

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340121

研究課題名（和文） 魚類を中心とする色可変な構造色の研究

研究課題名（英文） Study of tunable structural colors in fish

研究代表者

吉岡 伸也（YOSHIOKA SHINYA）

大阪大学・生命機能研究科・助教

研究者番号：90324863

研究成果の概要（和文）：自然界にはタマムシやモルフォチョウのように、輝くような色（構造色）を持つ生物が数多く存在している。構造色の反射波長は、主として微細構造の周期によって決定されるため、例えばチョウの翅のように乾燥した部位を持つ構造色では、色が能動的に変化することはない。しかし、魚類においては、微細構造を変化させることで色可変性を実現した構造色が存在する。本研究では、そのような構造色持つ典型例としてネオンテトラを中心に、その仕組みに関する研究を行った。

研究成果の概要（英文）：In nature, many examples including jewel beetle and Morpho butterfly exhibit brilliant colors called structural colors. The wavelength of reflected light is mainly determined by the spatial period of microstructure. Thus, the structural color of, for example, the butterfly wing cannot be actively varied, whose microstructure is contained inside dried wing scales. However, some species of fish have tunable structural colors, since their color-causing microstructures are motile. In this study, we study mainly the structural color of a small tropical fish, neon tetra, which is a representative species having such tunable characteristic.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2012 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：数物系科学

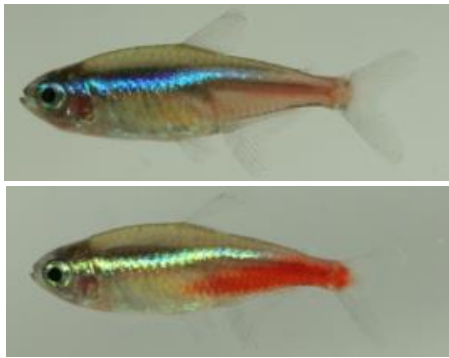
科研費の分科・細目：生物物理・化学物理

キーワード：構造色、魚類、色可変性、フォトニック結晶

## 1. 研究開始当初の背景

自然界にはあたかも人工物のような輝きを持つ生物が数多くいる。例えばタマムシは金属のような輝きを放ち、樹上を高く飛んでいるときでさえ容易にその姿を見つけることができる。このような美しい色を持つ生物は、古くから科学者の注目を集め、輝きの背

後にある物理機構が研究されてきた。ニュートンは著書の中でクジャクの羽根について記述しているし、光散乱で有名なレイリーやラマンは、昆虫や鳥の羽根、さらには貝殻の色についての論文を書き残している。電子顕微鏡が開発された 20 世紀後半には、輝く色の背後にはサブミクロンサイズの微細構造



る。底部での反射板間隔  $D$  は一定。図1 ネオンテトラ。側部の明るい部分が虹色素胞

が発見され、光の干渉や回折といった物理光学現象が鮮やかな色の起源であることが明らかになった。やや曖昧な定義ではあるが、微細構造に起源を持つこれらの色を、色素の吸収による着色と区別して、“構造色”と呼んでいる。

構造色は古くは 20 世紀初頭から研究論文を見つけることができる。しかし、21 世紀をになった現在においても、発色機構に関する研究は終焉を迎えたわけではない。むしろ、構造色に関する論文数は、世界的に見て急速に増えつつある。特に 2000 年以降は、例えば *Phys. Rev. E* や *J. Phys. Soc. Jpn* を始めとする物理系の雑誌、英国王立協会が刊行する生物系の雑誌 (*Proc. R. Soc. Lond. B* や *J. R. Soc. Interface*) などに、多くの論文を見つけることができる。そのような構造色研究の高まりには次のような背景あるだろう。三次元フォトニック結晶のような複雑な微細構造体が生物の内部に実在し、確かに発色に利用されていること、干渉を起こす周期的な構造だけではなく、あえて不規則な要素が導入された構造色が見つかり、回折格子や多層膜干渉といった単純な光学モデルを超えた発色効果が存在すること、さらには生物の巧みな発色機構を模倣することで、塗装、化粧品など光輝材への応用が囑望されていること、などである。“自然に学べ”というフレーズをたびたび耳にする現在、構造色はその代表例として再び脚光を浴びている。

最近出版された構造色に関する研究論文の多くは、鳥の羽根や昆虫の翅などを対象としている。その理由には、細胞レベルでは死んでいる部分が微細構造を持っているため、長期間に渡って発色が安定であるという研究上の利点が考えられる。反面、そのような構造色は能動的に色を変化させることは不可能である。ところが、魚類の構造色では、生きた細胞内に発色性の微細構造が存在し、微細構造を調節することで、色を変化させることができる。その代表例は、観賞用としても知られる小型の熱帯魚ネオンテトラである (図1)。側部のストライプは、日中は鮮

やかな青色をしているが、夜になると (周囲の環境が暗くなると) 紫色に変化する。また、魚が興奮したときには黄色へと変化する。このような色可変な構造色は、他の淡水テトラや、ルリスズメダイなどの海水の熱帯魚にもその例を見つけることができ、魚類の中では珍しくない。また、爬虫類の間にも色可変な構造色が知られている。

魚の構造色が色可変性を持つことは 20 世紀中ごろから既に報告されており、ネオンテトラについては 80 年代から 90 年代にかけて、英国の Lythgoe らのグループ、日本国内では東邦大学の藤井、大島らのグループが精力的な研究を行った。その結果、発色を担う細胞内の微細構造はほぼ解明され、色変化の機構に関して二つのモデルが提案された (後述)。しかし、詳しい光学測定は行われておらず、色変化のメカニズムに関してどちらのモデルが妥当であるのかは、決定されないまま残されていた。

## 2. 研究の目的

ネオンテトラの構造色を担う細胞 (虹色素胞) の内部には、小さな六角形の反射小板が配列した列が細胞核の上に二列存在する (図2)。小板の材質はグアニン結晶で、屈折率は 1.8 程度と大きいために、水中でも比較的高い反射率を持つ。小板一枚の大きさは数~ $10\mu\text{m}$  程度で、配列の間隔は光の干渉を起こすのに丁度良いことが電子顕微鏡観察から分っている。すなわち、反射小板と細胞質の層とが周期的に並んだ多層膜構造が構造色の原因である。したがって、虹色素胞の色が変化することは、小板の間隔 (細胞質部分の厚さ) が変化することにより、干渉条件が変化して異なる波長の光が反射されることが

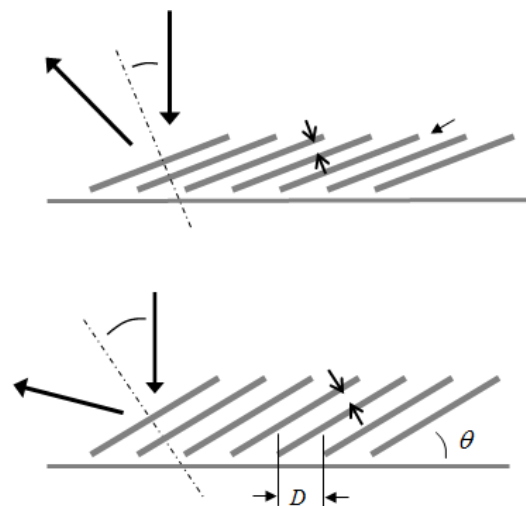


図2 ブラインドモデル (虹色素胞内部構造の縦断面模式図。上と下では反射板の傾き角度が異なるため、板の間隔と光の反射方向が異なる

原因であると推測される。

反射板間隔が変化する運動機構には、次に示す二つのモデルが提案されていた。英国の Lythgoe らは、浸透圧を変えて色変化を誘導する実験を行った結果から、水が虹色素胞へ流入すること、すなわち細胞が膨張することが小板間隔を変化させていると考えた。一方、東邦大学の大島らは、図 2 に示すブラインドモデルと呼ばれるモデルを提案した。それはちょうど、窓にかかるブラインドのように、小板の傾き角度が変化し、その結果小板の間隔が変化するというモデルである。

本研究は、ネオンテトラの色可変機構として、どちらのモデルが正しいのか、実験的な検証を行うことを第一の目的として行った。

### 3. 研究の方法

ブラインドモデルでは、小板の傾きが変化するに伴って、光の反射方向が変化することが予測される。一方、細胞が膨張するモデルではそのような効果は予想されない。したがって、反射角度と反射スペクトルを同時に測定することができれば、二つのモデルを明確に区別することが可能であると考えられる。

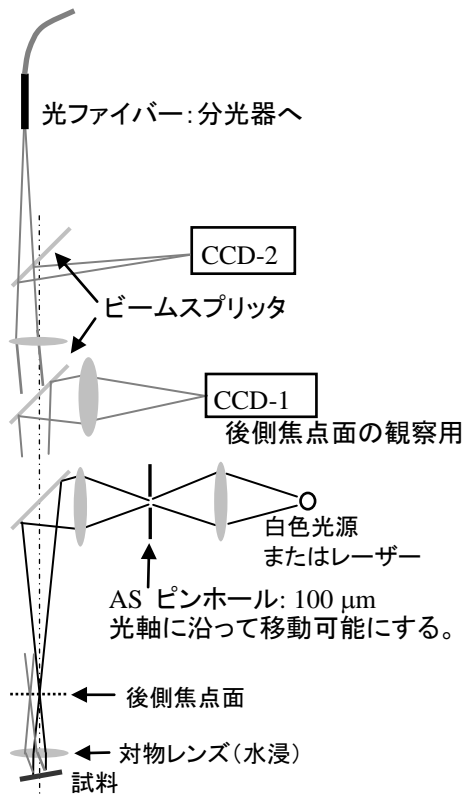


図 3 顕微光学システム。上部に配置した光ファイバーにより、微小部分の反射スペクトルを測定する。二つの CCD は、試料の実像と対物レンズの後側焦点面(瞳面)を観察する。試料は生理食塩水に浸っており、ゴニオメータにより角度を変えることができる。

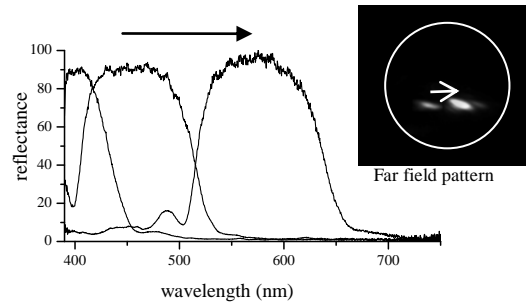


図 4 色変化に伴う反射スペクトルの長波長シフト(左)と、それに伴って瞳面上のスポットが移動する様子(右)。白い円は対物レンズの開口によって定まる角度で、光軸となす角度は 36 度になる。この角度は対物レンズの開口数から計算できる。

そのため、本研究では、図 3 に示すような、反射光スペクトルと反射方向を同時に測定可能な光学系の構築を行った。すなわち結像面にはファイバーを設置し、微小部分から反射された光を分光器に導入する。一方、一つの CCD カメラは対物レンズの後側焦点面を観察し、反射光の方向に関する情報を得る。

### 4. 研究成果

虹色素胞が紫から黄色にまで色変化する間に計測された反射スペクトルを図 4 に示す。スペクトルの形状はほぼ同一のままで全体が長波長側にシフトする様子が見取れる。高い反射率、広い反射帯域、短波長側のサイドバンドなどの特徴は、多層膜干渉スペクトルによく見られる特徴で、反射小板の厚さ 60nm とグアニン結晶の屈折率(1.83)の値を用いて理論的におよそ再現することができる。一方、対物レンズ後側焦点面の観察においては、色変化の前後において反射スポットの位置が大きく変化することがわかった(図 4 右)。画像解析の結果、光が反射される方向はおよそ 15 度変化しており、反射小板の角度に直すと 7.5 度の傾き変化があったこ

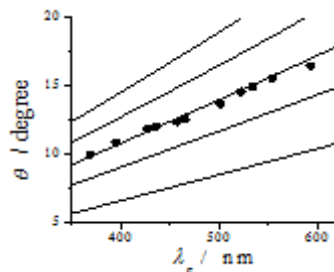


図 5 実験から得られた反射板の傾き角度 $\theta$ とスペクトルピーク $\lambda_c$ の関係(●)。曲線はブラインドモデルからの予測。虹色素胞の底部での反射板間隔 D (図 2 で定義) が異なる五本の曲線をプロットしてあり、上から D=500、570、670、800、1100nm に対応する。

とになる。詳しい解析を行うと、反射板の傾き角度とピーク波長とあわせてプロットすると図5のような結果が得られた。ピーク波長が長波長側へ移動するのに伴って、反射板の傾き角度が増大することが分かり、この振る舞いはブラインドモデルによって矛盾なく再現することができる。反射板の動きに関して他のモデルを仮定した場合には定性的に異なった振る舞いになるため、ネオンテトラにおける色変化の光学的な仕組みとしては、ブラインドモデルが妥当であることを定量的に結論できた。

本研究ではネオンテトラの他にも、興味深い色変化を示す構造色の研究を行った。そのうちの一つはヤマトタマムシである。タマムシの角度依存による色変化は“玉虫色”と呼ばれ、広く知られている。しかし、その色変化は単純な波長シフトだけではない複雑な特徴を含んでいる。本研究では、凹凸のような不規則性を含む自然界の多層膜構造を対象に、屈折率とその波長依存性を定量的に決定する方法を開発し、その方法をタマムシに適用した。その結果、初めて多層膜構造を形成する二種類の材質の屈折率を定量的に決定することに成功した。その値を用いて、タマムシの反射率とその角度依存性を定量的に解析を行い、タマムシの“玉虫色”たる原因を明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- ①S. Yoshioka, Y. Shimizu, S. Kinoshita and B. Matsuhana:” Structural color of a lycaenid butterfly: Analysis of an aperiodic multilayer structure”, *Bioinspiration & Biomimetics*, 査読有, (2013), in press.
- ②Y. Takeoka, S. Yoshioka, A. Takano, S. Arai, N. Khanin, H. Nishihara, M. Teshima, Y. Ohtsuka, and T. Seki:” Production of Colored Pigments with Amorphous Arrays of Black and White Colloidal Particles”, *Angewandte Chemie*, 査読有, (2013), in press.
- ③不動寺浩, 針山孝彦, 山濱由美, 吉岡伸也, 石井大佑, 木村賢一, 久保英夫, 下村政嗣, 魚津吉弘:” ホットエンボッシングによって作製したドーム状構造のオパール膜”, *高分子論文集*, 査読有, vol. 70, (2013), 227-231.
- ④S. Yoshioka, S. Kinoshita, H. Iida, and T. Hariyama:” Elucidation and reproduction of the iridescence of a jewel beetle”, *Proc. SPIE*, 査読有, vol. 8480, (2012), 848005-1-10.
- ⑤E. Lee, J. Miyazaki, S. Yoshioka, H. Lee,

and S. Sugita:” The weak iridescent feather color in the Jungle Crow *Corvus macrorhynchos*”, *Ornithological Science*, 査読有, vol. 11, (2012), 59-64.

- ⑥N. Okada, D. Zhu, D. Cai, J. B. Cole, M. Kambe, and S. Kinoshita:” Rendering Morpho butterflies based on high accuracy nano-optical simulation”, *J. Opt.*, 査読有, vol. 42, (2012), 25-36.
- ⑦S. Yoshioka, S. Kinoshita, H. Iida, and T. Hariyama:” Phase-adjusting layers in the multilayer reflector of a jewel beetle”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, vol. 81, (2012), 054801-1-7.
- ⑧S. Yoshioka and S. Kinoshita:” Direct determination of the refractive index of natural multilayer systems”, *Phys. Rev. E*, 査読有, vol. 83, (2011), 051917-1-7.
- ⑨S. Yoshioka, B. Matsuhana, S. Tanaka, Y. Inouye, N. Oshima and S. Kinoshita:” Mechanism of variable structural colour in the neon tetra: quantitative evaluation of the Venetian blind model”, *J. R. Soc. Interface*, 査読有, vol. 8, (2011), 56-66.
- ⑩M. Kambe, D. Zhu, and S. Kinoshita:” Origin of retroreflection from a wing of the Morpho butterfly”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, vol. 80, (2011), 054801-1-10.

〔学会発表〕(計 18 件)

- ①吉岡伸也、タマムシの構造色に施された微妙で重要な工夫、第13回構造色シンポジウム、2012.11.10、青山学院大学
- ②木下修一、伝統工芸と構造色：銀箔の発色現象、第13回構造色シンポジウム、2012.11.10、青山学院大学
- ③吉岡伸也、いい加減かつ巧妙：生物に学ぶ光技術、2012.10.2、新学術領域「生物規範工学」発足記念 公開ワークショップ、国立科学博物館
- ④吉岡伸也、木下修一、飯田晴久、針山孝彦、タマムシの構造色、2012.9.21、日本物理学会2秋季大会、横浜国立大学
- ⑤ S. Yoshioka、Aperiodic multilayer designs in the structural colors of natural systems、2012.8.14、SPIE Optics + Photonics meeting、San Diego convention center, USA
- ⑥K. Seo, S.-i. Lee, S. Yoshioka, J. C. Choe, P. G. Jablonski, Melanin content in structural and non-structural feather of the Magpie nestlings, 2012.8.12-17, the 14th International Behavioral Ecology Congress, Lund University, Sweden
- ⑦木下修一、江畑芳、吉岡伸也、銀箔の着色に見られる興味深い光学現象、2012.6.14、第37回光学シンポジウム、東京大学

- ⑧吉岡伸也、多様な微細構造を利用した生物の構造色、2011.11.19、第12回構造色シンポジウム、名古屋大学
- ⑨吉岡伸也、多様な微細構造を利用した生物の構造色、2011.11.19、第12回構造色シンポジウム、名古屋大学
- ⑩吉岡伸也、藤田浩晃、木下修一、チョウの翅が持つ三次元微細周期構造とその光学特性 II、2011.9.24、日本物理学会秋季大会、富山大学
- ⑪清水悠司、吉岡伸也、木下修一、非周期的な多層膜によるミドリシジミの構造色、2011.9.23、日本物理学会秋季大会、富山大学
- ⑫吉岡伸也、生物に学ぶ構造的発色の原理、2011.9.16、色材分析講座、名古屋市工業研究所
- ⑬S. Yoshioka and S. Kinoshita、Direct determination of the refractive index of the multilayered cuticle of a jewel beetle、2011.6.4、International Symposium on Natural Photonic Structures、Shanghai、China
- ⑭吉岡伸也、多層膜の屈折率決定方法：タマムシを例として、2010.11.13、第11回構造色シンポジウム、立教大学
- ⑮木下修一、FDTD法の使い方、2010.11.13、第11回構造色シンポジウム、立教大学
- ⑯吉岡伸也、木下修一、タマムシの持つ多層膜構造とその屈折率決定、2010.9.26、日本物理学会秋季大会、大阪府立大学
- ⑰朱棟、吉岡伸也、木下修一、FDTD法によるモルフォチョウ微細構造の解析 II 実際の構造をまねた基本モデルの光学特性、2010.9.26、日本物理学会秋季大会、大阪府立大学
- ⑱吉岡伸也、生物の構造的発色と色変化、2010.9.16、第59回高分子討論会、北海道大学

[図書] (計2件)

- ①S. Yoshioka、Elsevier、Pattern Formation and Oscillatory Phenomena、(2013)、199-251.
- ②吉岡伸也、次世代バイオミメティクス研究の最前線、(2011)、144-149.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉岡 伸也 (YOSHIOKA SHINYA)  
大阪大学・生命機能研究科・助教  
研究者番号：90324863

### (2) 研究分担者

木下 修一 (KINOSHITA SHUICHI)  
大阪大学・生命機能研究科・招聘教授  
研究者番号：10112004

(3) 連携研究者  
なし