するような低反射塗膜となっている。

4. 塗膜物性評価

次に、スプレー塗装で作製した塗膜の各種光学特性の評価結果を表2に示す。カラーおよび反射率の測定には、積分球を用いた正反射を含むSCI方式を採用した。比較として用いた自動車補修用黒塗料の反射率(550nm)は4.32%であり、これは空気と樹脂の屈折率差に起因する反射によるもので、カーボンブラックでは抑制が難しい。一方、本

表2 作製した塗膜の各種光学特性

サンプル	カラー (SCI/D65)			反射率 (%)	光沢	
	L*	a*	d*		550nm	60°
LUSHADE BLACK塗料	5.59	-0.43	-0.79	0.64	0.0	0.0
自動車補修用黒塗料	24.76	-0.13	-0.46	4.32	91.4	99.2

塗料では反射率(550nm)が0.64%と非常に低い値を示した。本製品の粒子径は数 μm と比較的大きく、塗膜に凹凸を付与しやすい。また顔料濃度が十分高い場合、塗膜表面から一部露出したウニ棘状構造によって光を吸収し、白ボケのない低反射塗膜が得られている。光沢値も60°、85°ともに0.0と極めて低く、特に85°光沢のように平面に近い浅い角度から入射する光の反射を抑えることは一般に困難であることから、高い低反射性能を有していることが分かる。前項で述べた、塗装対象が平面に錯視する現象は、このようにどの角度からも光の反射が抑制され、観察者の目にほとんど光が返らないためである。また、カメラの鏡筒やレンズ周辺の遮光部材に対して浅い角度で入射する光は迷光となりやすく、画像上でゴーストやフレアの原因となるため、こうした反射を抑制できることはカメラ性能の向上にも寄与する。

図3ではより幅広い波長域の分光反射率を示している。近赤外領域に着目すると、比較の自動車補修用黒塗料では全波長域で一定の反射率が見られる一方、本塗料では近赤外領域の反射率が高くなっている。

可視光領域での低反射性能に加え、近赤外領域では反射する性質を併せ持つ。材料特性と構造設計により、可視光と赤外光に対して異なる光学応答を示す。主成分の硫化ビスマスは、そのバンド構造に起因して赤外領域の光を吸収しない性質を持つ。一方、特徴的なウニ棘状構造は可視光の吸収に特化して最適化されており、赤外光に対しては効果的な吸収機能を発揮しない。これらの特性が組み合わせることで、可視光を効率的に吸収しつつ赤外光を選択的に反射する独特の光学特性が得られる。図4は、それぞれの塗料で塗装したお面を可視光または赤外光で撮影した写真である。本塗料で塗装したお面は、可視光では反射が少ないため表情がほとんど見えないが、赤外線カメラで撮影す

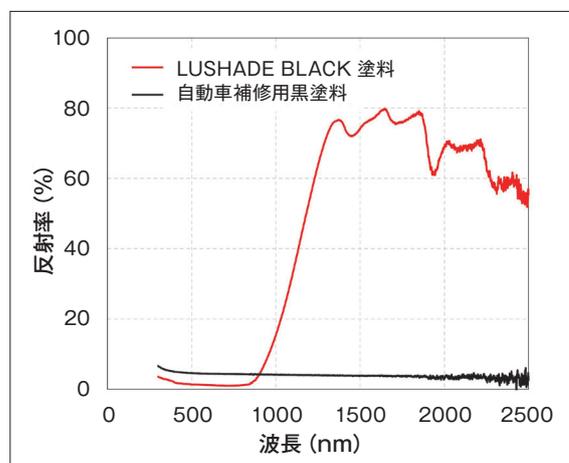


図3 作製した塗膜の分光反射率



図4 お面(左:LUSHADE BLACK 塗料、右:自動車補修用黒塗料)

ると、その反射特性により立体感や表情を確認できる。

また近年発展が目覚ましい自動運転技術において重要な赤外線センサーとしてLiDAR (Light Detection and Ranging) が注目を集めている。この赤外線センサーは、主に905nmや1550nmの赤外線レーザーを用いてその反射光を検知することで、物体の形や距離の把握ができる。しかし従来のカーボンブラックを用いた黒色塗料は赤外線領域の光を吸収するため、光が返ってこずLiDARでの検知が困難であるという課題が存在していた。これに対する解決策として、本塗料の性能評価を行った。評価には、Innovusion Inc. 社製の1550nm検知型LiDARセンサー「Falcon」を使用し、本塗料と従来の自動車補修用黒塗料をそれぞれ塗布したパネルの検知テストを実施した(図5)。

自動車補修用黒塗料を塗布したパネルは、LiDARセンサーによって検知されず、画像上では黒色として表示された。これは、従来の黒色塗料が赤外線を吸収する性質を持つことを裏付けている。一方、本塗料を塗布したパネルは、LiDARセンサーによって明確に検知され、画像上で明るく表示されている。この結果は、本塗料が赤外線を反射する特性を有していることを示しており、LiDAR技術に適用可能であること、また深い黒色を維持しつつ、LiDARセンサーによる物体検知を可能にすることを証明した。

5. おわりに

本稿ではウニ棘状構造を特徴とする漆黒顔料「LUSHADE BLACK」を紹介した。自然界で最も黒い鳥の羽毛構造から着想を得て、可視光を吸収しやすいウニ棘状構造を顔料自

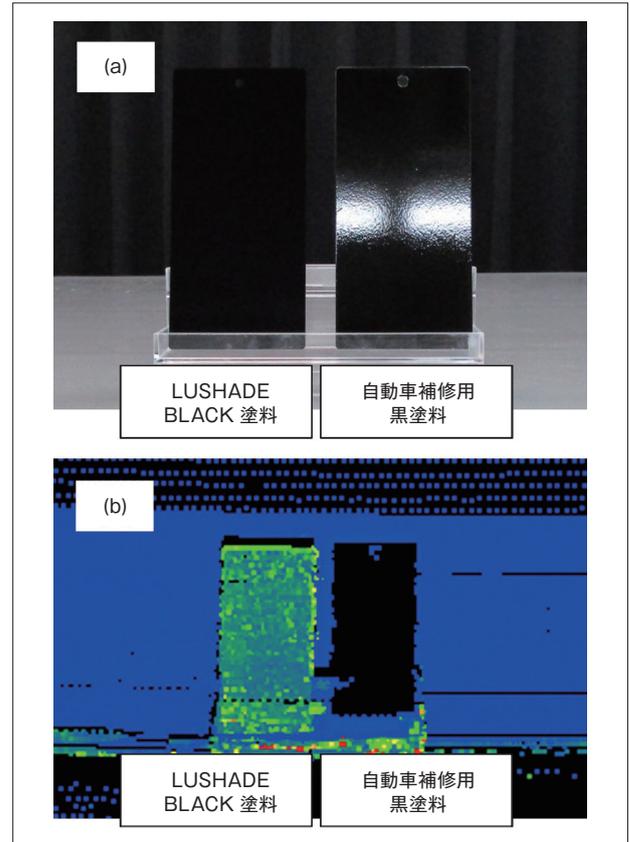


図5 (a)可視光カメラ撮影画像、(b)LiDAR (1550nm) スキャンデータ

身に付与することで、従来の黒色顔料では困難であった低反射塗膜の容易な作製・塗装が可能となった。可視光は吸収する一方、赤外線は反射する性質を有することから汎用的な黒色顔料であるカーボンブラックでは難しいLiDARのような赤外線センサーの被写体としても有用である。また本製品は顔料分散体であるため、様々な塗料系への適用可能性を秘めており、今後幅広い用途展開が期待される。

<参考文献>

- 1) J. L. Marshall, P. Williams, et al., JINST, 2015, 10, P12009.
- 2) J. Lehman, C. Yung, N. Tomlin, et al., Appl. Phys. Rev., 2018, 5, 011103.
- 3) K. Amemiya, Y. Shimizu, H. Koshikawa, H. Shitomi, T. Yamaki, Sci. Adv., 2023, 9, eade4853.
- 4) S. L. Burg, A. J. Paenell, J. Phys.: Condens. Matter, 2018, 30, 413001.
- 5) D. E. McCoy, T. Feo, T. A. Harvey, R. O. Prum, Nat. Commun., 2018, 9, 1.