

反射に加え透過でも役立つ モルフォチョウの光学特性

齋藤 彰^{*,**}

1. はじめに

我々はモルフォチョウの不思議な発色に魅せられ、長年さまざまな方向で研究を続けてきた。はじめに実作・実証により発色原理解明を行ったのは20年近く前である⁽¹⁾。そこにはナノスケールの規則性と不規則性(乱雑さ)という相矛盾する性質をうまく組み合わせた、自然の奥深い匠の技があった。その後すぐ、応用上の特異な利点が多いことに気づき、工学的な研究を開始した。しかし、本種の光学特性はナノ構造に起因するため、現実味のある生産技術には多くの課題があった。それらの課題を1つずつ解決しつつ、5年ほど前までには特性制御から量産プロセス、乱雑さを含む設計法、さらに形状の自由化(フレキシブル等)に至るまで、多くの課題を解決してきた⁽²⁾。

ところがここ数年で、それまでとは全く異なる方向で、新たな応用価値を見出すに至った。それは、反射でなく透過という逆の方向性である。上記の乱雑さとナノ構造の特異性をうまく利用することで、反射における構造発色と同様、「従来に無い」光学特性を発現できるのである。端的に言えば、反射では「高反射率の干渉色ながら、広角で視野角依存性(角度による色分散)のない単色」が実現できる。一方、透過では「高透過率で、広角に拡散できて色分散がない」採光窓ひいては光拡散板が可能になるのである。ここで本稿の主眼は、透過における新たな展開の解説である。反射はこれまで様々な媒体で解説しており、それらとの重複は避けたいが、透過を語る上で原理として反射の前提は不可避である。そこで、まず次項で反射のモルフォ発色原理について述べ、そこから透過への展開について詳述する。なお、反射と透過の原

理は共通点が多いものの、対応はすれども考察には注意を要することをはじめに記しておきたい。

2. モルフォ発色の原理(反射)

モルフォチョウ(図1(a))は南米～中米に産する蝶で、うちいくつかの種では特徴的な青色の光輝色が目立つ。輝ききらめきゆえ生きた宝石と呼ばれ、土産物や装飾に珍重される。その色合いから、発色原理は干渉に基づく機構が容易に想像され、構造色の代表とも言われる。たしかにその翅上に並ぶ鱗粉(図1(b))を拡大すると、上面(図1(c))では筋状で回折格子の様相を呈し、一方その断面(図1(d))では樹状構造が見え、樹の各々は多層膜に見える。回折格子・多層膜のいずれも干渉色の基になる微細周期構造である。

ここで干渉ならば、見る角度で光路差が変わるのだから、色も変わるのが必然である。ところが本種はどこから見ても青く、物理法則に矛盾するのである。この不思議さは、一度本文から離れて考えみて下さいと申し上げたいほどで、すぐに解を提示するのは勿体なくもあるが、以下に簡単に要点を述べる⁽³⁾。謎を解く鍵は乱雑さである。つまり、青色自体は多層膜干渉(の垂直入射条件)で作る一方、多層膜ならば本来発現する別の色(斜めの干渉条件)を、樹状構造配列の乱雑さで回避しているのである。では青色は垂直方向(真上)でしか見えないかということ、青色は回折広がりの効果で広く見えるのである。回折は「直進する波が波長サイズの構造に当たると、回り込んで広がる」現象で、進行波(たとえば水面の波)の進路上に波長サイズの障害物(水面ならば杭)を置いた状況を考えてと分かりやすい。以上をまとめると図2のようになる。前述の通り、規則性(多層膜干渉)と不規則性(乱雑

* 大阪大学大学院工学研究科；准教授(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 M1 棟)

** 理化学研究所/SPring-8

Optical Properties of *Morpho* Butterflies that are Useful not only for Reflection but also for Transmission; Akira Saito>(*Department of Precision Engineering, Osaka University, Suita. **RIKEN/SPring-8, Sayo, Hyogo)

Keywords: *structural color, Morpho butterfly, transmission, diffuser, daylight window, disorder, nanostructure*

2022年 4月11日受理[doi:10.2320/materia.61.479]

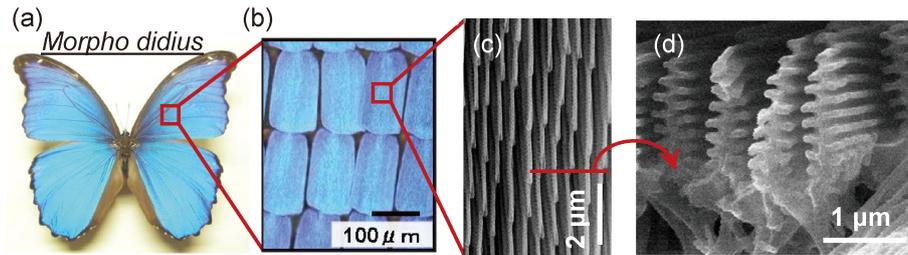


図1 (a) モルフォチョウの全体像と、(b) 翅上の鱗粉列. (c) 鱗粉の拡大SEM像(上面図)と(d) 断面のSEM像. (オンラインカラー)

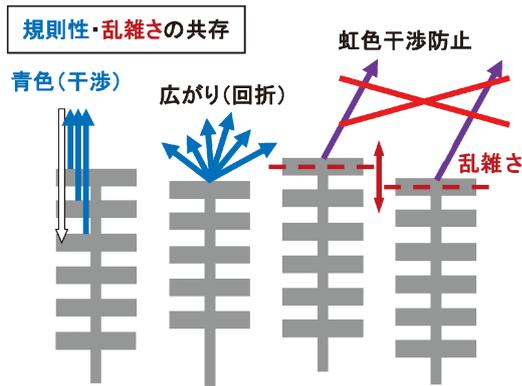


図2 モルフォ発色機構の原理. (オンラインカラー)

さ)の巧みな組み合わせである。

ただし上記はあくまで理屈であり、正しさを証明するには実証が必要である。一方、図1(c)(d)のような複雑な3D構造を光学測定に便利な数mm以上のサイズで作るのは現代のナノテクでも困難である。そこで、原理を抽出して「多層膜と乱雑さ、さらに狭い幅(による回折広がり)」を同時に満たす構造(図3(a))を設計した⁽¹⁾。作製プロセスの便宜から、はじめに基板の上に乱雑さと狭い幅を同時に満たす設計・加工を施し(図3(b))、最後に多層膜を蒸着した(図3(c))。光学薄膜なので真空蒸着で精度を担保し、かつ多層膜の屈折率比は大きくし(反射率を稼ぐため)、応用を考えて安価・安全で普遍的な材質を用いた(TiO_2 と SiO_2)。

結果はモルフォチョウの発色をよく再現し、「干渉色だが広角で高反射率の青」が実現できた。実証のための光学測定では絞った白色光を試料に入射し、反射光の角度分布を光ファイバで得た上、分光器で波長分布も測定する。本稿の主眼

は透過の応用にあるので、詳細は他の文献をご参照頂きたい⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3. モルフォ発色(反射)の応用と生産技術

特異な発色の原理が実証できてみると、我々はその応用価値に改めて目を見張った。そもそも構造色は色素によらない物理的な効果に起因し、UVや酸化で物質変化があっても色の劣化つまり色褪せが無い。そして色素では不可能なきらめきを伴う光輝色が出せる。また色素フリーとなると毒性や環境負荷も低く、高反射率ゆえ光利用効率が高いので、環境・エネルギーに有利な側面がある。加えて、材料2種だけの膜厚変化でRGBが作れるため(実証済み)、省材料でもある。一方、光輝色の利点から装飾に有利でも、通常の構造色は「見る角度で色が変わる」特徴から、ディスプレイやポスターなどの用途には困難がある。ところが本発色は「広角で単色」なので、魅力的である。

そこで生産技術に目を移すと、上述の通り「乱雑な」「ナノ構造」がネックとなる。要するに、図3(b)の構造をいかに「大面積で」「量産」するか、である。半導体プロセスに依拠する当初の方法では、スループットに限界がある。そこでナノインプリントによる大量複製により、生産の効率は1000倍以上改善できることがわかった⁽⁵⁾。ところが次に、複製してもモールド(鋳型)自体が小面積では限界が見えてきた。この点はレーザー加工による大面積化の工夫で解消できることがわかった⁽⁶⁾。ところが大面積のナノインプリントは離型に困難が伴う(モールドと複製用樹脂との接着力が面積比で増大するため)。そこで、インプリントした複製をモールドとして使うことで、モールド自体を曲げられる樹脂にし

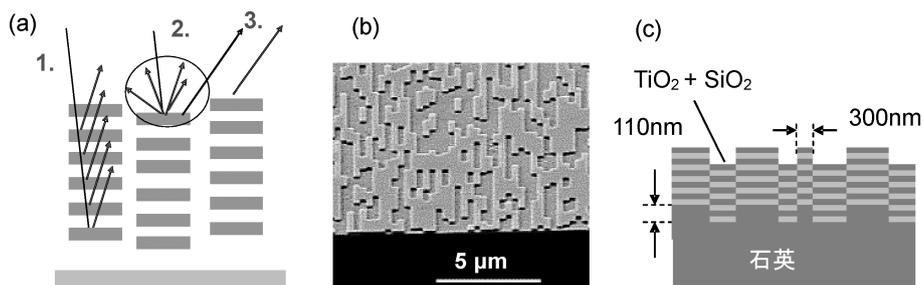


図3 (a) モルフォ発色体の構造モデル(断面図). (b) 多層膜蒸着前の基板表面SEM像. (c) 多層膜蒸着後の断面概念図.

て、少しずつ剥がすことで離型が容易にできるようになった⁽⁷⁾。

それでもまだハードルは残っており、特に発色膜のフレキシブル化が問題だった。これが実現できないと、自由形状での発色応用ができない。その時点で発色体は固い基板に限られており、理由は多層膜形成が真空蒸着に基づいており、熱輻射と均一成膜のため固い基板上への成膜が前提だったからである。そこで、多層膜の成膜後に膜全体を樹脂で包埋して保護し、その状態で基板から容易に剥離できる工夫を行った。これは基板と多層膜の間にあるUV硬化樹脂が湯浸で膨潤し、自発的に離型するプロセスである⁽²⁾。このフレキシブル化工程は、部分的には粉体化にも役に立つ⁽⁸⁾。

こうして、発色体の生産過程で生じる様々な困難を克服しつつ、現状ではフレキシブル発色フィルムが100 mm四方程度で比較的容易に作製可能である。

4. 透過への展開

ところが、上に述べた「モルフォチョウの知恵」について、思わぬ使い道が最近わかってきた。それは従来の反射とは逆方向で、透過つまり「窓」ひいては「光拡散板」である⁽⁹⁾。反射に基づく発色体では「高反射率、広角、単色(虹色でない)」の特長があったのに対し、透過では「高透過率、広角(拡散)、虹色でない」特長があり、従来に無い高性能の採光窓ができる。この特長がなぜありがたいのか。反射と透過の対応関係に注意しつつ、以下のように説明できる。

まず採光窓に望ましい条件は何か。それはi. 高透過率(窓が明るい)、ii. 広角拡散(広く照らす)、iii. 虹色でない、という点である。どれも効率的な採光に必須なことは明らかであろう。一方で通常、窓を通る光は直進してしまうので、太陽光があっても室内の上部は暗くなり照明が要る。そこで、光の経路を曲げる、もしくは広げることができれば照明を減らすことができ、省エネ効果はきわめて大きい。しかし、それには散乱(透過率は低下する)や回折格子・屈折(透過率は保てるが虹色になってしまう)を使うか、光ダクト(図4)など大規模設備が必要になる。

現在、こうした「光拡散板」の主流は散乱体埋込フィルムなどの「散乱」に基づいている(図5)。しかし、多重散乱による光損失が大きく、透過率と拡散広がりにはトレードオフの関係がある(図6(b))。つまり明るさが欲しくて散乱を減らすと入射光は直進してしまい、逆に拡散を増やすために散乱を増やすと多重散乱で光が散ってしまい、明るさが犠牲になる。さらにこの方式は、散乱体が球状なので原理的に拡散方向(光軸を法線とする面内での異方性)も制御できない。

次に、回折を使って光路を曲げるには、典型的な方法として「回折格子」を思い浮かぶが、それでは角度により色が変わって虹色になってしまう。だからといってプリズム的に光を曲げる屈折では、なおさら色分散が生じてしまう。

以上を考えると、窓では通常「高透過率、広角、色づかない」3条件の並立は不可能である(図6)。よって現行の窓で

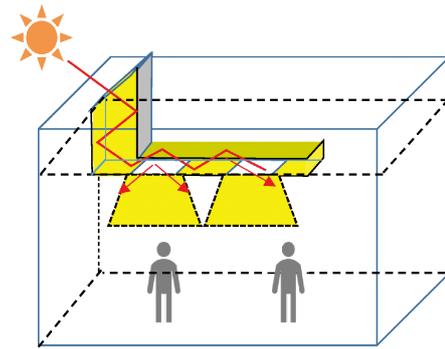


図4 光ダクトの概念図。(オンラインカラー)

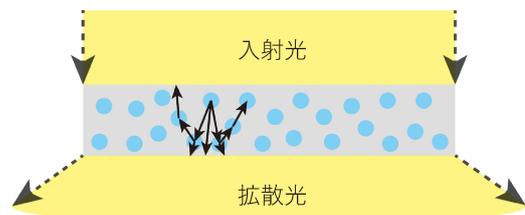


図5 多重散乱を用いる光拡散板の概念図⁽⁴⁾。Copyright (2022), The Japan Society of Applied Physics. (オンラインカラー)

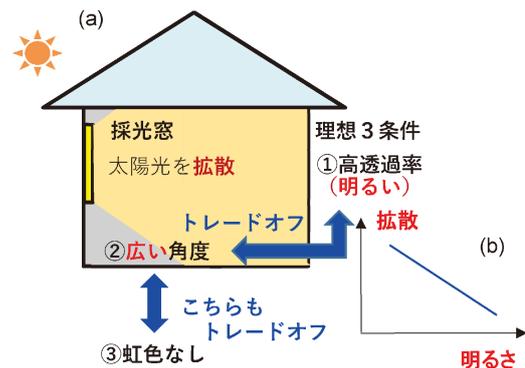


図6 (a) 採光窓・理想3条件の概念と(b)「透過率」と「拡散」のトレードオフ。(オンラインカラー)

は、光を曲げずに透過率を稼ぐか、散乱により拡散して透過を犠牲にする。しかしモルフォ蝶の発色特性「高反射率・広角拡散・単色」を使うと、上の3条件は並立可能なのである。つまり「微細な幅で光を広角回折し、乱雑さで虹色(回折格子)を防ぐ」原理を透過に転用すればよい(図7)。このとき回折広がりが入射界面でのみ起きるので多重散乱がなく、高透過率も実現できる。したがって透過型モルフォ採光窓の構造モデルは、反射型モルフォ発色体から青色反射を作る多層膜を除去した形になる。

ここで1つ補足を述べると、図7(b)のデザインから「結局、すりガラスが良いのでは」と言われることが多い。しかし、すりガラスはスケールが全く異なり、凹凸が μm スケールでアスペクト比が低い。凹凸自体はすりガラスだとRMS粗さで言えば1~数 μm 程度が多いが、この点はあまり重要でなく、重要なのはアスペクト比に関わる幅つまり、回折広

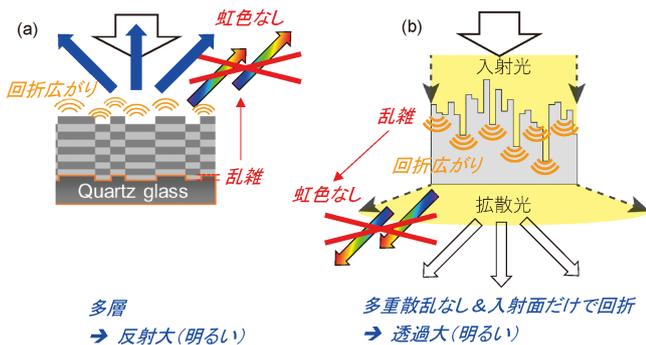


図7 反射型モルフォ発色から透過への転換と、原理的な対応関係⁽⁴⁾. Copyright (2022), The Japan Society of Applied Physics. (オンラインカラー)

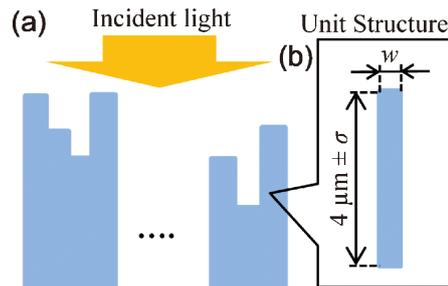


図8 採光窓デザインの断面図. (a) 乱雑高さをもつ全体像. (b) 幅 w と高さ $4\mu\text{m} \pm \sigma$ をもつ棒状単位構造. Reproduced with permission from (9), (c) The Optical Society. (オンラインカラー)

がりに寄与する単位構造の幅(反射では樹状構造1本の幅, 透過では1本のピラー幅)である. すりガラスではこの幅が大きく, 回折広がりにはほぼ寄与しないレベルである. したがって「回折でなく屈折」で光を散らすことになり, 乱雑さゆえ虹色にはならないが, 角度広がり小さい. この点, 原理から違うものであることは留意されたい.

5. 設計と最適化デザイン

上記の発想に基づき, まず必要なのは図7(b)にある構造の最適化である. この構造は図6(a)のように面内(紙面内)で2次元的な光拡散を前提とするため, 断面図を示しており, 紙面の奥行き方向には均一な厚みをもつ. 換言すれば, 図7(b)の構造は, 紙面内では棒状(縦長の長方形)構造を横に並べた構造と考えることができる(図8). ここでパラメータは, 単位構造である長方形について, 横幅 w と深さの乱雑さ σ である. 横幅 w は回折広がりを決める重要な役割を持つが, 次段の作製と絡んで設計と構造のシンプルさが担保される必要があるため, 一定値である. また乱雑さは平均高さからの正規分布(標準偏差 σ)で定義される. 平均高さ $4\mu\text{m}$ は, 一般的なPCプラットフォーム(後述)で数時間の現実的な時間で問題なく計算できる最大深さとして選んでいる. これより高くても計算エリアが増えるだけで, 計算時間はかかるが結果に影響がないことは確認済みである(光学特性は入射界面の特徴的な構造で支配されるため, 平均深さは $4\mu\text{m}$ 以上でも影響しない).

この2パラメータ w と σ を振って, モルフォ発色研究で培った数値計算による構造最適化を行った. 解析的手法でなく数値計算なのは, マクスウェル方程式で電磁場を扱う際, 構造が複雑ゆえ解析的に扱えないためである. 手法はFDTD(Finite-Difference Time-Domain)法で, 空間を微小メッシュで分割して計算を容易にしつつ, 各メッシュ間の接続と境界条件を適切に処理しつつ試料全体での電磁場を取り扱えるように工夫している. 計算環境に一般性をもたせるため, 市販ソフト(Ansys Lumerical社のFDTDパッケージ)とデスクトップPC(3.80 GHzの8コアプロセッサ, 32 GB

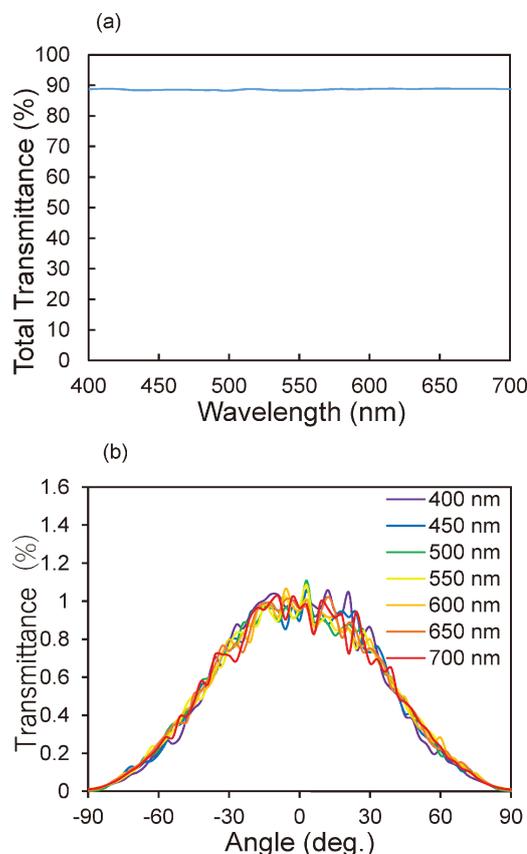


図9 図8の構造の最適値($\sigma=1000\text{nm}$, $w=300\text{nm}$)に対するシミュレーション結果. (a) 波長依存性のない全透過率($\sim 90\%$). (b) 異なる波長(400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 nm)に対する透過率の角度分布. 色分散がなく, 広角(半値幅で $\sim 90^\circ$). Adapted with permission from (9), (c) The Optical Society. (オンラインカラー)

メモリ)を使用した.

最適化の判断指標は, 先述した3条件つまり, 全透過率と角度広がり, そして波長分散である. パラメータによる結果比較やFDTD計算の設定など詳細の途中過程は省略するが, 最適化で得られた結果を図9に示す. パラメータの最適値はそれぞれ w が 300nm , σ が 1000nm である. 詳細は文献に詳しいが⁽⁹⁾, 直感的な根拠は以下の通りである. まず,

w の 300 nm は反射型のモルフォ発色でも近い値であり、可視光波長に近くサイズの小さい幅で最も回折広がり効果が大きいことから妥当であろう。一方、虹色防止に必要な乱雑さ σ でここまで大きなアスペクト比が必要なのは、透過と反射の光路差が効いている。つまり反射(オリジナルの鱗粉棚構造)ならば、隣り合う高さの差 h は、反射の光路差では $2h$ に対応する。一方、透過だと構造体の屈折率 n に対して光路差が $(n-1)h$ だけとなり、代表的な n の値 ~ 1.5 を考えても反射の 4 分の 1 程度になってしまう。加えて、反射では青色 450 nm 付近のみを対象なのに対し、透過では最大 780 nm 付近までの可視全域を対象とするため、必要な σ がさらに 2 倍近く、つまり反射型に比べて 8 倍近い値が必要になる。したがって 1000 nm という結果は直感とも相容れる結果である。図 9 を見ると、「全透過率 90%」「角度広がり半値幅 90° 」「色分散なし」が証明できている⁽⁹⁾。ここで入射光は白色の垂直入射を前提としている。

こうして、モルフォ蝶の「明るく広角で、(単色で)色分散が無い」反射原理を透過に転用し、「明るく広角で、(白色で)色分散が無い」採光窓が可能なが証明された。同時にこれは、先述した 3 条件すべてを同時に満たすコンパクトな窓の条件を明らかにしたことになる。

6. 作 製

次に必要なのは、実証である。しかし、実作にあたっては、構造の微細さ ($w=300$ nm) と高アスペクト比 ($\sigma=1000$ nm) に加え、乱雑さ付与のため、ナノ構造作製が困難である。ところがここでも反射型モルフォ発色体での知見が役立った。じつは、深さ方向の「乱雑さの光学効果」は、面内の乱雑さで同じ効果が出せるのである。これはモルフォ発色体

の再現プロセスを注意深く見るとよくわかる。2 章で述べた通り、乱雑さは干渉による虹色を防ぐ上、シャープな干渉縞を防ぐことから角度広がりにも有効である。そしてその乱雑さの方向は主に、断面図(図 1(d))で樹状構造の配列における深さ方向であった。一方、この方向の乱雑さを人工的に作るのは、半導体のナノテク(リソグラフィ)でも至難の業である。実際、モルフォ再現基板でも樹状構造は形成したが、深さ方向は 1 段だけで済ませている(図 3(c))。そのかわり、図 3(b)の通り、乱雑さは面内で担保しており、同時にこの面内の乱雑さはモデル上面図(図 1(c))から乱雑さのパラメータ抽出をした結果である。つまり、3D の乱雑さ(図 1(c)(d))のうち、2D(図 1(c))のみを利用しているのである。

これでなぜ干渉効果を防ぎ、「虹色防御」と「角度広がり」ができるのか。それは図 10 の通りである⁽¹⁰⁾。乱雑な面内パターン(図 10(a))は、 y 方向に異なるいくつかの xz 断面で見ると、それぞれ構造が違っている(図 10(a)点線)。これらの面は、各々が固有の干渉パターンを発生し(図 10(b)~(d))、この段階では各干渉パターンは鋭い干渉縞を持つ。しかし面内の(xy 面内の)乱雑さゆえ、各 xz 面の断面形状が乱雑に分布する以上、それらの総和としての反射パターンは干渉縞が平均化され、なだらかな角度分布になる、という理屈である⁽¹¹⁾。

この効果は重要である。まず、乱雑さの光学効果で「虹色防止」と「角度広がり」を実現するにあたり、1 段の深さは要るが、3D 加工が 2D 加工で済むので、大幅に加工の煩雑さが軽減される。のみならず、量産化や大面積にとって極めて有望なナノインプリントに相性が良いからである。

この独自技術を利用し、今度は透過型で図 7(b) の 3D 構造を 2D 構造に焼き直し、ごく最近、実作と実証を行った(図 11(a))⁽¹²⁾。なお透過型の設計では、反射型のようにモ

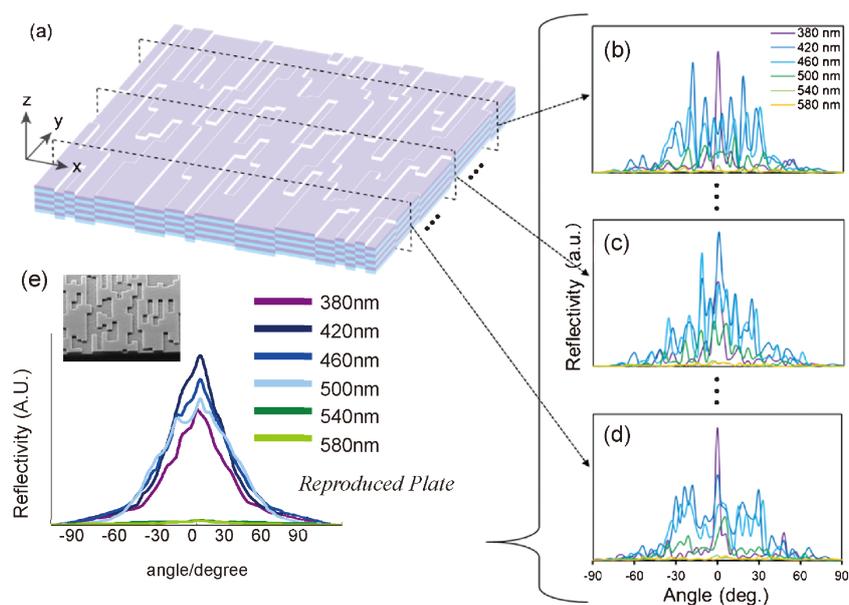


図 10 (a) 反射型モルフォ発色体の構造概念図。 y 軸方向の複数断面に分割できる。(b), (c), (d) 3 つの独立な断面に対する反射率角度分布シミュレーション結果。(e) 人工モルフォ発色体の反射率角度分布の測定結果(白色の垂直入射光)。干渉ながら鋭いフリンジが無い。Adapted with permission from (10). (オンラインカラー)

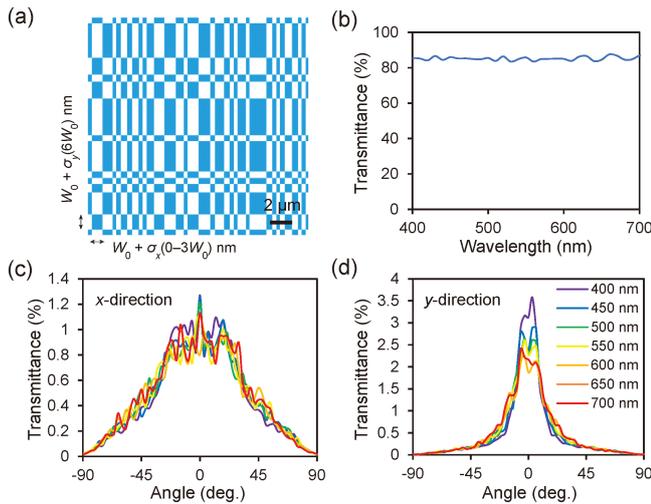


図11 (a) モルフォ型光拡散板(2D)の設計概念図。異方性が見て取れる。1枚の上面下面で意匠が異なるが、ここでは下面のみを示す。(b) 全透過率のシミュレーション結果。(c)(d) 透過率角度分布のシミュレーション結果。x方向(広角)とy方向(狭角)の異方性がわかる。Reproduced with permission from (12), (c) The Optical Society. (オンラインカラー)

デル構造(図1(c))から直接パラメータ抽出を行うのではなく、より概念的な考察をもとに設計を行い、いくつかのステップで反射型と異なるアプローチを含んでいる。まず反射型では、異種断面がxy面内に多数存在するため3Dシミュレーションが必須で、計算の負担が大きい。そこで、透過では2Dシミュレーション可能な「乱雑幅から成る格子状パターン」にしている。ここで、単位長方形の乱雑幅は $W = W_0 + f(W_0)$ (最小幅, f : 分布関数) で定義でき、凹凸深さを d とする。

次に、拡散角の制御と異方拡散ができるよう、分布関数 f は x, y 方向で独立にし、個別な最適化を行った。実際、光拡散の用途では全方位の均一拡散(図5の従来型)でなく、「横方向メインで広げたい(その分、単位立体角での明るさも稼げる)」等の場面があり、こうした制御性も本構造の特徴として、当初の3条件(明るい、広角、虹色でない)に続く4番目の長所である。ここでは x 方向で広角拡散、 y 方向で狭角拡散にしている。また反射型と異なる点として、全可視光を均等に拡散する必要もある。そこで下面は短波長、上面は長波長を主に拡散する両面構成である。

分布関数 f はやはり正規分布に基づくが、 W_0 を平均幅でなく最小幅としたため、正確には正規分布を平均値から折り返した半正規分布関数である。イメージとしては横軸を分布値 W (幅の値)、縦軸を頻度(確率密度)としたとき、分布関数の形状は正規分布の「釣鐘型」でなく、それを中央で割って右半分にした形である。したがって f の値は最小値が0(このとき W の最小幅が上述の通り W_0) であり、図12のようになる。またこの際、 f の標準偏差 σ は W_0 に対して「微小なゆらぎ」というレベルではなく、回折ピークを抑制する十分な乱雑さが必要なので $3W_0$ や $6W_0$ という値も取り得る。

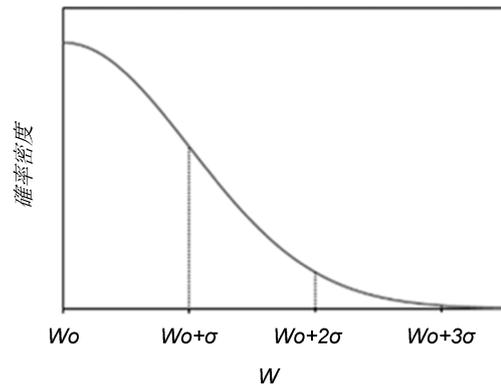


図12 半正規分布の概念。

試行錯誤の結果、 f の標準偏差 σ について、狭角拡散(y 方向)だとある一定値($\sigma = 6W_0$)で色分散のない透過特性を実現できるが、広角拡散(x 方向)だとまだ乱雑さが不足するとわかった(具体的には、回折ピークが生じてしまい「色がつく」)。そこで、 σ を $6W_0$ のような一定値でなく、さらに乱数で乱雑に取ることで問題を解消した。そもそも乱雑さの指標である σ をさらに乱雑に取る、とは混乱しそうだが、話が入れ子(二重構造)になっており、要するに乱雑な幅 W を置く際、そのつど毎回異なる半正規分布を使うと考えればよい。特に σ の選択幅を $0-3W_0$ に設定すると十分な乱雑さが確保でき、広角拡散(半値幅 $\approx 75^\circ$)でも回折ピークがなく波長分散なしが可能だとわかった。

可視光全域で尖った回折ピークがなく光を均質拡散するには、深さ d の制御も重要である。紙幅の関係上詳細は割愛するが、検討の結果、最終的に最適値として下面で $W_0 = 300$ nm, $d = 440$ nm, 上面で $W_0 = 470$ nm, $d = 690$ nm とした。詳細は文献に詳しいが⁽¹²⁾、直感的な根拠は以下の通りである。まず下面の(短波長側) $W_0 = 300$ nm は青色 450 nm に対して回折広がり効果の大きい幅である(前項で述べた3Dモデルの幅 w における議論と同じ)。一方、 $d = 440$ nm は正透過の光路差(やはり3Dモデルで既述)が青色の半波長となり、青色を打ち消せるように考えている。上面の $W_0 = 470$ nm と $d = 690$ nm は、赤色 700 nm に対して同様の考察を行った結果である。

これらの最適条件とその光学特性はシミュレーションの結果、図11のとおりである。透過率は約85%と高く、 x 方向で広角拡散(半値幅 $\approx 75^\circ$)、 y 方向で半値幅 $\approx 30^\circ$ の異方拡散を示す。色分散も広角側では全く見られず、狭角側で若干残るものの、回折ピークのような鋭い分布は見られない。したがって基本3条件に加え、拡散光の異方性形状制御もできることがわかる。

では、シミュレーションでなく実測ではどうか。作製にはやはり反射型モルフォ発色体の研究で培ったナノ加工プロセスが役立った。まず始めに図11(a)の構造をフォトリソグラフィとドライエッチングでSi基板に作製し、それにナノインプリントを施す。採光窓や光拡散板となると、応用を見据えた見映えも判断材料になるため、パターン面積は 100 mm

と比較的大面積で実施した。なお、反射型発色体と違い、透過型の窓ではナノ凹凸構造形成後の多層膜形成プロセスは無いが、Si モールドは2枚必要である。これは先述のとおり、上面・下面(窓と言えば表面・裏面)にそれぞれ長波長・短波長仕様の異なるパターンが必要なためである。透過窓を形成するにあたっては、ナノインプリント用基板にPMMA フィルムを用いる(透過率や汎用性、強度に加え、屈折率も要考慮で約1.5)。このフィルム上にUV 硬化樹脂を塗布し、Si 基板上のナノパターンをUV ナノインプリントで転写する。フィルム両面に異なるパターンを施すことで、試料が完成する。

光学特性の結果は、シミュレーションに近い条件として白色コリメート光(垂直入射)を用いると、透過した拡散光を投影するスクリーン上にダイレクト光の輝点を生じ、また十字模様の輝線が生じていた⁽¹²⁾。十字模様は長方形ベースの構造ゆえの回折で、設計段階での空間対称性の問題であり、輝点は作製時のエラー(凹凸比ずれ)などが考えられる。これら

は別途、設計変更や作製プロセスの検討で改善の余地がある。一方、実用上の光源は、LED や太陽光などさほど指向性のない場合が多い。そこで、LED に対する光拡散性を調べるべく、ハンドライト型 LED について照射パターンを拡散板の有無で比べると、**図13**の通りである。

拡散板が無いと光分布は等方的で絞られているが、拡散板を通すと広く拡散し、分布は異方的である(**図13(a, b)**)。さらにコリメート光源で見られた輝点も十字パターンも無く、分布は滑らかである。角度分布は半値幅の値で見ると、拡散板の未使用時は約 21°で鋭く、使用時は x, y 方向でそれぞれ 63°, 30°と、異方性が実現できている(**図13(c)**)。

これらの結果は、市販品との性能比較で評価するのは価値があろう⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾。図6のように横軸に全透過率、縦軸に光拡散係数をとってトレードオフ関係を見やすくプロットし、市販品とこれまでの我々の結果を比べたのが**図14**である。ここで光拡散係数は、試料への垂直入射をそのまま延長した下流方向(試料窓に対しては法線)を 0°とし、小さい拡散(20°)



図13 (a, b) LED 光源のスクリーン投影像で光拡散板の有無の比較。(c) (a, b)で透過率の角度分布測定結果。Reproduced with permission from (12), (c) The Optical Society. (オンラインカラー)

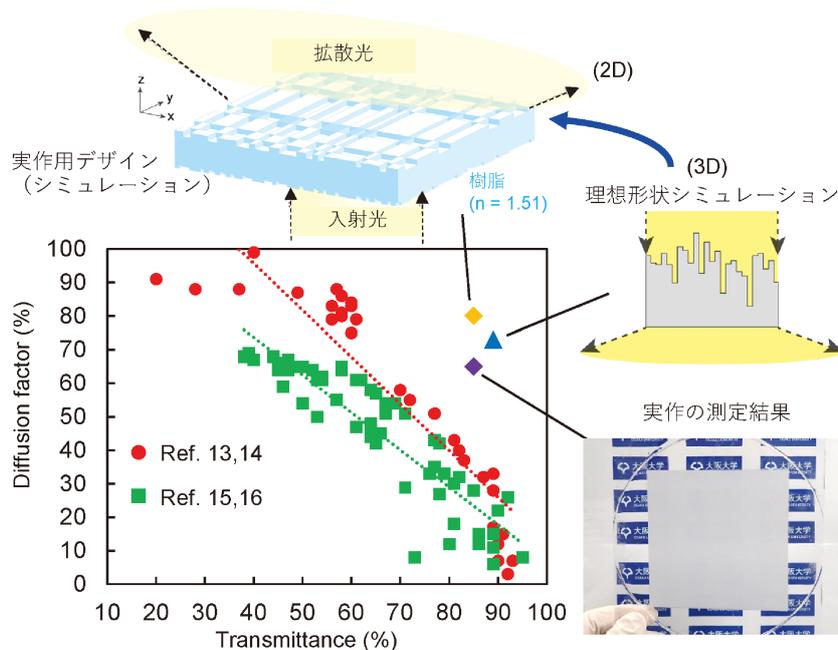


図14 異なる光拡散板について、拡散係数と透過率の比較。赤○と緑□のプロットはそれぞれ市販品の結果で、補助線(点線)の通り、トレードオフの関係がわかる。他のプロットで青△は当初の理想形状(3D)の計算結果、黄色◇はそれを実作用に2D化したモデルの計算結果、紫◇は実作の測定結果である。Adapted with permission from (12), (c) The Optical Society. (オンラインカラー)

と大きい拡散(70°)の平均輝度を直入射に近い下流(5°)の輝度で規格化した値である。従来の市販品に対しては、先述したトレードオフ関係がよく見て取れる。一方、理想構造(図7(b))のシミュレーション結果(図9)はそこから大きく外れ、さらに3D→2Dの簡易化で設計した場合(図11)のシミュレーション結果も同様である。最終的に実作の結果も、シミュレーションに比べれば特性低下が見られるものの、従来のトレードオフ関係を破る性能は発揮できている。

このように、3条件「高い透過率、広角、虹色でない」を並立するモルフォ型採光窓は、基本設計と原理実証について、基礎的な確認ができたと考えられる。加えて、拡散光の形状制御という従来不可能だった付加価値もある。考察と検討に際し、ナノ加工技術(リソグラフィとエッチング)・シミュレーション・光学測定と制御は、反射型発色体で培った多くのノウハウが役立った。さらに今後の応用・高度化の展開では、ナノインプリントによる量産技術とフレキシブルフィルム化など、共通して役立つ点も多い⁽⁴⁾。一方、トレードオフ離脱の限界値、つまり「高透過率と広角拡散」の極限の両立がどこまで可能かはまだ未知数であり、加工自体にも課題が残るのは先に述べた通りである。また実用レベルの量産化とコストについてはむしろこれからの課題であろう。

7. 光拡散板(ディフューザ)

これまで「採光窓」と「光拡散板」の話を、明確な区別なしに用いてきた。確かに採光窓は光拡散板の一種であり、両者の正確な峻別は難しい。しかし用途という点では、光拡散板には太陽光を前提とする「窓」以上に、「照明」への大きな可能性がある⁽⁴⁾。ここでは太陽光に対する「窓」と対照して、人工照明に対する「光拡散板」を前提に、その価値について述べる。

青色LEDの急速な普及に見られる通り、照明は視覚を支える肝であり、演色性(色の再現性)の高い光は常に希求されている。ゴールは、あらゆる対象で本来の色彩が、天空下の太陽光で見たように再現できることである⁽¹⁷⁾。現在普及している青色LEDは明るい反面、赤色成分が不足するため、演色性の不足、つまりその照明下では本来の色が再現されない課題がある。そこで紫色LEDにより、全可視域の光で太陽光下の演色性を可能にする照明の変革が叫ばれている。

しかし変革にはピースが1つ欠けており、それが拡散である。屋内で対象を見るとき、天空の太陽光のような拡散光源がないため、照明を用いる。しかしその拡散性には限界がある。そこで現状は、反射板で光束を広げるか、光拡散板を通すのが普通である。ところが反射板では、光源と対象以外に反射のための余計なスペースが必要になり、設置の自由度に制限が大きい。一方、拡散板では上述の困難(透過率低下、拡散不足)があり、拡散板で光を拡散できても、暗くなったり色温度が変わったりしてしまえば、演色性は損なわれる。つまり仮にLED光源のスペクトルが太陽光と同じになっても理想的な拡散光源からは遠く、自然光を理想とする多

様な用途に使えないのである。換言すれば、演色性自体はLED本体で解決できても、拡散しないと灯体は使えないことになる。

その訴求は大きく、たとえば工芸分野では日本刀の展示を例に挙げると「いかに刀身の姿、地鉄の肌合いや刃文、地刃・刃境・刃中の微妙な景色を展示の形態で提供できるか、視覚に認識されるか、見えなければただの鋼棒となる。」が代表的な意見である⁽¹⁸⁾。一方、そのために自然光を天空光のように拡散し利用しようとする、現状では建築構造に関わる大型設備を要する上、天候に左右され、多くの場面で適切な拡散照明がない⁽¹⁹⁾。鑑定のように「正しく物を見る」必要性は、工芸・美術に限らず、手術・診断、精密加工技術、各種の撮影、など実に多くの場面で現れる。

理想的な拡散板を使用すると、こうした大規模設備は不要となり、広範囲の訴求に耐える照明が可能になる。コストや運用面において圧倒的な優位性があり、工学・技術、美術・工芸から多様な撮影現場など、それぞれの分野で有効な解決法になる。

上記の現状を受け、照明に向けた光拡散板の開発例は学術的にも多く見られる。樹木の繊維構造や、高分子由来のしわによる新技術の報告もあるが(文献(12)に引用多数)、いずれもトレードオフ打破には厳しく、しかも前者(樹木)のように固定形状だと、拡散光の形状制御の自由度に制限がある。一方、本件のモルフォ型拡散板では、構造パターン次第で異方性制御も可能である。

8. ま と め

モルフォチョウの矛盾に満ちた構造色の解明に端を発した本研究は、実証研究を皮切りに、その応用研究や多方面の生産技術開発を経て、「反射」から「透過」へと新たな展開を迎えている。

反射型発色体の技術開発では、大面積のフレキシブル化を実現した段階⁽²⁾で2002年以降15年ほどの研究歴があり、もうモルフォチョウの話が続けるのもどうか、の思いが正直なところ、筆者にはあった。しかしそれは不遜な勘違いで、自然界の奥行はまだ深かった。透過への応用という発想自体はすでに10年ほど前にあったが、技術・知識の機が熟してまともにアプローチできるまでに時間がかかったこともある⁽²⁰⁾。

自然に学んだ最大のポイントは、反射型同様、透過型でも「ナノスケール」の「乱雑さ制御」に基づく光学特性である。その結果、入射光を「高透過率で」「広角に」通し「色づかない」理想的な光透過材が可能とわかった。光学的には「回折広がり」によるモルフォ型光拡散板は、多重散乱がないため高透過率で、ナノの幅で広角に広がり、乱雑さゆえ色分散がない。さらに回折広がりを与える微細構造の制御により、拡散光の異方性制御ができる(ディスプレイなど横方向に選択的に広い光が必要な例は多い上、立体角当たりの輝度を稼げる)。技術的にも、反射型でノウハウを蓄積したナノ加工

