

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360039

研究課題名 (和文) 広い角度で色が変わらない構造発色体の開発

研究課題名 (英文) Development of structural color materials that maintain a color in wide angular range

研究代表者

齋藤 彰 (SAITO AKIRA)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90294024

研究成果の概要：本研究の目的は、生物（特にモルフォ蝶）のもつ巧妙なナノ構造をベースに、色素を用いず、構造色による新規な発色体を作製することである。申請者らは特殊なナノ構造構築によりモルフォ蝶の青色を再現した後、本課題の中で「量産プロセス開発」に成功し、従来比 1000 倍の効率を得た。次に光学特性（1. 角度広がり 2. 色度）の自由な制御を試み、1. は成功し、2. では新たなシミュレーション法の導入によって自由な色相制御の足がかりを得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2007 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・光学材料

キーワード：(1) 構造色 (2) 応用光学 (3) 生物物理 (4) ナノインプリント (5) バイオミメシス (6) モルフォ蝶 (7) 干渉色

## 1. 研究開始当初の背景

概要で述べたモルフォ蝶の特異な発色に関し、青色については近年、特殊なナノ構造を構築することで、申請者らは光特性をほぼ再現した。しかし、工学的には「量産プロセス開発」「光学特性の制御」の 2 点がネックとなり、実現に至っていない。

## 2. 研究の目的

上記の背景に鑑みて、本研究の目的は、1) 発色基板の量産プロセス開発、2) 光学特性の自由かつ厳密な制御（ただし特性とは、1.

角度広がり、2. 色度、の 2 通り）を実現することである。

## 3. 研究の方法

1) 量産プロセス開発については、基板表面の特殊なナノパターン複製が鍵である。この目的には、近年進歩の著しいナノインプリントリソグラフィ（NIL）技術を用いた。その際、材質と各種条件を様々に工夫した。次に、パターン複製に続いて多層膜の成膜が必要であるが、その条件も仔細に検討が必要である。膜形成後は、その量産基板が「広角

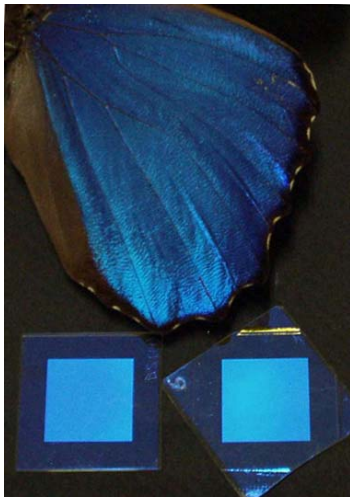
で色の不変な、高反射率の、鮮明な色、を再現すること」(モルフォ蝶の光特性)の証明を行った。

#### 2) 光学特性の自由かつ厳密な制御

これにはナノパターンの構造確認が重要である。成膜の前後で、SEMおよびAFM観察により、十分な精度で構造が再現されていることを確認した。さらに断面SEMでは、発色の根本である切れ切れ多層膜構造の形成を精査した。その後、2)の主題である光学特性が、設計に対してどの程度正しく実現されているか、について評価した。ここで光学測定とは、各波長で反射率の角度分布を測定することが主体である。最終的にナノ構造と光特性との間の関係を見積もることで、ナノ構造の最適化→光特性の最適化(1. 角度広がり、2. 色度、の2通り)、という方向で特性の最適化を行った。

#### 4. 研究成果

1) 量産プロセス開発については、NIL技術において、材質と各条件を工夫することで、ナノ構造のパターン複製に成功した。次に、多層膜の成膜においても各条件を検討し(従来の石英上でなく、ナノインプリント「樹脂」基板上への成膜条件の検討)、樹脂上への直接成膜に成功した。これにより、最終的に、1000倍の効率向上に成功した。また、光特性の測定結果も、NILで作製された量産型基板が、従来プロセスの基板とまったく遜色のないことを示した。



図：代表的なモルフォ蝶(*Morpho Didius*)の後翅(上)と、人工モルフォ再現基板のプロトタイプ(下左)および量産型人工モルフォ基板(下右)の比較。

#### 2) 光学特性の自由かつ厳密な制御

当初「ほぼ(定性的に)成功」のレベルであった人工モルフォ発色の光学特性(特に1. 角度広がりと2. 色度、の2点)について、

「完全かつ自由な制御」を目標に研究を進めた。具体的に1. では基板加工の構造パラメータをナノレベルで調整し、その反射特性への影響を精査した。その結果、パラメータの最適化が可能となり、真のモルフォ蝶に等しい角度広がりを得ることに成功し、構造と光学特性との相関が定量的に把握できるようになった。2. の色度ではまず基板と別に、波長を決める膜パラメータを調整することでスペクトルを制御し、次に、基板では従来不完全であった乱雑さを増やすよう改善した。その結果、スペクトル(波長間の関係)でも真のモルフォ蝶スペクトル再現に成功した。ただし、まだ回折効果が不十分であり、基板の乱雑さ増加だけでは対処として不完全なこと、むしろ予想以上に成膜過程での「膜の平坦化」が大きく影響することが示された。その際、新たなシミュレーション

(FDTD解析)を導入し、予測と構造(作製)と光学測定の関係づけを図った。なおこの計算は、従来のシミュレーション(多層膜反射の解析的Matrix計算)では困難だったものである。その結果、まず従来の解析的計算の功罪が把握でき、FDTD解析により、これまで扱えなかった構造パラメータの最適化が可能となった。同時にパラメータを多数変えた様々なヴァリエーションの発色体を作製し、その影響を調べた。詳細はまだ検討中の内容を多く含むが、構造と光学特性との相関が乱雑さを含めて定量的に把握できるようになったと言える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1) 齋藤 彰、宮村友輔、石川陽子、村瀬淳一、赤井恵、桑原裕司：  
“誘電多層構造によるモルフォ蝶型発色膜の作製”，

Journal of the Vacuum Society of Japan (査読有)，52，4 (2009) 218-223.

2) A. Saito, Y. Miyamura, Yoko Ishikawa, J. Murase, M. Akai-Kasaya, Y. Kuwahara. :  
“Reproduction, mass production, and control of the Morpho butterfly's blue”,  
Proc. SPIE (査読有)，7205, 720506 (2009) 1-9.

3) 齋藤彰：  
“ナノインプリント法によるモルフォ再現基板の新たな展開 ~ 空間分布制御・量産効率向上・色制御 ~”  
0 plus E (査読無)，30 (2)，(2008) p.156-162.

- 4) 石川陽子、宮村友輔、赤井恵、桑原裕司、齋藤 彰：  
"モルフォ・ブルー再現基板の作製と、その最適化"  
J. of Soc. of Powder Technol. Japan (査読有)  
45 (3), (2008) 180-186.
- 5) A. Saito, Y. Ishikawa, Y. Miyamura, M. Akai-Kasaya, Y. Kuwahara:  
"Optimization of reproduced Morpho-blue coloration",  
Proc. SPIE (査読有), 6767 (2007) 676706, 1-9.
- 6) 齋藤 彰、石川陽子、宮村友輔、中島匡司、十河健司、赤井恵、桑原裕司、平井義彦：  
"ナノインプリントリソグラフィによるモルフォ・ブルー量産技術の開発",  
Journal of the Surf. Sci. Soc. of Japan (査読有)  
28 (2007) 414 -418,
- 7) A. Saito, Y. Miyamura, M. Nakajima, Y. Ishikawa, K. Sogo and Y. Hirai:  
"Morpho-Blue Reproduced by Nano Casting Lithography",  
Proc. SPIE (査読有), 6327, (2006) 63270Z, 1- 9.
- 8) A. Saito, M. Nakajima, Y. Miyamura, K. Sogo, Y. Ishikawa Y. Kuwahara and Y. Hirai:  
"Reproduction of the Morpho Blue by Nano Casting Lithography",  
J. Vac. Sci. Technol. B (査読有), 24(6) (2006) 3248-3251.
- 9) 齋藤彰、平井義彦：  
"1枚の写真ーモルフォブルーの再現ー",  
0 plus E (査読無), 28, (9) (2006) .883-884.

[学会発表] (計 21 件) (うち招待 10 件)

- 1) A. Saito他,  
"3D engineering of photonic structures- an example of morpho butterfly",  
SPIE Photonics West 2009, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA (2009) 1/24 -29. (招待講演)
- 2) Akira SAITO:  
"Development of Application studies on Artificial Morpho-Butterfl's color",  
The 9th International Symposium. on biomimetic Materials Processing, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, Jan.20-24 (2009). (招待講演)
- 3) A. SAITO:  
"Specific Surface Structure to Reproduce the Morpho-butterfly's Brilliant Blue",  
The 17th World Interfinish Congress and

Exposition, Haeundae-Grand Hotel, Busan, Korea, June 16-18 (2008). (招待講演)

- 4) Akira SAITO:  
"High Resolution Elemental Analysis and its Applications: from Single Biological Cell to Single Atomic Scale."  
The 8th International Symposium. on biomimetic Materials Processing, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, Jan.21-24 (2008). (招待講演)
- 5) A. Saito他:  
"Reproduction and Mass- production of Morpho butterfly' s Blue",  
SPIE Optics East, Seaport World Trade Center, Boston, USA (2007) 9/9-12. (招待講演)
- 6) Akira SAITO :  
"Mystery of Morpho Butterfly's Blue -"structural color" Based on Bio-nanostructures & its Applications-",  
The 7th International Symposium on biomimetic Materials Processing, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, Jan.23-25 (2007). (招待講演)
- 7) Akira SAITO :  
"Interaction of Quantum Beam and Materials: Various Applications in Nanoscience",  
IFCAM (International Frontier Center for Advanced Materials) Seminar, IMR (Institute for Materials Research), Tohoku University, Jul. 11 (2006), (招待講演)
- 8) A. Saito他:  
"Morpho blue reproduced by nanocasting lithography",  
SPIE Optics & Photonics 2006 California, USA (2006) 8/13-17.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

特許名 発色体とその製造方法.

発明者 齋藤 彰、吉岡伸也、木下修一.

特許番号 特願 2003-391572.

出願年月日 2003 年 11 月 21 日.

(2008 年度の審査請求により、2008 年 9 月 27 日 特許成立)

[その他]

<展 示> (計 2 件)

1)

集会名：セミコン・ジャパン 2008

主催機関：セミコン・ジャパン

開催日：2008 年 12 月 3-5 日

場所：幕張メッセ  
タイトル：阪大 GCOE 高機能化原子制御製造  
プロセス教育研究拠点／モルフォ型構造発  
色体の開発と応用

2)

集会名：環境・エネルギー材料研究展  
主催機関：物質・材料研究機構  
開催日：2008年5月29日  
場所：東京ビッグサイト  
タイトル：バイオミメティクス 天然構造  
利用

<学会オーガナイザー> (計1件)  
第9回構造色シンポジウム  
2008年11月15日  
大阪大学・吹田コンベンションセンター

<出版資料提供> (計1件)  
『グリーンテクノロジー』 藤井恒男 編著,  
中央経済社(2009) ISBN978-4-502-66690-2,  
資料写真提供p.193, 第7章 自然に学ぶもの  
づくり

<受賞> (計1件)  
The 17th World Interfinish (Interfinish  
2008),  
by World Interfinish Congress committee  
"Invited Presentation Award"  
Akira SAITO  
2008.06

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 彰 (SAITO AKIRA)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90294024

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者