干渉発色繊維 “モルフォテックス®” の開発

Development of the Light Interference Colored Fibers “MORPHOTEX®”

田 畑 洋・吉 村 三 枝・清 水 進

1. はじめに

我々の環境は多様な色彩に彩られており、それらの色彩が心理的・生理的に大きな影響を及ぼしていることや逆に心理的・生理的状态が色彩の選択に影響を与えることは、衆知の通りである。色材としての感性繊維において、たとえば、染料の歴史を省みると、1856年のモーブ合成に始まり、1880年のインジゴ合成などその種類は4000種以上と言われており、19世紀以降は合成染料の時代といって過言ではなく¹⁾、それに伴う染色技術の発展とともに色彩豊かな文化、日常生活への貢献は測り知れないものがある(図1参照)。しかし、近年、この感性色材繊維分野において、スーパーカラーともいうべき色味を有する繊維の創出が次世代繊維の一つとして取り上げられている。スーパーカラーの定義については明確とはいいがたいが、その具現化は物理発色ではないかと考えられ、分子配向異方性高分子フィルム応用あるいは薄膜蒸着技術の応用などの研究が進められている。一方、自然界を覗くと、上述の概念に相当する多くの生物が存在しており、言うならば、最適モデルがすでにあるということである^{1,2)}。

本開発ではそのような生物の中で、生きた宝石とも言われている南米産のモルフォ蝶に焦点をあて、その中のスルクウスキーモルフォ(タテハチョウ科; NYMPHALIDAE, モルフォ亜科; Morphinae)の雄翅を採り上げ、その発色

図1 染料の歴史概観

機構解明に基づく工学設計を通して成功した干渉発色繊維開発の概要を紹介し、今後いっそうのバイオミメティック・デザインとバイオミメティック繊維技術進展につながればと期待したい。

2. モルフォ蝶翅の発色機構

モルフォ蝶の発色に関する記述は、1924年分類学関係の論文にさかのぼるが、その後、化学的・物理的な総合的解析は見られない。また、モルフォ亜属の各個体間の発色の見えはそれぞれに違いがあることから、発色機構要素も同一ではないと考えられる。そのため、本論の解析では前述の試料について述べる。

2.1 化学的解析

翅膜と鱗粉の蛍光顕微分析によると、鱗粉からのみ青色の蛍光発色が観察される。それが人間の視覚上、問題になり得るか否かを明確にしておく必要がある。そのため、蝶翅から溶媒抽出法により得られた抽出液について、ペーパークロマトグラフィー、高速液体クロマトグラフィー及び

HIROSHI TABATA
日産自動車株式会社 総合研究所材料研究所 シニアリサーチャー 工学博士
〒237-8523 横浜青葉区夏島町1
Tel: 0468-67-5194
e-mail: h-tabata@mail.nissan.co.jp
〈専門〉物理光学、材料工学、視覚認知工学
〈趣味〉スキー、山歩き

MIE YOSHIMURA
帝人株式会社 繊維技術開発部
〒791-8530 松山市北吉田町77
Tel: 089-971-4584
e-mail: m.yoshimura@teijin.co.jp
〈専門〉溶融紡糸技術
〈趣味〉旅行、スポーツ観戦

SUSUMU SHIMIZU
田中貴金属工業株式会社 技術開発センター技術本部 主席技術員
〒254-0076 平塚市新町2-73
Tel: 0463-35-3212
e-mail: s-shimizu@ml.tanaka.co.jp
〈専門〉金属加工
〈趣味〉カメラ

表1 モルフォ蝶翅(♂)の主要含有プテリジン化合物の定量分析
(平均翅重量: $253 \pm 19 \text{ mg}$)

	Wings weight (mg/individual)	Biopterin (pmol/individual)	pterin (pmol/individual)	Isoxanthopterin (pmol/individual)
<i>M. sulkowskyi</i>	253 ± 19	1030 ± 130	459 ± 183	150 ± 37
<i>M. adonis</i>	293 ± 14	2890 ± 600	363 ± 98	150 ± 90

The means of 4 individual $\pm$ SD.

質量分析方法などによる含有色素の同定及び定量化を行った。その結果、紫外線により青紫色に発色する数種類のプテリジン化合物が見出された²⁾。表1にその主な化合物を示すが、1頭当りの蝶翅中の含有量は極めて微量であり、人間の視覚認知への影響は考えられない。ちなみに、ここで示したバイオプテリンは成長系代謝サイクルにおける重要な補酵素であるが、蝶翅から初めて発見されたものである。

2.2 物理光学的解析

写真1はスルコウスキーモルフォ(♂)の翅膜上に2種類の鱗粉が交互に一定の重なり比率を持って整然と配列されている上翅背面の光学写真である。また、図2に自製の3次元広変角分光光度計による上翅背面の分光反射スペクトル例を示した。ここで見られるように、480nm付近をピークに青紫から広角度に向けわずかに赤紫への色相変化が見られる異方性反射特性を有することが分かる。写真2は

写真1 スルコウスキーモルフォ蝶(♂)翅背面の光学顕微鏡

図2 スルコウスキーモルフォ蝶(♂)上翅背面の3次元分光反射特性(測光条件: 入射角 45° , 受光角 30° , おお角 $90^\circ \sim 90^\circ$)

写真2 スルコウスキーモルフォ蝶(♂)翅背面のカバースケール断面(SEM)

図3 スルコウスキーモルフォ蝶(♂)翅背面のカバースケール断面の模式図

カバースケールと呼ばれる鱗粉断面の走査型電子顕微鏡(SEM)による観察写真であり、図3はその模式図である。前節の結果を踏まえ、本試料の発色主要因がトラベキュラー上にフラクタル的に形成された規則的構造にあることが推測される。その3次元的規則性はx軸方向にラメラ・リッジ構造の繰り返し、y軸方向にクチクラ成分(屈折率 $n=1.5$)から成るラメラ層と空気層の交互積層構造、z軸方向に一樣といえる。この鱗粉断面模式図から発色要因として、二つの可能性が示唆される。一つはラメラ・リッジ構造の頂点の突起形態の規則的繰り返し配列に着目した回折系であり、他方はx軸方向における各ラメラ層と空気層の位置平行性に着目した仮想薄膜積層構造に基づく干渉系である²⁾。

ここで、実際のラメラ・リッジ構造に近い光学モデルから、そのエッセンスと考えられる単純な薄膜多層光学モデルに至るそれぞれの系に対してマクスウェル電磁方程式解法において鱗粉模式図内の諸元及び実検により得られたクチクラの屈折率を用いた分光反射スペクトルシミュレーションによると、青色領域の λ_{max} 位置には変化なく、 n 次波長に多少の違いは見られるが、本質的にはもっとも単純な薄膜積層構造と考えてよい。その例を図4に示した。鱗粉の顕微分光スペクトルとの高い一致性を示し、この干渉系を本試料の発色に対する主要因とし、バイオミメティ

ク繊維設計への基礎とした⁹⁾。

図4 カバースケール断面構造の薄膜積層単純光学モデルに基づく干渉反射分光スペクトルシミュレーションと顕微分光スペクトル(入射光角度0°)

3. 繊維断面設計と繊維成形

3.1 繊維断面設計

まず、2種類のポリマーの交互積層構造において、成形精度、繊維径の自由度を得る面から言えば、理論的にも相互材料の持つ屈折率比が大きいことが望ましい。また、市場性を踏まえたエンジニアリングの視点から言えば、適用素材のMSDS(Material Safety Data Sheet)がそろえられること及び成形繊維の風合がほぼ予想できることが望ましい。本開発ではその他、諸々の要件を加えて求めた基本的構造要件は下記の通りである。

- ① ポリマー系はPEN/Ny-6、PET/Ny-6を主とする
- ② 断面を扁平構造とし、反射効率を補完する
- ③ 積層部保護と機械的強度維持のため、入射光波長振動を考慮したクラッド構造とする

また、目標とする干渉発色波長、すなわち1次波長と2種類のポリマーのそれぞれの積層厚み(d_a , d_b)及び屈折率(n_a , n_b)との関係は0°-0°光学系において、単純に次式となり、最大反射強度は両者の光学的厚みを等しくすることとなる。

$$\lambda_1 = 2(n_a d_a + n_b d_b)$$

実際の繊維成形においては上記のような理想系を得ることは困難のため、繊維断面構造の工学設計において、扁平断面内の長軸方向及び短軸方向における部位別の精度レベルと1次反射波長強度との関係をシミュレートし、エネルギー反射率0.8~0.9を得る設計構造を行った。ちなみに、交互積層数は61層、1層当りの層厚は70~90nm(目標反射波長により、この範囲内で±数nmオーダーの制御を要する)となる^{10,11)}。

3.2 繊維成形

本開発では2元あるいは3元コンジュゲートによる溶融複合紡糸法による実現を目指した。製糸技術の中の重要なキー技術の一つはコンジュゲート口金である。光学機能発

図5 コンジュゲート口金内の流路設計概念

現の基である積層厚の精度は積層形成流路に流れる吐出量に依存するため、両ポリマーの吐出部形状及びその加工精度が非常に重要になる。図5に新たに工夫した流路概念例を示した。また、設計断面形態を得るにあたり、最終吐出口の形状・サイズにも留意する必要がある^{10,11)}。さらに、前節で述べた数十ナノオーダーの積層厚の制御には、使用ポリマーの溶融温度における親和性や粘度・剪断速度物性などの適正化を行い、それを基に適正な溶融温度の選定、使用口金に基づく最適吐出量及び吐出量比等の計算、形状維持性を考慮した最適紡糸速度の選定及び紡糸プロセス全てにおける最適雰囲気温度の選定・確保が要求される¹²⁾。

また、適正な繊維強度の確保や所定の発色機能確保に対する延伸条件の選定も重要になることは言うまでもない。図6にPET/Ny6系において、10dtexを目標に2元コンジュゲート方式により成形された扁平繊維断面のSEMを示した。ここで見られるように、両者の層界面におけるマイグレーション現象もほぼ押さえられていることが分かる。また、図7に発色目標主波長(480nm)における断面積層厚制御許容と発色機能の変化例を示した。

図6 PET/Ny-6系による成形繊維断面構造(SEM)

図7 繊維断面の積層厚制御性による発色機能変化(例)

表2 干渉発色扁平繊維の物性値(10dtex)

色	主波長 nm	単繊維度 dtex/f	強度 cN/dtex	伸度 %	乾熱収縮 %(150°)
紫	430	10	3.2	35	3
青	480	10	3.4	40	3
緑	520	10	3.5	45	3
赤	630	10	3.5	50	3
紫	430	3.7	4.2	25	4
緑	520	3.7	4.1	30	4

このようにモノフィラメント成形においても層厚制御は大変大きな課題であり、生産技術レベルでは多難となることなどを含め、非常に多くの課題克服が要求される。現在、表2に示すように紫系、青系、緑系及び赤系が得られており、さらに同様の物性値を有する3.5dtexレベルの繊維成形技術にもほぼ成功しつつある。

4. あとがき

本開発はこれまで述べてきたようにバイオミメティクスの一環と考えているが、その光干渉発色繊維の特徴を色彩工学的及び環境面からいえば、下記のようにまとめることができる。

- ① 光源色に類似するため、基本的には澄んだ色みと透明感が得られること及び加工法の精度等に関係するが深み感等の複合的材質感も表現可能である
- ② アニソトロピック特性を基に複合発色(カオスの)設

計が可能である

- ③ 非染色技術のため、染色廃液の低減及び染色工程に要するエネルギーの低減等、環境保全や資源の面にも貢献可能である

また、テキスタイル開発の面では、天然繊維系を含めて各種合成繊維系との混糸あるいは複合使用方法の開発などにより、従来にない多種多様なデザインや質感創成へと拡張得る可能性を有しているのではなかろうか。そうした可能性の具現化として、自動車の内外装品やスポーツ用品、アウトドアグッズ等の一部に適用されるとともに他の多くの分野で精力的な応用開発が行われている。

これまでの長い繊維技術の流れを省みると、本論の物理光学的感性繊維ともいうべき技術は、繊維成形加工技術という意味では新しい技術の流れへの発端と考えられよう。しかし、自然界で育まれた生物の機能は奥深く、学ぶべき多くのことがあり、それらの機能実現には素材面からの本格的改良とともに、成形装置面においても種々の改良開発も必要になるのではないと考えている。いずれにしても本分野の今後の発展を期待したい。

参考文献

- 1) A.F.Huxley, *J. Exp. Biol.* **48** 227(1968)
- 2) 藤井良三, 細胞, **23**(13), 19(1991)
- 3) H. Tabata, S. Tanaka, J. Takimoto, M. Akimoto, H. Namiki, and A. Yoshida, *Kogaku*, **22**, 618(1993)(in Japanese)
- 4) 河田照芳, 高分子, **44**(10), 662(1995)
- 5) H. Tabata, K. Kumazawa, M. Funakawa, J. Takimoto, and M. Akimoto, *Optical Review*, **3**(2), 139(1996)
- 6) H. Tabata, M. Asano, and S. Shimizu, *Kobunshi* **47**(10), 738(1998)(in Japanese)
- 7) H. Tabata, T. Hasegawa, M. Nakagoshi, S. Takikawa, and M. Tsue, *EXPERIENTIA*, **52**, 85(1996)
- 8) H. Tabata, M. Yoshimura, S. Shimizu, *BULLETIN OF THE FIBER AND TEXTILE RESEARCH FOUNDATION*, **10**, 8(2000)
- 9) 特許登録公報 3036305 号, 公開特許 H9-133038
- 10) PCT WO98/046815
- 11) 公開特許 H11-181630