

# 生物規範工学

## *Engineering Neo-Biomimetics*



文部科学省 科学研究費 新学術領域  
「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

## CONTENTS

### 文部科学省 科学研究費 新学術領域 「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

\*\*\*\*\*

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1) 巻頭言                                                                                                                                                        |    |
| ・ バイオミメティクスの普及と期待<br>平坂 雅男 (高分子学会) .....                                                                                                                      | 5  |
| 2) 産業界からのメッセージ:                                                                                                                                               |    |
| ・ バイオミメティクスの沃野<br>中野 充 ((株)豊田中央研究所) .....                                                                                                                     | 8  |
| 3) 研究紹介                                                                                                                                                       |    |
| 【2016年8月4日(木)-5日(金)】<br>科学研究費「生物規範工学」公開講演会ならびに全体会議                                                                                                            |    |
| ・ プログラム .....                                                                                                                                                 | 12 |
| 要旨集                                                                                                                                                           |    |
| 8月4日(木) 10:00-13:10 科学研究費「生物規範工学」公開講演会                                                                                                                        |    |
| ・ 環状両親媒性高分子によるベシクル構築とゲスト包摂による物性変化<br>山本 拓矢 (北海道大学) .....                                                                                                      | 14 |
| ・ 珪藻が生産する多孔質バイオシリカに基づくバイオミメティクス<br>前田 義昌 (東京農工大学) .....                                                                                                       | 16 |
| ・ ナノワイヤ構造体によるセミの翅の物理的防御機構の模倣<br>安井 隆雄 (名古屋大学) .....                                                                                                           | 18 |
| ・ サイトカイン濃度勾配による好中球の液中内運動機構とその応用<br>玉川 雅章 (九州工業大学) .....                                                                                                       | 20 |
| ・ 磁性粒子分散柔軟材料を用いた人工繊毛の開発<br>津守 不二夫 (九州大学) .....                                                                                                                | 22 |
| ・ Coleoptera Cuticles: from Calcium deposition to Attachment Structures<br>Dr. Richard Leschen<br>(Landcare Research, New Zealand Arthropod Collection) ..... | 24 |

## 8月4日(木)-5日(金) 科学研究費「生物規範工学」全体会議

- ・ A01 班：バイオミメティクス・データベース構築—2016 年度前半の取り組み  
A01 班 野村 周平（国立科学博物館） ..... 26
- ・ バイオミメティクス画像検索基盤の拡張 —オントロジーとの連携—  
A01 班 長谷山 美紀（北海道大学） ..... 28
- ・ B01-1 班 生物規範界面デザイン: トライボロジー界面の創製  
B01-1 班 平井 悠司（千歳科学技術大学）、  
黒川 孝幸（北海道大学） ..... 30
- ・ モスアイ構造—機能の多様性と自己組織化による構造形成過程  
B01-2 班 木村 賢一（北海道教育大学）、  
吉岡 伸也（東京理科大学） ..... 32
- ・ B01-3 班研究進捗報告  
B01-3 班 細田 奈麻絵（物質・材料研究機構） ..... 36
- ・ 放熱特性を向上させる新しい表面の設計  
B01-3 班 前田 浩孝（名古屋工業大学） ..... 38
- ・  
・ ガ類フェロモンブレンドの受容機構の解明  
B01-4 班 光野 秀文（東京大学） ..... 40
- ・ クロオオアリ体表炭化水素センサの機能特性  
B01-4 班 北條 賢（神戸大学） ..... 42
- ・ 生物規範環境応答・制御システム  
B01-4 班 森 直樹（京都大学） ..... 44
- ・ 培養細胞の常温保存への挑戦: ネムリユスリカの乾燥耐性機構から学ぶ  
B01-4 班 奥田 隆（農業生物資源研究所） ..... 46
- ・ 生物規範メカニクス・システムの学理解明へ  
B01-5 班 劉 浩（千葉大学） ..... 48
- ・ 周期的力学場による細胞メカノシグナル入力ゆらぎ特性解析  
B01-5 班 木戸秋 悟（九州大学） ..... 50

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ・ 細胞メカニクス・システム：細胞の基質硬度と重力の感知機構<br>B01-5 班 小林 剛（名古屋大学） .....                                           | 52 |
| ・ 昆虫の羽ばたき飛行における外骨格構造の機能<br>B01-5 班 安藤 規泰（東京大学） .....                                                  | 54 |
| ・ 持続可能な社会創成に不可欠な生物規範工学<br>C01 班 石田 秀輝（東北大学・地球村研究室） .....                                              | 56 |
| ・ 環境制約下に求められる暮らしの価値とその実装<br>C01 班 古川 柳蔵（東北大学） .....                                                   | 58 |
| ・ 技術マッチングに向けたオントロジー工学の応用<br>C01 班 岸上 祐子（東北大学環境科学研究科／北陸先端科学技術大学院大学）、<br>須藤 裕子（東北大学） .....              | 60 |
| ・ 生き物とのセレンディピティを支援するデータベースの構築<br>ーモノづくりからマチづくりまで<br>C01 班 山内 健（新潟大学） .....                            | 62 |
| 4) トピックス (PEN より)                                                                                     |    |
| ・ 人工的に模倣した森の宝石（タマムシ）とアウトリーチ活動<br>ー最先端バイオミメティクス研究をどうやって子供達に伝えるかー<br>物質・材料研究機構 不動寺 浩、浜松医科大学 針山 孝彦 ..... | 65 |
| ・ バイオ TRIZ：生物の不思議を工学に移転する技術ー 分割原理 ー<br>新潟大学 山内 健、大阪大学 小林 秀敏 .....                                     | 71 |
| ・ 数学とバイオミメティクス ーヘテロな集団が生み出す力への期待ー<br>北海道大学 久保 英夫 .....                                                | 75 |





|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 5) 国内外研究動向紹介                                 |     |
| ・ 平成 28 年 3 月 3 日(木)                         |     |
| 科学研究費「生物規範工学」全体会議/JAMSTEC 合同講演会に参加して         |     |
| 前田 義昌 (東京農工大学) .....                         | 78  |
| ・ 平成 28 年 3 月 4 日(金)                         |     |
| 公開ジョイントシンポ「海洋資源メッカ沖縄で考えるバイオミメティクス」に参加して      |     |
| 青野 光 (東京理科大学) .....                          | 80  |
| ・ 平成 28 年 3 月 5 日(土)                         |     |
| 漫湖水鳥・湿地センターでのフィールドワーク活動報告                    |     |
| 津留 美紀子 (海洋研究開発機構) .....                      | 81  |
| ・ 平成 28 年 3 月 24 日(木)～27 日(日)                |     |
| 日本化学会 第 96 春季年会 (2016)に参加して                  |     |
| 桑折 道済 (千葉大学) .....                           | 82  |
| ・ 平成 28 年 3 月 26 日(土)                        |     |
| 日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学 京田辺キャンパス)              |     |
| アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP)                    |     |
| 穂積 篤 (産業技術総合研究所) .....                       | 84  |
| ・ 平成 28 年 7 月 1 日(金)～2 日(土)                  |     |
| Biomimexpo 2016 (7/1～2, Senlis, France) 参加報告 |     |
| 齋藤 彰 (大阪大学) .....                            | 86  |
| ・ 1991 年 6 月～8 月                             |     |
| 北海道新聞 コラム「オーロラ」                              |     |
| 下澤 楯夫 (北海道大学 名誉教授) .....                     | 88  |
| 6) 新聞・報道 .....                               | 94  |
| 7) アウトリーチ活動 .....                            | 98  |
| 8) 各種案内 .....                                | 101 |

## (1) 巻頭言

## バイオミメティクスの普及と期待

公益社団法人高分子学会  
平坂 雅男



2013年7月1日にNHKクローズアップ現代に、生物模倣技術としてバイオミメティクスが取り上げられ、日本では昆虫学や動物学の研究者と工学系の技術者との連携が弱く、製品化の動きは欧米に大きく遅れを取っている現状が伝えられた。それから、3年が経過し、バイオミメティクスという言葉は、アウトリーチ活動や啓蒙活動により、雑誌、書籍、テレビで取り上げられ、一般社会でもバイオミメティクスという言葉が、認知されつつある。また、生物規範工学のプロジェクトが中核となり、2015年の国際ナノテクノロジー総合展でバイオミメティクス・ネットワーク・ジャパンと称する研究開発ネットワークを明らかにすると共に、この分野の最先端研究を紹介し、来場者から高い評価を得た。そして、産業界では、バイオミメティクスの潜在的なポテンシャルに対する期待が高まり、シーズ探索のみならず、製品開発に着手する企業も増加した。

一方、海外に目を向けると、先陣を切るドイツでは、FESTO社が自律分散型のロボット（BionicANTs）を発表したように、生態系バイオミメティクスに進展している。また、フランスも、2016年7月にBiomim'expo 2016を開催し、環境・エネルギー・海洋大臣がフランスでのバイオミメティクスの推進を唱えた。そして、フランス国内での産官学連携ネットワークが着実に築かれつつある。さらに、2011年からスタートしたバイオミメティクスの国際標準化は、ドイツ提案に基づき3つ作業部会で標準化作業を進めてきたが、2015年に2件、2016年には3番目の国際規格が発行された。また、国際標準化委員会では、環境や持続可能性へのバイオミメティクスの寄与を評価することが検討され始めている。そして、Nature（Vol 529(2016),277-278）には、"Interdisciplinarity: Bring biologists into biomimetics."と題した記事が掲載

された。バイオミメティクスの成功の鍵は、工学、化学などの研究者が生物系の研究者と連携することであると述べられている。

このような国内外のバイオミメティクスを取り巻く環境は、この数年で著しく変化した。本新学術領域研究は、自然史学、生物学、農学、材料科学、機械工学、環境科学などの学際連携により、環境政策・包括的技術ガバナンスの観点から「生物多様性」に学び「人間の叡智」を組み合わせた技術体系を創出している。外部環境の変化は追い風であるが、本領域の研究者は当初の領域の目標を認識し、学際連携による研究成果を示すと共に、新たな技術体系の創出を認知してもらわなければならない。そのためには、本領域内の成果報告においても学際連携を意識し、新たな技術体系としての位置づけを明確に説明できなければ、外部評価での高い評価は期待できない。残された期間は短い、プロジェクトの事後評価を考慮し、最終報告に向けて邁進してほしい。本領域の成果により、バイオミメティクスが産業界で新たな技術プラットフォームとして位置づけられ、日本の産業発展に寄与することを期待している。



## (2) 産業界からのメッセージ

## バイオミメティクスの沃野

(株) 豊田中央研究所  
戦略研究部門  
フロンティア研究領域  
中野 充



少し古い話題で恐縮だが、2014年9月頃、Science誌に、トッケイヤモリの大きな写真と共に、“Biomimetics and evolution”という記事が掲載されていることに気づいた [S. N. Patek, Science 345, 1448 (2014)]. 「何を今さら、ヤモリの足の接着…」と、当時の私は思ったが、記事を読んで、自身の勉強不足を思い知らされた。そこには、バイオミメティクスに関して、非常に示唆に富む研究が紹介されていた。

皆さんよく御存知の通り、ヤモリの足裏には、seta と呼ばれる繊維が配列している。また更に、seta の先端は 100-1000 本の spatula と呼ばれる細い繊維に分岐している。この様に、接地面積の大きい微細構造が、van der Waals 力のみによる強接着/軽剥離を可能にしている、…と私たちは信じてきた。

一方、上記の様な魅力ある脱着特性を、産学の研究者は、長年必死になって再現しようと試みてきた。しかしそれらの挑戦は、「実用化」という観点からは、成功には程遠かった。精緻な微細構造は、製造上高コストであり、また容易に目詰まりを起こし、初期性能を失う。

それに対して、Univ. of Massachusetts at Amherst の 2 つの研究グループ（それぞれ、高分子化学と生物学が専門）は共同で、ヤモリの足裏の  $F_c$ （最大接着力）が  $A/C$ （ $A$ : 接地面積,  $C$ : コンプライアンス）の  $1/2$  乗に比例する、という関係を導き出した。そして更に素晴らしいことに、 $A/C$  が大きくなるシンプルな材料を、人工的に実現したのである。一般に、材質が軟らかいほど  $A$

は増大するが、C（「変形しやすさ」と言い換えてもよい）も増大するため、A/C を大きくすることは容易ではない。しかし彼らは、ファブリック（織物）にエラストマーを含浸・硬化させることで、A/C の増大を図った。結果、100cm<sup>2</sup> で最大 300kg の荷重に耐えるシートの作製に見事成功した。得られたシートは、ヤモリの足裏とは似ても似つかない。

詳細は原著論文を確認いただくとして、この事例からは、非常に重要な教訓が読み取れる。ヤモリの精緻な微細構造は、優れた脱着特性を実現するための一手段に過ぎなかった。実際 UMass の研究者は、かつて、微細繊維構造なしで脱着を可能にした種がいることにも着目したそうだ（evolutionary analysis）。私たちは、あの美しい足裏の構造に目を奪われてしまったがために、その奥に潜む原理には、長らく気づくことができなかった。

生物は多様だ。それこそが生物の魅力である。その一方で、多様性は私たちの心を惑わす。私たち研究者は、生物の多様性の中に内在する「普遍性」にこそ着目したい（「普遍性」が何か分かれば、何が真に「特異な性質」であるかも判別できるはずだ）。「時（＝進化のプロセス）」を越え、また生物「種」を越え、採用される普遍原理を抽出して初めて、バイオミメティクスは使える技術になる様に思う。物理量の関係式であらわされた原理は、例えば、生物が存在し得ない温度・圧力・速度域などに、更には生物が持ち合わせない材質にも適用できる。

言うは易く行うは難し。バイオミメティクスの沃野は豊饒にして、険しい。

## (3) 研究紹介

## 科学研究費「生物規範工学」公開講演会ならびに全体会議

日 時 : 2016年8月4日(木)－5日(金)  
場 所 : 北海道大学 創成科学研究棟 5階大会議室

■ 8月4日(木) ■

### **公開** 科学研究費「生物規範工学」 公開講演会

- 10:00-10:30 山本 拓矢 先生（北海道大学・准教授）  
「環状両親媒性高分子によるベシクル構築とゲスト包摂による物性変化」
- 10:30-11:00 前田 義昌 先生（東京農工大学・助教）  
「珪藻が生産する多孔質バイオシリカに基づくバイオミメティクス」
- 11:00-11:30 安井 隆雄 先生（名古屋大学・助教）  
「ナノワイヤ構造体によるセミの翅の物理的防御機構の模倣」
- 11:30-12:00 玉川 雅章 先生（九州工業大学・教授）  
「サイトカイン濃度勾配による好中球の液中内運動機構とその応用」
- 12:00-12:30 津守 不二夫 先生（九州大学・准教授）  
「磁性粒子分散柔軟材料を用いた人工繊毛の開発」
- 12:30-13:10 招待講演  
Dr. Richard Leschen  
(Landcare Research, New Zealand Arthropod Collection)  
“Coleoptera Cuticles: from Calcium deposition to Attachment Structures”

### **非公開** 科学研究費「生物規範工学」 全体会議

- 14:00-15:00 A01 班  
野村 周平 先生（国立科学博物館・研究主幹）（30 分）  
「A01-1 班：バイオミメティクス・データベース構築  
－2016 年度前半の取り組み」  
長谷山 美紀 先生（北海道大学・教授）（30 分）  
「バイオミメティクス画像検索基盤の拡張 －オントロジーとの連携－」
- 15:00-16:00 B01-1 班  
平井 悠司 先生（千歳科学技術大学・専任講師）、  
黒川 孝幸 先生（北海道大学・准教授）（60 分）  
「B01-1 班 生物規範界面デザイン：トライボロジー界面の創製」
- 16:00-17:00 B01-2 班  
木村 賢一 先生（北海道教育大学・教授）、  
吉岡 伸也 先生（東京理科大学・准教授）（60 分）  
「モスアイ構造－機能の多様性と自己組織化による構造形成過程」
- 17:00-18:00 B01-3 班  
細田 奈麻絵 先生（物質・材料研究機構・グループリーダー）（30 分）  
「B01-3 班研究進捗報告」  
前田 浩孝 先生（名古屋工業大学・准教授）（30 分）  
「放熱特性を向上させる新しい表面の設計」
- 19:00 懇親会  
札幌アспенホテル（札幌市北区北 8 条西 4-5） 会費：5,000 円



■ 8月5日(金)■

**非公開** 科学研究費「生物規範工学」 全体会議

09:00-10:00 B01-4 班

光野 秀文 先生（東京大学・特任助教）（10分）

「ガ類フェロモンブレンドの受容機構の解明」

北條 賢 先生（神戸大学・特命助教）（10分）

「クロオオアリ体表炭化水素センサの機能特性」

森 直樹 先生（京都大学・教授）（20分）

「生物規範環境応答・制御システム」

奥田 隆 先生（農業・食品産業技術総合研究機構・上級研究員）（20分）

「培養細胞の常温保存への挑戦：ネムリユスリカの乾燥耐性機構から学ぶ」

10:00-11:00 B01-5 班

劉 浩 先生（千葉大学・教授）（15分）

「生物規範メカニクス・システムの学理解明へ」

木戸秋 悟 先生（九州大学・教授）（15分）

「周期的力学場による細胞メカノシグナル入力ゆらぎ特性解析」

小林 剛 先生（名古屋大学・講師）（15分）

「細胞メカニクス・システム：細胞の基質硬度と重力の感知機構」

安藤 規泰 先生（東京大学・特任講師）（15分）

「昆虫の羽ばたき飛行における外骨格構造の機能」

11:00-12:00 C01 班

石田 秀輝 先生（地球村研究室／東北大学・名誉教授）（20分）

「持続可能な社会創成に不可欠な生物規範工学」

古川 柳蔵 先生（東北大学・准教授）（10分）

「環境制約下に求められる暮らしの価値とその実装」

岸上 祐子 先生（東北大学環境科学研究科／北陸先端科学技術大学院大学）、

須藤 裕子 先生（東北大学・特任准教授）（10分）

「技術マッチングに向けたオントロジー工学の応用」

山内 健 先生（新潟大学・教授）（20分）

「生き物とのセレンディピティを支援するデータベースの構築

ーモノづくりからマチづくりまでー」

所属班：公募班

所属機関：北海道大学

氏名：山本 拓矢

所属機関住所：〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

e-mail：yamamoto.t@eng.hokudai.ac.jp

研究キーワード：自己組織化、環状高分子、ベシクル、ミセル



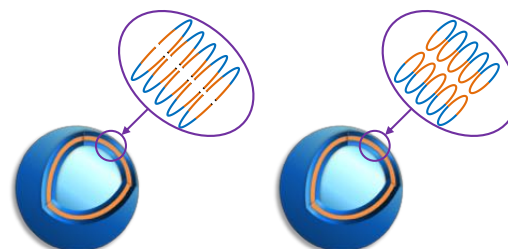
## 環状両親媒性高分子によるベシクル構築と ゲスト包摂による物性変化

### Construction of Vesicles from Cyclic Amphiphiles and Properties by the Encapsulation of Guest Molecules

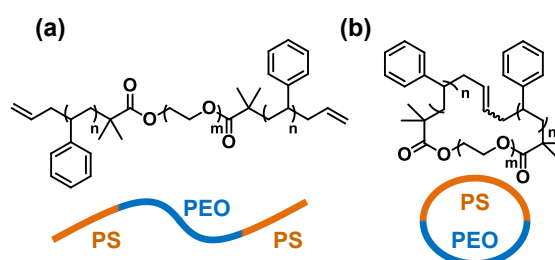
好熱菌は、細胞膜に環状の脂質分子を有することで海底火山や温泉など高温の環境で生息する単細胞生物である。本研究では、この環状脂質分子を模倣した合成高分子に自己組織化を誘導し、形成した好熱菌細胞膜モデルとなるベシクルを利用して高安定性獲得のメカニズムの解明を行い、その応用を探求する。

ベシクル (Fig. 1) は二分子膜の内側に疎水鎖、外側に親水鎖を持ち中心部分に内包水を持つ球状構造体である。つまり、疎水鎖を内側に向けた中実構造のミセルとは異なり、内部に親水性薬物の包摂が可能であり、ドラッグデリバリーシステム (DDS) などへの広範な応用が期待されている。

我々は、これまで環状両親媒性ブロック共重合体を用いたミセルやエマルションの研究により、環状構造に由来する「トポロジー効果」を報告した<sup>(1-2)</sup>。加えて、ポリスチレン (PS) とポリエチレンオキシド (PEO) から成る直鎖状及び環状高分子のベシクルの比較から、親水性分子であるフルオロセインナトリウム塩 (FSS) を包摂した場合に安定性の変化に有意な差が生じることを見出した。今回、FSS およびカチオン性のローダミン 6G (R6G) 存在下でベシクルの構築を行い、これらのゲスト分子の包摂がベシクルの構造安定性に与える影響について検討を行った。

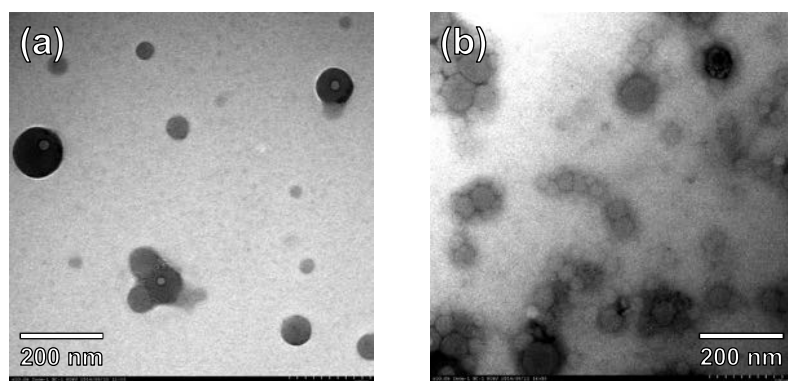


**Fig. 1.** Expected structures of vesicles formed from **Linear** (left) and **Cyclic** (right).



**Fig. 2** Chemical structures and schematic illustrations of (a) **Linear** and (b) **Cyclic**.

まず、末端にアリ  
ル基を持つ直鎖状  
PS-PEO-PS トリ  
ブロック共重合体  
(**Linear**;  $M_n =$   
4100 - 2100 -  
4100)及び環状 PS  
-PEO ジブロック  
共重合体 (**Cyclic**;  
 $M_n = 8900-2100$ )  
を合成した (Fig.  
2)。次に、自己組



**Fig. 3** TEM pictures of vesicles formed from (a) **Linear** and (b) **Cyclic**.

織化構造の TEM 観察を行い、中空球状構造体を確認した (Fig. 3)。引き続き、ベシクル水溶液に NaCl を 5% 加え昇温することで、動的光散乱測定により熱安定性を評価した。その結果、**Linear** より形成したベシクルが **Cyclic** のものと比べて数℃ 崩壊温度が高かったが、FSS を包摂した場合は双方とも熱安定性の低下は見られたものの、**Cyclic** が **Linear** に比べて数℃ 高くなった。一方、R6G を包摂した場合は **Linear** が **Cyclic** に比べて安定であった。この原因として、環状高分子は直鎖状高分子に比べて絡み合いが抑制されることが知られており、ベシクルの二分子膜中でも同様の可能性が考えられる。さらに、UV 測定より PEO と親水性薬物の相互作用を調査したところ、FSS では PEO の有無によりスペクトルが変化した。R6G では変化が見られなかった。つまり、FSS が **Linear** ベシクル中の PEO セグメントの絡み合いを抑制することで大きく熱安定性が低下したと考えられる。一方、**Cyclic** では、その高分子トポロジーにより元々絡み合いが制限されていたため、FSS 包摂の影響が抑制されたと考えられる。ところが R6G の場合、PEO との相互作用はほとんど見られないため、絡み合いに及ぼす有意な影響はなかったと考えられる。その結果として、**Linear** と **Cyclic** の熱安定性が逆転は起こらなかったと推測される。

結論として、直鎖状および環状両親媒性ブロック共重合体によりベシクルの構築し、FSS および R6G の包摂を行った。それぞれのベシクルの安定性を評価したところ、FSS と PEO が相互作用を起こすことで、直鎖状 PS-PEO-PS の絡み合いを制限し、環状 PS-PEO と比較して熱安定性が大きく変化するというトポロジー効果を見出した。

## 参考文献

- (1) Yamamoto, T. *et al. J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 10251-10253.
- (2) Yamamoto, T. *et al. Polym. J.* **2015**, *47*, 408-412.

所属班：公募班

所属機関：東京農工大学

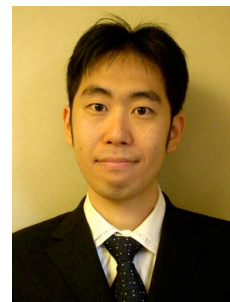
氏名：前田 義昌

所属機関住所：〒184-8588

東京都小金井市中町 2-24-16

e-mail：y\_maeda@cc.tuat.ac.jp

研究キーワード：珪藻 珪殻 バイオシリカ 表面修飾

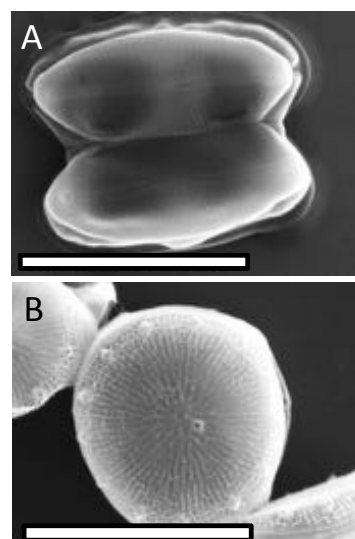


## 珪藻が生産する多孔質バイオシリカに基づく バイオミメティクス

### Biomimetic studies based on porous biosilica produced by diatoms

#### 1. はじめに

珪藻は地球上のあらゆる水圏環境に適応し、最も繁栄した生物の一つである。約 20 万種にも及ぶ多様性を有し、全地球の一次生産量の約 20%を担う<sup>(1)</sup>。珪藻の最も大きな特徴として、汎用元素であるケイ素を含む生物態シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) からなる細胞壁（珪殻）を生産することが挙げられる。珪殻は階層的な微細構造を持つ多孔性材料であり（Fig. 1）、機能性無機ナノ結晶や有用タンパク質の固定化担体など、ナノ・バイオテクノロジー分野での応用が期待されている。以上のように、高い多様性と賦存量を有し、サブセルラーサイズの微細構造を構築するといった観点から、珪藻は生物規範工学における重要な研究対象の一つと考えられる。



#### 2. 珪藻のバイオミメティクス研究

珪藻のバイオミメティクス研究の代表例として、規則的な微細孔が整列した珪殻を天然のフォトリソグラフィックナノ構造として捉え、その光学特性を評価する研究が挙げられる。一方で、珪殻バイオシリカの微細構造を生み出す分子生物学的機序が明らかとなりつつあり、珪殻特異的に発現するタンパク質群や珪藻種ごとに異なるポリアミン類の関与が指摘されている<sup>(2)</sup>。近年では、これらの分子を用いたバイオミメティックな機能性シリカ材料の構築が試みられているが、珪殻微細構造を再現するには至っていない。

Fig. 1 Scanning electron microscopic images of the biosilica cell walls of a pennate diatom, *Fistulifera solaris* (A), and a centric diatom, *Thalassiosira pseudonana* (B). Scale bar = 5  $\mu\text{m}$

### 3. 遺伝子工学的手法による珪殻の高機能化

バイオシリカを用いて、ナノ・バイオテクノロジー分野で応用される機能性材料を構築する生産プロセスを考えた場合、珪殻模倣バイオシリカを化学的に合成するより、珪藻を大量培養することで珪殻を生物合成し、その機能化を図る方が現状では合理的と言える。筆者が所属する研究室では、海洋珪藻 *Fistulifera solaris* を用いた燃料生産に取り組んでおり、数百~1万Lのスケールで培養することができる<sup>(3)</sup>。このような大量培養技術を利用することで、大量の珪殻を生産することが可能である。

一方で、珪殻表面はシリカや多糖類で構成されており、機能性無機ナノ結晶など、実際の機能を示す物質との相互作用に乏しい。そこで、遺伝子工学的手法を用いて珪殻表面を改変し、より高機能な珪殻の創生を試みた。*F. solaris* はゲノム解析と遺伝子組み換え手法の確立の両方が完了している数少ない珪藻である。そのゲノム情報から、珪殻特異的に局在するフルスチュリンの遺伝子を同定した。このフルスチュリンを足場として用いることで、任意のタンパク質やペプチドを珪殻表面にディスプレイすることができる<sup>(4)</sup>。これまでに、光触媒作用を示す酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) に結合するペプチド (アミノ酸配列: RKKRKKRKKRKKGGGW) を珪殻表面にディスプレイした形質転換株を作出している (Fig. 2)。得られた形質転換株を高濃度の水溶性チタン化合物添加培地で培養することで、酸化チタン-バイオシリカ複合体を構築することができる。構築した複合体を焼成処理したところ、光触媒活性の高い、アナターゼ型酸化チタン微結晶の形成が確認された。本手法は機能性バイオシリカ生産の有力になると期待される。

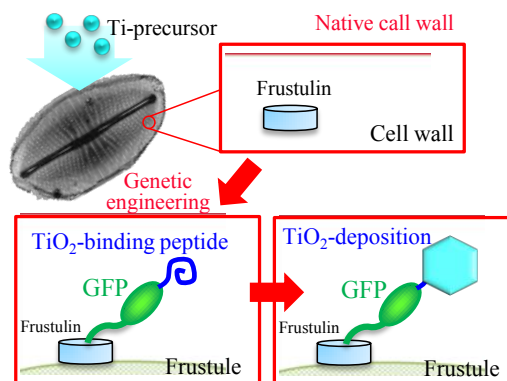


Fig. 2 Diatom cell surface display system for fabrication of  $\text{TiO}_2$ -functionalized biosilica composites.

### 参考文献

- (1) Falkowski, P.G.; Barber, R.T.; Smetacek, V.V. *Science*: **1998**, 22, 200-207.
- (2) Kröger, N.; Poulsen, N. *Annu Rev Genet*: **2008**, 42, 83-107
- (3) Matsumoto, M.; Nojima, D.; Ikeda, K.; Yoshino, T.; Tanaka, T., *J. Jpn. Inst. Energy*: **2015**, 94, 1087-1091
- (4) Maeda, Y.; Tateishi, T.; Niwa, Y.; Muto, M.; Yoshino, T.; Kisailus, D.; Tanaka, T. *Biotechnol Biofuels*: **2016**, 9, 10



所属班：公募班

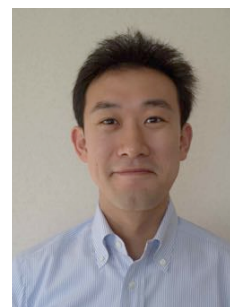
所属機関：名古屋大学 大学院工学研究科  
化学・生物工学専攻 応用化学分野

氏名：安井 隆雄

所属機関住所：〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

e-mail：yasui@apchem.nagoya-u.ac.jp

研究キーワード：ナノワイヤ構造体、セミの翅、物理的防御機構



## ナノワイヤ構造体によるセミの翅の物理的防御機構の模倣

### Nanowires modeled after physical defense mechanism of cicada wing

#### 1. はじめに

2013 年にクランガーゼミというセミの翅は、物理的な構造だけで細菌を殺すことが可能であるということが発見された<sup>(1)</sup>。このような物理的な構造で殺菌作用を持つ天然の表面構造が発見されたのは世界初のことである。クランガーゼミの翅には、微細な柱状のナノ構造体「ナノピラー(直径：約 60 nm)」が広く表面に並んでいる。細菌がセミの翅の表面に付着すると、その細胞膜はナノピラーの表面に突き刺さり、細胞膜はナノピラーとナノピラーの間隙に引き伸ばされる(ゴムのような伸縮性のあるシートを両端よりゆっくり引き伸ばした際に、中央部が薄くなって裂け目が入る現象に近い)。その結果、細胞膜に大きなひずみが生じ、その細胞は破裂する。この殺菌メカニズムは、ナノピラーが細菌細胞に穴をあけて殺菌するのではなく、引張破断に近い構造で殺菌が生じている。報告されている内容によれば、クランガーゼミの翅はグラム陽性菌を殺菌することは可能であるが、グラム陽性菌はその細胞膜の厚さのため、殺菌することが困難であった。しかし、殺菌メカニズムを考慮に入れば、ナノピラーの直径をさらに細くすることで、グラム陽性菌の細胞破碎が可能だと考えられる。本研究では、これまでに作製してきたナノワイヤ構造体<sup>(2-4)</sup>を人工的なセミの翅として、ナノワイヤ構造体を用いた**グラム陰性・陽性菌の破碎**に取り組んだ。

#### 2. ナノワイヤ構造体

本研究では、酸化スズナノワイヤ構造体を有する石英基板とマイクロミキサー構造を有する Polydimethylsiloxane (PDMS) を組み合わせ、人工的なセミの翅であるナノワイヤ構造体を用いた**グラム陰性・陽性菌の破碎**を行った。Vapor-Liquid-Solid (VLS) 法により作製したナノワイヤは、直径 30 nm 以下の酸化スズナノワイヤである。ナノワイヤの長さは、成長時間に応じて長さを変えることができ、アスペクト比が非常に大きい構造体である。マイクロミキサーは、フォトリソグラフィ技術を用いて作製し、マイクロチャンネル高 10  $\mu\text{m}$  に深さ 3  $\mu\text{m}$  のミキサー構造体を PDMS に転



写した。本ナノワイヤ構造体を用いることで、グラム陰性菌の大腸菌だけでなく、グラム陽性菌の枯草菌も殺菌可能であることが明らかとなった。

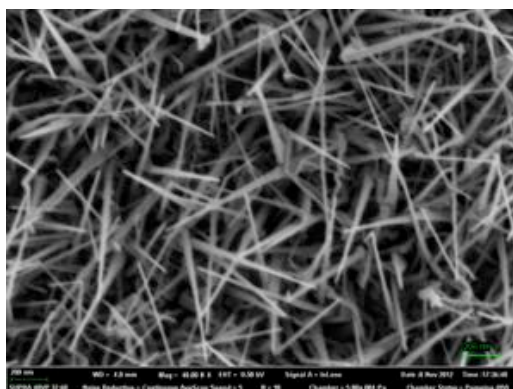


Fig.1 An SEM image of nanowires.

## 参考文献

- (1) Pogodin, S.; Hasan, J.; Baulin, V. A.; Webb, H. K.; Truong, V. K.; Nguyen, T. H. P.; Boshkovikj, V.; Fluke, C. J.; Watson, G. S.; Watson, J. A., *et al.*, Biophysical Model of Bacterial Cell Interactions with Nanopatterned Cicada Wing Surfaces. *Biophys. J.* **2013**, *104*, 835-840.
- (2) Yasui, T.; Rahong, S.; Motoyama, K.; Yanagida, T.; Wu, Q.; Kaji, N.; Kanai, M.; Doi, K.; Nagashima, K.; Tokeshi, M., *et al.*, DNA Manipulation and Separation in Sublithographic-Scale Nanowire Array. *ACS Nano* **2013**, *7*, 3029-3035.
- (3) Rahong, S.; Yasui, T.; Yanagida, T.; Nagashima, K.; Kanai, M.; Klamchuen, A.; Meng, G.; He, Y.; Zhuge, F.; Kaji, N., *et al.*, Ultrafast and Wide Range Analysis of DNA Molecules Using Rigid Network Structure of Solid Nanowires. *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 5252-5259.
- (4) Rahong, S.; Yasui, T.; Yanagida, T.; Nagashima, K.; Kanai, M.; Meng, G.; He, Y.; Zhuge, F. W.; Kaji, N.; Kawai, T., *et al.*, Three-Dimensional Nanowire Structures for Ultra-Fast Separation of DNA, Protein and Rna Molecules. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 10584.

## 謝辭

本研究は文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術(15H01599)」により助成を受けて実施しており、ここに厚く御礼を申し上げます。

所属班：公募班  
所属機関：九州工業大学  
氏名：玉川 雅章  
所属機関住所：〒808-0196  
福岡県北九州市若松区ひびきの  
e-mail：tama@life.kyutech.ac.jp  
研究キーワード：好中球，サイトカイン濃度勾配，推進機構



## サイトカイン濃度勾配による

### 好中球の液中内運動機構とその応用

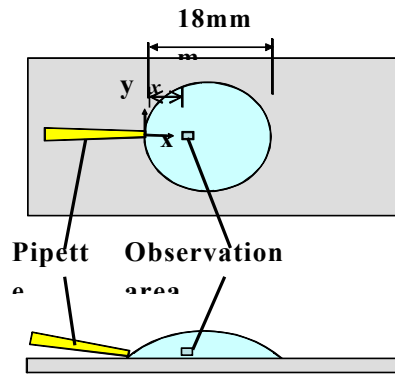
## Mechanism of Neutrophil's Motion in Liquid by Concentration Gradient of Cytokine and its Applications

### 1. はじめに

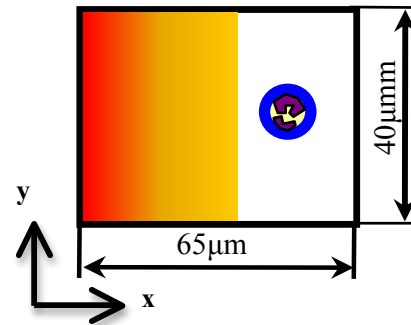
好中球は、炎症患部付近から産生される走化性因子により活性化され、血流中から患部へ目掛けて移動する機能（走化性）を有している。SEM 画像などによれば、好中球表面は凹凸が多くみられることが知られている<sup>(1)</sup>。一般的に濃度勾配のある液体中の微粒子には濃度マランゴニ効果による界面張力が働くが、液体中（血液中）を運動する好中球の駆動機構が同じ現象かどうかは解明されていない<sup>(2-3)</sup>。そこで本研究では、好中球を微粒子とみなし、サイトカイン濃度勾配によるその運動方向への駆動力の発生機構について調べた。具体的には好中球の膜表面におけるレセプターの濃度拡散を仮定して好中球の運動観察と駆動機構の検討を行った。これまでのところ、サイトカイン濃度が好中球に到達した時間から膜上の輝度分布の勾配が正、負の値をとりながら振動していることがわかっている<sup>(4)</sup>。本報告においては、膜面での濃度勾配の時間変化と膜面上での濃度分布について画像解析による結果を示す。

### 2. 実験方法と画像結果

スライドガラス上の分散する好中球にサイトカインを滴下し(Fig.1)，その拡散と好中球運動を高感度 CCD カメラで観察した。このときサイトカイン濃度を、FITC によって抗体標識された蛍光強度から計測し、サイトカインが好中球に到達する際の濃度分布の変化を調べる。Fig.2 には、膜上でのサイトカイン濃度勾配（輝度勾配）と好中球速度の時間履歴を示す。Fig.2(a)より、輝度勾配が正負と変化していること、Fig.2(b)より、好中球の速度もそれらにあわせて正負となっていることがわかる。しかし、一方で速度は負の領域が大きいいため、総計として好中球が  $x$  の負の方向、すなわち、高濃度の方に動いていることが考えられる。現在、マイクロ流路を製作して濃度勾配が一定となる時間を長くすることで、これらの現象をより正確に計測する予定である。

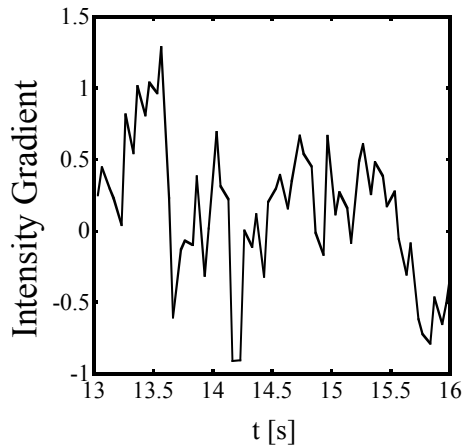


(a) Pipette and observation part on the microscopy

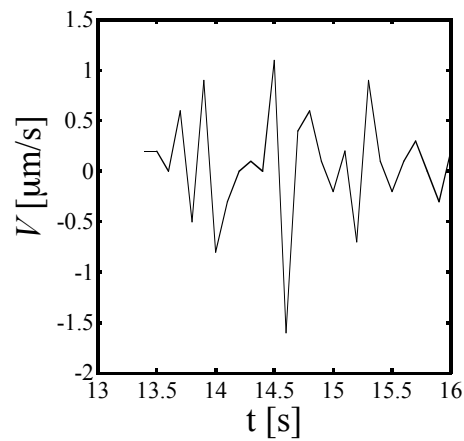


(b) Schematics of propagation of concentration to the neutrophil

Fig.1 Observation part on the microscopy and propagation of Cytokine concentration



(a) Time history of intensity gradient (concentration gradient)



(b) Time history of velocity of neutrophil

Fig.2 Relation between concentration gradient and velocity of neutrophile by image processing

## 参考文献

- (1)<http://www.sciencephoto.com/305848/>, Neutrophil white blood cells, SEM, P276/0172 etc.
- (2)P. R. Ebrahimzadeh, vol. 67, no.5, 2000, *Journal of Leukocyte Biology*, pp.651-661.
- (3)R.A.Jannat, M.Dembo, and D.A.Hammer, *Biophysical Journal*, Vol. 101, 2011, pp.575-584
- (4)M.Tamagawa and K.Matsumura, *FEDSM2008 (2008 ASME Fluids Engineering Conference)*, 2008, pp.553191-553194
- (5)M.B. Byrne, Y. Kimura, A. Kapoor, Y. He, K.S.Mattam, K. M. Hasan, L.N.Olson, F. Wang, P.J.A. Kenis, C.V. Rao, *PLOS ONE*, Vol. 9, Issue 1, 2014, e85726

所属班：公募班  
所属機関：九州大学大学院工学研究院機械工学部門  
氏名：津守 不二夫  
所属機関住所：〒819-0395  
福岡市西区元岡744番地  
e-mail：tsumori@mech.kyushu-u.ac.jp  
研究キーワード：磁性粒子，マイクロアクチュエータ，  
人工纖毛，メタクロナル波



## 磁性粒子分散柔軟材料を用いた人工纖毛の開発

### Development of Artificial Cilia using Elastomer Dispersed with Magnetic Particles

#### 1. はじめに

纖毛とはゾウリムシ等の微生物の表面にある微細な毛のような組織である。多くの纖毛が表面を覆い、その一本一本が動くことにより水流を発生している。本講演では微細加工プロセス用のゴム材料，それに磁性粒子を用い，このような微細駆動構造を人工的に作り上げることを目標としている。この人工纖毛は，微小領域での効果的な送液や微粒子搬送デバイスとしての工学的な応用が期待できる。

#### 2. 非対称な動き

自然界の纖毛は10マイクロメートル程度と，非常に微細である。このような纖毛が水流をいかに発生するかを考えてみる。纖毛は単純に左右に揺れているだけではない。流体を特徴づける値としてレイノルズ数というものがある。これは，慣性力と粘性力の比を表している。レイノルズ数が大きいほど慣性力の影響が大きく，小さいほど粘性力の影響が大きい。具体的に，例えばクジラが泳ぐ場合レイノルズ数は約3億，逆に小さいバクテリアが泳ぐ場合は，レイノルズ数は約0.00001と極端に異なる。クジラは尾を上下に動かして泳ぐ。その際，尾で押し出した水の慣性，つまり勢いが大きいため，このように泳ぐことができる。クジラが仮にバクテリアのような大きさならば同じように泳ぐことができるかという，答えはノーである。上下に尾を動かして，押し出そうとした水は，押し出した勢いで流れることなく粘性の影響でつぶされてしまう。我々も非常に「ねっちりした」タールのような液体の中では泳ぐことができない。実は，レイノルズ数を考慮すると，纖毛が流れを作る世界はこのような「ねっちりした」世界である。では，纖毛はどうや

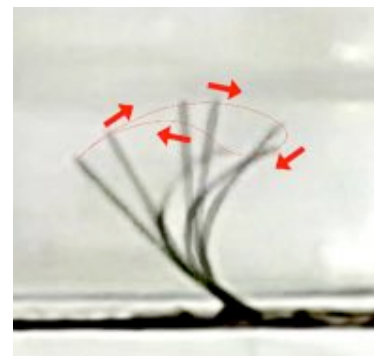


Fig. 1 Actuated sample of artificial cilium.

って流れを作るのか、この場合、クジラと同じような上下の行きと帰りで同じ動きを「しない」ことが重要となる。

図1は作製した人工繊毛の例である<sup>1)</sup>。このような非対称な動きにより粘性支配の環境においても流れを起こすことができる。このような動きはまさに自然界の繊毛で見られるものであるが、本研究では単純な回転磁場により、自然界と同様の非対称な動きを起こすことができることを示した。

### 3. 繊毛群の集団挙動

自然界では、繊毛は表面を覆うように大量に生えている。これらの集団での動きも重要である。繊毛の集団は、稲穂が風になびくように、またはドミノ倒しのように、一本一本の動きが伝播するような集団的な動きを見せる。このような挙動はメタクロナル波と呼ばれており、効率の良い流れを生み出すことが解析的にも示されている。メタクロナル波を作り出すには、一本一本の磁場駆動型の繊毛を作る際に外部磁場を印加し、形状は同じでも、内部に磁気的な「くせ」を持たせることで実現できる。図2に模式図を示す<sup>1)</sup>。従来の微細構造作製技術では、磁気的なくせ（異方性）を作りこむことは不可能であった。現在、レーザー加工装置や磁性ゴム材料用の三次元プリンタを開発中である。

### 4. まとめ

柔軟磁性材料を使った人工繊毛について紹介した。講演においては具体的な作製手法についても触れる。

### 参考文献

(1) Tsumori, F: et al. *Jpn. J. Applied Phys.* **2015**, 54, 06FP12.

### 謝辞

本研究は新学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」の公募研究として実施している。また、利用した微細加工プロセスに関しては科研費、基盤B(15H04161)、挑戦的萌芽(15K13916)により開発した技術を応用している。ここに謝意を表する。

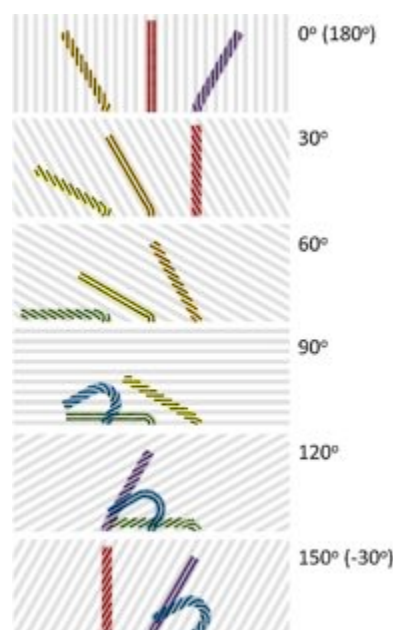


Fig. 2 Schematic of movements of artificial cilia with different magnetic orientation in a rotational magnetic field.



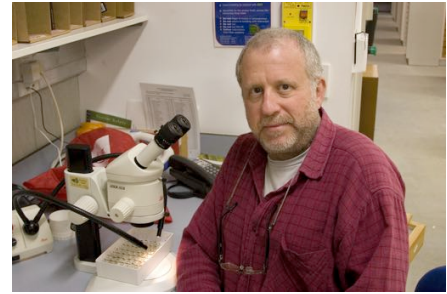
## Dr. Richard Leschen

### Landcare Research, New Zealand Arthropod Collection

- Telephone: 64 9-574-4111
- Address: Private Bag 92170, Auckland, New Zealand

### Education & Academic Background

1995, PhD, Entomology, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA  
1988, MS, Entomology, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, USA  
1984, BS Biology, Southwest Missouri State University, Springfield, Missouri, USA  
2013 – present, Editorial Board, Systematic Entomology  
2005 – present, Editorial Board, European Journal of Entomology.  
2005 – 2007, President of New Zealand Entomological Society.  
2004 – 2015, Editorial Board, New Zealand Entomologist.  
1999 – 2003, Science Editor, New Zealand Entomologist.  
1999 – 2001, Associate Editor, Systematic Biology.  
1995 – 1997, Adjunct Assistant Professor, Departments of Entomology and Ecology and Evolutionary Biology, Michigan State University.



### Awards

2013 - Distinguished Alumnus, University of Arkansas.  
2011 - Best Paper Award of the Year, Entomological Society of Japan.  
2005 - Paper selected for publication in the Patricia Vaurie Series, The Coleopterists Society.  
2004 - Outstanding Paper of the Year Award, Coleopterists Society.  
1997- Lacordaire Prize for Best Dissertation, Coleopterists Society.  
1990- Student Competition, Second Prize, Central States Entomological Society.

### Select Publications

- Leschen, R.A.B.** & Beutel, R. G. (Editors). 2014. Handbook of Zoology, Coleoptera Volume 3: Morphology and Systematics (Phytophaga). Walter de Gruyter, Berlin. 687 p.
- Leschen, R.A.B.**, Beutel, R. G. & J. F. Lawrence (Editors). 2010. Handbook of Zoology, Volume IV Arthropoda: Insecta, Part 39, Evolution and Systematics Coleoptera (Polyphaga part.), Vol. II. Walter de Gruyter, Berlin. 787 p.
- Beutel, R. G. & **R.A.B. Leschen** (Editors). 2005. Handbook of Zoology, Volume IV Arthropoda: Insecta, Part 38, Evolution and Systematics Coleoptera (Archostemata, Adephaga, Myxophaga, Polyphaga part.). Walter de Gruyter, Berlin. 567 p.
- Schaefer, C.W. & **R.A.B. Leschen** (Editors). 1993. Functional Morphology of Insect Feeding. Proceedings, Thomas Say Publications, ESA, Lanham. 162 p.
- Buckley, T. R., M. Krosch, & **R. A. B. Leschen**. 2015. Evolution of New Zealand insects: summary and prospectus for future research. Austral Entomology 54: 1-27.
- McKenna, D., Wild, A. L., Kanda, K. ... **Leschen, R.A.B.** ... 2015. A tree of life for beetles (Coleoptera) reveals the order survived end Permian mass extinction to diversify during the Cretaceous terrestrial revolution. Systematic Entomology 40: 835-880.
- Yavorskaya, M., **Leschen, R.A.B.**, A. A. Polilov, & R. G. Beutel. 2014. Unique rostrate larvae and basidiomycophagy in the beetle family Corylophidae. Arthropod Structure & Development. 43: 153-162.
- Buckley, T.B. & **Leschen, R.A.B.** 2013. Comparative phylogenetic analysis reveals long-term isolation of lineages on the Three Kings Islands, New Zealand. Biological Journal of the Linnean Society 106: 361-377.
- Marske, K. A., **Leschen, R.A.B.**, Buckley, T. R. 2012. Concerted versus independent evolution and the search for multiple refugia: comparative phylogeography of four New Zealand forest beetles. Evolution 66: 1862-1877.
- Leschen, R.A.B.** & B. Cutler. 1994. Cuticular Calcium in adult beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). Annals of the Entomological Society of America 87:918-921.
- Leschen, R.A.B.** & C.E. Carlton. 1993. Debris cloaking in Endomychidae: a new species from Peru (Coleoptera). Zoological Journal of the Linnean Society 109:35-51.



## Coleoptera Cuticles: from Calcium deposition to Attachment Structures

Most beetles keep their surfaces free of particulate matter by active grooming, or simply having slick and smooth cuticular surfaces. Many species, however, may be coated by films of fluids of various viscosities and/or coarse to fine particular material, some of it embedded in waxy material or encrustations. The fluids or waxy secretions that form films or cements are produced from glands within the bodies of the beetles, often distributed by special grooves and attachment accomplished by passive or active methods, held in place often by special setae. The exact mechanisms of secretion and attachment are poorly known and have not been fully characterised or described for beetles. Here a brief and rather ad hoc survey of encrustations is presented and examined in some beetle groups to determine their evolutionary and behavioural significance.

所属班：A01-1班  
所属機関：国立科学博物館動物研究部  
氏名：野村 周平  
所属機関住所：〒305-0005 茨城県つくば市天久保4-1-1  
e-mail：nomura@kahaku.go.jp  
研究キーワード：データベース、SEM画像、  
生物多様性、昆虫・企画展



## **A01-1 班：バイオミメティクス・データベース構築 —2016 年度前半の取り組み**

### **Part A01-1: Database Building for Biomimetics -Works in the earlier half of 2016**

#### **1. A01-1 班研究の概要とこれまでの成果**

当研究計画班における研究内容は、バイオミメティクスを推進する工学系研究者に「気づき」をもたらす可能性のある生物構造に関するデータを収集し、初学者でも容易に必要な情報を取り出すことのできるデータベースを構築することである。そのために、当班は大きく生物系と情報系に分かれ、生物系は昆虫を担当する野村小班と、魚類を担当する篠原小班、情報系は画像検索を担当する長谷山小班と、オントロジーを担当する溝口小班とに分かれて、それぞれ研究内容を分担している。生物系から情報系へ提出したSEM画像件数は2012-2015年度で約25,100件に上った。この内訳は、昆虫約19,000件、鳥類約1,500件、魚類約4,600件である。これらの画像データは長谷山小班へ提出され、画像検索基盤の基礎データとして使用されている。

また、生物の適応についてまとめたテキストファイルの整備を進め、これまでに約500分類群（昆虫 約250、鳥類 約160、魚類 約190）の処理を終えた。これらのテキストデータについては、オントロジー担当の溝口小班へ提出され、バイオミメティクス・データベースに組み込まれつつある。

#### **2. 2016 年度の研究計画**

本年度は研究期間の最終年度であり、これまで蓄積してきたデータをさらに充実させるとともに、これまでの研究成果の取りまとめを行う。生物系2小班では引き続き、昆虫、魚類からSEM画像などの生物画像データを収集する。これらの収集にあたっては、領域内他班との連携に資するデータへの選択と集中に配慮

する。生物系データの蓄積により、バイオミメティクスに関する深い知識と幅広い発想が期待できる。

情報系担当2小班では、昨年度開始した「バイオミメティクス・データ検索基盤」試作システムの領域内での試験運用結果に基づき、これまでに開発してきたデータベースと画像検索基盤としての高度化をはかる。本データベース構築の特色は、独創的な工学的発想をもたらす画像検索と、生物情報に関するオントロジーと組み合わせることで、極めて異質なデータ同士の統合を可能にし、独自の発想を実現する点にある。

### 3. アウトリーチ活動

本班では、研究成果を広く発信するため、また、若手研究者の育成に資するため、2016年度前半までに、一般向け書籍の発行と国立科学博物館における企画展を実施した。書籍については、篠原現人・野村周平編著「生物の形や能力を利用する学問—バイオミメティクス—」を国立科学博物館叢書⑩として発刊した（図1：東海大学出版部刊）。また企画展は「生き物に学びくらしに活かす—博物館とバイオミメティクス」と題して、本年4月19日～6月12日の約7週間、東京上野の国立科学博物館上野本館にて実施した（図2）。会期中約14万7千人の入場者があった。



Fig.1. A book of biomimetics (Shinohara & Nomura eds., 2016).



Fig.2. A snapshot of the exhibition held in NMNS.

所属班：A01-1 班  
所属機関：北海道大学大学院情報科学研究科  
氏名：長谷山 美紀  
所属機関住所：〒060-0814  
北海道札幌市北区北14条西9丁目  
e-mail：miki@ist.hokudai.ac.jp  
研究キーワード：バイオミメティクス・データ検索



## バイオミメティクス画像検索基盤の拡張 －オントロジーとの連携－

### Extension of Biomimetics Image Retrieval

### - Collaboration between Image Retrieval and Ontology -

#### 1. はじめに

バイオミメティクスのものづくりを支援するために、バイオミメティクス画像検索基盤の研究開発が進められている。本検索基盤には、大量の生物を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した画像が格納されており、材料の表面構造と類似の表面構造を持つ生物を効率的に検索することができる。検索により得られた生物の生態環境や固有の性質を知ること、材料開発に発想が生まれる<sup>(1)</sup>。本稿では、バイオミメティクス画像検索基盤に新たに導入された画像特徴量を用いて得られた検索結果、および現在進められているオントロジーとの連携について紹介する。

#### 2. バイオミメティクス画像検索基盤の拡張

バイオミメティクス画像検索基盤を発展すべく、新たな特徴量を導入した。新特徴量を用いて検索した結果を Fig.1(a)に示す。参考のため、以前までの特徴量を用いた検索結果を Fig.1(b)に示す。Fig.1 より、新たに導入された特徴量は、以前の特徴量に比べて画像中のテクスチャを観察することに適しており、微細構造の類似性により注目した検索結果が得られることが分かる。

さらにバイオミメティクス画像検索基盤の高度化を目指し、オントロジーのキーワード検索システムとの連携機能の実装が進められている。具体的な仕様を Fig.2 に示す。Fig.2 左のオントロジー検索システムで利用者が関心を持ったオントロジーキーワードを選択し、Fig.2 右の画像検索基盤に実装したオントロジー連携ボタンを押下することによって、オントロジーに注目した検索から画像検索へのシームレスな連携が可能となる。この機能が実装されれば、より高度なバイオミメティクス画像検索が可能となる。

### 3. むすび

バイオミメティクス画像検索基盤に新たに導入された画像特徴量の検索結果について説明した。さらに、オントロジーのキーワード検索システムとの連携機能の仕様を紹介した。本稿で示したバイオミメティクス画像検索システムの高度化により、材料開発の発想をより効果的に支援するツールへの発展が期待できる。

### 参考文献

- (1)長谷山 美紀, “ものづくりの発想を支援するーバイオミメティクス・画像検索基盤ー,”現代化学, no. 529, pp. 31-34, 2015.

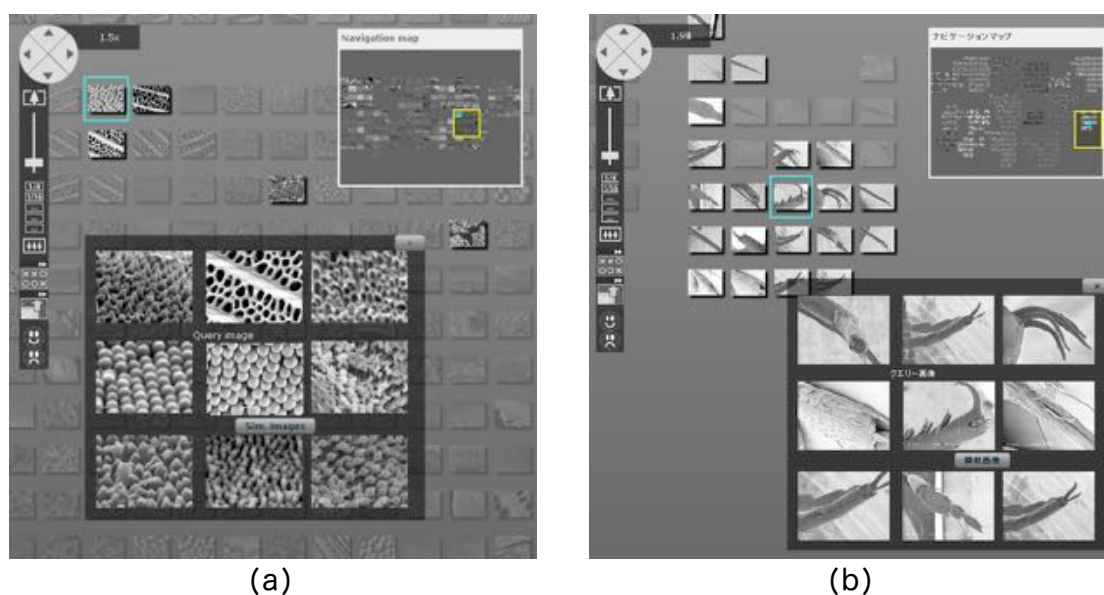


Fig.1 Image retrieval results : (a) Results obtained by using new features, (b) Results obtained by using previously reported features.



Fig.2 Collaboration between Image Retrieval and Ontology Keyword Retrieval.



所属班：B01-1班

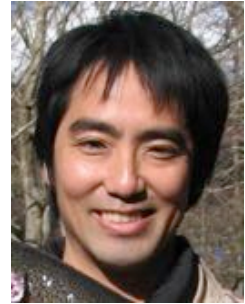
所属機関：国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏名：大園 拓哉、（発表：平井悠司、黒川孝幸）

所属機関住所：〒305-8565 つくば市東1-1-1

e-mail：ohzono-takuya@aist.go.jp

研究キーワード：摩擦、潤滑、防汚、表面



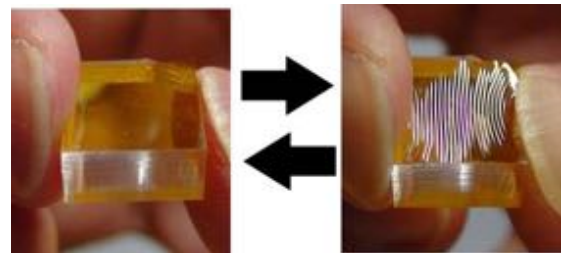
## B01-1 班 生物規範界面デザイン： トライボロジー界面の創製

### B01-1：Design of Biologically-Inspired Surfaces with Tribological Properties

#### 1. はじめに

柔らかく変形可能な凹凸構造のある生物表面は多い。しかし、元来、その構造と摩擦などのトライボロジーに関する性質が、どのように結びついているのかは一部の例（ヤモリの接着機能等）を除き自明ではない。その解明のためには、各個別の生物系をしらみ潰しに調査し、その活動環境（例えば水中なのか空気中なのか等）や力学的機能（相互作用力の程度等）を解明していく地道な戦略が有効であろう。

一方で、その柔らかく変形可能な凹凸構造という特徴を一般化し、抽象化したモデル系においてそのトライボロジー機能に対するより一般的な理解とその機能のチューニングの指針を得ることも、工学的目的においては有効である。その考えのもと、これまではそのモデル表面として自己組織化によって作製できる表面シワ構造を活用し、摩擦挙動や防汚機能を調査してきている(Fig. 1)。今回は、最近進んできている異分野(班間)連携による生物表面の機能解析の結果を含めた B01-1 班全体の進捗状況の概要と、特にウバウオに学ぶ吸着ゲル材料について報告する。



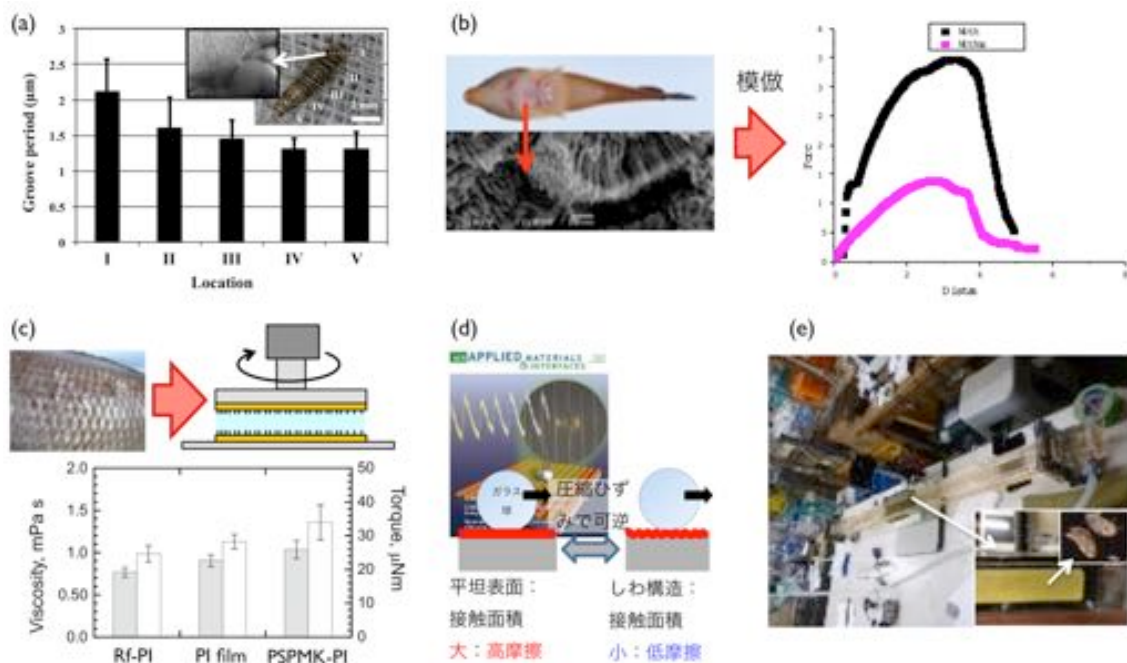
**Fig. 1** Shape-tunability of wrinkles.

#### 2. B01-1 班の進捗状況の概要

Fig. 2 に班内の進捗状況の概要を示す。B01-1 班は、当初工学系の研究者で構成されており、材料に関する個別研究が主であった。一方班間連携が進み、異分野連携による生物の機能解明も進んできた。Fig. 2(a)には微細な溝構造を有するマダラシミ鱗片表面の解析に関するグラフを示す。本研究は A01-1 班の野



村先生(生物系)と長谷山先生(情報系)との共同研究の成果であり、この鱗片表面の溝構造のばらつきが摩擦特性に影響を及ぼしているという結果が得られている。Fig. 2(b) にはウバウオに学ぶゲル材料の吸着特性を示している。ウバウオの吸盤は細かい繊維状の微細構造と粘液によって構成されており、これらの構造を模倣することで、実際に高い吸着性を示すゲル材料の開発に成功するとともに、人工系による材料作製の成功により、ウバウオの吸着機構が説明できるようになった(詳細は口頭にて発表の予定)。また、魚鱗の粘液を模倣した高分子ブラシの抵抗特性の評価(Fig. 2(c))や生態系でも数多く見られるしわ構造の摩擦特性評価(Fig. 2(d))、さらに中間審査後に参画した野方先生により、流体抵抗測定系が構築され、それを利用した流水下でのフジツボの幼生や珪藻の付着性試験が行えるようになった。今後は生物表面に学び、表面の分子から微細構造までを班内連携により設計、急ぎ流体抵抗や流水下での抗付着性の評価を執り行う予定である。



**Fig. 2.** Outlines of research results conducted by B01-1 (a: Hirai, b: Kurokawa, c: Kobayashi, d: Ohzono, and e: Nogata).

## 謝辞

本研究は、科研費新学術領域「生物規範工学」(No.24120002, No.24120003)の支援の下、行われた。

所属班：B01-2班

所属機関：

<sup>A</sup>北海道教育大学札幌校生物研究室、

<sup>B</sup>東京理科大学理工学部物理学科

氏名：<sup>A</sup>木村 賢一、<sup>B</sup>吉岡 伸也

所属機関住所：<sup>A</sup>〒002-8502

札幌市北区あいの里5条3丁目1

<sup>B</sup>〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

e-mail：<sup>A</sup>kimura.kenichi@s.hokkyodai.ac.jp、<sup>B</sup>syoshi@rs.tus.ac.jp

研究キーワード：モスアイ、クチクラ、ナノパイル、ニップル、ロバストネス



## モスアイ構造 — 機能の多様性、自己組織化による構造形成過程、構造的揺らぎを許した高機能性

### Moth eye structure: self-organization of nanoprotrusion, and diverse and irregularity-robust functions

#### 1. はじめに

“モスアイ構造”は、昆虫の網膜レンズ表面に見られる微小なナノニップル構造であり、クチクラで形成されている(Fig.1)。また、類似のナノパイル構造は昆虫の翅の表面にも見られる(Fig.2)。これらのサブセルラー・サイズの構造は光の反射を防ぐだけでなく、高い撥水性を示すとともに、汚れが付きにくいセルフクリーニングの特性(防汚性)といった多機能性を有する。これらクチクラ表面サブセルラー・サイズ構造の形成メカニズムを明らかにすることで、生物の自己組織化現象を理解し、工学的製造プロセスに模倣するという今後のバイオミメティクス展開を目指して研究を推進している。



Fig.2 Nanopile structure on the wings of large brown cicada.

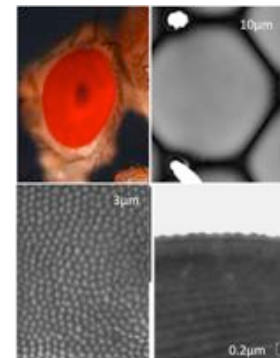


Fig.1 Corneal nipples in the compound eye of *Drosophila*.

#### 2. モスアイ構造の新たな機能：滑落性

セミの翅のクチクラの表面には、数百ナノメートルのナノパイル構造が存在する。この構造は、透明な翅においては光の反射を抑制し、非常に高い透明性を示す。このような透明な翅をもつセミに加え、アブラゼミのような不透明な翅の表面にもナノパイル構造が見られる(Fig.2)。このナノパイル構造には、光の反射抑制

の他にどのような機能があるのだろうか？アリがセミを攻撃している様子を見ると、この翅の上をうまく歩けないことが観察された。アリを含め、滑らかな垂直面を歩行することができる昆虫の肢の先端には、footpad と呼ばれる特殊なクチクラ構造が見られ、接着性を保証している。しかし、モスアイ構造はfootpad による接着性を阻害し、滑落性といった機能を有することがわかった。そこで、モスアイ構造を模倣した“モスアイフィルム”を利用し、様々な昆虫に対する滑落性を調査したところ、調べたすべての昆虫で滑落性が示された。このことは、“モスアイフィルム”の害虫防除への応用の可能性を示唆している。

### 3. モスアイ構造の形成メカニズム

生物は、モスアイ構造をどのように形成しているのだろうか。遺伝学的解析が可能なキロショウジョウバエのレンズのニップルに注目して解析を進めている。キロショウジョウバエの複眼は約 800 個の個眼よりなり、それぞれの個眼のレンズの表面には微小な突起構造（ニップル構造）が見られる（Fig.1）。レンズクチクラは、エンベロープ、エピクチクラ、プロクチクラの 3 層よりなり、ニップル構造はエンベロープとエピクチクラ層で形成される。ニップル形成過程には、レンズ形成細胞の表層（apical 側）には多数の微絨毛が存在し、微絨毛の間の細胞膜からエキソサイトーシスにより、クチクラ形成のための材料物質が分泌されていた。細胞外の材料物質は、まず微絨毛の先端に集積しエンベロープを形成する。その後エピクチクラ層の形成とともに自己組織的にニップル構造の形成が進行し、続いてプロクチクラ層がつくられる（Fig.3）。

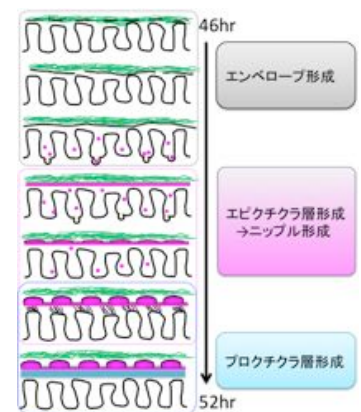


Fig.3 Nipple formation.

ニップル構造の形成メカニズムを明らかにするため、遺伝子ノックダウン法などを用いて特定の遺伝子の作用を変化させ、レンズ表面のニップル構造が変化するかを調べた。その結果、細胞表面の張力に関与するアクチンやミオシン遺伝子の作用をノックダウンするとニップルが肥大化した

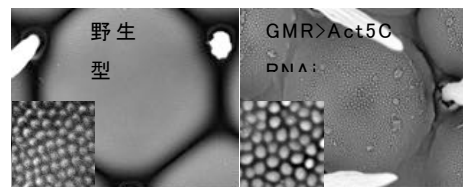


Fig.4 wild-type and enlarged nipples.

（Fig.4）。また、アクチン分子と結合する細胞接着因子をノックダウンさせると、同様にニップルの肥大化が生じた。これらの結果から、ニップル形成時の自己組織化には、レンズ形成細胞のアクチン-ミオシンによる細胞表面の張力あるいは細胞接着による形の維持機構が関与することが示唆された。

### 4. モスアイ構造の乱れの可視化と定量化

生物の自己組織化過程は、細胞内にある柔らかな材料を用いて常温常圧下で行われるから、必然的に熱揺らぎの影響を受けてしまう。例えば規則的な微細構造が引き起こす発色現象（構造色）を持つ生物においても、詳しく観察すると構造



の乱れや欠陥が無数に存在している。構造色の代表例、タマムシの多層膜構造においては、クチクラ膜の界面はかなり凸凹であり、一枚の膜が途中で二枚に分かれるなどの欠陥が多数含まれている。モスアイ構造においても、ニップルの配列がアモルファス状に乱れた昆虫がクマゼミの翅などで見つかっている。このような配列の乱れはなぜモスアイ効果を始めとする機能に影響を与えないのだろうか。B01-2 班では、生物が持つ乱れを含んだ微細構造が示すロバストな機能に学ぶことがバイオミメティクス研究には重要であると考え研究を進めてきた。

ニップルの配列乱れを評価する方法の一つにボロノイ分割を用いた解析が考えられる。Fig.5 左はその例で、ニップルがある位置を母点としてボロノイ分割を行い、ボロノイセルが五角形と七角形になるところに色付けをしたものである。六方格子状の規則的な点配列は六角形のボロノイセルを持つため、線状の欠陥を結晶粒界として可視化することができる。しかし、乱れの度合いが大きくなった場合には、結晶粒界が明確でなくなるため、例えば結晶ドメインのサイズを定量化するといった解析が困難になる問題があった。そこで、今回新たに局所的な配向秩序変数 $\phi_6$ を使った可視化を試みた。この配向秩序変数は、ある母点とその周囲にある  $i$  番目の近接点を結ぶ直線が任意の参照軸となす角度 $\theta_j$ を用いて

$\phi_6 = \frac{1}{m} |\sum \text{Exp}[6i\theta_j]|$  で定義される。ここで  $m$  は近接点の数である。周囲の近接点が正六角形を形成している場合には $\phi_6 = 1$ となり、近接点の配列が乱れている場合には配向秩序変数の値は 0 に近づく。その量を用いてボロノイセルに色づけを行った結果を Fig.5 右に示す。粒界の可視化と同時に局所的な規則度合いの空間変化が連続的な色の変化（図では赤からオレンジ）として可視化できることが分かった。今後、この秩序変数の空間相関距離を調べることで、乱れが多い場合においても結晶ドメインサイズに相当する量を定量化できると期待できる。

ここであげた配向秩序変数以外にもエントロピーや動径分布関数といった多くの物理量が乱れの評価方法としてありうるだろう。今後できるだけ多くの物理量で乱れを評価し、どんな機能と結びついているのかを明らかにしていく必要がある。また、複数の量で乱れを評価しておくことは、自己組織化過程の数理モデルが提案されたとき、その妥当性の検証に役立つと思われる。

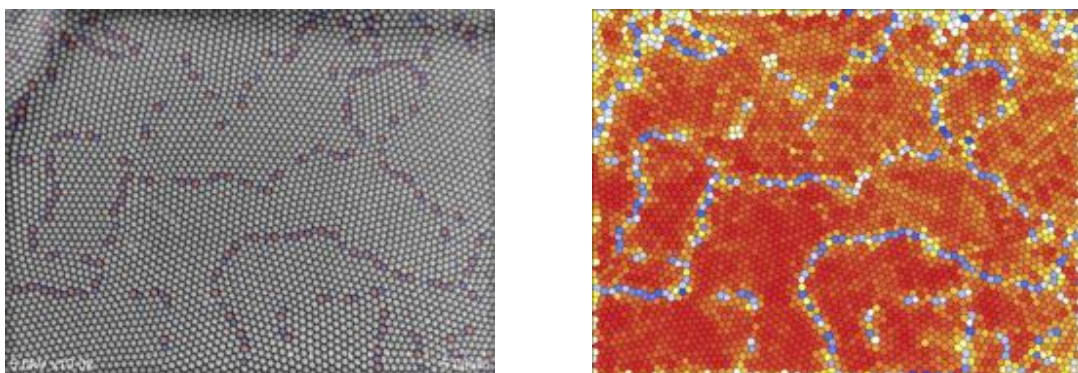


Fig.5 Voronoi diagram of a moth eye structure. Left: Pentagonal and heptagonal Voronoi cells are colored as blue and red, respectively. Right: Bond order parameter value is used for the coloration.

## 5. モスアイ効果のロバストネス

前節で述べたニップル配列の乱れは本当に機能に影響を与えていないのだろうか。B01-2 班では反射防止効果（モスアイ効果）に注目して詳しい検証を行ってきた。具体的には、乱れを導入した構造モデルにおける散乱効率の数値計算、生物試料を用いた光学測定、二次波の足し合わせモデルによる散乱現象の理論的な解析などである。その結果、クマゼミの翅の反射率は実験値として 0.1% 程度であり、モスアイ構造がない場合の反射率（およそ 8 %）と比べて十分に低いことがわかった。すなわち、クマゼミの翅で観察されたニップルの配列は、結晶のように完全ではないという意味で「いい加減」ではあるが、散乱が問題となるような度合いではないという意味では「良い加減」なのである。

一方、その「いい加減さ」は昆虫の種類によって異なることも分かってきた。Fig.6 は、乱れ度合いを示す縦軸にボロノイセルの面積の標準偏差に比例した量をとったものである。異なる昆虫が持つ乱れ度合いの差は、異なる適応をした結果であることを意味しているのかもしれない。冒頭で述べたモスアイ構造の多機能性や構造乱れに対する機能のロバストネスという視点から今後も研究を継続していく必要があるだろう。

本研究は B01-2 班を中心とする次の共同研究者(所属機関)と行われました。南竜之介(北教大)、山濱由美(浜松医大)、針山孝彦(浜松医大)、久保英夫(北大)、石井大佑(名工大)、不動寺浩(物資・材料研究機構)、魚津吉弘(三菱レイヨン)、下村政嗣(千歳科技大)。また、A0 班をはじめ他班の方々のご協力を得ました。感謝申し上げます。

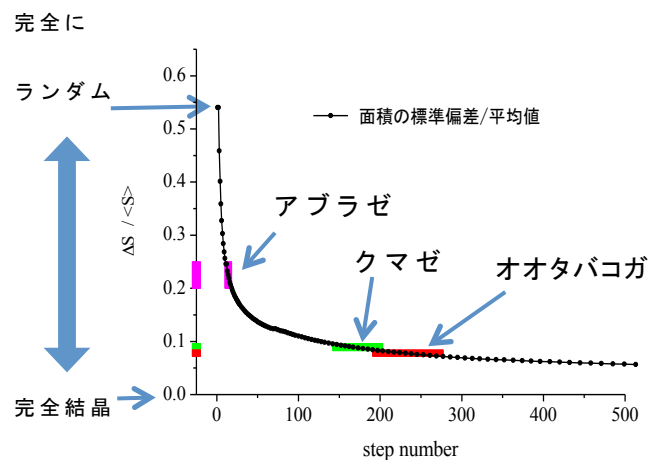


Fig.6 Evaluation of irregularity using a computer simulated dot pattern and Voronoi diagram. Data for three insect species are superimposed.



所属班：B01-3班

所属機関： 国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
ハイブリッド材料ユニット インターコネクトデザイングループ

氏名：細田 奈麻絵

所属機関住所：〒305-0044 茨城県つくば市並木1-1

e-mail：HOSODA.Naoe@nims.go.jp

研究キーワード：ぬれ性制御、分泌、自己治癒、接着・剥離、  
摩擦、熱の移動



## 生物規範階層ダイナミクス班の研究進捗報告

### Progress report of B01-3 group

本研究班は、生物のサブセルラー・サイズ構造に起因する動的特性を生物物理・材料/表面科学の視点から解明、系統的なアナロジーの検証、原理の抽象化、発生学的形成プロセスの解明、などを通して、生物規範の基礎を確立し、技術移転を行っている。

生物表皮にあるサブセルラー・サイズ構造に起因する動的特性は、（１）移動のための可逆的接着（接着・剥離・摩擦）、（２）機能保持のための防汚・自己治癒、（３）温度制御のための熱の移動など生命維持のために役立っている。本研究班では、上記３つの特性について研究し要素技術開発を行った。

（１）可逆的接着のモデルは、テントウムシ、ハムシ、カミキリムシなど脚の先端に接着性に優れた毛状構造を持つ昆虫を対象にし、接着特性の調査と毛状構造の設計を行い可逆的接着機構の開発を行った。昆虫の接着特性調査の最中にハムシやテントウムシが水底を自由に歩行していることを発見し、昆虫が泡を利用して水底歩行していることを突き止め、水中接着の開発に繋がった。（２）生物の機能保持のための防汚・自己治癒は表皮からの分泌物により実現している。このしくみを技術的に実現するため、層状ハイブリッド皮膜を開発し、優れた滑水性、ダメージを受けた際の自己治癒／修復、表面機能の回復、長期にわたる耐食性を実現した。この層状ハイブリッド皮膜を被覆した銅、アルミニウム基板は塩水噴霧試験 2000 時間以上経過しても腐食は確認されず、優れた長期耐食性を示す

ことが明らかとなった。また、ナメクジの分泌機能を模倣した自己分泌型機能材料（SLUG：Self-lubricating Organogel）を開発した。導入する液体を任意選択することで、防汚性のみならず、着氷防止、付着防止、超撥水性、撥液性等の表面機能を付与できることが明らかとなった。（３）温度制御のための熱の移動については、生物表皮の周期的な凹凸に着目し、周期的凹凸構造のサイズが、熱的性質に影響を及ぼすことを明らかにし、コンピューター内の放熱に有効である事を実証した。

Fig.1 に B01-3 班で開発した要素技術の模式図を示した。生物表皮のサブセルラー・サイズ構造は多種多様な新技術開発をもたらすことが可能であり、本研究においては１）分泌液の制御による水／油分離膜、２）積雪しない表面、３）亀裂が自己治癒する被膜、４）水中接着、５）可逆的接着、６）ヒートシンクなど多様な新技術開発に成功している。



Fig.1 The new technologies developed by group B01-3.

所属班：B01-3班

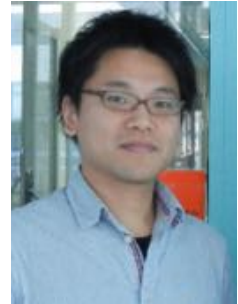
所属機関：名古屋工業大学 大学院工学研究科

氏名：前田 浩孝

所属機関住所：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

e-mail：maeda.hirotaka@nitech.ac.jp

研究キーワード：熱特性，周期構造，表面処理



## 放熱特性を向上させる新しい表面の設計

### Surface Design for Enhancing Heat Radiation Abilities

#### 1. はじめに

近年の電子部品の高機能化にともない発熱量が増加するため、一定温度以下に保つ熱設計が重要となる。例えば、ヒートシンクでは高熱伝導性材料を用いて、比表面積を増加させる形状を構築し、ファンによる強制対流により積極的に放熱を行う。小型化が進む電子部品の熱管理では従来の方法を用いることが困難な場合があるため、材料表面科学の観点から、発生する熱を効率よく取り除く新しい表面技術の研究を進めている。

#### 2. 周期構造を利用した表面設計

特異な配列の細孔を表面に持つ珪藻殻において、電磁波の反射に影響を及ぼすことが報告されている<sup>(1)</sup>。一方、周期構造を作ることで、これまでにない機能を発現するメタマテリアルを用いた伝熱制御が報告されている<sup>(2)</sup>。これらのことから、空気層を利用したメタサーフェスを構築することで、放熱特性の向上を目指している。図 1 に石英ガラス表面に構築した凸型円柱の周期構造のレーザー顕微鏡写真と、円柱の高さと熱拡散率の関係を示す。石英ガラスの熱拡散率は  $9.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  であるが、 $2 \text{ }\mu\text{m}$  までの高さを持つ周期構造を表面に構築することで熱拡散率は増加し、約  $3 \text{ }\mu\text{m}$  の高さになると低下する傾向を示した。表面積の増加効果を検証するため、紙やすりで表面を研磨した石英ガラスの熱拡散率を測定した結果、 $8.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  であった。また、ポリジメチルシロキサンへ形状を転写することで作製した凹型円柱構造を構築した表面においても、熱拡散率が変化する事を明らかにしたことから、周期構造が熱拡散率の向上に有効であることが示唆される。

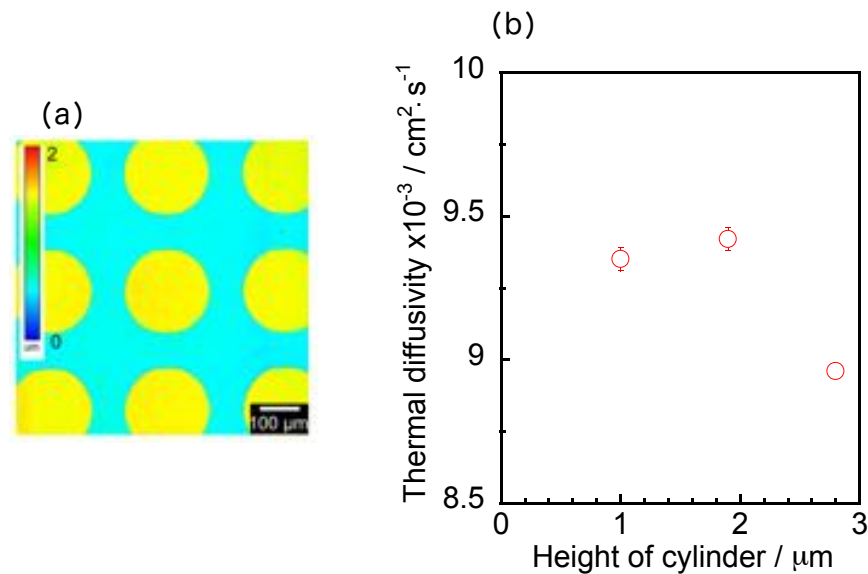


Fig.1 (a) Micrograph of quartz glass patterned with a square arrangement of cylinders and (b) Relationship between thermal diffusivities of the glass and heights of the cylinders.

表面に周期構造を構築した石英ガラスと未処理の石英ガラスをパソコン中のグラフィックボードのヒートシンクに取り付け、作動時におけるサンプル表面の温度変化を測定した結果を図 2 に示す。温度上昇速度が小さいほうが高い伝熱特性を示すため、表面への周期構造の導入は実環境において有用な設計となる。

#### 参考文献

- (1) Li H.; Jiang B.; Yang X.; Eastman M.; Liu Y.; Wang L.; Campbell J.; Lampert L.; Wang R. K.; Rorrer G. L.; Jiao J. *ACS Photonics* **2014**, *1*, 477-482.
- (2) Dede E. M.; Nomura T.; Schmalenberg P.; Lee J. S. *App. Phys. Lett.* **2013**, *103*, 063501.

#### 謝辞

B01-3 班の皆さま、(株)LIXIL 井須様のご協力により本研究を実施いたしました。厚く御礼申し上げます。

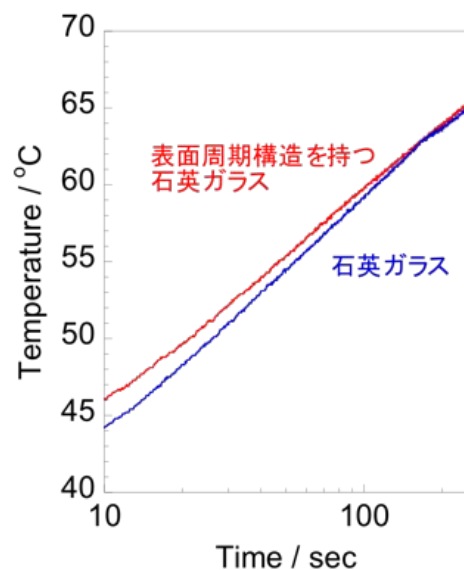


Fig.2 Temperature changes of samples mounted on a graphic board of a personal computer.

所属班：B01-4班

所属機関：東京大学 先端科学技術研究センター

氏名：光野 秀文

所属機関住所：〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

e-mail：mitsuno@brain.imi.i.u-tokyo.ac.jp

研究キーワード：ガ類、フェロモンブレンド、性フェロモン受容体、  
嗅覚受容細胞



## ガ類フェロモンブレンドの受容機構の解明

### Elucidation of detection mechanism of pheromone blend in moth

#### 1. はじめに

ガ類のオスは、メスが放出する種特異的な性フェロモンを検出し、同種のメス個体を識別する。これまでさまざまな昆虫種から性フェロモンが同定され、その大半は 2 種類以上の成分が異なる比率で混ざったフェロモンブレンドであることが報告されている<sup>(1)</sup>。オス個体は、フェロモンブレンドの構成成分を検出するとともに、それらの構成比率を検出することで、同種のメス個体を識別している。近年、フェロモンブレンドの各構成成分を検出する受容体が同定されてきた<sup>(2-3)</sup>。しかし、これら受容体によってどのようにフェロモンブレンドの構成比率が検出されるのかは明らかにされていない。そこで、本研究では、フェロモンブレンドを利用するさまざまなガ類から性フェロモン受容体を同定し、受容体によるフェロモンブレンドの受容機構を解明することを目的とする。これにより、複数成分から成るガス検知の新たな手法の提案につなげたい。

#### 2. 2 成分系ガ類のフェロモンブレンド検出機構

2 成分系のフェロモンブレンドを利用するガ類であるヒメアトスカシバ (*Nokona pernix*) (EZ 体：ZZ 体=9：1) から、各成分に特異的に応答する受容体 (NpOR1 (EZ 体受容体)、NpOR3 (ZZ 体受容体)) を同定した。触角における各受容体の発現様式の調査の結果、主成分に応答する NpOR1 を発現する嗅覚受容細胞 (ORN) の割合は NpOR3 を発現する ORN よりも多く、各成分を受容する ORN の比率は性フェロモン成分の構成比率と類似した傾向を示した。また、他のガ類における ORN の比率<sup>(3)</sup>と比較したところ、性フェロモン受容体を発現する ORN の比率はフェロモンブレンドの構成比率と相関することが分かった。このことから、ガ類では、オス触角で性フェロモン受容体を発現する ORN の比率を調整することで、性フェロモン成分の構成比率を検出している可能性が示唆された。



現在、2成分系フェロモンブレンドの検出機構の一般化を目指し、2成分系を利用する2種類のカガ類（ベニスズメ（*Deilephila elpenor*）、サザナミスズメ（*Dolbina tancrei*）を対象に、性フェロモン受容体の機能同定を進めている。各カガ類から複数種類の嗅覚受容体候補遺伝子を単離し、これら遺伝子が性フェロモン受容体ファミリーに属することが分かった。現在、これら受容体の機能同定を進めており、研究期間内に触角における発現様式を調査することで、2成分系フェロモンブレンドの検出機能の一般化を行う。

### 3. 4成分系カガ類のフェロモンブレンド検出機構

4成分系のフェロモンブレンドを利用するキマエホソバ（*Eilema japonica*）を対象に、雌雄触角を用いてRNAseqによる網羅的な遺伝子発現解析を実施し、オス触角に優勢的に発現する4種類の性フェロモン受容体候補遺伝子を単離した。各遺伝子の発現量を推定した結果、各性フェロモン受容体候補遺伝子は、オス触角でそれぞれ異なる割合で発現していることが分かった（Fig.1）。現在、これら受容体候補の各性フェロモン成分に対する応答の取得を実施している。これにより、4成分系のフェロモンブレンドの受容機構の解明につなげたい。

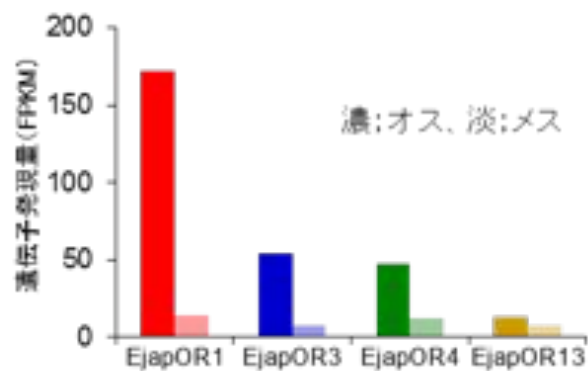


Fig. 1 Expression levels of sex pheromone receptor candidates in antennae of a lichen moth, *Eilema japonica*.

### 参考文献

- (1) Byer, J.A. J. Anim. Ecol. 2006, 75, 399-407.
- (2) Sakurai, T.; Nakagawa, T.; Mitsuno, H. et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2004, 101, 16653-16658.
- (3) Mitsuno, H.; Sakurai, T. et al. Eur. J. Neurosci. 2008, 28, 893-902.

### 謝辞

本研究で用いたカガ類は鳥取大学農学部中秀司准教授よりご提供いただきました。心より感謝いたします。

所属班：B01-4班

所属機関：神戸大学大学院 理学研究科

氏名：北條 賢

所属機関住所：〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

e-mail：m.k.hojo@people.kobe-u.ac.jp

研究キーワード：バイオセンサ・匂い混合物・SBF-SEM



## クロオオアリ体表炭化水素センサの機能特性

### Functional Characteristics of Cuticular Hydrocarbon Sensor in a Carpenter Ant, *Camponotus japonicus*

#### 1. はじめに

昆虫は匂い(フェロモン)を介したコミュニケーション能力が発達しており、高感度かつ高精度な匂いセンサを備えることから<sup>(1)</sup>、匂いバイオセンサへの応用が期待されている。中でも社会生活を営むアリは体表面の複雑な匂い混合物(体表炭化水素)のわずかな差異を識別することで、仲間以外の個体を攻撃的に排除する(Fig.1)<sup>(2)</sup>。匂い混合物の差分検出には触角上に存在するメスト異的な感覚子が関与していることが報告されている<sup>(3-5)</sup>。この体表炭化水素センサの機能特性と差分検出の作動原理を抽出することで、匂い混合物識別センサの設計に向けた、汎用性のある概念を提供できると考えられる。

#### 2. 方法・結果

クロオオアリのゲノム・トランスクリプトーム解析から、嗅覚受容体(OR) 396 遺伝子を同定し、メス(働きアリ)に多く発現する 110 の Or 遺伝子群を見出した(Fig.2)。さらに、これら OR 遺伝子のリガンドを電気生理学的に探索したところ、クロオオアリの体表炭化水素に対して強い応答を示した。次に、連続ブロック表面走査型電子顕微鏡 (SBF-SEM) を用いて、当該センサの内部微細構造の 3D モデルを構築した (Fig.3)。センサ内部には 100 本以上の受容神経から伸びる感覚突起が束になって格納されており、隣り合う突起が瘤状の構造部分で互いに接しているように見えた。また、クロオオアリ触角からはイネキシシンが検出され、神経細胞間での電氣的なカップリングの存在が示唆された。



Fig.1 Aggressive behavior between *C. japonicus* workers.

### 3. まとめと展望

働きアリに多く発現する OR 遺伝子は炭化水素に特異的に応答する受容体であった。また、センサ内の受容神経細胞間では電気的な相互作用が存在し、炭化水素の受容に伴って発生する電流が近隣の受容神経へと分配されることが考えられた。今後は炭化水素受容体のリガンド特性を明らかにするとともに、電流の分配を仮定した神経応答の数理モデルを作成し、匂い混合物の識別に関する一般的なスキームの構築を目指す。

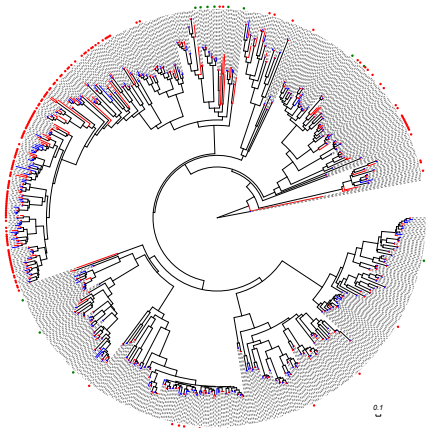


Fig.2 Expression profiles of *Camponotus* ant ORs along with their phylogeny. Red and green color points indicate higher expression level in workers and males respectively.

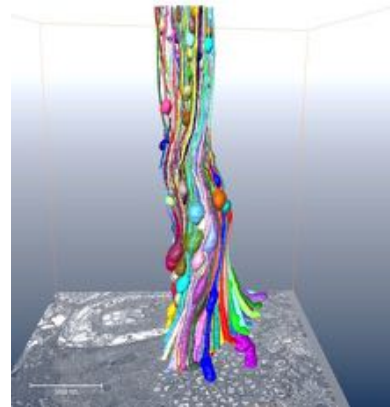


Fig.3 3D reconstructed sensory neurons in a cuticular hydrocarbon sensor.

### 参考文献

- (1) Wyatt, T. D. *Pheromones and Animal Behavior: Chemical Signals and Signatures*; Cambridge University Press; Cambridge, 2014.
- (2) van Zweden, J. S.; d’Ettorre, P., In *Insect Hydrocarbons*; Blomquist, G. J.; Bagnères A. G. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 2010, pp 222–243.
- (3) Ozaki, M.; Wada-Katsumata, A.; Fujikawa, K.; Iwasaki, M.; Yokohari, F.; Satoji, Y.; Nisimura, T.; Yamaoka, R. *Science* **2005**, *309*, 311–334.
- (4) Sharma, K. R.; Enzmann, B. L.; Schmidt, Y.; Moore, D.; Jones, G. R.; Parker, J.; Berger, S. L.; Reinberg, D.; Zwiebel, L. J.; Breit, B.; *et al.* *Cell Rep.* **2015**, *12*, 1261–1271.
- (5) Nakanishi, A.; Nishino, H.; Watanabe, H.; Yokohari, F.; Nishikawa, M. *Cell Tissue Res.* **2009**, *338*, 79–97.

### 謝辞

次世代シーケンサを用いた解析においてご協力をいただきました基礎生物学研究所の重信秀治先生、SBF-SEMを用いたセンサ構造の観察・3D立体構築においてご協力をいただきました生理学研究所の村田和義先生に、この場を借りて御礼申し上げます。

所属班：B01-4班

所属機関：京都大学農学研究科応用生命科学専攻

氏名：森 直樹

所属機関住所：〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

e-mail：mokurin@kais.kyoto-u.ac.jp

研究キーワード：化学受容，聴覚センサ，



## 生物規範環境応答・制御システム

### Functional analysis of subcellular structures in Insects and Plants

#### 1. 昆虫-植物相互作用

きのこ栽培用の原木の害虫であるカミキリムシにおいて，特定周波数の振動に対する行動反応の閾値を得た．また，超磁歪素子を用いた振動発生装置の試作機を用いて室内評価試験をおこなったところ，本種は振動によって歩行の停止等の行動反応をひき起こした．現在，振動による行動制御効果の野外実証試験をおこなっているところである．

果樹の害虫であるチャバネアオカメムシの肢に内在する弦音器官2種，腿節内弦音器官ならびに膝下器官を特定した．両者とも少数の感覚細胞からなり，構造から振動受容性の特徴を持つ．これらの弦音器官は，他種のカメムシやセミにも存在した<sup>(1)</sup>．

#### 2. 微生物-植物相互作用

微生物由来の多糖は，植物防御応答を誘導する．その一方で，植物に生育促進作用をもたらすという報告もある．我々は， $\beta$ -1,3/1,6-glucan を含むビール酵母の細胞壁成分（以下 CW1）をイネ（*Oryza sativa*）に処理すると，根張りが向上することを見出し，そのメカニズム解明を試みた．

第四葉展開イネ（日本晴）の根を，CW1 含有水耕液に浸した．1 週間後，

CW1 処理区は対照区に対して根張りが向上し、根の乾燥重量は有意に増加していた。また、CW1 処理区では、側根数も増加していた。

植物ホルモン応答性遺伝子の発現量の経時的变化を CW1 処理区-対照区間で比較した。その結果、地上部では、処理後 7 日目で IAA 応答性遺伝子 (*OsIAA 1*) とエチレン応答性遺伝子 (*OsERF 1*) の発現量が増加した。根では、処理後 7 日目で IAA 応答性遺伝子の発現量が増加し、5 日目からサイトカイニン応答性遺伝子 (*OsRR 6*) の発現量は低下した。このことから、CW1 処理は IAA・サイトカイニン・エチレンの挙動に影響を及ぼすと考えられた。次に、側根形成に関与する遺伝子 (*OsIAA 11*, *OsIAA 13*) の発現解析を行った。これらの発現量は、処理後 5 日目から増加していた。

## 参考文献

- (1)Nishino H, Mukai H, Takanashi T. Chordotonal organs in hemipteran insects: unique peripheral structures but conserved central organization revealed by comparative neuroanatomy. Cell Tiss Res. in press



所属班：B01-4班

所属機関：国立研究開発法人 農業食品産業技術総合研究機構

氏名：奥田 隆

所属機関住所：〒305-8634 茨城県つくば市大わし1-2

e-mail：oku@affrc.go.jp

研究キーワード：極限環境、乾燥耐性、培養細胞、  
常温保存、ガラス化

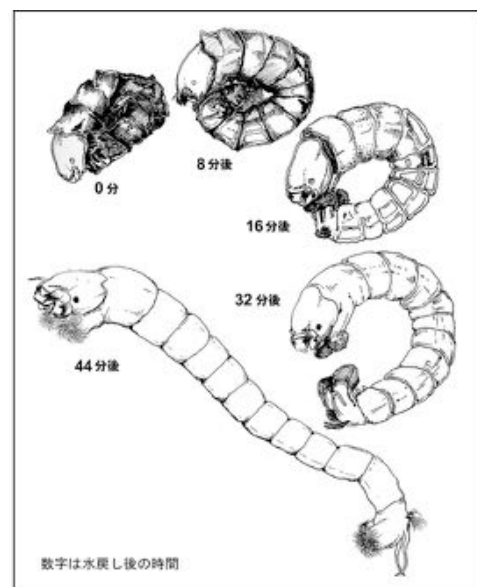


## 培養細胞の常温保存への挑戦

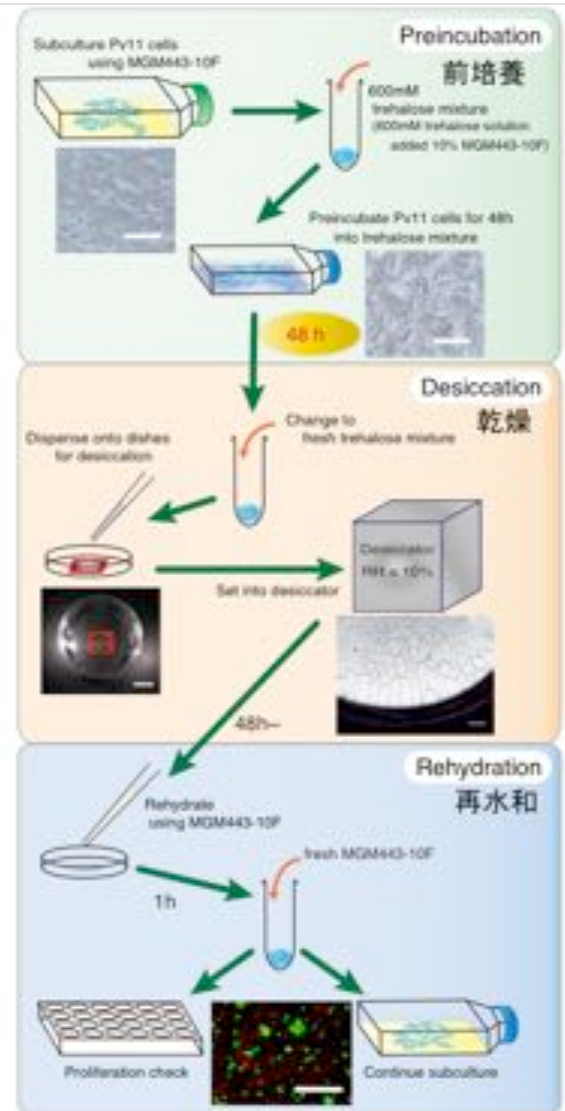
：ネムリユスリカの乾燥耐性機構から学ぶ

### Dry-preservation of cell lines inspired by a desiccation tolerant Sleeping Chironomid, *Polypedilum vanderplanki*

1950年代後半の家庭用電気冷蔵庫の普及によって、生鮮食品の大量長距離輸送が可能となり、それまでの地産地消の食生活が大きく様変わり(多様化)した。研究分野においても、冷蔵・冷凍技術の普及は細胞や組織の長期保存が可能となり、生命科学の飛躍的な発展に貢献した。一方で、この保存技術は電気の消費および冷媒による環境負荷の増大をもたらしている。近年、維持費のかからないフリーズドライによる常温保存技術が注目されているが、この手法には、高度な技術や特殊な装置が必要であることや、すべての細胞には応用が困難であること等の制約がある<sup>(1)</sup>。本課題は極限的な乾燥耐性のある生物の適応様式を模倣しての「簡便な自然乾燥法による培養細胞の常温保存法」の確立を目指す。ほとんどの生物およびその細胞は50%以上の脱水で致死するが、*Artemia* やクマムシ、本課題の実験材料であるネムリユスリカ幼虫(右図)などは、生体水をほぼ完全に失っても致死することなく、再水和後に蘇生する。脱水に伴い水の代替分子であるトレハロースという糖やLEAタンパク質等を大量に合成し、それらが生体成分を保護しながら最終的にはガラス化し、自らをカプセルに封入するような形で無代謝の乾燥休眠に入る<sup>(2)</sup>。これまでにトレハロースやLEAタン



パク質を用いた培養細胞（特にほ乳類由来培養細胞）の常温保存技術の開発が世界中で試みられているものの成功には至っていない。本課題では、まずネムリユスリカ幼虫同様優れた乾燥耐性能力を有するネムリユスリカ由来培養細胞（Pv11）を用いて、その常温保存技術法の確立を行なった。Pv11 は高濃度のトレハロース溶液（600mM）で 48 時間の前処理の後、ゆっくり乾燥することで、増殖可能な状態での 251 日の常温乾燥保存に成功した<sup>(4)</sup>（右図）。しかしながら、現時点では、この簡便な常温保存技術は他の昆虫由来培養細胞への適用はできない。乾燥および再水和に伴い大きな酸化ストレスが発生し DNA 損傷を誘導することが判明した。そこで、ある程度 DNA 損傷が生じても修復し、致死しない昆虫培養細胞(Sf9)にネムリユスリカ由来の乾燥耐性関連遺伝子（例：トレハロース輸送体遺伝子）を導入し、乾燥耐性付与を試みたが成功に至っていない。トレハロースは昆虫の血糖であるが培地中の高濃度トレハロースには Sf9 が耐性を持たないことが、原因の一つであることが示唆された。そこで、高濃度トレハロースを含む培地でも高い生存率を示す昆虫由来培養細胞の構築（探索）を行なったところ、高い塩耐性を持つ鱗翅目昆虫由来の培養細胞が得られた。現在この培養細胞の性状解析および乾燥耐性の付与実験を進めているので報告する。



参考文献：

- (1) Loi P. et al. *TRENDS Biotech.* **2013** 31:688-695
- (2) Sakurai M. et al. *PNAS.* **2008** 105:5093 -50987
- (3) Gusev. O. et al. *Nat. Commun.* **2014** 5:4784 doi: 10.1038/ncomms5784
- (4) Watanabe K. et al. *Cryobiology.* **2016** (in press)

所属班：B01-5班

所属機関：千葉大学工学研究科

氏名：劉浩

所属機関住所：〒263-8522千葉市稲毛区弥生町1-33

e-mail：hliu@faculty.chiba-u.jp

研究キーワード：生物規範飛行システム，昆虫飛行の制御，乱流，  
バイオメカニクス，バイオミメティクス



## 生物規範メカニクス・システムの学理解明へ

### Towards uncovering the principal mechanisms in bioinspired mechanical systems

B01-5 班では，ミクروسケールの細胞からマクروسケールの生物個体にわたる幅広いスケールに共通する生物の「動き」—生物規範メカニクス・システムにおける流動性と波動性に関わる新しいスケーリング法則を適用することにより、普遍的な生物運動原理として「生物マルチスケール・メカニクス」という新しい学理の創出を目指している。

生物運動へのマクロ的なメカニカル法則の創出は、生物運動メカニズムの本質や生物進化過程への理解や解明、さらに生物を規範としたロボティクス、ないし工業製品デザインへの設計指針のイノベーションにとって大きな意味を持っている。ことにこれまでの「静的な」生物規範工学から今後の「動的な」生物規範工学へ展開するためにも欠かせないものである。例えば、従来の学理（航空力学等）では説明できない生物規範飛行の学理に関しては、生物個体のサイズとレイノルズ数により、ある程度‘定性的かつ定常的に’整理されたが、エネルギー変換を考慮した流動性と波動性に基づいたスケーリング法則による‘定量的かつ非定常的に’理路整然たる学理がまだ確立されていない。

本グループ最近の研究により、生物規範メカニクス・システムにおけるロバストネス（robustness）と最適化（optimization）という二つ重要な生物運動の原理を明らかにしてきた。「生物羽ばたき翼の運動・形態・変形（動き）のロバストネス」について、（1）昆虫や鳥の翼羽ばたき運動（能動的な動き）は、「翼振動速度と前進速度」の比がある狭い範囲に入り、羽ばたき翼

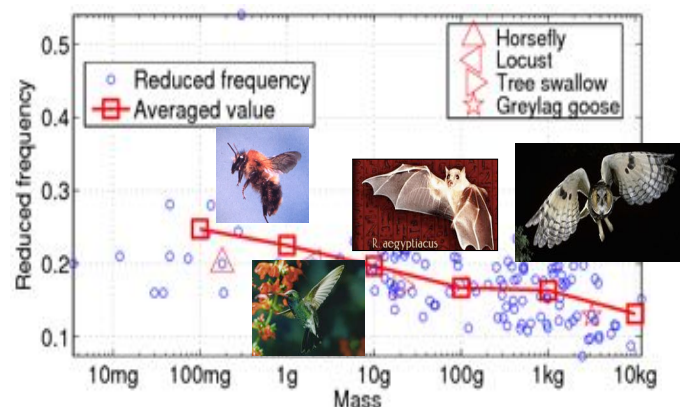


図1 羽ばたき翼運動のロバストネス：無次元周波数 vs 質量



運動のロバストネス（図1）を実現する；（2）4枚翅昆虫の翼形態（前翅・後翅）は、「前翅だけで十分な揚力を発生する」ことが可能であり、翼形態のロバストネスを示す；（3）昆虫翼の羽ばたき運動に起因する翼変形（受動的な動き）は、翼構造と関係なく、その「相対的な捻りや曲げ」が同じ規則に従い、空気力学性能と飛行安定性のロバストネスを向上している；（4）昆虫柔軟翼や胴体の受動的な「動き」が羽ばたき飛行の空気力学性能を向上し飛行制御のロバストネスをもたらすとのことなどが分かってきた。一方、生物運動の最適化のスケーリング法則に関して、魚類（zebra larva fish）遊泳を例に、実験と大規模な力学シミュレーションを遂行し、生物遊泳の運動や力学特性及びエネルギー交換などを統合的に解析した。さらに遊泳の波打ち運動（undulation）を横波、自由遊泳時の前進運動（forward swimming）を縦波とそれぞれ定義し、横波運動エネルギーから縦波運動エネルギーへの変換率に対して波動エネルギー数（wave energy number）を導入した。これら解析と考察の結果により、生物遊泳は、（1）従来の流体力学スケーリング法則で説明できない（図2）；2）最大機械効率(Max. mechanical efficiency)ではなく、如何に効率よく横波運動エネルギーから縦波運動エネルギーへ変換すること、すなわち最小移動コスト（Min. cost of transport）を選択している（図3）ことを明らかにした。今後は、この「最小コスト」メカニズムの生物飛行や細胞運動への適用を試み、学理「生物マルチスケール・メカニクス」の確立を目指す。

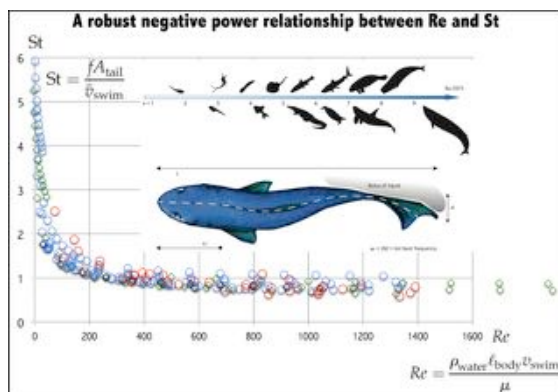


図2:従来の流体力学スケーリング法則: Re vs St

RESULTS – adjust body kinematics to optimize swimming performance

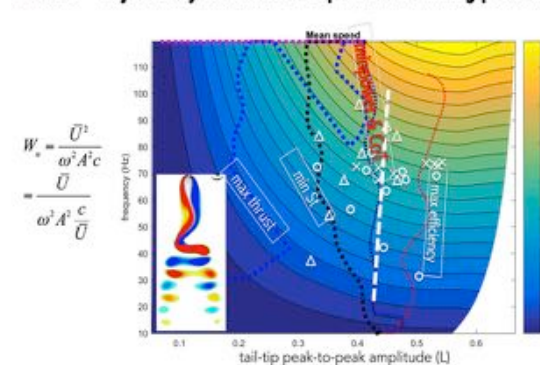


図3:生物遊泳の諸運動、力学及び効率の比較

#### 参考文献：

- 1) H. Liu, S. Ravi, D. Kolomensky, H. Tanaka. Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2016. (in press)
- 2) M. Gazzola, M. Argentina, L. Mahadevan. Scaling macroscopic aquatic locomotion. *Nature Physics*, **10**, pp785-861, 2014.
- 3) G. Li, U. Muller, H. Liu, J. Leeuwen. How tail-beat frequency and body curvature affect swimming performance in larval zebrafish, *Proceedings of SEB' Annual Meeting*, Brighton UK, 4-7 July 2016.

所属班：B01-5班

所属機関：九州大学先端物質化学研究所

氏名：江端 宏之、木戸秋 悟

所属機関住所：〒819-0395 CE41-204 元岡西区福岡市

e-mail：kidoaki@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

研究キーワード：間葉系幹細胞、人工幹細胞ニッセ、  
培養力学場



## 周期的力学場による細胞メカノシグナル入力のゆらぎ特性解析

### Characterization of fluctuations of mechano-signal input for cells cultured on the micro-elastically patterned hydrogels

間葉系幹細胞(mesenchymal stem cell; MSC)は再生医療の臨床応用に最も近い細胞医薬品資源として注目される幹細胞の一つである一方、培養中における細胞老化や望まぬ系統への偏向を起こしやすいなど品質の維持が難しく、品質を管理し保証する培養技術の確立が強く求められている。培養中のこのような MSC の品質変化は、MSC が培養環境に鋭敏に応答しその環境履歴を細胞内活動に記録し蓄積する特性を有することに起因しており、特に環境の機械力学特性の影響の大きいことが近年報告され、その品質保持培養には培養力学場を最適設計することの重要性が示唆されている[1, 2]。この課題に関連し我々はこれまでに MSC の幹細胞性保持の培養力学場設計原理追求の端緒として、幹細胞の分化フラストレーション現象を独自に見出している[3]。すなわち、硬・軟領域の周期的弾性場で間葉系幹細胞を培養すると、培養中の硬・軟領域間の非定住運動の過程で硬・軟領域それぞれにおいて対応する系統へと分化誘導される効果が抑制され、その未分化性が維持される現象である。本研究では MSC の分化フラストレーション誘導の主動因と考えられる非一様弾性場からのメカノシグナルの振動的入力プロファイルの検証のため、MSC 運動の牽引力顕微解析を行った。

スチレン化ゼラチン 30%ゾルに対して PC 描画像縮小投影光リソグラフィーを使用し光照射することで STG 弾性パターンニングゲルを作製した。このゲル上に  $1.5 \times 10^3 \text{ cell/cm}^2$  で human Bone Marrow Mesenchymal Stem Cell (Lonza, OF3853)または NIH-3T3 fibroblast を播種し、ゲル表面上に配置させた蛍光ビーズ画像をタイムラプス観察した。実験後細胞を 0.3%TWEEN/L15 溶液にて剥離・除去し、細胞がない状態での蛍光ビーズ画像を撮影した。細胞がない状態という状態の間での蛍光ビーズの変位を PIV(FlowNizer2D, ディテクト社)にて測定し、ゲルの変位を求めた。また、ゲル表面に力が加わったときのゲルの応答を有限要素法により数値的に求め、細胞がゲル表面に加えている牽引力の分



布を推定した。

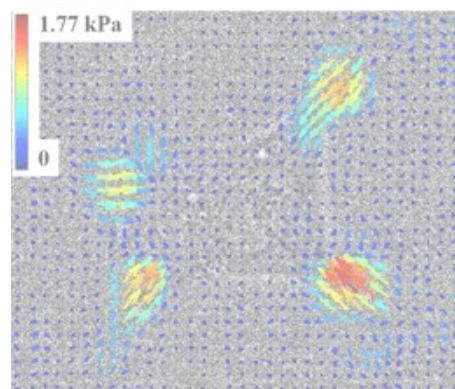
Figure 1 に弾性パターンングゲル上で非定住運動をする細胞の牽引力の推定結果の一例を示す。MSC, 3T3 cell 共に細胞の辺縁部もしくは仮足部分で強くゲルを牽引していることが分かった。次に、大きな牽引力が働いている領域のみ着目し、各時間における平均的牽引力と牽引力が働く場所の平均的基材硬さを求めた。Figure 2 に平均的牽引力と平均的基材硬さの時間変化を示す。これより MSC, 3T3 共に基材硬さと牽引力の間には強い正の相関があり、基材が硬くなるほど牽引力が大きくなっていることが分かる。Figure 3 に均一弾性ゲルと弾性パターンングゲルでの牽引力の平均値周りの時間的なゆらぎの大きさを示す。これより均一弾性ゲルでは 10% 前後牽引力が揺らいでいるのに対

し、弾性パターンングゲルでは 20% 前後揺らいでいることが分かる。このことから、弾性パターンングゲルのほうが牽引力の時間変化が大きいことが分

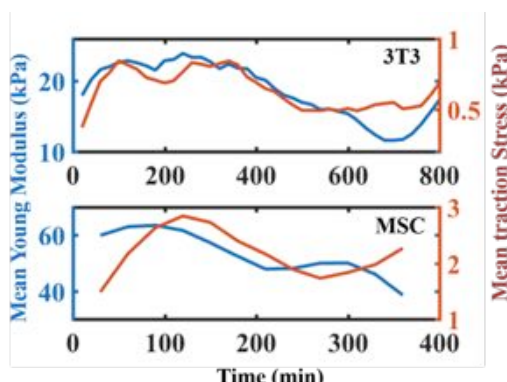
かった。以上の結果から、MSC が弾性パターンングゲル上を非定住運動することで、牽引力、つまりメカノシグナルが大きく振動していることが確認された。

#### 参考文献

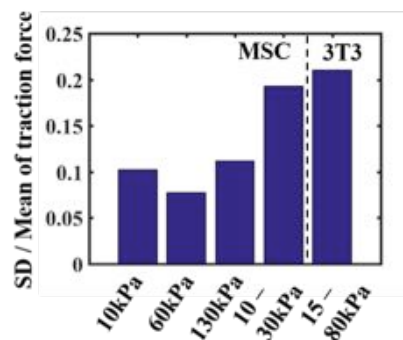
- [1] A. J. Engler, S. Sen, H. L. Sweeney, and D. E. Discher, *Cell* **126**, 677 – 689 (2006)
- [2] C. Yang, M. W. Tibbitt, L. Basta, and K. S. Anseth, *Nat Mater.* **13**, 645 – 652 (2014)
- [3] S. Kidoaki, S. Jinnouchi, *Biophys. J.* **102**, Suppl.1, p716a (2012).



**Figure 1.** Estimated traction stress of a NIH-3T3 cell on micro-elastically patterned hydrogels. Vectors indicate the direction of the forces.



**Figure 2.** Time series of mean young modulus (blue) and mean traction stress (orange). Up: NIH-3T3 cell. Down: MSC.



**Figure 3.** Standard deviation divided by mean value of traction force. 10kPa, 60kPa, 130kPa represent Young modulus of uniform hydrogels. 10 – 30kPa and 15 – 80kPa represents maximum and minimum Young modulus of patterned hydrogels.

所属班：B01-5班

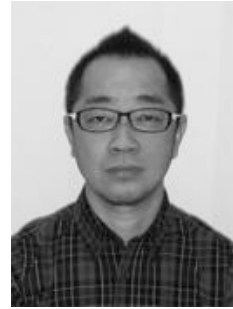
所属機関：名古屋大学 大学院医学系研究科 統合生理学

氏名：小林 剛

所属機関住所：〒466-8550 名古屋市昭和区鶴舞町65

e-mail：takeshik@med.nagoya-u.ac.jp

研究キーワード：細胞力覚、基質硬度感知、  
重力感知、宇宙実験



## 細胞メカニクス・システム：

### 細胞の基質硬度と重力の感知機構

## Rigidity and Gravity Sensing of Cultured Cells

### 1. 生物規範細胞ミクロメカニクス・システム研究

本研究では、細胞運動・機能の制御を可能にするメカノバイオマテリアル設計を目的に、細胞の力学的環境の感知機構の解明を目指している。これまでに、細胞の基質（足場）の硬さ感知においては、細胞が細胞骨格（ストレス線維）を収縮させて周囲を引っ張り、基質の力学的性質に応じた反力を感知している可能性を示してきた。また、その感知過程において、細胞が接着斑近傍の機械刺激受容（MS）チャネルによる  $\text{Ca}^{2+}$  流入を利用していることを示し、その MS チャネルの同定を進めてきた。さらに、最近、細胞の微小重力環境の感知にも細胞骨格の張力が関与していることを見出した。

### 2. 細胞の微小重力環境感知機構

筋芽細胞、骨芽細胞といった細胞自身が微小重力環境を感知する能力を持つことが、最近の宇宙実験から示されている。しかし、その分子機構の多くは不明である。核やミトコンドリアのような比重・重量が大きいオルガネラに対する重力作用の消失が出発点であると考えられているが、その出発点を細胞がどのように感知して応答反応に結びつけているか不明である。我々は、細胞の機械刺激感知機構に関する研究を進める中で、細胞の微小重力環境に対する応答が、軟らかい基質足場に対する細胞応答に似ていることに気付き、両者には共通の力覚機構が働いていると予想している。細胞が基質の硬さを感知する際は、ストレス線維を収縮させ基質を牽引し、基質の硬さに応じて生じるストレス（張力）を MS チャネルなどにより細胞内化学シグナルに変換していると考えられる。実際、核やミトコンドリアはストレス線維と機械的に相互作用しており、微小重力環境下で核やミトコンドリアに対する重力作用が無くなると、連結するストレス線維の張力も低下し、軟らかい基質上と類似の応答を誘導する可能性がある（Fig. 1）。

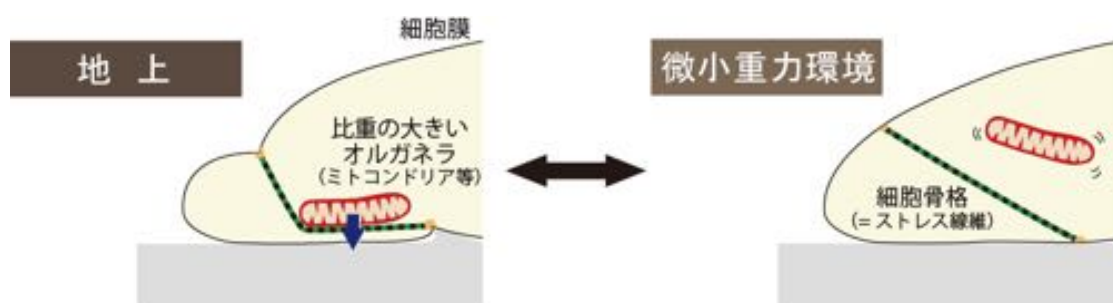


Fig. 1. Molecular model of gravity sensing. Organelles such as nuclei and mitochondria, which are heavy and have a high specific gravity, are attached to cytoskeletons. In microgravity conditions, heavy organelles float upwards, and the weight of them disappears from the cytoskeletons.

今回、上記仮説を検証するために、国際宇宙ステーションの「きぼう」において間葉系幹細胞を培養し、その骨分化を解析した。地上では間葉系幹細胞の骨分化は基質の硬軟に依存し、硬い基質上と比較して、軟らかい基質（ヤング率 ～ 10 kPa）上では間葉系幹細胞の骨分化は抑制される。しかし、「きぼう」内の微小重力環境では、骨分化はの基質の硬さ依存性は失われていた（Fig. 2）。また、基質の硬さに依存する細胞内シグナル活性（YAP/TAZ 活性）も微小重力環境下においた間葉系幹細胞において低下していた（Fig. 3）。これらの結果は、細胞がストレス線維の張力変化として重力変化を感知している可能性を示した。

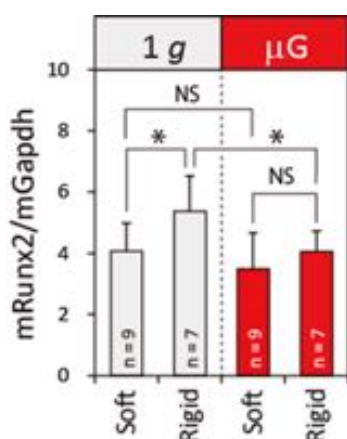


Fig. 2. Loss of rigidity-dependent responses of mesenchymal stem cells in microgravity.

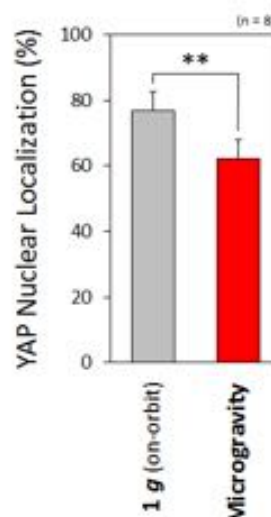


Fig. 3. Reduced YAP activity of mesenchymal stem cells in microgravity.

## 参考文献

- (1) Kobayashi, T.; Sokabe, M. *Curr. Opin. Cell Biol.* **2010**, *22*, 669-676.
- (2) <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/cellmechanosensing/>

所属班：B01-5班  
 所属機関：東京大学先端科学技術研究センター  
 氏名：安藤 規泰  
 所属機関住所：〒153-8904東京都目黒区駒場4-6-1  
 e-mail：ando@brain.imi.i.u-tokyo.ac.jp  
 研究キーワード：飛行，羽ばたき，間接筋，同期筋，スズメガ



## 昆虫の羽ばたき飛行における外骨格構造の機能

### Functional structure of the insect thoracic exskeleton for flapping flight

#### 1. はじめに

昆虫の飛行は極めて多様である。特に羽ばたきのメカニズムは昆虫目によって異なり，①構造，②機能，③制御の点から分類される。まず，①構造には，翅の基部に直接付着して翅を動かす直接筋(direct muscle)と，胸部外骨格に付着して外骨格の変形を介して翅を動かす間接筋(indirect muscle)とに分類される。直接筋は神経系による操縦性が良好である一方，間接筋は外骨格のばねの性質を利用できるという利点がある。次に②飛翔筋の機能は，翅の上下運動を生み出すパワー筋(power muscle)と，翅のひねりなどを操作して方向制御を行うステアリング筋(steering muscle)がある。さらに，③飛翔筋の収縮制御では，運動神経の指令と収縮が同期する同期筋(synchronous muscle)と，同期しない非同期筋(asynchronous muscle)がある。非同期筋は，機械的な引っ張りが収縮をトリガする筋であり，間接筋として外骨格の振動を利用することで，より高い羽ばたき周波数を生み出す。代表的な昆虫の羽ばたきメカニズムについて表1に示す。羽ばたきメカニズムの違いがそれぞれの昆虫の運動能力を特徴づけており，この多様なメカニズムの理解が，目的に合った羽ばたき機のデザインにつながる事が期待される。

Table 1 Variety of insect flight muscles

| 昆虫名    |  |  |  |  |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 筋の役割   | トンボ                                                                                 | バッタ                                                                                 | チョウ・ガ                                                                                | ハエ・ハチ・コウチュウ                                                                           |
| パワー    | 直接・同期                                                                               | 直接・同期<br>間接・同期                                                                      | 間接・同期                                                                                | 間接・非同期                                                                                |
| ステアリング | 直接・同期                                                                               | 直接・同期                                                                               | 直接・同期                                                                                | 直接・同期                                                                                 |



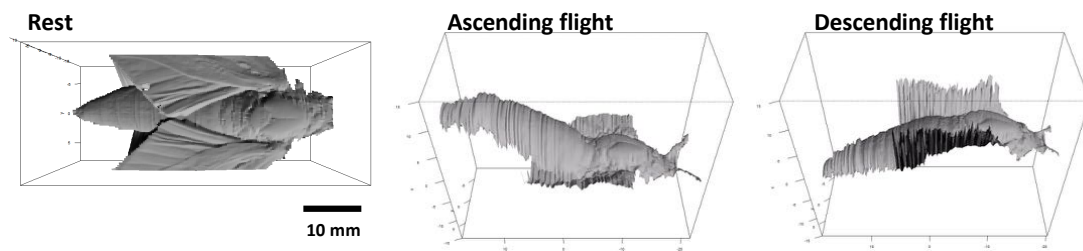


Fig. 1 Body deformation during tethered flight of the hawkmoth.

## 2. 進捗状況

トンボ目とハエ目を羽ばたきメカニズムの多様性の両極端と見なすと、チョウ目は双方の特徴を備えた極めて中間的な位置にあることが分かる。神経系による能動的な作用と骨格系の受動的な特性がどのように相互作用するかは、生物運動のしくみを理解する上で重要な点であり、我々のモデル昆虫であるチョウ目のスズメガは、その格好の研究対象である。我々は、昆虫の羽ばたき飛行を担う神経・筋・骨格系のモデルを構築することで、メカニズムの理解を目指してきた。これまでに、筋電位、外骨格の変形、および羽ばたき運動を高速に同時計測する実験系を構築し、左右の翅をつなぐ胸部外骨格の中胸背板の変形を面で計測することに成功するとともに、左右の間接筋の活動が左右独立に外骨格を伝播し羽ばたき運動を調節することを示した<sup>(1)</sup> (Fig. 1)。現在は、計測手法の改良を進めるとともに、X線CT画像から再構築した中胸背板の構造モデルを構築し、有限要素法解析により実測結果の再現を行っている。また、同時に進めている間接筋を支配する個々の運動神経の活動の解析結果を統合し、神経系の活動による筋収縮の制御・外骨格の変形・そして羽ばたき運動の統合的な理解を目指している。

飛行中は翅だけでなく全身が能動的・受動的に振動している。そして、この振動周期は、感覚の時間分解能と密接に関わっている。例えば、ハエの平均棍（後翅が退化したもの）やスズメガの触角は、羽ばたきと同期して振動し、基部のひずみ受容器が体の回転に伴うコリオリ力を検出する<sup>(2,3)</sup>。また、嗅覚受容においても羽ばたきとの関連が報告されている<sup>(4)</sup>。羽ばたき運動に限らず、感覚と運動の周期に着目した幅広いスケールの生物の解析により、生物の内部メカニズムを人工物の制御に応用する上で課題となるスケールの違いに対する指針が得られることが期待される。

## 参考文献

- (1) Ando N., Kanzaki R. *Biology letters* **12**, 20150733 (2016).
- (2) Nalbach G. *Journal of Comparative physiology A* **173**, 293-330 (1993).
- (3) Sane S. P., Dieudonne A., Willis M. A., Daniel T. L. *Science* **315**, 863-866 (2007).
- (4) Daly K. C.; Kalwar F.; Hatfield M.; Staudache, Bradley E.; S. P. *Plos One* **8**, e81863 (2013).



所属班：C01班

所属機関：合同会社 地球村研究室

氏名：石田秀輝

所属機関住所：〒891-9222

鹿児島県大島郡知名町徳時910

e-mail：emile.h.ishida@gmail.com

研究キーワード：持続可能な社会、新定常化社会、

ライフスタイル、オントロジー工学、Bio-Triz手法



## 持続可能な社会創成に不可欠な生物規範工学

### Biomimetics, innovative technology field which can contribute for the creation of the sustainable society

#### 1. 求められる新しいテクノロジー価値

縄文時代から 1950 年代初めまで、日本の社会構造はアニミズム型社会であった。それは、圧倒的に強い自然と強固につながった共同体があり、それに個(人)が帰属している社会といえる。しかしながら、1970 年代からの高度経済成長(工業化の時代)に伴い個(人)は、自然や共同体から離脱し肥大化を続けた。お金という物差しが主役になり、離脱化を可能にさせた。離脱した個(人)は肥大化を続け、結果として共同体や自然を侵食し始めた<sup>1)</sup>。それが資本主義社会の2つ限界といわれている、地球環境の劣化と消費欲求の劣化を生み出した<sup>2)</sup>。今求められる社会のかたちは、離脱した個(人)をもう一度自然や共同体につなぎとめることである。それは決して昔に戻るのではなく、新しい定常化社会を創ることである。

テクノロジーの役割は、人を豊かにすることであるが、イギリス産業革命後の近代テクノロジーは、個

(人)の離脱と肥大化に貢献したが、自然や共同体につなぎとめるという

視点ではほとんど貢献できなかった。例えば、エコ・テクノロジーが、総体として地球環境問題に貢献できなかった(エコ・ジレンマ)ことが好例だろう<sup>3)</sup>。

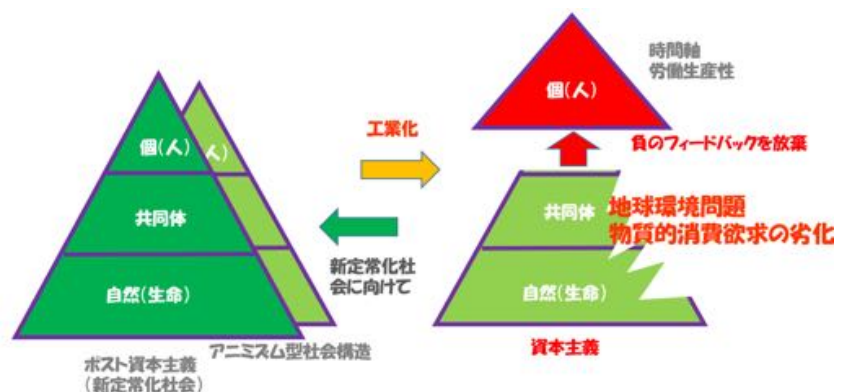


Fig.1 Transformation of the social structure.

今求められるテクノロジーとは、個（人）を共同体や自然につなぎとめることができるテクノロジーでなければならない。

## 2. Biomimetics の新しい役割

自然は、太陽を主なエネルギー源として完璧な循環をもっとも小さなエネルギーで駆動する唯一の持続可能な社会を創っている。近代テクノロジーが持続可能な社会を生み出せないことが明らかになった今、人も自然の循環の中にあることを意識しなければならない新定常化社会では、あらためて自然の持続可能なメカニズムに倣うことが、おそらく最も効率的であろう<sup>3)</sup>。

一方では、個（人）を自然や共同体につなぎとめるには、豊かであるという価値観の再考が必要である。それは、厳しい環境制約の中で心豊かに生きるという「暮らし方のかたち（ライフスタイル）」を明らかにし、それに求められているテクノロジー要素を自然の中に学び、最先端テクノロジーを駆使して具体化するということでもある<sup>4)</sup>。



Fig.2 Biomimetics for the innovative value creation.

## 3. 社会実装に向けて

C-0 班では、バックキャスト手法によって、多くの求められるライフスタイルを描き、それに必要なテクノロジー要素をオントロジー工学を導入して明らかにし、Bio-Triz 手法を使って具現化するという基本概念で研究を進めている。この間、多くの新しい知見が得られ、前掲の概念が新しいテクノロジーを生み出し得ることは明らかになったが、社会実装にはまだ、不足の部分もある。全体会議では、同班の研究者とともに、その部分も明らかにしたい。

## 参考文献

- (1) 石田秀輝, 光り輝く未来が沖永良部島にあった!, ワニブックス 2015
- (2) 広井良典, ポスト資本主義, 岩波書店 2015
- (3) 石田秀輝, 自然に学ぶ粋なテクノロジー, 化学同人 2009
- (4) Emile H. Ishida, Ryuzo Furukawa, Nature Technology, Springer 2013

所属班：C01班

所属機関：東北大学大学院環境科学研究科

氏名：古川 柳蔵

所属機関住所：〒980-0845

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1

e-mail：ryuzo.furukawa.b1@tohoku.ac.jp

研究キーワード：ライフスタイルデザイン、バックキャスティング、  
暮らしの価値、地域、社会実装



## 環境制約下に求められる暮らしの価値とその実装

### Lifestyle value creation in the local city under environmental restriction toward innovation

#### 1. はじめに

厳しい環境制約下において求められるライフスタイル（LS）や価値とはどのようなものか。そして、そのLSを実現するためにテクノロジーに求められる要件は何か。このような問題意識のもと、本研究では、バックキャスティングを用いて描かれる心豊かなLSに含まれる価値と現在の社会における重視される暮らしの価値の比較分析を行った。また、本手法を用いた北上市に新展開する社会実装の取り組みを紹介する。

#### 2. 厳しい環境制約下において求められるLSと価値

豊岡市、北上市、秋田市の職員及び関西地域に本社を持つ企業の社員がバックキャスティング<sup>(1)</sup>により描いた心豊かなLSの比較分析を行った。分析対象は、各地域の人が心豊かだと思ふLSを各10事例とした。LSの構造分析には、評価グリッド法及びKJ法で抽出したLS評価項目（70項目）を用い、各評価項目が含まれているか否かをアンケート調査により定量的に評価した（各LSに対してn=440）。Fig.1は各地域で描かれたLSに含まれる価値と現在重視される価値とのギャップを比較した図である。この結果、これらのLSの中には、現在重視される利便性やプライバシー、流行、贅沢感に関する評価項目は十分含まれてはいないが、人との交流、自然との関係の評価項目は含まれていることが明らかとなった。求める価値についての地域差は比較的少ない。厳しい環境制約の中で求められる価値は、現在重視される価値と大きく構造が異なることが明らかとなった。

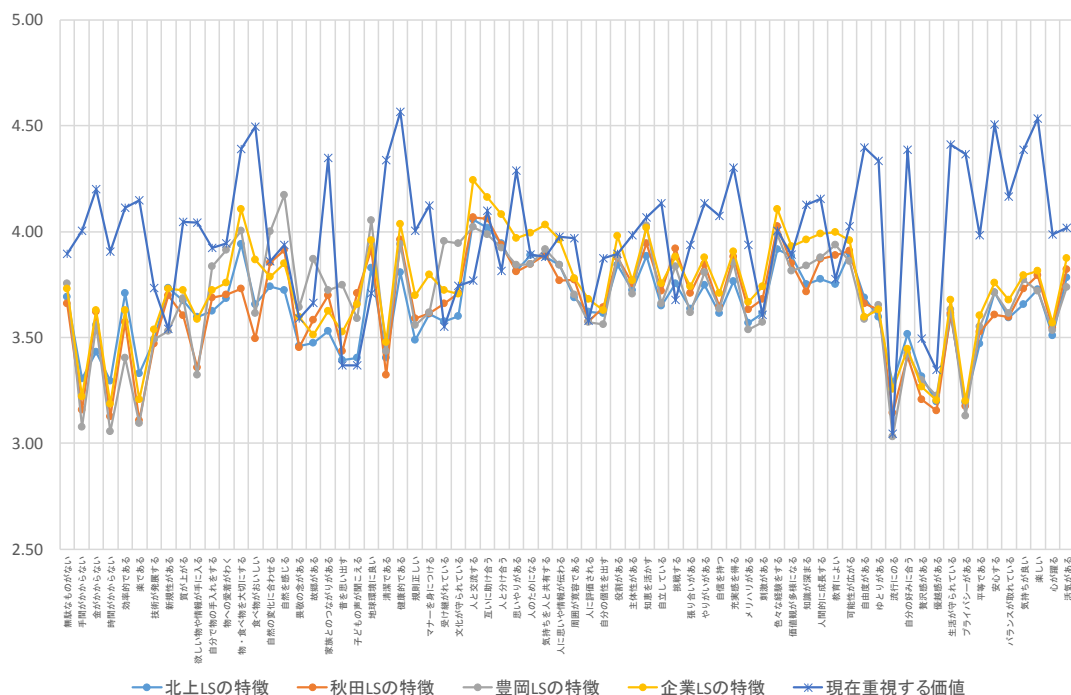


Fig.1 Lifestyle values created in local cites and the gap with present important values.

### 3. 北上市に新展開する社会実装

北上市の口内地区には、過去に東北地方に広く製造販売していた「口内傘」が存在したが、現在その技術の継承は途絶え、口内地区交流センターを中心に復活の取り組みが進んでいる。本研究では、この地域リソースを出発点にバックキャストリングにより新 LS をデザインし、社会実装する手法研究を開始した。これは単純な伝統技術の継承ではなく、口内傘に含まれていた価値と環境制約を分析し、地域らしさを見出し、将来の環境制約下での新価値を生み出す手法である。現在は、地域住民と連携し、新 LS の社会実装を進め、実現のためのテクノロジーを厳しい制約下に実在した自然に探索するための Bio-TRIZ 法及びオートロジー工学を用いた新 LS の社会実装を進めている。

### 参考文献

- (1) 古川柳蔵, 石田秀輝, バックキャストリングによるライフスタイル・デザイン手法とイノベーションの可能性, 高分子論文集, 2013, Vol.70, No.7, 341-350.

**謝辞** 北上市との連携では、JST-RISTEX 平成 27 年度採択「未来の暮らし方を育む泉の創造」、ネイチャーテクノロジー研究会、北上市にご協力頂いた。感謝申し上げます。

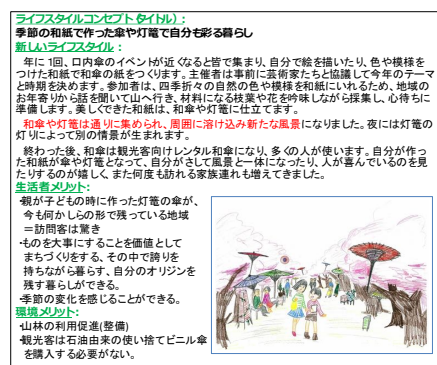


Fig.2 Lifestyle design in Kitakami based on the local Wagasa technology.



所属班：C01班

所属機関：東北大学大学院環境科学研究科・工学研究科  
／北陸先端科学技術大学院大学

氏名：岸上祐子・須藤祐子

所属機関住所：〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉468-1

〒 923-1292 石川県能美市旭台1-1

e-mail：kisikami@jaist.ac.jp, Yuko.K@dc.tohoku.ac.jp

研究キーワード：ライフスタイル、オントロジー工学



## 技術マッチングに向けたオントロジー工学の応用

# Application of the ontology engineering for the technology matching for the lifestyle needs

### 1. はじめに

持続可能ではない利便性・快適性のみを追求したライフスタイル（以下 LS）ではなく、将来予想される環境制約下でも心豊かで持続可能な LS のために、心豊かな LS からのテクノロジーの発想が必要である。その解を自然界に求めるために、LS にオントロジー工学<sup>1)</sup>を導入し、技術マッチングの手法を検討した。

### 2. 行為分解木から Bio- Triz へ

バックキャスト手法で描かれた LS について、オントロジー工学に基づき行為分解を行った。これを図示した行為分解木によって、暮らしにおける行為のみではなく、その行為と関係する社会的課題や制約、および心の豊かさも可視化することができる。また、行為分解を繰り返すことにより行為は具体性を増し、その行為に求める機能となる。

行為分解木から Bio-TRIZ を用いて生物の解（自然界のテクノロジー）へとマッチングするプロセスを、社会実装の試みを開始している北上市

の LS 例で示す。Fig.1 は、北上市の伝統産業であった和傘（口内傘）を出発点として描いた LS の行為分解木の「アーケードの屋根を和傘で作り、その屋根が風景となじみ季節を感じさせる」という部分と、そこから生物の解へ辿り着くプロセスを示している。LS 実現のために必要とされる機能として「アーケードの

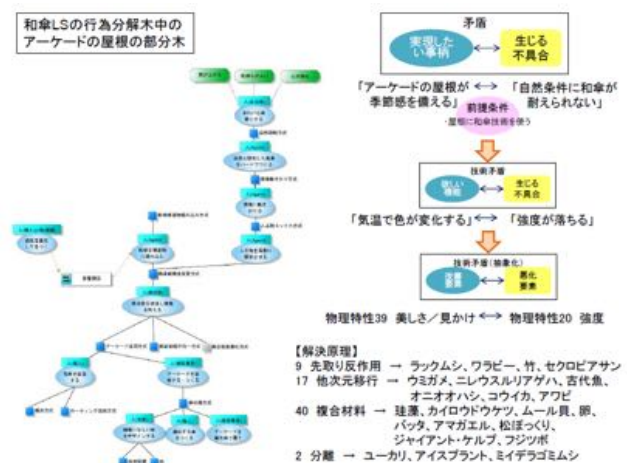


Fig.1 An example of matching technology-seeds in nature for the LS-needs.



屋根が季節感を備える」が挙げられ、「屋根を和傘で作る」という前提条件下で機能を発現させようとした場合、「自然条件に和傘が耐えられない」という不具合が生じることが考えられる。この矛盾を段階的に一般化することで「美しさ／見かけ」を良くしようとする「強度」が悪化するという技術矛盾となり、Bio-TRIZ を用いることで、図中の右下に挙げている生物の解に辿り着いた。このように、行為分解木からは「実現したい機能」と「生じる不具合」の組み合わせである矛盾を見出すことができ、Bio-TRIZ を用いて生物の解（技術シーズ）に辿り着くことが可能である。

### 3. 行為分解から得られる LS 標準語彙

自然の恵みを活用すると同時に自然環境の制約を受ける LS を 90 歳ヒアリングから得て、行為分解を行った。行為分解木から得られた語彙（表層語彙）は、本質を表す標準語彙へと集約させる。LS 行為分解木から得られる標準語彙によって多様な LS の本質を表し、これを用いて同様の心の豊かさを得る LS のグルーピングや、検索が可能になると考える。また標準語彙を介して、

バックキャストで描いた LS 中の本質的に同じ行為を検索することで、90 歳ヒアリングの LS における解決策へつながることが期待できる。LS 標準語彙は

既に規定されている人工物等の標準語彙のみでは表現できず、独自の語彙（図中④）も加え、Fig.2 のような構造になるのではないかと考えている。

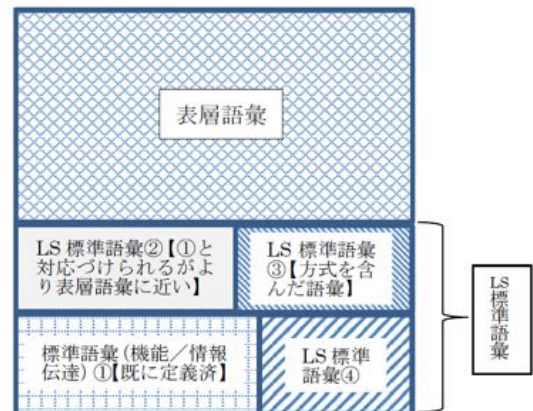


Fig.2 Image of relations of common vocabulary and vocabulary at the surface level.

### 4. 行為分解木のさらなる活用

行為分解木は心の豊かさとは行為を関連づけ描いており、ライフスタイルにおける心の豊かさの評価につながる可能性もある。これは技術マッチングによって得られた自然の解を用いり・デザインしたテクノロジー及びそれが実装された社会において、当初に想定した心の豊かさが得られているのかどうかの評価ツールとなり得ると考えており、今後の検討課題である。

### 参考文献

1) 溝口理一郎, 「オントロジー工学」, オーム社, 2001

謝辞 オントロジー工学についてご指導いただいた A01 班の溝口理一郎教授（北陸先端大）に感謝申し上げます。

所属班：C01班  
所属機関：新潟大学工学部  
氏名：山内 健  
所属機関住所：〒950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050  
e-mail：yamauchi@gs.niigata-u.ac.jp  
研究キーワード：国際標準化機構（ISO）、バイオTRIZ、  
データベース、和傘



## 生き物とのセレンディピティを支援するデータベースの構築 ーモノづくりからマチづくりまでー

### Construction of a database supporting serendipity with nature From materials design to urban design

#### 1. はじめに

近年、高効率・高性能な生物機能を材料設計に取り入れる生物模倣工学の研究が活発に進められている。しかしながら、その応用範囲は広く、ケースバイケースでの材料設計が主となっており、生物技術の体系化は非常に困難である。さらに国際標準機構（ISO）ではバイオミメティックスに関する規定について検討されており、国際基準に準じたバイオミメティック製品の創出が求められている。現在、我々はバイオ TRIZ と呼ばれる手法で、150 万種以上も存在するといわれる生物の中から抽出した生物機能を材料設計に取り入れることができるデータベースを構築することで、この ISO 基準に適応したものづくりの解決案を提供している。このデータベースは革新的問題解決法として知られる T R I Z（トリーズ）法を活用して、生物とのセレンディピティにより技術問題を解決するという発想で情報を提供できる仕組みになっている。バイオミメティックスに関する特許では、形態の類似性を利用したものが多く、プロセスなどの解決例が少ないのが現状であるが、本データベースでは材料設計だけでなく製造プロセス、品質管理など多様な工学的課題に対応できる特長がある。そこで、今回はこのデータベースを活用してモノづくりから街づくりまでという広範囲での適用について検討した。具体的には①データの R D F 化によるモノづくりの発想支援、②岩手県北上市の伝統である口内傘による地方活性化に関して、生物機能を材料設計に取り入れた問題解決の実証を試みた。

## 2. データのR D F 化によるモノづくりの発想支援

バイオミメティック材料の開発においては、①既存技術・材料から問題を抽出、②問題解決のための生物機能を探査、③探査した生物機能の原理を抽出・一般化、④材料を創製して最適化を検討、という過程を経る必要がある。

本データベースによる検索の特長は、過程①～④を経ながら生物機能を工学に移転するためのヒントを提供できる点にある。

このデータベースの試行に当たって、企業のモニターから、「分離する」「接着する」など工学機能に関して、バイオ T R I Z 情報との関連付けが有効であるとの意見があり、この点を検討した。具体的には各情報を R D F 化して、情報のリンクを可視化した。この検索により、改善が必要な機能を選択することで、改善に最適な自然原理と生物機能を提供できるため、問題解決までのプロセスが容易となった。

| あなたが選択した組み合わせ   |                            |                        |
|-----------------|----------------------------|------------------------|
| 【機能】分離する 【状態】固体 |                            |                        |
| 工学              | 生物模範工学                     | TRIZの原理                |
| 超音波             | -                          | -                      |
| 吸着              | 筋肉で吸い付くミズダコ                | <a href="#">局所性質原理</a> |
| 透心機             | -                          | -                      |
| コアンド効果          | -                          | -                      |
| コロナ放電           | -                          | -                      |
| エレクトレット         | ミミズが泥まみれにならない理由（表面がマイナス電荷） | <a href="#">帯電分離原理</a> |
| ろ過機             | -                          | -                      |
| 摩擦              | 水をはじく汚れない蓮の葉               | <a href="#">局所性質原理</a> |

Fig.1 BioTRIZ database for technology transfer from nature.

## 3. ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチの技術支援

現在、岩手県北上市の伝統品口内傘による「和傘と暮らすライフスタイル」から技術要素を抽出して、バイオ T R I Z による和傘の設計を検討している。今回はオントロジー法により、ライフスタイルに対する人の希望や行為を分解していき、機能や技術を導き出し、そこに派生する工学的技術矛盾の解決を検討した。具体的には、和傘の普及、風景と調和する和傘、和紙を用いた灯籠のある街並み、和傘アーケードなどの新しいライフスタイルの要素を抽出し、そこでの技術問題を解決することで、折りたたんでも濡れないアサガオに学んだ和傘、廃棄物から再生したナノセルロースを利用した透明和傘、害虫の滑落する灯籠、雨水の貯蔵が可能な和傘アーケードなどを設計することができた。

以上のことより、バイオ T R I Z という生き物とのセレンディピティから工学技術を生み出すという発想で、心豊かなライフスタイルに必要な新技術・新材料を ISO の基準に準じた開発プロセスで、短時間で簡便に開発できることがわかった。

| 40の原理                                                 | バイオTRIZ語彙 | バイオTRIZ例                                                                              | バイオTRIZ特許               |
|-------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 32.変色利用原理<br>1. 物体の色や外部環境を変更する<br>2. 物体の透明度や外部環境を変更する | 換える       |  | セルロース誘導体を利用したナノセルロースの開発 |

Fig.2 Relationship with 40 principles in TRIZ and idea from nature.

## (4) トピックス (PEN より)

# FEATURES

## 寄稿

# 人工的に模倣した森の宝石（タマムシ）と アウトリーチ活動

ー最先端バイオミメティクス研究をどうやって子供達に伝えるかー

物質・材料研究機構 主幹研究員 不動寺浩  
浜松医科大学 教授 針山孝彦

新学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」のプロジェクトの一つとして生体模倣材料の開発を行っている。生命誕生以来 38 億年の間、生物はそれぞれの命を賭して性能試験を繰り返してきた。その生物の有り様を規範として「ものづくり」を考える分野をバイオミメティクスという。生物の表面構造を、どれくらいバイオミメティクス展開できるだろうか。タマムシの輝きを規範として、我々は多くの発見と開発を進めることに成功している。ここでは、最新の研究成果を元にして、自然界の構造色の不思議さと新材料研究の面白さを伝えようとしたアウトリーチ活動について報告する。

物質・材料研究機構では、4 月の科学技術週間に子供たちに材料研究の世界に触れさせるイベントとして「NIMS キッズの実験工房」という小学生とその親をターゲットとした体験型の一般公開を行っている。今年度、このイベントに参画する機会を得た。このアウトリーチ活動において、我々が取り組んでいる最先端の研究成果をベースとし、できる限りの正確さ（学術的、専門性）を担保しながら、わかりやすく楽しんで（エンターティメント性）体験できるように工夫した。タイトルを「アルコールに漬けると色が変わる模倣タマムシ」とし、「ナノテクノロジーを用い、生

物をまねた（バイオミメティクス）新材料の展示です。タマムシの構造色を構成している人工オパールが、アルコールに浸すと変色する様子を観察します」というキャッチフレーズを設定した。

子供たちに先端研究の成果をどのようにすれば伝えることができるのだろうか？①生物の模倣であることを理解させるために自然界の構造色について説明する、②バイオミメティクスで工学的に模倣したタマムシと本物のタマムシの構造色を比較観察させる、③概略を伝えた後に、できるだけ子供に実験をさせる、という 3 つのステップでイベントを進行させ、子供たちの理解を深めることに挑戦した。

## ① 自然界の構造色について

はじめに、一般にはまだ馴染みの薄い「構造色」という専門用語の説明をおこなった [1]。

自然界には多種多様な構造色の存在が知られているがそのなかでも代表的な構造色で入手が比較的容易な、蝶類の構造色（モルフォ蝶）、甲虫の構造色（ヤマトタマムシ）、鳥類の構造色（孔雀の羽）、貝類の構造色（アバロン貝）の標本を展示した（図 1）。これらの標本は展示コーナーの





図1 タマムシブース。手前が展示コーナー、奥が実験コーナー

テーブル上において間近で観察できるようにした。これらの生物の織りなす金属光沢のような光輝性の構造色に子供のみならず保護者の多くも驚嘆し、並置したパネルを使って構造色について理解も深めさせることができた。特に、構造が壊れにくいアバロン貝については子供たちに自由に触らせ、構造色の一つの干渉作用の特徴である角度によって色が変わることから、日常触れている吸収による色とは異なることを体感させることができた。

## ② 本物のタマムシと模倣タマムシの比較

我々は新学術領域研究の一つとして、実際のタマムシの発色の仕組みを解明し、その光学的仕組みを模倣することを試みている。時間も短く、経費もほとんどかからず自己組織的に工学的再現ができる技術を開発し、反射スペクトル波形をほぼ完全に再現することに成功した。子供たちに、この技術で作製した模倣タマムシの構造色を本物のタマムシと比較観察を行わせるとともに、構造色の発色の仕組みについて説明した。

図2のAとBはこのミドリフトタマムシの表面構造を鋳型として転写し、その表面に自己組織的にコロイド粒子を規則配列することで作製した模倣タマムシである。これらの模倣タマムシが、本物のミドリフトタマムシ（タイ国原産）（図2C、D）に極めて類似した構造色を呈していることが写真からもわかる。実際に両者を手に取り触らせることで、模倣タマムシと本物のタマムシを区別することがかなり難しいところまで、バイオミメティクス技術によって

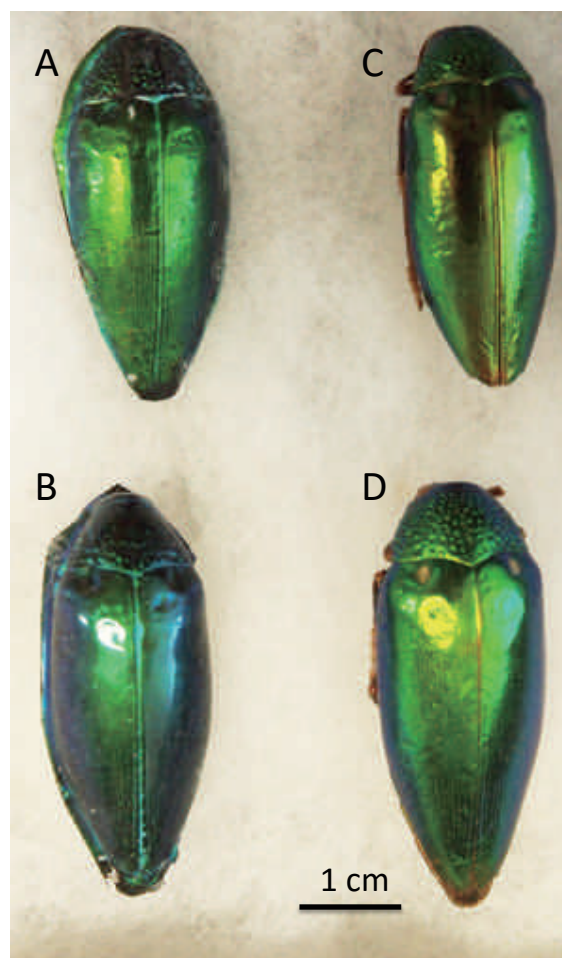


図2 模倣した人工タマムシ（A、B）と本物のミドリフトタマムシ（C、D）

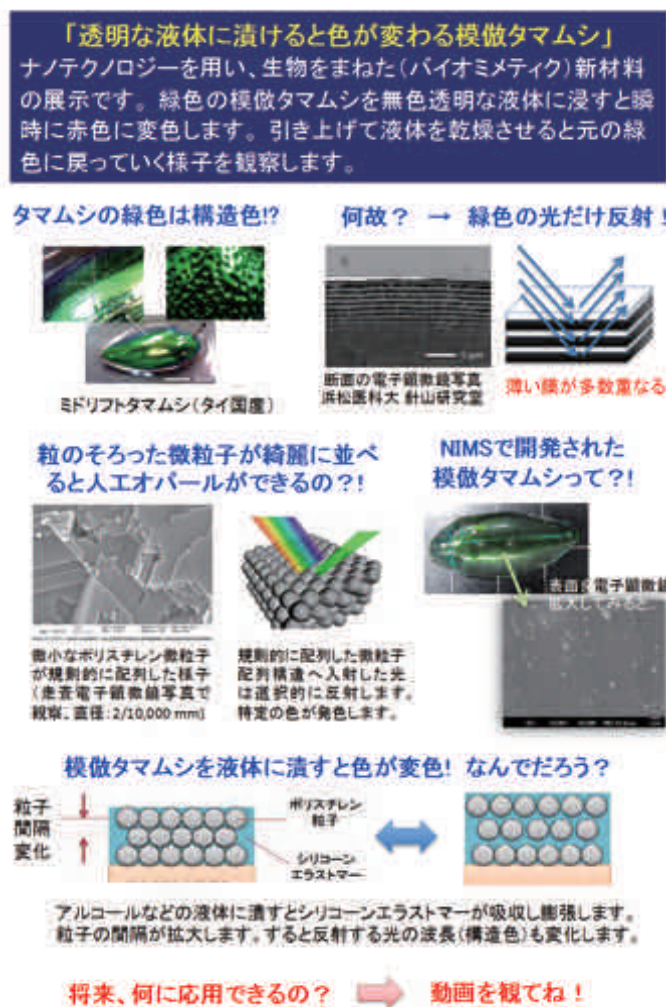


図3 タマムシの構造色と変色の仕組みの説明に用いたパネル

作製できていることを体感してもらうことができた。

どのようにタマムシの構造色が発色しているのか、どのようにしてタマムシ構造色を模倣するのかという疑問を想定し説明パネル(図3)を準備していたが、その表現が作成当初から小学生向けには多少難しいかもしれないと懸念していた。ところが、子供たちの表情を見ながら、できる限りかみ砕いた表現を選んで用いることで対応でき、子供たちの理解度の高さに驚かされた。

このように構造色について基本的理解をさせた上で、メインとなる子供達が実験を体験するステップへと移った。

### ③ 子供達に構造色実験を体験してもらう

どのような実験を行わせれば、子供達が楽しみながら構造色の理解を深めることができるだろうか。色が構造によって創出されていることを体験させるために、模倣タマムシ

の微細構造を変化させると色が変化してくる実験を行えば子供たちが構造の変化を想像できるのではないかと考えた。研究室の身近な道具を使って実施した。構造色を繰り返し変化させるために揮発性の溶液が必要であるが、安全性を考慮してエタノールを使用することとした。また、子供達が自分自身の手を使って作業するため、ゴーグルとビニル手袋を着用させ安全を確保させた。

実験のガイダンスを行ったあとはできるだけ子供自身が自分で実験を体感できるように保護者の方々に手を出さないように協力していただいた(図4)。当初、手袋やゴーグルの着用の煩わしさがあるのではないかと懸念したが、以外に、子供達はすぐに慣れた。また、自分自身が重要な実験を行っているという実感を深めることができたようだ。子供向けの職業体験施設のキッズニアでも、できるだけ実際に沿ったコスチュームを着て作業を行っていたことを思い出し、研究の体験でも科学者と同じ姿で作業をする必要





図4 子供達が自分たちで模倣タマムシの構造色の  
変化を観察する体験実験の様子

性を感じた。また、真剣に実験に取り組んでいる我が子の様子を、付き添いの保護者が何枚もの写真に納めていて、アウトリーチ活動として予想以上の反響であったといえる。

図5はエタノールを模倣タマムシの表面を濡らした状態で構造色が緑色から橙～赤色に変色している様子である。この構造色変化の仕組みについてもパネルにその仕組みを説明するイラストを準備しておいた。規則配列したポリスチレン粒子の周期がエタノールを垂らすと拡大して変化すること。その周期変化はナノレベルでシリコーンエラストマーがエタノールを吸収し、体積が膨張する膨潤という現象であることを説明した。エタノールが蒸発すると元の状態に戻るため構造色が最初の色に戻ることや、この操作を繰り返して構造色が可逆的に変化することなどを体験させることができた。

実験を通して子供達はいくつもの素朴な疑問が芽生えたようで、何故だろうと考えると共に、多くの質問をぶつけてきた。また、付き添いの保護者の方々からも多くの質問を受けた。質問は、二つのポイントに集約できる。一つは科学の視点で生物の構造色の不思議さに関するもの、もう一つは工学の視点でこのような構造色が何の役に立つのかについてである。

タマムシの構造色がユニークなのはよく知られているが、

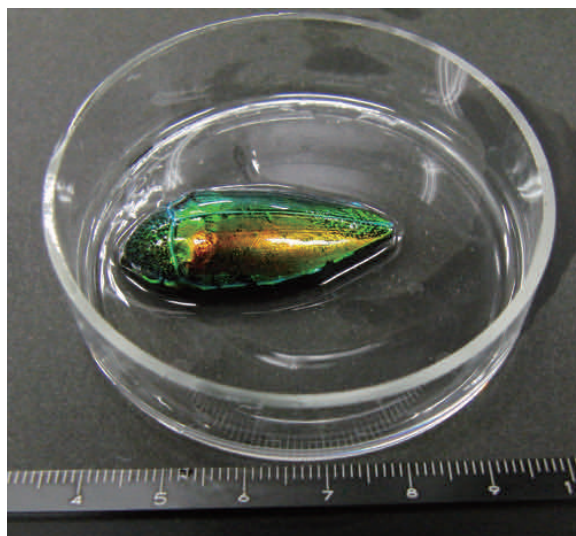


図5 エタノールで濡らすことで模倣タマムシの構造色が  
緑色から赤色に変色した様子

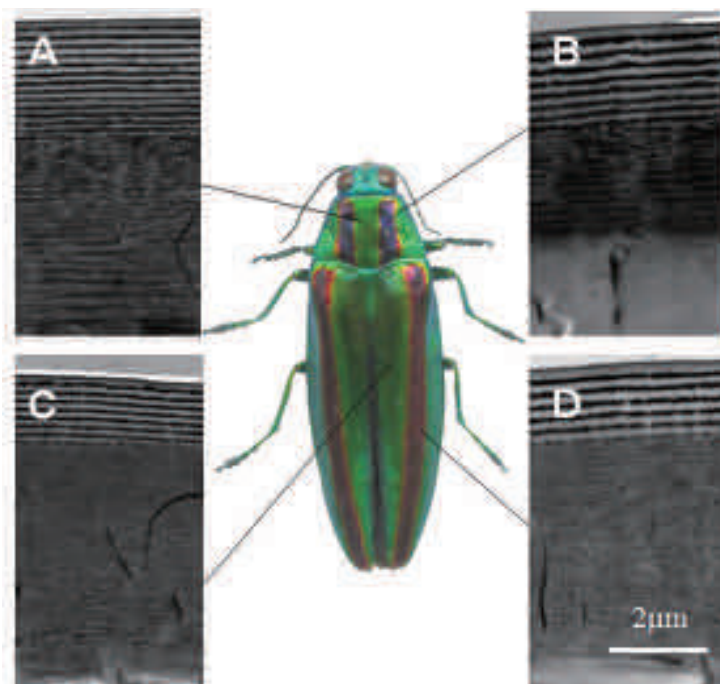


図6 ヤマトタマムシ（中央）と、その緑（A、C）と赤（B、D）の部分の断面の微細構造を拡大した透過電子顕微鏡写真

その仕組みについては今回の展示で始めて理解できたという率直な感想を何人もの保護者から寄せられた。タマムシの構造色についてはヤマトタマムシを使って（図6）、浜松医科大学や大阪大学の研究チームが解明している [2]。玉虫厨子の装飾に使われたヤマトタマムシは、胸部から鞘翅にかけて緑の部分と赤の部分があり、その部分を透過型電子顕微鏡で、クチクラの最外層の表角皮を観察すると、白い層と黒い層が交互に繰り返す多数の層構造が観察されていて緑と赤の部分でその層の厚みが異なること、この層でそれぞれの反射光が干渉しあうことによって輝く色ができあがるという多層膜干渉によるものであることなどを説明することで納得いただけた。今回、子供達が実験で体験した模倣タマムシの構造色変化の仕組みとヤマトタマムシが行っている巧みな構造色変化の仕組みが本質的に同じであることも理解していただくことができた。

一方、構造色の研究が何の役に立つのかとの質問に対しては、モルフォテック（帝人の構造色繊維）やマジョーラ（日本ペイントの顔料）など実用化された構造色材料や、京都オパール（京セラの人工オパール）の事例を引き合いに出すと共に、物材機構-土木研究所-広島大学の共同研究として進めている新しい歪みの可視化技術への可能性について説明した。将来、この技術が実用化されれば、急速に高齢化が進む社会インフラ構造物を、低コストで簡単に診断できるようになると考えている。この将来の応用について、物材機構の広報室が一般向けビデオを公開している

[3]。この動画を保存したタブレット端末（iPad）を活用し、構造色の応用の可能性を分かりやすく説明することができた。

1日だけのイベントであったが、当日は100名ほどの子供達が実験を体験し、構造色とバイオミメティクスの最新の研究にも触れてもらうことができた。最新の研究を体験学習の教材としたことで、難しいことをわかりやすく伝えるための多くの工夫に時間をとられたが、研究に対する想いや研究の意義を子供たちやその保護者の方々に伝えることができ、充実したすがすがしさを感じた時間であった。

アウトリーチ活動を通して、子供たちの瞳が求めているのは難しい内容の向こう側にある研究者がもつ喜びであると感ずることができた。その喜びが伝わることで、子供はきっと自ら学習しそのとき難しかった自然現象を理解しようと努めるだろう。また、アウトリーチの現場で、研究者が自分の研究活動を直接説明し、自分たちの研究の意義を研究者以外に伝えようとすることで、自分の研究を外側から見直すことができる好機でもある。他者に伝えようとすることで、自らの科学的思考が研ぎ澄まされる。

バイオミメティクス研究は何十年も前に提唱された概念であるが、近年、ナノテク技術や計測法の進展、エネルギー・環境問題の深刻化、持続可能なものづくりなどの視点で Engineering Neo-Biomimetics と呼ばれる新時代を迎えて

いている。この新潮流では学問分野の垣根を越えた協同作業が重要な枠割りを果たしている [4]。例えば、ナノスーツ法 [5, 6] と呼ばれる革新的な観察法の発見は生物学者と工学者の研究チームによる斬新な発想に起因している。今回のアウトリーチ活動も新学術領域で進められている、異分野融合の研究成果の 1 つであり、次世代を担う子供たちにバイオミメティック研究の面白さと今後の可能性を少しでも伝えることができたのではないかと確信している。

## References :

- [1] 構造色研究会 : <http://mph.fbs.osaka-u.ac.jp/~ssc/>
- [2] [http://www2.nhk.or.jp/school/movie/bangumi.cgi?das\\_id=D0005100152\\_00000](http://www2.nhk.or.jp/school/movie/bangumi.cgi?das_id=D0005100152_00000)
- [3] <http://www.nims.go.jp/publicity/digital/movie/mov140212.html>
- [4] <http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber1308.html>
- [5] <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20130416/>
- [6] <http://www.pnas.org/content/early/2013/04/10/1221341110.full.pdf+html>



# FEATURES

## 連載 第1回

# バイオ TRIZ：生物の不思議を工学に移転する技術 － 分割原理 －

新潟大学工学部 山内健  
大阪大学基礎工学研究科 小林秀敏

### 1. はじめに

2013年8月の本誌に「生物の不思議を工学に移転する技術 - バイオ TRIZ という技法 -」という題名で、発明的問題解決理論である TRIZ の簡単な概説、バイオ TRIZ の説明と実例、世界動向について紹介させていただいた。TRIZ とはロシア語で発明的問題解決理論を意味する “Теория решения изобретательских задач” の頭文字に相当する [1-3]。その中で、バイオ TRIZ は 40 個の宝箱に 150 万種の生物が持っている知恵をレシピとして詰めて、問題解決のヒントとして提案するという発想であることを説明した。これから 6 回のシリーズで、40 個の宝箱のうち、特に生物機能を有効に利用している 6 個を厳選して、その原理や研究例を説明していく。今回は「分割 (Segmentation) 原理」を取りあげる [4-7]。

### 2. TRIZ における「分割原理」

物や組織は肥大化すると、構成体の交換が困難になり、老朽化やマンネリ化を助長するため、機能も鈍くなる。このようにときには、分割して部分的に処理や改善をすることが必要となる。

TRIZ では具体的には以下の 4 項目で問題解決のヒントを探っていく。

- (1) システムを複数の部分に分割する
- (2) 組み立てと分解が容易なシステムを作る
- (3) 分割の度合いを増やす
- (4) 分割した部分を交換できるようにする

スイッチとして本体に付属していた機能を分離したりリモコン、組み立てと分解が容易な自転車、容易に交換できるカートリッジなど我々の身の回りには、分割することで、その機能を高めたものが数多く存在している。最近では MEMS に代表されるように材料の小型化、システムの小空間化が求められている。材料の機能を切り離して複数個に分割し、その一部の部品を交換することで、システムの飛躍的な改善ができ、また、各部品を特化することが容易になるため、3次元化が可能となり、省スペース化も期待できる。

### 3. バイオ TRIZ における「分割原理」

TRIZ の分割原理と同様の仕組みを生物の営みの中で探してみる。生物において、分割は至る所でみられ、例えば植物は、葉、茎、花、根とモジュール化して高性能な機能を

発揮している。また、落葉樹の落葉やトカゲの尻尾切りなど、部分的に分割することで、自身を守る術を身に付けている。例えば、オーストラリアは1年を通してとても乾燥した地域で、山火事が頻繁に起こるが、ユーカリはこの環境に対応した分割機能を備えている。ユーカリの幹の外皮（樹皮）と内側にある層（形成層）では燃えやすさが異なり、樹皮が非常に燃えやすく、樹皮に火がつくと幹から剥がれ落ちるので、幹の内側まで火が燃え移ることはない[8]。また、中国原産の竹は、節により部分的に分割されていることで、樹木の幹と比べると比較的細いものにも関わらず、鉄筋の2～3倍に相当する引っ張り強度を有している。背の高い竹は、節があることで、台風や強風による横からの力に耐え、折れにくく、しなやかな機能を発揮できる[9]。また、分割は生命体の機能を維持するためにも必要不可欠な要素であり、細胞分裂を繰り返すことで、生命体を維持している。心筋細胞に代表されるように、細分化された物体が集合体を形成し、共同して周期的に活動することで、大きなエネルギーを生み出している。しかも、その活動は、分割された一部の細胞が常に交換されることで、長期間、機能を維持・発揮できている。



#### 4. 技術矛盾の解決法として

TRIZ 法の特長は、工学技術を解決するための原理原則が提示されており、解決したい問題をパターン化することで研究分野を問わずに問題解決のヒントを得ることができる点にある。①プリンシプル、②プレディクション、③イフェクツなどいくつかの活用法があるが、前回は40の解決原理を有効利用するプリンシプルを活用した問題解決法を紹介した[10]。プリンシプルでは、まず、縦、横それぞれ39項目にわたる物理特性から“解決したい問題”と“改善すると不具合が生じる問題”を選択して、それら両者が

交わるマス目を39×39のマトリックスから見つけ出す。そのマス目には40の解決原理の中から適切な方法が記載されていて、この原理をヒントに解決案を考える方法である。このマトリックスは「矛盾マトリックス」といわれている。例えば、材料の機能する速度を改善したいが、装置の製造過程が複雑になる場合、「速度 vs つくりやすさ」という技術矛盾を抱えるわけであるが、これらが交わるマス目には、分割原理がその有力な解決法として挙げられている。分割原理は、このほかにも「体積 vs 長さ」や「体積 vs 作りやすさ」などを解決する有効な手立てとなっている。

一方、バイオ TRIZ は矛盾マトリックス⇒生物のレシピ⇒問題解決というプロセスを経て問題解決のヒントを得るというものである。前述も踏まえて、研究開発の一例を示す。近年、ソフトマテリアルの研究が盛んになっているが、その中でも外部環境に応答する高分子ゲルの利用は様々な分野での利用が期待されている。高分子ゲルは数%の高分子がネットワークを形成して、その中に溶媒を包括した材料であり、その応答特性は素材の90%以上を占める溶媒の特性が大きく関係する。そのため、物質の移動速度が大事であるため、小型化することで応答速度が改善できる。ここまではTRIZにより解法を提案できる。MEMS分野などで、小型で高性能な素材が必要となっていることも、この解法の有用性を高めている。この機能性材料にさらなる付加価値を与えるための一例として、前述の生物のレシピから提案した我々の研究例を紹介する[11, 12]。微小材料を並べて生物における組織（2次元）や器官（3次元）のような働きを担わせるという発想で、心筋細胞の活動にみられるような集合体を形成することで、大きなエネルギーを獲得する一つの手法である。外部環境に応答する高分子ビーズを様々な結合様式で並べて、2次元、3次元に集積化して新たな材料を創製した。図1に示すように、pHの異なる環境下で、膨潤・収縮する材料に官能基を付与して、2次元、3次元の集合体を作製した。この材料の外部環境に対する応答機能を調べたところ、同じ大きさのバルク体に比べ、数十倍速くなった（図2）。集合体の機能は小さいビーズの速度と同じで、集積体の協働的運動も作用して、極めて効率的に応答することが分かった。現在は、ビーズ同士の静電的相互作用で、集積する材料の開発にも成功しており、必要な場所で集合体を組み立てて、その場で運動機能を発揮し、作業後は、相互作用を働かないようにすることで、元の1つひとつのビーズに分解することもできるようになっている（図3）。

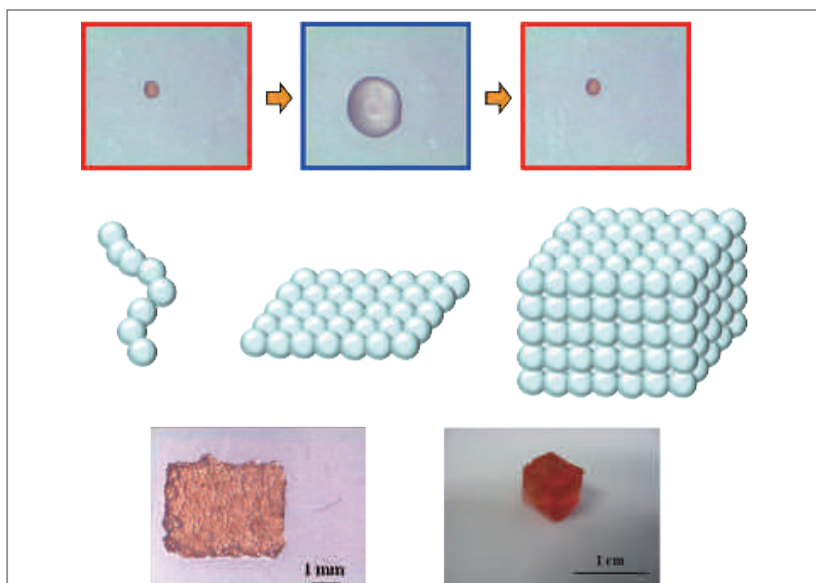


図1 外部環境に応答する材料の集積化

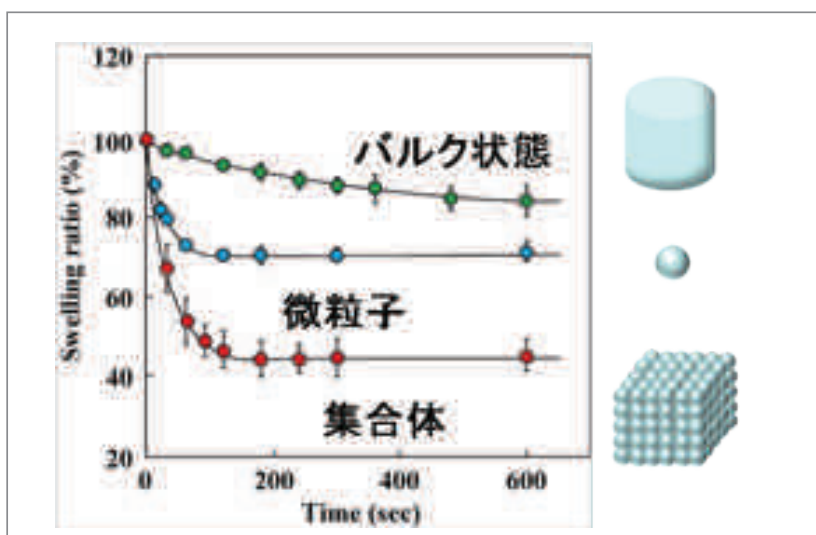


図2 集合体による高速応答特性

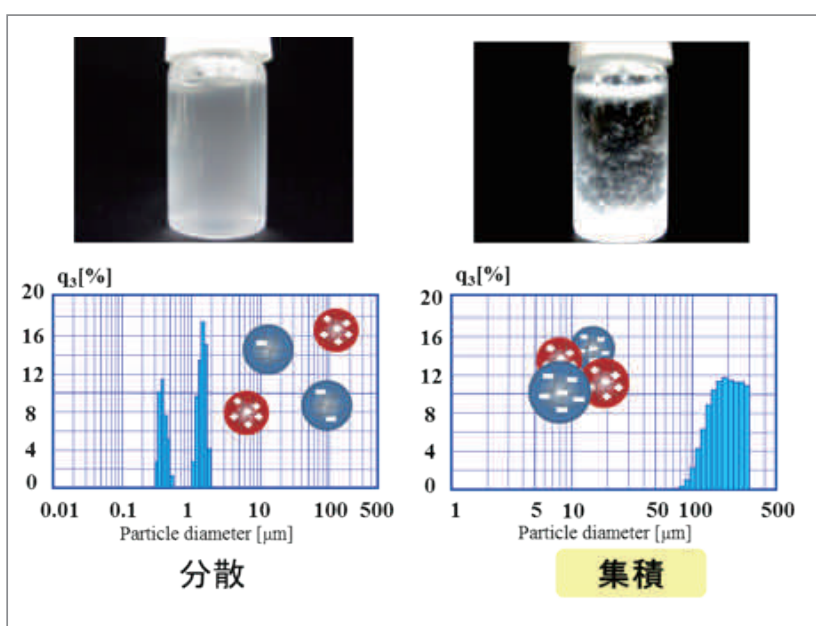


図3 外部環境を変化させることで組み立てと分解ができる運動素子

## 5. おわりに

バイオ TRIZ について、「分割 (Segmentation) 原理」を取りあげて、その原理の内容、矛盾マトリックスからわかる技術矛盾の例、TRIZ による解決、バイオ TRIZ の仕組みと解決の一例などを概説した。ソフトマテリアル分野における一例ではあったが、バイオ TRIZ が分野を問わず、あらゆる技術矛盾を解決するのに有効な手法となりうることが明示できた。このバイオ TRIZ が、様々な分野の研究者および技術者にとって、ヒント発案の一助になれば幸いである。

### References :

- [1] J. F. V. ビンセント、バイオミメティックスハンドブック、エヌティーエス、pp.3-14 (2000)
- [2] J. F. V. ビンセント、バイオミメティックスの新展開、エヌティーエス、pp.9-25、(2002)
- [3] G. S. Altshuller, Godon and Breach science publishers, 1-223 (1984)
- [4] 山田郁夫、図解 TRIZ、p.57、日本実業出版 (1999)
- [5] 笠井肇、開発設計のための TRIZ 入門、p.44、日科技連出版社 (2006)
- [6] 粕谷茂、図解これで使える TRIZ/USIT、pp.15-74、日本能率協会マネージメントセンター (2006)
- [7] 長谷部光雄他、はじめようカンタン TRIZ、pp.64-75、日刊工業新聞社 (2007)
- [8] ネイチャーテック研究会のすごい自然のショールーム「火事とともに生きるユーカリ」  
<http://nature-sr.com/index.php?Page=11&Item=93>
- [9] ネイチャーテック研究会のすごい自然のショールーム「節あってこそしのやかな竹」  
<http://nature-sr.com/index.php?Page=11&Item=43>
- [10] PEN 2013 August, Vol.4, No.5, pp.13-18, 2013
- [11] T. Nishiyama, Y. Kagami, T. Yamauchi, N. Tsubokawa, Preparation of stimulus-sensitive gel particles with a DNA-dye complex and their pH sensitivity, Polym. J., 44, 396-400 (2012)
- [12] T. Nishiyama, Y. Kagami, T. Yamauchi, N. Tsubokawa, Assembly of stimulus-sensitive gel particle with DNA-dye complexes, Polym. J., 45, 659-664(2013)

# FEATURES

## 寄稿

# 数学とバイオミメティクス ーヘテロな集団が生み出す力への期待ー

北海道大学大学院理学研究院数学部門 久保英夫

### はじめに

本稿では、数学者の眼からみたバイオミメティクス研究について私見を述べたいと思う。

より具体的には、バイオミメティクス研究の本質は、製品化されたモノの中にあるのではなく、むしろモノづくりの過程や発想の中にこそあるのだということを以下で考察してみたい。

### 数学の学際性

学部時代からずっと数学を専門にしてきたが、改めて、数学とは何であるかを考えるとなかなか難しい。そこで、手元にある辞書で数学という言葉を引きしてみると、数・量・空間について研究する学問とある。正直、ちょっと意外と言うか、これでは何百年も前に終わっている学問のように思われているのではなからうか、と感じた。確かに、数学の歴史を振り返ってみれば、ものの多少を表すために自然数が創られ、分量を表すために分数などが考えだされ、土木工事や天体観測の技術の進歩が空間図形の問題を顕在化させてきたことがわかる。その意味で、「数学は数・量・空間を研究する学問」という特徴付けは的外れなものではない。しかしながら、それが数学の本質かと言えば、そん

なことは決してなく、現在もなお、数学は高度に進化し、その守備範囲を広げながら発展を続けているのである。

では、その発展の源はどこにあるかと言えば、この世には法則性があるという事実にその根源があると思われる。そのような法則性があればこそ、それを理解するために脳を深化させてきた知的生命体が現存しているのである。仮に、この世が何ら規則性を持たず、無秩序なものであったなら、もっと別なタイプの進化が起きていたはずである。そして、その法則性によって生じる、ありとあらゆる現象に数学的構造が見出されるという経験的事実によって、数学が今も生き生きと発展していくことが保証されているのである。例えば、ものの多少という現象があるのなら、必然的にそれを表現する構造—自然数—が存在するという具合に、数学的構造と現象は陰陽の如しである。しかし、ここで強調したいことは、もともになる現象は何も数・量・空間に限定されるものではなく、様々な現象に対して、それを表現するに相応しい数学的構造が創造されていくという点である。例えば、針金中を熱が伝導していく様子は熱方程式によって記述され、フーリエが重ね合わせの原理を駆使して、熱方程式を解いたことは余りに有名である。そして、その解法の正当化を図る努力が現代数学の基礎を固めてきたという経緯がある。この様に、数学は数学という学問の中で



閉じてはおらず、本来的に、物理学を始めとする他の様々な学問分野との関わりの中で発展してきたのであり、学際的な学術領域であると言える。にもかかわらず、日本では、数学に対する認識が限定的なものとなっており、それが和算の伝統の影響なのか、もっと深い原因があるのか定かではないが、この認識を変えていかなければと思う。それには、現象と直接、向き合っている実証的科学の専門家が持つ現場力と数学者が持つ俯瞰力をヘテロに結合し、有機的な協働作業を進めることが必須であると考えている。

## バイオメティクスの普遍性

次に、バイオメティクスについても数学と同様の分析を行ってみたい。オンライン辞書によると、バイオメティクスとは「生体のもつ優れた機能や形状を模倣し、工学・医療分野に応用すること。ハスの葉の撥水効果、サメ肌の流体抵抗の低減効果、ヤモリの指の粘着力などが材料開発などで実用化されている。」と書かれている。数学に対する説明に較べると、かなりの確に表現されているように思われる。しかし、この記述はバイオメティクスの目的とそれが達成された具体例であって、その方法論や意義について何ら触れられていない。まず、生体の優れた機能や形状は誰が見つけるのだろうか。生体のことから生物学者が見つめるのだろうか、と言い切れる程ことは単純ではない。工学や医療分野に応用することが前提であるから、生体のある機能や形状が優れているか否かを生物学の視点のみから判断するのでは不十分であって、工学的視点や医療関係の視点が欠かせない。その意味で生物学者と応用分野に携わる人々の協働が本質的に必要である。つまり、バイオメティクスも数学同様、一つの閉じた学問体系ではなく、複数の学問分野にまたがる学際的な学問領域である言えよう。日本におけるバイオメティクス研究は新学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」を中心に精力的に進められているが、そこでも生物学者と工学者が他分野の研究者をも巻き込んだ材料開発が進められている。まさにヘテロな集団が新しいものを創ろうとしているのである。更には、生物の様々な機能や形状をデータベース化するという作業も進められている。このデータベースは、応用家が必要性を感じたときに参考になりそうな生物の形状を探しに行くことを可能とし、あるいは、そこにあるデータをヒントに新たな材料開発が始まることを可能にする画期的な仕掛けである。

また、生体の優れた機能や形状は長い進化の歴史の中で生物が獲得してきたものであり、そこにはパラダイムがある。より具体的には、遺伝子情報によるトップダウン型の制御

と自己組織化というボトムアップ型のモノづくりを巧みに組み合わせることにより、低エネルギー環境下において、汎用元素のみを用いて生命維持に必要な構造を実現するというパラダイムである。一方、人間の技術体系は、必要以上の性能を持つものを作ってしまう傾向があるように思われる。例えば、コンクリート製の橋は木製の橋と較べて強くで長持ちするとして普及しているが、恒久的に使えるわけではない。人工的に製造されたものであるが故に自然に還元されることはなく、最終的には産業廃棄物となってしまう。そうではなく、自然の中で循環していくようなしなやかな設計に基づくモノづくりへのパラダイム・シフトを促すところに、バイオメティクス研究の意義があると考ええる。加えて、新学術領域では、社会受容に耐える科学技術をバックキャスト思考によって体系化していく試みがなされている点も見逃がせない。

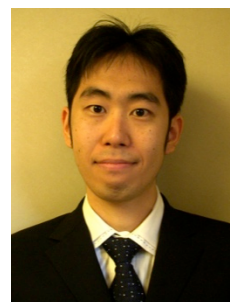
このように、生物や自然に学ぶという価値観に基づいて、異分野の研究者が直接に、またはデータベースを通して間接的に協働することが、バイオメティクスの基本的な方法論である。そして、バイオメティクスは生物の技術体系を解釈し、それを有効活用するという普遍的な意義をもつ学際的な学術領域として特徴付けられるものと理解している。

## おわりに

例えば、本物のタマムシとバイオメティクで工学的に模倣したタマムシは、構造も同じなら発現する機能—構造色—も同じなので、そこに新鮮な驚きはあっても、その模倣したタマムシという物体がバイオメティクスの本質とは言い難い。むしろ、タマムシの構造を解析して、それが構造色を発現する本質を捉えた上で、工学的な工夫を凝らしてその構造を再現するというプロセスにこそバイオメティクス研究の醍醐味があるのだと思う。この様に、対象を限定することなく、汎用的に通用するプロセスなりアルゴリズムを開発しようとするところに、数学者として魅力を感じている。

## (5) 国内研究動向紹介

所属班：公募班  
所属機関：東京農工大学  
指名：前田義昌



## 科学研究費「生物規範工学」全体会議

### ／JAMSTEC 合同講演会に参加して

「生物規範工学」全体会議、及び JAMSTEC 合同講演会が平成 28 年 3 月 3～4 日、沖縄県市町村自治会館 4 階にて開催された。初日は領域代表下村正嗣先生より開会の挨拶があり、5 年間の研究期間でバイオミメティクスへの注目度が高まってきた一方、期間内に研究成果をまとめ説明責任を果たす必要がある点など、最終年度に向けた取り組みについてお話しがあった。

その後、各班における研究成果と進捗の説明があった。A01 班からは野村周平先生（生物班）、溝口理一郎先生（情報班）が発表され、生物班では昆虫のモスアイ構造や構造色に注力して画像収集を行い、平成 27 年度に 4 千件以上の画像情報を情報班に提供された。また、昆虫の羽の表面を有機溶媒処理することで分泌物を溶解し、その下に隠れたクチクラパターンを露出させる技術を開発され、中南米生息する蝶（スカシジャンメ）やセミの羽の構造を詳細に解析した研究が報告された。情報班ではオントロジーの拡充と高機能化を手作業、もしくは半自動処理で行っており、生物班から提出されたテキストデータが追加されている。詳細な機能分解を行い、概念と関係を抽出することで、工学研究者がバイオミメティック・データベースを用いて新たな発想を得ることを支援している。B01-1 班からは大園拓哉先生、野方靖行先生が発表された。大園先生から、しわ構造のトライポロジーについて発表があり、最近の研究進捗として、柔らかい凹凸構造を作製し、しわのない平坦な状態に比した時の摩擦について検討した結果が報告された。野方先生からは流水条件化における生物付着評価に向けた取り組みが報告された。従来の生物付着研究は殆ど静水条件下で行われていたのに対し、流水実験用水路を構築し、付着珪藻を用いて生物付着性を評価した研究が紹介された。B01-2 班からは針山孝彦先生が発表され、サブセルラーサイズの生物表面研究の重要性について解説があった。特に、昆虫の最表面の素材はほぼ同一にもかかわらず、表面構造をほんの少し変えるだけで様々な機能を生み出している実例が報告された。B01-3 班からは細田奈麻絵先生、松尾保孝先生が発表された。細田先生からは魚類の吸盤構造や、泡をとらえて水中歩行を可能とするハムシの脚の毛状構造などについて報告があった。松尾先生からは、上記のハムシの脚を模倣した毛状構造のエレクトロニクスへの実装への取り組みとして、気泡を用いたチップ部品のセルフアライメント法の開発について報告があった。B01-4 班の光野秀文先生からは、昆虫の性フェロモンセンシングに関する研究が紹介された。大半の昆虫種は複数成分から構成される性フェロモンを利用しているが、コミュニケーションには、ホルモンの化学成分だけではなく、その比率が非常に重要であることが知られている。昆虫はどのように比率を感知しているの

かについて、性フェロモン受容体の遺伝子発現挙動から考察されており、非常に興味深かった。B01-5 班からは劉浩先生、木戸秋悟先生から発表があった。劉先生からは蜂の羽の構造が受動的に起こす運動により、余計なエネルギーを使わずに揚力を生み出していることが報告された。本成果により生物規範飛行システムとバイオミメティックデザインに関する研究の発展が期待される。木戸秋先生からはがん細胞の運動の表現型の評価について報告があった。上皮領域にいるがん細胞は、基底膜にもぐりこんでいくという通常の上皮細胞とは異なる 3 次元的な運動性を獲得する。そこで、弾性を制御可能なゲルマトリックスシートを作成し、細胞の浸潤過程を解析する手法が紹介された。C01 班からは石田秀輝先生、小林秀敏先生から、心豊かなライフスタイル・デザインとテクノロジーとを繋ぐデータベース構築、標準語彙によるライフスタイル検索などについて発表があった。

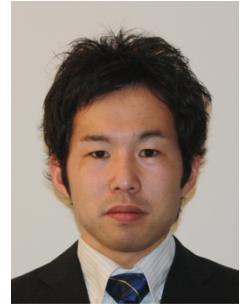
各班の研究報告の後、特別講演が 2 題発表された。まずは元北海道大学教授 辻井薫先生より「超撥水現象の温故知新-私の研究と生物の超撥水-」と題してご講演いただいた。「濡れ」を研究することから始まった界面化学の歴史から、人工フラクタル構造や生物表面の超撥水性など、界面化学の興味深い話題を幅広くご紹介いただいた。続いて、水産総合研究センター 赤松友成先生より、「海洋生物に学ぶセンシングとコミュニケーション」と題してご講演いただいた。赤松先生は海の中では遠くに存在する物体の情報を光により得ることができないため、音による情報収集がなされていることを紹介され、イルカの超音波エコーによるセンシングやクジラのコミュニケーションについてお話しいただいた。イルカは体を回転させながらエコーを発し、その反射から遠方の物体までの距離や方角のみならず、形まで識別できる。新たな魚群探索手法への応用も可能であるとのことである。

特別講演後、計画班各班 1 件ずつ、公募班から 12 件、合計 19 件のポスター発表があり、活発な議論が行われた。

二日目は、公開ジョイントシンポ“海洋資源メッカ沖縄で考えるバイオミメティクス”と題うち、第一部「海洋資源とバイオミメティクス」において一ピーバイオファクトリー株式会社金本昭彦先生から海洋資源ライブラリーの構築とそれを利用したビジネス展開について、海洋研究開発機構 白山義久先生より胴甲動物の多様性について、国立科学博物館の松浦啓一先生からアマミホシゾラフグの美しい産卵巣について、琉球大学 西田睦先生より国立自然史博物館を沖縄に設立する提言について、沖縄美ら海水族館 佐藤圭一先生より水族館における動物の長期行動観察の利点と生物の機能分析などについてそれぞれご講演いただいた。また、第二部「自己組織化とバイオミメティクスー良い加減さの起源」においては、九州大学 都甲潔先生より匂いと味を定量的に評価するセンサについて、神戸大学 尾崎まみこ先生よりアリの嗅覚器官の詳細な構造解析について、旭川医科大学 室崎喬之先生よりフジツボの接着と接着面の表面構造の関係について、東京理科大学 吉岡伸也先生よりモルフォチョウの鱗粉やクマゼミの羽の規則性の乱れについて、浜松医科大学 山濱由美先生からイソヘラムシの複眼構造やハマトビムシの曲がった個眼構造などについて、それぞれご講演いただいた。

筆者は平成 27 年度より本領域・公募班に採用されたため、全体会議への出席はまだ 2 回目であったが、毎回、生物が進化の過程で獲得した能力を解明し、それを工学的に発展させようという熱意を強く感じる。班内・班間連携も活発に行われており、学際的な研究協力の重要性についても強調されている。平成 28 年度は本領域の最終年度ということもあり、気を引き締めて研究にあたり、成果を発信できるよう努める決意を改めて固める次第であった。

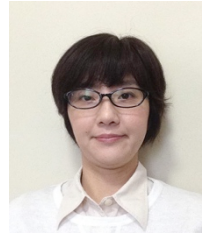
所属班：B01-5 班  
所属機関：東京理科大学工学部機械工学科  
氏名：青野 光



## 公開ジョイントシンポ「海洋資源メッカ沖縄で考えるバイオミメティクス」(沖縄平成 28 年 3 月 4 日)に参加して

沖縄県市町村自治会で「バイオミメティクス」に関する公開ジョイントシンポが行われた。当日は朝 9 時から夕方 16 時までと丸一日を活用し公開ジョイントシンポのテーマである「海洋資源とバイオミメティクス」と「自己組織化とバイオミメティクス」に関する招待・一般講演が行われ活発な議論がなされた。当日は本領域代表である下村先生(千歳科学技術大学)のご挨拶からスタートし、初めに金本先生(オーピーバイオファクトリー株式会社)による海洋生物資源を活用した事業展開についてのご講演があり、金本先生ご自身の企業の理由や海洋生物資源を活用した事業の現在の問題点や今後の可能性などについてのお話があった。続いて、白山先生(国立研究開発法人海洋研究開発機構)による海洋生物の自然史学に学ぶバイオミメティクスなどについてのご講演があり、海洋生物の多様性と海洋生物を対象とした生物規範工学の可能性などについてのお話があった。続いて、松浦先生(国立科学博物館)による新種のフグが作るミステリーサークルに関するご講演があり、フグに体長に比べて格段に大きいミステリーサークルの構造や構築することの意味などについてのお話があった。続いて、西田先生(琉球大学)による国立自然史博物館設立に向けての構想と最新の準備状況などに関するご講演があった。続いて、佐藤先生(沖縄美ら島財団 総合研究センター)による沖縄美ら海水族館が創り出す多様な資源とその活用についてご講演があり、育てられているマンタやジンベイザメなどについてのお話があった。続いて、都甲先生(九州大学)による生物模倣技術を用いた味と匂いを測るセンサ開発についてのご講演があり、味と匂いの概念化とそれらを計測可能する装置の開発などについてのお話があった。ハイブリットレシピはとても興味深かった。その後、4 つの一般講演があり、活発な議論が行われた。上述のように講演内容が多岐に渡っており、私はすぐに理解できない新しい話が多かったため、実りがあったシンポであったというのが個人的な感想である。引き続き今後もこのような興味深いシンポの開催を期待する。





## 漫湖水鳥・湿地センターでのフィールドワーク活動報告

2016年3月3,4日の全体会議の開催に合わせ、3月5日に漫湖水鳥・湿地センターで行われた漫湖周辺のフィールドワークとセミナーを行った。

漫湖は那覇空港から車で15分の市街地に位置し、国場川と饒波川の合流地に広がる干潟である。漫湖は貝や甲殻類などの多様な底生生物を基盤とする豊かな生態系を形成し、水鳥の重要な飛来地となっている。漫湖水鳥・湿地センターは、2003年「水と湿地と人を結ぶ場所」として開設され、2012年ラムサール条約に登録されたこともあり、漫湖の環境保全の重要拠点となっており、セミナー当日も朝から多くの小学生が訪れているなど地域のコミュニティとしても機能している。

前日まで行われた全体会議での沖縄らしい心地よい天候から一転、5日は朝から空が黒く、会場の集合時間に近づくにつれ、激しい雨と小雨が交互に続く、あいにくの天候に見舞われたが、本フィールドワークには23名もの班員が参加した。午前中は、鳥という同じ生物群を対象としていながらも全く異なる視点で研究を進める2名の先生にご講演いただいた。東工大の田中博人先生より「鳥類の飛翔」の題目で鳥の翼の形状を流体力学の観点から、山階鳥類研究所、森本元先生には「渡り鳥の生態」の表題で、遠距離を移動する様々な鳥の特徴を生態学の観点から紹介いただき、活発な議論が交わされた。

午後は、まず屋内展示室で水鳥センターの鹿谷法一氏の実際の鳥類や底生生物標本をご紹介いただき、漫湖についてのビデオ上映鑑賞の後、屋外にあるマングローブ林の中にある木道を通り干潟の観察を行った。その頃には幸いにして雨は止んでいたものの、天気の影響からか、残念ながら水鳥の飛来に遭遇できなかった。しかし、マングローブの胎生種子や膝根、そしてマングローブ樹皮上のオカミミガイや砂泥底に生息するミナミトビハゼやウミニナ、オサガニなどを観察し、マングローブ干潟のユニークな生態系を観察することができた。



Fig. 1 漫湖水鳥・湿地センター

所属班：公募班  
所属機関：千葉大学大学院工学研究科  
氏名：桑折道済  
開催場所：同志社大学



## 日本化学会 第 96 春季年会 (2016)に参加して

2016 年 3 月 24 日(木)～27 日(日)に日本化学会 第 96 春季年会 (2016)が開催された。本稿では、3 月 26 日(土)に行われたアドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP) 「バイオミメティクス (生物模倣) の最新動向 (オーガナイザー：下村政嗣領域代表)」午後のセッションについて報告する。

### ・混雑環境が作り出す高次機能：細胞の賢さを学ぶ

(同志社大生命医) 吉川研一

「エントロピーの増大が高秩序を生み出す」という概念が、混雑環境を利用した細胞サイズ空間での物質運動制御を例として、実験・理論的な観点から紹介された。

### ・メラニン顆粒から着想したコロイド粒子を用いる視認性の高い構造発色の実現 (千葉大院工) 桑折道済

孔雀等の鳥類の羽の発色機構を模倣した、メラニン顆粒を模倣した吸収のあるコロイド粒子を用いる高発色な構造色材料作製に関して報告された。

### ・バイオミメティクスへの期待と流体制御応用の可能性

(日立製作所) ○宮内昭浩・守谷浩志・宮崎真理子

企業としてのバイオミメティクス製品へのアプローチ, ならびに遊泳速度の異なる鮫体表の違いを流体制御可能な高機能表面創出へと応用する試みが紹介された。

・最先端分析評価技術とバイオミメティクス

(島津製作所) ○武内誠治・安居嘉秀

バイオミメティクス研究における最先端分析技術の重要性が、X線CT装置、走査型プローブ顕微鏡、質量顕微鏡等を用いた共同研究の具体例とともに紹介された。

・自己組織化表面微細構造のフジツボ付着期幼生に対する抗付着効果

(旭医化学教室・東北大院工・電中研・千歳科技大理工) ○室崎喬之・阿部賢太郎・神野達哉・野方靖行・下村政嗣

自己組織化ハニカムフィルム、ならびにそれらを基盤として作製される各種表面微細構造がフジツボの付着に与える影響について報告された。

・バイオミメティクスの社会実装に関する国際比較分析-特許と論文発表件数の関係性およびその背景要因に着目して-

(金沢大人間社会) ○香坂玲・内山愉太・藤平祥孝

バイオミメティクスに関連する特許出願件数および学術論文発表件数の関係性をもとに、日本、米国、欧州、中国の取り組み方の特徴が報告された。

最後に下村領域代表から挨拶があり、異分野連携によるバイオミメティクス研究の重要性、ならびに国立科学博物館で開催される企画展の案内が再度あり、盛会のうちに終了した。

2016年3月26日(土)  
日本化学会第96春季年会(同志社大学 京田辺キャンパス)  
アドバンスト・テクノロジー・プログラム(ATP)

(国研 産業技術総合研究所) 穂積 篤

最初に下村領域代表より、本ATPセッションのこれまでの経緯と趣旨についての説明があった。続いて、最近のNature誌に、バイオミメティクスの重要性を示唆する記事が掲載され、論文数も右肩あがりに増えているとの紹介があった。最後に、この分野を成功させるためのキーワードは“異分野連携”であることを、再度、認識するよう訓示を頂いた。



1) 農学におけるバイオミメティクス～農学と工学の新たな接点～  
森直樹先生(京大)

昆虫の行動を制御する性フェロモンとその工業用途に関する興味深い講演であった。ガ類昆虫におけるフェロモンブレン드의受容機構の解明を目指し、異なる構成比率(2～4成分)から構成されるフェロモンブレードを利用するガ類から性フェロモン受容体の同定を試みたところ、2成分系を利用するヒメアトスカシバ(Nokona pernix)から各成分に対する性フェロモン受容体が同定され、触角上で各受容体を発現する嗅覚受容細胞(ORN)の割合がフェロモンブレン드의構成比率とほぼ一致することが明らかとなった。これにより、複数成分のガス成分を検出するセンサーに応用できる可能性が出てきた。



続いて、ガ類幼虫に食害されたダイズ(エンレイ)がイソフラボン類(daidzeinやformononetin)を葉に蓄積し、Daidzeinが、ハスモンヨトウ(ガ類の一種)の幼虫の生育阻害活性を示すことを利用した害虫駆除技術に関する報告がなされた。幼虫の唾液にはダイズ葉におけるイソフラボンの生合成を活性化する化学因子(エリシター)が含まれており、それがN-linolenoyl-L-glutamineとそのリノール酸類縁体であることが明らかとなった。この手法を利用して、害虫抵抗性のダイズ品種の選抜・育種に利用することが可能となった。

2) 微粒子安定化ソフト分散系が拓くバイオミメティック材料  
～粉体状粘着剤の創出～

藤井秀司先生(大工大)

これまでの粘着剤は、薄膜状(テープ)やスプレー形式が主流だった。本研究では、アブラムシ(アリマキ)が作るリキッドマール(固体ワックス粒子が蜜を被覆)に着目した、圧力応答型粘着剤についての紹介があった。水分散系の粘

着剤粒子には、一般的な粘着剤であるポリブチルアクリレート（PBA）を用い、オクタデカノイックアシッドで疎水化処理した炭酸カルシウム粒子で被覆した後、水を蒸発させることでリキッドマーブルを作製した。タックテストで得られた接着強度は、押し付ける圧力が大きくなるほど接着強度が上がる（濡れ広がるため）。また、炭酸カルシウム粒子は凝集力をアップさせていて、フィラーとして働いていることが明らかになった。

さらに、鉄系の粒子にかえれば磁石でリキッドマーブルをマニピュレーションできる。リキッドマーブルを形成するための粒子サイズは？、リキッドマーブルのサイズ制御は可能か？鉄系粒子の場合もフィラーとして働いているのか？、熱等を利用すれば再利用可能なのか？等、会場から多くの質問があった。



### 3) モルフォ蝶を模倣した製品開発

広瀬治子先生（帝人）

モルフォ蝶の翅の構造と発色（青色）メカニズムの説明から、実際のものづくりへの展開についてわかりやすい説明を受けた。高分子材料の選択には、界面剥離しない、糸にしやすいこと、を前提に、高屈折率ポリマーとしてPET、低屈折率ポリマーとしてNylonが選択された。しかし、実際にはこれらの屈折率の差が小さいため、積層数を増やすことにより発色を実現した。その他、口金の設計、糸の熱収縮による断面収縮の抑制、生産性アップなど、様々な工夫がなされており、実用化までの苦労がよく理解できた。また、最近ではモルフォ蝶を模倣した繊維からフィルムの生産にシフトされており、すでに扇子、ボトルや缶などの装飾フィルムなどに利用されているとのこと。会場から、開発に関わった他企業の具体的な役割に関する質問が出た。



### 4) ナノスーツ法によるリアルな生物表面観察のバイオミメティクスへの展開

高久康春先生（浜松医科大学）

ナノスーツ法の原理（ECS擬似溶液塗布後、プラズマ/電子線照射後に観察）、特長の説明の後、これまでの生物表面の観察事例の紹介があった。擬似溶液としてイオン液体を用いたところ、粘性が高いため薄い膜が出来ない、毒性が高い、等の理由から生物表面観察には向かないことがわかった。また、SSE溶液を用いる新しいナノスーツ法は、高いバリア性があり、膜厚はわずか10nmにも関わらず、これまで困難であった線維芽細胞の観察が可能となった。観察後も線維芽細胞にダメージはなく増殖することが確認された。





所属機関： 大阪大学大学院 工学研究科  
氏名： 齋藤彰



## Biomimexpo 2016 (7/1~2, Senlis, France) 参加報告

パリ近郊、中世の香る街サンリス（Senlis）における Biomimexpo 2016<sup>1)</sup>開催は一つの事件であった。核となる組織 CEEBIOS（Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis）<sup>2)</sup>と Senlis 市は、それぞれバイオミメティクス産学官コンソーシアムといわばその地主であり、市が譲渡された 10 ha もの仏陸軍跡地を提供して 2012 年、組織が発足した。両者にまたがる運営はコンサルタント会社 NewCorp Conseil が請負い、本 Expo でも仕切り役である。Senlis 市はすでに「科学の祭典」などをたびたび開催しているが、本件はフランス初の、本格的なバイオミメティクス展示・講演会である。その規模はそうそうたる共催・後援リストからもうかがえる（政府や地方行政府に加え、金融公庫や複数の財団、各種の政令産業拠点、大企業群、政府系の環境コンサルや環境協会、仏国立自然史博物館、Biomimicry Europa 等）。以後、人名の敬称は略す。

7 月 1 日朝の幕開けは、Senlis 市長 Pascale Loiseleur の開会挨拶に続き、環境・エネルギー・海洋省 Barbara Pompili 生物多様性担当大臣の 15 分近い熱弁であった。行事を通して、主な司会は上記 NewCorp Conseil 理事 Alain Renaudin が務めた。その後すぐ、開会プレナリーで 5 人が登壇し、個別プレゼンを少し挟みつつ、活発なパネル討論と質疑応答が 1 時間続いた。議題は「生物多様性、持続可能な新しい成長に向けた発想と技術革新の源」で、役者は大臣（環境・エネルギー・海洋省）付き科学補佐官（前・仏国立自然史博物館長）、オ・ド・フランス地域圏の副知事、北仏商工会議所代表、コレージュ・ド・フランス教授、Matikem 社（化学材料系の政令産業拠点）統括部長である。Renaudin の司会技術も高く、各人の熱い話しぶりが印象的であった。

まだ初日午前の半分だが、上記の人物ラインアップが示す通り、本 Expo の特長は優れたバランス感覚である。産官学からの的を得た人物を、ほどよい均衡で配置し、専門的な内容にはショートプレゼンを個別に設置。長い講演で退屈させることも、弛緩したパネル討論も避け、最後に 15 分ほど聴衆との対話時間を長めに設けた。つまり「人選」「発表&討論」「聴衆との双方向性」そして「テーマ選び」など配慮が絶妙で、練られた構成だった。この傾向はプレナリーに限らず、最後まで全セッションに通じて言えることで、それに応えるように産・官・学それぞれの役者も各セッションでうまく協働していた。そしてラテン系には珍しいほど時間進行も守られていた（閉会時のみ例外）。

初日午前の続きは、趣変わって異業種大手 4 社（Air Liquide=ガス事業、L'Oréal=コスメ、Dassault Systèmes=3D 技術、Eiffage=建設）による「産業面のバイオミメティクス紹介」各 30 分で、前項の方針を保持しつつ、各社複数の担当者が壇上に立った。ここまでは単独セッションで、昼休みの後、2 会場同時の平行セッションが 2 コマ（講演は計 20 件）続いた。平行なので実見は片方のみだが、1 コマは出色の主題でバイオミメティクスと建築・都市・農業である。これは特に「モノ偏重」「単発的」な日本には欠けた視点で、参考になった。採光から流通（人、物さまざま）、循環から水利・気候・エネルギー効率化まで、総合的システムの範として生物・生態系を見る感覚には彼我の違いを痛感した。さらにそれらと農業を結ぶ視線は、農業国フランスの面目躍如である。ほかのセッションは先端研究の紹介、教育の展開などにわかれ、平行終了後は翌日まで、全て単独セッションであった。この時点で夕方 5 時半だが、最後の統一セッションは「生物から学んで、どう生物多様性にお返しができるか」の題で発表・討論がなされ、軽妙な閉会トークの後、19 時から軽食、20 時から晚餐となった。

晚餐も含めて紹介事項は多々あるが、紙幅の都合で詳細は省く。最終的に 2 日で 40 件超の講演、同時に展示約 30 件、CEEBIOS 施設見学、等が行われた。平行会場 1 棟を除き、会場は基本的に大講堂（むしろ大きな体育館）1 棟でまかない、建屋を 2 分して 1 つがメイン会場、残りが展示会場で、無駄な分散がなく助かった。会場の壁は著名写真家による多様な生物の美しい大判写真パネルで埋まり、展示は製品・研究や書籍のブース形式である。屋外にも会場前広場に大学等 10 件程のテント展示があり、CEEBIOS 施設見学はおもに 2 日目昼前が当てられた。構成として、初日はある程度専門に近い人々、2 日目は一般市民向けである（2 日目の主題は CEEBIOS のさまざまな取組み、バイオミメティクスの広汎な紹介、エネルギー問題、を論じ、最後は海洋利用が中心のセッション）。

自然豊かで明媚ながら鄙の古都ともいえる Senlis に、一般市民を含み参加者千人近くが訪れ、会場は人で溢れていた。CEEBIOS では地場の中小企業参画も進んでいる。また産学・行政に加えメディアの協力も目につく（放送・出版関連が後援に名を連ねる）。中でも映像シリーズ Nature=Futur！<sup>3)</sup> は必見である（仏国立自然史博物館・CEEBIOS・CNRS 等の協力で制作されたバイオミメティクス紹介ビデオ。各 5 分程度×30 本で構成）。

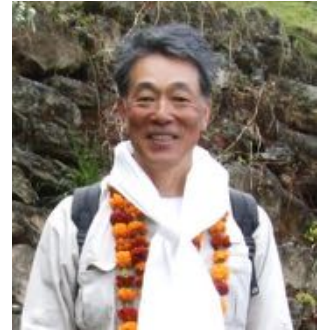
個人レベルの交流も印象的で、初日に雑談した学際専攻の大学院生はなんと生物学＋材料学＋環境学を同時に専門とし、2 日目たまたま昼食を共にした親子はバイオミメティクスに関心ある受験生リセエンヌと両親だった。かように CEEBIOS のモットーを地で行く「教育・市民にも広く生きるバイオミメティクス」の例に触れ、バイオミメティクスの明日の姿を体現する交流を実体験し、大学人として参考になったが、衝撃は大きかった。来年の続編予定もあり、このショックを早く癒し、かつ活かせるよう、新たなアイデアの源としたい。

1) <https://biomimexpo.wordpress.com>

2) <http://ceebios.com>

3) <https://vimeo.com/channels/naturefutur>

本稿は、1991 年 6 月から 8 月まで 10 回にわたり、北海道新聞のコラム「オーロラ」に連載された下澤楯夫先生の文章を基にしたもので、北海道新聞社の了解を得て掲載するものです。



1991 年 6 月 10 日(月)

「エレキテルから電気」

こはくを毛皮でこすると、軽い物を引きつける不思議な力を帯びる。これをエレクトリシティと名付けたのは物理学者ギルバートで、1600 年ころのことである。こはくの輝きを、トロイ戦争の英雄アガメムノンの娘のエレクトラの美しさにたとえたのであった。

平賀源内はエレキテルをそのまま使い、福沢諭吉も明治初頭まで越列機篤児(エレキトル)を使っている。いつのまにか電気に置き変わり、今では日常語になっている。

では、電気を知る前の電は何だったのか。電はイナズマ(ピカッ)、雷はカミナリ(ゴロゴロ)である。エレキテルを電気と訳した人は、この不思議な気力がこはくの光輝と関係があることや、嵐の日にたこを上げて雷電の正体が電気であることを明かしたフランクリンの実験を知っていたに違いない。残念ながらこの訳は、日本ではなく中国でなされたい。

神経という言葉も、オランダの解剖図譜を解体新書として訳出した前野良沢らによる新造語である。原語ではネルフェンで、単に糸とかスジという意味である。同じ系列の欧語にナーブ、ノイロ、ニューロがある。昆虫学では、クサカゲロウの仲間をニューロプテラという。ニューロはスジ、プテラは羽の意味なので、脈翅(みゃくし)目と訳している。

訳語としての神経では、経が糸の意味を表しているが単なる糸ではなく、たていと、筋道、道理、教えといった意味が入っている。神にはもちろん心や命の意味が込められている。神経系に関する今日の知識に照らしても卓見という他はない。

このごろ、ある電気メーカーは神経の働きをまねた製品にニューロアンドファジーのうたい文句をつけている。前野良沢らが聞いたらどう思うであろうか。

1991 年 6 月 24 日(月)

「カエルとカミナリ」

1786 年のある嵐(あらし)模様の日、イタリアの解剖学者ガルバーニはカエルでカミナリを予知しようとしていた。彼は、当時ヨーロッパで大流行の摩擦起電機を持っており、新鮮な食用カエルの肉(皮をはいだ下半身)は電気に敏感で、起電機からかなり離れていても筋肉が縮むことを知っていた。

フランクリンの実験(1752 年)のとおり雷の本性が電気なら、嵐の前の空中には電気が多くなるだろう。こう考えたガルバーニは、高感度の電気の検出器として皮をはいだカエルの下半身を銅のかぎにかけ、ベランダの鉄格子につるした。

空中電気に対する反応はみられなかったが、風にあおられてカエルが揺れ、脚の先が鉄格子に触れるたびに脚がピクリと持ち上がる。これをみたガルバーニは、筋肉は電気を出しており、銅や鉄を通して電気が流れると縮むのだという「生物電気」説を発表した。

これに対し物理学者ボルタは、銅と鉄が触れ合うと電流が起こり、これが筋肉を縮めるという「金属電気」説を出し、激しい論争になった。この論争は塩水を銅板と亜鉛板ではさんだボルタの電池の発明で一応の決着を見た。電池のおかげで電流の磁気作用が見つかり、電流計が発明されて電気技術の時代が始まった。

ガルバーニの偉さはその後にある。彼は屈服せず、弟子とともに生物電気の証明に力を注いだ。今日では生物の細胞は活動するとき電気を出すことがよく知られ、心電計や脳波計など医学的診断に使われる。これらに使う高感度電流計はガルバノメーターと呼ばれる。

ガルバーニは当初の説明こそ間違えたが、結果的にはわれわれに電気についての科学を生む力を与え、さらに生物の仕組みを解きあかす科学へも導いてくれた。今、われわれの研究室では、神経細胞 1 個が出す電気を手がかりにして脳神経系の仕組みを調べている。

1991 年 7 月 1 日(月)

「電気と生命力」

わが国初の摩擦起電機である平賀源内のエレキテルには握り棒が付いていて、体の中を電気が流れるときの奇妙な感覚を体験させるようになっている。いわば、肩こり治療機である。源内がエレキテルを作ったのは 1776 年であるが、それより 11 年前、後藤梨春が紅毛談(おらんだばなし)を著し、「オランダにはエレキテリという機械がある。その原理は女の人が夜にくしで髪をすくと火花がとぶことがあるのと同じで、そんなに怪しいことではない。人の命とも関係が深く、病気にも効く」と、起電機を絵入りで紹介している。

前回話題にしたように、電気をかけると死んだカエルが動く。古今東西を問わず、動くことは生きているあかしである。今の脳死問題も、心停止、呼吸停止がなければ人の死と認めたくないところに発端がある。カエルだけでなく、死んだ人間も電気をかけると動く。あたかも電気には生命力に転換可能な気力があるようにみえる。

フランケンシュタイン博士の怪物という映画がある。博士が死体をいくつか縫い合わせて、起電機で電気を与えたが、生き返るまでには至らない。その後、あらし模様だった空にイナズマが走り、起電機に落雷する。落雷によって十分な電気が与えられ、怪物は生き返り、暴れ出す。このように、かつて電気は生命力と同義であった。ヨーロッパでは人の死後、起電機にかけても動かなくなるまで埋葬が許されなかった時代があるという。

今、救急蘇生処置や心臓移植の後など、小さくうごめく細動状態や止まってしまった心臓を正常な拍動に戻すためには、皿のような金属盤で心臓や胸をはさんで電気ショックを与える。やはり電気は生命と深い関係にある。

1991 年 7 月 8 日(月)

「コウモリのたたり」

コウモリは、超音波を出して返ってきたこだまを聞き、障害物やえさを探知するソナーの能力を持っている。20 年前、その仕組みを調べるため、コウモリの聴覚神経に電極を刺しこむ実験をくり返し、100 匹以上犠牲にした。

月曜の朝、コウモリに麻酔をかけ、頭蓋(がい)骨を露出し、実験装置に取りつける。麻酔から醒めたコウモリの頭蓋骨を小さくはがして脳の一部を露出し、タング

ステン線の先を 0.01 ミリにとがらせた電極を脳に刺しこんで神経細胞が出す電気信号を記録する。

超音波を聞かせながら、電極の場所を少しずつ変え、脳のどこの神経細胞はどんな音に反応するかの地図を作る。神経細胞は見えないので、記録される電気信号だけを手がかりに、いわば手探りで電極を動かす。神経細胞 1 個を捕えるのに 1 時間ほど、その性質を分析するにはさらに 1 時間はかかる。

夕方、中断して食事をとり、明け方 3 時ごろまで実験を続ける。コウモリを実験台に残して家に帰り、仮眠と朝食をとり 9 時に実験室に戻る。その間に、ヨウモリもえさをもらう。また、記録と分析の 1 日が始まる。

水曜の晩になると、寝不足のためミスが多くなり、木曜にはさらに多くなって、実験を続けられなくなる。コウモリに手を合わせて死んでくれるよう拌み、麻酔薬を過剰に注射する。

金曜はただ眠り、土曜はデータを整理する。こんな生活をして給料をもらい、子供を育てた。

3 年前から、右の耳が聞こえなくなった。きっとコウモリのたたりには違いない。あのときは自分の辛さだけで、コウモリも眠いとは考えなかったし供養もしていない。

1991 年 7 月 15 日(月)

「リバースエンジニアリング」

物や力を新しく作り出すことを、エンジニアリング(工学)と言う。普通は、どうやって作るか、何をどう加工するかといった知恵を集めて設計図を描き、それに従って物を作る。

いくら考えても設計図を描けないこともある。このとき、一つでも手本があれば、分解し、中身を見て、作り方を探る。この作業は、製品から設計図を作るのでリバース(逆向き)エンジニアリングと呼ばれる。要するに物まね、設計を盗むことである。

科学のレベルが低ければ、たとえ手本があってもその設計を読みとることはできない。逆向き工学は順当な工学より高いレベルの科学を必要とする。日本は昔からこの能力に優れ、種子島に流れ着いたポルトガル銃をたちまち国産化した。最近では、お手本よりも安く製品を提供したため、基本設計に費用をかけた欧米から、日本はただ乗りしていると非難を受けている。

物まねは人類共通の特質であり、文明を広げる原動力である。欧州が中世の暗黒から抜け出すとき、アラビア世界が受け継いできたギリシャ、ローマの文化をまね、ルネサンスと呼んだ。

鳥のように空を飛びたいと願った人々は、鳥の翼や羽ばたきを調べ、飛行機を作りあげた。今では、人が鳥になれるハンググライダーもある。自然から設計を盗んでも、自然は人を非難しない。

これまでの工学は、この自然がどんな材料でできているかを調べる物理と化学に頼ってきた。自然の中にどんな設計があるかを調べるのは生物学である。われわれは今、しなやかな機械や話ことばの分かる機械を作るため、生物の体や神経系をリバースエンジニアリングしている。



1991 年 7 月 22 日(月)

「サイバネティクス」

動物の体では、血糖値や酸性度、体液濃度などがある範囲に調節され、また周りの状況にあわせて体の動きが制御されている。このような情報機械としての動物の体の仕組みを調べる工学をサイバネティクス(生体情報工学)という。

この世の中には、人間の自由になる量と、ならない量とがある。では、自由にならない量の過去の様子を参考にしていじれる量を調節し、望ましい状態をもたらす方法はないだろうか。

このような問題を考える科学として、ノーバート・ウィーナーはサイバネティクスを提唱した。人間の力をはかるに越えた波や風を読んで、舵や帆を操り、船を目的の港までもって行く舵手(サイバネート)にちなんでのことであった。

この考え方は、機械は力強ければ良いという古典的な工学を、自動制御の研究へ向けさせた。今ではほとんどの機械に計測制御装置が組み込まれ、使い易くなっている。

様々な力のもとで、自分を望ましい状態にもっていくことにかけては、機械より生物の方がはるかに先輩である。動物の本能の仕組み、つまり生き方に関する遺伝情報を行動に変換する装置としての神経系を調べる生物学に神経行動学がある。

実は、サイバネティクスと神経行動学は同じことを調べている。ウィーナーは「動物と機械における通信と制御」という副題をつけて、工学と生物学の融合を説いている。しかし、工学と生物学は全く違う分野で、使う言葉も違う。工学者はヌルヌルした生き物をどう調べて良いのか分からず、生物学者は情報理論に弱い。

今私は、それぞれの分野を修めた若い頭脳を一つの部屋にいれ、工学と生物学の同時通訳をしながらかき混ぜている。そのうち、うまい具合に混ざることを願いながら。

1991 年 7 月 29 日(月)

「飛んで火に入る」

重力方向を感じる平衡感覚に異常をきたすとめまいを起こし、立っていることもできない。飛行機の操縦には不可欠で、もしパイロットがめまいを起こしているのを知ったら、だれもその飛行機には乗らないだろう。

しかし、空を飛ぶ動物の代表選手みたいな昆虫には平衡感覚器がない。動物の中で最初に空へ進出した昆虫が、その後何億年にもわたって、ずっと欠陥操縦士だったはずもなく、別の方法で飛んでいる。

昆虫の頭には、大きな左右の複眼のあいだに単眼と呼ばれる小さな眼が三つ付いている。この単眼が、地平線を検出して体を水平に保つ働きをしている。

単眼は、レンズの機能が弱くボケた像しか結べないが、明暗とくに紫外線を感じる力は強い。

空からくる光には青い光が多く、なかでも紫外線は昼夜を問わず降り注いでいる。地面や草木はほとんど紫外線を反射しないから、紫外線の多少は上下として使える。

昆虫は単眼で紫外線を測りながら飛んでおり、暗く感じている単眼の側の羽ばたきを強めて、そちら側を持ち上げる。つまり、自然光のもとでは三つの単眼が同じ明るさを感じるように羽ばたけば、水平に飛ぶことができるのである。

自然光を頼りに夜間飛行している昆虫が、街路灯や焚火(たきび)の横を通りかかると、こまったことになる。片側の単眼に灯からの光が入るので、その反対側を上げようとして羽ばたき、灯に背を向けてしまう。昆虫は羽ばたきで腹の方向へ空気

のジェットを吹き出しているから、螺旋を描いてどんどん灯に近づくことになる。

夏の夜、明かりに集まる昆虫は光が好きなのではなく、人間の作りだした世界に翻弄(ほんろう)されているのである。

1991 年 8 月 5 日(月)

「虫の世界」

風の穏やかな夕方、クモの糸がゆっくりとたなびいていることがある。糸のはしには小さなクモの子がつかまっている。空気には粘性があって、長い糸の周りにはかなりの量の空気が付いているので、クモの子は大きな空気の塊につかまって風に乗り、旅をするのである。

このように、体の大きさがわれわれに比べて極端に小さい動物では、われわれの日常を支配している力とは別な力を利用できる。

夜、動き回っているゴキブリは光をあてても逃げたりはしない。しかし、動くものからは器用に逃げ回り、スリッパや丸めた新聞紙でたたこうとしてもうまくゆかない。夜行性の彼らは動く相手を光に頼らずに知る手段として、空気の流れを感じている。

新聞紙を振り上げると、周りの空気がそれにつれて動き、ゴキブリは新聞紙が来るはるか以前に逃げるべき方向を割り出している。コオロギをつかまえようとして手を突き出したときも同じことが起こる。

昆虫の神経系は 100 万個ほどの神経細胞で出来ているが、その 90%は外界をとらえる感覚細胞で、中枢では残り 10%の神経細胞が情報を整理している。これに比べて、われわれ脊椎(せきつい)動物では約 1 兆個の神経細胞のうち感覚細胞は 0.01%にも満たない。神経細胞の大部分は中枢にあって少ない情報をもてあそんでいる。

神経細胞の数で動物の優劣は決まらない。ファーブルが昆虫記で紹介しているように、彼らも実にさまざまな芸を持っている。むしろ彼らの身の丈にあった場所をうまく見つけては、脊椎動物よりも多く長く繁栄している。

どんな場所でどんな仕組みが生き残るのかを調べるのも、この世界を知るために必要なことである。

1991 年 8 月 12 日(月)

「基礎科学」

研究者の仕事は、あることを調べて論文を書き、世間に公表することであるが、手間のわりには大儲けの少ない業界である。研究成果が売り物になる(専門誌に載せてもらえるということ)ためには何か新しさが無いといけない。穴場だと思って仕事を始めてみたら、難しいからだれも手を付けなかったのだということが分かったりする。

名の通った専門誌に論文を投稿すると、2~3 人のレフェリーが読んで、可否を判定する。レフェリーはより良い仕事を求めるから、いろいろケチを付けてくる。レフェリーと外国語で戦って切り抜けるのは、かなりしんどい。

自分がレフェリーに指名されたとき、つい厳しいことを言うてしまうのは、けっして腹いせではなく、科学のレベルを保つためである。

ところで、学者の話がこむずかしいせいもあるが、最近の社会には、人間の役に

立つ科学技術だけを厚遇し、その基礎である科学そのものを育てようとしない風潮がある。

基礎科学は直接に役立つ物を作り出したりはしないので、それを支えるのは世の中の人々の好奇心だけである。世の中の人々の好奇心が薄れると、基礎科学を支える力が弱まり、50年後の応用の基盤を失う。また、基礎研究なしに応用を急げば、公害のように50年後100年後の子孫にまで重いツケを残す。

マイケル・ファラディは電磁誘導(発電機やアンテナの原理)を発見して、アインシュタインにいたる物理学の基礎を築き、電気工学の父と呼ばれる。そのファラディが「そんなことを調べて何の役に立つのか」と聞いた人に、「やっと立って歩けるようになった赤ん坊に、将来何になるつもりかと聞くようなものだ」と答えたという。

1991年8月19日(月)

「閉じている脳」

娘がまだ小さかった頃、うたた寝をしてしびれた腕を私の腕におしつけて、「ねっ、こんなにしびれているの」と言った。

いくら親子でも、神経はつながっていないので他人の痛みや辛さを直接感じることは出来ないこと、われわれの感じるものがそのまま外の世界にある訳ではないことを教えたが、強いしびれを感じてくれない父親に幼い娘は不満そうだった。

脳は幾つもの部分で、並行して別の仕事を処理している。例えば、コウモリの聴覚系では、自分が出した音と標的から返ってきた音の高さを比べる部分がある。音の高さは相手の速度で変わるので、ここはまるで速度計のように見える。別の場所には、音を出してから戻ってくるまでの時間を分析する細胞が順に並んでおり、距離計のように見える。

コウモリの脳の活動を見れば、どこからどのくらいの速度で標的が近づいているかを読み取れることになる。しかし、読みとるのは同じ脳の別の部分であり、そこでの分析をまた別の部分が読みとる。このように、動物の脳は閉じた世界を作っており、信号のたらい回しが脳全体としてつじつまのあったものに落ちついたとき、外の世界が認識されたことになるのであろう。

超電導磁気センサを用いて、人の脳の働きを調べている北大応用電気研究所の栗城眞也教授によれば、われわれの脳にも音を分析する小さな部分が並んでおり、「バ」を分析する部分は「パ」のところより1センチほど前のほうにあるらしい。

そのうち、「パパ」と「ババ」の音からなぜ違う顔を思い浮かべるのか、脳の中での読みとり経路が分かるかも知れない。そのとき、話し言葉の分かるロボットの設計も出来ることになる。

## (6) 新聞・報道

## 【新聞・報道】

### 総括班

- (1) テレビ東京 ワールドビジネスサテライト (2016 年 4 月 18 日)  
独立行政法人国立科学博物館、科研費新学術領域「生物規範工学」主催の国立科学博物館上野本館にて開催中の企画展「生き物に学び、暮らしに活かす 博物館とバイオミメティクス」がテレビ東京・ワールドビジネスサテライトにて放送され下村政嗣研究代表(千歳科学技術大学)、篠原現人先生(国立科学博物館)が出演しました。
- (2) 日経産業新聞 (2016 年 5 月 12 日)  
「「生物模倣」海外開拓で利点 製品に応用、国際規格定まる  
高分子学会 常務理事 平坂雅男氏」  
平坂雅男先生(評価グループ)が掲載されました。
- (3) 読売新聞 (2016 年 6 月 26 日)  
「サイエンス View 「生物の特徴 まねて新製品」  
電子顕微鏡で細かく観察、 人類の課題 解決へヒント」  
下村領域代表、石田秀樹先生 (C01 班)、野村周平先生 (A01 班) のコメントが掲載されました。
- (4) 日経産業新聞 (2016 年 7 月 4 日)  
『知を拓く 九州大特別主幹教授 国武 豊喜氏  
「細胞膜」を再現 人工化合物から作製 研究者の道、奨学金が後押し  
自然の力でモノ作り VB 設立、自己組織化を応用 半導体、燃料電池にいかす』  
国武豊喜先生(評価グループ)が掲載されました。
- (5) NHK BS1 キャッチ！世界のトップニュース (2016 年 7 月 8 日)  
「生き物に学ぶ最先端技術」  
下村政嗣領域代表が電話出演されました。
- (6) 石油化学新聞 (2016 年 7 月 25 日)  
”「生物に学び新たな技術」バイオミメティクス” と題する記事において、帝人のモルフォテックス、三菱レイヨンのモスマイトなど、我が国で開発されているバイオミメティクス製品と、高分子学会バイオミメティクス研究会、バイオミメティクス推進協議会の活動が紹介されました。  
広瀬治子先生(産学連携 G)、魚津吉弘先生(産学連携 G)

### A01 班

- (1) テレビ東京 ワールドビジネスサテライト (2016 年 4 月 18 日)  
独立行政法人国立科学博物館、科研費新学術領域「生物規範工学」主催の国立科学博物館上野本館にて開催中の企画展「生き物に学び、暮らしに活かす 博物館とバイオミメティクス」がテレビ東京・ワールドビジネスサテライトにて放送され下村政嗣研究代表(千歳科学技術大学)、篠原現人先生(国立科学博物館)が出演しました。



- (2) 読売新聞 (2016 年 6 月 26 日)  
「サイエンス View 「生物の特徴 まねて新製品」  
電子顕微鏡で細かく観察、 人類の課題 解決へヒント」  
下村領域代表、石田秀樹先生 (C01 班)、野村周平先生 (A01 班) のコメントが掲載されました。

## B01-2 班

- (1) テレビ東京 ワールドビジネスサテライト (2016 年 4 月 18 日)  
独立行政法人国立科学博物館、科研費新学術領域「生物規範工学」主催の国立科学博物館上野本館にて開催中の企画展「生き物に学び、暮らしに活かす 博物館とバイオミメティクス」がテレビ東京・ワールドビジネスサテライトにて放送され下村政嗣研究代表(千歳科学技術大学)、篠原現人先生(国立科学博物館)が出演しました。
- (2) 理系マイナビ (2016 年 6 月 8 日)  
理系マイナビ SPECIAL INTERVIEW vol.28. 「主流の研究分野に飛びついても、一人前になった頃、その分野は食い尽くされているはずだ」  
針山孝彦先生 (B01-2 班)
- (3) Newton 8 月号 (2016 年 6 月 25 日)  
「ミクロな構造が生む色彩美光を操る、自然界の魔術師たち」が掲載され、吉岡伸也 (B01-2 班) らが取材協力しました。構造色の仕組みやそのバイオミメティクス製品が美しい写真と共に紹介されました。  
吉岡伸也先生 (B01-2 班)、広瀬治子先生 (産学連携グループ)
- (4) 中日新聞 (2016 年 07 月 22 日)  
「生き物に学ぶ ものづくり」浜松科学館「生き物から学ぼう！展」記念講演会開催  
針山孝彦先生 (B01-2 班)

## B01-3 班

- (1) 日刊工業新聞 (2016 年 3 月 17 日)  
「平成 27 年度永井科学技術財団賞 技術賞  
「汎用元素を利用した接触角ヒステリシス制御による高滑落表面の創製」」  
穂積篤先生 (B01-3 班) が掲載されました。

## C01 班

- (1) 読売新聞 (2016 年 6 月 26 日)  
「サイエンス View 「生物の特徴 まねて新製品」  
電子顕微鏡で細かく観察、 人類の課題 解決へヒント」  
下村領域代表、石田秀樹先生 (C01 班)、野村周平先生 (A01 班) のコメントが掲載されました。

## 公募班

- (1) Welt der Physik (ドイツ) (2016 年 3 月 17 日)  
「Gefüllte Mikrokugeln mit Licht gesteuert」  
<http://hackaday.com/2015/11/15/powdered-glue-sticks-when-squished/>  
藤井秀司先生（公募班）が掲載されました。
- (2) NewScientist (イギリス) (2016 年 4 月 13 日)  
「Laser-driven liquid marbles can push 150 times their own weight」  
<https://www.newscientist.com/article/2084124-laser-driven-liquid-marbles-can-push-150-times-their-own-weight/>  
藤井秀司先生（公募班）が掲載されました。
- (3) Gizmodo (2016 年 4 月 13 日)  
「Laser-Powered Balls Can Haul Heavy Loads Across Water」  
<http://gizmodo.com/laser-powered-balls-can-haul-heavy-loads-across-water-1770686574>  
藤井秀司先生（公募班）が掲載されました。
- (4) Gizmodo India (インド) (2016 年 4 月 14 日)  
「Laser-Powered Balls Can Haul Heavy Loads Across Water」  
[http://www.gizmodo.in/science/Laser-Powered-Balls-Can-Haul-Heavy-Loads-Across-Water/articleshow/51811354.cms?utm\\_source=GIZ&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=GIZMODO](http://www.gizmodo.in/science/Laser-Powered-Balls-Can-Haul-Heavy-Loads-Across-Water/articleshow/51811354.cms?utm_source=GIZ&utm_medium=feed&utm_campaign=GIZMODO)  
藤井秀司先生（公募班）が掲載されました。

## (7) アウトリーチ活動

## 【アウトリーチ活動報告】

- (1) 2016年3月24日(木)～27日(日)に同志社大学 京田辺キャンパスで開催される日本化学会 第96春季年会 ATP セッションにおいて”バイオミメティクス(生体模倣)の最新動向”に関するセッションが企画されました。  
ATP セッション T2 話題の技術 ～実用化のカギを握る新素材～  
Topical Technology – New Materials Holding the Key to the Practical Use (サブセッション) バイオミメティクス(生体模倣)の最新動向／New Trends in Biomimetics
- (2) 2016年3月19日(土)～2016年4月7日(木) 科学技術館 4階 4D イベントスペースにて『春休み特別展「海！！未来をひらく！海からの贈り物」』が開催されました。
- (3) 2016年3月22日(火) 政策研究大学院大学にて「生物模倣技術の社会実装に向けた標準化」セミナー -GRIPS・NISTEP・JSA 標準化討論会-が開催されました。  
平坂雅男先生(評価グループ)、溝口理一郎先生(A01班)、香坂玲先生(公募班)、魚津吉弘先生(産学連携グループ)、井須紀文先生(産学連携グループ)らが講演を行いました。また、パネリストとして下村政嗣領域代表、石田秀輝先生(C01班)らが出席しました。
- (4) 2016年4月19日(火)～6月12日(日) 国立科学博物館上野本館にて企画展「生き物に学び、くらしに活かす 博物館とバイオミメティクス」が開催されました。
- (5) 2016年6月6日(月) 国立科学博物館上野本館にて国立科学博物館企画展「生き物に学び、くらしに活かす 博物館とバイオミメティクス」併設講演会を開催しました。  
下澤楯夫先生(評価グループ)、松浦啓一先生(A01班) 針山孝彦先生(B01-2班)、山内健先生(C01班)、宮内昭浩先生(産学連携グループ)らが講演を行いました。
- (6) 2016年6月15日(水) 東京大学本郷キャンパスにて「バイオミメティクス塾 生物から学ぶ「第1回最適な形の創成」」が開催されました。  
藤崎憲治先生(評価グループ)らが講演を行いました。
- (7) 2016年7月16日(土)～9月4日(日) 佐賀県立宇宙科学館 ゆめぎんがにて、夏の特別企画展「新・世界の昆虫展～虫の秘密とバイオミメティクス～」が開催されました。  
針山孝彦先生(B01-2班)が展示協力を行いました。
- (8) 2016年7月16日(土)～8月31日(水) 松科学館にて、夏休み特別展「生き物から学ぼう！展」が開催されました。  
針山孝彦先生(B01-2班)が「「ナノスーツ法」とは何か？」～ここまで進んできたバイオミメティクスの世界～」の講演を行いました。

- (9) 2016 年 7 月 25 日(月)~29 日(金) フィンランドのヘルシンキ大学にて The 16th International Conference on Organized Molecular Films が開催されました。

Self-assembly and Nanoscale Organization や Biological and Bioinspired Systems など、バイオミメティクス関連セッションが企画されています。

<http://www.helsinki.fi/icomf16/>

下村政嗣領域代表は International advisory committee のメンバーです。



## (8) 各種案内

# BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

松村 洋子 (キール大学・慶応大学 学振特別研究員)

## 昆虫は体長より長いペニスを どう動かすのか？

2016年3月20日 (日)

会 場：北海道大学人文・社会科学総合教育研究棟 / W102  
札幌市北區北10条西7丁目

時 間：午後1時30分から 午後3時30分

体長を超えるほど細長いペニスを持つ昆虫がこの世には数多く存在する。この奇抜さとは裏腹に、彼らがそれをどのように動かしているのかと言った素朴な疑問すら解かれていなかった。私たちはこの疑問に答えるべく、“どうやって長いペニスをメスに挿入するのか？、種間に見られる形の違いが挿入の動きにどう影響するのか？ペニスの形以外の性質（例えば硬さ）はどうなっているのか、そしてそれが動きにどのような影響をもたらすのか？”といった課題に取り組んでいる。私たちの研究は単にペニス研究の枠を超え、例えば負担の少ないカテーテルの開発などに役立てることができるかもしれない。本講演では、昆虫のペニス研究の面白さをお伝えすると共に、皆さんと一緒に基礎研究の応用への可能性を考えたい。



主 催：北海道大学総合博物館  
共 催：科学研究費 新学術領域「生物模範工学」  
高 分 子 学 会 北 海 道 支 部  
協 賛：千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北區北10条西7丁目  
受付時間：TEL 011-706-2608 FAX 011-706-4029  
E-mail: museum-pro@hokudai.ac.jp



# BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

中垣 俊之 (北海道大学 電子科学研究所附属社会創造数学研究センター 教授)



## 生き物に学ぶ最適化設計

2016年4月2日 (土)

会 場：北海道大学学術交流会館 / 第3会議室  
札幌市北区北10条西5丁目

時 間：午後1時30分から 午後3時30分

粘菌という生き物がいます。森や草原の地面に  
棲んでいて、カビが菌糸を広げたような姿形をしています。  
実はこれ、カビではなくて巨大なアメーバ。編み目状の身体を  
巧みに作り変えて、あちこちに散らばったエサにありつきます。  
あちこちのエサ場所をつなぐネットワークですね！この粘菌の能力をつかって、  
街をつなぐ交通ネットワークを設計してみると、なんとなく現実の交通網と似ているような、  
似ていないような…。単細胞生物の粘菌からネットワークの設計法を学び取りとる、なんてことが  
ありえるのでしょうか？



主 催：北海道大学総合博物館  
共 催：科学研究費助成事業「生物模倣工学」  
協 賛：高分子学会北海道支部  
北海道大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北区北10条西5丁目  
TEL: 011-736-2055 FAX: 011-736-4029  
E-mail: museum@hokudai.ac.jp

# BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

不動寺 浩(国立研究開発法人物質・材料研究機構 主席研究員)

## コロイド微粒子を並べて タマムシの構造色を模倣する

2016年5月7日(土)

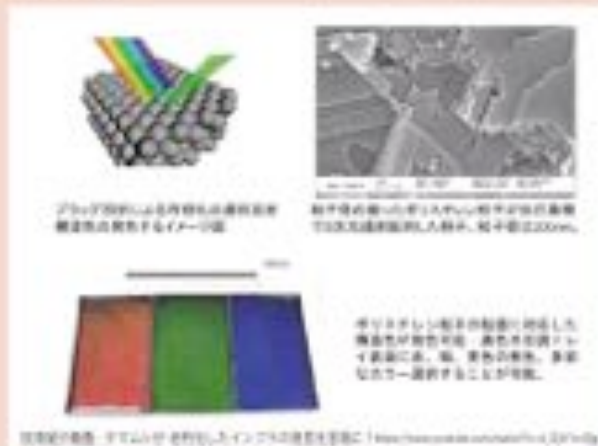
会場：北海道大学学術交流会館/第3会議室  
札幌市北区北8条西5丁目

時間：午後1時30分から 午後3時30分

金属光沢で緑色に輝くタマムシ、森の宝石とも言われています。

タマムシの表皮(最外層)にはエビクチクラと呼ばれる多層膜構造が存在しており、入射した白色光が多層膜干渉によって特定の波長の光が選択反射することで構造色が発現します。

私達は粒子サイズが揃った単分散のコロイド粒子を自己集積によって3次元に規則配列させることでタマムシの構造色を模倣しました。規則配列したコロイド粒子は宝石のオパールと同じ原理で入射した白色光を選択的に反射します。この現象は可視光のブラッグ回折と呼ばれており、粒子サイズで任意に構造色を選択することができます。本物と区別のつきにくい模倣タマムシを使ったタマムシの行動実験を行っています。さらに模倣タマムシの作製プロセスは汎用性があり、様々な形状の対象物に構造色を付与することができます。例えば、黒いお皿や皿にタマムシの構造色を再現することができます。日本では古くよりタマムシを利用した装飾技法が開発されました。安価な方法でタマムシの構造色を模倣する緑色技術として今後の応用が期待されます。また、変形によって構造色が変化する現象を利用した新しいひずみの可視化技術などへの応用も進められています。



模倣タマムシ (左) / タマムシ(右)



主催：北海道大学総合博物館  
共催：科学研究費新学術領域「生物模範工学」  
高分子学会北海道支部  
協賛：千歳市立大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北区北10条西5丁目  
問合せ：TEL 011-756-2638 FAX 011-756-4829  
E-mail: museum@mu.hokudai.ac.jp



# BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

三浦 徹 (北海道大学 大学院地球環境科学研究院 准教授)

## 環境によって変幻自在に 姿を変える昆虫たち

2016年6月4日 (土)

会 場：北海道大学 人文・社会科学総合教育研究棟 / W102  
札幌市北区北9条西7丁目

時 間：午後1時30分から 午後3時30分



脚が3対6本で、翅が2対4枚。これが昆虫類の体のつくりの基本です。しかし、これは種により実に多様で、さらに同種であっても環境条件によって、様々に姿かたちを変えてしまうものもあります。これは「表現型可塑性」という生物が習得している環境による柔軟性をうまく利用して、環境に適した形に変化させる仕組みを進化的に獲得しているからなのです。同種であっても巣の中にソルジャーやワーカーが存在するシロアリやアリ、幼虫のときの餌条件によって大顎の大きさをダイナミックに変化させるクワガタムシなど、昆虫たちがいかにして環境に適応しているのかを紹介します。



主 催：北海道大学総合博物館  
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」  
協 賛：高分子学会北海道支部  
千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目  
問合せ先：TEL 011-756-2658 FAX 011-756-4029  
E-mail: museum-prcs@museum.hokudai.ac.jp



# BIOMIMETICS

## バイオミメティクス・市民セミナー

安居 嘉秀 (株式会社島津製作所 分析計測事業部 グローバルマーケティング部)

### 島津製作所による「バイオミメティクス」など 最先端高分子素材研究のマーケティング活動

2016年7月2日 (土)

会 場：北海道大学 人文・社会科学総合教育研究棟 / W102  
札幌市北区北9条西7丁目

時 間：午後1時30分から 午後3時30分



島津製作所は京都市に本拠地を置く、計測機器や医療機器、航空機器などの製造を行っている精密機器製造メーカーです。

当社では特に生物学や化学素材開発の研究者を抱えておりませんが、現在バイオミメティクス分野の研究者の方々と様々なコラボレーション企画を展開しております。

「高精度」、「高感度」、「高解像度」や「新仕様」などを特徴とした分析評価機器の開発を通して、

さらに産学官の連携を図ることで高分子など化学素材産業への貢献を目指しています。

本講演では、これまで当社がどのような視点を持ちながらバイオミメティクス研究分野でのマーケティング活動を行ってきたのか日ごろの市場開拓活動の状況とともに、バイオミメティクスなど機能性化学素材を創製されている先生方に特にご評価いただいている最新の分析評価技術について紹介します。



主 催：北海道大学総合博物館  
共 催：科学研究費 新学術領域「生物機能工学」  
高 分 子 学 会 北 海 道 支 部  
協 賛：千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目  
問合せ先：TEL 011-706-2658 FAX 011-706-4029  
E-mail: museum-group@museum.hokudai.ac.jp





13時00分  
挨拶  
国立科学博物館 林 真博 館長

13時10分  
基調講演 Society5.0とOpen Science  
文部科学省科学技術・学術政策研究所 田上 静雄 所長

13時40分  
問題提起「工学が生物を学ぶ」ことの重要性  
北海道大学名誉教授 下澤 新太 先生

14時10分  
招待講演 JSTにおける  
Open Scienceへの取り組み  
科学技術振興機構 白木淳 理事長

14時40分  
自然史博物館の標本データの  
発掘とバイオミメティクス  
国立科学博物館・名誉研究員 松浦 啓一 先生

15時20分  
ナノスーツ法：  
SEM観察法の新潮流  
国松医科大学 社山 孝彦 先生

15時50分  
BioTRIZによる生物データから  
工学への技術移転  
新潟大学 山内 健 先生

16時20分  
情報工学によるバイオミメティクスの  
実用化に向けて  
日立製作所 宮内 利浩 先生

16時50分  
閉会  
文部科学省科学技術・学術政策研究所  
新学術領域「生物規範工学」  
領域代表 下村 政嗣 先生

国立科学博物館企画展  
「生き物に学び、  
くらしに活かす  
博物館とバイオミメティクス」  
併設講演会

Open Scienceとバイオミメティクス  
～生物から工学への技術移転のために～

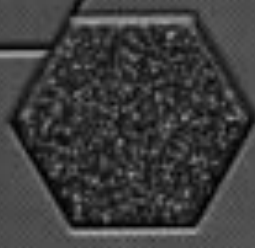
2016年6月6日(月)  
国立科学博物館  
日本館 講堂

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| 定員  | 120名<br>当日先着順<br>会場にて1230から受付開始    |
| 入場料 | 企画展ならびに併設講演会には、<br>常設展示入場料をお支払い下さい |
| 主催  | 科学費新学術領域「生物規範工学」                   |
| 共催  | 独立行政法人国立科学博物館<br>高分子学館バイオミメティクス研究部 |



# 生物規範工学

公開講演会

- 
- 
- 
- 
- 10:00 山本 拓矢 北海道大学  
環状両親媒性高分子によるベシクル構築と  
ゲスト包摂による物性変化
- 10:30 前田 義昌 東京農工大学  
珪藻が生産する多孔質バイオシリカに基づく  
バイオミメティクス
- 11:00 安井 隆雄 名古屋大学  
ナノワイヤ構造体によるセミの翅の物理的防衛機構の模倣
- 11:30 玉川 雅章 九州工業大学  
サイトカイン濃度勾配による  
好中球の液中内運動機構とその応用
- 12:00 津守 不二夫 九州大学  
磁性粒子分散柔軟材料を用いた人工繊毛の開発
- 12:30 Dr. Richard Leschen  
Landcare Research, New Zealand Arthropod Collection  
Coleoptera Cuticles: from Calcium deposition  
to attachment Structures
- 

2016年8月4日(木)

北海道大学 創成科学研究棟  
5階大会議室

(札幌市北区北21条西10丁目)

入場無料

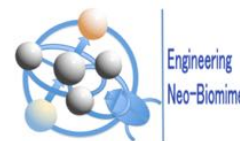
参加方法

下記ホームページよりお申込みください。

<http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/?p=9204>

# 生物多様性を規範とする革新的材料技術

*Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity*



「生物多様性を規範とする革新的材料技術」ニュースレター Vol. 5 No. 1

発行日 2016年7月29日

発行責任者 下村政嗣（千歳科学技術大学）

編集責任者 穂積 篤（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）

制作 「生物規範工学」領域事務局

北海道大学電子科学研究所内

〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目

電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361

URL <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html>