

## 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  
札幌アスペンホテル (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のゆらぎ特性解析」

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



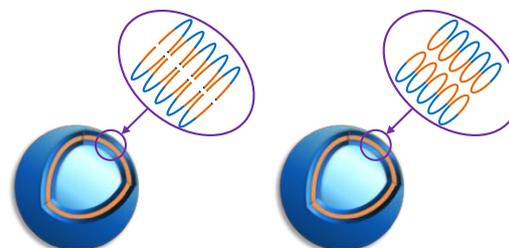
## 環状両親媒性高分子によるベシクル構築と ゲスト包摂による物性変化

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

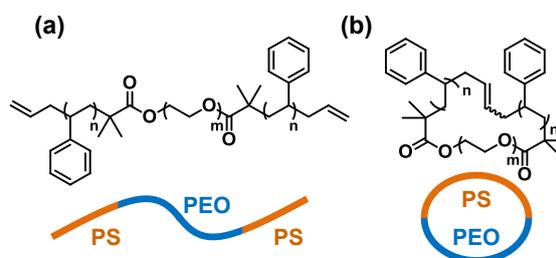
好熱菌は、細胞膜に環状の脂質分子を有することで海底火山や温泉など高温の環境で生息する単細胞生物である。本研究では、この環状脂質分子を模倣した合成高分子に自己組織化を誘導し、形成した好熱菌細胞膜モデルとなるベシクルを利用して高安定性獲得のメカニズムの解明を行い、その応用を探求する。

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。

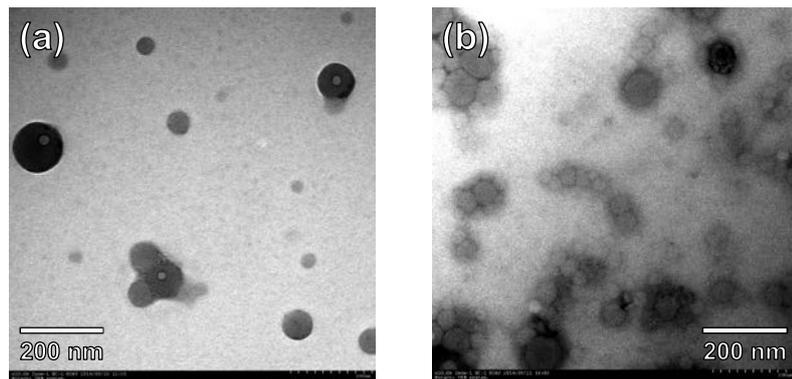


**Fig. 1.** Expected structures of vesicles formed from **Linear** (left) and **Cyclic** (right).



**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°C 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°C 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が、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。

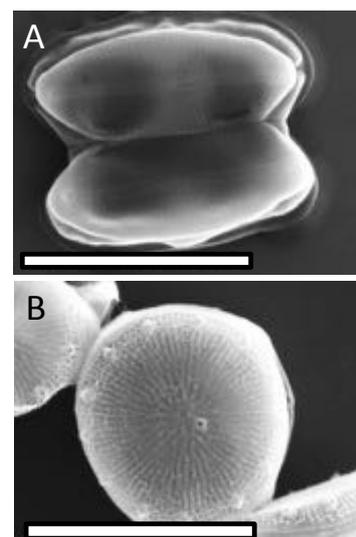


Fig. 1 Scanning electron microscopic images of the biosilica cell walls of a pennate diatom, *Fistulifera solaris* (A), and a centric diatom, *Thalassiosira pseudonana* (B). Scale bar = 5  $\mu\text{m}$

#### 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ニ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。

### 3. 遺伝子工学的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。

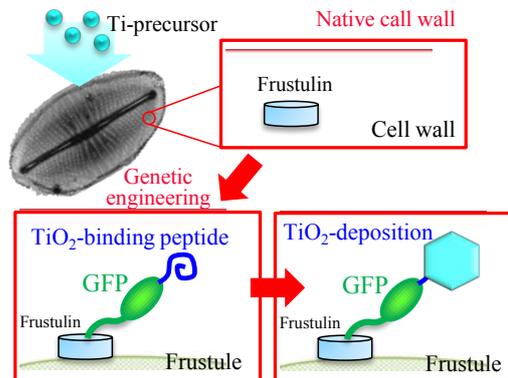


Fig. 2 Diatom cell surface display system for fabrication of  $\text{TiO}_2$ -functionalized biosilica composites.

### 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。

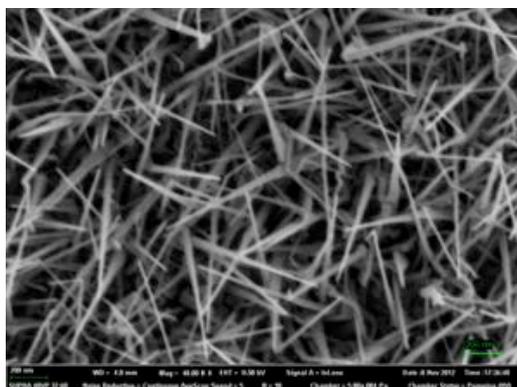


Fig.1 An SEM image of nanowires.

### 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.

### 謝辞

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

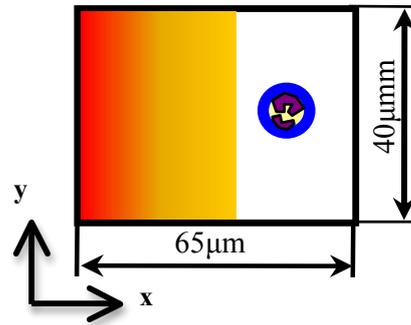
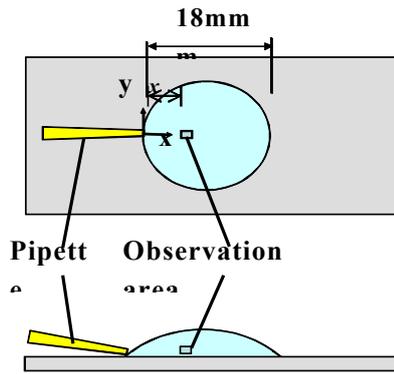
## Mechanism of Neutrophil's Motion in Liquid by Concentration Gradient of Cytokine and its Applications

### 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．

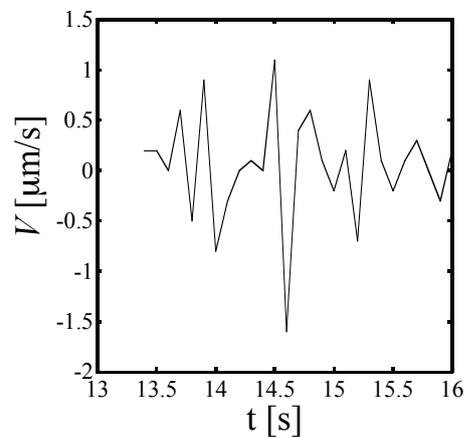
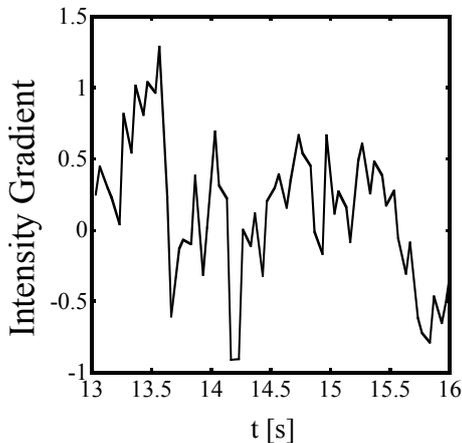
### 2. 実験方法と画像結果

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とることで，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，人工繊毛，メタクロナル波



## 磁性粒子分散柔軟材料を用いた人工繊毛の開発

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

#### 1. はじめに

繊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。多くの繊毛が表面を覆い、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。この人工繊毛は，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

自然界の繊毛は10マイクロメートル程度と，非常に微細である。このような繊毛が水流をいかに発生するかを考えてみる。繊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問い，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，繊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，繊毛はどうや

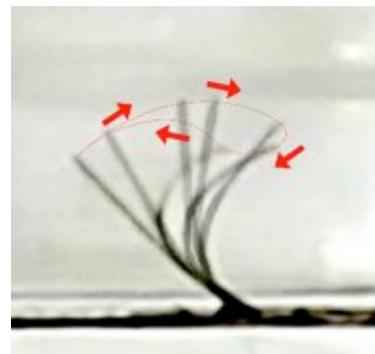


Fig. 1 Actuated sample of artificial cilium.

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，内部に磁氣的な「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，磁氣的なくせ（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。

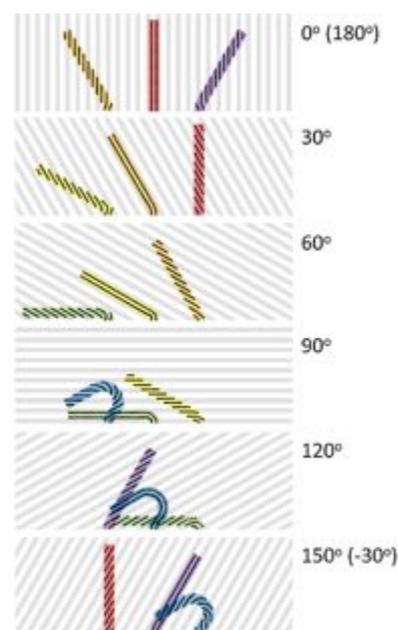


Fig. 2 Schematic of movements of artificial cilia with different magnetic orientation in a rotational magnetic field.

## 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. Walther 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.). Walther 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で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によって、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.

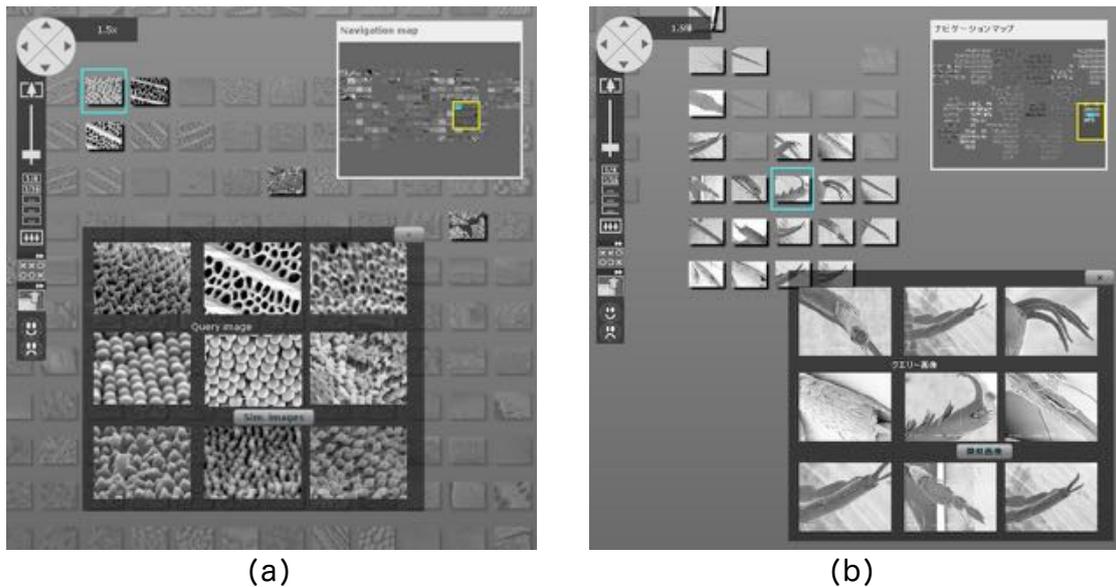


Fig.1 Image retrieval results : (a) Results obtained by using new features, (b) Results obtained by using previously reported features.

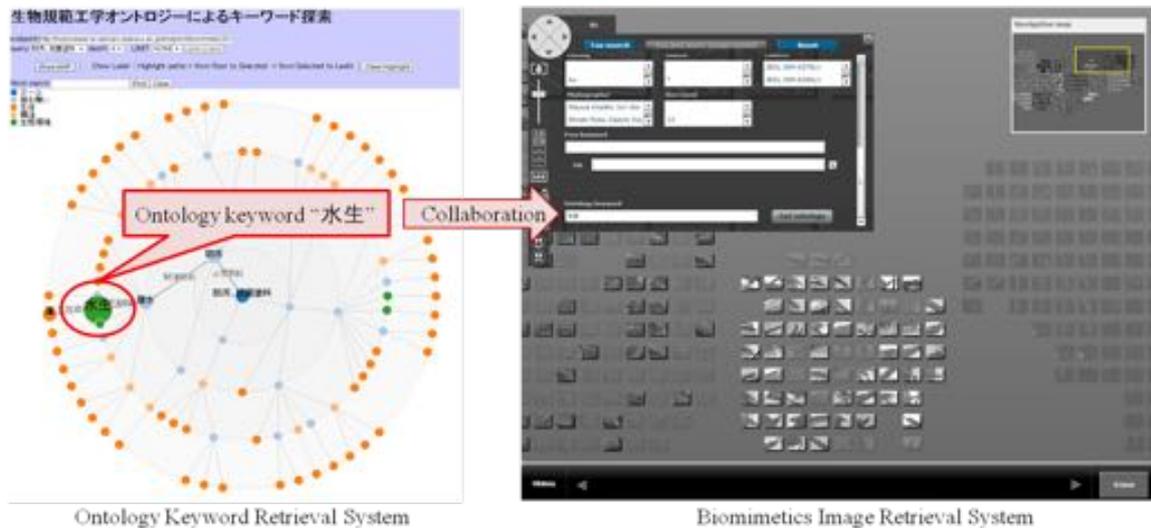


Fig.2 Collaboration between Image Retrieval and Ontology Keyword Retrieval.

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。

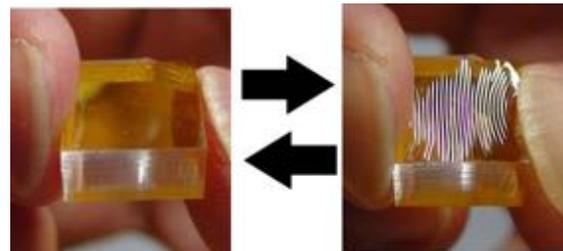


Fig. 1 Shape-tunability of wrinkles.

#### 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。

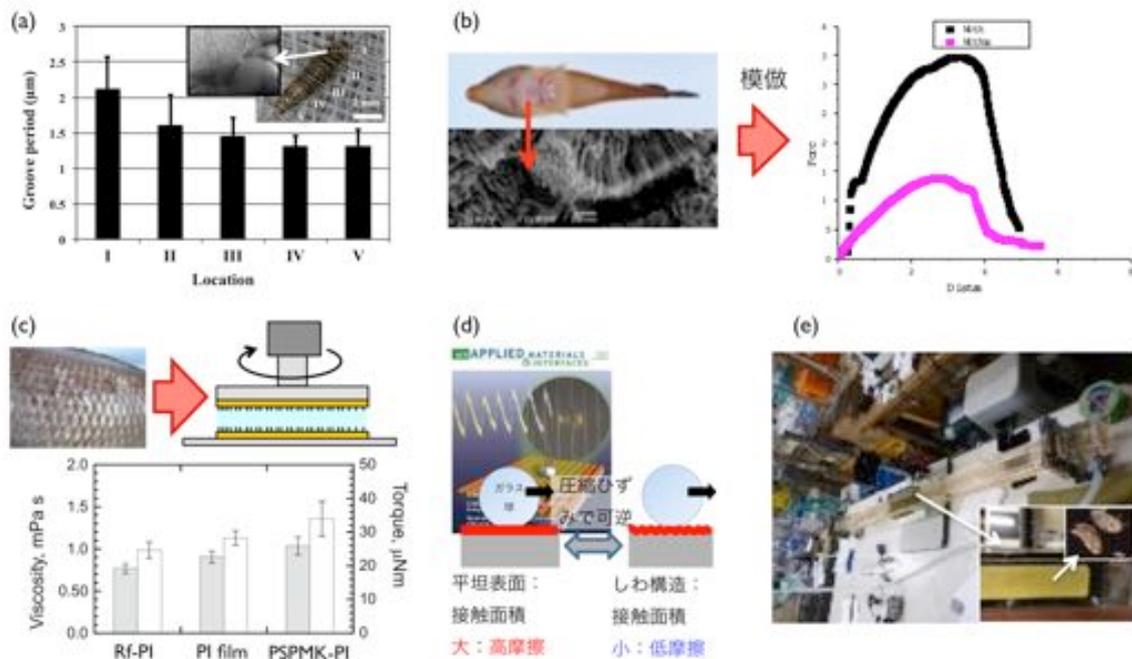


Fig. 2. Outlines of research results conducted by B01-1 (a: Hirai, b: Kurokawa, c: Kobayashi, d: Ohzono, and e: Nogata).

## 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



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

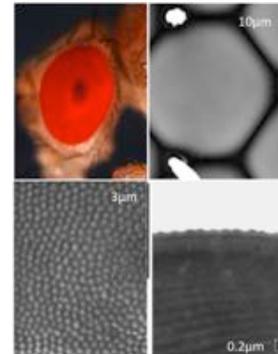


Fig.1 Corneal nipples in the compound eye of *Drosophila*.

#### 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てみると、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作られる（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

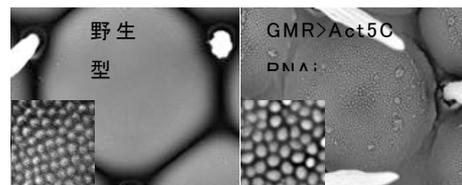


Fig.4 wild-type and enlarged nipples.

(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。今後も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。

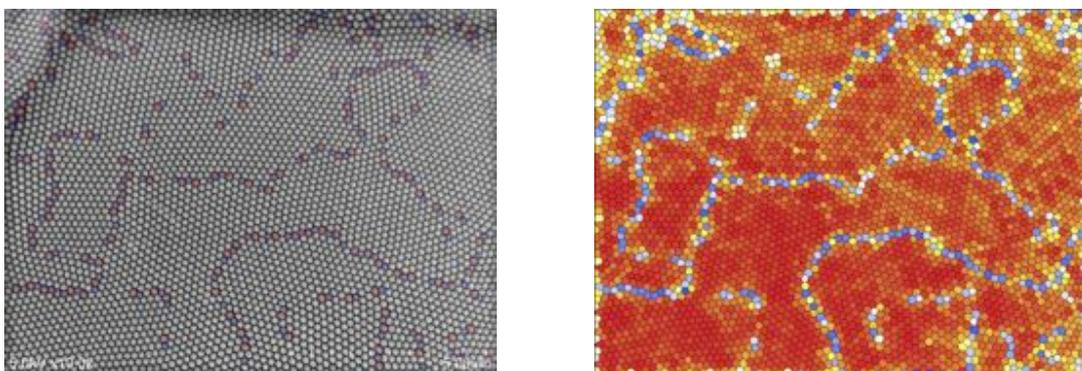


Fig.5 Voronoi diagram of a moth eye structure. Left: Pentagonal and heptagonal Voronoi cells are colored as blue and red, respectively. Right: Bond order parameter value is used for the coloration.

## 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。

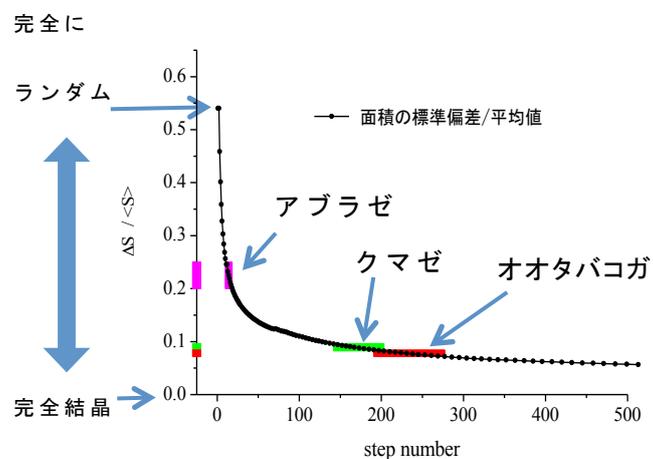


Fig.6 Evaluation of irregularity using a computer simulated dot pattern and Voronoi diagram. Data for three insect species are superimposed.

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.hiroataka@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によって、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、 $2 \mu\text{m}$  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  $3 \mu\text{m}$  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。

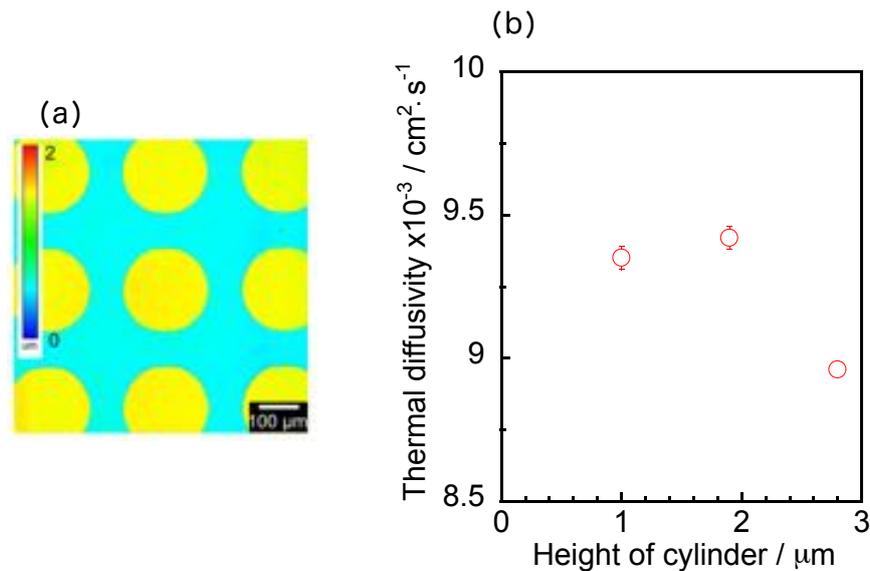


Fig.1 (a) Micrograph of quartz glass patterned with a square arrangement of cylinders and (b) Relationship between thermal diffusivities of the glass and heights of the cylinders.

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。

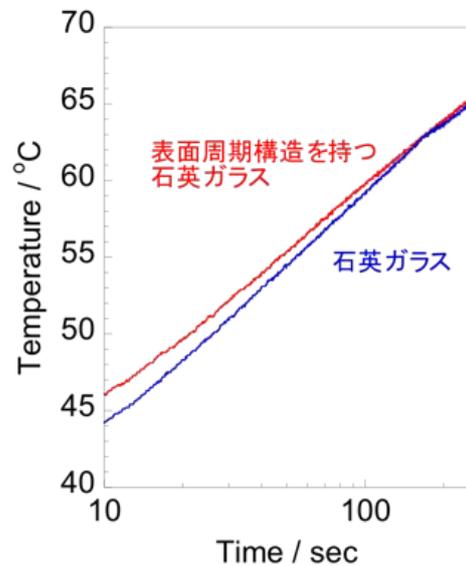


Fig.2 Temperature changes of samples mounted on a graphic board of a personal computer.

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。

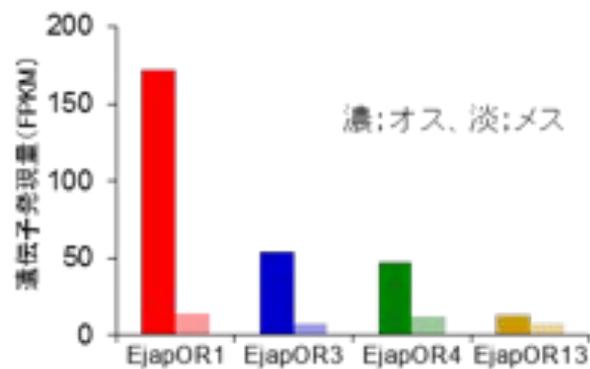


Fig. 1 Expression levels of sex pheromone receptor candidates in antennae of a lichen moth, *Eilema japonica*.

### 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特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。

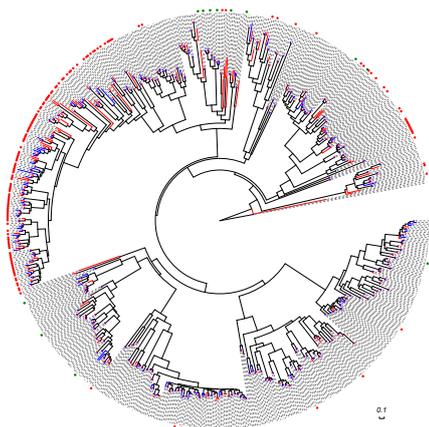


Fig.2 Expression profiles of *Camponotus* ant ORs along with their phylogeny. Red and green color points indicate higher expression level in workers and males respectively.

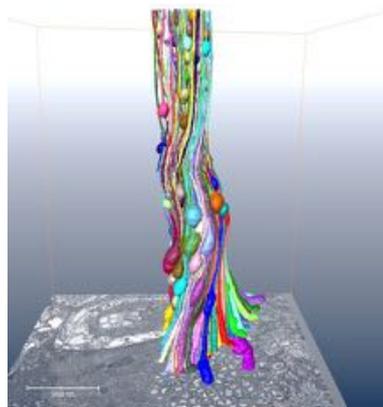


Fig.3 3D reconstructed sensory neurons in a cuticular hydrocarbon sensor.

### 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'Ettoire, 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おこした．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

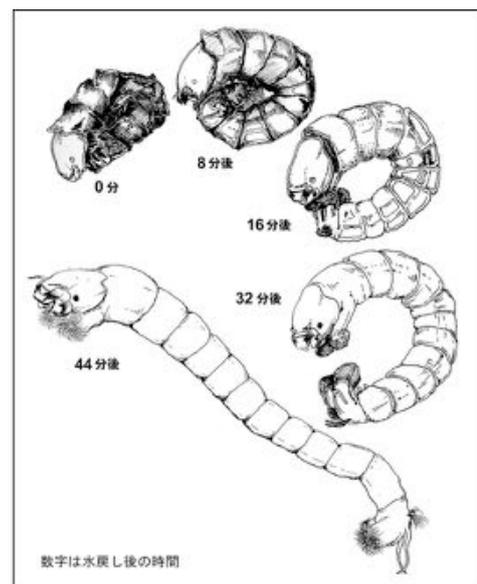


## 培養細胞の常温保存への挑戦

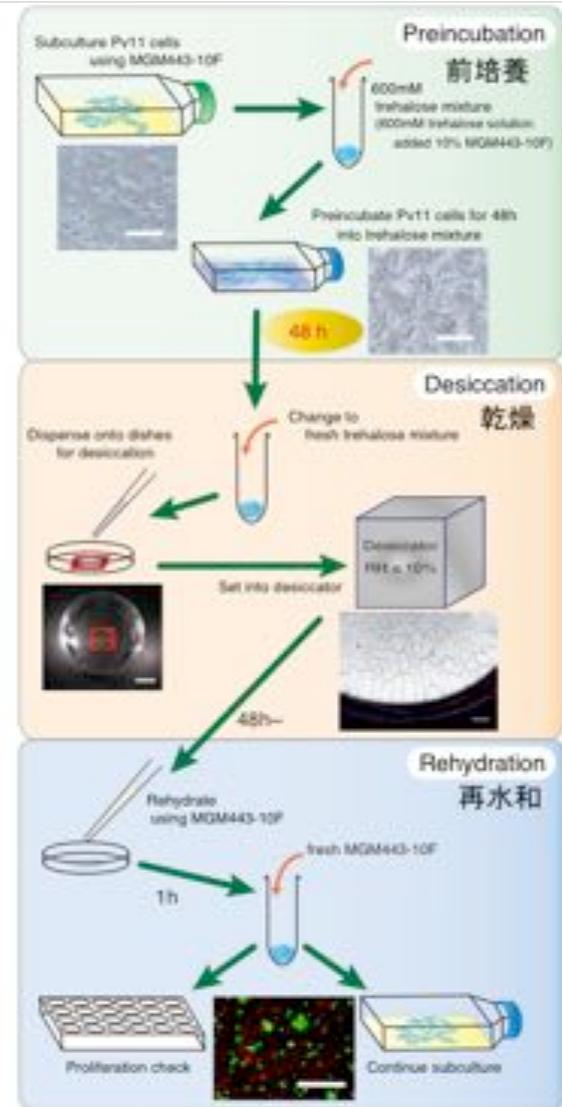
：ネムリユスリカの乾燥耐性機構から学ぶ

## 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

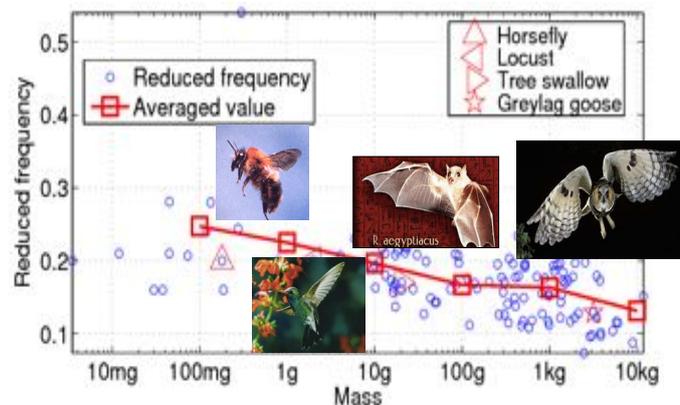
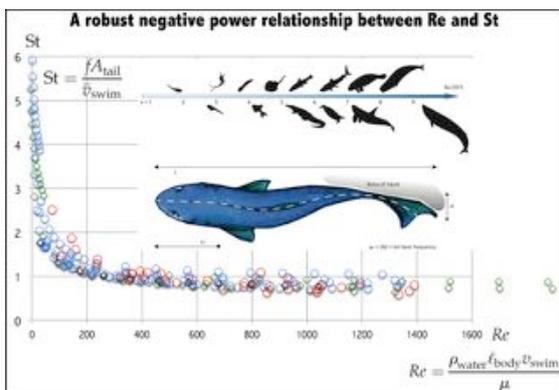


図1 羽ばたき翼運動のロバストネス：無次元周波数 vs 質量

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。



RESULTS – adjust body kinematics to optimize swimming performance

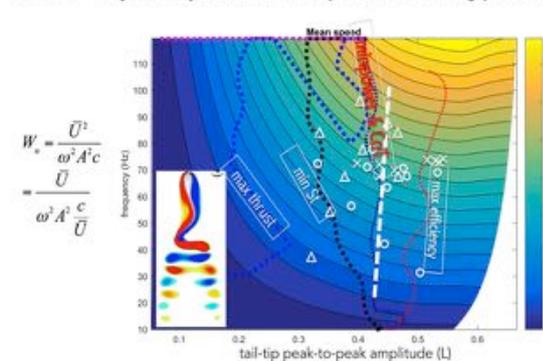


図2:従来の流体力学スケーリング法則: Re vs St 図3:生物遊泳の諸運動、力学及び効率の比較

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：九州大学先導物質化学研究所

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 弾性パターンングゲルを作製した。このゲル上に  $1.5 \times 10^3$  cell/cm<sup>2</sup> 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。

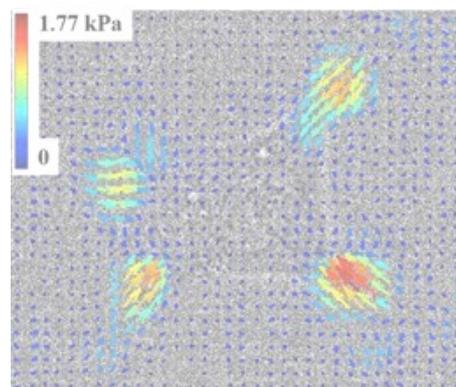
Figure 1 に弾性パターンングゲル上で非定住運動をする細胞の牽引力の推定結果の一例を示す。MSC, 3T3 cell 共に細胞の辺縁部もしくは仮足部分で強くゲルを牽引していることが分かった。次に、大きな牽引力が働いている領域のみ着目し、各時間における平均的牽引力と牽引力が働く場所の平均的基材硬さを求めた。Figure 2 に平均的牽引力と平均的基材硬さの時間変化を示す。これより MSC, 3T3 共に基材硬さと牽引力の間には強い正の相関があり、基材が硬くなるほど牽引力が大きくなっていることが分かる。Figure 3 に均一弾性ゲルと弾性パターンングゲルでの牽引力の平均値周りの時間的なゆら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

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

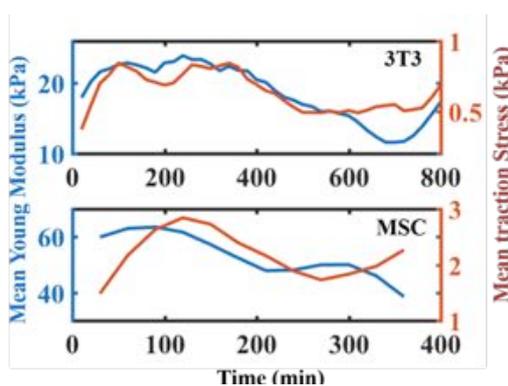
かった。以上の結果から、MSC が弾性パターンングゲル上を非定住運動することで、牽引力、つまりメカノシグナルが大きく振動していることが確認された。

#### 参考文献

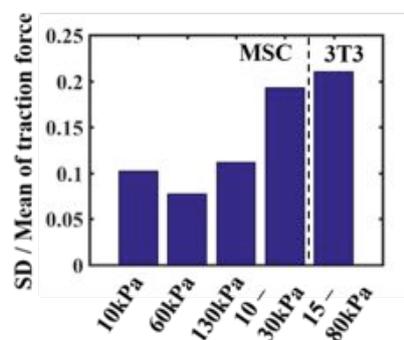
- [1] A. J. Engler, S. Sen, H. L. Sweeney, and D. E. Discher, *Cell* **126**, 677 – 689 (2006)
- [2] C. Yang, M. W. Tibbitt, L. Basta, and K. S. Anseth, *Nat Mater.* **13**, 645 – 652 (2014)
- [3] S. Kidoaki, S. Jinnouchi, *Biophys. J.* **102**, Suppl.1, p716a (2012).



**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

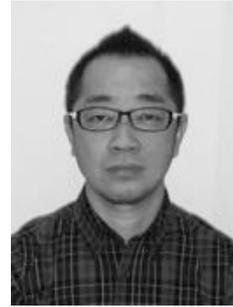
所属機関：名古屋大学 大学院医学系研究科 統合生理学

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. 生物規範細胞マイクロメカニクス・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）。

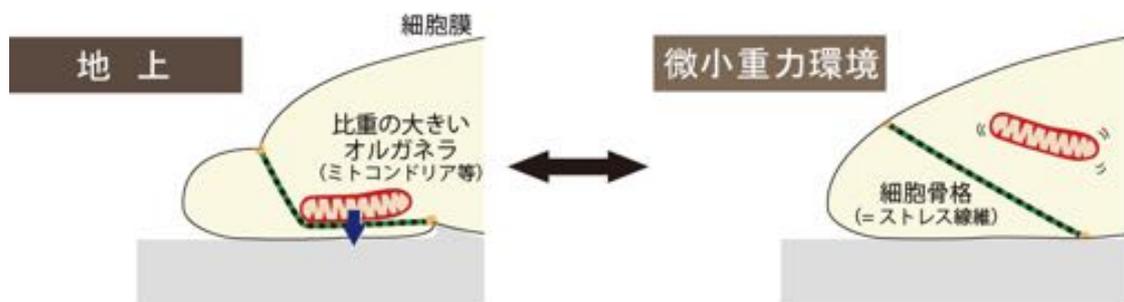


Fig. 1. Molecular model of gravity sensing. Organelles such as nuclei and mitochondria, which are heavy and have a high specific gravity, are attached to cytoskeletons. In microgravity conditions, heavy organelles float upwards, and the weight of them disappears from the cytoskeletons.

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、柔らかい基質（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。

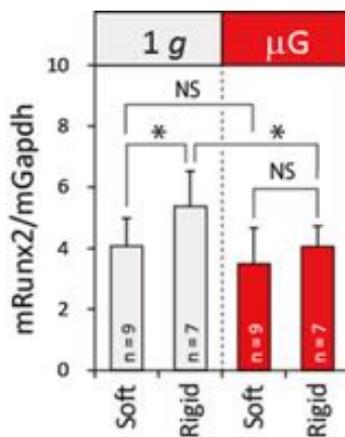


Fig. 2. Loss of rigidity-dependent responses of mesenchymal stem cells in microgravity.

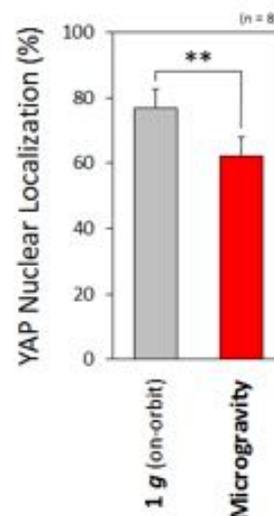


Fig. 3. Reduced YAP activity of mesenchymal stem cells in microgravity.

#### 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



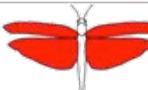
## 昆虫の羽ばたき飛行における外骨格構造の機能

### Functional structure of the insect thoracic exoskeleton 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 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

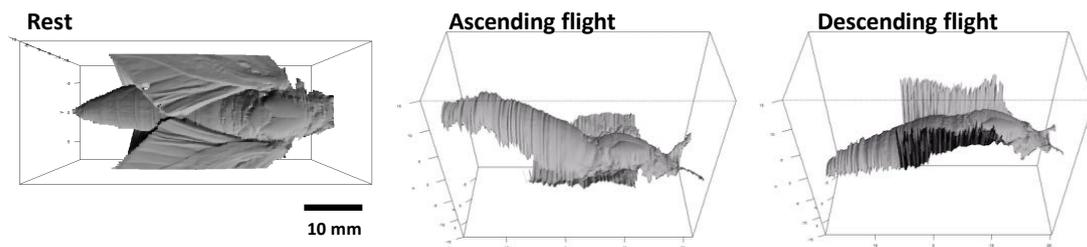


Fig. 1 Body deformation during tethered flight of the hawkmoth.

## 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>。

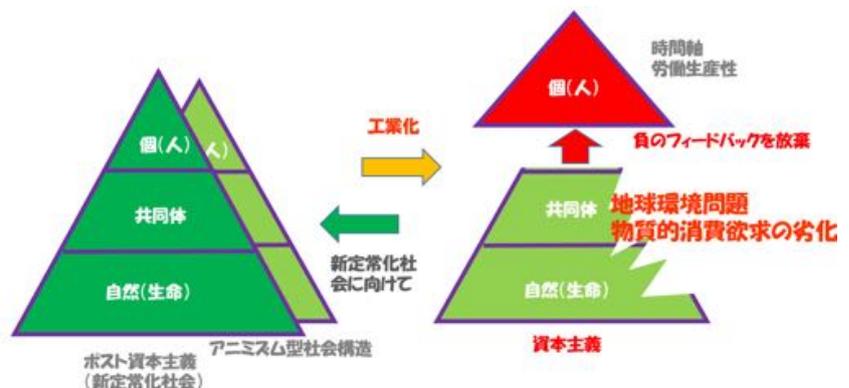


Fig.1 Transformation of the social structure.

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 innovate 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、バックキャストिंग、  
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、バックキャストिंग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トिंग<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。

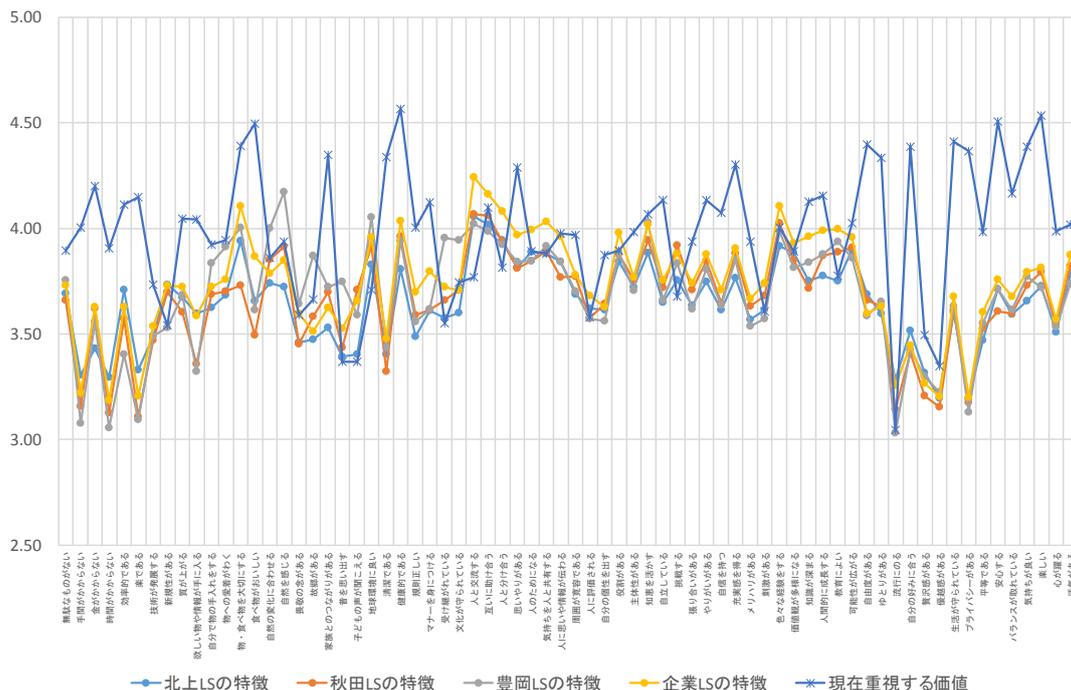


Fig.1 Lifestyle values created in local cities and the gap with present important values.

### 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。

**ライフスタイルコンセプト(タイトル):**  
季節の和紙で作った傘や灯籠で自分も彩る暮らし

**新しいライフスタイル:**  
年に1回、口内傘のイベントが近くなると皆で集まり、自分で絵を描いたり、色や模様をつけた和紙で和傘の紙をつくります。主催者は事前に芸術家たちと協議して今年のテーマと時期を決めます。参加者は、四季折々の自然の色や模様を和紙に写し取るため、地域のお年寄りから話を聞いて山へ行き、材料になる花や草を採集しながら採集し、心待ちに準備します。美しくできた和傘は、和傘や灯籠に仕立てます。

**和傘や灯籠は通りに集められ、周囲に溢れ込み新たな風景になりました。夜には灯籠の灯りによって別の風景が生まれます。**

**終わった後、和傘は観光客向けレンタル和傘になり、多くの人が使います。自分が作った和傘が傘や灯籠となって、自分が生きて風景と一体になったり、人が喜んでいるのを見たりするのが嬉しく、また何度も訪れる家族連れも増えてきました。**

**生活者視点から:**  
- 傘が子どもの時に作った灯籠の傘が、今も何かしらの形で残っている地域 = 訪問客は驚き  
- ものを大事にすることを価値としてまちづくりをする、その中で誇りをもちながら暮らす、自分のオリジンを残す事ができる。  
- 季節の変化を感じることができる。

**課題視点から:**  
- 山林の利用促進(整備)  
- 観光客は石油由来の使い捨てビニル傘を購入する必要がない。



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

### 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。

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

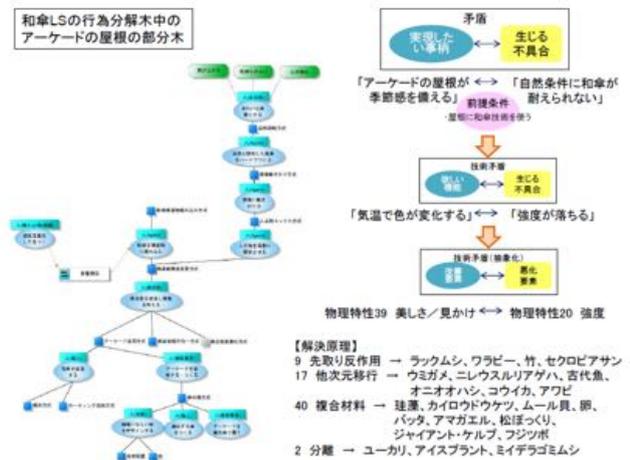


Fig.1 An example of matching technology-seeds in nature for the LS-needs.

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。

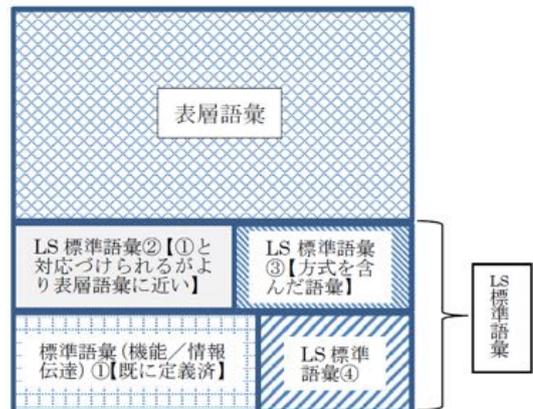


Fig.2 Image of relations of common vocabulary and vocabulary at the surface level.

### 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 TRIZ（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RDF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TRIZ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RDF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	生物規範工学	TRIZの原理
音響波	-	ニ
吸着	筋肉で吸い付くミズダコ	<a href="#">粘着性質原理</a>
遠心機	-	ニ
コアンダ効果	-	ニ
コロナ放電	-	ニ
エレクレット	ミミズが死ななれない理由 (表面がマイナス電荷)	<a href="#">帯電原理</a>
ろ過機	-	ニ
摩擦	水をはじく汚れない蓮の葉	<a href="#">撥水性原理</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TRIZ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TRIZ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 1. 物体の色や外部環境を変更する 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.