

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13802

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24120004

研究課題名(和文)生物規範機能構造・形成プロセス

研究課題名(英文)Biomimetics based on the functional structure and the formation process of organisms

研究代表者

針山 孝彦(HARIYAMA, Takahiko)

浜松医科大学・医学部・教授

研究者番号：30165039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 106,400,000円

研究成果の概要(和文)：生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスを開発するために、生物学的構造である昆虫のモスアイ構造や構造色に焦点を当てた。1. 自己組織化的方法による高輝度表面構造の作製、2. 生物の形態形成の観察と工業化への検討、3. 生物の“厳密ではない構造だけど緻密な機能”の意味の解析のために、数学・物理・生物・化学・工学からなる異分野連携の研究チームを組織し、その機能を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to embody the material design based on the surface structure of organisms and to develop the energy saving production process, we focused on the moth eye structures and the structural colors of several organisms; 1. Fabrication of high brightness surface structure by self-organizing method, 2. Observation of morphogenesis of organisms for industrialization, 3. To discover the meaning of the organism's "not precise structure but precise function", we organized research teams of different fields including mathematics, physics, biology, chemistry and engineering, and clarified their functions.

研究分野：バイオミメティクス、視覚生理学、光生物学

キーワード：生物表面構造 自己組織化 サブセルラーサイズ 構造色 太陽電池 「いいかげん(好い加減)」
極限生物 Nanosuit法

1. 研究開始当初の背景

昆虫の複眼や翅などの表面構造は、構造的強度を維持しているだけでなく、多様な機能をもつ。たとえば、複眼は透明で集光能力に優れ、翅は種内コミュニケーションの信号としての役割をもち、飛翔のために軽くて十分な強度をもつ。また自浄機能を兼ねそなえ、超撥水性により空気中の水滴を除去できる。我々の最近の研究から、複眼で発見された集光機能を高めるモスアイ構造が、翅などの体表面の各所にあり、生物の表面構造が多機能性を備えていることがわかった。このような生物がもつ多機能性の詳細と、どのような発生過程で構造形成され、どのようなメカニズムで機能が達成されているかについての研究は、世界的にも未だない。そのため、生物の表皮の自己組織化現象を中心に研究し、光学材料としての機能を達成しているメカニズムを明らかにし、高機能でかつ自然に優しい光学応用材料を手に入れることを目指した。

2. 研究の目的

生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスを開発するために、生物学的構造である、昆虫のモスアイ構造や構造色に焦点を当て、数学・物理・生物・化学・工学からなる異分野連携の研究チームを組織し、その機能を明らかにすることが、H24年度の目的であり、出口としては太陽電池パネルの高効率化を狙っていた。H26年度に中間評価で「生物学者と工学者そして数学者が連携した研究成果を挙げつつある」との高い評価と共に、ものづくりや工学応用と高効率太陽電池開発への明確な道筋を示すようにとの指摘を受け、本研究を通して、生物がもつ学理と、材料設計規範としての多機能性を明確に記載することを目的とした。つまり、a. 生物の「厳密ではない構造だけど緻密な機能」の意味の解析、b. 生物の形態形成の観察と工業化への検討、c. 自己組織化的方法による高輝度表面構造の作製、d. 生物微細構造観察の NanoSuit 法の発展と医学応用、などの研究に注力した。

3. 研究の方法

a. 昆虫の複眼および翅の構造に関して、数理的解析に基づく物理モデルをつくり、高い集光効率を生み出す微細階層構造を工学的に設計できるようにする。特に、生物のサブセラー構造の“乱れ”に注目し、ポロノイ分割などで“乱れ”の評価をすると共に、機能解析を行う。
 b. 昆虫の複眼や翅において、細胞から分泌された物質は、細胞側ではコレステリック結晶構造、最外層側では層状構造やナノニップル構造を形成している。細胞外分泌物が、自己組織化によってサブセラー・サイズの構造を形成するプロセスを脱皮時の経時観察により明らかにし、形態形成のタイミングを調節している物質の遺伝・生化学的解析を行

う。その為に、遺伝子操作法が確立しているショウジョウバエを実験材料とする。

c. 層状構造やナノニップル構造がもたらす構造色、無反射性を産み出すナノレベル構造を明らかにする。構造色の実現として、オパール粒子の3次元構造体への集積技術を確立し、タマムシの構造色を再現する。人工タマムシを作成し、構造色の生物学的意味をタマムシの行動解析で検証する。

d. NanoSuit 溶液を調整し、細胞から個体まで広く生物を観察可能にする。

4. 研究成果

a. 「厳密ではない構造」だけど、緻密な機能」を実現し、かつ多機能性を保有していることの発見

モスアイなどの自己組織化サブセラー・サイズ構造が、相当の構造乱れがあっても高い機能を示すことを、NanoSuit 法を含めた電子顕微鏡を用いた構造解析やポロノイ分割などの数学的解析によって明らかにし、構造のロバストネスと多機能性を明らかにした(図1)。(投稿準備中)

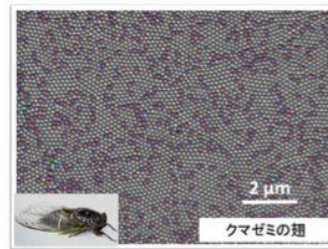


図1. ポロノイ分割による“乱れ”の表記。生物は機能発現のための「良い加減“厳密ではない構造がもたらす緻密な機能”」のものづくりをしている。

b. 生物のサブセラー・サイズ構造の自己組織化による形態形成過程解明

ショウジョウバエを用いた遺伝子操作実験により、遺伝子とその産物によって細胞外分泌物の集積が制御されていることがわかり、細胞外物質が自己組織的にパターン化されていることが強く示唆された。(Zool. Sci., 33, 583-591 (2016))

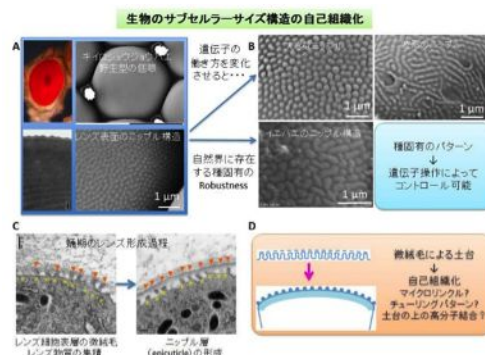


図2. 遺伝学的に修飾したショウジョウバエ(A, B)の形態学的実験を行うと、上皮細胞の分泌物が微絨毛の配置を基盤とし、その後自己組織的に配列形成していた。

c. タマムシを模倣した自己組織化構造色材料作製

タマムシをマスターピースとしてレプリカを作製し、自己組織的にブラック反射構造を形成するコロイド粒子懸濁液に浸漬してタマムシの表面構造を作製可能とし、また3次元構造体への集積技術を拡大して表面積の大きな材料表面に適応可能とした。このレプリカを野外に置くことで、タマムシが種内コミュニケーションに構造色を用いていることを証明した。(A.F.T ジャーナル, 58, 1(2015)、成形加工, 29, 86-89(2017))

d. NanoSuit®法の医学的展開

生きたままで昆虫などの生物の微細構造の観察を可能とする NanoSuit®法を用いて、細胞や組織を濡れたままの状態を観察できることがわかった。(R. Soc. Open Sci., 4, 160887, 1~9(2017))

これらの研究を通して、「サブセルラー・サイズ構造」がもつ“厳密ではない構造がもたらす緻密な機能を実現するロバストネス”が多機能性を保有することを明らかにできた。

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 69 件)

M. Iwata, M. Teshima, T. Seki, *S. Yoshioka, *Y. Takeoka, “Bio-Inspired Bright Structurally Coloured Colloidal Amorphous Array Enhanced by Controlling Thickness and Black Background”, *Advanced Materials*, 29, 1605050 (2017) in press 査読有 doi: 10.1002/adma.201605050

Y. Takaku, H. Suzuki, H. Kawasaki, I. Ohta, D. Ishii, S. Hirakawa, T. Tsutsui, H. Matsumoto, S. Takehara, C. Nakane, K. Sakaida, C. Suzuki, Y. Muranaka, H. Kikuchi, H. Konno, M. Shimomura, *T. Hariyama, “Modified ‘NanoSuit®’ Preserves Wet Samples in High Vacuum: Direct Observations on Cells and Tissues in Field-Emission Scanning Electron Microscopy”, *R. Soc. Open Sci.*, 4, 160887 (2017) 査読有 DOI: 10.1098/rsos.160887

K. Muto, S. Ito, *D. Ishii, “Liquid Transport in Bio-Inspired Capillary-Driven Open-Air Channels”, *MRS Advances*, (2017) 査読有 doi: 10.1557/adv.2017.77

R. Minami, C. Sato, Y. Yamahama, H. Kubo, T. Hariyama, *K. Kimura, “An RNAi Screen for Genes involved in Nanoscale Protrusion Formation on Corneal Lens in *Drosophila melanogaster*”, *Zool. Sci.*, 33, 583-591 (2016) 査読有 doi:10.2108/zs160105

*M. A. Giraldo, S. Yoshioka, C. Liu, D. Stavenga, “Coloration Mechanisms and Phylogeny of Morpho Butterflies”, *J. Experiment. Biol.*, 219, 3936-3944 (2016) 査読有 doi: 10.1242/jeb.148726

D. Ishii, H. Yamasaki, R. Uozumi, *E. Hirose, “Does the Kinorhynch have a Hydrophobic Body Surface? Measurement of the Wettability of a Meiobenthic Metazoan”, *R. Soc. open sci.*, 3, 160512 (2016) 査読有 doi: 10.1098/rsos.160512

S. Ito, *D. Ishii, “Overwritable Liquid Selective Open Channel”, *Surf. Interf. Anal.*, 48, 1199-1202 (2016) 査読有 doi: 10.1002/sia.6109

T. Hariyama and Y. Takaku, “Dressing Living Organisms in the NanoSuit for FE-SEM Observation”, *JEOL News*, 50, 1-10 (2015) 査読有

Y. Takaku, H. Suzuki, I. Ohta, T. Tsutsui, H. Matsumoto, M. Shimomura, *T. Hariyama, “A ‘NanoSuit’ Surface Shield Successfully Protects Organisms in High Vacuum: Observations on Living Organisms in an FE-SEM”, *Proc. Biol. Sci.*, 282, 20142857 (2015) 査読有 doi: 10.1098/rspb.2014.2857

Y. Takaku, H. Suzuki, I. Ohta, D. Ishii, Y. Muranaka, M. Shimomura, *T. Hariyama, “A Thin Polymer Membrane, Nano-Suit, Enhancing Survival Across the Continuum Between Air and High Vacuum”, *PNAS*, 110, 7631-7635 (2013) 査読有 doi: 10.1073/pnas.1221341110

[学会発表](計 155 件)

T. Hariyama, “A Thin Polymer Membrane ‘NanoSuit’ Allows Living Organisms to Survive in the Harsh Conditions of Electron Microscopy”, *SPIE International Symposium on Smart Structures 2017, Portland (USA)* (2017年3月27日)

T. Hariyama, “The NanoSuit, Enhancing Survival Across the Continuum Between Air and High Vacuum, Seeks the New Vision for the Sustainable World”, *Asia NANO 2016 Asian Conference on Nanoscience and Nanotechnology, Sapporo Convention Center (Sapporo)* (2016年10月11日)

T. Hariyama, “Biomimetic Thin Membrane, the NanoSuit®, Enhancing Surface Shield Effect for Living Organism in High Vacuum”, *Engineering Neo-biomimetics VI and Satellite Workshop at Lake Biwa, 島津製作所三条工場内セミナーホール (Kyoto)* (2015年10月22日)

M. Shimomura, “Biomimetic water transportation device based on wharf roach *Ligia exotica*”, *The 15th IUMRS-International Conference in Asia*

(IUMRS-ICA 2014), Fukuoka University (Fukuoka) (2014年8月25日)

T. Hariyama, "Nano-Suit Enhancing Survival Across the Continuum between Air and High Vacuum; Biomimetic Approaches", The 13th Hamamatsu-Kyungpook Joint Medical Symposium, 大邱(韓国) (2013年9月1日)

T. Hariyama, Y. Takaku, H. Suzuki, I. Ohta, D. Ishii, Y. Muranaka, M. Shimomura, "Nano-Spacesuit Keeps Animal's Life in Extreme Condition", The 9th SPSJ International Polymer Conference (IPC2012), Kobe International Conference Center (Kobe) (2012年12月12日)

〔図書〕(計 16 件)

下村政嗣, 劉浩, 野村周平, 針山孝彦, 下澤楯夫, 出口茂, 魚津吉弘, 穂積篤 ほか, インスツルメンテーションの視点からみたバイオミメティクス, シーエムシー・リサーチ, 308 (2016)

下村政嗣, 不動寺浩, 吉岡伸也, 長谷山美紀, 野村周平, 高久康春, 針山孝彦 ほか, トコトンやさしいバイオミメティクスの本, 日刊工業新聞社, 160 (2016)

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ等

<http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

針山 孝彦 (HARIYAMA, Takahiko)

浜松医科大学・医学部・教授

研究者番号：30165039

(2) 研究分担者

下村 政嗣 (SHIMOMURA, Masatsugu)

千歳科学技術大学・理工学部・教授

研究者番号：10136525

不動寺 浩 (FUDOUJI, Hiroshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点光機能分野 コロイド結晶材料グループ・グループリーダー

研究者番号：20354160

久保 英夫 (KUBO, Hideo)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：50283346

石井 大佑 (ISHII, Daisuke)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60435625

木村 賢一 (KIMURA, Kenichi)

北海道教育大学・教育学部・教授

研究者番号：80214873

吉岡 伸也 (YOSHIOKA, Shinya)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：90324863

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()