

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32651

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540436

研究課題名(和文)有限要素法によるポーラス・コロイドフォトリック構造の特性解析

研究課題名(英文) Analysis of optical properties of the porous colloid photonic structure by the finite element method

研究代表者

植田 毅 (UETA, Tsuyoshi)

東京慈恵会医科大学・医学部・教授

研究者番号：30251185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：青い羽根を持つルリビタキの羽枝の断面TEM画像より、羽枝を多孔質誘電体円筒とした数理モデルを完成し、様々な入射角に対する反射特性を計算した。その結果、ルリビタキの羽の反射スペクトルはポーラス構造による反射で、また、エアロッドがランダムに並んでいることが本質的であること、反射スペクトルが青色より長波長側に尾を引くのは光が斜めに入射した部分の寄与であることを示した。また、網目構造を持ち、より複雑なカワセミの羽枝の実測に基づく数理モデルを完成した。

研究成果の概要(英文)：It has been observationally confirmed that the color of birds, such as kingfisher and red-flanked bluetail, is a structural color owing to the interference of the light within a sponge structure inside a barb. In this study, we proposed the disordered air rod photonic crystal as a model of the structural color of the feather of blue birds, and computed the reflection properties. It was found that the reflection spectra are broadened more at higher frequency due to disorder of the lattice of the photonic crystal. The blue structural color is attributed to the reflection by the first photonic band gap of the disordered porous photonic crystal. This study also presents full modeling of the cross-section of blue feather barbs of Tarsiger cyanurus and computed optical properties of the barbs of Tarsiger cyanurus by means of finite element simulations.

研究分野：計算物理学

キーワード：ランダム系 構造色 フォトリック・アモルファス ポーラス構造 有限要素法 ランダムレーザー  
反射スペクトル ルリビタキ

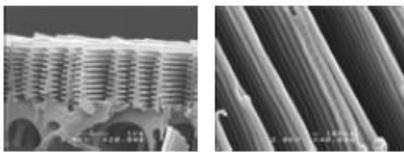
1. 研究開始当初の背景

モルフォ蝶 モルフォ蝶の翅の表面の鱗粉の構造



モルフォ蝶

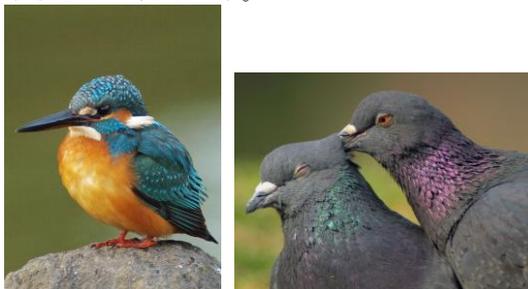
⑤ 断面 (20000 倍) 表面 (40000 倍)



lamella が積層された ridge が 650nm 間隔で周期的に配置されている。

モルフォ蝶の翅の表面の鱗粉の構造

モルフォ蝶の翅の光沢のある青い色は翅の表面に規則的に並んだ鱗粉による光の反射による構造色であることが判明している。構造色は昆虫やトカゲなどさまざまな生物が利用している。翡翠、孔雀など鳥の光沢のある色は、羽毛の繊維の中の 3 次元網目状の構造による光の反射、干渉による構造色であるといわれている。



翡翠と鳩の羽の構造色

モルフォ蝶やコガネムシ、トカゲ、ミミズなどの構造色は表皮構造の空間平均をとった誘電率を用いた多層膜による干渉で説明できるが、鳥の構造色については未だに理論的に説明できていない。実験的に、翡翠の羽毛の繊維には網目状の 3 次元構造があることが分かっている。また、その網目構造が相乗になっている可能性も示唆されており、どのような干渉が構造色を発生させているのかは未だ未解明である。

その原因の一つは網目構造のモデル化が困難であることにある。羽繊維の断面の電子顕微鏡写真はありますが、微細構造であるため立体構造のデータが取れていない。また、数

理的に構造が解明されていないため、数理的に発生させることもできていない。また、構造が複雑であるため、その構造の電磁波の反射透過特性の解析は非常に大規模なものになるため、実現していない。

2. 研究の目的

(1) 翡翠の羽毛繊維の網目構造の数値モデルを構築することから始める。

現状では、羽毛繊維の網目構造のどのような構造が構造色にとって重要なかさえ分かっていない。似た構造は作れるであろうが、再現すべき構造を特徴付ける指標 (物理量) を見出す必要がある。実験を行っている大阪大学木下教授、獨協医科大学宮本教授のグループからさまざまな実験 (観測) データの提供を受けつつ、羽毛繊維の網目構造を泡の作るポイド構造を用いてモデル化し、有限要素法による解析に用いるメッシュ生成のプログラムを開発する。

(2) 網目構造を持つ系にさまざまな偏光で入射する電磁波の反射・透過特性を計算する有限要素法コードを開発する。近年、フォトニック結晶の設計をする場合、市販の解析ソフトなどが発売されている FDTD 法を用いて特性解析をする場合が多い。しかし、FDTD 法の場合、構造を離散化する格子の自由度が小さいため (通常、正方格子、立方格子が用いられる) に、複雑な系の解析は困難である。そこで、本研究では空間分割の自由度が高く、複雑な形状の数値解析に定評のある有限要素法を用いて特性解析を行う。形のデータを発生させるプログラムの開発が終わった時点で MPI 並列計算に対応した電磁波解析有限要素コードを開発する。現在、研究指導を行っている名古屋大学大学院 工学研究科機械理工学専攻 博士課程後期 3 年の藤井雅留太君が誘電体円柱、六角柱が平行に 2 次元ランダムに並んだフォトニック結晶の電磁波の反射・透過特性を計算する有限要素プログラムを開発し終わっている。このプログラムを 3 次元構造へ対応できるように変更すればよい状況である。

(3) 網目構造の翡翠の羽の構造色の主要因を解明する。特に、網目構造のみで構造色が発生するのか、網目構造の積層が必要なのかを可視光域の電磁波の反射特性を数値計算することにより示す。

(4) 網目構造を用いたランダムレーザーの発振の可能性を解明する。近年、誘電体円柱がランダムに配列した系での光の局在現象を用いたレーザー発振が盛んに研究されている。このレーザー発振の原理では電磁波の散乱による局在が重要であるのであるから、網目構造でも同様の現象が期待できる。特に、ポーラスなフォトニック構造であれば、発光させるための色素も導入が容易である。この構造の透過特性を数値解析することにより、構造の最適化を図る。

また、これまでにフォトニック結晶に格子

振動を導入すると、入射光を増幅する現象を見出している。そこで、ランダムな系に振動を導入するために、帯電したコロイド粒子に外部から振動電場を印加することにより振動させ、光とコロイド粒子の振動を相互作用させることにより、光の増幅の可能性を解析する。

### 3. 研究の方法

カワセミの羽の構造色の研究は大阪大学の木下先生の研究室で行われてきた。1, 2) 木下研が主催している構造色研究会に所属しており、電子顕微鏡画像のデータ、また、光学特性の実験データの提供を受ける。また、これまで、ミミズの構造色、日本トカゲの幼体の構造色について共同研究を行っている獨協医科大学宮本先生のグループ 3, 4) においても、構造解析を依頼する。

それらのデータを元に、羽毛繊維の3次元網目構造を特徴付ける指標を見出す。これまでに、網目構造を数理的に表現する方法を求めて「泡の物理」を研究してきた。泡の作るボイド構造を用いてモデル化し、数理モデルにより網目構造を再現する。

現時点では、網目構造は穴あきチーズのようにブロックの誘電体から、半径にある程度揺らぎのある球をランダムに取り去った形状として表せると考えている。これについて、初年度の研究において検証していく。

近年、フォトニック結晶の設計をする場合、市販の解析ソフトなどが発売されているFDTD法を用いて特性解析をする場合が多い。しかし、FDTD法の場合、構造を離散化する格子の自由度が小さいため(通常、正方格子、立方格子が用いられる)に、複雑な系の解析は困難である。そこで、本研究では空間分割の自由度が高く、複雑な形状の数値解析に定評のある有限要素法を用いて特性解析を行う。

そのため、形が再現できるようになった時点で、その形を有限要素法による解析に用いるメッシュ生成のプログラムを開発する。有限要素法は汎用性が高く、さまざまな分野で利用されており、メッシュ生成の自動化もある程度進んでいる。そこで、文部科学省、東京大学生産技術研究所が進めてきたAdventure projectにより開発、公開されている有限要素法のメッシュ生成プログラムを改良して用いる。

このとき、構造が複雑であるため、メッシュデータは膨大な容量になると考えられる。ランダムな構造であるため、物性の計算においては統計処理が必要であり、多数の種類形状のデータを保存する必要がある。そこで、本件研究費により本研究専用のファイルサーバーを導入する。また、メッシュ生成にはそれほど高速な処理を必要とはしないが、大容量のメモリを搭載した計算機が必要であるため72GByteのメモリを搭載したワークステーションを導入する。

導入する計算機は電磁波解析の際に導入する予定のPCクラスターの一部とする。平行して、研究指導を行っている名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程後期の藤井雅留太君が開発した誘電体円柱が平行に2次元的にランダムに配列している系を解析するためのプログラムを3次元構造向けに変更する作業に着手する。

網目状構造のメッシュ分割が可能になり、3次元系の光学特性が数値計算可能となった段階で多種類の構造につき、電磁波の反射スペクトルを数値計算する。

現時点では、網目構造は穴あきチーズのようにブロックの誘電体から、半径にある程度揺らぎのある球をランダムに取り去った形状として表せ、その構造は球の半径平均値、半径の分散、球の中心間の距離の平均値と球の半径の平均値の比により特徴付けられると考えている。したがって、この3つのパラメータを固定した複数個の系について反射スペクトルの統計処理を行うことにより、その形状の光学特性を調べる。

また、3つのパラメータをそれぞれ変化させ、構造の最適化を図る。特に、網目構造のみで構造色が発生するのか、網目構造の積層が必要なのかを検証する。

この数値計算は大規模になるため高速な計算機が必要となる。現在、当研究室には高速なPC(quad core、メモリ8GByte)が2台あり、小規模な計算であれば実行不可能ではないが、生憎、現在、他の研究テーマにより占有されている。大規模計算を実行するためには情報基盤センターなどのスーパーコンピュータなどの利用も考えられるが、本研究では、同様の計算を多数回繰り返すため必要な計算時間の見積もりが難しく、専用のワークステーションの導入の方が効率的であると判断し、導入する。

網目構造およびコロイドを用いたランダムレーザーの発振の可能性について調べる。

近年、誘電体円柱がランダムに配列した系での光の局在現象を用いたレーザー発振が盛んに研究されている。5, 6)このレーザー発振の原理では電磁波の散乱による局在が重要であるのであるから、網目構造でも同様の現象が期待できる。特に、ポーラスなフォトニック構造であれば、発光させるための色素も導入が容易である。この構造の透過特性を数値解析することにより、構造の最適化を図る。

また、これまでにフォトニック結晶に格子振動を導入すると、入射光を増幅する現象を見出している。そこで、ランダムな系に振動を導入するために、帯電したコロイド粒子に外部から振動電場を印加することにより振動させ、光とコロイド粒子の振動を相互作用させることにより、光の増幅の可能性を解析する。

引用文献

1) 松宮智恵子、吉岡伸也、木下修一: ``カワ

セミの羽根の微細構造と光学特性', 日本物理学会講演概要集, 第59巻, 第1号, 第2分冊, p. 397, 30aWE-11, (2004).

2) 松宮智恵子, 吉岡伸也, 木下修一: ``青色の生物に見られる網目状微細構造とその発光機構'', 日本物理学会講演概要集, 第59巻, 第2号, 第2分冊, p. 257, 314aPS-80, (2004).

3) 小作明則, 宮本潔: ``環形動物表皮に観察される構造色'', 形の科学会誌, Vol. 17, pp. 121-122, (2002).

4) 宮本潔, 小作明則: ``ミミズ、ゴカイ(環形動物)を彩る表皮繊維構造'', 形の科学会誌, Vol. 20, pp. 167-168, (2005).

5) P. Sebbah and C. Vanneste: ``Random laser in the localized regime'', PHYSICAL REVIEW B, vol. 66, 144202 (2002).

6) 猪瀬裕太, 大槻東巳, 椽田英之, 江馬一弘, 酒井優, 菊池昭彦, 岸野克巳: ``誘電体円柱集団における光局在特性'', 日本物理学会講演概要集, 第64巻, 第2号, 第2分冊, p. 74, 26pXB-7, (2009)

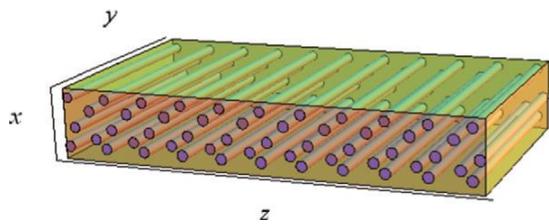
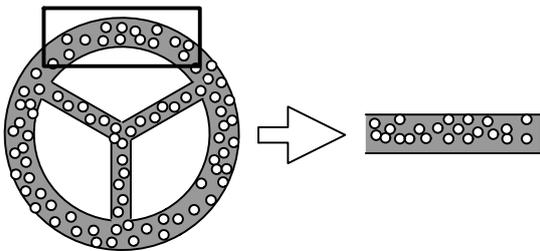
#### 4. 研究成果

カワセミに先立ち羽枝断面の TEM 画像が得られているルリビタキについて実測データを元に平成 25 年度から数理モデルを構築した。



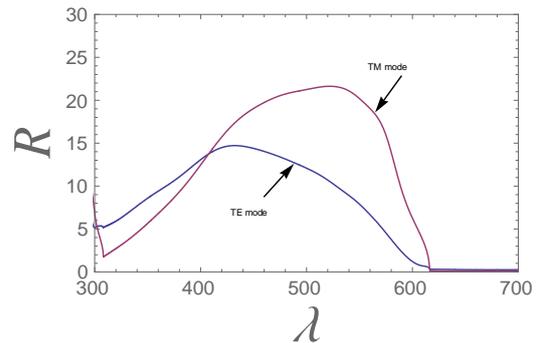
ルリビタキ

まず、無限に広く厚さが有限の誘電体に無限に長い円柱形の穴(エアロッド)が平行に開いているランダムなポラス構造でモデル化し、様々な入射角で入射した場合の反射スペクトルを本研究を通して開発した有限要素法プログラムにより計算した。



羽枝の平板ランダムポラスポトニック決勝モデル

その結果、ルリビタキの羽の反射スペクトルはポラス構造による反射で、また、エアロッドがランダムに並んでいることが本質的であること、反射スペクトルが青色より長波長側に尾を引くのは光が斜めに入射した部分の寄与であることを示した。



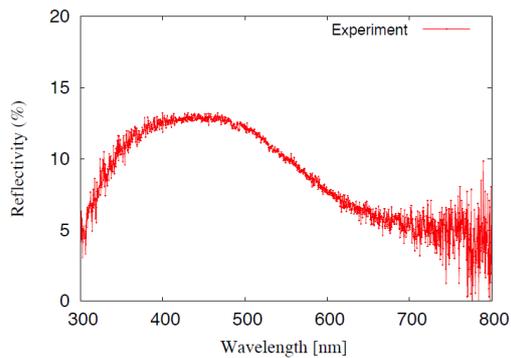
垂直入射時の反射スペクトル

この成果は国際会議 META' 14-Singapore (20-23 MAY 2014)で発表され、また、EPL, vol. 107, no. 3 (2014) 34004 に掲載され、EPL 誌 2014 年の highlight 論文に選ばれた。より詳細なモデルとしてランダムなポラス構造を持つ 3 本のピラーを持つ円筒の反射スペクトルを計算した。

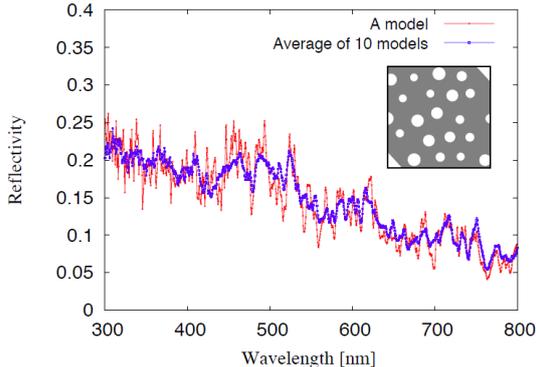


3 本ピラーの羽枝計算模型

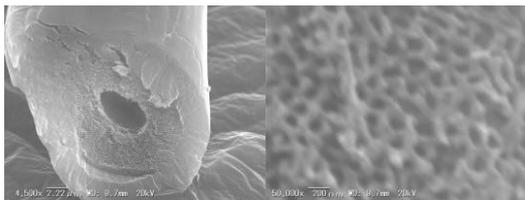
スペクトル形状がより実験に一致するものと期待されたが、紫外領域における減衰が見られず、より強調される結果となった。



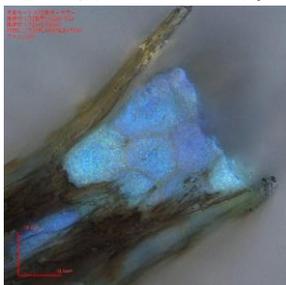
ルリビタキの羽枝の反射スペクトル



3本ピラーの羽枝計算模型の反射スペクトル  
 この結果は研究分担者藤井が国際会議 Metamaterials 2014 Copenhagen (25-30 August 2014)において発表し、論文誌に投稿準備中である。紫外域での不一致の原因は内部での乱反射と考えられるが現実にはどのように減衰しているのかを特定するため、羽を粉末にしたものの紫外域での吸収係数を測定することとした。他方、ようやくカワセミの羽枝の断面図のTEM画像が得られたため、実測値に基づくモデルが完成した。



カワセミの羽枝の断面構造  
 羽根の青色はこれらの網目状構造がで発色していることが確認できている。



羽枝の断面発色のようす  
 現在、平成 27 年 5 月現在、計算中でその途中経過を国際会議 ICMAT2015 (28 June-3 July, Singapore)で発表予定である。また、ランダ

ムポーラス系の応用としてレーザー発振の有効性を研究分担者藤井が Metamaterials 2013 (Bordeaux, 16-19 September, 6809044)において発表した。

#### 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 8件)

G. Fujii, T. Ueta, G. Morimoto and M. Nakamura, Numerical analysis for reflectance properties of bird-feather fibers, Proceedings of MetaMaterials 2014 査読有, vol. 2014, 2014, 115-117 DOI:10.1109/MetaMaterials.2014.6948614

Tsuyoshi Ueta, Garuda Fujii, Gen Morimoto, Kiyoshi Miyamoto, Akinori Kosaku, Takeo Kuriyama and Takahiko Hariyama, Numerical study on the structural color of blue birds by a disordered porous photonic crystal model, Europhysics Letters, 査読有 vol. 107, 2014 34004, DOI : 10.1209/0295-5075/107/34004

Tsuyoshi Ueta, Garuda Fujii, Gen Morimoto, Kiyoshi Miyamoto, Akinori Kosaku, Takeo Kuriyama and Takahiko Hariyama, Numerical study on the structural color of blue birds by a disordered porous photonic crystal model, Proceedings of META'14-Singapore, 査読有, vol. 2014, 2014, 153-157

Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta, Mamoru Mizuno, Finite element analysis for laser action in porous random media, Proceedings of 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, 査読有 2013, 334-336

G. Fujii, T. Matsumoto, T. Takahashi and T. Ueta, Finite Element Analysis of Laser Modes within Photonic Random Media, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 査読有, vol. 45, 2012, 85404 DOI:10.1088/0953-4075/45/8/085404

G. Fujii, T. Matsumoto, T. Takahashi and T. Ueta, Study on transition from photonic-crystal laser to random laser, Optics Express, 査読有, vol. 20, 2012, 7300-7315

藤井雅留太、松本敏郎、高橋徹、山田崇恭、植田毅、誘電体ランダム配置系におけるレーザー発振の系内電場強度依存性に関する研究、電気学会論文誌C、査読有、132 巻、2012、89-95

Garuda Fujii, Toshiro Matsumoto, Toru Takahashi and Tsuyoshi Ueta, A study on effect of filling factor for laser actions in dielectric random media, Applied Physics A, 査読有, vol. 107, 2011, 35-42 DOI:10.1007/s00339-011-6734-0

[学会発表] (計 8件)

Tsuyoshi Ueta, Garuda Fujii, Gen Morimoto, Kiyoshi Miyamoto and Akinori Kosaku, Study on the structural color of kingfisher: experimental measurement and numerical simulation by a disordered porous photonic crystal model, ICMAT2015, 2015年7月1日, シンガポール (シンガポール)

G. Fujii, T. Ueta, G. Morimoto and M. Nakamura, Numerical analysis for reflectance properties of bird-feather fibers, Metamaterials 2014, 2014年08月25日, コペンハーゲン (デンマーク)

Gen MORIMOTO, Takahiko. HARIYAMA, Tsuyoshi UETA, Garuda FUJII, Aakihiko KOSAKU, Takeo KURIYAMA, Kiyoshi MIYAMOTO, Color characteristics of delayed plumage maturation in the male red-flanked bluetail Tarsiger cyanurus, 26th International Ornithological Congress, 2014年08月19日, 立教大学 (東京都・豊島区)

Tsuyoshi Ueta, Garuda Fujii, Gen Morimoto, Kiyoshi Miyamoto and Akinori Kosaku, Study on the structural color of kingfisher: experimental measurement and numerical simulation by a disordered porous photonic crystal model, ICMAT2015 2015年7月1日, シンガポール (シンガポール)

Tsuyoshi Ueta, Garuda Fujii, Gen Morimoto, Kiyoshi Miyamoto, Akinori Kosaku, Takeo Kuriyama and Takahiko Hariyama, Numerical study on the structural color of blue birds by a disordered porous photonic crystal model, META' 14, 2014年05月20日, シンガポール (シンガポール)

植田毅、藤井雅留太、森本元、宮本潔、小作明則、ランダム・ポーラス  
フォトニック結晶の構造色解析、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月30日、東海大学 (神奈川県・平塚市)

植田毅、ランダムポーラスフォトニック結晶の構造色解析、形の科学会第76回形の科学シンポジウム、2013年11月17日、青山学院大学 (東京都・渋谷区)

Garuda Fujii, Toshiro Matsumoto, Toru Takahashi and Tsuyoshi Ueta, A study on effect of filling factor for laser actions in dielectric random media, ICMAT2011, 平成23年6月28日, シンガポール (シンガポール)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

植田 毅 (UETA, Tsuyoshi)  
東京慈恵会医科大学・医学部・教授  
研究者番号：30251185

### (2) 研究分担者

藤井 雅留太 (FUJII, Garuda)  
信州大学・工学部・助教  
研究者番号：90569344

### (3) 研究協力者

森本 元 (MORIMOTO, Gen)

宮本 潔 (MIYAMOTO, Kiyoshi)

小作明則 (KOSAKU, Akinori)