

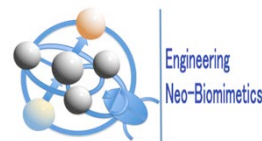
(バイオミメティクス)

# 生物模倣から生物規範工学へ

ー 持続可能性のための技術革新：生物多様性がもたらすパラダイムシフト ー

Paradigm Shift based on Biodiversity to Innovation for Sustainability

## 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                                                                   |    |
| ・ 新学術領域 “生物規範工学”の発足を祝う<br>国武豊喜 (北九州産業学術推進機構 理事長) . . . . .               | 5  |
| 2) 評価委員からのメッセージ                                                          |    |
| ・ 「連携だけなら誰でもできる、クロスボーダ次世代を残せ」<br>下澤楯夫 (北海道大学 名誉教授) . . . . .             | 8  |
| 3) 研究紹介 (2012年12月10日 神戸国際会議場 文部科学省科学研究費新学術領域<br>「生物規範工学」全体会議)            |    |
| ・ 生物多様性を基盤とするバイオミメティクス・データベースの構築<br>A01班 野村 周平 (独立行政法人国立科学博物館) . . . . . | 14 |
| ・ 戸田漁港での班間連携深海魚採集<br>B01-1班 平井悠司 (東北大学) . . . . .                        | 16 |
| ・ 1次元フォトリック結晶中の厳密結合波解析<br>B01-2班 久保英夫 (東北大学) . . . . .                   | 18 |
| ・ DNAを分子鋳型としたバイオミメティック金属ナノワイヤー作製技術の開発<br>B01-3班 居城邦治 (北海道大学) . . . . .   | 20 |
| ・ 昆虫の安全な飛行のしくみを探る<br>B01-5班 安藤規泰 (東京大学) . . . . .                        | 22 |
| ・ Bio-TRIZを利用したバイオミメティック・デバイスの開発<br>C01班 山内健 (新潟大学) . . . . .            | 24 |
| 4) 活動報告 (2012年10月2日 上野国立科学博物館 文部科学省科学研究費新学術領域<br>「生物規範工学」公開講演会)          |    |
| ・ バイオミメティクス・データベースの構築：発想支援型画像検索システム<br>A0-1班 長谷山 美紀 (北海道大学) . . . . .    | 27 |
| ・ 微細界面構造とウェットライボロジー<br>B01-1班 平井悠司 (東北大学) . . . . .                      | 29 |
| ・ いい加減かつ巧妙：生物に学ぶ光技術<br>B01-2班 吉岡 伸也 (大阪大学) . . . . .                     | 31 |

# 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



Engineering  
Neo-Biomimetics

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ・ 虫が手をする足をする：虫から学ぶ接着・非着のナノテクノロジー<br>B01-3班 細田 奈麻絵（独立行政法人物質材料研究機構）                                                              | 33 |
| ・ 汎用元素による環境に優しいはつ油処理<br>B01-3班 穂積 篤（独立行政法人産業技術総合研究所）                                                                           | 35 |
| ・ バイオミメティクスと植物保護<br>B01-4班 森 直樹（京都大学）                                                                                          | 37 |
| ・ 細胞操作材料のメカノバイオミメティクス<br>B01-5班 木戸秋 悟（九州大学）                                                                                    | 39 |
| ・ バイオミメティクスの社会インプリケーション<br>C01班 阿多 誠文（独立行政法人産業技術総合研究所）                                                                         | 41 |
| 5) トピックス（PENより）                                                                                                                |    |
| ・ 特別寄稿 1（新連載 生物規範工学 第一回）大震災後に確信し、そして反省したこと<br>下村政嗣（東北大学）                                                                       | 44 |
| ・ 生物規範工学 第二回 Homo domesticus － 家畜化したヒト<br>針山 孝彦（浜松医科大学）                                                                        | 49 |
| ・ 生物規範工学 第三回 私が体験した驚愕の「生物規範工学」in アメリカ<br>森 直樹（京都大学）                                                                            | 55 |
| ・ 生物規範工学 第四回 自然に学ぶ防汚性：超親水性表面の利用<br>小林 元康 <sup>1</sup> 、高原 淳 <sup>1,2</sup> （1 科学技術振興機構ERATO 高原ソフト界面プロジェクト、2 九州大学<br>先端物質化学研究所） | 61 |
| 6) 国内外研究動向紹介                                                                                                                   |    |
| ・ 滋賀での実践 ―自然に学ぶものづくり・まちづくり<br>星野敬子（NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン）                                                                        | 66 |
| ・ 麗しくそして懐かしのストックホルム Swedish Biomimetics 3000 訪問記<br>佐野健三（株式会社 積水インテグレートドリサーチ）                                                  | 69 |
| ・ 12-1バイオミメティクス研究会報告<br>浦田千尋（独立行政法人産業技術総合研究所）                                                                                  | 72 |
| 7) 新聞・報道                                                                                                                       | 76 |
| 8) アウトリーチ活動                                                                                                                    | 79 |
| 9) 各種案内                                                                                                                        | 82 |

## 巻頭言

## 新学術領域“生物規範工学”の発足を祝う

北九州産業学術推進機構  
理事長 国武豊喜



このたび、本領域の評価グループの一員として加わることとなった。生物を規範とする材料、Biomimetic Materials、は、近年、国際的に大きな注目を受け、活発な研究開発が先進国の多くで行われている。化石資源に頼り従来型の生産方式による材料開発が、資源や環境、エネルギーの面で様々な課題を抱えていることが明白となり、それに代わる学術や技術が求められているからである。

領域代表である下村教授の解説にあるように、機械系バイオミメティクスは、ロボティクスやセンサーの分野で 1960 年代から興味の対象であり、一方、分子系バイオミメティクスは、1970 年代から 1980 年代にかけて体系化された。前者は主にミリメートルサイズ以上の構造を対象とし、後者ではナノメートル程度の大きさの構造体を対象であった。この状況はナノテクノロジーの立場からは、極めて興味深い。ナノ構造体を作製する手法には、大きいものから削り込むトップダウン方式と分子・原子から組み上げて作るボトムアップ方式がある。従来、トップダウン方式で 3 次元デバイスを効率的に作り込む限界はミクロン程度であり、ボトムアップ方式で 3 次元構造を作る上限は数十ナノメートルであった。従って、10 ナノメートルから 1 ミクロンに至るサブミクロンサイズの構造やデバイスを作製する一般的な手法は、まだ、実現していない。ところが、生物に見られるユニークな材料構造は、このサイズ領域にあることが多い。おそらくこの事情が、生物の多様性を規範とする材料作製技術の開発をこれまで阻んできた、のであろう。

最近になってこの状況にも新しい展開が見えてきた。ボトムアップ側からは、ミクロン以下の精度をもつ複雑な構造が、自己組織化の手法を使い可能となってきた。また、トップダウン側からは、rapid prototyping の方式に基づく 3 次元プリンターにより、ミクロン精度

までの複雑な構造が比較的容易に製造できるようになった。サブミクロン領域の構造に対しては一般的に有効となる方式が見出されていないとは言え、ギャップはずいぶん埋まってきた。これらの技術の進展がバイオミメティック材料の開発を促進することは間違いない。

最後に、本領域が「生物模倣（バイオミメティクス）から生物規範工学へ」を標榜することの意味に触れたい。従来のバイオミメティクスは、分子系であれ機械系であれ、生物の挙動を化学または力学の知識で切り取り、単純化したモデル系を作製することが主流であった。それに対し、「生物規範工学」では、生物の作動原理をあるがままに観測し、生物の技術体系を出来るだけそのままの形で活用することが求められているようである。そこには基礎となる多様な科学や技術が含まれるであろうが、それらの統合化こそが本質である。このパラダイムシフトがどのようなイノベーションを生み出すか、今後が楽しみである。

## 評価委員からのメッセージ

## 「連携だけなら誰でもできる、 クロスボーダ次世代を残せ」

北海道大学 名誉教授 下澤 楯夫



生物規範工学の必要性を提唱してから、20 年近くが経ってしまった<sup>1)</sup>。この言葉を冠した新学術領域の発足を心から嬉しく思い、大いなる成果を期待している。キックオフ会議（10 月 2 日東京上野国立科学博物館）では、下村領域代表が「持続可能な社会を実現する基盤としての工学と生物学の連携」を謳った。しかし、我が国で医工連携（医学と工学の連携）や生工融合（生物学と工学の融合）を掲げた活動が真に実りある形をなした例はきわめて少ない。それで、「生物学と工学の境界を越えた（Across-bordered）次世代」を育成し学術領域としての持続性を確保するよう、評価グループの一員として要望したのである。

そもそも「連携」とは何か？ 工学者と生物学者が連名で論文を書けば連携か？ そんなコトは誰でもできるヤッタフリ連携に過ぎない。真に新しい学術は、既存の境界線上にではなく、境界を越えた処で当事者として生きることから始まる。勿論、40 代 50 代の研究者が脳みそを入れ替えて、訓練を受けたこともない異分野に移り棲むことなど出来る訳がないし、社会もそう短兵急に付託している訳でもない。ただし、10 年後 20 年後には実際に世の中を変えている人材を育てるのが教育研究機関の役割だ。それで、「生物系の班員は工学出身の若者をポストドクとして鍛え、工学系の班員は生物学出身の若者をポストドクとして鍛えて、生物の技術（生きる仕組み）を我々の技術に転化する人的基盤としてのクロスボーダ次世代を確実に残せ」と提案したのである。これは、「少しでも変異した次世代を残し続ければ、環境に適応した新しい種の分化さえ起る」、「生物進化は生きる仕組みの転用の歴史である」という生物の存在原理そのものの実践を要請したことになる。

残念ながら、クロスボーダは我が国の一般風潮とは合っていない。理学部生物学科の助教授として昆虫神経生理学の教育と研究に携わっ

ていた 35 年前、「学術研究の新しい動向」を高校教員の研修会で紹介する機会が与えられた。筆者の講演が終わってから聴衆の一人が、「下澤君、下澤君だよ。同姓同名の別人かと思ってた。あなた確か、工学部の電子工学科へ進学したんじゃないの？ どうして理学部で生物の助教授なんかやってるの？ なにかヤラカシタの？」と話しかけられた。母校の教師が研修会に来ていたのだ。「なにかをヤラカシタ訳ではありません。これからの世の中が健全な科学を持つためには、工学技術を使って生物の仕組みを調べたり、生物の生きる仕組みを工学技術に取り入れたりする必要があります。神経系は情報通信系ですから電子通信工学と同じです。今は生物学の助教授として次の世代を育てて給料を貰っています。」と、工学と生物学とは自然科学として一体で相互乗り入れ可能であることを説明したが、理解して貰えた訳ではない。万世一系を貴ぶ我が国では、高校教員ですらこうなのだ。人生も「縦流れ」が美しく全うな生き方で、「横渡り」は邪（ヨコシマ）で忌むべきことなのだ。横に流れた教え子は、きっと何か「社会的非行をヤラカシ」て罰を受けたに違いないのだ。同じ趣旨の「なにかヤラカシタのか」詰問は、その後の高校の同窓会でも複数の教師や同期生から受けた。

このように、高校教師を含めて一般市民の多くは、学科や学部など「大学の縦割り教育」構造を、学術の根本的・本質的な構造に由来しているかのように誤解している。我が国の高等教育における縦割り構造は、「社会の要望に合った人材を高効率で供給する作業」と「学術（人類としての知的生産）の高度化と次世代への伝達作業」との妥協の産物に過ぎない。にも拘らず、あたかも神が規定した自然界の構造であるかのように誤解されているのである。これは重大な問題である。さらに残念なことに、この間違いに気付かない「科学者仲間」もまた多いのである。自然は一体で、自然の中が「数学、物理、化学、生物学」に分かれている訳ではない。人間が、何かの観念に囚われて勝手に自然を分割し、便宜上の名前を付けたに過ぎない。少なくとも、自然の中にこれら科学の諸分野の境界線を見出すことは出来ない。

我が国の行政はポストドク制度の設計に見事に失敗したままだ。そもそも担当省庁にポストドク経験を持つお役人はいない。昔、ポストドクと大学院生の違い（大学院生は訓練すべき対象、ポストドクは共

同研究者）すら理解していない担当係長の欧米研究開発体制視察記を読んで、暗澹とした。しかし、嘆くだけでは状況は変わらない。新学術領域を自認するなら、研究費を次世代の育成にも投入して自前でクロスボーダポストドクを養成して人的学術基盤として次世代へ遺すべきなのだ。さもなくば、ただの「ヤッタフリ連携」で終わる。

太平洋を東へ渡った国のポストドク制度は、異分野融合が自発的に進む仕組みとして、良く出来ている。ポストドクを雇うボスは、資金と装置と床と（自らの失敗を含めた）多くの知識と大受けしそうなテーマを持っている。しかし、年寄りで指先も震え顕微鏡も震んでデータを上手く集められず、頭も硬く固執から抜け出せない。ポストドクとなる若者は、金も装置も床もなく知識も少ないが、3-4日は徹夜で実験を続ける体力と器用な指先と良く見える眼、柔軟な発想が出来る最新型の脳みそ、そして人生の夢と勇気を持っている。ポストドクとは、前者と後者が手持ちの富を交換トレードする制度である。前者は後者から若い体力と指と眼と脳みそと勇気を手に入れ、後者は実験費用と装置と床、そして当面の生活費を手に入れる。こうして共同生産した研究成果が高い評価を受ければ、両者共に人生が豊かになる。ここで重要なのは、ボスは自分には出来ない異分野の作業をしてくれるポストドクを必要としており、ポストドクは自分の人生を掛けてボスとは異なる分野を開拓しなければ評価されないことである。世代交代を通して必然的に異分野融合が進むのである。彼の国は「人種の坩堝（ルツボ）」と形容されるが、「科学の坩堝」でもあるのだ。科学の坩堝による異分野融合が高い産業競争力を支えている。本領域の班員には、このまま万世一系の縦割りバラバラ科学の列に並び続けるか、クロスボーダポストドクを養成する科学の坩堝作りになるか、選択が問われている。

今や工学の現実は、「行き詰まり・閉塞」状態にある。数学・物理・化学に頼った古典的な設計論理で出来ることはやってしまった。どうすれば設計できるのかさえ分からないことが山積している。工学に「真の合成理論」は存在しない。人間は分析しか出来ない。上手く行った場合の分析経路を逆に辿ることを合成理論と呼んでいるに過ぎない。学習機械 (NeuralNet、誤差逆伝搬)、最適化制御 (Fuzzy 理論、Genetic Algorithm)、Combinatorial chemistry など、どれも条件を少しづつ

シラミ潰しに変えて上手く行った結果を捨てているだけの、完全敗北主義・設計放棄状態にある。そんな膨大な試行錯誤のコストに何時まで耐えられるのだろうか？

膨大な試行錯誤なら、自然界は既に終えた膨大な試行錯誤の結果で満ちている<sup>2)</sup>。生物の進化（変異と選択、工学用語なら試作と市場評価）は構造と機能の転用の歴史である。多くの工学者はそれすらも知らない（知ろうとしない）。現実の世界に在るものに目をつぶり続けるのなら、工学は科学の資格を失う。

18世紀は数学の時代、19世紀は化学の時代、20世紀は物理学の時代、そして21世紀は生物学の時代と呼ばれている（図1）。最初の三つは「この世界は、どんな物で出来ていて、どんな力が支配しているかを教えてくれた科学」で、現在の科学技術の基盤をなしている。そして、生物学は「この世界にはどんな設計があり得るのか」を教えてくれるのである。工学とは「積極的に人工物を設計して自然と相互作用する人間活動」なのだから、工学は生物の技術（生きる仕組み）から学ばざるを得ない。現実の世界には生物が満ち溢れており、我々自身が生物なのだから。

確かに、かつての物理学や化学は生物現象を脇に置いて対象から外すことで、身軽になり大きく発展し、現在の科学技術の基盤としての地位を確立した。生物学は数学、化学、物理学の発展の後でなければ開花できなかったし、数学・化学・物理学の理解なしに生物現象を深く理解出来ないことも事実である。しかしこの歴史上の発展の順は、これらの科学諸分野の単純さの順をも証明していることに注意してほしい。現在の工学は、単純な科学にしか頼ってこなかったのだ。複雑な現実に対処可能な技術を単純な科学に頼って作り上げる、というのも不思議な信仰である。

現実の世界に満ち溢れる生物現象の科学をも基盤に据えた、健全な工学体系を創り出して欲しい。

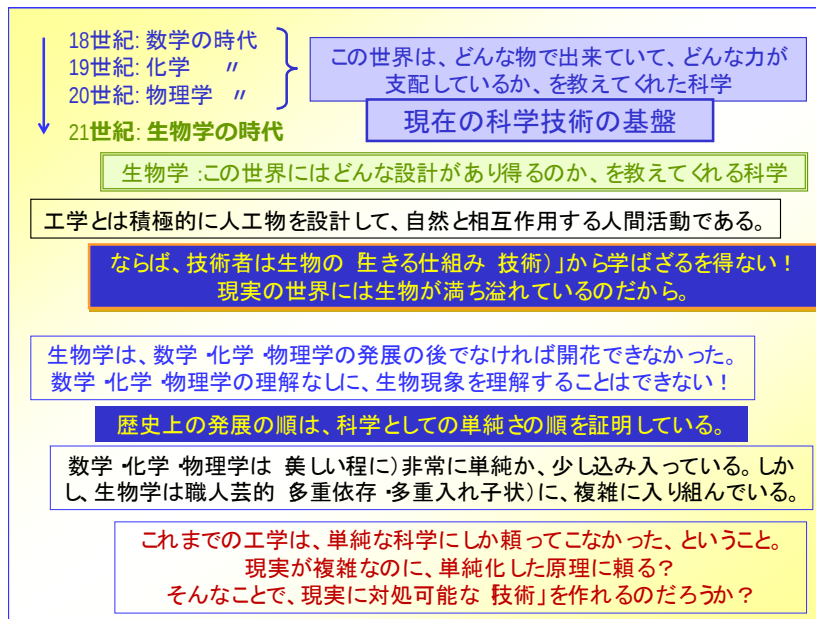


図 1. 自然科学諸分野の発展の歴史と役割および単純さの度合い

- 1) 下澤 楯夫「生物規範工学への道 (Towards Bionormal Engineering)」: 日本機械学会第 72 期全国大会講演論文集 (V)、p59-60、1994-8.17-19、北海道
- 2) リチャード・ドーキンス「進化の存在証明」、垂水雄二訳、早川書房、東京 2009

## 研究紹介

2012年12月10日 神戸国際会議場

文部科学省科学研究費新学術領域

「生物規範工学」全体会議

所属班：A01-1

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，生物多様性，インベントリ  
ー，表面構造，SEM



## 生物多様性を基盤とするバイオミメティクス・データベース の構築

### Construction of Biomimetics Database on the Basis of Biodiversity

#### 1. 研究の目的

A01-1班の研究目的は、新たな技術を開発しようとする工学研究者が、昆虫、鳥類、魚類などの生物の適応に関する生物学研究者の知識を検索し、技術革新の着想を得ることのできるデータベースシステムを構築することである。本研究では、工学と生物学との連携を、近年発達した著しい情報科学の技術を用いてスムーズに推進することを目指している。本研究の第一義は、工学研究者の発想をインスパイアし、新たな工業デザイン発見を支援することにあるが、本データベースの構築過程で得られる種々のデータやその解析結果は、工学研究者と生物学研究者の協調による生物進化研究へのフィードバックをもたらし、さらに本プロジェクトでは、研究成果をより多くの人に分かりやすく伝えるため、一般向けの普及啓発書の出版を計画し、また博物館の新しい展示コンテンツの開発とその利用も企画している。

平成 24-25 年度には継続して科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）において別の研究を実施している。本研究と目的や作業手順の点で共通性はあるが、CREST 研究では昆虫のみについて作業を行っているのに対し、本研究では昆虫、鳥類、魚類の幅広い生物群を対象としている。そのため、本研究では、きわめて異質なデータ同士の統合という、バイオミメティクス研究上重要なテーマの遂行に主眼を置く。成果発信の方法についても、本研究では一般へのアピールや人材育成、リカレント教育に力点を置いている。

#### 2) 研究組織

A01-1班の研究組織は大きく生物系の3小班と、情報科学系の2班に分けられる。生物系の3小班は、野村が昆虫を、山崎、上田、松原が鳥類を、篠原、松浦が魚類を担

当する。情報科学系は、画像検索を主とする部分を長谷山が、オントロジーを用いたテキストデータの検索を溝口、來村、古崎が担当する。連携研究者、研究協力者を含めたメンバーの一覧は以下のとおりである。

研究代表者 野村周平（国立科学博物館・研究主幹） 昆虫学、生物多様性  
 研究分担者 山崎剛史（山階鳥類研究所・研究員） 鳥類系統分類学、機能形態学  
 上田恵介（立教大学・教授） 鳥類行動生態学、進化生物学  
 松原始（東京大学総合研究博物館・助教） 鳥類の行動学・生態学  
 篠原現人（国立科学博物館・研究主幹） 魚類分類学、魚類形態学  
 松浦啓一（国立科学博物館・動物研究部長） 魚類形態学、動物地理学  
 溝口理一郎（北陸先端科学技術大学院大学・教授） オントロジー工学  
 古崎晃司（大阪大学産業科学研究所・准教授） オントロジー工学  
 來村徳信（大阪大学産業科学研究所・准教授） オントロジー工学  
 長谷山美紀（北海道大学大学院情報科学研究科・教授） 情報科学  
 連携研究者 土屋広司（浜松ホトニクス・主任部員） 極微弱光計測  
 河合俊郎（北海道大学総合博物館・助教） 魚類分類学、魚類系統学  
 小川貴弘（北海道大学大学院情報科学研究科・助教） 情報科学  
 研究協力者 松本和二（分光応用技術研究所・代表取締役） 分光学、色彩学  
 高岡良行（エネゲート(株)・主任研究員） 知識工学

### 3) 研究計画

生物系の3小班は、それぞれ昆虫類・魚類・鳥類について、博物館等に保管されている学術研究標本を活用して高情報量データ（走査電子顕微鏡画像、X線CT画像、マルチスペクトル画像など）の収集を進める。あわせて各生物群の特筆すべき適応や生息環境、系統関係等の情報をまとめたテキストデータを作成する。情報科学系2小班は統合的な検索技術を用いて、生物学の分科間（昆虫学・魚類学・鳥類学）を融合させ、工学的ニーズ／社会的ニーズによる検索機能をも付加したデータベースを構築する（生物学と工学の融合）。



所属班：B01-1班

所属機関：東北大学 多元物質科学研究所

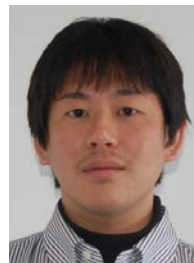
氏名：平井 悠司

所属機関住所：〒980-8577

宮城県仙台市青葉区片平2丁目-1-1

e-mail：y-hirai@tagen.tohoku.ac.jp

研究キーワード：深海魚、班間連携、サメ肌、眼



## 戸田漁港での班間連携深海魚採集

### Samplings of Deep-Sea Fishes on Heda Fishing port by group-group cooperation

技術革新を含む新たなバイオメティクス研究を進めて行くためには、如何にして生物の優れた機能を見いだしてその機能を解析、材料として開発するかが重要である<sup>(1)</sup>。我々の新学術領域研究には、膨大な種の生物を扱っている研究者から、様々な機能の測定、解析、そして材料作製を行っている研究者まで、幅広い分野の数多くの研究者が一堂に会している。そこでこの環境を最大限活かすために、まずは生物を扱っている研究者と材料の解析、作製を行っている研究者が共同でサンプル採集を行ったので、その様子について紹介する。

今回のサンプル採集は静岡県の戸田漁港で10月31日～11月2日の日程で行われ、サンプリングの対象としては深海魚を選択した。その理由として、深海魚はその特殊な生育環境から様々な機能を有している“特殊”な生物と考えられるからだ。例えば深海では大きな水圧がかかっており、その水圧下で行動するためには骨格的にも表面構造的にも特殊な機能を有していると示唆される。また深海には太陽光がほとんど届かないことから、少ない光を効率的に感知・利用するために、深海魚の眼は他の魚の眼にはない特殊な構造・機能をもっているとも考えられる<sup>(2)</sup>。戸田漁港でサンプル採集した理由としては、駿河湾は日本の近海で急激に深くなっている海であり、新鮮な深海魚のサンプルを採集することができるためである。サンプルの採集方法は、戸田漁港の網元の宿が所有する底曳き網漁船、清進丸の底曳き網により漁獲された深海魚の中から非食用のものを分けて頂いた。サンプルの処理は、10月31日、11月1日にそれぞれ水揚げされた深海魚をその翌日の午前中に洗浄、切片化、固定化した後持ち帰り、後日まずは走査型電子顕微鏡にて表面微細構造の観察を行った。

Fig.1 には水揚げされた深海魚の写真を示す。サンプルとしては主にサメを中心に、全18種の魚類が集められ、17の皮膚のサンプルと19の眼のサンプルを切片化し固定化した。

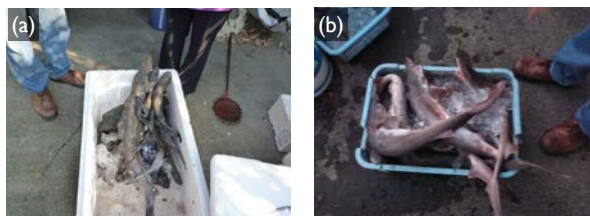


Fig.1 Photographs of samples. (a) Results of Oct. 31 and (b) Results of Nov. 1.

Fig.2 には固定化後のホシザメの皮膚と眼の写真を示す。また、Fig.3 には持ち帰ったホシザメの皮膚サンプルの走査型電子顕微鏡を示す。サメ肌特有のリブレット構造とともに、各鱗の根本にはマイクロスケールのディンプル構造を有する、階層構造が形成していることが明らかとなった。このディンプル構造はサメの種によって形成している種と形成していない種が観察されており、今後サメの遊泳性等の情報をもとに、その機能の特定を行っていく予定である。また、12月10日の発表では浜松医科大学の山濱様より、眼の表面構造についても報告を頂く予定である。



Fig.2 Photographs of (a) the skin and (b) the eye of a shark.

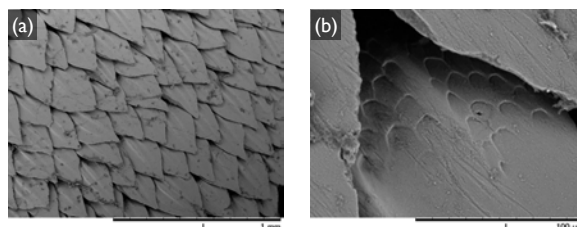


Fig.3 SEM images of a shark skin

#### 参加メンバー

篠原現人(A01-1 班)、平井悠司(B01-1 班)、細田奈麻絵(B01-3 班)

#### 参考文献

- (1) Bhushan, B.; *Phil. Trans. R. Soc. A*, **2009**, 367, 1445-1486
- (2) Douglas, R. H.; Partridge, J. C.; Marshall, N. J.; *Prog. Retin. Eye Res.*, **1998**, 17, 597-636

#### 謝辞

本サンプル採集に関しては、網元の宿 清進丸の皆様、国立科学博物館の中江雅典資氏、片山英里氏に、また、サンプル処理の場として戸田造船郷土資料館にご協力頂きました。

所属班：B01-2班

所属機関：北海道大学理学研究院数学部門

氏名：久保英夫

所属機関住所：〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

e-mail：kubo@math.sci.hokudai.ac.jp

研究キーワード：数学，微分方程式論，波動方程式



## 1 次元フォトリック結晶中の厳密結合波解析 On the rigorous coupled-wave analysis in one dimensional photonic crystals

生物は、可視光の波長程度の構造を自発的に形成し、干渉や回折などの光学現象を巧みに利用しながら構造色を発現している。そのような構造色のなかで、近年、甲虫の表面にみられる金属色や魚群において観察される銀色のように幅広い波長帯域の光が同時に反射されるような現象に注目が集まっている<sup>(1-2)</sup>。屈折率が一定であるような媒質の薄膜や異なる屈折率をもつ薄膜を層状に積み重ねた多層膜の表面における反射では、入射波の入射角、薄膜の厚さ及び屈折率によって決定される特定の波長の光が強調されて反射してくることが良く知られている。たとえば、タマムシは外表皮内層にある層状構造によって構造発色している(Fig.1)。

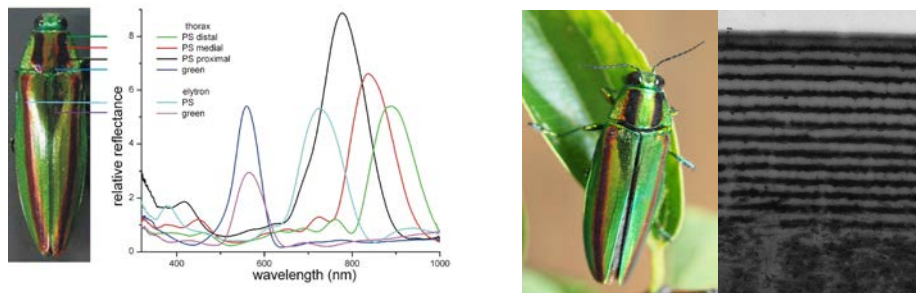


Fig.1 SEM image of stratified media.

従って、波長が広帯域に渡るような光が反射されてくるには、各薄膜内の屈折率の非一様性が重要であると思われる。その様な場合には、薄膜はあたかも異方性をもつ結晶のように振る舞うので、偏光について詳しく調べる必要がある。そこで、本講演では屈折率が周期的に変化するような薄膜- 1 次元フォトリック結晶(Fig.2)-中を伝播する光を厳密に解析するための枠組みについて考察する。



Fig.2 Image of one dimensional photonic crystal.

さて、フォトニック結晶に限らず、媒質中の光の伝播を理論的に解析するには

マクスウェルの方程式 ⊕ 構成関係式 ⊕ 境界条件

を解かなければならず、きわめて煩雑である。もっとも、光は二つの偏光成分(s 偏光、p 偏光)をもつので、光(電磁波)をベクトルの的に分解して考えることが多い。しかし、今後、1 次元フォトニック結晶を多層化した場合を解析する際には、その偏光状態が各層毎に変化するような状況(Fig. 3)をも考察しなければならないので、ここでは偏光を区別せずに扱う。そのために 4×4 行列法<sup>(3)</sup>を基本とするが、そこで扱われている媒質は空間的に一様なものである、媒質内の光波の横方向の波数は単一なものとなっている。しかし、結晶内の光波の横方向の波数はその周期性を反映すべきなので、その枠組みを次のよう更に一般化する必要がある：

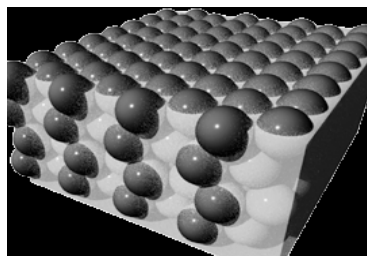


Fig.3 Image of opal composite.

**Step 1.** 光波の時間依存性を  $\exp(-i\omega t)$  と仮定する(定在波への帰着)。

**Step 2.** 屈折率の周期性を用いて、結晶内の光波の横方向の波数と縦方向の波数との関係を導く<sup>(4)</sup>。

**Step 3.** ブロッホの定理を用いて、結晶内の光波の一般解を求める。

そして、求めた光波と入射領域における入射波・回折波および透過領域における透過波とが境界条件を満たすように回折係数・透過係数を決定し、反射率と透過率を計算する。

厳密結合波解析に関する代表的なレビュー論文<sup>(5)</sup>などでは、**Step 2** と **Step 3** の順序が逆になっているが、その場合、縦方向の波数を無限サイズの行列の固有値として導かなければならないのに対して、その順序を逆にすると、有限サイズの行列の固有値を求めてから標準的なフーリエ級数の理論に乗せられるという利点がある。

#### 参考文献

- (1) A. E. Seago; P. Brandy; J-P. Vigneron; T. D.Schultz, J. R. Soc.Interface, **2009**, 6, S165-S184.
- (2) T. M. Jordan; J. C. Partridge; N. W. Roberts, Nature Photonics, **2012**, 6, 759-763.
- (3) D. W. Berreman, J. Opt. Soc. Am. **1972**, 64, 502-510.
- (4) 黒田和男, 「物理光学」(朝倉書店)
- (5) M.G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, J. Opt. Soc. Am. **1995**, A 12, 1968.

謝辞：本講演の着想へと導いて下さった B01-2 班の皆様に感謝致します。

所属班：B01-3

所属機関：北海道大学電子科学研究所

氏名：居城邦治

所属機関住所：〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目

創成科学研究棟

e-mail：ijiro@poly.es.hokudai.ac.jp

研究キーワード：DNA、塩基選択性、分子鋳型、  
ナノワイヤー、ナノメッキ



## DNA を分子鋳型とした バイオミメティック金属ナノワイヤー作製技術の開発

### Development of Biomimetic Method for Metallic Nanowires

ボトムアップ型ナノテクノロジーは自己集合(self-assembly)と散逸構造に基づく自己組織化(self-organization)を利用した微細構造作製技術であり、従来のフォトリソグラフィを中心としたトップダウン型ナノテクノロジーでは対応できない小さなスケールでの加工を大がかりな装置を用いることなく可能にする技術として期待されている。我々の研究室では原子や分子、ナノ粒子などをボトムアップ的に組織化する手法のお手本を生物に求めてきた。DNA は遺伝を保持する物質として知られており、二本の鎖のアデニン(A)とチミン(T)、グアニン(G)とシトシン (C) がそれぞれ特異的に水素結合することによって相補的な塩基対を形成し、それらがスタッキングすることで二重らせん構造をつくる特異な高分子化合物である (Fig.1)。このような DNA を分子レベルの鋳型として用いて金属ナノワイヤーを作製してきた<sup>(1)</sup>。

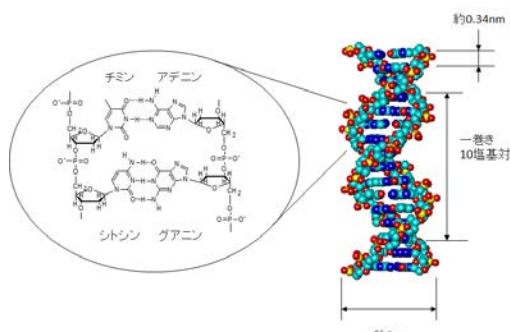


Fig.1 Structure of double-stranded DNA.

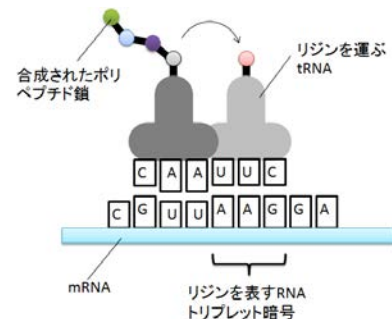


Fig.2 Translation of mRNA to protein.

生体内では DNA は遺伝情報を保持するための物質として存在しており、DNA の遺伝情報は mRNA を通してタンパク質に一方的に翻訳される。mRNA が鋳型となり、tRNA が順次結合してアミノ酸が重合され、DNA の遺伝情報を持ったタンパク質（ポリペプチド鎖）が生合成される（Fig.2）。我々はこのような DNA の塩基配列→物質の転換システムを模倣した塩基配列選択的な金属ナノワイヤーの作製方法を開発した。シスプラチン(CP)は抗ガン剤として知られるプラチナ錯体であり、連続したプリン塩基（例えば GG）に選択的に共有結合することができ、これを還元すると GG の近傍にプラチナのクラスターを析出することができるので、G が長く連続して配列していればプラチナのナノワイヤーを作製することが可能になる（Fig.3(a)）。DNA の塩基に選択的なナノワイヤーを作製することを目的として、G の連続配列と AT 配列からなるジブロックコポリマー型 DNA、poly(dG)・poly(dC)-poly[d(AT)]を酵素反応により新たに合成した。この DNA と CP を混合し CP を化学的に還元した後、雲母基板上に伸長固定化して AFM 観察を行った。Fig.3(b)中の A 部分は DNA より高さが上昇していることからプラチナが析出して poly(dG)・poly(dC)ブロックに沿ってプラチナのナノワイヤーが形成したことがわかった。それに対して Fig.3(b)中の B 部分は裸の DNA の平均高さと同じことから B 部分は poly[d(AT)]ブロックに相当し、プラチナは析出していないことを示している<sup>(2)</sup>。この実験より、DNA を分子鋳型として用いれば、塩基配列選択的にナノワイヤーを作製できることを示した。最近、この手法を応用して、金属ナノギャップ電極を自己組織化的に作製することに成功しており<sup>(3)</sup>、今後はより複雑な電子デバイスの作製を目指す。

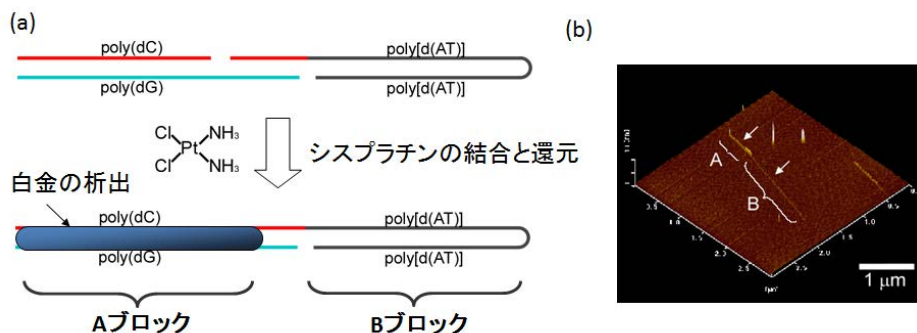


Fig.3 Schematic illustration of base-specific deposition of Pt on block copolymer DNA (a) and AFM image of Pt-deposited DNA.

参考文献：

- (1) Hashimoto Y.; Matsuo Y.; Ijiri K. *Chem. Lett.* **2005**, 34, 112-113.
- (2) Tanaka A.; Matsuo Y.; Hashimoto Y.; Ijiri K. *Chem. Commun.* **2008**, 4270-4272.
- (3) Mitomo H.; Watanabe Y.; Ishikawa A.; Matsuo Y.; Niikura K.; Ijiri K. *in preparation*.

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：羽ばたき飛行，筋骨格モデル，神経系，機械感覚，視覚



## 昆虫の安全な飛行のしくみを探る

### Exploring safety of the insect flight system

昆虫は2～4枚の翅の羽ばたき運動により、トンボのホバリングやハエの逃避のように空中で高い機動性を発揮することができる。また、摂食による体重変動や翅の損傷に対しても姿勢を保持し飛行を継続することができる。このような昆虫の優れた飛行能力は、神経系と筋肉からなる「アクティブな」制御系だけでなく、翅や外骨格、そして筋肉の物性がもたらす「パッシブな」特性によるところも大きい。例えば、羽ばたき運動において翅はパッシブに変形するが、この変形が空気力の発生に重要であることが計算流体力学により明らかにされている<sup>(1)</sup>。また、ハエやガなどの昆虫が持つ間接飛翔筋と呼ばれる筋は、外骨格を変形させることで間接的に羽ばたき運動を引き起こすことから、筋骨格系の物性は羽ばたき飛行にとって重要な役割を果たしている<sup>(2)</sup>。したがって、昆虫飛行のバイオミメティクスにおいては、その分析の過程ではアクティブな要素とパッシブな要素を切り分け、最終的に統合して理解することが重要である。本研究では、昆虫の飛行におけるアクティブな要素である神経系とパッシブな要素である筋骨格系の解析を行い、これらの知見を統合した神経系－筋骨格モデルの構築を目指す (Fig. 1)。さらに研究代表者の劉教授らが進めている計算流体力学と組み合わせることで、神経活動から空力に至る昆虫飛行の統合的理解を実現する。

実験昆虫は、チョウ目スズメガ科のエビガラスズメ (*Agrius convolvuli*) を用いる。本種は通年飼育が可能で大型であること、そして優れた飛行能力を有しているため、研究対象として適している。神経系の解析では、飛行制御に重要な役割を果たす機械感覚、および視覚による運動へのフィードバック経路を中心に解析を行う。これまでに翅の変形といった機械感覚の自己受容器の神経経路を明らかにしてきたが<sup>(3)</sup>、本課題ではこれ

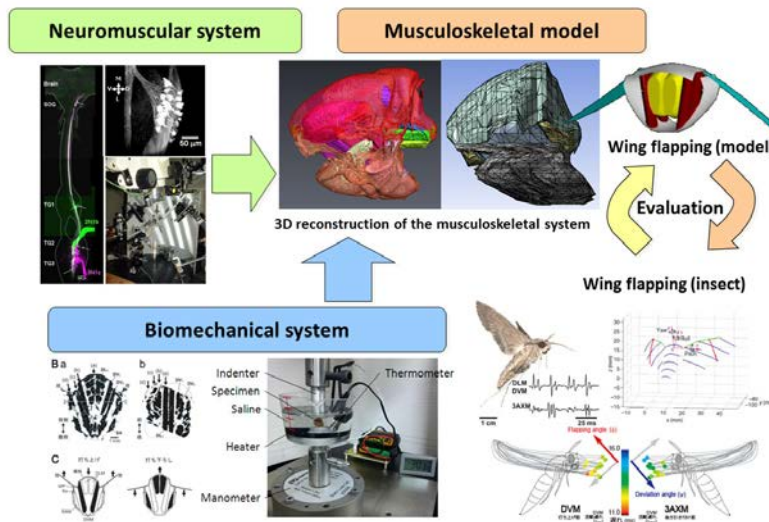


Fig.1 Overview of the project to construct an insect musculoskeletal model.

らの機能を電気生理学および行動学的手法を用いて解析する。また視覚情報（オプティカルフロー：自身の動きによる背景の動き）による飛行制御についても解析を行い、この系の入出力特性を明らかにする。一方、筋骨格系の解析では、X線CTや切片画像から胸部の三次元構造を再構成し、そこへ筋肉や外骨格の物性値を入力し有限要素法解析を用いて羽ばたき運動を再現することを計画している。形状モデルでは、単に複雑な形状を再現するのではなく、ヒンジのような外骨格表面の機能構造の再現を重視する。モデルの評価は、実際の羽ばたき運動における各飛翔筋活動<sup>(4)</sup>をモデルに入力し、出力である羽ばたき運動を実際の運動と比較することで行う。最終的に神経系の知見を筋骨格モデルに統合し、その入出力特性（入力：視覚、機械感覚；出力：筋電位、羽ばたき運動）を実際の昆虫と比較しパラメータの最適化を行う。

本年度は、神経系の解析については計測装置の構築と視覚情報に対する神経系の入出力特性の解析を進めている。また筋骨格系については、外骨格の機能構造の解析を行い形状モデルへ反映させる予定である。

#### 参考文献

- (1) Nakata, T., Liu, H. *Proc. R. Soc. B*, **2012**, 279, 722-731.
- (2) Snodgrass, R. E. In *Principle of Insect Morphology*, McGraw-Hill, New York, 1935, pp228-248.
- (3) Ando, N., Wang, H., Shirai, K., Kiguchi, K., Kanzaki, R. *J. Insect Physiol.* **2011**, 57, 1518-1536.
- (4) Wang, H., Ando, N., Kanzaki, R. *J. Exp. Biol.* **2008**, 211, 423-432.

所属班：C－1 班

所属機関：新潟大学工学部 機能材料工学科

氏名：山内 健

所属機関住所：〒950-2181

新潟市西区五十嵐 2 の町 8 0 5 0

e-mail：yamauchi@gs.niigata-u.ac.jp

研究キーワード：TRIZ、ソフトマテリアル、バイオミメティック・デバイス



## Bio-TRIZ を利用したバイオミメティック・デバイスの開発

## Development of Biomimetic Devices Using Bio-TRIZ

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。工学分野では機械工学を中心に工学的な問題を系統的に解決できるアイデア創出法として TRIZ（トゥリーズ）が知られている。TRIZ とはロシアの特許審議員であった Genrikh Saulovich Altshuller (1926-1998) が、約 250 万件の特許を調査してその中にある規則性を体系づけた“発明的な問題を解決するための理論”のことである。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る点で、解決したい問題をパターン化することで 40 個の解決原理の中から最適な問題解決法が自動的に抽出される仕組みになっている。

近年、次世代材料を開発するための有用な手段として、この技術問題解決法が注目されており、J. F. V. Vincent 氏（前バース大学教授）らは無尽蔵に眠っている生物の巧みな機能を TRIZ の問題解決法に置き換えた、Bio-TRIZ という新しい概念を提唱している。ここでは「マイクロバイオリアクターの反応速度の向上」を一例にバイオミメティック材料設計を試みる。

微細加工技術は医療・健康分野にも小型化、高性能化、省エネルギー化をもたらしている。微細加工技術を応用することで抗体や酵素といった生体機能性物質を担持したマイクロバイオリアクターやマイクロバイオチップの研究が進展している。しかしながらその多くは高分子樹脂、活性炭、金属酸化物といったドライな流路表面または流路内に生体機能性物質を固定化、充填するものが多く、反応速度を高めようとすると、材料の質量および形状、システムの圧力などの阻害要素が発生する。このように定義した問題を解決する際に TRIZ での有効な解決原理として 36. 相変化原理、29. 液体利用原

理、3. 局所性質原理があげられる。ここから①材料を固相から液相への変換、②液体層の利用、③非対称構造などが連想される。Bio-TRIZ ではこれらの原理を重複している生物機能に柔突起の働きがあげられる。柔突起は主成分が水から成るソフトマテリアルで表面積がきわめて高く、マイクロロッド状の柔突起間を溶液が流速を落とさずに流れていく。

そこで、多孔質シリコンウェハー上で、酵素を含むポリビニルアルコール(PVA)水溶液を凍結と融解を繰り返すことにより、微小な突起構造を有するPVA ゲルを作製した。PVA ゲルは優れた生体適合性や親水性を有するうえに、凍結融解操作によるゲル化は、タンパク質の変性に大きく影響しないことが知られている。酵素を固定化した PVA ゲルに突起構造を付与することで、絨毛のような生体環境を *in vitro* で再現した高効率な生化学反応デバイスの開発を検討した。具体的にはシリコンウェハーをアルカリエッチング、電解エッチングすることで、直径数  $\mu\text{m}$  の微細孔を形成した多孔質シリコンウェハーを作成した (Figure 1)。この多孔質シリコンウェハーに酵素を溶解した 10 wt%PVA 水溶液をキャスト後、減圧処理により微細孔内に充填した。その後、凍結と融解を繰り返してゲル化させた (Figure 2)。酵素を有する PVA ゲルに、呈色試薬を混合した基質溶液を反応させると、ゲル中及び界面で酵素反応が進行し、徐々に赤く呈色した。これより、本手法で作製した PVA ゲルは、活性を極端に損なうことなく酵素を固定化出来ることがわかった (Figure 3)。これらの結果から、小腸の絨毛が効率的に消化、吸収を果たすように、柔突起構造を有する PVA ゲルは、高感度なマイクロバイオリアクターとして期待できる。

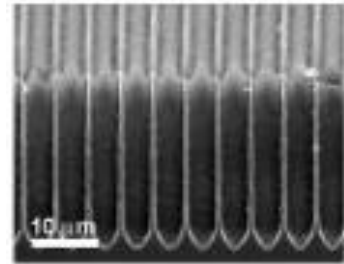


Figure 1 Silicon mold prepared by electrochemical method.

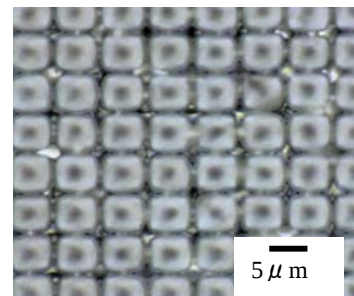


Figure 2 Enzyme immobilized PVA gel with micro-rod structure.

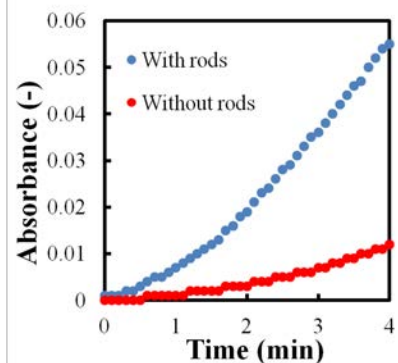


Figure 3 Application of enzyme immobilized PVA gel with micro-rod structure for bio-reactor.

## 活動報告

2012年10月2日 上野国立科学博物館

文部科学省科学研究費新学術領域

「生物規範工学」公開講演会

所属班：A01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

e-mail：miki@ist.hokudai.ac.jp

研究キーワード：画像



## バイオミメティクス・データベース構築： 発想支援型画像検索システム

### Construction of Biomimetics Databases: Image Retrieval Systems for Creativity Support

高速通信網の普及に、記録媒体の大容量化と低廉化も伴い、我々の周りは急速にデジタル化している。大量に蓄積されたデジタルデータから価値を見出すことが重要とされ、様々な研究が行われている。特に、画像や映像はその娯楽性から産業化も早く、既に希望のコンテンツを視聴可能な検索サービスが利用されている。

ところで、既存の検索サービスは、コンテンツに付与されたメタデータにより行われている。このメタデータとして、過去には、撮像時に得られる情報（撮像日時や場所等）や人手により付与されたキーワードが用いられてきたが、現在は、画像データから自動で抽出された特徴に基づいて検索する手法が提案され、一部利用されている。これは、以前より研究されてきた機械学習、特に統計的機械学習によるメディア解析技術が大きく貢献した結果である<sup>(1)</sup>。

上の分野を含め広く画像処理について研究を行ってきた筆者が着手した研究が、発想支援型の画像検索<sup>(3)</sup>である。画像や映像などの非構造化データの特徴を分析し、異なる分野に蓄積された異なる種類のデータを有機的に連携することで、検索者に気づきを与え発想を支援する情報検索を実現する理論体系の構築を目指している。この理論に基づき、発想支援型画像検索基盤を実現する試みがバイオミメティクス・データベースである。筆者は、2012年10月2日に東京都台東区で開催された公開ワークショップで、生物学と工学の連携基盤となるバイオミメティクス・データベースを紹介した(Fig.1)。バイオミメティクス・データベースは、今まで昆虫や鳥類、魚類などの分類ごとに個別

につくられた博物学データベースの情報を統合しただけでなく、異なる研究分野の研究者の利用を可能とし、さらには、産学問わず広く工学系研究開発者が望む情報を検索可能な環境を提供する。沢山の研究分野に蓄積された大量のデータの背景には、分野に固有の貴重な知識が存在する。貴重な知識には、言語化されにくいものも多く、他者が利用するのは容易ではない。社会が解決を望む問題は複雑さを増し、問題の所在さえ見えない現状で、個別の研究分野の研究者に知識が留まっていたのでは、解決の方策を見出すには限界がある。発想支援型画像検索基盤であるバイオミメティクス・データベースを異なる研究分野の研究者や開発者が利用することで、その知識を共有できれば、新たな気づきが生まれ、解決方策の創出が加速されると考える。研究に留まらず、一見、大きくかけ離れたように見える異分野のデータベース統合を通して、新しい産業の創出を支援する産学連携のプラットフォームの実現を目指したい<sup>(2)</sup>。

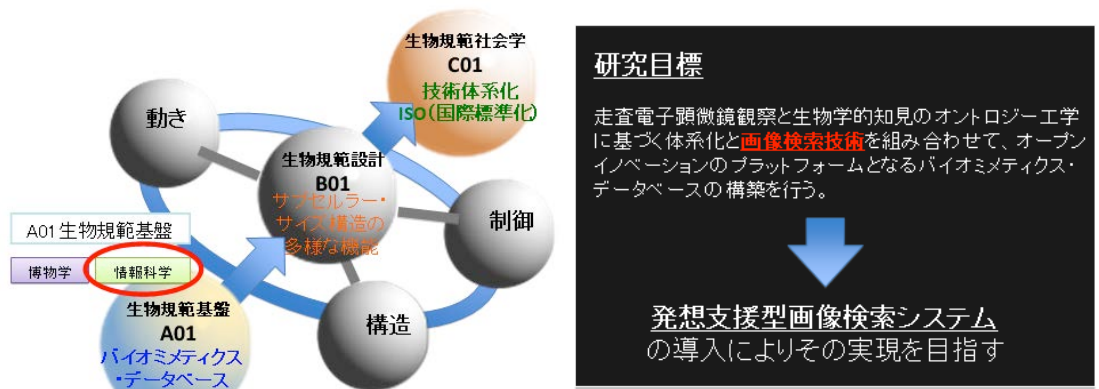


Fig.1 The role of biomimetics databases in biodiversity-based innovative materials engineering.

#### 参考文献：

- (1) 長谷山美紀: 画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース, 電子情報通信学会誌, Vol. 93, No. 9, pp. 764-769, 2010.
- (2) 北海道大、技術革新の着想が得られる発想支援型データベース開発に着手, 技術者を応援するサイト Teck-On(日経BP社), <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20121003/243572/?ref=IP>
- (3) Miki Haseyama, Takahiro Ogawa: "Trial Realization of Human-Centered Multimedia Navigation for Video Retrieval", International Journal of Human-Computer Interaction (to appear)

所属班：B01-1班

所属機関：東北大学 多元物質科学研究所

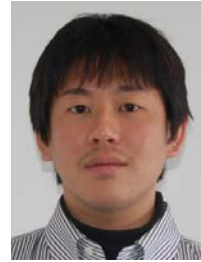
氏名：平井 悠司

所属機関住所：〒980-8577

宮城県仙台市青葉区片平2丁目-1-1

e-mail：y-hirai@tagen.tohoku.ac.jp

研究キーワード：トライボロジー、流体摩擦、界面、微細構造、自己組織化



## 微細界面構造とウェットトライボロジー

### Wet Tribology of Interfacial Nanostructures

近年のエネルギーに関する重要な課題として、如何にエネルギーを無駄にせず、効率的に利用できるかが一つのキーワードになっている。そこで我々は摩擦、特に“濡れた”状態での摩擦に着目した。これまでの報告で、サメ肌表面には数百マイクロメートルスケールのリブレット構造が形成しており、そのリブレットの整流効果によって高速遊泳時の流体抵抗を低減しているといわれている<sup>(1)</sup>。一方でサメを含む魚類の鱗表面には、フジツボ等の海洋生物が付着しないことも知られている<sup>(2)</sup>。海洋生物によるタンカー等船舶底面への付着汚染は燃費を悪化させることが知られており、低摩擦かつ抗付着性材料の作製は重要な研究テーマである。

我々B01-1 班は高強度ゲルの作製技術<sup>(3)</sup>と自己組織化をベースにした微細構造の作製技術<sup>(4-5)</sup>、さらには表面化学組成の精密制御を可能とする若手研究者<sup>(6)</sup>により構成されており、新規材料の作製プロセスにおいても省エネルギーでの機能性材料開発が可能である。そこで我々は濡れた界面での自己組織化を利用した動的に構造と機能を制御可能な新規機能性摩擦制御・抗付着性材料の開発を目指すことにした(図1)。

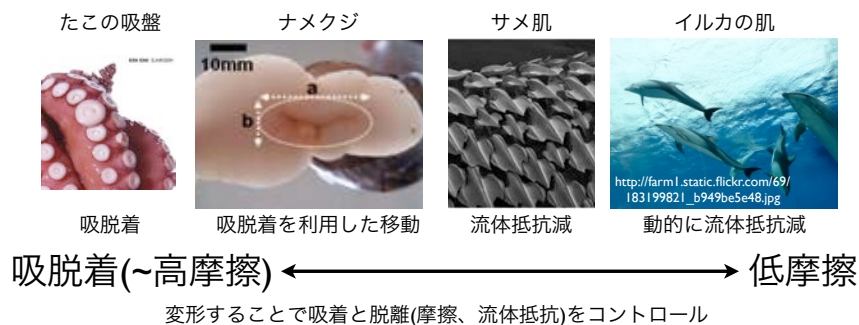


Fig.1 Examples of friction control in nature

図2にはB01-1班の班員構成とその役割、研究方針をまとめた図を示す。また本研究を進めて行く上で重要な生物試料の観察・機能解析においては、すでにA01-1班と連携しており、実際にまずはサメ肌のサンプルを提供して頂き、走査型電子顕微鏡にて観察を行っている(図2)。さらに作製した材料に関しては、社会に還元や適合可能な材料とするためにC班と議論を行っていく予定である。

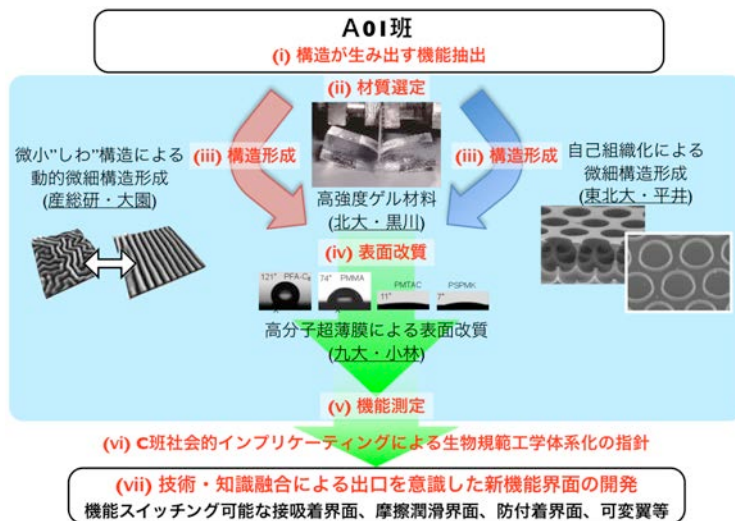


Fig.2 The research strategy of B01-1

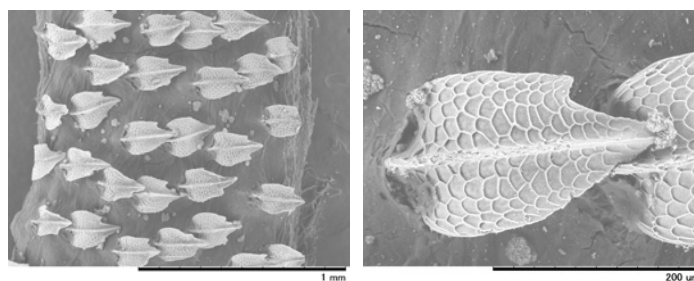


Fig.3 SEM images of a shark skin.

#### 参考文献

- (1) Bechert, D.W.; Bruse, M.; Hage, W.; Meyer, R., *Naturwissenschaften*, 2000, 87, 157–171
- (2) Murosaki, T.; Noguchi, T.; Kakugo, A.; Putra, A.; Kurokawa, T.; Furukawa, H.; Osada, Y.; Gong, J. P.; Nogata, Y.; Matsumura, K.; Yoshimura, E.; Fusetani, N., *Biofouling*, **2009**, 25(4), 313-320
- (3) Gong, J. P.; Katsuyama, Y.; Kurokawa, T.; Osada, Y., *Adv. Mater.*, **2003**, 15, 1155-1158
- (4) Ohzono, T.; Watanabe, H.; Vendamme, R.; Kamaga, C.; Ishihara, T.; Kunitake, T.; Shimomura, M., *Adv. Mater.*, **2007**, 19, 3229-3232.
- (5) Hirai, Y.; Yabu, H.; Matsuo, Y.; Ijio, K.; Shimomura M., *J. Mater. Chem.*, **2010**, 20, 10804-10808
- (6) Kobayashi, M.; Takahara, A., *Chem. Rec.*, **2010**, 10, 208-216

所属班：B01－2班

所属機関：大阪大学大学院生命機能研究科

氏名：吉岡伸也

所属機関住所：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1－3

e-mail：syoshi@fbs.osaka-u.ac.jp

研究キーワード：構造色、光技術、モスアイ構造、反射防止



## いい加減かつ巧妙：生物に学ぶ光技術

### Delicate but Robust : Light Technology of Animals

眩いばかりの青色を放つモルフォチョウ、反射を極端に抑えた蛾の複眼表面、入った光を効率よく検出する深海魚の目玉・・・、自然に生きる生物達は、環境に適した光技術を駆使して生存競争に勝ち残ってきた。その技術には、巧妙に設計されたサブセルラーサイズの構造が利用されている。一方、人間のフォトニクス技術も相当に進んでいる。レーザー光線向けに設計された誘電体多層膜鏡はほぼ 100%の効率で光を反射するし、リソグラフィー技術を用いて作成された微細構造は、電子顕微鏡の中で整然と並んだ構造物として観察される。このような人間の技術と、生物が利用する光技術では何が異なるだろうか。B01-2 班では、“いい加減さ”を含みながら、それでもしっかりと機能を発揮する“巧妙さ”が、生物から学ぶべき特徴ではないかと考えている。

例えばタマムシの構造色を見てみよう。タマムシの金属のような光沢は、鞘翅表面に存在する多層膜構造が干渉を起こすことに物理的な原因がある (Fig. 1)。緑色の色素を用いずに生み出される鮮やかな構造色は、法隆寺の玉虫厨子がいまだに輝きを保っているように、退色性にきわめて優れた特徴を持っている。しかし、多層膜構造を詳しく



Fig.1 Jewel beetle (*Chrysochroa fulgidissima*). Angle dependent photographs showing the iridescence (left) and the transmission electron micrograph of the elytron (right). Scale bar: 500 nm

観察すると、層の境界は平坦ではなく、かなりの凹凸が見られる。さらに、層が完全に途切れた部分や、一つの層が二つに分離する場所もあるため、タマムシの多層膜構造は欠陥だらけであると言える。真空薄膜蒸着によって作成された人工の多層膜構造とは大違いである。しかし、欠陥だらけではあっても、玉虫色が消えてしまうほどには乱れてはいない。一方、最近の研究によって、光学的に重要な役割を発揮する要素においては、微妙な制御がなされていることがわかった<sup>(1)</sup>。実は、タマムシの構造色は、単純な周期的多層膜構造では正しくモデル化できない。屈折率が低い材質が一番外側の層を形成しているために、周期的なモデルを仮定すると、上端面から反射された光と内部から反射された光の位相がそろわず、打ち消しあう干渉が起きてしまう。タマムシの多層膜構造では、あたかもその問題を回避するかのように、表層付近の層が内側よりも少しだけ厚く、内部から反射された光の位相を調節している。その結果、緑色の光で強めあう干渉が起きて反射率が上昇する。タマムシの多層膜構造は、乱してよいところは乱しておいて、きっちり作る部分はきっちりと作ってある。その見極めは巧妙としか言いようがない。

規則性と不規則性を共存させた系は、モスアイ構造と呼ばれる反射防止構造にも見つけることができる。複数種の昆虫を観察すると、突起の配列には異なる度合いの欠陥・乱れが見出される (Fig. 2)。これらの欠陥、あるいは“いい加減さ”は、生物のサブセルラー構造が自己組織化として形成されることに本質的な関わりがあるだろう。そのプロセスには、乱れを許容範囲内で抑えるための工夫があるはずだ。あるいは、乱れをあえて加えることで、光学特性以外の機能を発揮しているかもしれない。B01-2 班では、構造の規則性・不規則性の評価方法を確立し、その発生過程を学ぶことで、揺らぎを含んだ光技術を育てることを目指している。

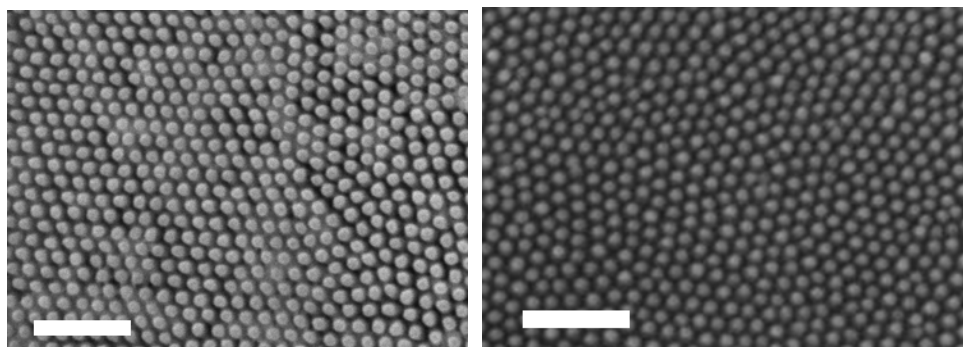


Fig.2 Nipple array having different degrees of irregularity. The surfaces of the compound eye of *Helicoverpa armigera armigera* moth (left, observed by Dr. Yamahama) and the transparent wing of *Terpnosia nigricosta* cicada (right, observed by Prof. Shimozawa). Scale bar: 1  $\mu$ m

(1) Yoshioka, S.; Kinoshita, S.; Iida, H.; Hariyama, T.; *J. Phys. Soc. Jpn.* **2012**, *81*, 054801.

所属班：生物規範階層ダイナミクス班  
所属機関：独立行政法人 物質・材料研究機構  
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：接合、昆虫、バイオミメティクス  
水中接着、グルーミング



虫が手をする足をする：  
虫から学ぶ接着・非着のナノテクノロジー  
Adhesion and nonadhesion technology  
Learning from insects

接着・接合技術はものの組み立てに欠く事のできないものであり、人類がものづくりを始めた頃からくっつける技術が使われていたと考えられる。現代の我々の身近にある接着・接合技術は、高分子化学と石油化学工業の発展とともに有機系接着剤が飛躍的に進歩し、身近な製品から航空宇宙などの先端技術までその適用範囲は広い。こうした技術開発は主に如何に強く信頼性の高い接合を達成できるかに視点をおいて開発されて来た。新素材の開発とともに多様な材料に対して強く接合できるようになったが、その一方で剥がしにくいためリサイクルする時の解体を困難にしている。地球環境保全への関心が高まるとともに、循環型の社会への変換が求められ接着・接合技術も剥がすことを念頭にした開発が求められているのである。しかし、接合部の強さと剥がれ易さは正反対の現象であるため開発は困難であった。

ところで、接着・接合技術は、人類だけが利用しているものではない。生物は被着表面上へ体の固定や表面上の移動に接着・接合を利用しており、中には接着・剥離に優れたものがある。本講演では、虫の優れた接着機構のしくみを解説し、ナノスケールの被着表面の形状がもたらす接着性の限界、虫が足を擦る引き金のなぞ<sup>1)</sup>、陸上で生息するハムシのような昆虫が水中を歩く能力を持っているという新発見<sup>2)</sup>などを紹介した。

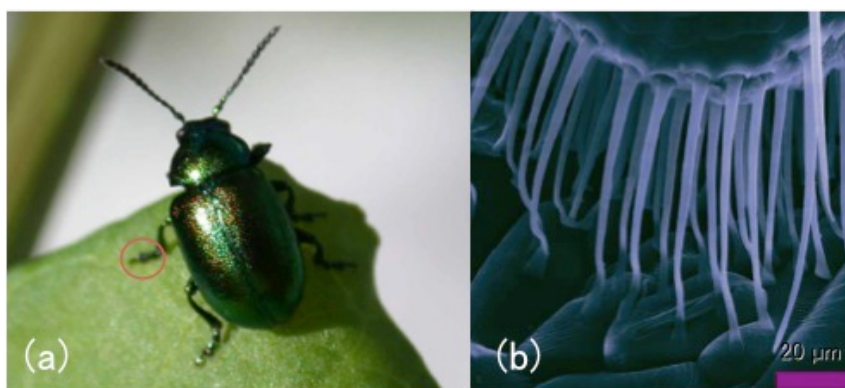


Fig.1. (a) The leaf beetle *Gastrophysa viridula* (Coleoptera, Chrysomelidae), (b) Attached terminal elements of *G. viridula* on the replica of adaxial surface of *R. obtusifolius*



Fig.2 . The leaf beetle *Gastrophysa viridula* (Coleoptera, Chrysomelidae) grooming 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> feet of the right body side.

#### 参考文献

- (1) Naoe Hosoda and Stanislav N.Gorb, "Friction force reduction triggers feet grooming behaviour in beetles", *Proceedings of the Royal Society B*, **2011**, 278,1748-1752
- (2) Naoe Hosoda and Stanislav N.Gorb , "Underwater locomotion in a terrestrial beetle: combination of surface de-wetting and capillary forces", *Proceedings of the Royal Society B*, **2012**, published online, 4236-4242

#### 謝辞

本研究の一部は、NIMS 理事長ファンド、積水化学 自然に学ぶものづくり 研究助成プログラムなどからの研究費の助成を受けて行った。

所属班：B01-3

所属機関：産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル

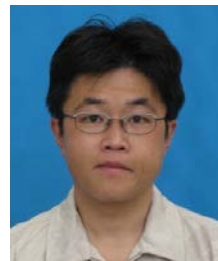
研究部門 高耐久性材料研究グループ

氏名：穂積 篤

所属機関住所：〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞  
2266-98

e-mail：a.hozumi@aist.go.jp

研究キーワード：動的濡れ性、滑液性、接触角ヒステリシス、汎用元素



## 汎用元素による環境に優しいはつ油処理

### Environmental-friendly Oleophobic Treatments Using Ubiquitous Elements

蓮の葉の構造／機能を模倣した超はっ水性に関する研究が、最近のバイオミメティクス研究のブームにもあって再び世界中で活況を呈している。Bonn 大学（ドイツ）の Wilhelm Barthlott 教授はこの蓮の葉に注目し、表面の凸凹構造とその先端から分泌される Plant Wax の相乗効果によって、超はっ水性とセルフクリーニング効果が現れることを見出した。しかし、この Plant Wax は油とよくなじむため、例えば *n*-ヘキサデカンを蓮の葉に滴下すると一瞬にして濡れ広がってしまう。固体表面にはつ油性を付与するためには油よりも表面エネルギーの低い有機フッ素化合物が有効であることは周知の事実である。しかしながら、近年、有機フッ素化合物の製造に必要な蛍石の価格高騰や、それらの人体・環境への影響（特にパーフルオロオクタン酸）が懸念されており、本物質群に対する規制も年々厳しくなっている<sup>(1)</sup>。そのため、省エネルギー・省資源・低環境負荷の観点からも、有機フッ素化合物に依存しない“汎用元素”による表面処理技術の開発が望まれている。

我々は、接触角を大きくし、液滴と固体表面との接触面積を小さくするという従来の表面処理ではなく、動的濡れ性（前進（ $\theta_A$ ）、後退（ $\theta_R$ ）接触角、および接触角ヒステリシス（ $\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$ ））を制御することにより、液滴の滑落性を向上させる新しい表面処理技術の開発に従事している。我々のコンセプトは、分子が駆動可能な“Liquid-like”な表面の構築である。そのような表面では官能基や高分子鎖の回転／駆動により液滴の3相接触線も動きやすくなり、液滴が動く際のエネルギーバリアが小さくなるためヒステリシスが小さくなると考えている。これまで、特殊分子構造を持った単分子膜<sup>(2-3)</sup>、

低分子量の PDMS ポリマーブラシ<sup>(4-5)</sup>等で被覆することで固体表面が低ヒステリシス化し、滑液性が向上することを見出してきた。詳細は著者らの文献<sup>(2-5)</sup>を参照して頂くことにして、ここでは、有機アルキルシランを用いた有機-無機ハイブリッド膜の優れた滑油性について紹介する<sup>(6)</sup>。



Fig.1 Dynamic oleophobicity of our samples.

一般的なアルキル基で終端されたデシルトリエトキシシラン ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$  :DTES) およびテトラメトキシシラン ( $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$  : TMOS) を、各種混合比 (モル比 (TMOS/DTES) = 1~10)、酸性条件下で共加水分解・共縮重合した前駆体溶液をガラス上にスピコートするだけで、密着性、透明性に優れたハイブリッド皮膜が得られる。特に油 (*n*-ヘキサデカン) に対する $\Delta\theta$ は  $2^\circ$  ( $\theta_A\theta_R=36^\circ/34^\circ$ ) となり、油滴は基板表面にピン止めされることなくスムーズに動き、わずかな傾斜で滑落した(Fig.1 右)。一方、DTES 単分子膜処理では、油に対する $\Delta\theta$ は  $13^\circ$  ( $\theta_A\theta_R=21^\circ/8^\circ$ ) となり、油滴は濡れ広がり、基板を  $180^\circ$  傾けても流れ落ちなかった (Fig.1 左)。これは、Fig.2 に示すように、TMOS 由来のシリカ種がアルキル鎖間の距離を制御するスペーサーとして機能し、アルキル鎖の運動性が向上したため、試料表面と油滴の相互作用がなくなり、優れた動的はつ油性を示したものと考えられる。<sup>(6)</sup> このように、例えば接触角の値が小さくても、接触角ヒステリシスを制御し、液滴と固体表面の相互作用をなくすることができれば、有機フッ素化合物を使用しなくても、表面エネルギーの低い油滴をスムーズに動かすことが可能となる。やみくもに接触角の値を大きくするのではなく、接触角ヒステリシスを制御することが工業的応用の観点から肝要である。

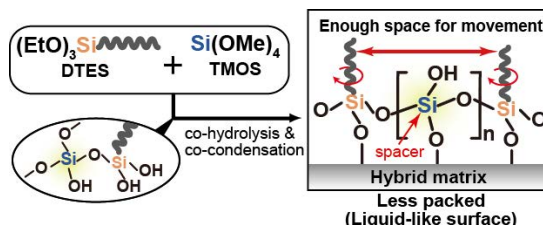


Fig.2 Conceptual scheme of our study.

参考文献：(1) Lindstrom, A. B.; Strynar, M. J.; Libelo: E. L. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, 45, 7954.

(2) Hozumi, A.; Kim, B; McCarthy, T. M. *Langmuir*. **2010**, 26 2567.

(3) Hozumi, A.; Cheng, D. F., Yagihashi, M. *J. Colloid Interf. Sci.* **2011**, 353 582.

(4) Cheng, D. F.; Urata, C.; Yagihashi, M.; Hozumi, A. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, 51, 2956.

(5) Cheng, D. F.; Urata, C.; Masheder, B.; Hozumi, A. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, 134, 10191.

(6) Urata, C.; Cheng, D. F.; Masheder, B.; Hozumi, A. *RSC Adv.* **2012**, 2, 9805.

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：振動シグナル，化学センサ，フェロモン，抗酸化  
耐性，植物の誘導抵抗性



## バイオミメティクスと植物保護

### Biomimetics for plant protection

本研究班では、昆虫の情報伝達、環境に対する応答・制御システムを規範として、特に「サブセルラー・サイズ効果」の観点から、下記を主課題とした研究を進める。

#### 1) 未開発生物シグナル（振動など）を利用した植物保護法の確立

森林害虫（カミキリムシやガ）の行動・感覚を制御する固有の微弱振動とその受容特性を解明し、微弱振動を樹木に発生させることで害虫の活動を制御して防除する。既に研究分担者（高梨）は、マツノマダラカミキリが感覚器により振動を感知し、忌避行動を示すことを初めて明らかにした（Fig. 1）。さらに、振動をマツの木に与えることで、マツノマダラカミキリの行動を制御できることを報告した。また、ガ類の超音波による交信を発見しており<sup>(1-2)</sup>、本研究では、これらの成果をもとに振動を使った新しい害虫防除手法の開発を行う。また、害虫の食害・ウイルスの感染により誘導される植物抵抗性やコナダニ類の後胴体部腺の情報伝達物質を利用した植物保護法を確立する（森・三瀬・奥本）。

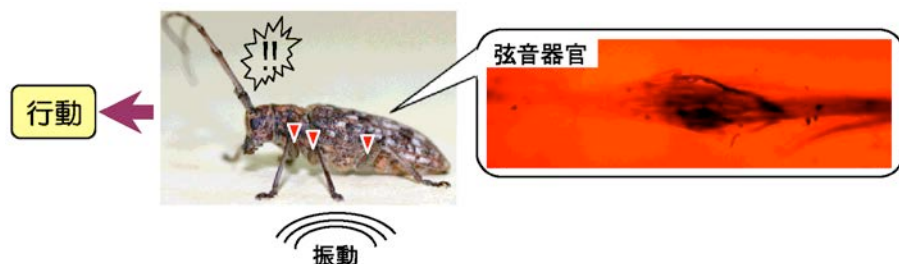


Fig. 1 Chordotonal organs mediate behavioral response to vibration in *Monochamus alternatus*

## 2) 昆虫をまねた超高感度化学センサの開発

複数の化学シグナルを高感度に検出するガやアリの触角の機構を解明し、その機構を模倣した化学センサの開発研究を行う。現在までに害虫を含む 500 種以上の昆虫から性フェロモンの構造が決定されているが (Fig. 2), 多くの昆虫は複数成分からなる種特異的なブレンドを利用している。研究分担者 (光野) は 3 種類のガ類から 1 種類ずつ性フェロモン受容体を同定し<sup>(3)</sup>, 性フェロモン受容体を模倣した匂いセンサの開発につなげた<sup>(4)</sup>。同じく研究分担者 (尾崎) は社会性昆虫クロオオアリの触角上に巣仲間識別のための化学感覚器を発見し<sup>(5)</sup>, その作用機序を徹底解明している。生物学的成果を工学に移転することで、新規化学センサを開発する (岩佐・中村)。

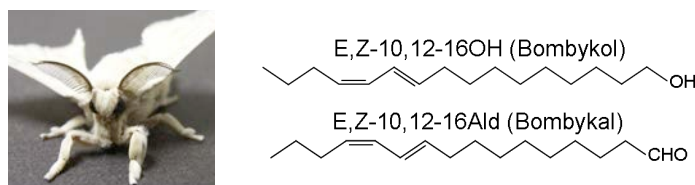


Fig. 2 *Bombyx mori* (male) and sex pheromones (Bombykol and Bombykal)

## 3) ネムリユスリカに学ぶ乾燥耐性機構の解明

昆虫が有する極限環境への応答・制御システムを規範とした医学・細胞工学への応用を図る (奥田, 齋藤)。具体的には、ネムリユスリカが持つ乾燥および酸化ストレス修復 (DNA 鎖切断, タンパク質のカルボニル化, 脂質過酸化等) の分子機構や耐性に関連した遺伝子を明らかにすることで、ストレス耐性の根幹である細胞修復機構を解明し、細胞培養、医療への応用を展開する。

### 参考文献:

- (1) Takanashi, T.; Nakano, R.; Surlykke, A.; Tatsuta, H.; Tabata, J.; Ishikawa, Y.; Skals, N. *Plos One*, **2010**, 5, e13144.
- (2) Nakano, R.; Skals, N.; Takanashi, T.; Surlykke, A.; Koike, T.; Yoshida, K.; Maruyama, H.; Tatsuki, S.; Ishikawa, Y. *PNAS*, **2008**, 105, 11812-11817.
- (3) Mitsuno, H.; Sakurai, T.; Murai, M.; Yasuda, T.; Kugimiya, S.; Ozawa, R.; Toyohara, H.; Takabayashi, J.; Miyoshi, H.; Nishioka, T. *Eur. J. Neurosci.*, **2008**, 28, 893-902.
- (4) Misawa, N.; Mitsuno, H.; Kanzaki, R.; Takeuchi, S. *PNAS*, **2010**, 107, 15340-15344.
- (5) Ozaki, M.; Wada-Katsumata, A.; Fujikawa, K.; Iwasaki, M.; Yokohari, F.; Satoji, Y.; Nishimura, T.; Yamaoka, R. *Science*, **2005**, 309, 311-314.

所属班：B01-5 生物規範メカニクス・システム

所属機関：九州大学先導物質化学研究所

氏名：木戸秋 悟

所属機関住所：〒819-0395 福岡市西区元岡

744CE11-115

e-mail：kidoaki@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

研究キーワード：メカノバイオマテリアル、メカノタクシス、幹細胞操作、生物運動波



## 細胞操作材料のメカノバイオミメティックス

### Mechanobio-mimetics of cell manipulation materials

細胞はそれらが生着する組織環境の生物学的、化学的、機械的条件に依存した接着伸展形態の動的応答性、すなわち運動性を示す。細胞運動は生体組織における様々な生理学的・病理学的過程に重要な役割を有しており、そのメカニズムの理解と制御技術の確立は、細胞分子生物学における学術的基礎からバイオテクノロジー・生体材料設計等の医用工学分野への応用展開も含む重要課題の一つである。私達はこれまでに、独自に細胞接着性ゲルの表面弾性率分布のマイクロパターンニング技術を開発し、細胞の硬領域指向性運動として知られるメカノタクシスの制御条件を世界に先駆けて確立してきた<sup>1)</sup>。本研究では、細胞運動を自在に制御する微視的材料力学場の系統的設計に基づき、細胞と周囲マトリックスとの間の生体力学的クロストークを操作する新規のメカノバイオミメティックスの材料の開発を行う。以下にこれまでの二つの取り組みを紹介する。

#### 1) 非対称弾性勾配ゲルによる細胞運動の整流化

メカノタクシスの誘導条件の本質は、細胞一体の接着面内で弾性率が急峻かつ不連続的に増加する弾性境界の導入にある<sup>1)</sup>。このことはメカノタクシスが弾性境界においてのみ局所的に誘導される走行性であることを意味し、材料表面上での長距離にわたる細胞運動制御への応用の際には多数の弾性境界の機能的配置設計が必要となる。この課題に対して本項目では、鋸型の非対称弾性勾配を連続的に有するマイクロパターンニングゲルを設計し、細胞運動の整流化の誘導について検討を行った。光硬化性スチレン化ゼラチンゲル表面の弾性率分布を光リソグラフィー的にパターンニングし、細胞運動の長距離整流化を可能とする非対称弾性勾配場の条件探索を行ったところ、約 10 kPa の低弾性率領域と約 60 kPa の高弾性率領域間を約 30  $\mu\text{m}$  幅で急峻に上昇し、約 60  $\mu\text{m}$  幅で

緩慢に減衰する非対称な弾性率分布が 90  $\mu\text{m}$  おきに繰り返された非対称弾性勾配ゲルに、約 5 kPa の交差軟領域 PSL を導入出来た系が最もよく整流化を誘導することがわかった (Fig.1)。細胞培養基材表面に非対称弾性勾配分布を設計することにより、細胞運動の長距離整流化が可能となることが示唆された。

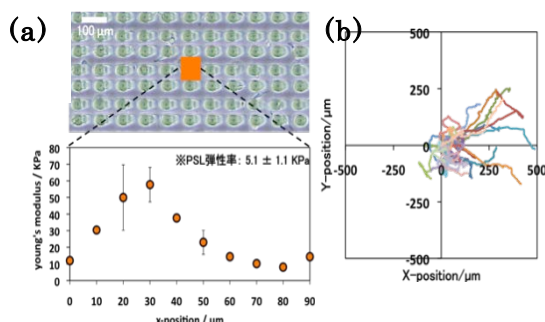


Fig.1. Long-ranged rectification of cell migration induced on the saw-like patterns of asymmetric micro-elasticity distribution with perpendicular soft lane. (a) Phase contrast microscopic image and distribution of Young's modulus in a unit pattern. (b) Moving trajectory of 3T3 fibroblast cells cultured on the gels with PSL.

## 2) 微視的培養力学場設計に基づく幹細胞分化フラストレーションの誘導

幹細胞フラストレーション仮説とは、硬・軟領域を微細パターン化したゲル上で間葉系幹細胞 MSC に硬軟領域間の非定住培養を行った場合、特定の系統への分化誘導が抑制されてその未分化状態が維持される可能性について、私が独自に提唱している理論である。MSC は培養床の弾性率に依存して異なる細胞種へ分化することが知られており、もし硬・軟領域のいずれかに一定時間以上定住すると特定の系統への分化方向の決定が起こるが<sup>2)</sup>、硬・軟領域をランダムあるいは周期的に経験させると MSC の系統決定がブロックされるものと予想される。この仮説を検証するため、50 $\mu\text{m}$  幅の硬軟ストライプパターン (硬領域: 50kPa, 軟領域: 5kPa) を作製し、この上での MSC の運動を一週間にわたり調べたところ、およそ 2 ～ 3 時間程の周期の硬軟領域間の非定住運動が誘導されることを確認できた。その後、MSC の幹細胞性を評価したところ、各種幹細胞マーカーの正常な発現および神経・筋・骨分化マーカーの明確な発現抑制が見られ、通常のプラスチックシャーレ上での培養に比べ、より良質の未分化状態を維持していることが明らかとなった (Fig.2)。

参考文献：

- 1) T.Kawano and S.Kidoaki, Biomaterials 32(2011)2725-2733.
- 3) A.J.Engler, S.Sen, H.L.Sweeney, and D.E.Discher, Cell 126(2006)677-689.

### 分化マーカーに対する免疫染色

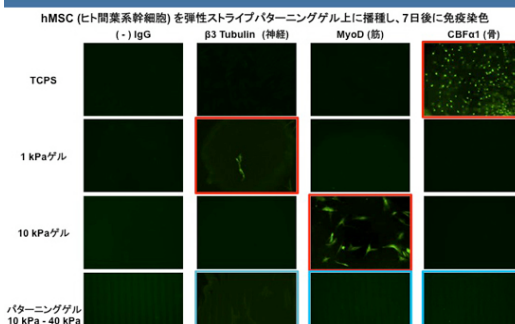


Fig.2. Immunofluorescent characterization of expression markers of MSCs cultured on TCPS, gels with 1kPa, 10kPa, and patterned gels. Simultaneous suppression for neuro-, myo-, and osteo-genic markers was confirmed.

所属班：C-01

所属機関：独立行政法人産業技術総合研究所

氏名：阿多誠文

所属機関住所：〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1

e-mail：masafumi-ata@aist.go.jp

研究キーワード：テクノロジーガバナンス、社会インプリケーション



## バイオミメティクスの社会インプリケーション

### Societal Implication in Emerging Biomimetics

#### はじめに

新興の科学技術には、新興であるが故の科学的不確実性が伴う。科学技術のリスクの評価や管理の方法、科学技術の応用に必須の国際標準といった社会基盤が整わない段階で研究開発を進めていくには、社会との双方向コミュニケーションに基づく科学技術のガバナンスの活動が重要になってくる。科学技術を創出する側は、科学技術を一方的に社会に応用(Application)するのではなく、開発している科学技術が将来どのような影響(Implication)を社会に与えるのかを検証しフィードバックすることが求められるようになってきた。真に持続可能な社会の実現を目指して社会とのインターフェイス領域の課題に取り組む C-01 班のなかで、我々は生物規範工学のリスク側面を管理し、その研究開発の成果の効果的普及からイノベーションプロセスへ展開させるべく、包括的テクノロジーガバナンスを実践する。

#### 動き出したバイオミメティクス国際標準化

社会とのインターフェイスの戦略課題であるバイオミメティクスの国際標準化が始まった。ここでは国際標準化機構 ISO の第 266 番目の技術委員会として活動を開始した ISO/TC266 Biomimetics について速報する。

2012 年 10 月 9-10 日の二日間、ベルリンのドイツ規格協会(DIN)において、ISO/TC266 Biomimetics の第 1 回総会が開催された。参加を表明したのは提案国のドイツ、ベルギー、チェコ、オランダ、イギリス、フランス、韓国、中国、そして日本の 9 カ国である。その他、15 カ国がオブザーバーとしての参加を表明した。今後各国の研究者と標準化のナショナルボディの話し合いが進み、参加国は増加してくると思われる。

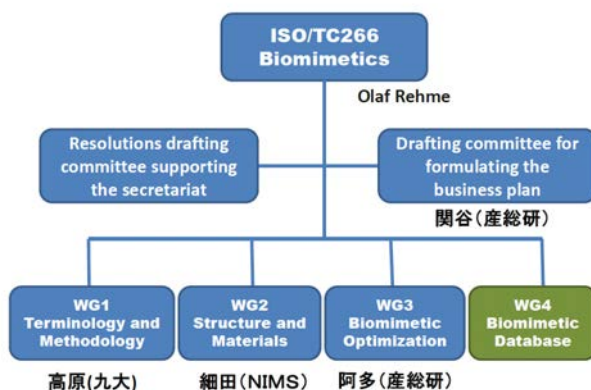
この会議に先立ち、日本は（社）高分子学会のなかにバイオミメティクス研究会を設立し、これを日本工業標準調査会(JISC)の ISO/TC266 国内審議団体とした。第1回ベ



写真 ISO/TC266 Biomimetics 第1回総会参加者(ドイツ規格協会中庭にて)

リン総会には下村政嗣氏を団長とする9名の JISC の委員が参加した。第1回総会までに国内での議論をきちんと積んで事前に示された原案への対応を図ってきたのは、日本とドイツだけだったと思われる。

2日間にわたる第1回本会議で、下の図1に示すようなドラフティングコミティと三つのワーキンググループおよびその作業の目的が確認され、ドイツの提案どおり活動が開始されることになった。また三つのワーキンググループのコンビナーが決まり、日本からのエキスパートも図1のとおり登録したところである。WG1では、何がバイオミ



メティクスであり何がそうでないのかといったバイオミメティクスの定義の議論が展開する。WG2およびWG3に関しては、とりわけイギリスとフランスから設立の意義や議論の内容に関して多くの意見が出されたが、最終的にはドイツの提案どおりの作業委員会が発足した。

図1. ISO/TC266 Biomimetics の構成と日本から登録したエキスパート

なお、日本はWG4としてバイオミメティクスデータベースに関する国際標準化の作業を行うべく提案を行った。次回第2回総会は来年の5月、パリで開催される予定である。国際標準化は基本的には民間の産業化ニーズに基づくボランティア活動である。パリ会議までに、産業化ニーズの国際標準化活動への反映の仕組みなど、日本の国内で準備しなければならない課題も山積している。十分な準備をして次回パリ会議に臨みたい。

## トピックス（PENより）

## 大震災後に確信し、そして反省したこと 東北大学 下村 政嗣

あんたは火を使う  
そりゃわしらも 少しは使うがの  
多すぎる火は 何も生みやせん  
火は森を一日で灰にする  
水と風は  
百年かけて森を育てるんじゃ  
わしらは水と風の方が ええ  
(風の谷のナウシカ より)

### 1. なんで、動物園なの？

今年 3 月 6 日からサンディエゴにおいて開催された Smart Structures/NDE2011 は、フォトンクスとオプティクスの国際学会 Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE) の分科会の定例会である。今年から新たに "Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication" のセッションが設けられた [1]。筆者は、年度末の学内業務もあり、また、3 月 16、17 日にベルリンで開催される BIOKON 主催の "International Industrial Convention on Biomimetics" [2] に出席することもあって、サンディエゴ行きは見送っていた。しかし、大震災が起きた 3 月 11 日は、出国前日であったので、結局ベルリンにも行くことはできなかった。"Biomimicry, Bioinspiration, and the San Diego Zoo" を見つけたのは、来年 3 月にサンディエゴで開催される Smart Structures/NDE2012 の call for paper [3] である。SPIE の 5 大行事である Optics + Photonics 2011 もまた、夏のサンディエゴで定期開催される。何故、バイオミメティクスと動物園なのか？それが知りたくて、サンディエゴ動物園を訪れた（もちろん、筆者は、Optics + Photonics 2011 における研究発表者の一人でもある）。

8 月 12 日付の Financial Times のオンライン版に、"Inspired, naturally" と題する記事がある [4]。そのなかで、「biomimicry (バイオミミクリー) の分野は、米国では

15 年後に年間 3000 億ドルの国内総生産、そして 2025 年までに 160 万人の雇用をもたらす」という Fermanian Business and Economic Institute (Point Loma Nazarene University) の経済予測を紹介している。この予想は、サンディエゴ動物園の委託によって昨年 10 月に報告された "Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer" [5] に記載されている。Fermanian Business and Economic Institute のチーフエコノミストである Lynn Reaser 博士は、Da Vinci Index という新しい経済指標をつくり [6]、学術論文、特許、グラント数、予算額などから、2000 年のダビンチ指数を 100 とすると 2010 年には 713 にも急増していることを示した。

サンディエゴ動物園では、「サンディエゴ動物園は、バイオミミクリー活動の主要拠点となることを目指しています。サンディエゴをバイオミミクリー分野の教育、アウェアネス、研究、応用の国際的な拠点に育てるために、サンディエゴ動物園では、地域、国、海外の機関との連携を進めています。いつの日か、デザイナー、エンジニア、研究者といった人々が、学生、研究者、起業家、投資家にひらめきを与える生きたデザインセンターとしてサンディエゴ動物園を頼りにすること、企業が自然界のデザインの原理について学び、人類が直面する数々の課題に応用すること」を目指して、「多くの機関からなる連携研究ネットワーク Biomimicry Business, Research,

*Innovation, Design, Governance, and Education (BRIDGE)* をとおし、バイオミクリーを、効率的で持続可能な社会の創造を目指し、自然からインスピレーションを得る研究、教育、イノベーション、投資のための新しいパラダイムとして普及させること」として自らを位置付け、積極的な活動を行っていることは、この文章からも読み取ることができる [7]。

そして、上記の報告書を作成するにあたり、Reaser 博士は、バイオミクリーが蒸気機関やエレクトロニクス、IT などの“産業革命”に匹敵するパラダイムシフトであり、さらには、環境やエネルギーなど、今、人類が抱えている問題を解決することができる技術革新だと言い切っている [8]。

## 2. 日本は“近代国家”なのか？

筆者は、平成 21 年度に（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「次世代バイオミメティック材料・技術に係わる調査」と、文部科学省科学技術政策研究所の「科学技術動向」誌でのレポート（「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流」[9]）作成を通じて、この分野における我が国の“周回遅れの”状況の背景にあるものを、薄々とは感じていた。

バイオミメティクス（アメリカではバイオミクリー）は、生物模倣技術のことである。バイオミメティクスの歴史は古い。カローザスが発明したナイロンがシルクを模倣した繊維であることは良く知られている。バイオミメティクス（Biomimetics）という言葉は、神経生理学者であり発明家でもあるアメリカ人オットー・シュミットによって作られる。彼は、ノイズ除去回路として有名なシュミット・トリガーの発明者でもある。その後、分子系バイオミメティクスと言うべき研究は、バイオミメティクスケミストリとして世界的な研究潮流となり（筆者も、我が国のバイオミメティクスケミストリには少なからず寄与させていただいた）、モレキュラー・ナノテクノロジーへと展開した。一方、機械やセンサーの分野では、コウモリを模倣したソナーや昆虫型ロボットなどの研究が行われている。

そして、今世紀になって、「材料系バイオミメティクス」とも呼ばれる新しい研究潮流が起こった。「蓮の葉の超撥水性」や「蛾の眼」の無反射性を模倣した塗料や光学フィルムが開発されてきたのである。Da Vinci Index が 2000 年の指標を 100 とすることには理由があったのだ。ナノテクノロジーの世界的な発展とその成果によって、走査電子顕微鏡 SEM の性能は向上し広く普及した。それまでニッ

チ、と言うより未知であった生物の「サブセルラー・サイズ構造」のミクロ構造が明らかにされたのである。しかも、その大きさに興味と関心を持ったのは、自然史学や分類学、俗に言う博物学の研究者であった。そして、ナノテクノロジーと博物学の積極的な異分野共同研究が、新しい潮流を生み出していく。さらにこの潮流は、アメリカに輸入され、さらに社会的、経済的、そして環境活動の色合いをも持ったバイオミクリーとして広まっていく [10]。

一方、日本では、「生物から学ぶ」という考え方は言い古されており、“何で、今更？”という風潮があることは否めない。化学や材料分野においては、すでに終わった学問分野であり、政策現場においても、もはやバイオミメティクスはロボットやバイオメカニクスの代名詞であり、研究分野は限定的であった。2010 年の生物多様性条約第 10 回締約国会議（COP10）を前にした 2009 年に、日本経団連が生物多様性宣言を策定し [11]、その行動指針とその手引き [12] においてバイオミクリーに言及していることが、筆者にとってはせめてもの救いであった。一旦、アメリカで“環境”の香りがついたバイオミクリー（バイオミメティクス）が、生物多様性条約において重要な位置を占めていることは、筆者にとっては意外ではあったものの、それを理解するには時間はかからなかった。外務省ですら COP10 のホームページにバイオミクリーという言葉とともに、“新幹線とカワセミ”を紹介していた。ただ、バイオミメティクスに関わってきた筆者にとっては、「産」と「官」がこぞってバイオミクリーという言葉を使うことに違和感を覚えざるを得なかった。

しかし、我が国の「学」は、世界の動向を捉えることはなかった。その原因は、何であろうか？そもそも、ヨーロッパ、アメリカでは環境問題、資源・エネルギー問題など、従来の科学技術に対する漠然とした危機感が潜在的に広がっていたように感じられる。ドイツは、2007 年の生物多様性条約の国家戦略をうたう白書において、バイオミメティクスが技術革新のポテンシャルを持つことに言及しており [13]、COP9 の議長国を努めた折には国際イニシアティブ「ビジネスと生物多様性イニシアティブ」を発足させた [14]。これらの活動を牽引しているのは、Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety であり、3.11 後ドイツ政府がいち早く脱原発宣言をしたことを考えると、“行政のあり方”にどこかの国との違いを感じざるを得ない。

そして、もう一つは、“学問のあり方”である。この点において、“「西洋化」の終わり”と日本経済”と題した東京大学の松井彰彦教授の解説 [15] は、筆者にとっては極め

て示唆的であった。氏は、「近代化」とは先進国へのキャッチアップの過程であり、「脱近代化」とはキャッチアップした後にいかに他国と差をつけていくかの過程のこと」であり、「近代化」のチャンピオンとしての地位を中国に奪われた日本は、否が応でも「脱近代」を目指し、中国との差異化を求めていかななくてはならない立場に追い込まれている」、と分析している。明治維新以降の富国強兵策、太平洋戦争の決断と奇跡の戦後復興こそが、まさに「近代化」のプロセスであった。しかし、「日本の政策や制度は未だに過去の成功体験に縛られているといっても過言ではない。欧米より短期間に近代化に成功してしまったがゆえに、制度や意識の転換が追いつかなかったことが、停滞の主因であろう。どの大学に入るかにばかりに焦点が当てられ、大学で何をするかには注目が集まらないことも、高度成長期の残渣の一つである。」とする背景には、明治維新から続いている縦割りの教育制度を未だに引きずった大学の学部構成があり、さらには、均一性の高い学会などの組織のあり方があるのではないだろうか。それは、初等中等教育、とりわけ理科教育のありかたにも影響している。我が国の学術が異分野連携に消極的なことの一因かもしれない。

“脱近代化”の証しは、異分野連携を可能とする学術の総合力なのではなかろうか。この解説を読んだ時、欧米において勃興したバイオメティクス研究の新潮流の予兆も介さず、さらには周回遅れの状況を把握することすらなかったこの国の科学技術のあり方に、「ああ、日本の学問は、まだ「近代化」してはいないのだ」と変に納得し、科学技術動向のレポートの結論にも引用した。日本が、新世代バイオメティクスの潮流に乗り遅れたのには、「物理や数学が苦手な生物学者」や「暗記が嫌いな工学者」、さらには「高校で生物学を履修しないままに医学部に進学する学生」を生み出したこの国の教育と文化的な背景があるように思われたのである。

### 3. 何を反省し、確信したのか？

我が国が欧米へのキャッチアップから脱却し、科学技術先進国として脱近代化するためにはどうすれば良いのであろう。もう少し、松井先生の解説から引用させてもらおうと、「研究開発投資の場合、発展途上国では世界の知識の最先端にキャッチアップすることが成長の原動力になるが、既にキャッチアップが終わった先進国では研究開発によって新しい知識そのものを創り出していくことが望ましい。その際、教育の役割が大切なのは当然として、知識の最先端から距離がある場合は初等・中等教育の役割が大きく、日本のような先進国の場合は大学以降の高等教育の役割が大き

い」にもかかわらず、「先進国が競って未来への投資としての高等教育や科学技術予算を増やすなか、日本はその流れに逆らうように、関連予算を削減してきた。」筆者が関わった、NEDOの「次世代バイオメティック材料・技術に係わる調査」も、“仕分け”旋風もあって、プロジェクト化されることもなく調査報告だけで終わってしまった。そして3.11は、もともと逼迫していた科学技術予算にとっても、大打撃であった。

ここまでの記述だけだと、単に研究予算が欲しい学者の戯言で終わってしまいそうである。しかし、この地震と震災は、筆者自信の科学観、研究観を少なからず変えている。研究費を獲得したい、世界の先端を走りたい、オリジナリティの高い研究をしたい、・・・そんな科学者のモチベーションの背景に在るべき「科学者としての使命」が自分自身には欠如していたのでは無かっただろうか？そんな自省のきっかけは、原発事故の対応において情報操作をしてまでも何かを隠し守ろうとした科学技術政策と学者の意識に対する、筆者自身の問題提起である。そして、総合的な科学技術であるべき原子力技術が、実は、総合的異分野連携とはほど遠い「村社会」によって支えられてきたことへの反省である。筆者自身は、原子力とは関係のない学術分野に身を置いてはいるが、「村社会」を作り守ってきたことに大差はない。

多くの研究者、政策担当者が、環境・温暖化や資源・エネルギー問題の解決として「グリーン・イノベーション」を標榜してきたが、計らずも3.11がクローズアップした現実の問題に対する認識の甘さと、解決策の具体性の無さ、それらに対する科学者としてのあり方、「当事者意識」の希薄さ、などなどに、筆者は反省を深めている。冒頭に紹介した、サンディエゴ動物園の意気込みと同じように、我々もまた、バイオメティクスがイノベーションを引き起こすパラダイムシフトである、と明言してきた。それにもかかわらず、3.11とそれ以降の問題解決には、実は無力であった。バイオメティクスの持つ意味と意義を明確に認識して、研究チームを構築する活動を、危機感を持って、もっともっと早くから、もっと真剣に始めるべきであった。東北大環境の石田秀輝教授の言を借りれば、3.11は環境分野における2030年危機の前倒しである。それ故に、今回の地震とそれに引き続く原発の問題は、バイオメティクスやネーチャーテクノロジーの意義と意味をきわだたせるものだと確信するにいたった。

### 4. 「高炭素世界」が拓く「低炭素社会」の“アイロニー”？

何故、バイオミメティクスはイノベティブなのか。パラダイムの違いはどこにあるのか？生物が有する多様性は、長い進化の過程において環境に適応した結果であり、「生物の技術体系」とも言うべき、「人間の技術体系」とは異なる「生産プロセス」「作動原理」「システム制御」によって獲得されてきたものである。生物は、「太陽光エネルギー・化学エネルギー」をエネルギー源として「自己組織化・自己集合」プロセスにより有機物を中心とする「炭素世界」を構築することで、ナノ・マイクロからマクロにいたる階層構造と、それらの構造に伴う機能を発現している。注目すべきは、生物の機能発現や作動原理が「人間の技術体系」によって作られた材料やデバイスと根本的に異なっている点である。

産業革命以来人類は、「化石燃料や原子力」エネルギー源として「鉄やアルミ、シリコンや希少元素、プラスチック」を原料に、「リソグラフィや高温高圧」を使ってモノを作ってきた。その結果、「人間の技術体系」が内包し解決すべき喫緊の課題として環境、資源ならびにエネルギー問題がクローズアップされている。「サステナビリティ」や「グリーン・イノベーション」の課題は、「エネルギーをどうやって安全に効率よく創るのか？」、「効率的な省エネ型のモノ作りプロセスは？」、「エネルギー散逸を抑えて効率的にモノを使うには？」という課題の解決であり、3つの課題を総合的に捉える包括的な技術ガバナンスが求められる。生物多様性と環境適応性をもたらした「生物の技術体系」に学び、人類の叡智を組み合わせた新しい技術体系（筆者らは「生物模倣工学」と名づけた [16]）を創生する必要がある。

人間は、危険な「火」を使うことができる（使いこなすところまでは行ってはいないが）「知恵」は持っている。勿論、「過信」や「奢り」もある。「プロメテウスの火」を使うにあたっては、出来ること、出来ないこと、してはいけないこと、を見定め、将来を決めて行くことが「叡智」なのかもしれない。一方、生物は、長い進化適応の実験を通して、生き残るすべを獲得してきた。そして、やっと人間は、生物の生きる様を明らかにすることができるようになりつつある。まだ、緒に就いたばかりではあるが、生物の有り様と、人間の「叡智」を組み合わせたものが「バイオミメティクス」なのである。さらに重要なことは、人類がどんな生き様（ライフスタイル）をするのか、ということだ。人間は「自然」と、どのように立ち向かうのか？自然を「支配」し「制御」することが不可能であることは、今回の災害でも明確である。自然とどのように共存し、快適な暮らしをすることができるのか。

多くの外国のメディアが、震災を受けた日本人の礼節、秩

序、感謝などを驚きとともに報道した。日本人の自然観に、その理由を求めた外国人キャスターもいた。石田先生が提唱したネーチャーテクノロジーと目指すべきライフスタイルの実現には、日本人の自然観に刻まれた「叡智」が不可欠であることも強く認識すべきである。環境科学、科学技術論の視点から、統合化された生物模倣技術を技術シーズとし、社会ニーズとのマッチングを同時進行的に図ることで、持続可能性社会に向けた新たな技術体系としての「生物規範工学」を確立する。省エネ化を図れば図るほどエネルギー消費が増える、というエコジレンマ（石田先生の造語）を回避するためには、ライフスタイルと環境政策の観点から社会ニーズを設定し、それに相応しい技術シーズを探索せねばならない。

## 5. そして、博物館に行こう！！

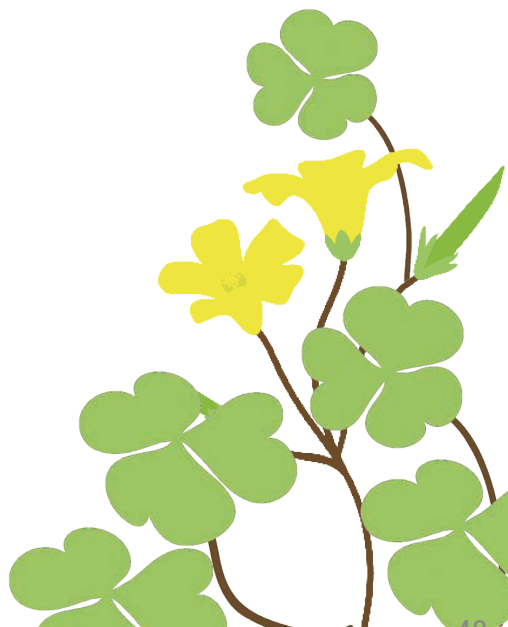
バイオミメティクス研究にとって、膨大な生物資源情報とも言える生物標本を保有している博物館の役割は、特に不可欠である。データマイニングや「知の構造化」、「画像データからの暗黙知の知識化」などのデータベース化法を利用して、博物館の所蔵物であるインベントリを体系化・指標化することで、バイオミメティック・データベースを網羅的に作成することは急務である。また、分類学、形態学にとっても、これまでに収集した標本に工学的な価値が見いだされることは学術的にも意味のあることであり、事実、欧州の博物館では、電子顕微鏡写真なども含むデータベースを基に材料やデバイスの研究者との連携、産学連携を積極的に行っている。生物資源インベントリを工学的な視点からデータベースにする作業は、工学者と生物学者がお互いを知る場を提供することであり、さらには、「標本」を「宝物」に換えることであり、そしてそこから共同研究の課題を見いだすことでもある。生物多様性は、生物を模倣し着想を得て新たに設計される材料の多様性に反映される。これこそが、近代国家の科学技術のあるべき姿であろう。

博物館（動物園、水族館、植物園）は、リカレント教育の最良の場でもある。子供をつれて、お父さん、お母さん、博物館に行きましょう。

## References :

- [1] <http://spie.org/Documents/ConferencesExhibitions/ssnde11-call-L.pdf>
- [2] <http://www.biomimetics-convention.com/>
- [3] <http://spie.org/Documents/ConferencesExhibitions/ssnde12-call-L.pdf>
- [4] <http://www.ft.com/intl/cms/s/2/37bb18a2-bea7-11e0-ab21-00144feabdc0.html#axzz1WxrIT6bG>

- [5] [http://www.sandiegozoo.org/images/biomimicry/biomimicry\\_economic\\_impact\\_study.pdf](http://www.sandiegozoo.org/images/biomimicry/biomimicry_economic_impact_study.pdf)
- [6] <http://www.pointloma.edu/experience/academics/centers-institutes/fermanian-business-economic-institute/da-vinci-index>
- [7] [http://www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/biomimicry\\_san\\_diego\\_zoo\\_vision](http://www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/biomimicry_san_diego_zoo_vision)
- [8] <http://fbei.wordpress.com/page/5/?archives-list&archives-type=tags>
- [9] <http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt110j/report1.pdf>
- [10] Janine Benyus “Biomimicry : Innovation Inspired by Nature” (「自然と生体に学ぶバイオミクリー」山本良一、吉美耶子訳、オーム社、2006)
- [11] <http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2009/026.html>
- [12] <http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2009/026/koudoushishin.pdf>
- [13] National Strategy on Biological Diversity
- [14] <http://www.business-and-biodiversity.de/jp/homepage.html>
- [15] 日本経済新聞経済論壇、東京大学教授 松井彰彦、2010年3月28日
- [16] バイオミメティクス研究会編「次世代バイオミメティクス研究の最前線 - 生物多様性に学ぶ -」、CMC 出版、2011
- [http://www.cmcbooks.co.jp/products/detail.php?product\\_id=3843](http://www.cmcbooks.co.jp/products/detail.php?product_id=3843)



# *Homo domesticus* — 家畜化したヒト

浜松医科大学 針山孝彦

## 1. はじめに

子供の頃から家の外で過ごすことが好きだった。母が「もう夕飯の時間だからおうちに入りなさい」と呼びに来るまで外で遊び、泥だらけの体を洗わないと家に入れない。遊び相手は、もちろん近所の子供たちだったが、学年を超えた遊びの輪は、知らず知らずのうちに少年たちに自然への接し方を教育していたのだと思う。飛蝗釣りには、バツはいらない。糸と短い棒があればいい。蜻蛉釣りには、トンボを糸につけて飛ばすのもいいが、糸の両端に小石を結んで、クルクルと空中に放り出すのも有効だ。オニヤンマが糸に絡まって落ちてくる快感！ザリガニ釣りには糸だけもって出かけて、途中で蛙をつかまえて皮を剥ぎ餌にする。皮を剥がれたカエルは、あたかも何もなかったかの如くピョンピョンと跳ぶ。自分たちの巣（隠れ家）を作るには太い枝で枠を組み上げたのちに、風雨を防ぐことができる松の葉を壁材にするといい。石を飛ばして何回水面の上を滑らすことができるかを競うときには、石の形と大きさの選別と、水面への投入角度が重要だ。長じてからこれらの遊びを思い返すと、理にかなっている所作であることに驚きを感じる。

そんな楽しいことは、すべて別々の能力をもった友達から教わったり、高い能力をもつ者の仕草を傍でじっと見て物まねすることで覚えたりしたのだ。そこには伝承文化があり、その文化は子供たちの中で改変され、新しい文化が構築されていた。

## 2. 生命の誕生と「食う・食われる」の関係

地球は 46 億年前に誕生した。それからおよそ 8 億年を経て生命の祖先ができた。地球の地殻がもっている元素が、重量比で酸素 (O)、ケイ素 (Si)、アルミ (Al)、鉄 (Fe) であるのに対して、生命を構成している元素のそれは、酸素 (O)、炭素 (C)、水素 (H)、窒素 (N) である。生命は、地殻に存在している元素の比率とは異なる元素比率に

することを選んだ。生命は、これらの素材を用いて有機物と呼ばれる高分子を造り上げ、それらを組み合わせて複雑な形をなしている。38 億年前の生命がどのように誕生したかは諸説あるところだが、とにかく生命誕生後は、「生命は、生命から誕生する」とされる。生命の連続性を考えると、我々のご先祖様は、原核生物と呼ばれる  $1\ \mu\text{m}$  程度の大きさの、細胞膜で囲まれた単純な構造物ということになる（この単純な仕組みさえ人は十分に理解できていないが…）。

生命誕生後の最大の出来事は、シアノバクテリア（藍藻）と呼ばれる原核生物が光合成を始めたことだ。光合成は、二酸化炭素と水を材料に、有機物を合成し酸素を放出する。それまで二酸化炭素が優位だった生命周辺の環境が、シアノバクテリアが大発生した 20 億年ほど前に一変し、酸素優位の環境に改変されてしまった。生物が自ら地球環境を大きく変えてしまったのだ。その後、原核生物に比べて、長さで 10 倍、体積で 1000 倍も大きな真核生物が誕生し、およそ 5.4 億年前の「カンブリア紀の爆発」を迎える。多様な多細胞生物の出現である。

生物学の教科書には、「ほとんどの動物の祖先がカンブリア紀に出現したと考えられ、この時代に多様性が増大した」と書かれていることが多い。私は、生物の多様性が高まったのは「当時出現した動物同士の相互関係が生じた」結果であり、訳もなく偶然、多様性が増大したのではないと考えている。動物は、従属栄養生物であると言われるように、他の生命体を食うことによって栄養を獲得している。他者の栄養に従属しているので、常に食べ続けなければならない。エントロピーは増大するという法則に反して個体や細胞の秩序性を維持するためには、良質のエネルギーが必要だ。常に食べ続けるということは、自分自身も他者の餌になる可能性が生じる。ここに「食う・食われる」という関係が生じ、その後、現在に至るまでその関係が続く。太陽から降り注ぐ光エネルギーを源として、自身でエネルギーを獲得することのできる独立栄養生物である植物を食べる動物たちがいる。その動物を食べ、栄養と呼ばれるエネルギー

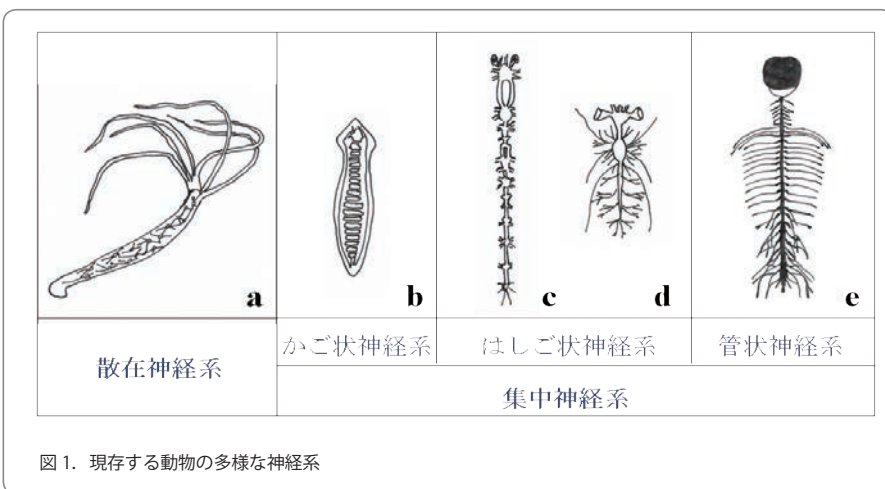
ギーが各動物の間を移動するという「食物連鎖」がおこる。食物連鎖の中で生き残るためには、うまく餌を見つけ、敵からはうまく逃げる必要がある。餌になる生き物からの反撃をいかにかわして怪我をしないでどのように食うか。そこで、性能の良い感覚器（センサー）と情報処理器（コントローラ）、そして効果器（アクチュエータ）が不可欠になった。性能の良い動きを獲得した動物は、種内競争を行うことにもなった。異性を獲得するための工夫を凝らすのだ。子孫を複製する方法として性が存在していることは、遺伝子の変化による形質の改変が起こりやすくなり、個体群がもつ遺伝子のバラエティーが増えることに繋がる。各個体は生死をかけて自身の遺伝子を残すことができるか否かの試合に参戦する。

子孫を残すため、生き残るための行動は複雑になり、コントローラは高度な演算処理ができるようになる。雄と雌は、自身がもつ情報処理能力を駆使して子孫繁栄のために努力する。しかし獲得形質は個体の遺伝子の改変を伴わないので、努力を重ねた形質は子孫には伝わらない。たまたまもっていた遺伝子によって、ほんの少しだけ他の個体よりも有利な仕組みを表出できた個体の遺伝子が次世代により多く伝わ

り、他の個体もつ遺伝子はどうにか生き残るか、環境が厳しければ淘汰される。少しずつだが着実に情報処理能力は改変され次世代の個体ができる。繁殖は同一種の雌雄間でしか行うことができないので、繁殖に関わる行動は、同種内の異性および同性間で決まった行動様式をとるようになっていく。ときには雄は雌の気をひくためにより良い住まいを作り、食べ物プレゼントしなくてはならない。よくモテル雄と、眼力のある雌の子孫が残されるということを世代に渡って繰り返すうちに、種独自の情報交換の仕組みが出来上がっていった。ミツバチはミツバチ同士、カエルはカエル同士、ヒトはヒト同士の情報交換が得意になり、他種の情報処理系を簡単には理解できない。それぞれの種内で情報処理の基本設計が決まっていってしまうので、異なった種間での情報の共有が難しくなる。結果として、同種の視線だけを気にして魅力的に見られるように振舞う努力をし、同種が構築した世界の中だけで生きることになる。

生き残るための情報取得も重要な要素である。種特有の「視覚世界」の例として、ヒトにはまったく見えない紫外線を、

昆虫はもちろん脊椎動物の魚やトカゲや鳥などが受容できることが挙げられる。ヒトには一色の白い花としか見えないものでも、その花の蜜を吸う蝶やハチドリには紫外線の反射や吸収による複雑な文様が蜜のありかを知らせる道しるべ（蜜標）として機能する。多くの動物は紫外線を色情報として感じることができる。受容器レベルの種による違いを例として挙げたが、コントローラ自身も種によって異なっている。つまり、動物たちは、前述の進化の仕組みの結果、それぞれ種独自の情報処理によって、同じ環境を違う見方で見ているのだ。この種特有の情報処理に基づいて、ある個体が生息環境や種々の生物や仲間との相互関係の中に構築した情報世界を「環世界<sup>1</sup>」という。ヤーコブ・フォーン・ユクスキュルが提唱した概念である [1]。



進化を繰り返した結果、各個体もつ遺伝情報に従って作り上げられた身体各部分、特に脳によって構築されている種特有の情報処理系によって、それぞれの個体が主体として環境との相互作用の中に作っている環世界の総体の関わり合いが生物の世界だともいえる。

それぞれの動物もつ環世界の相互作用の中で、動物は、およそ 5.4 億年の歳月の間、絶えることなく続く、生死をかけた性能試験の中で、開発を進めることになった。その開発は、それぞれの種の環世界という情報世界だけにとどまらず、体の各所各部位に及んだ。

### 3. ヒトの誕生と地球環境

生命の 38 億年もの歴史の中で、ヒトの誕生という出来事は、ごくごく最近の出来事である。カンブリア紀のピカイヤと呼ばれる脊索動物からヒトに至る系譜には、それぞれの時代を生きた動物たちの繁栄と絶滅の歴史も含まれてい

た。鳥の先祖とされる恐竜の絶滅の後、哺乳動物が繁栄をはじめ、現存するツパイのような食虫目がおよそ 5000 万年前に活躍した。このモグラのような姿をした食虫目が、霊長目の先祖である。原核生物が生命の起源であることを先に述べたが、霊長目の直接の祖先はおどおどと臆病な、森に棲むごく小さな動物だったのだ。この生き物を始まりとして進化をとげた現生の霊長目は、約 220 種あり、ヒトはこの霊長目の一員ということになる。

これまで、最古の人類（猿人）とされてきた 400 万年ほど前に誕生したといわれているアウストラロピテクス属よりも、一層古い時代の化石人類としてアウディピテクス属が近年発見された [2]。エチオピアでアウストラロピテクスが発見された場所のすぐ近くから見つかったこの化石の主は、約 580 万年前から 440 万年前まで生息していたものと推定され、身体的に大きな特徴をもつ。つまり、完全な二足歩行をして、犬歯は大きく退化していたのだ。完全な二足歩行は、プレゼントとしての食べ物を腕で抱えて運ぶため、犬歯の退化は同種内での体を張っての権力争いが縮小されたためと考えられている。つい私は「なるほど」と思ってしまう。彼女にプレゼントを運び、同性同士の殴り合いの喧嘩はしない平和主義者を演じる自分。笑顔や泣き顔など生まれながらにして獲得している顔の筋肉運動を使って表情を豊かにし、寡黙な性格を補う。系譜としての先祖であるアウディピテクスはすでに 500 万年も前に、その形質を身につけていたのかと思うと感慨を深くせざるをえない。

その後、*Homo* 属が約 200 万年前に出現し、現存するヒトの祖先は、およそ 20 万年前にアフリカの地に誕生した。アフリカに端を発したヒトは、その後世界中に広がっていった。そこまでが、生物学の一分野として研究が続けられ、記載されていることである。

#### 4. *Homo domesticus*

およそ 1 万年前に、ヒトは農耕をはじめた。農耕は、根栽農耕と穀物農耕の 2 つに大きく分けられる。根栽には穴を掘るための道具があればよいが、穀物農耕では広い面積を耕すために牛や馬などの使役動物と共に道具を用い、多くの人が協力する必要がある。根栽農耕による収穫物は傷みやすいが、穀物農耕による収穫物は長期の貯蔵に耐え運搬も可能である。穀物農耕の発達は、耕作以外の仕事に専心する者たちを養うことができるようになり、人口が集中する村や都市の形成を促した。穀物の豊作を祈る神官の役割が発達し、さまざまに分業化した人々による階層社会が

誕生して都市社会全体が段階的に発展した。この穀物農耕による都市形成は、人類にとっての一大革命だった。長期保存ができる穀物は、都市の民の富であり、富を守るために都市は城砦に囲まれ、その集団の中には文化が発展した。

巨大な脳容量をもつヒトはもともと高い情報処理能力を備えているが、都市の中で役割を分業化することで各自が考え学ぶ時間が増え、世代から世代へと外面的・内面的な生活様式を伝承することによって高度な文化と変容していった。生物学的な「ヒト<sup>2</sup>」から、文化を共有する「人」への変身である。

敵や野生動物による侵害から自分たちを守るために都市や農作地の周辺には塀が作られ、その結果、安全な生活と食事が保障された。使役や食料として人の生活に直接役立つ牛や馬はもちろん、鳥や犬や猫などのペットとしての動物も飼育されるようになった。これらの家畜動物は、塀の中で保護され餌を安定に与えられるので、食物連鎖のルールからは外れることになった。家畜動物は人の保護なしに生存することはできない。

あらためて、この 1 万年を過ごした結果としてのヒトの姿を見つめてみよう。自然の中で生きていたヒトであったが、現代人の誰一人として、自然そのままの中に入り、生活できる者はいない。健康で強靱な肉体をもった者が、何日間生き延びることができるだろうか。私たちは、知らず知らずのうちに、塀の中でのみ生存できる動物になってしまっていたのだ。それぞれのヒトは、人の保護なしに生存することはできない。家畜動物は人間の手によって家畜化されたが、ヒトは人の手によって家畜化されたのだ。自らを自らの手で家畜化したという点では、150 万種存在するといわれる動物種の中の唯一の存在である。

現代のヒトは、自らを家畜化した地球上唯一の動物である。*Homo domesticus*<sup>3</sup>（家畜化したヒト属）だ！

#### 5. 産業革命が生み出したもの

文化は、その後あたかも生命であるかの如くの進化を続けた。個体としてのヒトは、ハードとしてヒトが備えている情報処理装置の中に、時代の文化がコンピュータにソフトを組み込む様に入り込むのだ。文化を備えた個体は、周辺の仲間と共に新しい文化を作り上げるのだ。人は、生物としての遺伝的に仕組まれた情報処理を基本として、人と人が接することで文化を成長させ、新しい文化を築きあげる。

数千年前からの歴史は明らかだ。「農作物」そのものから「金」という姿に変わるにより、富の集中が一層深まった。ヨーロッパでは、ルネッサンスに代表される学問芸術の広がりが起こった。学問の発達、数学、物理、化学、工学という流れで進み、やがて集中した富を資本に産業革命が起こる。産業革命は、人々の暮らしを豊かにしたと同時に、世界的に見ると人々の貧富の差の拡大や、国家戦略としての富への執着と争奪をもたらし、大規模な世界戦争をも誘引することになった。豊かさは世界的な規模での人口増加を招いている。その一方で、日本国内では、富を維持するた

めの働き手としての人口増加が求められるようになっている。2011年3月に起こった大地震に続く原発事故は、産業革命以来、営々と続く巨大エネルギーの必要性に基づく人災である。同じ産業構造で発展しようと人間が活動を持続すれば、今以上の巨大エネルギーを必要とし、形を変えた同じような事故が今後も続発するだろう。

栄養と呼ばれるエネルギーが各動物の間を移動するという「食物連鎖」の中では、自然均衡系と呼べるように、地球上のエネルギーや循環する物質は、収支バランスを保つことができていた。産業革命を経て、加速度的に自身の家畜化を進めた人間は、自然均衡系と呼ぶことができる安定した生態系を破壊し、不安定な地球を形成している。人が住み利用できる地域が、地球全体であるという奢り、自分たちが生活している場所を地球全体に拡大してしまったことが、自身自身の首を絞めている。

では、一万年前の生活までとは言わないにしても、例えば今よりは自然と共に生きていた江戸時代の生活に人々は戻ることができるだろうか。今の生活から見れば、「爪火生活」になる。急激に人口を減らし、電気を消したバーチャル世界の快楽などを一切なくすることができるのか。想像することすらできない机上の空論であることは誰しもが認めることだろう。

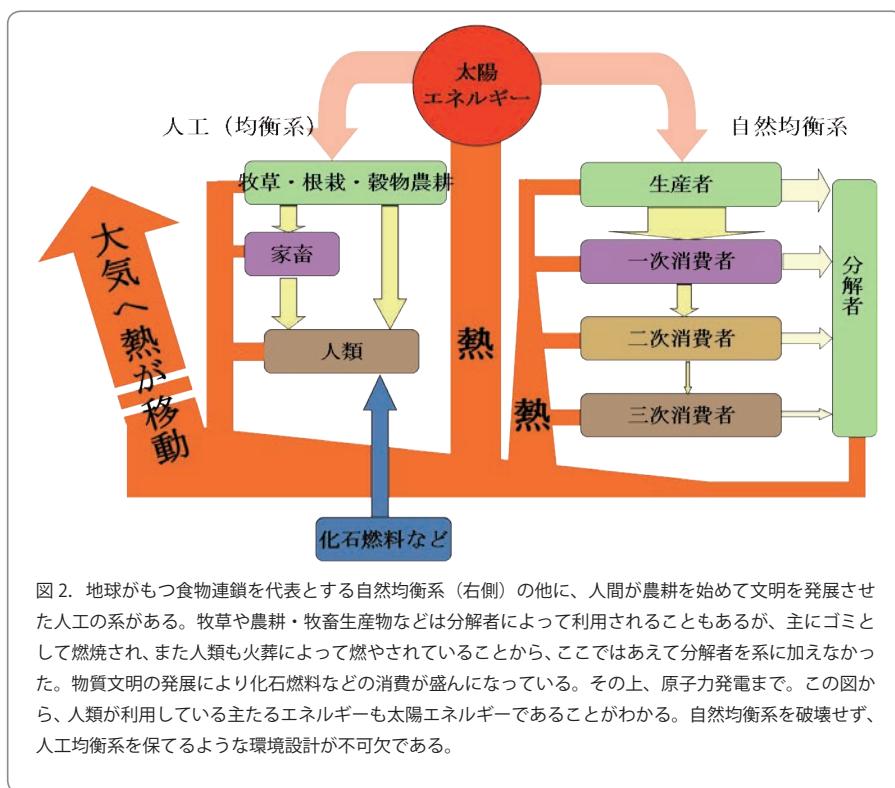


図2. 地球がもつ食物連鎖を代表とする自然均衡系（右側）の他に、人間が農耕を始めて文明を発展させた人工の系がある。牧草や農耕・牧畜生産物などは分解者によって利用されることもあるが、主にゴミとして燃焼され、また人類も火葬によって燃やされていることから、ここではあえて分解者を系に加えなかった。物質文明の発展により化石燃料などの消費が盛んになっている。その上、原子力発電まで。この図から、人類が利用している主たるエネルギーも太陽エネルギーであることがわかる。自然均衡系を破壊せず、人工均衡系を保てるような環境設計が不可欠である。

そもそも、なぜ人々は産業革命を求め達成したのだろうか。産業や経済の発展のために、なぜ人々は努力するのだろうか。いかに文化を背負った人であっても、文化を成長させるだけの努力をすることはない。生物としてのヒトの欲求が根底にあるのだ。アウディビテクス属が腕一杯のプレゼントを抱えて森の中を歩き仲間を喜ばしていたように、現代に生きる *Homo* 属も、自分自身や同種の仲間の欲求を満たすことが、自身の喜びである。産業や経済活動がヒトに与える喜びは、ヒトがヒトと繋がり、ヒトからの良い評価を勝ちとることが根底にある。この喜びを求め続けたいがために、社会的・経済的發展を繰り返すことを続けてきたのではないだろうか。社会性動物として進化を続けたヒトは、社会の中の一員としての立ち位置を常に確認する。社会からの称賛を求め、常に変化成長する努力を怠らない。社会という同種同士の繋がりを発展させた一つの形態が産業革命だったし、今後も経済活動を行うことはヒトという生物の欲求に基づいた文化活動であるといわざるをえない。「爪火生活」を万人に強いることは、結果としての発展が根源的な生物学的欲求であるので不可能である。人は人と繋がりたいがために、経済活動をし、産業を発展させる。

近代産業革命後の発展だけを求めた、行き過ぎた経済活動は、どのようにすればヒトの本質を失うことなくこれまで以上に安定に成長することができるのだろうか…。

## 6. 新産業構造の構築と新しい学術領域の開拓ー バイオミメティックスが一つの解決策

いままでの産業を発展させながら人工（均衡系）の括弧を外すためには、現有の産業技術をいかに改善しても限界があることは目に見えている。エコジレンマで象徴されるように、省エネの機器を造れば、遠慮なく電力使用をすることになり、電力消費は増える。当座の目標として技術改善を続けながら、新産業技術を模索しなくてはならないことは事実だが、私たちは次のステップを考えなくてはならない。

次世代の産業技術には、1. 製品作製にエネルギーコストがかからないこと、2. 壊すことが容易である技術であり、廃材が蓄積せずに生物分解できること、3. 一つの設計図を使うことにより多様な機能を生み出せること、などが要求される。この要求を満たすものは、すでに 38 億年の生命史の中で、カンブリア紀の爆発以来 5.5 億年間もの長い期間をかけて、性能試験を繰り返してきた生物に学ぶことによって達成できるのではないだろうか。生物は、素材として、炭素と窒素と酸素と水素を主体として、それらの分子の組み合わせによって構造をつくりあげ、機能を達成している。それらの高分子としての素材は多機能を省エネルギーの下に実現しているだけでなく、分解者と呼ばれる微生物や節足動物によって簡単に消化され、バラバラにされる。

生物に学び新たなテクノロジーを発展させる分野をバイオミメティックスと呼ぶ。生物多様性を維持し、次世代の産業を発展させることができるのは、生物の仕組みを模倣し、生物の設計図に学んだ産業構造の構築以外にはありえないのではないだろうか。これまでの産業構造を改良し発展させることを地球が許容している間に、我々はパラダイムシフトして新産業構造を構築しなくては生き残ることはできない。

欧米でもすでにバイオミメティックス研究の潮流はおこり、生物学者と工学者の強い結びの上に、企業が具現化した製品を生み出している。今バイオミメティックスを日本に根付かせなければ、次世代に続く国づくりを達成させることができなくなるだろう。他国の支配下になることを甘んじるのであるならば、単なる卑近な問題と割り切ることはできるが…。

日々周りを見渡しても、歴史の記載をたどっても、どうしても人は、サルの一員であることも、動物の一員であることも毛嫌いの傾向がある。Homo 属の一員である自分自

身を「Homo sapiens<sup>4</sup>」と呼び、「知恵のあるヒト」という冠をかぶせる。自ら「知恵のあるヒト」と冠を被せている人も、自分の尺度でしか世界を見ることができない。だいたい尺というのは、身体尺が始まりであり、自分の体の一部を基準にして物の長さを測っている。物事を判断する時の基準としての尺度も、自分の判断基準があり、その尺度に合わないとうとう気持ちも落ち着かない。

38 億年の長い年月をかけて性能試験を繰り返して作り上げてきた生物には、人がもっている尺度以外の所に、工夫に満ちたものをみることができる。生物は共通の素材を使って、ナノメートルから、サブミクロンメートルの範囲の工夫にも満ちた構造を作り出している。これらの構造は、ほとんどが自己組織化によって形成され、人の生活に取り入れて利用できるものが豊富にある。あまりにも豊富にあるがために、既存の学問分野のそれぞれの視点では十分に理解できない。そこで、バイオミメティックス研究では、学問分野間の横の連絡と、企業との連携が不可欠になる。

もしも、他の生き物の生きる仕組みを十分に知ることができたら、ヒトとは別の意味で *sapiens* という称号を与えなくなる動物がたくさん出てくるだろう。その仕組みを利用しない手はないし、実は、そこにこそ新しい産業を創出する宝物が溢れている。発掘しないわけにはいかないだろう。今までの巨大エネルギーに依存した産業依存から、生物を規範とした産業構造に変換できたときにはじめて、*Homo demesticus* から *Homo sapiens* に脱皮できることになるだろう。

## 7. おわりに

子供の理科離れというマスコミの声に背中を押されて、浜松では毎年「生物が見る世界～いくつもの目といくつもの世界～」と銘打って、全国の高校生 12 名を招き、スタッフ 6 名、医大生 6 名のほとんどマンツーマンで 3 日間早朝から夜中までお付き合いする。このサイエンスプログラムを過ごした子供たちが「こんな幸せなことはなかった！」といいながら帰っていく姿を見ると、日本の将来も捨てたものではないかと心を強くする。このプログラムは練りに練った企画だと自負している。主役は高校生、サブは大学生、ものすごく心配しながらソワソワしているのがスタッフという形の「ガキ大将方式」である。親は心配しながら出来るだけ口出しをせずに、子供同士が切磋琢磨していく手助けをすることに似ている。私が子供時代、夜まで自然の中で遊んで「なぜ学ぶことができたのか」を、再現しようとしているのだ。年齢の近い高校生と大学生は、一つの

テーマについて多方面から議論を進める。大学生がガキ大将となって高校生と会話が進む時、そこには科学的議論が生じる。初日にスタッフに質問するときは、つい解答を求めてしまう癖がとれないが、最終日には自分の意見をはっきりと言えるようになっている。

サイエンスプログラムに参加した高校生がなぜ幸せなのか。そこには、自由があるからだ。ガキ大将方式と銘打っているが、ガキ大将役の大学生は高校生とさして能力差があるわけではない。それぞれがもつ能力を存分に表出して、切磋琢磨できる喜びがそこにはある。

高校や大学の教育がつまらない理由は、画一化された教育方針を達成しなければならないところにある。小学校から始まる12年間、文科省が唱える学習達成目標をこなし、大学では再び文科省が口出した「シラバスに沿ったTax payerに対して言い訳のつく教育＝なにがでできるようになったのかを明確化する」を実施する。そこには、科学的な自由はない。12年間の基礎学習を過ごしてきた子供たちが大学生になって、再び、監獄の中での作業のような、決められた範囲の学習をこなしている。その後、修士・博士コースに入った大学院生（枠にはまることを強要され続けてきた青年）に、突然、独創性を求めるのだ。基礎力がなければ独創性を実現できないが、基礎力があっても独創性は生まれない。

もともと人は、自由で独創性に満ちている。だから、がちがちに固められた教育を受け続けてきた大学院生でも、それなりに夢を見た研究を展開する。ところが学会で発表しようとなると、学会のレベルにあった発表をしないと受け入れてもらえない。時流に乗った、学会の枠組みにあった発表である必要がある。すでに出来上がった学会という大きな圧力に、若人は簡単に迎合する。そうでなければ、生きていけないから。誰が悪いわけでもなく、私たちヒトは、縦割り社会を造りだし、その分相応な振る舞いをする事で心の安定を得るという生得的な行動様式をもっているのだ。科学の世界も、ヒトが織りなす社会なのだ。縦社会は、既存の学問の重箱の中の重要物を掘り出し、それを発展させるために便利な仕組みで、その社会制度の維持は不可欠である。しかし、それだけでは、新しいものを造り、自由に幸せな科学の創造の世界を楽しむことは難しい。

子供の頃の蜻蛉釣りがなぜ楽しかったのか。いつも横槍が入り、自分の考え方を学年の違う友達に指摘してもらえて改良を重ねることができたからだ。小石の結び方、投げ方、投げる位置…。「トンボの目に入る所に投げろ!」。そしてその改良はグループが共有できる宝となる。大人の科学も

楽しくなければやっていられない。バイオメティックス研究は、基礎研究から応用研究まで、すべての研究分野を結集しなくてはならない。忙しくて楽しい分野である。

#### References :

- [1] ユクスキュル / クリサート著 日高敏隆・羽田節子訳 「生物からみた世界」 岩波文庫
- [2] White, T. D.; Suwa, G.; Asfaw, B. (1994). "Australopithecus ramidus, a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia". *Nature* 371 (6495): 306

#### 注

- 1. 「環境世界」とは故日高敏隆教授がユクスキュルの著作を翻訳された時に作られた造語である。彼の古い翻訳書では「環境世界」という語句が使われていた。
- 2. ヒトは、*Homo sapiens* を意味する標準和名である。もともと生物につけられた和名は、学問規約的に規定された名称ではなく、一般に使用されている習慣的なものである。標準和名は二命名法（属名と種名の二つを併記する方法；*Homo* が属名、*sapiens* が種名）で定義した種と一対一となるように調整している。標準和名である種を、はっきりと明示させるためにカタカナで表記する。ここでは、ヒトは生物学的な意味上で用い、人は文化などを兼ね備えた広い範囲を示すこととする。
- 3. *Homo domesticus* は、著者の造語であり、一般に認められている学名ではない。2010年に命名したので、「*Homo domesticus* Hariyama, 2010」とでも記載すべきだろうか。
- 4. 分類学の父と呼ばれるカール・フォン・リンネ (Carl von Linné, 1707-1778 年) は、生物の学名を属名と種名の2語をラテン語で併記することで種を規定する方法を体系づけた。また、分類の基本単位である種の他に分類を階層化した。現在では、種・属・科・目・綱、門、界という順で基本階とされる。リンネが命名したヒトは、*Homo sapiens* Linnaeus, 1758 と記載され、*Homo* が属名、*sapiens* が属名を修飾する種名、Linnaeus は命名者名で Linné のラテン語記載、1758 は命名年である。

# 私が体験した驚愕の「生物規範工学」in アメリカ

京都大学農学研究科応用生命科学専攻 森直樹

## 1. はじまり

1998年から2000年まで、私は米国農務省のCenter for Medical, Agricultural, and Veterinary Entomology (CMAVE) に留学する機会を得た。研究所はフロリダ州のゲインズビルという人口約11万人の小さな都市にある。街では桎の枝から着生植物スパニッシュモスが垂れ下がり、郊外の州立公園にある川沿いのトレイルを歩くと数百頭ものワニと遭遇できる。野生のワニにも仰天したが、私を雇用するファンドがアメリカ国防総省のDefense Advanced Research Projects Agency (DARPA) から提供されることにも驚いた。防衛省が農学系の研究に研究資金を拠出することは、日本では想像もできないことだった。しかし、それ以上に、研究のアイディアの斬新さに脱帽した。少々長くなるが、その詳細を以下に紹介させて頂く。昆虫の触角を用いて、地雷を検出するバイオセンサーの開発が研究チームの目標の一つであった。

1990年、前述のCMAVEに所属するJames H. Tumlinson氏は非常に興味深い現象を報告した。チョウ目幼虫、いわゆるイモムシに食害された植物が特有の揮発成分を放出し、幼虫の天敵である寄生バチがこの香りを利用して幼虫を見つけ出したうえで、幼虫に卵を産み付けるのである(図1) [1]。植物がバラの様に棘を生じたり、タバコのニコチン、除虫菊の殺虫成分ピレスロイドやワサビやカラシの辛味成分シニグリンといった毒物質を生産し、植

食者の攻撃を防いでいることは読者の皆さんもご存知であろう。いわゆる物理的防御と化学的防御である。どちらも植物が植食者に対して直接作用するので、直接防御反応である。これに対して、Tumlinson氏らが報告した事例は、寄生バチという介在者を通した植物の防御反応であり、植物の間接防御反応と位置付けられた。トウモロコシ、タバコやワタは、食害されると草引きの際に経験する青臭い匂いに加えて、独特の花のような甘い香りを特異的に放出する。食害された植物が放出する匂いを初めてかいだ時は、その甘い香りに著者も驚いた。例えば、食害されたアオイ科のワタからは $\alpha$ -pinene、 $\beta$ -pinene、myrcene、limonene、 $\alpha$ -humulene、 $\beta$ -caryophyllene、jasmane、(Z)-3-hexenyl butyrate、(Z)-3-hexenyl isobutyrate、(E)-2-hexenyl butyrate、(Z)-3-hexen-1-ol、(E)-2-hexenal、(E)- $\beta$ -ocimene、linalool、(E,E)- $\alpha$ -farnesene、(E)- $\beta$ -farnesene、(E)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene、(E,E)-

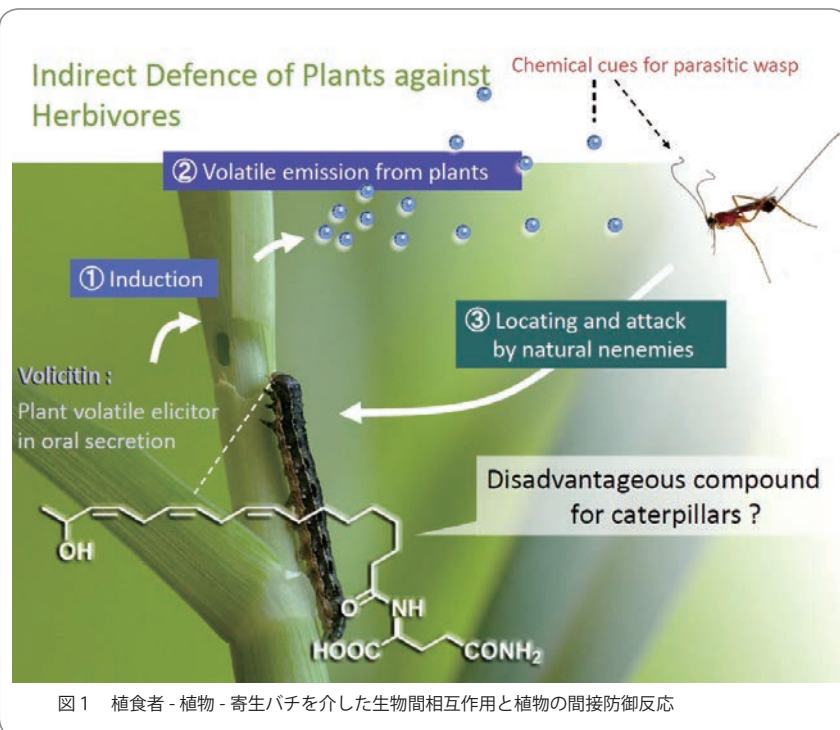
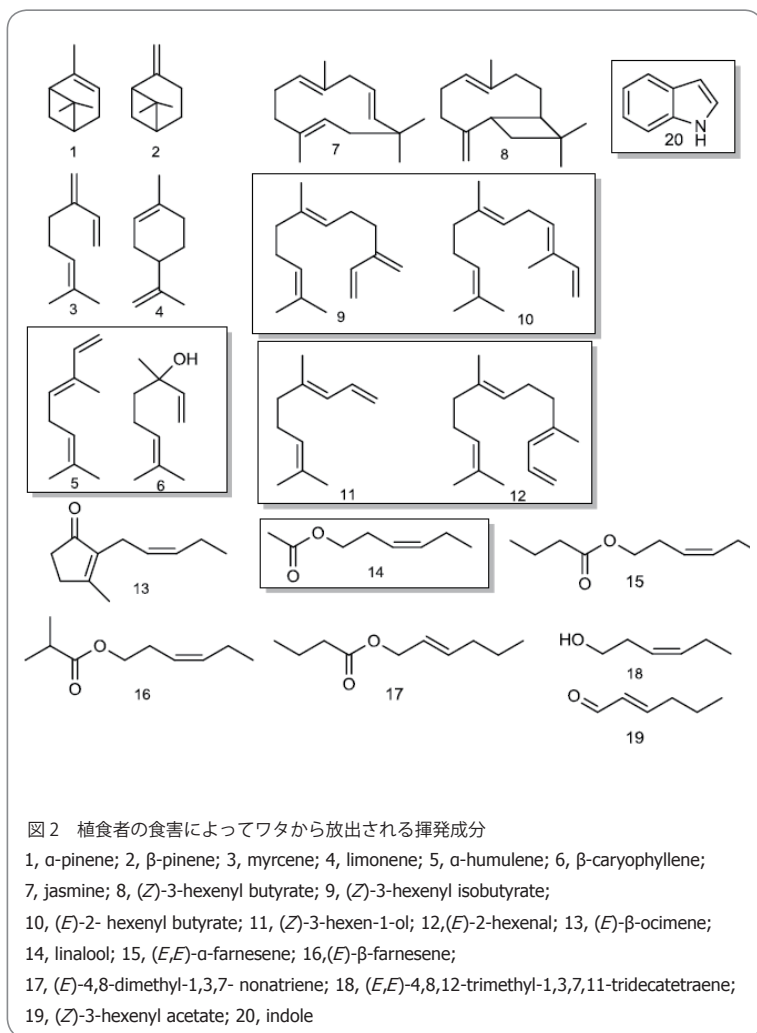


図1 植食者-植物-寄生バチを介した生物間相互作用と植物の間接防御反応

4,8,12-trimethyl-1,3,7,11-tridecatetraene、(Z)-3-hexenyl acetate、indole が放出される (図2)。オランダでは、リママメ、植物の大害虫であるハダニ、そしてハダニの天敵であるカブリダニの間にも同様な関係が報告され [2]、植食者-植物-天敵間で働く情報化学ネットワークは一部の特異な例ではなく、一般的な現象であることが示唆された。ワーゲニンゲン農科大学 Marcel Dicke 氏らの成果である。

イモムシの幼虫やハダニの食害だけではなく、現在では、昆虫の産卵や昆虫が植物の上を歩き回ったことさえも植物は検出でき、種々の抵抗性が誘導される事実が報告されている。



## 2. 自然の巧妙さ

自然は巧妙に出来ている。例えば、ナミアゲハをはじめとするアゲハチョウ属の多くはミカン科植物を幼虫の食草としており、他の植物を食べない。上述の植食者-植物-天敵間で働く情報化学ネットワークにも、厳格な区別がある。

比較的大型の寄生バチ *Cardiochiles nigriceps* はスペシャリストであり、鱗翅目ヤガ科の *Heliothis virescens* にしか産卵しない。同じヤガ科の *Helicoverpa zea* に産卵しても、*H. zea* の免疫機構を突破できず、*C. nigriceps* の幼虫は生育できない。しかしながら、外見上 *H. virescens* は *H. zea* とほぼ同じで、少なくとも著者には区別出来ない。どの様にしてこの寄生バチは *H. virescens* と *H. zea* を区別するのだろうか？

ペンシルベニア州立大学の Consuelo De Moraes 氏によると、*H. virescens* または *H. zea* に食害されたワタは上述の揮発成分を放出するが、その成分の比率が大きく異なる。

その違いを寄生バチは認識し、宿主となる幼虫が食害しているワタを識別している [3]。 *C. nigriceps* の宿主となる *H. virescens* に食害されたワタは (Z)-3-hexenyl acetate、(E)- $\beta$ -ocimene そして (E)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene を大量に放出する。一方、*H. zea* に食害された場合には、別の成分である (E,E)- $\alpha$ -farnesene、(E)- $\beta$ -farnesene そして (E,E)-4,8,12-trimethyl-1,3,7,11-tridecatetraene を放出する。同じ植物でも異なる植食者に食害された場合、比率の違う揮発成分を放出することは、トウモロコシやタバコでも確認された。現在、ハチは宿主が食害した植物が放出する匂いを学習し、その匂いを利用して効率的に自然生態系で自らの宿主を発見すると考えられている。昆虫が学習することに驚く読者もいるかもしれないが、昆虫は一般に考えられている以上に適応能力も高く、完成された生物である。

## 3. 驚愕の生物規範工学的発想の一例

前置きが長くなったが、いよいよ本題である。昆虫の触角ほど、感度の高いセンサーはない。この昆虫の「超能力」を利用する手段はないだろうか？ Tumlinson 氏や米国農務省 Crop Management and Research Laboratory の Joe W. Lewis 氏はここで驚くべき発想の飛躍を行った。すなわち、寄生バチが高い学習能力を持つならば、寄生バチに例えば爆薬中の副生成物 2,4-dinitrotoluene の匂いを学習させれば、地雷探知の高感度センサーとしてハチが利用出来る

のではないかと考えたのである。国際空港で活躍する麻薬犬ならぬ、地雷パチとでも言えようか。このアイデアが DARPA に認められ、本プロジェクトがスタートした。この発想の柔軟さには非常に感心させられた。

この研究で活躍した寄生バチは *Microplitis croceipes* である。食餌や産卵可能なイモムシ宿主の提供といった報酬と関連させれば、本種のハチはチョコレートやバニラの匂いを学習し、匂い源へ飛んで来る [4]。それでは、学習できる化学物質の幅はどれほど広いのだろうか？実際に、ハチは自然界には存在しない 2,4-dinitrotoluene の匂いを学習し、その匂いを選好することは出来るのだろうか？答えは、YES であった。産卵する雌蜂は見事に学習し、80 cm の風洞実験で匂い源に飛来した [5]。また、環状ケトン cyclohexanone、脂肪族ケトン 3-octanone、脂肪族アルデヒド octanal、脂肪族アルコール diisopropyl aminoethanol も同様に学習した。これらの結果から、*M. croceipes* は非常に広い範囲の化学物質を柔軟に学習できる潜在能力を有しており、ハチの生活史とはかけ離れた化学物質にも反応出来ると結論した。自然生態系には多くの化学物質が存在し、昆虫はそれらに晒されている。この化学物質から生存に有利な情報を取捨選択するために、昆虫の触角上のレセプターは種々な官能基を持つ化学物質に対応出来るように調整されているのかもしれない。

さらに、我々の研究チームのメンバーである Tomas C. Baker 氏とペンシルバニア州立大学の Kye Chung Park 氏は、上述の *H. virescens*、*H. zea*、*M. croceipes* に加えキロショウジョウバエ等の 5 種の昆虫の触角を切り取って集め、並列にアンブに連結し、ハンディータイプのハイブリッド型の嗅覚バイオセンサーを開発した。このセンサーに 20 種の揮発成分を検出させると、当然のことかも知れないが、それぞれの揮発成分に対して、それぞれの触角は大きさの異なる電気信号を生じる。これらの信号を再構築することで、このハイブリッド型のバイオセンサーに 20 種の揮発成分を識別さ

せることに成功した [6]。

#### 4. 害虫による食害のミミック

寄生バチが介在する植物の間接防御反応は驚くべき発見である。そこではハチの学習能力が重要であった。一方、植物はどのようなメカニズムで植食者から食害されたことを知り、揮発成分を放出し始めるのだろうか？本研究テーマも興味深い。著者はこのメカニズム解明の研究に従事した。

著者の同僚であったスウェーデン人 Hans T. Alborn 氏はヤガ科の一種シロイチモジヨトウ幼虫 *Spodoptera exigua* の唾液に着目した。興味深いことに、トウモロコシの葉に傷をつけ、その部分に幼虫の唾液を塗りつけると、食害時と同様な組成の揮発成分が放出された。植物に食害特異的な応答を引き起こすエリシターという鍵物質が唾液中に存在し、この物質が食害をミミックすることができる。Alborn 氏らは、幼虫の唾液を大量に集め、唾液からトウモロコシに揮発成分を放出させるエリシターを単離した。揮発成分 volatile と誘導 elicit を融合させ volicitin と命名した (図 3) [7]。昆虫の唾液に注目した点が非常にユニークである。その構造は、17 位が水酸化されたリノレン酸とグルタミンの縮合物であった。また、類縁体として、水酸基の無い *N*-linolenoyl-L-glutamine も同定された。筆者らは、ハスモンヨトウ・アワヨトウ・オオタバコガからも volicitin を同定し、その 17 位の立体化学を *S*-体と決定した。揮発成分放出活性を調べると、17 位の立体化学は活性には影響しないが、水酸基を除去すると、その活性は約 30% に減

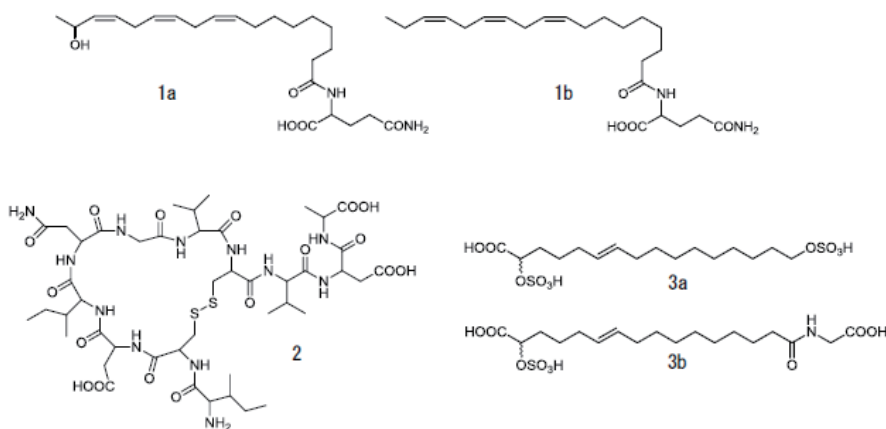


図3 植物に揮発成分を放出させる昆虫由来エリシター

1a, volicitin; 1b, *N*-linolenoyl-L-glutamine; 2, inceptin; 3a, caeliferin A 16:1; 3b, caeliferin B 16:1

少した。また、グルタミン部分をアスパラギン、ロイシン、プロリン、スレオニンなど他のアミノ酸に変換すると活性は消失し、volicitin のグルタミン部分が揮発成分放出の活性発現に必須であることが判った [8]。

Volicitin の同定以来、昆虫の唾液中のエリシター成分がわかに注目されてきた。Eric A. Schmelz 氏らは、ハスモンヨトウの近縁種 *S. frugiperda* に食害されたマメ科ササゲからトウモロコシと似た揮発成分が放出されることを見出し、その唾液からペプチド性のエリシター、inceptin を単離・同定した。Inceptin は幼虫が食べた植物の葉緑体 ATP シンターゼの  $\gamma$ -サブユニットを構成するタンパク質の一部であり、1枚の葉に 1 fmol (フェムトモル、 $10^{-15}$ ) という超微量の処理で、エリシター活性を示した。更に、volicitin の発見者である Alborn 氏は、鱗翅目ではなく直翅目 (バッタ目) に属するアメリカイナゴの唾液から、トウモロコシに揮発成分を放出させる新しいタイプのエリシター、caeliferin 類を単離・同定した。構造を図3に示す。

非常に興味深いのは、この揮発成分の放出は傷口周辺だけでなく、食害を受けていない健全な葉からも放出される点である。すなわち、volicitin が引き金となり、植物全身で揮発成分生合成が活性化され、インドールやテルペン類が合成される。健全な葉からも揮発成分が放出される本反応は、まさしく植物の免疫反応とも言える。また、食害されたワタから放出される揮発成分 20 種のうち、四角で囲んだ 8 化合物は食害の刺激で炭酸ガスから新たに de novo 合成された (図2)。食害の刺激で、植物の生理反応が活性化されていることが判って頂けると思う。テキサス工科大学の Paul W. Paré 氏らはトウモロコシ葉から volicitin と結合するタンパク質の存在を報告している。著者の研究結果と合わせると、この結合タンパクの認識には volicitin のグルタミン部分が重要であると予想される。トウモロコシは昆虫の食害に対して、巧妙な応答反応の機構を持ち合わせているのだ。トウモロコシに限らず、タバコ・ナス・ダイズも volicitin を受容して揮発成分を放出する。

それでは、*H. virescens* または *H. zea* に食害されたワタ・トウモロコシ・タバコで異なる比率の揮発成分が放出されるのは何故だろうか？ 残念ながら、この答えは未だに解明されていない。*H. virescens* および *H. zea* の唾液中から volicitin とその類縁体が同じ様に同定され [9]、両種の唾液で処理したトウモロコシから放出される揮発成分の組成には違いは見られなかった。二種のイモムシが直接トウモロコシを食害した場合に見られた揮発成分の比率の違いを in vitro 実験系では再現することは出来なかったのである。しかしながら、意外なことに糞中に含まれる volicitin 類の量には大きな差があり、*H. virescens* の糞にはほとんど volicitin 類は含まれていないが、*H. zea* の糞中には大量に含まれていた [9]。タバコズメガの糞にも volicitin 類は確認されている。多くのチョウ目幼虫の中には、果実内部や柔らかい海綿状柔細胞からなる髓の内部で生育する種もいる。この様な場合には、植物内に糞中の volicitin 類が溜まり、結果として植物の反応に何らかの影響を与える可能性も考えられる。

植物に抵抗反応を誘導するゆえ、volicitin 類は幼虫の生存に明らかに不利に働く。何故自分の生存に不利に働く volicitin 類を昆虫は持つのだろうか？ 恐らく幼虫にとっても volicitin は何らかの重要な役割を果たしていると思われる。そこで、著者らは鱗翅目幼虫ハスモンヨトウ *S. litura* を用いてその生合成経路を詳細に調べ、幼虫における volicitin の生理的な役割の解明に挑戦した。結論から述べると、幼虫にとって、volicitin 類とは老廃物であるアンモニアをグルタミンとして貯蔵し、幼虫の窒素代謝の効率

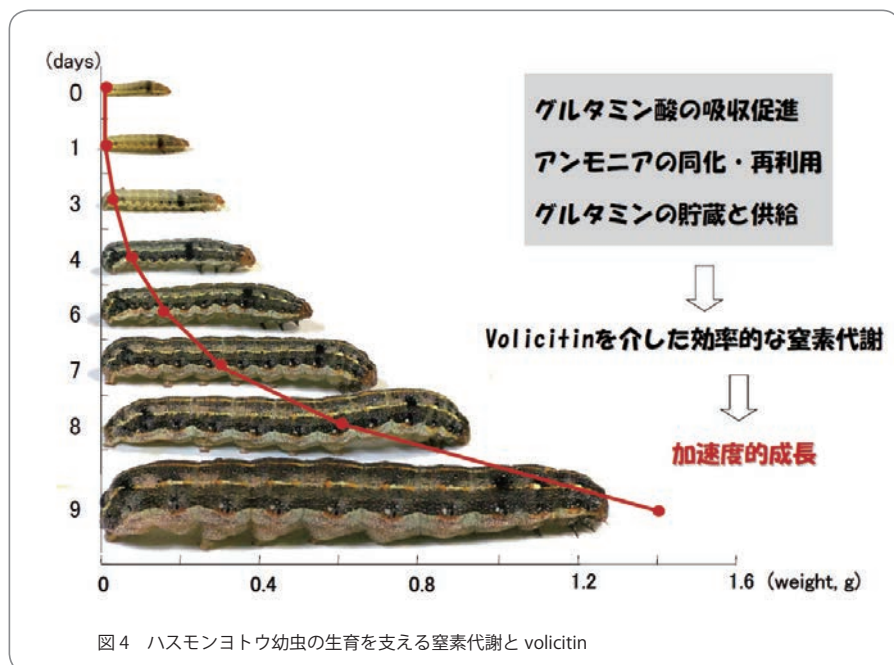


図4 ハスモンヨトウ幼虫の生育を支える窒素代謝と volicitin

化に寄与する化合物であることを見出した [10]。植物に含まれるタンパク質の量はそれほど多くはない。これに対して、ある種のチョウ目幼虫は卵から孵化後飛躍的に大型化することで、天敵からの攻撃を免れている (図 4)。この迅速な成長を可能にするには、幼虫体内の窒素の効率的利用は不可欠なのであろう。この生理的な理由から、たとえば唾液中の volicitin 類が植物の間接防御反応を引き起こそうとも、簡単には捨てられないのだ。

現在までに、volicitin 類は多くの鱗翅目幼虫から同定されているが [9,11]、全ての鱗翅目幼虫が持つわけではない。その一方で、著者らは直翅目コオロギ科のエンマコオロギやタイワンエンマコオロギ、双翅目ショウジョウバエ科キイロショウジョウバエ幼虫からも volicitin 類を同定した [12]。この様に、volicitin 類は当初研究者が予想していたよりも多くの昆虫が持つ。昆虫の食害に対して抵抗性が誘導される鍵化合物として、ある種の植物がたまたま幼虫唾液中の volicitin を利用するようになった。しかし、その背景には進化的・生態学的に様々な淘汰を経たことが覗える。

## 5. おわりに

以上、アメリカにおける著者の個人的な経験を書かせて頂いた。特に、ハチを用いた地雷の検出や昆虫の触角を利用した匂いの識別センサーシステムの構築に挑む研究は、昆虫の多様性をうまく活かしながら、生物学者と工学者の協力によりはじめて為し得た研究であった。まさしく、生物規範工学の好例である。また、著者が直接関与した植物に抵抗性を誘導する昆虫由来のエリシターに関する研究も、昆虫の唾液に注目した点が非常にユニークであった。昆虫の食害をミミックする物質から、植物の免疫機構に迫る研究は今後の発展が大きく期待される。この研究グループに所属し、その進展を間近で見ていると、世界各国から人材を集め、オリジナリティー溢れる研究を展開するアメリカのシステムの力強さ・底力を見せつけられた思いがした。実際、ヨーロッパや米国と比較すると、日本の生物規範工学的研究は周回遅れかもしれない。

しかしながら、同時に、日本独自の視点を大切に、欧米よりも優れたチームワークを発揮すれば、日本人らしい生物規範工学を確立できるとも強く確信した。幸い我々日本人は、四季によって育まれた自然に対する鋭敏な美的感覚、物作りにおいては細部に至るまでの心配りなど、独特の文化を築き上げてきた。我々日本人が失ってはいけない大切な長所であろう。世界に誇れる日本人らしさ、世界に期待される日本人とは何だろうか。勿論、現在の厳しい国際社

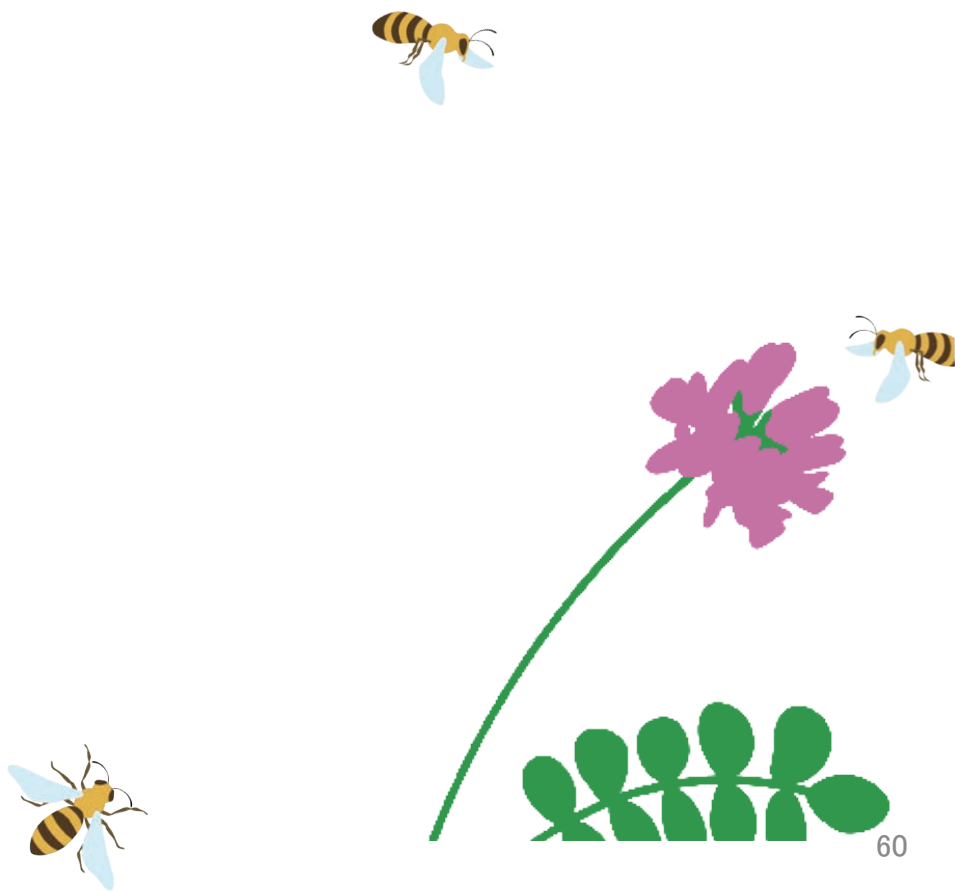
会において英語を自由に操り、外国人とのディベートに負けない日本人も必要である。しかし、それだけではないだろう。多様性が重要なのは、昆虫だけでは無いはずだ。流暢に英語が話せなくても、日本人らしい特徴・物の見方を磨くことも世界から期待される一つの日本人像ではないだろうか。国際化、グローバルスタンダードが声高に叫ばれるこの時代だからこそ、深く意識しておきたいポイントだと思う。読者の皆さまは如何お考えでしょうか？

## References:

- [1] Turlings, T.C.J., Tumlinson, J.H.T., Lewis, W.J. (1990) Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. *Science* 250, 1251-1253.
- [2] Dicke, M., Sabelis, M.W. (1988) How do plants obtain predatory mites as bodyguards. *Neth. J. Zool.* 38, 148-165.
- [3] De Moraes, C.M., Lewis, W.J., Pare, P.W., Alborn, H.T., Tumlinson, J.H. (1998) Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. *Nature* 393, 570-573.
- [4] Takasu, K., Lewis, W.J. (1993) Host- and food-foraging of the parasitoids *Microplitis croceipes*: learning and physiological state effects. *Biol. Control* 3, 70-74.
- [5] Olson, D.M., Rains, G.C., Meiners, T., Takasu, K., Tertuliano, M., Tumlinson, J.H., Wackers, F.L., Lewis, W.J. (2003) Parasitic wasps learn and report diverse chemicals with unique conditionable behaviors. *Chem. Sense* 28, 545-549.
- [6] Park K.C., Ochieng, S.A., Zhu, J., Baker, T.C. (2002) Odor discrimination using insect electroantennogram responses from an insect antennal array. *Chem. Sense* 27, 343-352.
- [7] Alborn, H.T., Turlings, T.C.J., Jones, T.H., Stenhagen, G., Loughrin, J.H., Tumlinson, J.H. (1997) An elicitor of plant volatiles from beet armyworm oral secretion. *Science* 276, 945-949.
- [8] Sawada, Y., Yoshinaga, N., Fujisaki, K., Nishida, R., Kuwahara, Y., Mori, N. (2006) Absolute configuration of volicitin from the regurgitant of lepidopteran caterpillars and biological activity of volicitin-related compounds. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 70, 2185-2190.
- [9] Mori, N., Alborn, H.T., Teal, P.E.T., Tumlinson, J.H. (2001) *J. Insect Physiol.* 47, 749-757.
- [10] Yoshinaga, N., Aboshi, T., Abe, H., Nishida, R., Alborn, H.T., Tumlinson, J. H., Mori, N. (2008) Active role of fatty acid amino acid conjugates in nitrogen metabolism in *Spodoptera litura* larvae. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 18058- 18063.

[11] Yoshinaga, N., Alborn, H.T., Nakanishi, T., Suckling, D.M., Nishida, R., Tumlinson, J.H., Mori, N. (2010) Fatty acid-amino acid conjugates diversification in lepidopteran caterpillars. *J. Chem. Ecol.* 36, 319–325.

[12] Yoshinaga, N., Aboshi, T., Ishikawa, C., Fukui, M., Shimoda, M., Nishida, R., Lait, C.G., Tumlinson, J.H., Mori, N. (2007) Fatty acid amides, previously identified in caterpillars, found in the cricket *Teleogryllus taiwanemima* and fruit fly *Drosophila melanogaster* larvae. *J. Chem. Ecol.* 33, 1376–1381.



## 自然に学ぶ防汚性：超親水性表面の利用

小林 元康<sup>1</sup>、高原 淳<sup>1、2</sup>

<sup>1</sup> 科学技術振興機構 ERATO 高原ソフト界面プロジェクト

<sup>2</sup> 九州大学先端物質化学研究所

### 1. はじめに

ハスは泥沼の中から生えてくるにも関わらず、泥水の濁りに染まらない美しい花を咲かせる。特に、ハスの葉の表面は水滴がコロコロと転がり落ち（図 1）、汚れもつきにくい。これは表面の微細構造に起因することがよく知られている。ハスの葉の表面には数マイクロメートル程度の突起が配列しており、さらにその先端には葉から分泌された疎水性のワックスがサブミクロンオーダーの微細な凹凸構造を形成している [1]。このような階層性を持つ凹凸構造があると、実表面積は大きくなり（Wenzel 状態）[2]、しかも微細な凹の部分には水が入り込みにくいため（Cassie-Baxter 状態）[3]、表面はあっという間に濡れにくくなる。ハスの葉はこうした微細構造とワックス状化合物の相乗効果により超撥水性を示し、Lotus 効果として呼ばれている。ハスの葉もアメンボの脚 [4] もセミの翅 [5] もフッ素系材料を利用することなく、水をはじく性質を獲得している。

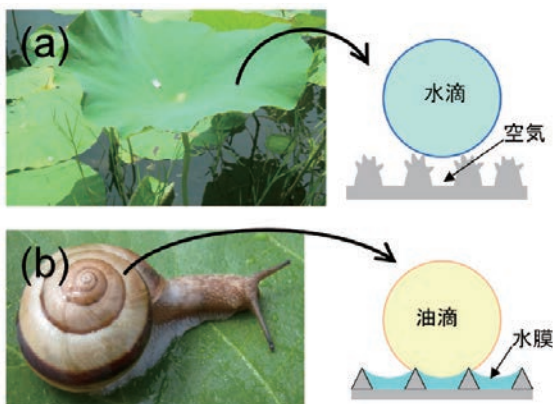


図 1. 階層的な微細凹凸構造によるハスの葉の撥水機構 (a) とカタツムリの殻によるセルフクリーニング機構 (b) の概念図

撥水性表面では水滴が転がり落ちるときに汚れを一緒に付着していくので自己清浄（セルフクリーニング）機能があると言われている。ただし、これは水性汚れに対して当てはまるものであり、疎水性な有機系の油汚れが落ちることはない。油をはじく性質、つまり撥油性を実現する時にも撥水性表面と同様に微細構造が有効であることは知られている。例えば、フラクタル的な凹凸構造を有する陽極酸化アルミニウムにフルオロアルキルリン酸を吸着させた表面 [6] や、カーボンナノチューブが林立した構造体をフルオロアルキル化合物で被覆した表面 [7] などが優れた撥油性を示すことが報告されている。では、自然界ではどのようにして撥油性やセルフクリーニングを達成しているのだろうか。

### 2. 自然界での防汚性

水中で泳いでいる魚の体表に油汚れが吸着することはない、常にその表面は清浄に保たれている。その秘密は鱗にある。魚の鱗は主にリン酸カルシウムと親水性のタンパクからできている。その表面には、幅 30～40 μm 高さ 100～300 μm のミクロンサイズの突起があり、これらが扇形をした鱗の動径方向に並んでいる。この突起の先端はさらに数 μm 程度の細かな突起があり、ハスの葉と同様に、階層的な凹凸構造をしている。これらがタンパクなど高分子電解質からなる粘液を保持することで鱗の表面は常に粘液で覆われており、水中では油や海洋生物の付着を防いでいるのである。

Jiang らは魚の鱗の撥油性に関する実験を行っている [8]。空気中で魚の鱗の表面に油性の 1,2-ジクロロエタン液滴をのせてみても液滴は完全に濡れ広がってしまい、撥油性

は観察されない。しかし、これを水中に入れると 1,2-ジクロロエタンは直ちに球形となり、鱗表面から離れようとする。つまり水中において撥油性が発現するのである。これは親水性の鱗が油よりも水との接触を好むため、油は鱗との接触面積を最小にするように真球状へと変化することが原因である。

カタツムリの殻も水膜が形成されることにより防汚性を示すと考えられている [9]。カタツムリは落ち葉の下など土汚れが付きやすい環境で生活しているにも関わらず、その殻が汚れている姿を見かけることはない。カタツムリの殻は炭酸カルシウムを主成分とするアラゴナイトという無機質とタンパク質との複合材料であるが、最表面は主に硬タンパク層でできている。その表面には約 0.5 mm 間隔の成長線とこれと直交するような約 0.1 mm 幅の溝があり、さらにその間にはより微細な 10 $\mu$ m 前後のシワのような形状をした凹凸構造がある。空気中または乾燥状態では油や汚れが付着するのであるが、いったん水を殻にかけると凹凸構造に水がたまり、水膜ができるしくみになっている。そのため、油汚れははじかれ、水と一緒に流れ落ちることで殻は防汚性を発揮しているといわれている。このしくみを模倣した防汚表面処理技術がすでにセラミックタイルや衛生陶器などに応用されている。

### 3. ポリマーブラシによる親水性表面

このような親水性の材料表面を構築する方法として筆者らはこれまで親水性の高分子を表面に固定化する手法を試みてきた。ひも状の長い高分子鎖の一端を固体表面に結合させると、あたかも歯ブラシやヘアブラシのような構造体ができる。これをポリマーブラシと呼ぶ。ポリマーブラシは高分子鎖の一端が共有結合など比較的強固な結合で基板表面につなぎ止められているため、摩擦や洗浄に対して剥離しにくく、改質効果を長期にわたって保持することが可能であるという特長がある。

筆者らの場合、表面開始重合という方法によりポリマーブラシを調製している。図 2 にその概要を示す。基板表面に開始剤と呼ばれる化合物を固定化し、これを起点としてモノマーという低分子化合物が連続的に連結する重合反応を行うと、ひも状の高分子鎖がブラシ状に生長した構造体を得られる。モノマーとして、フルオロアルキル基や水酸基、カルボキシル基、アミノ基、スルホン酸基などの官能基を持つ多彩な化合物を用いることが出来るため、これらの官能基の性質を反映した表面が得られる。つまり、適切なモノマーを選択することで表面の性質を自在にデザインすることが可能である。

図 3 は種々の親水性基やイオン性基を側鎖に有するポリメタクリル酸エステル類からなるポリマーブラシ表面における大気中での対水接触角  $\theta$ 、および水中における気泡とヘキサデカンの接触角  $\phi$  を示している。側鎖に撥水性のフルオロアルキル基を有する poly(2-perfluorooctylethyl acrylate) (PFA-C8) ブラシ薄膜表面では、フライパンなどにコーティングされているテフロンと同様に空気中の水の接触角は大きく、ヘキサデカンの接触角も 75°を示す。一方、二つの水酸基を有する poly(2,3-dihydroxypropyl methacrylate) (PDHMA) は水溶性のポリマーであるにも関わらず、そのブラシ表面の接触角  $\theta$  は 60°とそれほど低い値を示していない。一方、側鎖にスルホン酸塩を持つ poly(3-sulfopropyl methacrylate potassium salt) (PSPMK) ブラシや双性イオン型のホスホリルコリン基を有する poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) (PMPC) [10] ブラシは水との親和性が強い対水接触角は極めて小さく、水は表面に濡れ広がろうとする。また、ヘキサデカンも空気との界面自由エネルギーを低下させるために濡れ広がろうとする傾向を示した。

一方、水中ではどうなるのであろうか。親水性固体 / 水界面における表面の特性を評価する際には水和状態で接触角測定を行うことがある。この方法は Captive bubble 法とよばれ、気泡が接触角測定に用いられる。図 3 の中、下段で

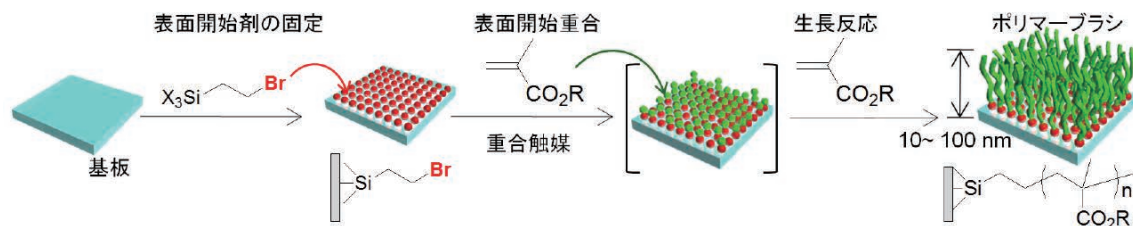


図 2. 表面開始重合法によるポリマーブラシの調製の概略

は水中に固定されたブラシ基板に対し、下方より気泡を導入し接触角  $\phi$  を測定している。

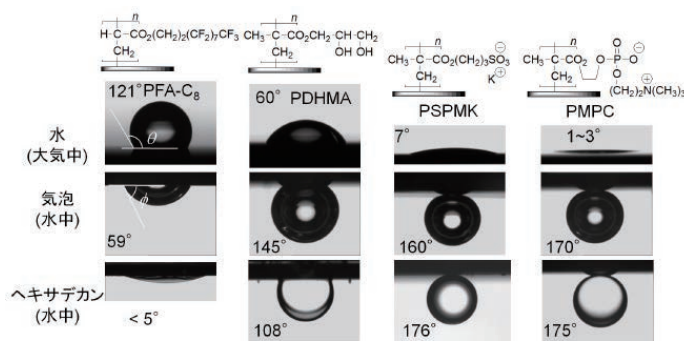


図 3. 種々のポリマーブラシ表面の大気中における対水接触角  $\theta$  および水中における気泡とヘキサデカンの接触角  $\phi$ 。左から順に PFA-C8、PDHMA、PSPMK、PMPC ブラシ。

図 3 に示すように水中では PFA-C8 ブラシ薄膜における気泡の接触角は 59° と低く、ヘキサデカンは界面エネルギーを低下させるために濡れ拡がろうとする。すなわちフッ素系ブラシ表面は水中では油が付着しやすい。これとは対照的に、イオン性基を有する PSPMK や PMPC ブラシ表面では気泡もヘキサデカンもその接触角は 180° に近く、気泡や炭化水素系液体が付着しにくいことが分かる。これは高分子電解質ブラシの表面自由エネルギーが水と同様に高く、気泡との接触による界面自由エネルギーの増加を最小にするためであり、高分子電解質ブラシ表面が超親水性であることを反映している。特に、PMPC は細胞外膜を構成するリン脂質分子と同様のホスホリルコリン基を有するため、蛋白質や細胞を付着しにくく生体適合性材料として用いられている [11]。固体材料表面を生体適合性のリン脂質骨格を有する水溶性高分子で表面修飾することで、バイオエンジニアリング等に有用な新規機能材料へも展開されている。

図 4 は PSPMK ブラシ表面にシリコン油を乗せ、そのまま水中へ浸漬させたときの油滴の形状変化を示している。大気中ではシリコン油は PSPMK ブラシ表面に濡れ広がっている。これは高分子電解質ブラシ表面の表面張力が油表面の表面張力より大きいためである。しかし、この試料を水中に入れるとシリコン油は速やかに球形となり、ブラシ表面から離脱し浮上する。超親水性の PSPMK ブラシが油よりも水との接触を好むため、油がブラシ表面との接触面積を最小にするよう真球状に変形した結果である。一方、表面が疎水性の材料を用いて同様の実験を行ってもシリコン油は水中において球形にはならず、表面に付着したままである。一般に、テフロンに代表されるフッ素系

樹脂やフッ素コーティング材料は大気中で撥水、撥油性を示すことが知られているが、水中では気泡や油が付着しやすいため撥油性は低減する。重油流出事故などにより油まみれになった水鳥の痛ましい映像を見かけることがある。水鳥の羽根は撥水性であるが、水界面ではむしろ油が吸着してしまうのである。

また、高分子電解質ブラシは水中において摩擦を低減する効果も有している [12]。親水性ブラシが水により膨潤するとともに、内部に浸透した水が荷重を支え潤滑作用を維持するために低摩擦となると言われている。また、ブラシ鎖が溶媒和することでブラシ鎖同士の相互作用が小さくなり、ある程度の垂直荷重領域までは溶媒の流動性が保たれる。そのため、滑り運動が生じた時にせん断抵抗が小さく、

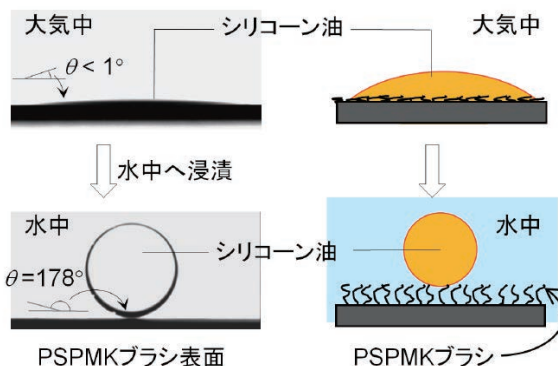


図 4. 大気中で PSPMK ブラシ表面にシリコン油を乗せ、そのまま水中へ浸漬させたときの油滴の形状変化。水中に入れると速やかに球形になり、ブラシ表面から離脱し浮上する。

ブラシ鎖界面で良好な潤滑が生じる。生体関節ではプロテオグリカンに代表されるような多くのイオン性基を結合したポリマーが重要な働きをしていることから、高分子電解質ブラシ表面には優れた水潤滑が期待される。また、魚類 [13] やドジョウ [14] などの表面がヌルヌルとしているのはタンパク質と結合したムコ多糖類の含水物からなる粘液で覆われているためであり、これが保水性を維持するだけでなく流体抵抗の低減にも寄与しているといわれている [15]。ムコ多糖類も硫酸基をはじめ多くのイオン性官能基を有する高分子電解質である。

水の膜を利用した潤滑表面としては食虫植物のウツボカズラが注目されている。ウツボカズラの消化液が入ったつぼの内壁には水を保持する微細な溝があるため、表面には常に滑らかな水の膜が形成されている。昆虫の脚の油はこの水の膜によってはじかれるため、昆虫は内壁から滑落する。最近、Wong らはこのしくみを模倣し、フッ素系ポリエステル潤滑液で満たされた多孔性素材を調製した [16]。この表面では、油、水、血液など様々な液体が高圧下（680 気圧）でも低温下（-4 °C）でも滑り落ちることを報告している。

#### 4. おわりに

親水性表面による撥油性・防汚性は撥水表面に基づく方法とは異なる発想ではあるが、湿潤条件下における低摩擦や潤滑などの分野へも応用されることが期待される。本稿で紹介した以外にも自然界にはソフトマテリアルの表面微細構造と濡れ特性をうまく組み合わせ、防汚性や集水性などを発現するしくみが多数見受けられる。こうした機能は現在の微細加工技術と、ポリマーブラシを含む高分子ナノ薄膜による表面自由エネルギーの制御を組み合わせることで達成可能であり、エネルギー損失が少なく環境負荷の小さい新たな機能表面を創出することが期待されている。しかし、それに関連する材料の表面・界面の構造や物性、機能の発現機構についてはまだ不明の部分が多数あり、これらを解明する上でも高分子固体界面を精密に設計し、その表面・界面の構造や物性について詳しく検討することが重要である。

#### References

- [1] K. Koch, H. F. Bohn and W. Barthlott, *Langmuir*, 25, 14116 (2009).
- [2] R. N. Wenzel, *Ind. Eng. Chem.*, 28, 988 (1936).
- [3] A. B. D. Cassie and S. Baxter, *Trans. Faraday Soc.*, 40,

- 546 (1944).
- [4] X. F. Gao and L. Jiang, *Nature*, 432, 36 (2004).
- [5] W. Lee, M. K. Jin, W. C. Yoo and J. K. Lee, *Langmuir*, 20, 7665 (2004).
- [6] K. Tsujii, T. Yamamoto, T. Onda and S. Shibuuchi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 36, 1011 (1997).
- [7] H. Li, X. Wang, Y. Song, Y. Liu, Q. Li, L. Jiang and D. Zhu, *Angew. Chem. Int. Ed.* 40, 1743 (2001).
- [8] M. Liu, S. Wang, Z. Wei, Y. Song and L. Jiang, *Adv. Mater.*, 21, 665, (2009).
- [9] バイオミメティクス研究会編, 次世代バイオミメティクス研究の最前線, シーエムシー出版, p.283-288, (2011).
- [10] M. Kobayashi, Y. Terayama, N. Hosaka, M. Kaido, A. Suzuki, N. Yamada, N. Torikai, K. Ishihara and A. Takahara, *Soft Matter*, 3, 740 (2007).
- [11] K. Ishihara, T. Ueda and N. Nakabayashi, *Polym. J.*, 22, 355, (1990).
- [12] M. Kobayashi and A. Takahara, *Chem. Rec.*, 10, 208 (2010).
- [13] J. Genzer and K. Efimenko, *Biofouling*, 22, 339 (2006).
- [14] 海野都久子, トライボロジスト, 46, 155 (2001).
- [15] 中川鶴太郎, レオロジー第2版, 岩波全書, p264-305, (1978).
- [16] T. Wong, S. H. Kang, S. K. Y. Tang, E. J. Smythe, B. D. Hatton, A. Grinthal and J. Aizenberg, *Nature*, 477, 433 (2011).

## 国内外研究動向紹介

## 滋賀での実践 ―自然に学ぶものづくり・まちづくり

NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン 研究員・コーディネーター 星野敬子

滋賀県は、琵琶湖水系が育む豊かな自然に恵まれている。琵琶湖の固有種をはじめとする動植物の種類が多いことも知られている。近畿地方の中核部に位置しながら、土地の約8割が森林・耕地・湖という、里山や自然の風景が今も色鮮やかに残る地域である。2010年10月、この地を舞台にNPO法人アスクネイチャー・ジャパンを設立した。

地球上に生命が誕生したのが38億年前。現在に伝わる自然・生きもののかたちやパターン、循環や生存の戦略は、同じ地球上に生きる私たちに必要な知恵の源泉である。私たちはこれまで自然を「資源の宝庫」と見なし、その資源を取り出し消費することによって文明を築いてきた。しかし、いつかは尽きてしまう資源の開発ではなく、自然を「知恵の宝庫」として見直し、その知恵と応用により築かれる社会が求められている。そして今「バイオミメティクス」、「バイオミクリー」、「ネイチャー・テクノロジー」という概念のもと、環境負荷の低い技術開発やライフスタイルづくりが始まっている。当法人は滋賀を拠点に、自然の知恵をものづくり・まちづくりにつなげていく推進団体である。

当法人の名前についてよく質問がある。「アスクネイチャー」とはどういう意味か。「アスクネイチャー」はその名のとおりに「自然に尋ねる」の意味である。これはアメリカのThe Biomimicry Institute(TBI)が運営しているデータベース「Ask Nature」に由来する[1]。mimicは「模倣」だが、私たちは「尋ねる」という思いと姿勢を込めたいのだ。日本人が古来から持つ自然への目差しである。人が自然とともに生きてきた里山では、その厳しさで知恵比べをしながらもその恵みに感謝し、生きとし生けるものに畏怖の念を持っていた。私たちは今改めて、師に尋ねるように自然に尋ね、謙虚に学ばなければならない。

構想は2011年春に始まった。「アスクネイチャー」がこれからの社会に必要な枠組みだと確信した滋賀の経済界のメンバーが、「バイオミクリー」の提唱者Janine Benyus氏が主宰するTBIを訪ねた。日本での団体立ち上げの構想を練り、同年4月に滋賀経済同友会において「自然に学ぶ

経済」研究会を設立し、生物多様性の専門家の足立直樹氏をはじめ、京都大学教授(当時)の藤崎憲治氏らの指導のもと研究を重ねた。同年10月には日本にBenyus氏を迎え、TBIと連携協定を結んだ。その調印式には産官学民から100名以上が集い、「自然に学ぶ」知識基盤の整備・運用、ものづくりやまちづくり、人材育成という目標を掲げた(図1)。



図1 アスクネイチャー・ジャパン連携協定調印式の集合写真  
2011年10月滋賀県近江八幡市にて開催。調印式にあわせてBenyus氏、足立直樹氏、理事長仁連孝昭の記念対談も行われた。

活動は大きく4つある。まず第1の活動は、自然に学んだ事例の収集と、研究者と企業のネットワークだ。国内外の事例を調査研究し、人と情報が交わり新しいアイデアや可能性が生まれ育つプラットフォームをつくる。「ネイチャー・テクノロジー」の提唱者であり東北大学教授の石田秀輝氏や、バイオミメティクス研究会を主宰する東北大学教授の下村政嗣氏にもご指導いただきながら、ネットワークの構築を進めている。応用まで視野に入れた生物学者や、課題解決の方法を生物学・生態学に求める工学者など、専門性と同時に広い視野を持った研究者が今後ますます増えることを期待している。

第2の活動はものづくりである。研究者や専門家、企業や行政を交えて実際の製品開発に取り組み、滋賀の中小企業の活性化にもつなげていく。現在、立命館大学教授高倉秀

行氏監修のもと、ハウセンカの葉序を模倣した太陽光発電装置を開発中である（図2）。葉序はフィボナッチ数列という数学の法則にのっとり、上方の葉が下方の葉に重ならないよう角度が調節されている。これをモデルに集光型太陽光パネルを配列し、効率的な発電を実現する。発電能力39.6Wの「Solar Plants」を開発したところだが、今後改良を加え、一本で一家庭分の電力をまかなうことを目標にしている。「Solar Plants」が街に生えていたら景観も楽しくなるだろう [2]。



図2 太陽光発電装置「Solar Plants」

モデルにしたハウセンカは、葉が茎の周りをらせん状に3周したとき、8枚目の葉が0枚目の葉の裏に重なる3/8葉序である。植物にはこのほかにも1/2、1/3、2/5など様々な葉序がある。

第3の活動はこどもの教育事業である。こどもが自然に学びもののづくり・まちづくりを体験する4つのプログラムを開発する。屋外で動植物を観察するフィールドワーク。自然のしくみを体験する工作実験。新しい技術や暮らしの学習。そして、ものづくりを考えるアイデアワークショップである。

私たちは自然のつながりのなかにその一部として生きている。たった一人のかけがえのない存在であると同時に支え生かされている存在でもある。人のなかにもある「内なる自然」に耳を傾ける感性を、未来を担うこどもたちにも持つてほしい。自ら行動し地域社会でたくましく生きてほしい。そのために、こどもが自然への理解を深め、大切にしたいという思いと新しい暮らしのヒントをつかむプログラムの実践を始めている（図3）。



図3 自然に学ぼう！「いきもの探検隊」

2012年3月、滋賀県近江八幡市の湖岸にて、大阪大学大学院生とワークショップを開催した。上から、「Solar Plants」の説明を聞く子どもたち、屋外で葉序を観察、生きものの観察から人間のライフスタイルを考えるワークに取り組む子どもたち

最後の4番目の活動は地域づくりである。自然に学ぶ技術の研究開発が発達し、より環境負荷の低いものをつくったとしても、これまで通り、またはそれ以上にものを製造廃棄しては本末転倒である。自然生態系の完璧な循環システムに学び、人間の社会づくり・ライフスタイルづくりに生かさなければならない。

2011年3月11日に起きた東日本大震災を受け、時代は大きく変わろうとしている。なによりも東北の復興が最優先の課題であり、その復興の道筋は、地球環境と世界の動向を見極めたうえで、日本の変革を目指すものでなければならない。東北復興がほかの地域のモデルとなり、21世紀の持続可能な社会をつくる契機にしなければならない。その観点から被災地の東北三県でシンポジウムを開催した(図4)。3回のシンポジウムを通じて、山折哲雄氏、赤坂憲雄氏、川勝平太氏、安田喜憲氏にご出演いただき、東北の歴史的・文化的な背景をもとに、自然とともに生きる地域づくりへの方途を探った。今後、ここで得られた知見と成果を滋賀県につなげるシンポジウムを開催する予定である。



図4 第1回東北復興シンポジウム「海やまのあいだに生きる」  
第1回 2011年12月岩手県遠野市(共催:遠野市)、第2回 2012年1月宮城県仙台市(後援:河北新報社)、第3回 2012年3月福島県会津若松市(共催:福島県立博物館)にて開催。

アスクネイチャー・ジャパンは活動をはじめたばかりである。これからみなさまとともに、自然の知恵を産業や社会に結びつけていきたいと考えている。研究すべき内容、開発すべきターゲット、アイデアなど、広く議論を行ってゆく。活動の趣旨をご理解いただき、活動へのご支援をいただければ誠に幸いである。

NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン

<http://www.asknature.jp/>

## References :

[1] AskNature. 2008.

<http://www.asknature.org/>

[2] NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン . 2011.

<http://www.asknature.jp/history/2011/10/>

寄稿

# 麗しくそして懐かしのストックホルム Swedish Biomimetics 3000 訪問記

株式会社 積水インテグレートドリサーチ 佐野健三



10月の9日10日にドイツベルリンにて第1回ISO/TC266 "Biomimetics" 会議に出席した後、11日にスウェーデンストックホルムのSwedish Biomimetics 3000 (SB3000) を訪問した。同社を紹介してくださったのは東北大学の下村正嗣教授でしたが、ドイツからトンボ帰りされた。訪問者は物・材機構の細田奈麻絵氏、産総研の阿多

誠文、関谷瑞木の両氏、そして筆者佐野の4名であった。SB3000は民間の会社でTLOとベンチャー育成を兼ねたような活動をしている。同社は2004年に設立され、3000年まで続けたいという意味合いが込められている。社長のLars-Uno-Larsson氏、副社長のDr. Andrew J Copestake氏が迎えてくれた。

SB3000 成り立ちや事業内容については同社のウェブサイト  
に詳しく記載されているので、ここでは訪問の際に強く  
印象に残った言葉、仕組みを報告する。

◎経営基盤：政府の補助金、4 人の投資家、大企業との提  
携

ー社長は以前大手の銀行家であり、そういった方面で  
の顔が利くのであろう。

◎生物学者と工学者には「通訳」が必要。

ー同感である。

◎単なる模倣ではなく inspire されたことを工学に変換す  
ることが肝要

ー同感である。

◎ SB3000 のバイオミメティクスの実用化のコンセプト  
(図 1)。このサイクルの中で最も重要なことは「Platform」  
基幹技術を確認することにある。

ーこれも同感である。

ここへ至るにはものすごい努力と忍耐が必要で多くの場合  
ここへ至らない。

◎大企業はおしなべてバイオミメティクスが好き。

ー日本も同様の傾向にある。

◎学際連携が重要。

◎特許戦略も重要。

ー「オレの言いたいことを先に言うな」と、言いたい  
ほどである。

◎ハチからのアプリケーションが一番進んでいて、マイク  
ロミストという基幹技術をもとにディーゼルエンジンでの  
採用が進み、さらに医療機器、食品、消防、日用品などに  
開発が進行中

◎関係団体との関わり (図 2)

SB 3000 の "μMist®  
Technology" にインスピ  
レーションを与えたボン  
バルディア・ビートル  
- Swedish Biomimetics  
3000 の HP より

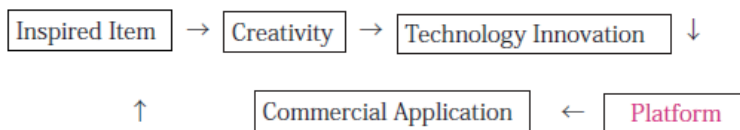


図 1 SB3000 のバイオミメティクスの  
実用化に向けたコンセプト

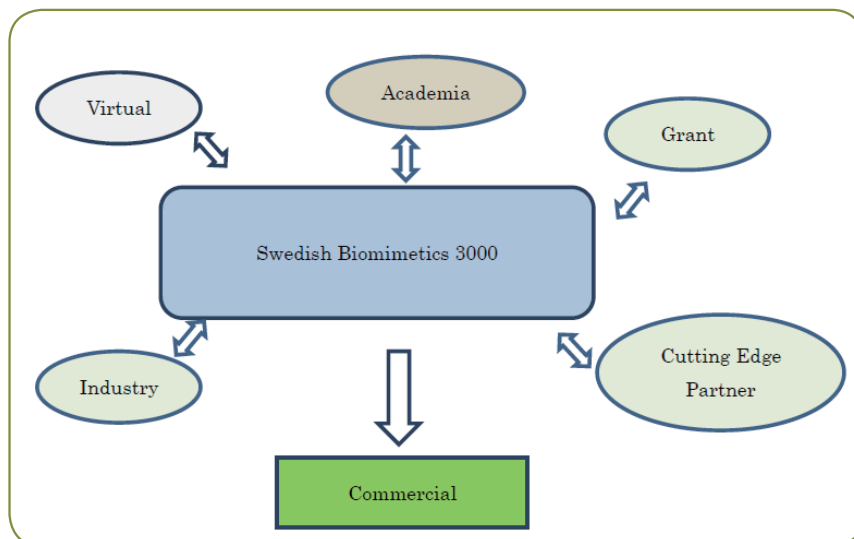


図 2 SB3000 と様々な関係機  
関との関係

筆者は 30 年前に半年間ストックホルムへ駐在した経験があり、その時にスウェーデンの人々の自然に対する考え方には日本人のそれと近いものがあると感じた。今回もまったく同感で、SB3000 の社長の Lars Uno 氏の自然に対する謙虚さ、感謝の心など実によく共感でき、信頼できる人物であると確信した。

SB3000 の紹介の後、日本側からベルリンであった ISO/TC266 "Biomimetics" 第 1 回総会の様子、日本のバイオミメティクス研究の状況、積水の「自然に学ぶものづくり研究助成」と日本でも早く SB3000 のような組織を創るべきだと考えていることなどを説明。

午後からは、中心部近くの Royal Institute of Technology (KTH) バイオテクノロジー研究所を訪れ Vincent Bulone 教授から主にセルロースにかかわる研究状況の説明を受けた。日本の研究者とも交流を持っており、国境を感じない研究内容であった。

夜は伝統的なレストランで料理、ビール、ワインとともに会話がはずんだ。短い滞在ではあったがストックホルムの旧市街は 30 年前とほとんど変わりがなく美しい街であった。スウェーデンは私にとって再度訪れたい国の最右翼である。

Swedish Biomimetics 3000

<http://www.swedishbiomimetics.com/index.htm>



## 12-1 バイオミメティクス研究会報告

独立行政法人産業技術総合研究所 浦田 千尋

- ・日時：平成24年11月2日(金) 17:00-19:00
- ・会場：北九州国際会議場 1F 11会議室
- ・主題：バイオミメティクス研究開発の国際動向と国際標準化
- ・講演タイトルおよび講演者

### 1. 米国陸軍におけるバイオミメティクス研究

講演者：宮田 隆夫（米国陸軍 研究開発司令部国際技術センター）

### 2. バイオミメティクスの国際標準化動向

講演者：阿多 誠文（産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門）

本研究会では、米国陸軍研究開発司令部国際技術センター太平洋地区(RDECOM ITC-PAC)に所属する宮田博士、および、産総研に所属する阿多博士にそれぞれ、米国陸軍のバイオミメティクスに関する研究動向、および、バイオミメティクスの国際標準化動向に関する講演を聴講した。

1 つめの講演は宮田博士による講演であり、講演内容は大きく 2 つのトピックに分かれており、RDECOM ITC-PAC の紹介、および、米国陸軍のバイオミメティクス関係の研究についてであった。聴講前は“米国陸軍”というイメージから、軍に関する技術、つまり、戦争に関与する技術を連想した。しかしながら、宮田博士の講演の聴講・質疑応答を経て、米国陸軍の研究開発が、必ずしも軍事技術に直結しないということが分かった。宮田博士が所属する RDECOM ITC-PAC は、アジア地域(インド以东のアジア全域および、オーストラリア、ニュージーランド)の技術調査を目的としており、実験を伴う研究は実施していない。また、日本の NEDO や JST のような側面もあり、日本の研究者に予算を配分することも業務の一つだという。その予算執行に関しては、飲食以外であれば自由に使用でき、しぼりが少ないことが特徴の一つである。さらに、成果物(特許や論文等)の帰属も研究者側にあり、学会発表前に事前の許可も必要がないと

いう。つまり、イメージとは異なり、非常に使い勝手の良い予算だという。しかしながら、国内では、“米国陸軍”というイメージのため、配分を受けている研究者・組織が限定的であるという。一方で、米国陸軍の研究資金援助を受けた研究者のうち 24 名がノーベル賞を受賞しており、日本では江崎玲於奈博士もその中の一人であるという。このことから、米国陸軍が関与する研究とはいえ、必ずしも、戦争と繋がるわけではなく、国を超えた枠組みで、基礎科学の発展に寄与しているということが伺えた。

次のトピックは、なぜ米国陸軍がバイオミメティクス研究を実施しているかであった。戦場という極限・特殊環境で使用を想定した技術を開発する場合、生物が持つ特異的な機能は参考になるためであるという。具体的には、サンドフィッシュ、クマバチやハチドリ等の小飛翔動物、ヤモリ、ガ等が研究対象にされており、これらの、皮膚構造や移動機構、センシング機構等の解明および応用開発が行われてきたという。米国では、これらの研究を推進するためにも、研究分野に応じて、米国内にいくつか研究拠点が存在している。特に、UCSB(University of California, Santa Barbara)内に存在する ICB (Institute for Collaboration Biotechnologies)は、主要研究拠点の一つであるという。ICB には、60 名の教授および 150 名の学生とポスドク、企業の研究者がバイオ関連の研究を実施しているという。実際に、ICB からは、多くの著名誌へ、バイオミメティクス関連の研究が報告されている。米国陸軍を管轄する米国国防総省が開発した技術の中には、GPS やインターネット等があり、これらの技術はもはや我々の生活に欠かせなくなっている。このような、バイオミメティクス関連の研究から、我々の生活を豊かにする技術が生まれることがわかり、今後の研究動向に注目していきたい。

2 つめの講演は、産総研 阿多博士による、バイオミメティクス研究の国際標準化に関する講演であった。阿多博士の講演では、バイオミメティクス研究の国際標準化に向けた海外の動向、そして、国内の動向について講演された。現在、バイオミメティクス研究は、サステナブル社会の実現、先進材料開発、付加価値の付与、宣伝等の目的により、世界各国で注目を集めているという。身近な例では、ハスの葉の凹凸表面を模倣した超はっ水材料やサメ肌を模倣した水着等が有名である。これらの例は、模倣対象と構造、効果が明確に関連づけられている。しかしながら、これらの関連性が殆どなく、こじつけに近いバイオミメティクス研究・材料・製品も少なくなく、玉石混淆の様相を呈してい

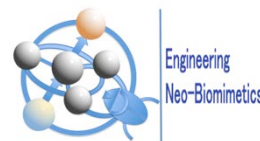
る。バイオミメティクスに関する“国際標準”が無いためこのような事態が起きているという。

このような状況を鑑み、バイオミメティクス関連の標準化は、ドイツがいち早く体制を整えている。ドイツ規格協会(DIN)は、2011年3月にはドイツ技術者協会と(VDI)と共催で、国際標準化に向けた事前イベント「ISO BIONIK」を開催しており、同年5月にはジュネーブの国際標準化機構(ISO)事務局に、技術委員会(TC)の新設を提案した。このような経緯の中、バイオミメティクスに関する国際標準化、ISO/TC266 Biomimetics がスタートし、今年(2012年)の10月に第1回目の本会議がベルリンのDINで開催された。もちろん、幹事国はドイツであるという。

このような潮流の中、日本は公益社団法人高分子学会のなかにバイオミメティクス研究会を設置し、ISO/TC266 Biomimetics の国内審議委員会を発足させ、新TCに対応しているという。阿多博士の講演を聞く前は、“バイオミメティクス”と“国際標準化”という言葉からは、研究の道しるべとなる基準・指標ができるだけという、のんきな考えを私は持っていた。しかしながら、国際標準化の策定に関与できるかどうかということは、日本の国際競争力に直結する戦略的課題であるという。これまで、クオリティマネジメントシステム(ISO9000 シリーズ)、環境マネジメントシステム(ISO14000 シリーズ)等、日本はこのような国際標準化動向に受け身であったため、何度も憂き目を見てきた。日本の経済停滞を打破するためにも、国際標準化の設立に積極的に対応・参加することが重要であるという。新技術の発見・開発の源流には研究者が存在する。その研究者自身が国際標準化の重要性を認識し、日本が有利となるように新技術を育てていくことも、日本が世界を牽引するためにも必要であると強く感じた講演であった。

本研究会での2つの講演は、バイオミメティクスの具体的な研究内容に関する講演ではなかったが、バイオミメティクス研究関連の世界的な潮流を知る、またとない機会であった。実験室に籠もるだけでなく、研究・政治的な国際的な動向を認識することの重要性を強く感じた研究会であった。

## 新聞・報道



## 【新聞・報道】

### 1) 2012年8月8日、日経新聞

(独) 物質・材料研究機構の細田奈麻絵グループリーダー (B01-3班) の研究が日経新聞で紹介されました。ハムシの水底歩行の仕組みを解明。この研究は水中で作業するロボットの開発に役立つ可能性があります。

### 2) 2012年9月21日、北海道新聞

北海道大の長谷山美紀教授(A01班)の研究室が北海道新聞で紹介されました。長谷山研究室では、札幌市内の地下歩行空間で通行人の気分を映像化する実験を実施する予定。服装や表情から好みの商品を自動的に探し出すシステムに応用できる可能性があります。

### 3) 2012年10月3日、日経BP Teach-On!

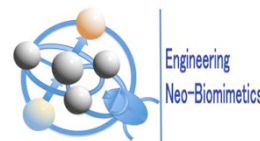
北海道大の長谷山美紀教授(A01班)の研究が日経BP Teach-On!で紹介されました。長谷山教授は、公開ワークショップ「生物多様性を規範とする革新的材料技術」で講演。技術革新の着想が得られる発想支援型データベース開発に着手したことを発表しました。

### 4) 2012年11月11日、NHK サイエンスZERO

東北大学大学院の石田秀輝教授(C01班)らがNHK サイエンスZEROに出演しました。トンボの飛翔能力、蚊の吸血メカニズムなどの応用研究を紹介し、バイオミメティクスについて解説しました。

### 5) 2012年11月15日、朝日新聞

神戸大の尾崎まみこ教授 (B01-4班)、小林碧博士の研究が朝日新聞で紹介されました。コロニーを作るアリが敵を認識する仕組みを解明。この研究は将来、外来種のアリを防除する研究につながる可能性があります。



## 【新聞・報道】

### 6) 2012年7月26日、日刊工業新聞

東北大学の下村政嗣教授（領域代表）、石田秀輝教授（C01班）の取り組みが日刊工業新聞で紹介されました。シンポジウム「生物多様性をもたらす持続可能性社会に向けて」において、講演およびパネルディスカッションを行い、生物多様性から持続可能な社会の実現に向けた課題、必要性を解説しました。

### 7) 2012年8月3日、静岡新聞

浜松医科大学の針山孝彦教授（B01-2班）の取り組みが、静岡新聞で紹介されました。高校生に先進的な科学技術を体験してもらう合宿プログラム「サマー・サイエンスキャンプ」が浜松医科大学で開催され、初日、針山教授が講義をし、プログラムの趣旨を説明しました。

### 8) 2012年8月21日、日刊工業新聞

東北大学の下村政嗣教授（領域代表）、石田秀輝教授（C01班）、古川柳蔵准教授(C01班)の講演内容が、日刊工業新聞で紹介されました。モノづくり日本会議が開催した「あたらしいモノづくりと暮らし方の潮流を創る-2030年のライフスタイルとバイオミメティクスとの融合を考えたビジネスシステムとは？-」において、石田教授、下村教授、古川准教授が、ネイチャーテクノロジーが新しいモノづくりに与える可能性について講演しました。

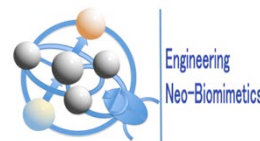
### 9) 2012年9月13日、読売新聞夕刊

森林総合研究所の高梨琢磨主任研究員(B01-4班)の研究が、読売新聞で紹介されました。松を振動させることにより、松枯れを防ぐ新しい方法を開発しました。

### 10) 2012年10月2日、日経BP Teach-On!

生物学と工学の融合を目指す「生物規範工学」の研究が科研費の助成でスタートすることが掲載されました。

## アウトリーチ活動活動報告



## 【アウトリーチ活動報告】

### 1) バイオミメティクス市民セミナー

C01班の石田秀輝先生がNHKサイエンスZERO「バイオミメティクス 生物が秘める超絶能力をいかせ！」にゲスト出演しました。

放送日時：2012年11月11日（日）23:30～0:00

NHKネットクラブ：

[http://pid.nhk.or.jp/pid04/ProgramIntro/Show.do?  
pkkey=001-20121111-35-09845](http://pid.nhk.or.jp/pid04/ProgramIntro/Show.do?pkkey=001-20121111-35-09845)

番組HP：<http://www.nhk.or.jp/zero/>

2) 日経CNBCおよびBSジャパン「38億年の英知を活かせ！“自然に学ぶものづくり”が未来を創る」で「生物規範工学」の研究活動が紹介されました。

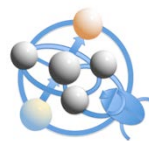
放送日時：日経CNBC 2012年11月23日（金・祝）12:00～12:30／2012年11月24日（土）13:35～14:05

BSジャパン 2012年11月25日（日）16:50～17:20／2012年12月01日（土）14:00～14:30

日経CNBC番組表：<http://www.nikkei-cnbc.co.jp/guide/>

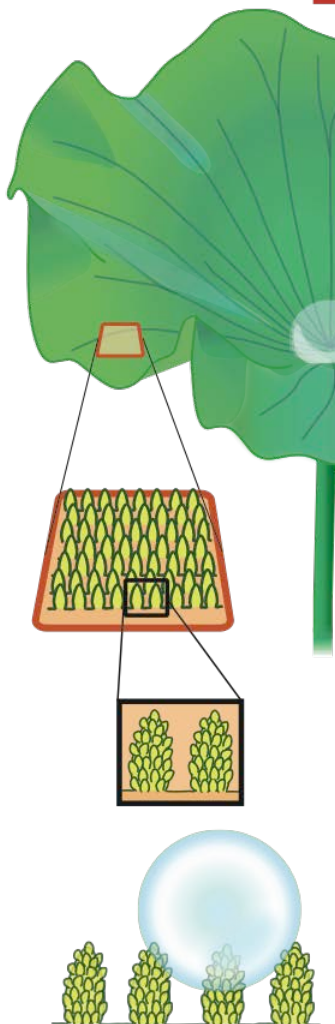
3) 兵庫県立人と自然の博物館 「ひとはく」 で2012年度パナソニック・バイオミミクリ賞が発表されました。

<http://www.hitohaku.jp/biodiv/result2012.html>



# BIOMIMETICS

## バイオミメティクス・市民セミナー



バイオミメティクス (Biomimetics) は、生物模倣技術と訳します。  
「カルの口を模倣した痛くない注射針」「サメの皮膚を模倣した水抵抗の少ない水着」「ヤモリの指先を模倣した粘着テープ」、さまざまな分野での新技術の応用と商品開発がなされています。

生物は、5億年の自然選択によって、人が頭で考えるデザインよりも優れたデザインを獲得しています。博物館には多くの生物標本が収蔵されていますが、標本を工学者の設計デザインの視点から見直すとうなるでしょう。生物学者では解けなかった自然の造形美の意味が解き明かされるかもしれません。そして生物のデザインからアイディアを得て新しい技術が生まれるかもしれません。

動植物の持つ能力や形・機能などの特性を把握し、そこからヒントを得て人工的に設計・合成・製造するのが「生物規範工学」です。

生物学と工学と博物館を結ぶ、**バイオミメティクス市民セミナー**では、生物学者と工学者が、新しい視点で生物の見方を紹介します。

会 場：北海道大学総合博物館／知の交流コーナー  
時 間：午後1時30分から午後3時30分

### セミナー8：2012年8月4日(土)

井須紀文 (株) LIXIL 水まわり総合技術研究所 IBA 推進室 室長  
「カタツムリと住宅材料」

### セミナー9：2012年9月1日(土)

堀 繁久 (北海道開拓記念館 学芸第一課長)  
「北海道の昆虫多様性とバイオミメティクス」

### セミナー10：2012年10月6日(土)

広瀬治子 (帝人 (株) 構造解析研究所 研究課長)  
「繊維とバイオミメティクス」

### セミナー11：2012年11月3日(土)：文化の日

森 直樹 (京都大学農学研究科 准教授)  
「農業とエントモミメティクス、バイオミメティクス」

### セミナー12：2012年12月1日(土)

長谷山美紀 (北海道大学大学院 情報科学研究科 教授)  
「生物画像から工学的「きづき」を生み出す新しいデータベース」

### セミナー13：2013年1月13日(日)

龔 剣萍 (グン チェンピン) (北海道大学先端生命科学研究院 教授)  
「ゲルとバイオミメティクス」

### セミナー14：2013年2月2日(土)

石田秀輝 (東北大学環境科学研究科 教授)  
「ネイチャー・テクノロジーと持続可能性社会」

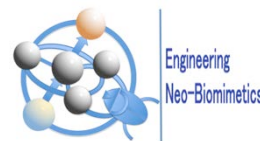
### セミナー15：2013年3月2日(土)

妹尾壁一郎 (東大)、阿多誠文 (産総研)、古田ゆかり (北大)、ほか (予定)  
「バイオミメティクスの社会受容とサイエンス・コミュニケーション」  
シンポジウム

※会場が変わります。詳細は別途ご案内します。

主 催：北海道大学総合博物館  
協 賛：高分子学会バイオミメティクス研究会  
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-jimu@museum.hokudai.ac.jp

## 各種案内



## 【各種案内】

### 1) 科学研究費新学術領域「生物規範工学」全体会議

日時：2013年3月1日（金）13:00～18:00

場所：北海道大学学術交流会館 第1会議室

### 2) 科学研究費新学術領域「生物規範工学」公開講演会

日時：2013年3月2日（土）10:00～12:30

場所：北海道大学学術交流会館 第1会議室

### 3) 北大総合博物館バイオミメティクス市民セミナー・科学研究費新学術領域「生物規範工学」共催公開講演会

日時：2013年3月2日（土）13:30～15:50

場所：北海道大学学術交流会館 第1会議室

### 4) 日本化学会第93春季年会(2013) アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP)

T2. 新材料開発最前線

C. 自己組織化技術、融合マテリアルが支えるバイオミメティクス研究の最前線

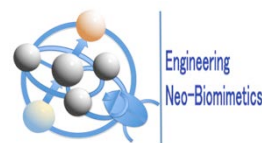
日時：2013年3月22日(金)～25日(月)

場所：立命館大学びわこ・くさつキャンパス ※第93春季年会(2013)会場内

概要：バイオミメティクスの現代的な意義は、生物の階層的な構造による機能発現がもたらすパラダイムシフトと、「自己組織化」を含むモノづくりプロセスの革新による持続可能性への寄与です。そして、現代的な課題は、分子-材料-機械へとナノからマクロにいたる階層を繋ぐことであり、そこに世界の新潮流があります。バイオミメティクスに軸足を置きながら、有機と無機の融合、ナノテクノロジーと生物学の連携、材料科学と機械工学の融合、情報科学や環境科学からの視点、などに着目し、異分野連携、産学連携まで議論の輪を広げていきます。

# 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.1 No.2

発行日 2012年12月10日

発行責任者 下村政嗣（東北大学）

編集責任者 穂積 篤（独立行政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 生体分子デバイス研究分野  
研究室内

〒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>