解 説

J. Jpn. Soc. Colour Mater., 79 [12], 539-544 (2006)

モルフォブルーに見る科学と芸術の出会い

永山 國昭*

1. はじめに モルフォブルーとの出会い

宝石のようなモルフォ蝶のブルーの輝きに魅せられて10年以上になる。最初の出会いは、科学技術振興機構ERATOプロジェクト「永山たん白集積プロジェクト」(1990～1995)の研究の中であった。当時、わたしたちはタンパク質や微粒子の二次元集積を研究していたが、その中で思わぬ副産物を得た。1 μm 径のポリスチレン粒子を二次元集積すると美しくオパール様発色をしたのである。オパールが100～200 nm径のシリカ粒子の三次元六方結晶であることは知っていたが、たった一層の微粒子層が発色するのは驚きであった。

もともとたん白集積プロジェクトは、タンパク質の機能を二次元集積体の形式でエンジニアリングに接続させるプロジェクトであり、「生物的自然の知恵」に学ぶという哲学があった。したがって、ポリスチレン二次元集積発色の対応物を生物界に探すというのは自然な流れであった。そしてモルフォ蝶に出会ったのである。

最初に手に入れたモルフォ蝶は、ほとんど白色に近い絶妙なオパール発色をするモルフォ・スルコウスキーであった。その後の10年間に、10匹以上の各種モルフォ蝶を入手したが、スルコウスキーを見たときの感激を越えるものはない。

スルコウスキーの翅のリン粉表面とわれわれのポリスチレン球の二次元結晶表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真の比較が図-1に示されている。モルフォ蝶の発色が、CD表面と同じよ

図-1 走査型電顕 (SEM) で見たモルフォ蝶リン粉表面とポリスチレン粒子二次元集積表面

うにリン粉表面上の1 μm 間隔の縦格子にその原因があるとするれば、われわれの微粒子一層はこの格子を六方格子として模倣したことになる。六方格子の場合、縦格子は、120℃回転した3方向が対応するので、いろいろな方向に発色する。

このことをきっかけにプロジェクト終了時の報告として、一般書『自己集積の自然と科学—モルフォ蝶は作れる?』(岩波, 1997)を上梓した(図-2)。この中でモルフォ蝶の輝きは格子効果だにとりあえず解答を与えている。しかし、決定的なミステリー「虹の否定」すなわち格子効果ならCDと同じように虹色の発色となるはずだが、モルフォ蝶のブルー発色は方向に依存せずほとんどブルーという神秘を説明できていない。自然界の奥深さの一例として将来への宿題にすると結んでいる。

図-2 パリティシリーズ (丸善) の一冊として出版された「たん白集積プロジェクト」の報告書 (巻頭カラー写真参照)

〔氏名〕 ながやま くにあき
〔現職〕 自然科学機構岡崎統合バイオサイエンスセンター・教授
〔趣味〕 山行, ガーデニング, スキー
〔経歴〕 1964年東京大学理学部卒, 1973年同大学院修了, 1974年理学博士。1973～83年東京大学理学部助手, 1983～93年日本電子(株)生体計測学研究室長, 1990～95年科学技術振興機構プロジェクト総括責任者, 1993～97年東京大学教養学部教授, 1997年生理学研究教授を経て2001年2月から現職。専攻: 生物物理学, 電子線構造生物学, 生理現象の熱統計力学。

受付日: 2006年6月22日 受理日: 2006年10月10日
An Encounter of Science and Art in the Morpho Blue
Kuniaki NAGAYAMA *

*自然科学研究機構 岡崎統合バイオサイエンスセンター
岡崎市明大寺町東山5-1 (〒444-8787)

表-1 ロレアル色研究会／色ワークショップ (WS) における構造色関係のレクチャー

第1回	1996年12月13日	永山國昭	「微粒子集積によるモルフォカラー」
第3回	1997年 1月24日	平野 豊	「モルフォ蝶, 玉虫の美の秘密」
第13回	1998年 5月15日	中尾幸道	「貴金属超微粒子による着色」
第2回WS	1998年12月11日	田畑 洋／永山國昭	「地球6億年の色ーモルフォ蝶の世界」
第18回	1999年 2月19日	木下修一	「モルフォカラーリング」
第21回	1999年 5月21日	木村 朝	「インフィニットカラー: 新しいファンデーション」
第24回	2002年12月13日	竹国敬和	「構造色を示すゲル」
第27回	2003年 9月 3日	大石善久	「Agナノ粒子の多色フォトクロミズム」
第28回	2003年10月27日	石津浩二	「ナノ微粒子によるフォトニック結晶」
第7回色WS	2003年11月17日	入江正浩／竹岡敬和	「化学の色, 物理の色」
第31回	2003年12月 5日	西尾嘉之	「液晶性セルロース誘電体の構造色」
第34回	2004年 2月19日	斉藤 彰	「モルフォ蝶の青色の再現」
第36回	2004年 3月15日	吉川 浩	「回折格子による色表現」
第8回色WS	2004年11月26日	木下修一／針山孝彦	「輝く翅ー森の中の動く宝石」
第8回色WS	2004年11月27日	松井真二／A. パーカー	「構造色ー5億年の進化とナノテク」
第46回	2004年12月27日	吉田哲也	「微粒子の構造色」
第52回	2005年 4月25日	中林誠一郎	「モノを並べて色を作るー磁性微粒子の配列を外部磁場で制御する」
第54回	2005年 7月28日	湊 道夫	「イオンブレイティングによる装飾用硬質膜の色について」
第57回	2005年 9月 8日	高田 潤	「火炎の中のサイエンスーペンガラ, 柿右衛門, 備前焼の“緋襷”」
第61回	2005年12月16日	辻早季子	「無色のインクから虹色をつくるー自己集合する微粒子」

Morpho – blue principle and: its lithographic reproduction

図-3 2004年ロレアル色の科学と芸術賞金賞作品 (文献1の22頁図)。木下グループによるモルフォブルーの解明 (巻頭カラー写真参照)

たん白集積プロジェクトが終わった翌年, 色に関する新しいプロジェクトをスタートさせた。これは, 研究というより色というテーマに関し「科学と芸術」の出会いを支援する文化運動で, フランスの化粧品メーカーが日本に作った「ロレアル科学と芸術ファンデーション (LASF)」の支援のもと, 10年計画で始めたものである。活動は「色の科学と芸術賞」「色研究会」「ロレアル賞連続ワークショップ」の3本からなり, 色についてかなり広範な内容をカバーしている。

この活動の中でモルフォブルーのミステリーが解かれること

を願い, 研究会, ワークショップでその話題を募り, かつ, 賞への応募を誘導した。たとえば, 70回以上続いている「色研究会」では表-1のようにモルフォブルーの基本原理解である「構造色」のレクチャーを何度も開いている。しかも, この色研究会の第1回はモルフォブルーに関する私の問題提起で始まっている。ワークショップにおいても私自身講演を行い, また多くの人々に構造色の講演をお願いした。表-1の中に色WSと書いたものがそれらである。

活動を始めて7年目, ついに待っていたものが訪れた。第18回の色研究会でも講演した木下修一阪大教授のグループからの応募であった。

原理から解き起こし, 理論展開を行い, 実験で検証し, ついに「虹の否定のモルフォブルー」を完全解明したのである。この内容については次節で触れるが, 構造色を軸としたロレアル色の科学と芸術運動は, 成功だったように思う。(残念ながらこの運動は2006年度で終了) 木下グループの応募は, 2004年ロレアル色の科学と芸術賞の金賞に輝いたし (図-3), また同じ年の銀賞は英国人 P. Vukusic の作品で, モルフォに限らずアゲハ蝶など蝶の多彩な構造色の世界が分光法と電顕観察で明らかにされた (図-4)。

3. モルフォブルーのミステリー解明

ここでは, 木下グループの研究を中心に科学と芸術の出会いを紹介する²⁾。

モルフォ蝶のブルー発色が構造色であるのは簡単な実験からわかる。蝶の翅をアルコールにつけるとブルーからグリーンに変わる。取り出すとまたブルーに戻る。翅の構成成分であるキチンと同じ屈折率の液体につければ無色になるはずである。すなわち, ブルーはモノの固有の色ではない。先に私はミステリーを「虹の否定」(虹色発色のCD表面と異なり, 角度により色を変えないこと)と表現したが, もちろんわずかに色を変える。

単色光をモルフォ・スルコウスキーの翅の正面からあて, 反射

図-4 2004年ロレアル色の科学と芸術銀賞作品（文献1の24頁図）。P. Vukusic による蝶の構造色の解明

図-5 モルフォ・スルクウスキーの反射光分光スペクトル（文献3のFig.7）。正面からの白色光入射に対する反射光スペクトルの角度依存性

図-7 モルフォブルーを証明するために用いられた光学モデル（文献3のFig.17を改変）

光の角度依存性を調べた結果が図-5に三次元表示されている³⁾。

青（400 nm）を中心とした正反射（0°）が見えているが、この青のスペクトルは反射角（0°→90°）を変えてもほとんど変わっていない。ただ強度が弱まるだけである。通常の縦格子ならピーク強度とピーク周波数が赤方シフトしなければならない（虹色）。ミステリーがこうして定量化されたので次にその解明を紹介する。

図-1にリン粉表面がすべて格子で覆われていると述べたが、電子顕微鏡で詳細を見るとさらに微細構造が観察される（図-6）。単純な格子ではなく切れ切れの棚構造が格子の下に隠れていた。木下らは、これを図-7のようにモデル化し理論計算を行った。モデル化においては、モルフォ蝶表面の複雑な構造と光学的性質を反映させている。そして、棚構造による多層膜干渉、表面回折、棚構造の高さの不揃いによる散乱を取り入れた。またリン粉は、二層構造で裏地リン粉の褐色層が透過光を

図-6 モルフォ蝶リン粉の断面方向のSEM像（文献3のFig.3）。モルフォ・ディディウス（didius）

図-8 モルフォ・ディディウスの翅の反射スペクトル実測値 (A) と光学モデル (図7参照) を用いて計算した反射スペクトル理論値 (B)。(文献3のFig.5とFig.11)

図-9 モルフォ蝶のリン粉表面の切れ切れの柵構造の半導体工学的再現法 (文献4のFig.3)

吸収するとしている。この光学モデルを厳密に計算し、図-8のような結果を得ている。柵の層が六層のとき (モルフォ・ディディウスのモデル)、実測値と計算値の対応はかなり優れている。「虹の否定」効果の再現、青での強い正反射、緑の50°方向反射そして赤の弱い反射と定性的によく一致している。

木下グループは、こうした理論的解析に満足せず、実証実験を行っている。多層膜は現在の薄膜技術 (蒸着法、イオンスパッター法、CVD法) を使えば簡単に作れる。しかし、切れ切れの多層膜構造 (柵構造) を再現するのは難しい。工学者の協力を得てこれを解決した。半導体リソグラフィー技術の導入である。

切れ切れの柵構造の下地は、図-9Aのように島状の台をリソグラフィーで作ればよい。この上に図-9B, Cのように屈折率の異なる2種の膜を交互に積み、モルフォ蝶の微細構造が模倣できよう⁴⁾。結果は上々でモルフォブルーの輝きを、「虹の否定」のミステリーとともに再現できた。

2004年ロレアル賞の金賞の半分はもう一つのグループ、兵庫県立大学松井真二グループに与えられている。木下グループの主張の本質は、私の最初の説明と異なり、格子による干渉効果ではなく不揃いの柵構造にあった。1999年第18回色研究会で木下理論を聞いたとき、私の最初の反応は、「では柵構造1本でモルフォブルーが再現できるか」であった。木下氏は、そのとき、そのはずだと答えたが実証はなかった。また、上記の実証でもそれは不問であった。この難問に答えたのが松井グループである。

ナノ加工技術の一つのフォーカスイオンビーム (FIB) CVD法を用いてリン粉の柵構造体1本に対応する構造物を実際に作り (幅1 μm, 柵厚200 nm, 長さ20 μm)、顕微鏡観察を行ったの

図-10 モルフォ蝶の柵構造1本のナノテクノロジー再現 (A) とモルフォブルーの顕微鏡分光法による証明 (B) (文献1の23頁図より)

である。図-10Aにナノテクによる世界最小の柵構造の実例、そして図-10Bにこの構造物の光反射の顕微鏡観察が示されている。白色光の入射角を変えていっても常に顕微鏡像はブルーに輝いていた。すなわちモルフォブルーが1本の柵構造で実証されたのである。

図-10Aに示すゴミより小さい加工物にかかった費用は、トータルで数百万円は下らなかつただろう。(FIB-CVD装置自体が約1億円)。また図-10Bの像を得るための費用も post doctor の1カ月の給料分くらいかかっているはずだ。眼には見えないこんな小さなものがモルフォブルーの神秘の最後の壁を壊したのである。木下グループと松井グループのモルフォブルー研究は、ハイテク日本の存在感を示した科学技術の金字塔と言えよう。

4. 地球6億年の色

2005年のロレアル賞銀賞は英国人のA. Parkerに与えられた (図-11)。彼の色に関する説は壮大である。眼の出現と生物の色の出現が5億年以上前のカレブリア期の爆発という進化上のミステリーを説明するというものである⁵⁾。

図-11の1, 2は、三葉虫の眼の存在を示す化石である。果たしてこの眼は色を見ていたのだろうか。Parkerは、Yesと答える。その証拠としてカンブリア期の生物表面の化石、*Canadia* 上の固い殻表面の格子構造を挙げている (図-11の3)。これは真の格子構造で *Canadia* はCDのように虹色に輝いていたはずだとParkerは主張する。虹色の発色はもちろん色を見る眼があ

図-11 2005年ロレアル色の科学と芸術賞銀賞作品（文献1の16頁図）。A. Parkerの（構造）色と眼の共進化説

って初めて意味がある。

構造色が化石に残る例としてまた8000万年前のアンモナイトの化石、5000年前の甲虫の青い化石も挙げている（図-11下段）。甲虫の青は、コガネムシと同じように、キチン質の多層膜構造に由来することを顕微鏡観察から明らかにした（図-11下段右）。

進化的に見た色の話は、私たちが異次元に誘う極上の科学ミステリーだ。構造が残らなかったため、その存在を知り得ない恐竜の皮膚の色を考えれば、Parkerの説がいかに壮大かわかる。

5. 自然美の再現

最後にこうした奥深い自然の美、自然の色をどう技術世界に取り込み、日常生活に反映させていくか、四つの例で考えてみたい。

5.1 モルフォテックス（帝人）

1998年12月の色ワークショップは、日産（当時）田畑氏による、繊維を使ったモルフォブルーの再現の話であった。日産、帝人、田中貴金属の共同研究の結果、2成分で交互に年輪のように積層されたハイテック繊維が生まれた【図-12】。図-12Bに示すように屈折率差がわずか0.1しかないポリアミド（PA）とポリエステル（PET）を70～80 nm厚で交互に60回積層している。これによりこの繊維はブルー発色する。驚くなかれ、厚みを制御すると、緑も赤も発色できる⁶⁾。

市場性のある技術化に10年以上の歳月をかけているが、この技術も日本の科学技術の華と言えよう。私は2006年1月20日科学技術振興機構主宰「科学と音楽の夕べ」の中の講演、「文化としての科学を楽しむ」でモルフォブルーの話をしたが、モルフォテックスで作ったウェディングドレスの佳人を登場させクライマックスとしている。

5.2 インフィニットカラー（資生堂）

市場化されている構造色のもう一つの例は化粧品である。マ

図-12 帝人モルフォテックス繊維の断面のSEM像（A）と高分解能TEM像（B）（文献6のFig.8）

図-13 マイカ片にチタンコートして作られた干渉発色性化粧品“インフィニットカラー”のピグメント構造モデル（A）とSEMによる断面像（B）（文献7のFig.6とFig.7）

図-14 微粒子カラーを示すコロイド結晶のSEM像（文献8の図5）

図-15 コレステリック液晶の偏光特性を説明するモデル図（文献9のFig.3）

イカの微小片を使い、その両面に酸化チタンのコーティングを行っている（図-13）⁷⁾。チタン層の厚さ（200～300 nm）の制御で赤系統と青系統の色が出せるという。図-13Bにはインフニットカラーと名付けられたピグメント像が走査型電顕により示されている。

5.3 微粒子カラー（綜化科学）

ポリスチレン粒子の六方細密充填物を用いても粒子径の制御により発色を制御できる。オパールとの違いは粒子径が大きいこと。そして細密充填であることである（図-14）。本来このような三次元結晶では色の角度依存性が出る。逆にそのことをうまく使おうとしている⁸⁾。しかし三次元結晶をどう固定するか（バインダー問題）、また遊色でない固有色を作るにはどう工夫すべきか、まだ決定打にはいたっていないようである。

5.4 液晶多層膜

玉虫やコガネ虫の発色も構造色で、これは厳密に多層膜発色であると考えられている。コレステリック液晶でこの多層膜を自己集積させるアイデアが最近提出された⁹⁾。この発明のきっかけは甲虫の翅発色が偏光していることの発見だった。そして甲虫の多層膜成分であるキチン、そしてセルロースなどがコレ

図-16 甲虫（コガネ虫）の青から赤にいたる多彩な羽の色をコレステリック液晶で再現（文献9のFig.3）（巻頭カラー写真参照）

ステリック液晶を作るという事前知識が活かされた。コレステリック液晶もこうした偏光特性があること（液晶カラーテレビの原理）を利用し（図-15）、コレステリック液晶の固体薄膜に固有色を付加させることに成功している。たとえば、ポリペプチドの液晶を用い、青から赤にいたる種々の甲虫表面を図-16に示すように見事に再現した。

6. おわりに

モルフォブルーをめぐって行われた私の知的冒険の旅は、10年で終わりとなった。色としての自然美を見せてくれるモルフォ蝶一つとっても自然の奥深さに感嘆するほかはない。こうした奥深さを追求することが新しい科学技術の方向に求められているように思う。それは、単に利便性だけでなく、私たち日本人の自然性に根ざす感性をさらに豊かにしてくれると信じている。

今回の解説は、昨年（2005年）の7月7日、岡崎で行った色材協会夏期ゼミナール講演「地球6億年の色ーモルフォブルーの世界」を基調としている。本文が白黒印刷のため美しいモルフォブルーの一部しかお見せできなかったことをお詫びしたい。

文 献

- 1) ロレアルパフレット“色2005”（ロレアルアーツアンドファンデーション、2005）より。
- 2) 木下修一：“モルフォチョウの碧い輝き”，化学同人（2005）。
- 3) S. Kinoshita, S. Yoshida：“Structural Colors in Biological Systems (Eds. Kinoshita & Yoshida)”，Chapter 3-3, Osaka Univ. Press (2005)。
- 4) A. Saito：“Structural Colors in Biological Systems (Eds. Kinoshita & Yoshida)”，Chapter 7-2, Osaka Univ. Press (2005)。
- 5) A. Parker：“in the blink of an eye：how vision kick-started the big bang of evolution”，Free Press, London (2003)。
- 6) H. Tabata：“Structural Colors in Biological Systems (Eds. Kinoshita & Yoshida)”，Chapter 7-3, Osaka Univ. Press (2005)。
- 7) A. Kimura：“Structural Colors in Biological Systems (Eds. Kinoshita & Yoshida)”，Chapter 7-4, Osaka Univ. Press (2005)。
- 8) 吉田哲也：未来材料，6（#2），16（2006）。
- 9) J. Watanabe, H. Takezoe：“Structural Colors in Biological Systems (Eds. Kinoshita & Yoshida)”，Chapter 7-6, Osaka Univ. Press (2005)。