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

ニュースレター　Vol. 3　No. 2

生物規範工学

Engineering Neo-Biomimetics

文部科学省　科学研究費　新学術領域

「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

CONTENTS

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

****

1)巻頭言

・Study nature, not books

総括班　評価グループ　下澤　楯夫（北海道大学　名誉教授）……………………………………………8

2) 評価委員からのメッセージ

・生体規範工学—プロジェクト後半に向けてー

総括班　評価グループ　国武　豊喜　(九州大学名誉教授、(財)北九州産業学術推進機構理事長) …14

3)研究紹介

【１１月２７日（木）】科学研究費「生物規範工学」全体会議

・プログラム………………………………………………………………………………………………………17

要旨集

・A01-1班：バイオミメティクス・データベース構築

Part A01-1: Database Building for Biomimetics

A01-1班　野村　周平　(国立科学博物館動物研究部)……………………………………………………19

・生物規範表面機能デザイン：可変凹凸構造による防汚表面へのアプローチ

Biomimetic design of surface functions

B01-1班　大園　拓哉　(産業技術総合研究所)……………………………………………………………21

Engineering Neo-Biomimetics

・オパール結晶薄膜塗工による擬倣タマムシの構造色
Structural color of biomimetic jewel beetle coated with opal crystal films
B01-2班　不動寺 浩（物質・材料研究機構）……23

・昆虫複眼レンズ表面のニップル構造の形成機構
Formation of corneal nipples in insects
B01-2班　木村 賢一（北海道教育大学）……25

・生物規範階層ダイナミクス
Dynamics of biomimetic hierarchy structure
B01-3班　細田 奈麻絵（物質・材料研究機構）……27

・生物規範環境応答・制御システム
Biomimetics of Insect Subcellular Systems
B01-4班　森 直樹（京都大学）……29

・生物規範メカニクシステム：細胞ミクロメカニクスから生物飛行マクロメカニクスまで
Bioinspired Mechanical System: From Cell Micromehcanics to Bioflight Macromechanics
B01-5班　木戸秋 悟（九州大学）……31

・PENが担うバイオミメティクスのテクノロジーガバナンス
Technology Governance in the Biomimetic Field supported by PEN
C01班　阿多 誠文（産業技術総合研究所）……33

・パイ共役系高分子の分子ダイナミクスを用いた生体模倣型信号処理デバイス
Bioinspired Signal Processing Device Using Molecular Dynamics in π-Conjugated Polymers
公募班　浅川 直紀（群馬大学）……35

・材料科学からアプローチするバイオクレプティックス
Biokleptics with Materials Science Approach
公募班　出口 茂（海洋研究開発機構）……37

【１１月２８日（金）】「生物規範工学」・海洋研究開発機構合同講演会

・プログラム……40

・生物系と人工系のはざまに挑む
Bridging the Gap between the Biologican and Artificial Systems
相澤 益男（科学技術振興機構）……41

・機械屋としてみた植物内における流れ
The flow in a plant from an engineering point of view
望月 修（東洋大学）……42

・水棲無脊椎動物におけるニップルアレイの構造と機能
Nipple Arrays on the Body Surface in Aquatic Invertebrates: Structures and Potential Functions
広瀬 裕一（琉球大学）……46

・海綿動物の多様な構造と機能
Diverse structures and multiple functions of sponge morphology
椿 玲未（海洋研究開発機構）……50

・アイドルは外見だけじゃない：アイドル生物スケーリーフットの秘められた魅力
Cute appearance but great scientific and application potential of scaly foot gastropods
高井 研（海洋研究開発機構）……53

・フジツボ類の多彩な着生場所選択性
Various variations of settlement selectivity of barnacles
野方 靖行（電力中央研究所）……………………………………………………………………59

・自己組織化を利用した生物模倣階層構造の作製と表面摩擦の測定
Fabrications of biomimetic hierarchical structures and surface friction measurements
平井 悠司（千歳科学技術大学）………………………………………………………………61

４）トピックス (PENより)

・フランスにおけるバイオミメティクス
帝人株式会社　平坂雅男　………………………………………………………………………65

・生物の不思議を工学に移転する技術　ーバイオTRIZ という技法ー
新潟大学工学部　　　山内健
大阪大学基礎工学部　小林秀敏　……………………………………………………………70

・ハイブリッド材料創製のツールとしての接合技術
独立法人物質・材料研究機構　主任研究員　重藤暁津　………………………………76

5）国内外研究動向紹介

・Conference Report: IUMRS-ICA
B01-3班：独立行政法人産業技術総合研究所　穂積　篤、Gary Dunderdale……………………………82

・第63回高分子討論会「生物模倣による新規機能制材料・次世代型プロセスの創成」に参加して
B01-2班：大阪大学　吉岡伸也……………………………………………………………………………86
C01班：新潟大学工学部　山内　健………………………………………………………………………90

・TECHBizEXPO 2014に参加して
B01-3班：独立行政法人産業技術総合研究所　浦田千尋、穂積　篤………………………………………100

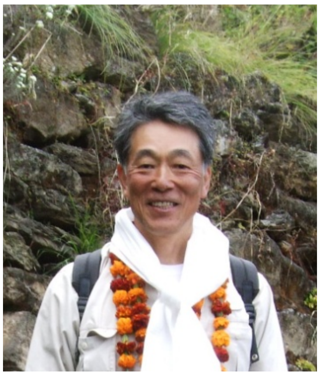
・3rd Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS)に参加して
B01-3班：名古屋工業大学　前田浩孝………………………………………………………………………106

・成形加工シンポジア'14　プラスチック成形加工学会第22回秋季大会　飛翔のトキ ~日本から世界に羽ばたく成形加工~ に参加して
B01-1班：千歳科学技術大学　平井 悠司……………………………………………………………………112

6）新聞・報道 ……………………………………………………………………………………………115
7）アウトリーチ活動………………………………………………………………………………………120
8）各種案内…………………………………………………………………………………………………123

（１）巻頭言

Study nature, not books



総括班　評価グループ
下澤　楯夫（北海道大学名誉教授）

中間評価で厳しい裁定を受けた。要約すると、『新学術領域としての成果が出ていない。様々な研究成果を出してはいるが個別の研究活動の加算和に過ぎず、領域内での工学と生物学の協働作業（相互作用）で生み出した成果は少ない。これでは基盤研究Ａが７つ併走しているのと同じことで、新学術領域を組んでいる意味がない。新学術領域には、内部での相互作用によって新奇な研究活動（加算和＋アルファ）を生み出すことが期待されている。相互作用を作り出せる体制に組み替えて、３年目の再審査を受けよ。』と言われたのである。

組み替えた班構成で走る残りの２年では、工学者は足繁く生物学者を訪ねて生物に触れて測り、生物学者も自ら工学者の技術に触れて、積極的に相互作用を生み出さねばならない。社会から付託された異分野連携（相互作用）とは、研究者集団の単なる併走状態（ヤッタフリ連携）ではなく、二人三脚（運命共同体）を構成することである。縛ってしまった二人の脚を前に進めるには、自らが相手に合わせるしかないのだから。

さて、話は跳ぶ。昨年「ピダハン」（ダニエル・エヴェレット著、屋代通子訳、みすず書房）という本を読んだ。最近、NHK E テレの地球ドラマチックでも「ピ

ダハン：謎の言語を操るアマゾンの民」が放送されたから、ご覧になった方もいるだろう。

　西欧文明との接触が殆んどないピダハンと呼ばれるアマゾン原住民にキリスト教を伝道するべく、現地に住み込んで、伝道に必要なピダハン語の習得と記録・解析を進めたエヴェレット氏は、とんでもないことを発見するに至った。それは、ピダハン語にはリカージョン（recursion、再帰）がないことである。つまり、「斉藤さんが新しい論文を出したと佐藤さんが言っているのを加藤さんが聞いた。」という伝聞表現（入れ子状の間接話法）がない。ピダハンの人々は、自分で直接体験したことしか他人に伝えない。伝聞（又聞き）は話さない。他人から聞いたことを別の他人に伝える語法を持たない。伝聞との比較がないから、自分の過去を悔いたり未来を心配したりすることもなく、現在のみを生きている。ピダハンの人々に、伝道者すら会ったことも声を聞いたこともない遠い過去の人が言ったという聖書の記述を説く努力は、徒労に終わった。現在のみを生きているピダハンと暮らしたエヴェレット氏は、ついに伝道を捨て、無神論者となってピダハン語の言語構造についての論文を出すに至る（筆者の上の記述も全て伝聞であることに注意されたい）。

　現代言語学の権威ノーム・チョムスキーの普遍文法（生成文法）説によれば、リカージョンはヒト言語の基本構造の一つであり、地球上のあらゆる言語はリカージョンを持つとされている。普遍文法説は、ヒトの言語はゲノムに依拠した本能であり、言語が異なってもその基層には生物学的に生成される普遍文法構造があると説く。チョムスキーはアメリカ合衆国政府にさえ公然と楯突く批判精神の持ち主として知られている。しかし、ピダハン語にはリカージョンが

無いとするエヴェレット氏の論文はチョムスキーをひどく不愉快にさせたようで、「そんなことは有り得ない。エベレットは間違っている。」と切り捨てに掛かっている。こんな大家でも、権威主義に陥る危険はあるのだ。リカージョンの有無については、MIT の研究チームがピダハンの人々の話し言葉の録音テープから文法構造を割り出すコンピュータシステムを開発し、解析を続けている。今のところ、リカージョンは発見されていない。

話はさらに跳ぶ。46 年前、工学部電子工学科の博士課程を中途退学して理学部動物学教室で神経生理学研究の真似事を始めた頃、幾度となく“Study nature, not books”と諭された。通信工学系の言葉で神経系を語ろうとする「頭でっかち」の筆者へ、せっかく生物に触れているのだから生物そのものを体験して欲しいとの、生物の先生方からの教えであった。これはルイ・アガシー（Louis Agassiz、古生物学者、Charles Darwin の進化論に強く反対したことでも有名）の言葉だそうだ。自然科学としては当たり前過ぎるほど当たり前のことに聞こえる。しかし、上に述べたピダハン語の特徴と考え合わせると、少し別のことに思い至る。

現在の科学は非常に多くの伝聞（間接体験＝books）で成り立っており、我々はこれを当然のことと思っている。一方、個別の研究作業（study）の根幹は、研究者個人が（nature を）直接体験することである。直接体験で引き起こされる心理的感動（の記憶）が、困難な検証作業を乗り越えるための原動力ともなっている。我々が今棲んでいる科学の世界は、伝聞（間接体験）無しでは成り立たないように見える。では、ピダハンの人々に「科学」は存在しないのだろうか？そんなことは無い。エヴェレット氏の著述（これも筆者にとっては間接

体験だが）によれば、ピダハンの人々は人間集団として一定の文化を継承しているし、自分たちを取り囲んでいる自然の性質や構造をかなり正確に理解している（だから集団として存続している）。エヴェレット氏の本の原題は Don't sleep, there are snakes である。これは、直接体験のみに基づいてピダハンの人々がエヴェレット氏へ与えた極めて論理的な忠告文の英訳である。伝聞が許されなくとも、個人の内での複数の直接体験の集積も集団内の複数の人の直接体験の共有（集積）も起こる。集積した直接体験からの帰納によって、科学（否定可能性を持った自然の合理的理解や法則化）も起こり、その法則からの演繹も可能であろう。即ち、ピダハン語を話す人々は我々のそれとは異なるかも知れないが、明らかに科学を持っている。

そうすると、圧倒的に多くの伝聞に頼ってしまっている我々の科学とは一体何なのか？という疑問に突き当たる。現時点では、この疑問への明確な答えは筆者自身も出せてはいない。全く伝聞（間接体験）のない科学を想像することは難しい。しかし、伝聞のみで作り上げられた科学が極めて危ういことも、昨今世間を騒がせている科学（論文捏造）事件の数々からも明らかである。

ここで、中間評価の話に戻る。生物学と工学の連携と融合は、社会から強く望まれているにも拘らず、なかなか進まないのが我が国の実情である。それが「縦流れ」のみを善とし横流れを厭う日本の社会風土に起因するのではないか？という筆者の疑問はニュースレターVo.1 No.2 に書いた。中間評価では、「理由はどうあれ、この新学術領域を組んだ当事者には生物学と工学の融合へ向けた具体的な連携作業が要求されているのに、この 2 年半でなされた作業は少なすぎる」、と判定されたのである。

我々の世界には、工学の基盤に関する膨大な教科書・解説書（books）があり、生物学の学問体系を伝える books も膨大な量に上る。しかし、科学の諸分野はそのどれをとっても著しく分業化しており、一体としての自然から大きく偏っている。生物学者と工学者は、互いに自然の異なる部分しか見ていない。一方、伝聞表現を持たないピダハンの人々は、健全な科学（一体としての自然そのものの理解）を作り出せている（世代を越えて伝承できるかどうかは別として）。今の我々の科学がその対極にあるのは、際限なく伝聞知識に頼ってしまい、直接体験を殆んど欠いているからではないだろうか？理解したいと願う対象そのもの（nature）を直接体験することなく、間接体験（books、知識、法則）からの演繹で済ませているせいではないだろうか？

生物学と工学という知識基盤（books）が異なる分野の研究者が、books（間接体験）に頼って「融合」を唱えても、上手く行かないだろう。Books を更に積み上げても、分業が進むだけで、偏りを是正する力は生じない。異分野の連携や融合を目指すなら、それぞれが対象としている自然（nature）の直接体験を共有すべきだと思う。本領域のこれからの 2 年間は、工学者は足繁く生物学者を訪ねて生物に触って測り、生物学者も足繁く工学者を訪ねて工学技術に触れ、互いが対象とする nature の直接体験の共有に努めて欲しい。異分野の nature を直接体験した感動からは、必ずや何か新たな世界像が湧き上がって来るに違いない。

（２）評価委員からのメッセージ

生体規範工学
―プロジェクト後半に向けて―

総括班　評価グループ
國武豊喜（九州大学名誉教授、(財)北九州産業学術推進機構理事長）

２０１１年に新学術領域の一つとしてスタートした生体規範工学のプロジェクトも折り返し点を過ぎたことになる。いよいよ成果が問われる時期となった。総括班の一員としての感想を述べたい。

プロジェクト前半の活動は全体的に極めて活発であった。本プロジェクトが幅広い視点で実施されていることを踏まえ、活動が多岐にわたっていたというべきであろう。これは、我が国のこの分野の活動が、欧米を中心とした産業化まで睨んだ素早い動きに取り残されそうだ、との危機感に背中を押されたとの事情もある。我が国でもバイオミメティクスに対する関心は再び高まり、自然の不思議や新しい産業技術へのヒントを与えるものとして、TV 番組にも頻繁に取り上げられるようになった。ただ残念ながら、我が国でのこれら関心の高まりが横断的な研究分野を生み出した例は見当たらないようであり、個別の領域の中でのバイオミメティクスの活用に留まっている。

このような我が国での状況へのアンチテーゼが本領域の特徴である。すなわち、生物のナノ形態のデータベース化と画像検索手法、ISO 委員会への提案、ライフスタイルへの意味付け、など、生体の特徴的な形態や機能を横断的に捉え、それを工学的に活用するための方法論を生み出そうとしている。この意欲

的なアプローチは、それがあまりに広範な領域に及ぶために、多くの新学術領域研究が目指す比較的フォーカスされた新領域の範疇からはみだしている。そのため、理解や評価の難しさが、ネガティブな見方をもたらす心配がある。これを避けるには、簡素でメリハリの効いた説明が必要となる。今後の活動に当たってぜひ心がけでもらいたい点である。本領域のコンセプトを支える個々の技術的成果が全体像の中でどのような位置を占めるか、明確な表現が必要であろう。

バイオミメティクスすなわち生体規範工学が、これからの産業技術の発展に対し大きな影響を及ぼすであろうことは確実である。何故なら、人類やその活動が地球上に溢れこぼれそうな時代にあって、生物進化の過程で得られた膨大な知識や知恵を活用して人類の活動の無駄な部分を徹底的に削減することが求められているからである。

これが、ダックアウトの奥にいてホームランを打ってくれとドキドキしながらプレーを見守っている人間の正直な気持ちである。

（３）研究紹介
【１１月２７日（木）】科学研究費
「生物規範工学」全体会議

会議名：科学研究費「生物規範工学」全体会議・海洋研究開発機構合同講演会
会場：沖縄産業支援センター、国際海洋環境情報センター（GODAC）
日時：２０１４年１１月２７日（木）～２８日（金）
主催：科学研究費「生物規範工学」、海洋研究開発機構

【１１月２７日（木）】科学研究費「生物規範工学」全体会議
会場：沖縄産業支援センター会議室（102 号室）　(沖縄県那覇市字小禄 1831 番地 1)
<http://www.okinawa-sangyoushien.co.jp>

10:00~10:10　開会挨拶　領域代表　下村 政嗣
各計画研究班の進捗報告ならびに今後の研究計画について
10:10~10:40　A01 班　生物規範基盤
　野村 周平 先生（国立科学博物館）
10:40~11:10　B01-1 班　生物規範界面デザイン
　大園 拓哉 先生（産業技術総合研究所）
11:10~11:40　B01-2 班　生物規範機能構造・形成プロセス
　不動寺 浩 先生（物質・材料研究機構）
　木村 賢一 先生（北海道教育大学）
11:40~12:10　B01-3 班　生物規範階層ダイナミクス
　細田 奈麻絵 先生（物質・材料研究機構）
12:10~13:10　昼食
13:10~13:40　B01-4 班　生物規範環境応答・制御システム
　森 直樹 先生（京都大学）
13:40~14:10　B01-5 班　生物規範メカニクス・システム
　木戸秋 悟 先生（九州大学）
14:10~14:40　C01 班　生物規範社会学
　阿多 誠文 先生（産業技術総合研究所）
14:40~15:00　休憩
15:00~15:20　学術調査官から中間評価に関する説明
15:20~15:50　総括班ならびに領域全体の今後の研究計画について
　下村 政嗣 先生（千歳科学技術大学）
15:50~16:10　公募班の研究成果　その１

浅川 直紀 先生（群馬大学）

16:10~16:30　公募班の研究成果　その２

出口 茂 先生（海洋研究開発機構）

16:30~17:00　総括班評価グループからのコメントならびに総合討論

17:00~17:15　総評

相澤 益男 先生（科学技術振興機構）

18:00~20:00　班長・評価委員　合同会議（会場は別途案内）

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

A01-1 班：バイオミメティクス・データベース構築

Part A01-1: Database Building for Biomimetics

1. A01-1 班 2012-2014 年度の研究成果

本計画研究班では、作業内容により、生物系 3 小班と情報系 2 小班とに分けて、効率的な協働作業を推進している。生物系 3 小班は昆虫・鳥類・魚類のデータ作成を担当し、平成 25 年度末までにすでに総数約 12,000 件を超える画像データを蓄積し、テキストデータの整備にも努めている。このほか領域内他班と連携した人材育成・普及啓発活動にも取り組んだ。情報系で類似画像検索を担当する長谷山小班では、発想支援型検索に基づく「バイオミメティクス・データ検索基盤」の試作システムを実装し（図１）、現在までに、昆虫・鳥類・魚類の SEM 画像データの検索を可能とした。このような、画像の類似性による画像検索により、生物学研究者が保有する画像を、工学者が検索できるようになった。同じく情報系でオントロジーを担当する溝口小班は、生物学と工学の専門用語の関係性の整理に取り組んでおり、２つのアプローチによるオントロジーの自動構築技術を開発した。

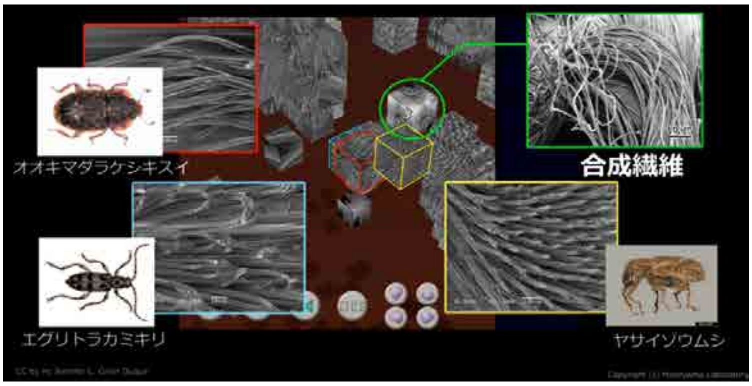


Fig. 1 A sample of search by the biomimetic data platform including SEM image of an artificial fiber mixed with SEM images of insect microstructures.

2. 2015-2016 年度に向けての取り組み

工学研究者が生物学データから材料開発の発想を得るための「バイオミメティクス・データ検索基盤」の検討を開始する。B01 班のこれまでの成果と密接に関連づけ、工学に有用な生物多様性情報を厳選して、博物館に所蔵される膨大な生物標本コレクションの中から抽出する。データ収集活動は以下の２点に絞り込む。(1) 昆虫の分野では、B01-2 班の研究内容とかかわりの深い「モスアイ構造」と「構造色」を生み出すサブセルラー・サイズ構造を、集中的に抽出する。 (2) 魚類の SEM 画像により、B01-1 班とすでに連携を進めている「防汚」機能を備える表面構造と摩擦や滑りなど「トライボロジー」の機能を生み出す構造を集中的に観察する。また、バイオミメティクス・データ検索基盤の検討については、上の(1), (2)に示した分野に集中して行い、具体的な発想の創出例を示す。また、検索基盤の利用については、上の２班に限定せず、領域内の B01 班、C01 班が利用できるようなセキュリティ管理を行い、班間連携に寄与する。生物系で作成したテキストデータは、自然言語処理や Web 情報処理技術を利用することで、より効率的なオントロジーの大規模化を実現する。また、オントロジー技術と C01 班の研究との連携により、社会科学的視点からの検索機能を開発する。

本研究の成果を社会・国民に発信する方法として、国立科学博物館における企画展を 2016 年度に開催する。さらに工学系の研究者との共同で、一般向けの普及啓蒙書の出版計画をすすめている。

3. SEM 画像データの高度化を図る

当計画研究班で昆虫のデータ作成を担当している野村小班では、B01-2 班で開発されたナノスーツ法を応用し、これまでＳＥＭ観察、写真撮影が困難であった、生体や軟弱な昆虫表面のＳＥＭ写真撮影を試みている（図２）。さらに、千歳科学技術大学のナノテクノロジ-支援事業を利用し、同大学の機体を使って、高倍率、高解像度の FE-SEM による画像データの作成に努めている。このような試みを通じて、新たな工学的発想を可能にするＳＥＭ画像データの高度化を実現できると考えている。

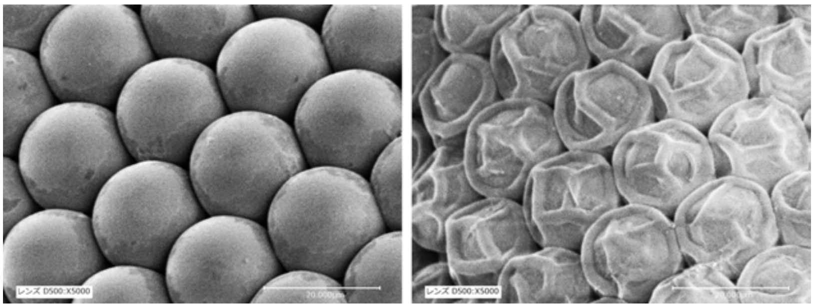


Fig.2 SEM photos of the surface of compound eye of a mosquito, *Aedes albopictus*; left –photo by nano-suits method; right –photo by dried sample.

所属班：B01-1班
所属機関：産業技術総合研究所
氏名：大園　拓哉
所属機関住所：〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1
e-mail：ohzono-takuya@aist.go.jp
研究キーワード：自己組織化リンクル、トライボロジー、液体

生物規範表面機能デザイン：可変凹凸構造による防汚表面へのアプローチ

Biomimetic design of surface functions

1．はじめに

B01-1 班では、サメ肌や魚鱗など、生物表面の凹凸構造のモデルとして、自己組織化によって形成する微細構造、特に、表面座屈により形成する周期的なリンクル(しわ)構造に着目し、その表面構造と海洋付着生物等の接着性を調査することで、生物表面における防汚機能のメカニズムを解明し、微細構造による防汚機能を発現する抗付着性機能表面の開発を目指す。また接着を究極の高摩擦状態という新しい視点で捉え、生物表面のトライボロジー特性と接着性の関係を総括的に解明、微細構造を利用した新規機能性材料の作製も目指している。

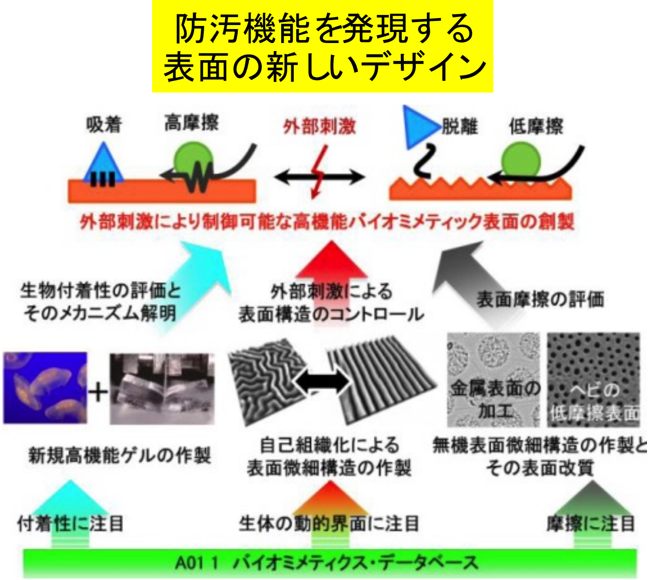


Fig.1 Research strategy of B01-1 team

２．これまでの進捗状況

これまでの研究においては、自己組織化微細構造をゲル等の生体類似ソフトマテリアルを用いて作製することで、動的に表面構造を変形させることが可能な新規材料を作製してきた[1,2]。また、その材料のトライボロジー評価によって、摩擦を制御する新規手法等を提案している[3,4]。さらに、生物の界面機能である低抵抗性や防汚性を学ぶために魚類等のサンプル採集および表面構造の観察、評価を開始している。さらに、リンクルの溝に構造化された液晶による気体状キラル分子の高感度検出（脊椎動物臭覚系の粘膜構造による気体分子捕集能に学ぶ）等の新規機能材料創出をもたらす、その他派生的

成果も得られている[5]。

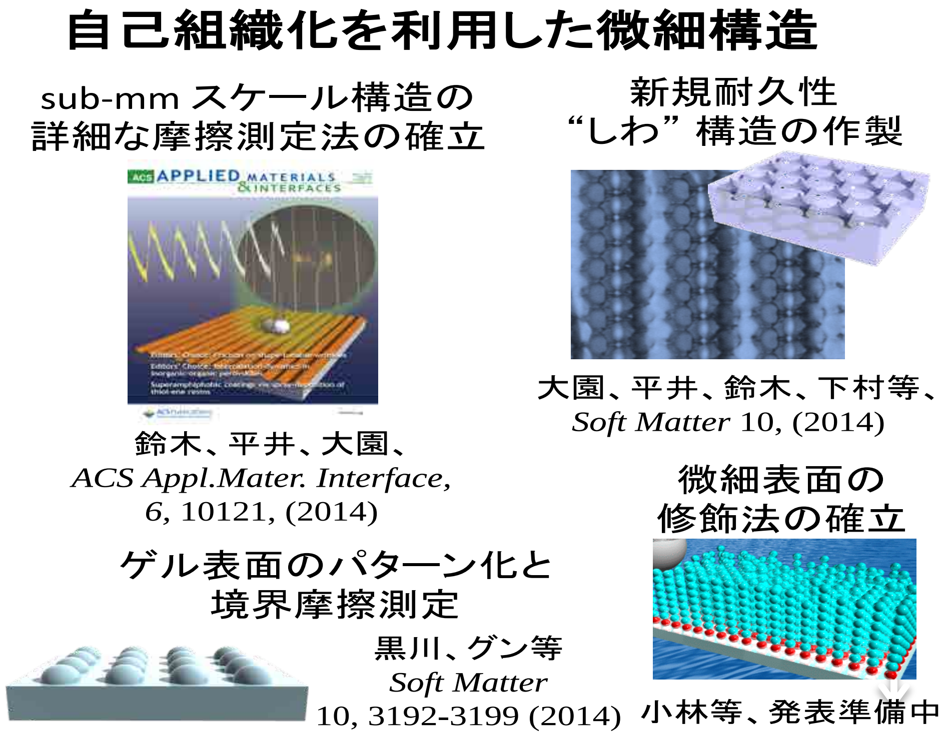


Fig.2 Research highlights of B01-1 team

３. 今後の計画

自己組織化を利用した微細構造作製に関するこれまでに得られた知見をもとに、生物学的な視点をより積極的に取り入れ、機能性表面の作製を目指す。例えば、遊泳に伴って動く魚鱗や波によって揺らぐ海藻類等、動的に変化している生物表面への海洋生物の付着等に着目し、表面微細構造が動的に変化する材料表面での海洋付着生物の接着性の関係を見いだし、付着のメカニズムを明らかにする。また微細構造表面を、生体分泌物を模倣した合成高分子によって化学修飾することで、更なる高機能化を図り、新規抗付着性機能表面を創出する。さらに、他の班との連携も強化してゆく。

(1) *Ohzono, T.; Suzuki, K.; Yamaguchi, T.; Fukuda, N. *Adv. Opt. Mater.*,**2013** *1*, 374-380.

(2) *Ohzono, T.; Hirai, Y.; Suzuki, K.; Shimomura, M.; Uchida, N. *Soft Matter*, **2014** *10*, 7165-7169.

(3) Yashima, S.; Takase, N.; *Kurokawa, T.; *Gong, J. P. *Soft Matter*, **2014** *10*, 3192-3199.

(4) *Suzuki, K.; Hirai, Y.; *Ohzono, T. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014** *6*, 10121−10131.

(5) *Ohzono, T.; Yamamoto, T.; Fukuda, J. *Nat. Commun.* **2014** *5*, 3735.

謝辞

本研究成果は、B01-1 班およびその他共同研究者との研究実施に基づきここに感謝する。

所属班：B01-2班
所属機関：独立行政法人物質・材料研究機構
氏名：不動寺　浩
所属機関住所：〒305-0047　茨城県つくば市千現１－２－１
e-mail：FUDOUZI.Hiroshi@nims.go.jp

研究キーワード：タマムシ、構造色、レプリカ、オパール薄膜

オパール結晶薄膜塗工による摸倣タマムシの構造色

Structural color of biomimetic jewel beetle coated with opal crystal films

1．はじめに

我々は、生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスの開発を研究目標の一つとしている。今回は、生物表面のレプリカ表面に自己組織プロセスで作製した模倣タマムシの構造色の解析、および、模倣タマムシを使ったフィールド試験の結果、さらに、タマムシの成虫脱皮過程の観察により得られた形態形成の自己組織化についての議論及びその模倣プロセスの方法などについても報告する。

２．模倣タマムシの構造色制御

ミドリフトタマムシの表皮を規範とし、転写したレプリカ表面にオパール結晶薄膜を塗工することで構造色を発色する。この構造色はオパール結晶を構成するコロイド粒子の粒子径、粒子間の間隔によって Fig.1 に示すよう紫色から赤色まで多様な発色が可能であった。反射分光スペクトルで計測した回折ピークをミドリフトタマムシのピーク波長（565nm）に近づけることで、肉眼ではオリジナルと模倣の区別がつかない構造色を

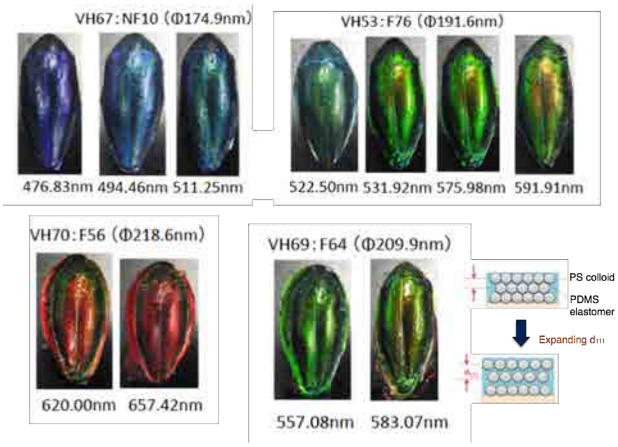


Fig.1 A wide variety structural color of biomimetic jewel beetles. The structural color is tunable by the colloid sphere size and the interspacing of colloid array, d_{111}. Here PS is Polystyrene and PDMS is Polydimethylsiloxane.

再現することができた。８月上旬に浜

松医大のキャンパス内において模倣タマムシを使った野生のヤマトタマムシ（緑色での波長ピークは 544nm）に対する行動実験を行った。ヤマトタマムシが模倣タマムシの構造色を認識し、ホバリングしながら旋回行動を行った後に模倣タマムシに着地することが確認された。

３．タマムシ及び模倣タマムシ光学特性評価

ミドリフトタマムシ及び模倣タマムシの反射スペクトルの角度依存性について光学計測（θ-２θ）を行った（Fig. 2）。A に示すように光学系を配置し、鞘翅における反射スペクトルを測定した結果が、B（ミドリフトタマムシ）と C（オパール（模倣タマムシ））である。またそれらの結果から、回折ピークの角度依存性をまとめたものをＤに示す。回折ピークの半値幅は、ミドリフトタマムシの方がオパール（模倣タマムシ）より広い（B，C）が、両者の角度依存性はよく一致していた（D）。

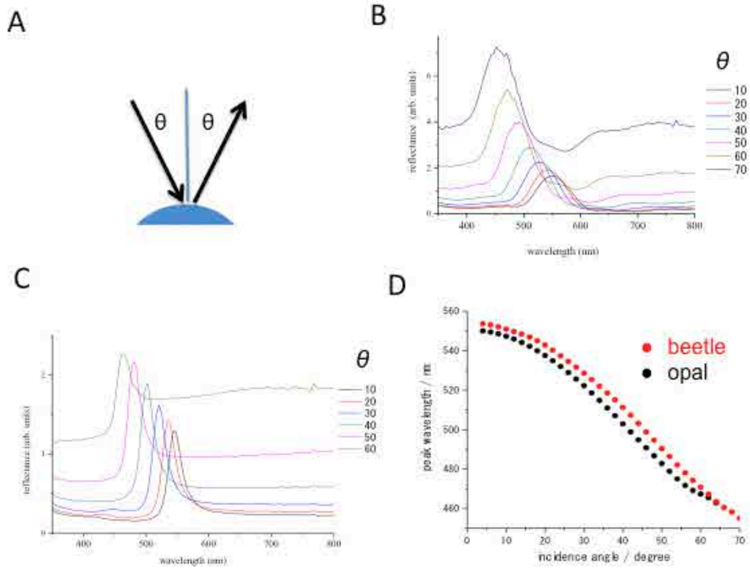


Fig.2
Reflection spectrometric analysis. A: Setup of measurement, B: Original jewel beetle, C: Opal (Biomimetic jewel beetle) and D: Diffraction peak as a function of tilting angle.

４．タマムシの形態形成の自己組織化

これまで人類が工業化に成功している自己組織化プロセスは限られている。B01-2 班ではより多様なプロセスの開発も目指し、現在、ショウジョウバエ複眼のニップル構造の形成過程やタマムシ鞘翅の成虫脱皮過程に注目し、クチクラの多層膜構造と構造色の自己組織化現象を規範とした新規の自己組織化プロセスの探索を行っている。その研究の中で生物の構造形成ではある程度の乱れ（乱雑さ）が生じることを避けることはできないが、機能としてこの乱れは許容されていることを発見した。生物規範により Robustness を有する革新的なプロセスの実現を目指している。

所属班：B01-2班
所属機関：北海道教育大学教育学部札幌校生物研究室
氏名：木村　賢一
所属機関住所：〒002-8502
札幌市北区あいの里5条3丁目1
e-mail：kimura.kenichi@s.hokkyodai.ac.jp

研究キーワード：モスアイ，ニップル，レンズ，クチクラ，ショウジョウバエ

昆虫複眼レンズ表面のニップル構造の形成機構

Formation of corneal nipples in insects

1．はじめに

“モスアイ構造”は、昆虫の網膜レンズ表面に見られる微小なナノニップル構造であり、クチクラで形成されている。このサブセルラー・サイズの構造は光の反射を防ぐだけでなく、高い撥水性を示すとともに、汚れが付きにくいセルフクリーニングの特性（防汚性）もあり、また昆虫などに対しての滑落性といった多機能性を有する。この構造を模倣した“モスアイフィルム”は、バイオミメティック素材の一つとして注目されている。生物は、どのようにしてこの“モスアイ構造”を形成しているのだろうか。これらクチクラ表面サブセルラー・サイズ構造の形成メカニズムを明らかにすることで、生物の自己組織化現象を理解し、工学的製造プロセスに模倣するという今後のバイオミメティクス展開を目指して研究を推進している。

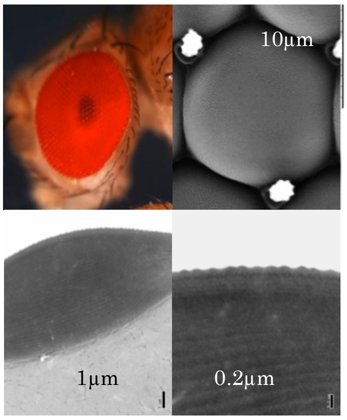


Fig.1 Corneal nipples in the compound eye of *Drosophila*.

2．ショウジョウバエ蛹期のレンズ発生過程におけるニップル形成

キイロショウジョウバエの複眼は約800個の個眼よりなり、それぞれの個眼はレンズで被われ、レンズの表面には微小な突起構造（ニップル構造）が見られる（Fig.1）。このニップル構造は、レンズクチクラの最上層のエピクチクラ層に形成され、その下層にはプロクチクラに相当

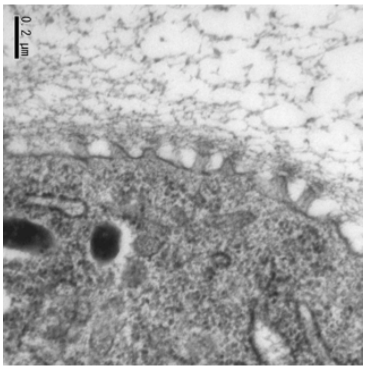


Fig.2　Microvilli and corneal formation

する層が見られる。複眼は蛹期に複眼成虫原基から形成され、角膜レンズは個眼内の 4 つの cone cell と 2 つの primary pigment cell から分泌された物質より形成される。その形成過程を TEM により観察したところ、蛹の中期の限定された期間にこの構造が形成されることが明らかになった。レンズ形成過程の円錐細胞や 1 次色素細胞の表層（apical 側）には細胞骨格のアクチンにより支持された多数の微絨毛が存在し、それぞれの細胞から分泌された物質、あるいは細胞外に存在した物質が微絨毛の先端に集積する(Fig.2)。続いてエピクチクラ層が形成されるとともに、その表層にニップル構造も見られるようになり、その後、プロクチクラ層が形成され、レンズが作られる。ニップル構造の形成過程において、微絨毛の関与が示唆された。

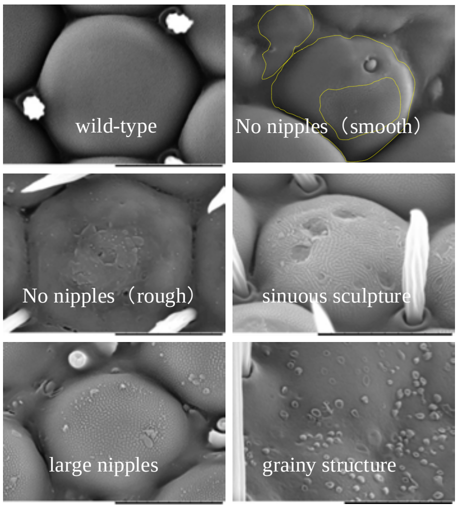


Fig.3 Various patterns of corneal nipples in *Drosophila* mutants

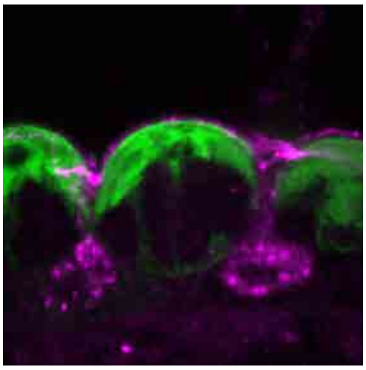


Fig.4 Cone cells (green) and new epicuticular protein (magenta)

３．ニップル構造の形成メカニズム

ニップル構造の形成メカニズムを明らかにするため、この形成に関わる遺伝子の同定を試みた。突然変異などを用いて特定の遺伝子の作用を変化させ、レンズ表面のニップル構造が変化するかを調べた。その結果、特定の遺伝子の作用を変化させることによって、1)ニップルの欠失、2)波状パターン形成、3)大きなニップル形成、4)粒状構造形成など、レンズの表面構造も変化することが明らかになった（Fig.3)。ニップル構造の形成は、分泌されたレンズクチクラ物質が硬化していく過程で自己組織化により生じていると考えられ、分泌物質やその形成過程の変化により自己組織化パターンが変化し、その結果ニップル構造の変化がもたらされたと考えられる。この自己組織化の過程を明らかにするために、クチクラとして分泌される産物を探索した。その結果、レンズ表面のエピクチクラ層に分泌されると考えられる新たなタンパクを発見した。このタンパクをコードする遺伝子の突然変異は、ニップル構造の欠失や波状パターン引き起こすことから、このタンパクはレンズ表面構造のニップル形成に大きな役割を担っていることが示された(Fig.4)。

所属班：B01-3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：接着、実装、防汚、、自己修復、放熱

生物規範階層ダイナミクス
Dynamics of biomimetic hierarchy structure

１．進捗報告

　当計画研究班は、これまでの研究期間において生物の多様な機能（可逆的接着性、自己修復、放熱性等）を規範に、要素技術開発を行った。

①昆虫の足の可逆的接着性、セルフアライメント技術：

陸上で生息しているハムシが、"泡"を利用して水中歩行を行っていることを世界で初めて発見した。水中接着のメカニズムを明らかにし新しい水中接着機構の開発に成功した。この成果は、科学誌の『Nature』でもニュースとして取り上げられた。泡を利用した微小部品のアライメントを考案し、泡の固定方法の開発を行った。足裏の毛状構造を模倣した接着構造を試作し、水中のみならず大気中においても優れた接着性を持つ接着機構の開発に成功した。

②植物の自己修復や分泌の仕組み、長寿命化：

　生物体表面が織りなす特異なサブセルラーサイズ構造や化学表面・界面に起因する驚異的な濡れ現象（はっ水性、はつ油性、自己洗浄性、親水性）や分泌液による自己修復機能を実現するために、防錆剤等の機能性ゲスト分子を、数ナノメートルの周期性を有する層状化合物の層間やゲルのナノ空間に大量に導入/固定化することで、ゲスト分子の持続的徐放や外部刺激による徐放を図り、長期にわたる防汚/防食能の維持、劣化防止、自己修復を可能にした新規絶縁性皮膜の開発を進めている。

③生物表皮の汚れないしくみを汎用元素だけで人工的に実現

絶縁性能の高いフレームワークから構成されるジルコニア系、シリカ系ハイブリッド皮膜の作製手法を確立し、防汚/防食の観点からその表面特性（はっ水/はつ油性）を詳細

に調査したところ、優れたはっ水／はつ油性があることがわかった。有機フッ素化合物を使用しなくても、生物と同じように汎用元素だけで優れたはっ水／はつ油性を得られることがわかった。

④生物の自己修復のしくみの技術化に成功

開発した層状化合物の層間に防錆剤を安定に導入する技術の開発、自己修復機能の効果確認を進めている。これまでの成果をもとに作製した一次試作品の耐食性を、塩水噴霧試験（JIS Z2371）により評価した結果、未処理，SiO2 皮膜を被覆した銅基板はわずか 2 時間で腐食が始まった。これに対し、一次試作品のハイブリッド皮膜を被覆した銅基板は 2000 時間以上経過しても，腐食は確認されず，優れた耐食性を示すことが明らかとなった。

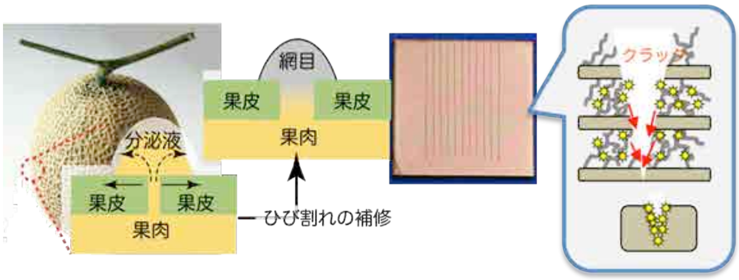


Fig.1 Anti-corrosion film with self-repairing properties learned from a muskmelon surface.

⑤生物の放熱性等、放熱特性の向上

電子機器において放熱の問題は、性能を左右するため重要である。サブセルラ−サイズ構造の材料の放熱特性の向上を目指すための表面設計指針の構築と機能評価を行った。これまでに、熱伝達を促進させるため、表面における分子鎖と凹凸構造を設計の対象とし研究を進めている。

平成 26 年度では主に表面構造の放熱特性への影響について調査した結果、周期的な凹凸構造を構築することで、熱伝達を加速させることを見出し、熱制御への応用を目指したメタサーフェスの可能性が示唆された。

⑥可逆的なハイブリダイゼーションの構築を目指した人工核酸の研究

次次世代を意識した、動的デバイスアドレッシング・分子接合技術確立を指向し外部刺激により DNA 結線の形成と解離を実現する外部刺激応答性人工核酸の開発にも取り組み、ホウ酸と pH 変化を外部刺激とする可逆的なハイブリダイゼーション形成・解離システムの構築に成功した。

2．今後の研究計画

これまでに得られた要素技術開発をベースに、生物規範による革新的な実装プロセスの確立を班内・班間連携により実施する。また、生物規範の基礎である「アナロジー」、生物モデルの「原理の抽出」の研究を強化する。

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：フェロモン，化学受容，振動受容，乾燥耐性

生物規範環境応答・制御システム

Biomimetics of Insect Subcellular Systems

1．昆虫-昆虫相互作用

ガ類のフェロモンブレンド受容機構の解明とその数理モデルの構築を目指し、10 種のガ類から性フェロモン受容体の同定を試みた。それらのうち 2 成分のフェロモンブレンド（EZ 体：ZZ 体＝9:1）を利用するヒメアトスカシバから、それぞれの成分に特異的に応答する受容体（EZ 体受容体、ZZ 体受容体）を同定し、各受容体を発現する嗅覚受容ニューロン（ORN）の比率が性フェロモン成分の構成比率と類似することを示した。また、他のガ類で報告されている ORN の比率と比較した結果、性フェロモン受容体を発現する ORN の比率は性フェロモン成分の構成比率と相関することを示した(1)。このことから、ガ類では、オス触角で性フェロモン受容体を発現する ORN の比率を調整することで、性フェロモン成分の構成比率を検出している可能性が示唆された。

次世代型走査型電子顕微鏡（SBF-SEM）を使って、アリの敵・味方識別センサの内部微細構造全容の画像データを取得し、3D モデルを構築した（Fig. 1）。センサ内部には 100 本以上の受容神経から伸びる感覚突起が束になって格納されており、感覚突起のところどころにみられる瘤状の構造部分で近隣の突起どうしが互いに受容器膜を接している。この瘤状構造が関与する電気的カップリングが巣仲間の体臭による活動電位の発生を抑え、異巣間の体臭パターンの差を恰も異種の体臭が示すように複数の異なる受容神経が応答する質的差分の情報へと変革する仕掛けとなっている。このスキームに従った情報調整メカニズムの数理モデルを考案する予定である。様々な化学環境モニタ危機管理システムの警報

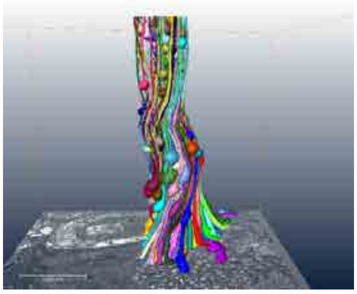


Fig. 1 3D structural image of a basiconic sensillum including 105 dendritic processes.

閾値を常態からどの程度の逸脱が生じた時にアラームを発するかなど、実情に合わせて調整する方法に応用できる。

2. 植物-昆虫相互作用

昆虫では、捕食者や配偶者の接近を感知するために固体を伝わる振動が用いられる。そこで、草本植物であるカラムシ上に生息するラミーカミキリが生物由来の振動を識別できるかを明らかにするために以下の研究を行った。まず、カラムシの振動特性を解析した。その結果、風による振動は 30Hz 程度の周波数成分が卓越していたが、ラミーカミキリの着地や歩行によって生じる振動は 30Hz 以上の周波数成分も強く、風による振動とは特性が大きく異なっていた（Fig. 2）[(2)]。次に、ラミーカミキリに周波数や振幅の異なる振動を与え、生物由来の振動に対して、フリーズ反応（歩行の停止）や驚愕反応といって特異的な反応をするかどうか検証した。その結果、ラミーカミキリは、他個体の着地や歩行に由来する振動の周波数成分に対して、敏感に反応を示すことが明らかになった。これらの振動情報の機能を応用することで、害虫の行動を制御し、防除につなげることができる。実際に、マツの害虫であるマツノマダラカミキリにおいて、振動によって産卵等の行動が阻害されることを示している[(3)]。

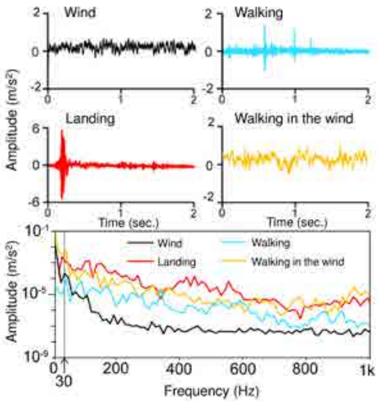


Fig. 2 Vibrations generated by wind, a beetle landing on a leaf, a beetle walking on a leaf, and a beetle walking on a leaf in the presence of wind.

3. 環境応答・適応

極限的な乾燥耐性を持つネムリユスリカの胚子由来培養細胞の増殖可能な状態で約 200 日間の常温乾燥保存に成功したが、再水和後の蘇生率は 5～15％と低かった。3 年目の成果として、乾燥処理方法の改良により、蘇生率を 30％に高めた。さらに、ネムリユスリカの全ゲノムを解読し[(4)]、乾燥耐性誘導を担う重要な遺伝子を精査した。得られた情報は乾燥耐性を持たない昆虫の培養細胞(Sf9)に乾燥耐性付与するシステムの構築の改良に貢献する。

参考文献

(1) Mitsuno, H.; Sakurai, T. et al. *Eur. J. Neurosci.* **2008**, 28, 893-902.

(2) Tsubaki, R.; Hosoda, N.; Kitajima, H.; Takanashi, T. *Zool. Sci.* **2014**, in press

(3) 高梨琢磨，深谷緑，小池卓二，西野浩史，生物科学 **2013**, *65*,102-107.

(4) Gusev, O.; Okuda T. et al. *Nature Comm.* **2014** DOI:10.1038/ncomms5784

所属班：B01-5班
所属機関：*九州大学先導物質化学研究所、千葉大学工学研究科
氏名：*木戸秋悟、劉浩
所属機関住所：〒819-0395　福岡市西区元岡744
e-mail：kidoaki@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

研究キーワード：細胞ミクロメカニクス、生物飛行マクロメカニクス，メガノバイオミメティクス、バイオメカニクス

生物規範メカニクシステム：細胞ミクロメカニクスから生物飛行マクロメカニクスまで

Bioinspired Mechanical System: From Cell Micromehcanics to Bioflight Macromechanics

1．B01-5 班全体の研究経過

生物マルチスケール・メカニクス・システムの学理探求と、生物の「動き」に及ぼす「サブセルラー・サイズ」構造が生み出す細胞メカニクスと生物飛行メカニクスの解明を目指している。これまでは、1)生物マルチスケール・メカニクス・システム研究では、生物羽ばたき翼の変形(動き)のロバストネスと、能動的な波動(振動やゆらぎ)に起因する周囲環境と相互作用により、都合良く波動的な力学場(流動波や運動波)を作る生物飛行や細胞運動のロバストネスを明らかにした。２)生物規範細胞ミクロメカニクス・システム研究では、細胞運動の制御と力覚検知メカニズムのメカノバイオミメティックスについて、iPS 細胞の内部応力を調整するメカノバイオミメティックス材料の設計として、光硬化性スチレン化ゼラチン(StG)ゲル表面に既存の培養系中にも含有されているタンパクであるラミニン(LAM)を化学固定することでフィーダーフリー弾性率可変基材を作製し、既存のマトリゲル上培養系を遥かに上回る正常な高速増殖率を達成できた[1]。３)生物規範飛行マクロメカニクス・システム研究では、昆虫羽ばたき飛行の飛行力学・流体力学・材料力学・飛行制御･運動最適化を統合した生物飛行統合力学シミュレータと、生物飛行と生物規範型飛行ロボット･流体機械の流体力学性能を測定･検証可能

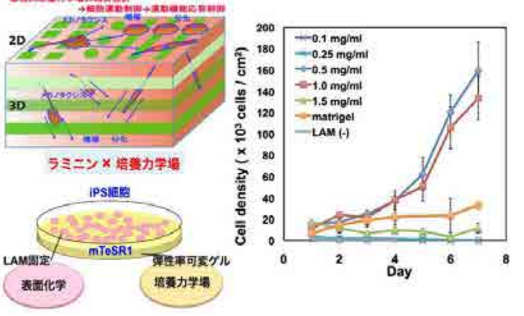


Fig.1. Rapid enhanced proliferation of iPS cells on laminin-fixed gelatin gels.

Fig. 2 Ultra-low speed wind tunnel & DPIV system at CU, high-speed recording of wing kinematics and CFD-based flow fields around a hummingbird, and biomimetic wings.

な世界トップレベルの回流型超低速風洞と DPIV 流体計測システムの開発に成功した。これらにより蛾やハチドリは精巧な構造により柔軟翼の受動的な変形が効率的に空気力を発生することを明らかにした。さらに生物柔軟翼の受動的変形を規範とした柔軟伸縮皺フィルム人工翼と生物翼を規範とした風力発電風車ロータの開発[(2)]に成功した。

2. 生体組織の曲率を感知する細胞運動の発見

実際の生体内では様々な臓器･組織に特有の細胞群が局在化され固有の機能を果たしているが、それらの臓器･組織はいろいろな曲率を有する構造から構成されており興味深いことにそれらの曲率に応答して異なる細胞種が棲み分ける挙動も見られる。そこで本研究では、細胞運動における場の曲率応答性の原理を調べるために、異なる曲率半径を有する弾性境界を弾性マイクロパターニング技術にて系統的に作製し、細胞メカノタクシスの応答性を解析した。曲率半径 50～1000 μm の異なる曲率の凹および凸の弾性境界パターニングゲルを作製し（硬領域：250~300kPa，軟領域：10kPa），細胞の運動軌跡の解析を行った。その結果、細胞メカノタクシスは、直線勾配の前後での凸から凹への曲率反転に際して顕著に促進されること、そして凸および凹の曲率半径 50 および 100 μm の弾性勾配においては凸境界では正の、凹境界では負のメカノタクシスが誘導されることを発見した（Fig.3）。このような弾性境界形状条件に依存した細胞運動特性の変化に対し、曲がった弾性境界におけるゲル内部の応力分布を解析したところ、これらの挙動の基礎をよく説明することができた。細胞運動の制御原理には、細胞外場のサブセルラースケールでの構造特性のうち、場の曲率というパラメータも重要な効果を有することがわかった[(3)]。

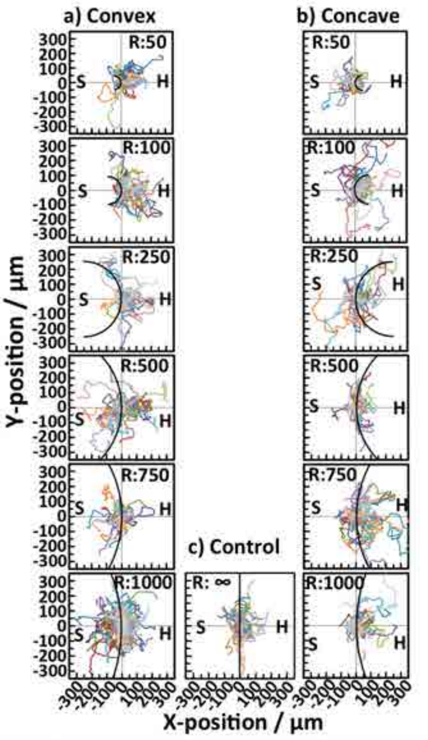


Fig.3. The starting position-superimposed cell trajectories around the elasticity boundaries with different curvatures Rs (μm) for convex (a), concave (b), and linear control (c). H and S indicate hard and soft region, respectively.

参考文献

(1) 木戸秋　悟，特願 2014-039524

(2) 劉　浩，特願 2013-112137.

(3) A. Ueki, S. Kidoaki, Biomaterials, in press, 2014.

謝辞

B01-5 班構成員全員のご協力に謝意を表する。

所属班：C01班
所属機関：独立行政法人産業後術総合研究所
氏名：安順花、関谷瑞木、〇阿多誠文
所属機関住所：〒305-3568　つくば市東1-1-1
e-mail：nano-pen-ml@aist.go.jp　（PEN)
研究キーワード：テクノロジーガバナンス　アウトリーチ

PEN が担うバイオミメティクスのテクノロジーガバナンス

Technology Governance in the Biomimetic Field supported by PEN

はじめに

10 月 20〜22 日、C 班が一翼を担ってきたバイオミメティクスの国際標準化の第 4 会本会議がベルギーLiege で開催され、早くもちょうど 2 年で用語の WG1 と構造最適化の WG3 の原案が国際標準となる。国際標準化についてはお台場での報告会が予定され、PEN でもその詳細を速報する。今回は新学術領域の中間評価を経た現時点で、改めてテクノロジーガバナンス、アウトリーチ活動といったことに注目して PEN の役割について皆様と認識を共有したい。

1. PEN は「ネオバイオミメティクス」の何を担ってきたのか？

第４期科学技術基本計画[1]では、科学技術政策とイノベーション政策は一体として「科学技術イノベーション政策」として進められ、明確に社会及び公共のための政策の一環と位置づけられている。国民の理解、信頼、支持のもとに推進するその具体的な方策として、社会との双方向の「科学技術コミュニケーション活動」の重要性が指摘されてきた。研究者には科学技術コミュニケーション活動の取り組みが求められ、科学館や博物館にはこれまで以上に国民の科学技術リテラシー向上のための活動の積極的推進が求められている。

バイオミメティクスの研究開発と社会の境界領域に存在する様々な課題への取り組みを展開しているＣ班の作業のうち、我々産総研サブグループは 2010 年４月から、社会との双方向コミュニケーションに基づくテクノロジーガバナンスのツールとして PEN の配信を行ってきた。ナノテクノロジーに加え、2011 年 9 月号からバイオミメ

ティクスに関する連載を開始、翌年の新学術領域ネオバイオミメティクスの発足にも貢献できたと自負している。以降 PEN はバイオミメティクスに関する研究開発動向、国際標準化動向等について一月以内のリアルタイムな情報伝達を心がけて速報を続けてきた。

ちなみに PEN は月刊で電子配信を行っており、一次配信先は 1500 ポイントに近づいている。内閣府をはじめとする関連府省庁、30 以上の民間企業団体、高分子学会やフラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会といった学協会、大学や公的研究機関、企業、メディア、個人と様々なポイントに配信している。例えばナノテクノロジービジネス推進協議会事務局からは 200 の会員企業へ、高分子学会からは 2 万人の会員へといったように二次配信が行われる。二次三次配信先まで含めると相当数の読者に PEN が届いているものと思われる。このほかに、ポータルサイト PENGIN[2]からも PEN のコンテンツを配信しており、こちらはビジターのほぼ半数が海外である。多くの読者からの信頼・支持は、その読者数が証明している。

２．PEN を使う、という発想を

PEN の現状を整理しておく。たとえば野村先生にご寄稿いただいたカブトムシの話は大きな反響を呼び、カブトムシを捕らえる「ノムラ・ホイホイ」の詳細についても続編をまとめていただいた。これも大好評だった。また不動寺先生のタマムシの子供向けアウトリーチ活動といった取り組みの紹介にも、多くの好評が寄せられた。読者が何を求めているのか、垣間見える。我々C 班もきちんとテクノロジーガバナンスに取り組もう、その思いは石田先生の連続コラム「沖永良部から考える『心豊かに暮らすということ』」、古川先生の連載「暮らし方を見直す」、山内・小林両先生の隔月連載「バイオ TRIZ」、そして我々が取り組んだ「バイオミメティクスの国際標準化動向」に関する連載や速報といった形で具体化した。その内容の詳細まで理解されたかどうかはともかく、関係各省庁にも C 班がこういったアウトリーチ活動、広い視点で見ればテクノロジーガバナンスの活動を積極的に展開している事実だけは伝わっているはずである。

評価のためにとは言わないが、研究開発の促進のために PEN を活用する、そういった意識で PEN にご寄稿をいただけると幸甚である。テクノロジーガバナンスの実践として、我々は原稿の編集・PEN の配信に全力で取り組む。

PEN の購読申し込みは nano-pen-ml@aist.go.jp。あなたのタブレットに PEN を。

参考

[1]第４期科学技術基本計画　（2011－2015 年度）内閣府総合科学技術会義
[2]PENGIN サイト http://pengin.ne.jp

所属班：公募班
所属機関：群馬大学大学院理工学府分子科学部門
氏名：浅川　直紀
所属機関住所：〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1
e-mail：asakawa@gunma-u.ac.jp
研究キーワード：生体模倣型デバイス，パイ共役系高分子，分子ダイナミクス、スケーラブルデバイス

パイ共役系高分子の分子ダイナミクスを用いた 生体模倣型信号処理デバイス

Bioinspired Signal Processing Device Using Molecular Dynamics in π-Conjugated Polymers

1．はじめに

近年、膜タンパク質、細胞、組織、組織間、個体といった生体の様々な階層において、ノイズが生体機能の向上に積極的に用いられていることが明らかとなってきた。この機能の一部には「確率共鳴」と呼ばれる現象が観測されている。最近、我々は確率共鳴現象を示す基本素子を多数接続しネットワーク化することにより、環境情報を基にシステムの状態を自律的に変化させるデバイスの設計指針を打ち立てた[1-5]。その設計にとって重要な性質は、「ノイズ発生」、「非線形外場応答性」、「信号の入出力分離」、「素子間結合強度の動的変調」であり、「確率的閾値素子」が基本素子となる。従来、高分子物質の多くは大きな構造ゆらぎをもつことから不安定な電気物性を示すため、エレクトロニクスのアクティブ材料としては敬遠されてきた。しかし、生体型情報処理デバイスの基本素子である「確率的閾値素子」にはそのような不安定性こそが重要な要素となる。本研究は、パイ共役系高分子に着目し、その電気物性ゆらぎを用いた確率的閾値素子の開発およびその素子集団の協同的ダイナミクスを発生・制御し、超低消費電力の生体型信号・情報処理デバイスの実現を目指している。

2．結果・考察

温度可変電気伝導度測定から、Au/RR-P3DT/Au縦型素子には、複数の伝導状態が存在し、それらの状態間の準確率的な遷移が観測された。この準確率的な遷移は、空間電荷制限伝導(SCLC)における電荷キャリアのトラップ充填転移(trap-filling transition;

TFT)付近で頻繁に観測された。また、このTFTのオンセット電圧をV_{TFT}とすると、室温でのノイズ測定から、$V < V_{TFT}$=10Vの条件では、ω^{-2}のDebye型のスペクトル密度をもつノイズの発生が観測され、$V > V_{TFT}$の条件では,緩和時間に分布が存在する場合に観測されるω^{-1}型のノイズ発生が観測された。さらに、V_{onset}値の温度変化とDSC測定や固体^{13}C NMR測定から、Au/P3DT/Au素子の準確率的な挙動は、P3DTの分子ダイナミクス変化が影響を及ぼしていることが明らかとなった。P3DTでは、チオフェン環のねじれ運動に伴うトラップ密度の時間ゆらぎが原因ではないかと推測される。以上の実験結果より、Au/P3DT/Au縦型素子は確率的閾値素子としての利用が期待される(6,7)。

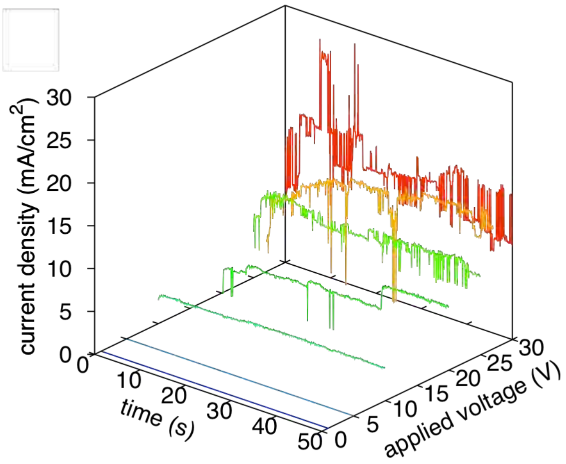


Fig.1 Results of noise measurements for the Au/P3DT/Au element. The time course of current density under a constant applied voltage is presented for various applied voltages.

参考文献

(1) Asakawa, N.; Hotta, Y.; Kanki, T.; Kawai, T.; Tabata, H. *Phys.Rev.E* **2009**, *79*, 021902-1—021902-8.

(2) Hotta, Y.; Kanki, T.; Asakawa, N.; Tabata, H.; Kawai, T. *Appl.Phys.Exp*. **2008**, *1*, 088002-1—088002-3.

(3) Kanki, T.; Hotta, Y.; Asakawa, N.; Kawai, T.; Tanaka, H. *Appl.Phys.Lett*. **2010**, *96*, 242108-1—242108-3.

(4) 浅川直紀，化学と教育 2013, 61, 396-397.

(5) Maruyama, R.; Asakawa, N. J.Phys.D:Appl.Phys. **2014**, *47*, 365402-1—365402-10.

(6) Asakawa, N.; Umemura, K.; Fujise, S.; Yazawa, K.; Shimizu, T.; Tansho, M.; Kanki, T.; Tanaka, H. *J.Nanophoton*. **2014**, *8*, 083077-1—083077-15.

(7) Asakawa, N.; Kanki, T.; Tanaka, H. *Proc.SPIE* **2014**, *9055*, 905509-1—905509-17.

謝辞

本研究の一部は科研費新学術領域「生物規範工学」公募研究(25120505)よって遂行された。

所属班：公募班
所属機関：独立行政法人海洋研究開発機構
氏名：出口　茂
所属機関住所：〒237-0061　横須賀市夏島町2-15
e-mail：shigeru.deguchi@jamstec.go.jp
研究キーワード：バイオクレプティックス／ナノバイオテクノロジー／セルラーゼ／深海微生物

材料科学からアプローチするバイオクレプティックス

Biokleptics with Materials Science Approach

我々は、材料科学の知見を応用した微生物機能のセンシングに関する研究を進めてきた。直径数十 nm のセルロースナノファイバーからなるヒドロゲル[1]の表面に、インクジェットパターニング装置を用いて極微量（1 ng 以下）のセルラーゼを滴下すると、セルロースが酵素加水分解を受けて三次元ネットワーク構造が破壊された結果、ゲル表面にピットが形成される（Fig. 1, 2)。これまでに 3D レーザー顕微鏡を用いたピットの詳細な解析を行い、ピット体積がセルロースの酵素分解を定量的に評価するための指標として利用できることを明らかにした。加えてピット体積が 1 ng 以下の極微量のセルロース分解をも定量可能な超高感度な指標であることもわかった（Fig. 3）。

さらにこの手法を応用して深海から分離した新奇微生物が生産するセルラーゼの解析も進めた。深海由来セルラーゼ生産菌 2 株のドラフトゲノムシーケンスを取得し、セルラーゼをコードしていると思われる遺伝子を複数同定した。

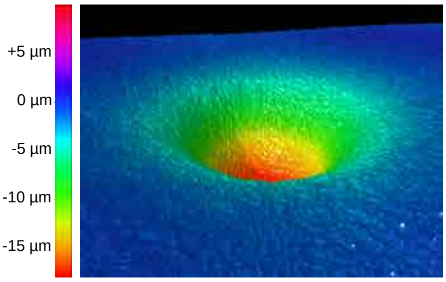


Fig. 1. 3D laser image of a pit formed on the surface of cellulose hydrogel in 31 min after depositing 90 pL of the cellulase solution.

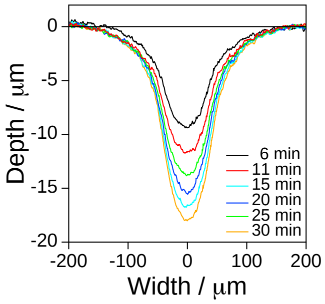


Fig. 2. Change of a cross-sectional profile of the pit as a function of reaction time.

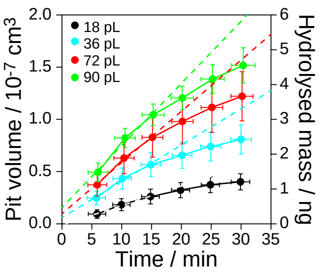


Fig. 3. Change of the volume of the pit formed after depositing various amount of the cellulase solution.

2011 年より ISO/TC 266 で「バイオミメティクス」の規格策定に向けた議論が続けられている。その中で当初から活発に議論が行われているのが、「バイオミメティクスとは何か？既存のバイオテクノロジーとどのように差別化されるのか？」である。「バイオミメティクス」と「バイオテクノロジ–」を区別するキーワードの一つが「抽象化」である。例えばクモの糸を組み替え大腸菌で大量生産した「スパイバー」は従来の「バイオテクノロジー」である。一方、クモの糸が優れた強度を持つ仕組みを解明・抽象化し、その「技術体系」を模倣して合成繊維を分子設計・合成できれば、それは明確に「バイオミメティクス」である。ところがその「技術体系」を模倣して、遺伝子組み換えによって大腸菌で生産した人工タンパク質繊維となると、その判断は容易ではない。

Rawlings らは *Soft Matter* に発表した「Innovation through imitation」という論文で[(2)]、biomimetic research を bioinspired、biomimetics、biokleptics の３つに分類することを提唱した。上述のような「バイオミメティクス」と「バイオテクノロジー」の狭間ともいえる技術分野は、biokleptics に含まれると思われる。耳慣れない biokleptics（klept-、from Greek kleptēs ‘thief’）とは、2005 年に Ned Seeman が DNA nanotechnology を指して使い始めた造語で[(3)]、“a biological reagent is used to aid a synthetic process”と定義される。「スパイバー」の例と全く同様に、DNA nanotechnology は DNA を材料として用いるが、その本質は DNA 塩基対間の相補的な相互作用を利用して、合成 DNA から複雑な立体構造をボトムアップによる自己組織化で作り出すことにある。

セルラーゼ研究の明確な出口は、地球上で最も豊富なバイオマスを出発原料とした物質生産（バイオリファイナリー）への貢献である。しかしながら深海由来のセルラーゼを新たな生体触媒として使うだけでは、従来の「バイオテクノロジー」に過ぎない。現在、深海微生物の「技術体系」に基づく biokleptics を創出するために、微生物が陸上とは比較にならないほどセルロース存在量の乏しい深海環境に適応する過程で獲得したと考えられる、セルロース分解のための独自の分子機構を解明・抽象化するための研究を、東京大学のグループと共同で進めている。

(1) Deguchi, S.; Tsudome, M.; Shen, Y.; Konishi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. *Soft Matter* **2007**, *3*, 1170-1175; Tsudome, M.; Deguchi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. *Appl. Environ. Microbiol.* **2009**, *75*, 4616-4619.

(3) Rawlings, A, E.; Bramble, J. P.;Staniland, S. S. *Soft Matter* **2012**, *8*, 2675-2679.

(3) Seeman, N. C. *Q. Rev. Biophys.* **2005**, 38, 363–71.

【１１月２８日（金）】

「生物規範工学」・海洋研究開発機構合同講演会

【１１月２８日（金）】「生物規範工学」・海洋研究開発機構合同講演会
会場：国際海洋環境情報センター（GODAC）（沖縄県名護市豊原 224-3）

11:30　GODAC にて昼食（弁当）
13:00~14:00　生物系と人工系のはざまに挑む
　相澤 益男 先生（科学技術振興機構）
14:00~14:45　機械屋としてみた植物内における流れ
　望月 修 先生（東洋大学）
14:45~15:30　水棲無脊椎動物におけるニップルアレイの構造と機能
　廣瀬 裕一 先生（琉球大学）
15:30~15:45　休憩
15:45~16:10　海綿動物の多様な構造と機能
　椿 玲未 先生（海洋研究開発機構）
16:10~16:35　アイドルは外見だけじゃない：アイドル生物スケーリーフットの秘められた魅力
　高井 研 先生（海洋研究開発機構）
16:35~17:00　フジツボ類の多彩な着生場所選択性
　野方 靖行 先生（電力中央研究所）
17:00~17:25　自己組織化を利用した生物模倣階層構造の作製と表面摩擦の測定
　平井 悠司 先生（千歳科学技術大学）

18:00~20:00　懇親会（オリオンビール園「やんばるの森」）
　http://www.royal-orion.co.jp/store/yanbarunomori.html

（独）科学技術振興機構・顧問
東京工業大学名誉教授・元学長
相澤益男
〒102-8666
東京都千代田区四番町５－３
e-mail：masuo.aizawa@jst.go.jp
研究キーワード：

生物系と人工系の狭間に挑む

Bridging the Gap between the Biologican and Artificial Systems

「ミトコンドリア・イブ」説が世界を沸かせて久しい。この間、激しい論争が繰り広げられ、どうやら「アフリカ中部に出現したホモサピエンスが、唯一生き残ることができ、世界各地域に進出することができた」という結論に決着したように思われる。もしそうであるならば、人類が進化するプロセスでの驚嘆すべき「人類革命」だ。そして、その決め手は、数万年にわたってのしたたかな「地球環境適応と自然共生」といえよう。

最近の２世紀に目を移せば、世界の人口、平均寿命、GDP の伸びが驚異的である。いうまでもなく、科学技術を牽引力として「人類の躍進」が達成された。一方、このプロセスにおいて、科学技術は地球環境を著しく損ない、環境・エネルギー危機を引き起こしている。何故か？重要なことが、科学技術と自然との関係に見出される。17 世紀科学革命は自然と屹立した立ち位置を明確にした。以来、科学技術は、人工物、人工システムを次々と創出し、人類の成長を支えてきた。しかし、これまでのような「飛躍的な成長」に限界があることは明確だ。

今や、成長の限界を克服しつつ、持続可能な未来を創造することが、人類共通の課題である。課題解決に向けて、「人類の叡智」を結集し、科学技術・イノベーションを推進すべき時だといえよう。講演では、人類の進化にも学び、「生物系と人工系の狭間に挑む」研究について、５つのアプローチに大別し、私見を述べる。

第１のアプローチは「自然循環・自然共生」、第２は「生体インターフェイス」、第３は「生命情報」、第４は「細胞・組織・構造体」、そして第５は「分子・オルガネラ」である。

所属機関：東洋大学理工学部生体医工学科
氏名：望月　修
所属機関住所：〒350-8585 埼玉県川越市鯨井２１００
e-mail：mochizuki@toyo.jp

研究キーワード：生物流体力学、バイオミメティクス、マイクロ流体計測、流れの可視化、非定常運動

機械屋としてみた植物内における流れ

The flow in a plant from an engineering point of view

Abstract: We try to explain mechanisms of a vessel flow of a plant from a fluid dynamical point of view. The necessary pressure to pump up water from roots to stomata is estimated by using the continuity and Bernoulli's equations. The limitation of 10m related to the atmospheric pressure is nonsense because of a fault of boundary condition, so that we should be released from the spell. We consider that the pressure given indirectly by the osmotic pressure at roots is a major source of the work of pumping up and the capillary action is also possible to pump up water to a height of 20 m, if the diameter of the capillary tube is 1.5 µm. We show my latest researches on the flow in platnt cells and the function of leaf vein that exerts on supplying water to the whole leaf.

Key Words : Physiology, Sap flow, Vessel, Sieve, Xylem, Vein, Cytoplasmic streaming, Transpiration, Osmotic Pressure, Water potential

1．はじめに

植物において根からの吸水→導管→気孔からの蒸散の一連の流れを蒸散流(transpiration streaming)という．このメカニズムについては諸説あってよくわからない．何故よくわからないかというと，仮説としての説明が多く，それを裏付けるデータが乏しいということが原因である．導管内の流量，気孔からの蒸散量，水ポテンシャル，導管・師管の寸法や数，導管壁・葉の細胞などと水との接触角，など物理的諸元が分からないなかで流動モデルの確認をするということが続けられてきた．植物生理学の人たちは水ポテンシャルと表現するギブスの自由エネルギーの高低差から吸い上げが行われると考えている．流体屋から見ると，エネルギー準位だけで語られても具体的に何が駆動源でどのようなメカニズムで水を流しているかが気になるところである．つまり植物だからという生命活動を前面に押し議論されるのではなく，物理的な理由付けをしないと納得できないというところである．

本講演では植物内に見られる流動に関する疑問を挙げ，皆で議論するきっかけとなり，理解を深めたい.

2．流れモデル

発端は大気圧で押せる水の高さが 10m 位だということである．木の高さが 10m 以上だと先端を真空にしても大気で押せる限界は 10m 位であるにもかかわらず，そのような高い木が水を吸えるのは何故か？ということになったのである．この議論では，大事なことを忘れている. 水の柱の先端が大気圧より小さいことが吸うということなので, 吸うことを基本に据えると，先端は圧力が抜けないように閉じていて，その閉じた先端ではもしそこに空間があるとすれば真空になっていなければならない. もしこれが本当だとすると，木のモデルとして，気孔から水の放出はなく，したがって流動しない水の柱を大気圧で保持しているだけというものになってしまう. こうなると木の幹を水が流れている音を聞けるとか, 傷を付けた幹から水が流れ出てくるというようなことは起こらないであろう．つまり，もともと 10m という限界を議論すること自体に意味はないのである.

したがって，10m のことは忘れて，単純に例えば 20m の高さの木で水の流れのモデルを作ってみればよい．まずは連続の式とベルヌーイの式である．これらで記述できなければ自然の法則に則っていないことになる．図 1 に示すように主管の先端で n 本に分岐する管（分岐管）を持つものの流れに関して考えてみよう。分期間の先端には気孔が付いていて，大気に開放されている.

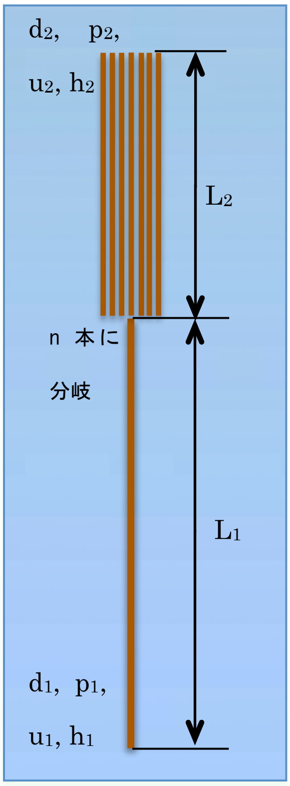


Fig. 1 Simple model of vessel

連続の式から

$$\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 u_1 = n\pi\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 u_2$$

損失を含むベルヌーイの式から

$$\frac{1}{2}\rho u_1^2 + p_1 + \rho g h_1 =$$
$$\frac{1}{2}\rho u_2^2 + p_2 + \rho g h_2 + \varsigma_v \frac{1}{2}\rho u_1^2 + n\varsigma_b \frac{1}{2}\rho u_2^2 + n\varsigma_t \frac{1}{2}\rho u_2^2$$

ここに, $\varsigma_v = \lambda_v \frac{L_1}{d_1}$，$\zeta_b$，$\varsigma_t = \lambda_t \frac{L_2}{d_2}$,はそれぞれ主管の管摩擦抵抗係数,分岐の抵抗係数,分岐管の管摩擦抵抗係数である. λ_v，λ_t はそれぞれ主管と分岐管の管摩擦係数であり, レイノルズ数 Re から 64/Re によって求められる.

連続の式から，u_1=u_2 の条件を満たす n を求めると

$$n = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

となる．分岐管の本数は主管と分岐管の直径比の 2 乗で求められる．例えば d_1/d_2=20 の場合は n=400 である．また，分岐管の本数がこの主管と分岐管の直径比の 2 乗で求められる本数より多いときには分岐管の流速は主管のそれより小さくなる．逆の場合は大きくなる．

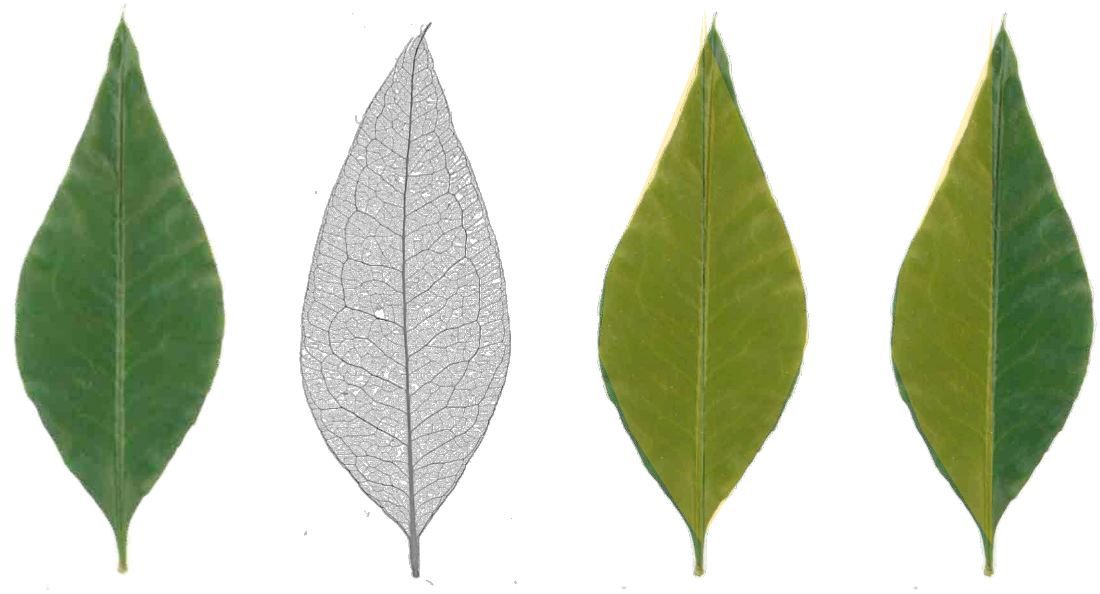
$$\left(1 + n\varsigma_b + n\varsigma_t\right)\frac{1}{2}\rho u_2^2 = \left(1 - \varsigma_v\right)\frac{1}{2}\rho u_1^2 + \left(p_1 - p_2\right) + \rho g\left(h_1 - h_2\right) \quad \cdots\cdot (1)$$

式（1）における右辺の項のオーダーを比較してみよう．まず，L_1=15m, d_1=100μm, u_1=100μm/s ,h_1=0m, p_1=?,L_2=5m, d_2=5μm, u_1=?, h_2=20m,p_2=1atm と仮定しよう．水の動粘性係数ν=1×10^{-6}とすると，Re=d_1u_1/ν=0.01 であり，λ_v=6×10^{3}である．この値から $\zeta_v=\lambda_v L_1/d_1$=1×10^{9}である．したがって，右辺第 1 項は(1-1×10^9)×(1/2)×1000×(100×10^{-6})^2=-5×10^3 [Pa]である．右辺第 3 項は 1000×9.8×（0-20）=-2×10^5 [Pa]である．左辺が正であるためには右辺における各項の総和が正の値とならねばならないので，(p_1-p_2)>2×10^{5}である．すなわち，根と 20m 上方の気孔との間の圧力差が 2 気圧あれば流れることになる．別の言い方をすれば，開放端である気孔における圧力が大気圧であるとすれば根は 2 気圧で水を押し上げることになる．なんとなくそれらしい値ではないか．

分岐の数 n は先の議論より，n=400．ということは u_2=100μm/s，Re=5×10^{-4}，λ_t=1×10^{5}であり，　$\zeta_t=\lambda_t L_2/d_2$=1×10^{11}と求められる．$\zeta_b$=0.5 と仮定すると，左辺の値は（1＋400×0.5+400×1×10^{11}）×（1／2）×1000×（100×10^{-6}）^{2}=200×10^6 [Pa]となる．すなわち，2000 気圧となる．根が 2000 気圧かというと現実的ではない．逆に，右辺が 2 気圧，ζ_tが主管程度の 1×10^{9}だとして流速 u_2を求めてみよう．u_2=0.4μm/s となる．葉っぱの中の流速がこの程度であれば，良さそうである．このことから逆に分岐の数は n=1×10^{5}本（10 万本）となる．これが気孔の数だとすればなんとなく現実的ではないか？

3．葉っぱの役割

図２に示すように葉っぱに条件をつけて水を吸わせた結果にもとづく式（２）の連立方程式から水の吸い上げに対して蒸散５７％、毛細管現象３５％、浸透作用 8%という寄与度がわかった。



a) without treatment　　b) only vein system　　c) whole surface covered with wax　　d) a half surface covered with wax

Fig. 2 Tested treatment leaves

$$
\begin{aligned}
Q_{v1} &= Q_c + Q_s + Q_o \\
Q_{v2} &= Q_c = 0.35Q_{v1} \\
Q_{v3} &= Q_c + kQ_s + Q_o = 0.20Q_{v1} \\
Q_{v4} &= Q_o = 0.08Q_{v1}
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

参考文献

(1) Mohr H. and Schopfer, P., *PFLANZENPHYSIOLOGIE*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chapter 28, 1992.

(2) Atkins, P. W. *Physical Chemistry*, 6th edition, Oxford University Press, Chapter 4, 1998.

(3) Hino, M., " An Essay on Transpiration from Stomata and Related Phenomena", Fluid Dynamic Research NAGARE, The Japan Society of Fluid Mechanics, vol 24, pp. 473-481, 2005. in Japanese.

(4) Hosokawa, I., " Physics in Water-Pumping of Plants", Fluid Dynamic Research NAGARE, The Japan Society of Fluid Mechanics, vol 24, pp. 491-496, 2005. in Japanese.

所属機関：琉球大学理学部海洋自然科学科（生物系）
氏名：広瀬裕一
所属機関住所：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原
e-mail：euichi@sci.u-ryukyu.ac.jp
研究キーワード：微細構造、多機能性、ナノピラーシート、生物多様性

水棲無脊椎動物におけるニップルアレイの構造と機能

Nipple Arrays on the Body Surface in Aquatic Invertebrates: Structures and Potential Functions

1．はじめに

多様な無脊椎動物の形態を観察していると、なぜこんな形を持っているのか理由が思いつかないことをしばしば経験する。そもそも、生物の形を決めているのは個々の生物が持つ遺伝情報であり、この遺伝情報の偶然な変化（突然変異）によって形も変化する。同時に、全ての生物は常に生存競争の中で生きており、生物の「かたち」は厳しい自然選択を受けることから、ほとんど全ての形には機能があると期待される。多くの種が共通に持つ（すなわち進化的に保存されている）「かたち」には、生存に不可欠な機能が備わっていると期待できるだろう。とりわけ、異なる系統（進化の道筋）の生物が同じような「かたち」を持つ場合、これは単なる偶然ではなく、その「かたち」の持つ機能のために同様な構造が収斂的に進化した可能性が高い。

蛾の仲間には複眼の表面にニップルアレイと呼ばれる高さ 100 nm 前後のイボイボ構造を持つものがある。この構造は表面に屈折率の勾配を作ることで光の反射を低減する機能があり、夜間に天敵からの目視を逃れる役に立つと考えられている[(1)]。これは生物模倣の研究者には著名な事例であるが、恥ずかしながら私がこれを知った（そして驚いた）のは 2011 年の動物学会（旭川）での下村政嗣先生のシンポジウム講演であった。私が「驚いた」理由は、同様な構造が私たちの研究するホヤや内肛動物の仲間にも見られるからだ (Fig. 1A, B)。文献を調べるとゴカイの仲間やヒトデの管足にも同様な構造を持つものがある。しかし、付着動物であるホヤが光反射を防ぐことに意味があるだろうか？水中環境においては別の機能があるかも知れない。謎は深まるばかりである。

生物の構造について機能を検証するには、その構造を持たない突然変異体を作製して比較する方法がある。しかし、これはいわゆるモデル生物を用いなければ困難で、

多様な生物に適用できない。2012 年のバイオミメティクス研究会（つくば）に招待していただいた際に、ナノインプリントの手法によってニップルアレイに似た構造を作成することが可能であることを知った(Fig. 1C)[(2)]。今回、ナノピラーシートを利用して、水棲無脊椎動物のニップルアレイの機能について検討した研究例を紹介する。

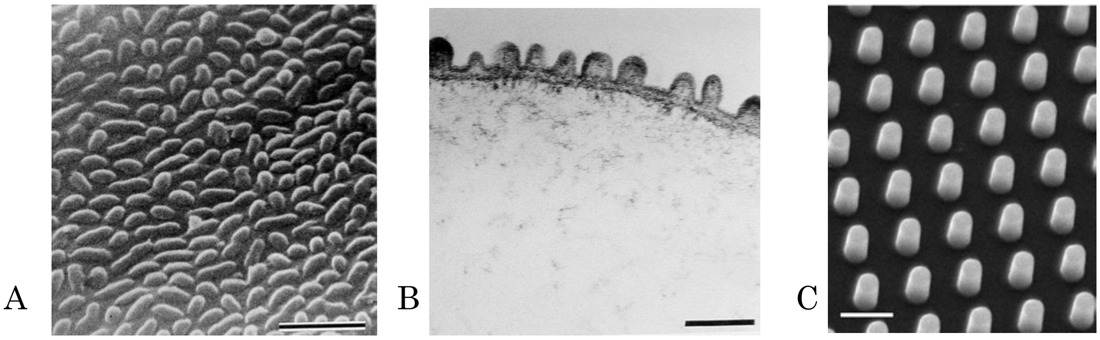


Fig. 1. (A, B) Nipple array on the tunic surface of a botryllid ascidian (Scale bar = 0.5 μm). (C) Nanopillar sheet fabricated by nanoimprint technology (Scale bar = 1 μm).

2．ニップルアレイは泡の付着を防ぐ[(3)]

ポリスチレンのシートを水中に沈めて加温し、表面に付着する泡の数を計数したところ、疎水性のポリスチレンシートには多数の泡が付着するが、親水処理したシートに付着する泡は有為に少なかった。さらに、親水処理シートの中でも、ナノピラー（0.5 x 1 μm)を持つシートにおける泡付着は平滑なシートと比較して有為に少なかった（Fig. 2)。理論的にも、ナノピラー上で泡が Cassie–Baxter 状態で付着しているとすれば、平滑な表面上よりも泡の付着エネルギーが小さいことが示された(Fig. 3)。

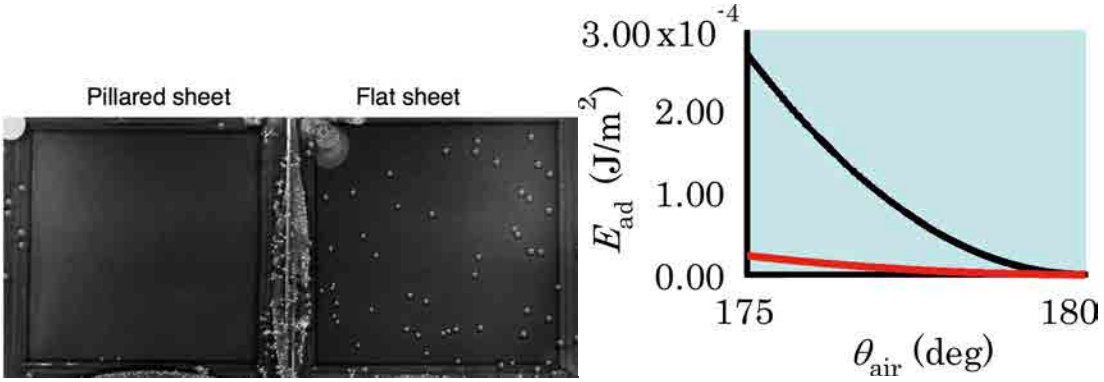


Fig. 2. (A) Attachment of bubbles on the hydrophilized pillared sheet and flat sheet. (B) Simulation of adhesion energy per unit area of a bubble on flat (black line) and pillared surface (red line) at various wettability of the surface. θ_{air}, contact angle of the bubble.

水棲生物の体表は一般に親水性であると考えられるが、ニップルアレイを持つことでさらに泡付着を低減することができると考えられる。水中の生物において泡付着は浮力の増加、運動の抑制、開口部の閉鎖などの問題をもたらすので、泡付着は特に浅所に生息する生物においては重要な機能であると考えられる。体表の親水性を粘液などで高めることでも泡付着の防除は可能なので、それぞれの生物の生息環境によって、多様な対策がとられていると考えられる。

3. ニップルアレイは水中でも光反射を防ぐか？

モスアイ効果として知られる光反射軽減（同時に光透過の向上）はニップルアレイの典型的な機能であるが水中ではどうだろう。水中でシート表面の光反射を較べると、光反射は平滑、直径 2 μm のピラー、直径 0.5 μm のピラーの順に減少する。

クラゲやサルパなど透明なプランクトンは捕食者からの視認性を下げることが生存に重要だと考えられる。サルパの体表（被嚢表面）の微細構造を調べると、昼間に浅所を浮游する種ではニップルアレイが認められている[(4)] (Fig. 3)。

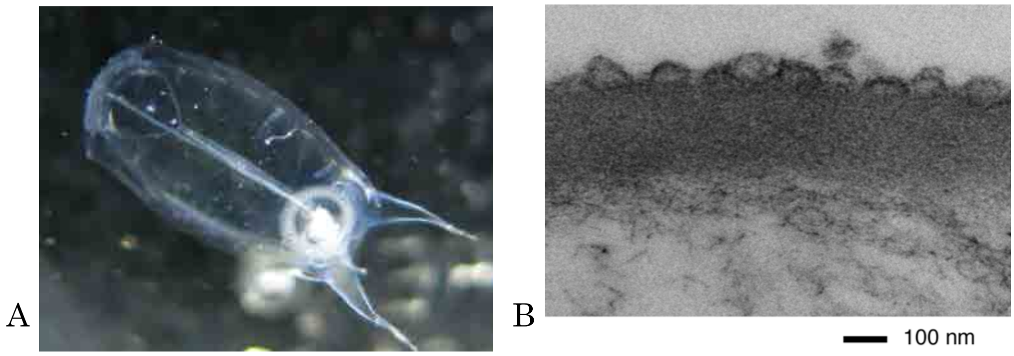


Fig. 3. (A) An individual of *Thalia rhomboides*. (B) TEM image of the tunic surface.

サルパの被嚢は透明度が高く、透過光ではほとんど視認できないが、暗視野照明などでは表面の光反射で認められる。また、被嚢は含水量が高いため、屈折率も海水に近いと考えられる。トゲヒメサルパのニップルアレイのサイズデータをもとに、海水と屈折率がわずかに異なる基質における光反射のシミュレーションを行ったところ、ある程度の光反射低減効果が認められた。また、ニップルのサイズ（高さ）や間隔を変化させた場合、サルパのニップルアレイは光反射の機能に最適化されてはいないことがわかった。これはニップルアレイを形成するために必要なコストと効果のバランスに影響を受けるだろう。また、ニップルアレイが同じ生物の上で複数の機能を果たすならば、それぞれの機能に最適な条件があると考えられる。機能による最適条件の違いから、必要な機能を得られる妥協点として実際の「かたち」が選択されているかもしれない。

4. 寄生性甲殻類体表のニップルアレイと宿主細胞の付着防除

魚の体内に潜り込んでいる寄生性カイアシ類１種について体表微細構造を調べたところ、体表のクチクラにニップルアレイが認められた[(5)]。ホヤやウミウシに内部寄生するカイアシ類の体表にもニップルアレイが観察されている。すでにナノピラーシート上では培養細胞が基質から剥がれやすくなることが報告されていることをヒントに[(6)]、ホヤ血球を用いてナノピラーシート上における機能を調べたところ、平滑なシート上の細胞と較べて細胞伸展と貪食作用が有為に抑制されることがわかった。体内に寄生する動物は外部の環境から隔離されるため、光や泡の問題はないと考えられる一方で、宿主の免疫系による防御反応への対策が必要となる。体表のニップルアレイには宿主免疫細胞の付着や貪食作用を抑制する機能があるかも知れない。

5. 今後の課題

陸上とは異なる機能が求められることから、相対的に研究の乏しい水棲無脊椎動物の体表には未知の機能的構造が眠っている可能性が期待される。多様な生物の体表微細構造を比較して収斂的に自然選択された構造を探索するのは有効なアプローチだろう。また、現象を解釈する上で、数理学・工学分野の研究者との協同することは重要である。体表のぬれ性は機能を推定する上で重要なパラメーターになると考えているが、生試料や微小な試料でぬれ性を計測するための技術的な助言をいただければ有り難い。

参考文献

(1) Bernhard, C. G. *Endeavour* **1967**, 26, 79–84.

(2) Kuwabara, K.; Miyauchi A. *J. Vac. Sci. Technol. B* **2008**, 8, 582–584.

(3) Hirose, E.; Mayama, H.; Miyauchi, A. *Biol. Lett.* **2013**, 9, 20130552.

(4) Hirose, E.; Kimura, S.; Itoh, T.; Nishikawa, J. *Biol. Bull.* **1999**, 196, 113–120.

(5) Hirose, E.; Uyeno, D. *Zool. Sci.*, **2014**, 31, 546-552

(6) Nomura, S.; Kojima, H.; Ohyabu, Y.; Kuwabara, K.; Miyauchi A.; Uemura T. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2005**, 44**,** 1184-1186

謝辞

本研究はさまざまな分野の研究者との共同による。ナノピラーシートを提供いただいた宮内昭浩博士（日立製作所）、生物試料を提供いただいた西川淳博士（東海大）・上野大輔博士（Univ. Florida）、理論的な解釈とシミュレーションを担当いただいた眞山博幸博士（旭川医大）・酒井大輔博士（北見工大）、ホヤ血球を用いた実験に協力いただいた Loriano Ballarin 博士 (Univ. Padova)をはじめ共同研究者の皆様に感謝いたします。

所属機関：独立行政法人海洋研究開発機構
氏名：椿　玲未
所属機関住所：〒237-0061
横須賀市夏島町2-15
e-mail：tsubakir@jamstec.go.jp
研究キーワード：海綿動物、生態、環境、多様性

海綿動物の多様な構造と機能

Diverse structures and multiple functions of sponge morphology

1．はじめに

生物は、生息環境に適応した様々な機能を有している。生物が持つそのような機能の解明は生物学の大きな課題のひとつであり、生理学や生物物理学など、さまざまな視点から研究が進められている。中でも特に、形態は機能と密接に結びついていることから、機能解明の第一歩としては詳細な形態観察が必須となる。

海洋では、海底の岩などに引っ付いて暮らす固着生物が優占する。固着生物の多くは水中の有機物を濾し取って食べる濾過食者であり、「移動せずにその場でうまく餌を採る機能」を持っている。海綿動物（以下、「カイメン」）もそのような固着生物のひとつだが、とりわけ特異な濾過食形態を持つ(Figs.1, 2)。カイメンの体内には網の目のような水路（水溝系）がびっしりと張り巡らされており、体内の襟細胞の鞭毛の運動によって水路に海水を取り込み、海水中の有機物を餌としている。多くの種のカイメンでは、襟細胞が集まって襟細胞室を形成し、膨大な数の鞭毛の運動によって強い水流を生み出す。

Fig. 1 Diversity of sponge morphology.

2. カイメンと二枚貝の間の水流を介した相利共生関係

カイメンは、「餌をとる」、「呼吸する」、「繁殖する」の３つを全て水溝系を通じて行うため、体の隅々まで張り巡らされた水溝系の内部に常に新鮮な水を送り届ける必要がある。鞭毛運動による能動的な水流創出のために、カイメンは全代謝エネルギーの約３割という莫大なコストを費やしているとの報告もある [(1)]。そのためカイメンは、水流創出のためのエネルギーコストを削減するために様々な戦略を発達させてきた。

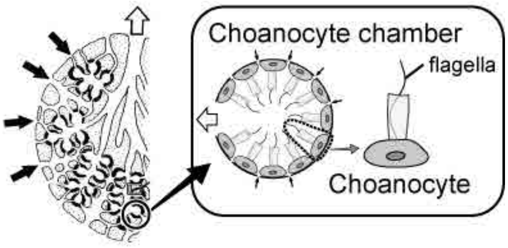


Fig. 2 Schematic image of sponge aquiferous system.

例えばカイメンは多様な動物の住みかとなることが知られており、二枚貝の 1 種であるホウオウガイは、特定の１種のカイメンのみを寄主として利用する[(2)]。この貝は腹縁を除いて完全にカイメンの中に埋在しており、カイメンの体内に向かって直接水を排出する(Fig. 3)。1 個体の中には非常に高密度にホウオウガイが生息しており、カイメンの体内を巡る水の約半分程度が二枚貝からの排水に由来する[(3)]。これはカイメンが共生する生物の生み出す水流を利用することによって、水流創出に必要なエネルギーコストを抑えているものと考えられている。

Fig. 3 A. Sponge host and sponge-endosymbiotic bivalves. The sponge inhale water exhaled from bivalves. B. Fluorescent dye dropped into the inhalant area of the bivalves. C. Dropped fluorescent dye first inhaled into the bivalve’s body, and then exhaled from specific sponge oscula. The volume of water circulating in the sponge body was dramatically increased by the water exhaled from bivalves.

3. 水輸送ネットワークとしての水溝系

カイメンの水流創出コスト削減のための戦略として、前項で紹介した共生する大型動物が生み出す水流の利用に加え、周辺の水流を利用する[(4)]、光合成微生物からの栄養供給を受ける[(5)]の３つが知られている。

上記３つの水流創出コスト削減戦略は、全て「水流をできるだけ自分で起こさない（＝鞭毛運動に使うエネルギーを節約する）」戦略と言い換えることができる。それに加えて「起こした水流を無駄なく使う」メカニズムも、カイメンの省エネルギー戦略として有効であると予想されるが、これまでにそのような観点からの研究はなかった。そこで私は、「カイメンの水溝系は水輸送に最適化されたネットワークである」という仮説を立て、現在、核磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging, MRI）、Particle Image Velocimetry（PIV）、X 線マイクロ CT などの方法を用いて、その検証を行っている。

4．バイオミメティクス研究のモデルとしてのカイメン

バイオミメティクスは、生物が持つ優れた構造や機能を模倣することにより、革新的な材料や技術の開発を行う新しい学問分野である。我々の現在の技術体系と生物が長い進化の中で築き上げてきた『技術体系』のもっとも大きな違いは、生物の形態や機能形成は脳や遺伝子など中枢からのトップダウン型の制御のみに頼るわけではなく、自己集合・自己組織化によるボトムアップ型の形態形成機構も併用するという点である。カイメンは、神経系を持たない唯一の多細胞動物であり、被食防衛や繁殖などの複雑な行動を、脳によるトップダウンの支配なしに行っている。つまり、カイメンをバイオミメティクス研究のモデルとすることによって、ボトムアップで最適な構造や機能を作り上げる手法を学ぶことができると予想される。

そのようなカイメンの特性を考えれば、カイメンはバイオミメティクス分野の新機軸となりうる高いポテンシャルを有する材料ということができ、バイオミメティクスの推進において重要な役割を果たすと大いに期待される。

(1) Hadas, E.; Ilan M.; Shpigel M. *J. Exp. Biol.* **2008**, *211*, 2185-2190.

(2) Tsubaki, R; Kato, M. *Zool. Sci.* **2012**, *29*, 585-592.

(3) Tsubaki, R; Kato, M. *PLOS ONE* **2014**, *9*, e108885

(4) Leys, S.P.; Yahel, G.; Reidenbaha, M.A.; Tunnicliffe, V.; Shavit, U.; Reiswig, H.M. *PLOS ONE* **2011**,*6*, e27877

(5) Weisz, J.B.; Lindluist, N.; Martens, C.S. *Oecologia* **2008**, *155*, 367-376.

所属機関：海洋研究開発機構深海・地殻内生物圏研究分野
氏名：高井　研
所属機関住所：〒237-0061　横須賀市夏島町2-15
e-mail：kent@jamstec.go.jp
研究キーワード：生命の起源、生命の限界、極限環境微生物、熱水循環、未到生命圏探査

アイドルは外見だけじゃない：アイドル生物スケーリーフットの秘められた魅力

Cute appearance but great scientific and application potential of scaly foot gastropods

1．はじめに

1977年に東太平洋ガラパゴス諸島沖の中央海嶺と呼ばれる海底山脈の深海底に、深海熱水活動が初めて見つかった。プレートテクトニクス理論の証明となる地球科学的な現象の発見以上に、当時ほとんど大きな生物は生息していないと考えられていた深海底に驚くべき高密度で生息する奇妙な生物群集の発見の方が、より大きな衝撃を持って受け止められた[1]。その発見は、太陽光が全く届かない深海底に、地球内部の熱エネルギーがもたらす還元的化学物質（硫化水素やメタン、水素）をエネルギー源として利用する「地球を食べる生態系」＝化学合成生物群集が濃密に（そしておそらく地球の深海底の至る所に）存在することを、たった数枚の写真によって全世界の人々に知らしめる程のインパクトがあった。以降、東太平洋だけでなく、西太平洋や大西洋の世界中の中央海嶺や海底火山などの海底に同様の深海熱水活動が見つかり、熱水活動自体の多様性やそこに生息する化学合成生物の多様性が明らかになっていった[2]（図1）。特に、東太平洋と西太平洋、大西洋では、深海熱水化学合成生物の組成が大きく異なり、熱水活動域の地理的な違いがその組成に大きな影響を及ぼしていること、そしてその地理的分布に従った熱水化学合成生物の分散・進化が東太平洋→西太平洋→大西洋の順序で進行していったとする仮説が、考えられるようになった[3]。にもかかわらず、三大洋の一つであるインド洋における深海熱水活動およびその化学合成生物群集の研究は20年以上の間、空白のままであった。

２．インド洋における熱水活動の発見とスケーリーフットという巻貝の発見

2000 年、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の調査船「かいれい」と無人探査機「かいこう」はロドリゲス三重点と呼ばれる中央インド洋海嶺、南東インド洋海嶺、南西インド洋海嶺が交わる海底付近に世界で初めてインド洋深海熱水活動（かいれいフィールド）を発見した[(4)]。限られた調査時間ではあったが、他の海域と似たような中央海嶺型熱水の存在と西太平洋と大西洋の化学合成生物群集の中間的な特徴を有する化学合成生物の存在を明らかにした。この結果は、熱水化学合成生物の分散・進化が東太平洋→西太平洋→大西洋の順序で進行していったとする仮説を裏付けるものであったが、インド洋熱水に特有の、太平洋や大西洋の生物と進化的に大きく異なる熱水化学合成生物が生息しているに違いないという期待を満たすものではなかった。一方日本の調査が行われてから 5 ヶ月後、アメリカの調査船と無人探査機による調査が近傍で行われ、インド洋で 2 例目となる深海熱水活動（エドモンドフィールド）が見つかった[(5)]（図 1）。この調査では、エドモンドフィールドだけでなく日本チームが発見したかいれいフィールドの詳細な調査が行われ、アメリカチームはかいれいフィールドにおいて、これまで他の熱水活動域では見つかっていなかったインド洋熱水に固有の極めて新しい系統の巻貝が生息していることを発見した[(5)]。それがスケーリーフットと呼ばれる巻貝であった（図 2）。

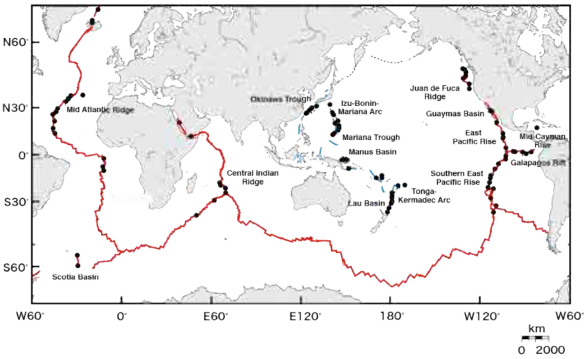


Fig.1 Location of various deep-sea hydrothermal vent systems in global ocean. Red line shows mid-oceanic ridge and blue line shows subduction arc-backarc systems.

３．スケーリーフットの特殊性

スケーリーフットは、進化系統的に極めて特異な巻貝であるだけでなく、これまでにない形態的特徴を有していた[(6)]。腹足を覆うように鱗を有し、しかもその鱗や貝殻は硫化鉄でコーティングされていた（図 2）。さらに他の化学合成巻貝が、化学合成共生細菌を鰓に細胞内共生させているのに対し、スケーリーフットは消化管の一部に特殊な組織があり、そこに硫黄細菌を共生させている。このようなそれまでの深海生物の常識をことごとく打ち破る特徴を有するスケー

Fig.2 A scaly foot gastropod found in the Kairei hydrothermal field.

リーフットは一躍、熱水性深海生物や化学合成共生の研究者だけでなく、生物マニアを含む一般の人々にまで知られるアイドル生物となった。我々の研究グループは、2002年と2006年に調査船「よこすか」と有人潜水船「しんかい6500」を用いてかいれいフィールドを再訪し、スケーリーフットを含むその化学合成生物の研究を開始した。我々の研究グループの興味は、スケーリーフットの生理・生態と共生システム、そして硫化鉄生物鉱化作用を明らかにすることであった。スケーリーフットは、かいれいフィールドの特定の場だけに生息し、極めて限定的な生息環境と分布を示すことがわかった（図3）。また大きく分けて、消化管組織に硫黄酸化細菌、鱗や貝殻表面に別の種類の硫黄酸化細菌、軟体組織の皮膚に硫酸還元菌という 3 種類の共生系を有していた。さらに、鱗を覆う硫化鉄コーティングは磁性を有するナノ結晶から構成されており、なんらかの生物学的な制御を受けて生成される生物鉱化作用によるものであることが明らかになった[7]（図 4）。また、この生物鉱化作用による硫化鉄コーティングは材料学的に極めて堅牢であることが明らかとなり、硫化鉄コーティングが貝殻の中に収納されない軟体組織を捕食者から守るための役割を果たしていることが推測された。しかし、(a)極めて遠隔地の深海熱水環境というスケーリーフットの生息域があまりに限定されており研究機会が極めて限定的でかつ比較対象生物が存在しない、(b)系統的なサンプリングが困難で、生体試料を用いた飼育実験や発生学的な実験・分析が極めて難しい、といった状況もあり、このような精緻な硫化鉄コーティングがどのように形成され、進化的にあるいは生態学的どのような役割を果たしているかについては未明のままであった。

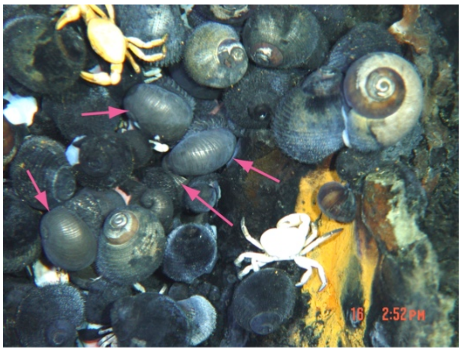


Fig.3 A photograph of a scaly foot gastropod colony at the Monju chimney site of the Kairei field.

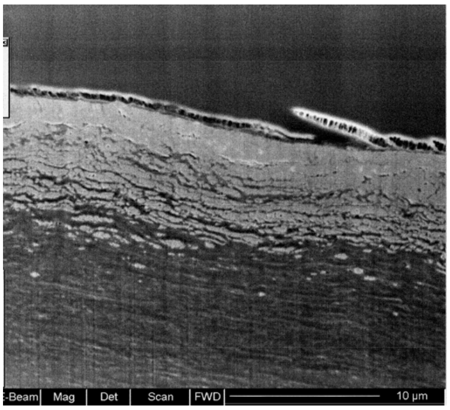


Fig.4 A photograph of a cross section of iron-sulfide coated scale. White area at the surface shows iron-sulfide crystal and black area shows a proteinaceous layer.

４．スケーリーフット三兄弟の出現

スケーリーフットは本当にかいれいフィールドの｢文殊チムニー｣サイトにしか生息しないのか？それともインド洋の他の深海熱水活動域に広く分布しているのか？たった２つの深海熱水の例のみでは、その疑問や他のインド洋熱水を巡る様々な

科学的疑問に答えることはできない。我々は、インド洋における第三、第四、そしてさらなる深海熱水を探査する必要性があった。2009 年、我々の研究グループは、調査船「よこすか」と有人潜水船「しんかい 6500」を用いて、かいれいフィールドから 600km 程北に位置する中央インド洋海嶺の深海底を調査し、インド洋における第三の熱水域（ドードーフィールド）と第四の熱水域（ソリティアフィールド）を発見した(7)。そしてソリティアフィールドにおいて、新しいスケーリーフット生息場を見いだした。興味深いことにソリティアフィールドで見つかったスケーリーフットは、茶色の貝殻と白い鱗を有した形態的特徴を有していた。遺伝的には、かいれいフィールドの黒いスケーリーフット（黒スケ）とほぼ同一の特徴（さらに共生菌の遺伝学的特徴も極めて類似）を示しながら、硫化鉄コーティングを持たない白いスケーリーフット（白スケ）だった（図５）(7)。さらに、白スケの硫化鉄コーティングされていない鱗の材料学的な強度は、黒スケの硫化鉄コーティングされた鱗よりもさらに堅牢であることが明らかとなった(7)。つまり、生物鉱化作用による硫化鉄コーティングが捕食者に対する防御のためという生態学的な推測は間違いであることがわかった。しかも、硫化鉄コーティングがスケーリーフットの種としての固定的な形質ではなく、黒スケという形態型に特徴的な形質にすぎない可能性が考えられた。かいれいフィールドとソリティアフィールドの熱水の化学的組成は大きく異なり（かいれいフィールドは水素、鉄に富む還元的な熱水であるのに対して、ソリティアフィールドでは鉄が少なく相対的に硫化鉄を形成しにくい環境）、生息場の物理・化学条件によって硫化鉄コーティングが制御されている可能性も考えられた。

Fig.5 A morphotype of scaly foot gastropod newly found in the Solitaire hydrothermal field.

　そして 2012 年、南西インド洋海嶺において見つかったインド洋第五の深海熱水であるドラゴンフィールドに、黒いスケーリーフットが生息していることが明らかとなった(8)（図６）。このスケーリーフット(ドラスケ)の研究は現在進行中であり、詳細を述べることはできないが、(a)黒スケや白スケと遺伝的には少

Fig.6 Another morphotype of scaly footDragon hydrothermal field.

し異なるものの同種と見なしてよい、(b)鱗も貝殻も硫化鉄に覆われている、(c)しかし硫化鉄は非結晶であり、生物鉱化作用の関与の可能性は小さい、(d)ドラゴンフィールドの熱水はかいれいフィールドの熱水と同様に水素、鉄に富む、と言う点が重要である。これらの情報から、鱗と貝殻が硫化鉄に覆われる現象自体は、スケーリーフットの生息する環境の物理・化学条件が大きく影響している可能性が考えられる一方で、生物鉱化作用は黒スケにおいてのみ見られる現象と言えるかもしれない。

５．スケーリーフット研究の今後

現在、インド洋の深海熱水域にのみ生息するスケーリーフットの生理・生態と共生システム、そして硫化鉄生物鉱化作用の理解を目指して、新しく発見されたドラゴンフィールドの調査とかいれいフィールドの再調査を計画している。また、スケーリーフット三兄弟のホストと共生菌のゲノム解析、トランスクリプトーム解析、鱗形成の発生学的解析、鱗タンパク質の鉱物との相互作用や鉄結合タンパク質の同定などの研究も進めている。硫化金属の結晶成長を制御するタンパク質は、微生物および動物を通じて全く報告例がなく、スケーリーフットの硫化鉄鉱化タンパク質の同定とその機能解析が進めば、硫化金属素子形成プロセスの人工制御に応用可能となるかもしれない。また、鱗自体の材料学的性質も興味深く、しなやかなのに強固な材料として、将来の人工関節やインプラントのような拒絶反応のない生体材料として利用出来る可能性もある。また貝殻の硫化鉄コーティング構造は、戦車の装甲材料として軍事利用の可能性が探られている[9]。我々の研究グループの興味は、あくまでインド洋の熱水化学合成生物としてのスケーリーフットの進化学的、生態学的そして生理・発生学的な性質・機能の理解にあるが、その生物模倣工学やバイオテクノロジーへの潜在的な可能性についても開拓していきたいと思う。

参考文献

(1) Corliss, J. B; , Dymond, J.; Gordon, L. I.; Edmond, J. M.; von Herzen, R. P.; Ballard, R. D.; Green, K.; Williams, D.; Bainbridge, A.; Crane, K.; van Andel, T. H. *Science* **1979,** *203*, 1073-1083.

(2) Ramirez-Llodra, E.; Shank, T. M.; German, C. R. *Oceanography* **2007**, *20*, 30-41.

(3) Tunnicliffe, V.; Fowler, C. M. R. *Nature* **1996**, *379*, 531–533.

(4) Hashimoto, J.; Ohta, S.; Gamo, T.; Chiba, H.; Yamaguchi, T.; Tsuchida, S.; Okudaira, T.; Watabe, H.; Yamanaka, T.; Kitazawa, M. *Zool. Sci*. **2001**, *18*, 717-721.

(5) Van Dover, C. L; Humphris, S. E.; Fornari, D.; Cavanaugh, C. M.; Collier, R.; Goffredi, S.

M.; Hashimoto, J.; Lilley, M. D.; Reysenbach, A. L.; Shank, T. M.; Von Damm, K. L.; Banta, A.; Gallant, R. M.; Götz, D.; Green, D.; Hall, J.; Harmer, T. L.; Hurtado, L. A.; Johnson, P.; McKiness, Z. P.; Meredith, C.; Olson, E.; Pan, I. L.; Turnipseed, M.; Won, Y.; Young III, C. R.; Vrijenhoek, R. C. *Science* **2001**, *294*, 818-823.

(6) Waren, A.; Bengtson, S.; Goffredi S. K.; Van Dover, C. L. *Science* **2003**, *302*, 1007.

(7) Suzuki, Y.; Kopp, R. E.; Kogure, T.; Suga, A.; Takai, K.; Tsuchida, S.; Ozaki, N.; Endo, K.; Hashimoto, J.; Kato, Y.; Mizota, C.; Hirata, T.; Chiba, H.; Nealson, K. H.; Horikoshi, K.; Kirschvink, J. L. *Ear. Planet. Sci. Lett*. **2006**, *242*, 39-50.

(8) Nakamura, K.; Watanabe, H.; Miyazaki, J.; Takai, K.; Kawagucci, S.; Noguchi, T.; Nemoto, S.; Watsuji, T.; Matsuzaki, T.; Shibuya, T.; Okamura, K.; Mochizuki, M.; Orihashi, Y.; Ura, T.; Asada, A.; Marie, D.; Koonjul, M.; Singh, M.; Beedessee, G.; Bhikajee, M.; Tamaki, K. *PLoS One* **2012**, *7*, e32965.

(9) Yao, H.; Dao, M.; Imholt, T.; Huang, J.; Wheeler, K.; Bonilla, A.; Suresh, S.; Ortiz, C. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2010**, *107*, 987-992.

所属班：B01-1班
所属機関：（一財）電力中央研究所
氏名：野方　靖行
所属機関住所：〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646
e-mail：noga@criepi.denken.or.jp
研究キーワード：海洋無脊椎動物・フジツボ・付着生物
付着メカニズム

フジツボ類の多彩な着生場所選択性

Various variations of settlement selectivity of barnacles

フジツボの仲間は 19 世紀前半まで、その外見から軟体動物（貝やイカの仲間）と考えられていたが、幼生期が甲殻類と同様の形態を経ることが明らかとなり、エビやカニの仲間である甲殻類の仲間として分類されている。フジツボ亜目は柄部を有する有柄目と柄部をもたず直接付着する無柄目の 2 グループからなり、世界的には 400 種類程度が知られており、そのうち国内には 150 種程度が生息するとされている。その分布様式も多様であり、北極海から南極海に至るすべての海域に生息し、鉛直的にも、潮間帯上部から深海数千 m まで分布している。一方、河川の影響からかなりの低塩分となる河口域には分布可能だが、淡水に生息する種は存在しない。また、一部のフジツボは寄生種としても知られており、海綿、クラゲ、カメ、クジラの表皮など生物の表面を生息場所とする種類もある。フジツボ類の付着期幼生はキプリス幼生と呼ばれ、独特な形態を取り、第一触角で好適な基盤を探索し着生時にはセメントタンパク質を分泌して固着生活へと移行する(Fig.1)。今回、我々が検討した数種類のフジツボの着生試験結果の事例を挙げながら、フジツボ類の付着場所選択性の違いについて紹介する。

我が国の沿岸で一般的にみられるタテジマフジツボ（Fig.2A)、海綿動物にに寄生するケハダカイメンフジツボ(Fig.2B)、ザトウクジラ表皮に寄生するオニフジツボ（Fig.2C)の幼生の飼育 [1]を行い、得られたキプリス幼生を用いて、それぞれの付着場所の選択過程を観察した。その結果、寄生生活を送るフジツボ類の着生行

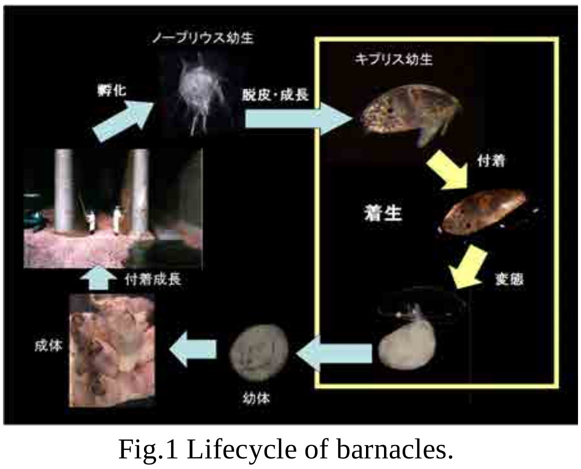


Fig.1 Lifecycle of barnacles.

動については、第一触角を用いた特徴的な探索行動を行う点は共通であったが、選択方法に違いが見られた。カイメンフジツボについては、宿主の匂い（抽出物）への反応性に乏しいものの、海綿と接した場合には、その後離脱する個体はほとんどなく、着生に至った(Fig.3)。一方、オニフジツボについては、クジラ表皮片あるいは表皮抽出物の存在により、遊泳・探索行動に変化が見られ、一部は着生に至ったが、クジラ表皮そのものへの付着は観察されなかった[1](Fig.4)。一般的なフジツボ類の付着に関しては、光、流れ、表面性状および化学物質（誘因物質・忌避物質）の存在が付着場所選択に重要であると考えられており[3]、着生誘起フェロモン[2]等も報告されている。一方、寄生性フジツボの場合には、付着場所を選択する要因が限定されている場合があると考えられた。

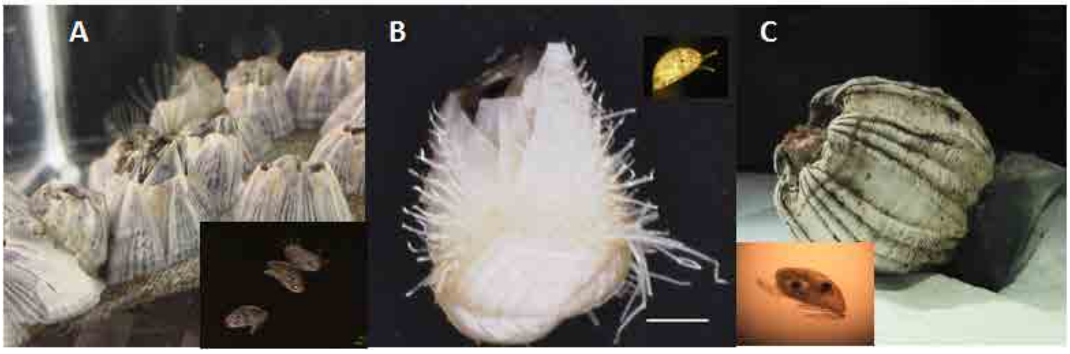


Fig.2 External shapes of test barnacle species (adult and cypris larvae).
A: *Balanus amphitrite*, B: *Acasta dofleini*, C: *Coronula diadema*

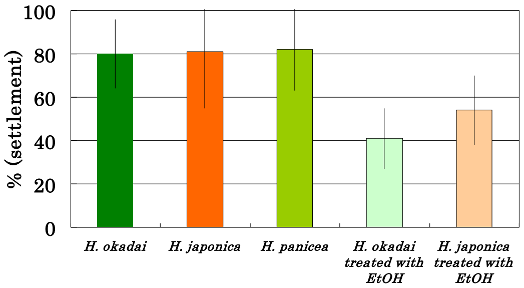


Fig.3 Settlement rates of cyprids of *A. dofleini* toward the surface of three species sponge, *H. okadai*, *H. japonica*, and *H. panicea* after 48 hours.

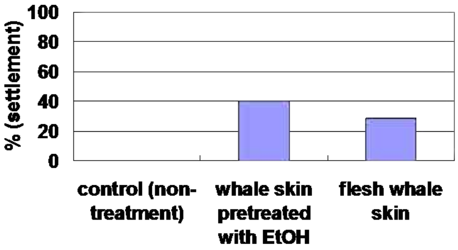


Fig.4 Settlement rates of cyprids of *C. diadema* toward the surface of petri dish after 48 hours.

参考文献

1) Nogata, Y.; Matsumura, K. *Biol. letters*, **2006**, *2*, 92-93.

2) Endo, N.; Nogata, Y.; Yoshimura, E.; & Matsumura, K. *Biofouling*, **2009**, 25(5), 429-434.

3) 松村清隆, *キプリス幼生の付着機構 1：フジツボ類の最新学*. 恒星社厚生閣；東京, 2006.

所属班：B01-1班
所属機関：千歳科学技術大学
氏名：平井　悠司
所属機関住所：〒066-8655
北海道千歳市美々７５８−６５
e-mail：y-hirai@photon.chitose.ac.jp

研究キーワード：サメ肌、自己組織化、摩擦、しわ、ディンプル

自己組織化を利用した生物模倣階層構造の作製と表面摩擦の測定

Fabrications of biomimetic hierarchical structures and surface friction measurements

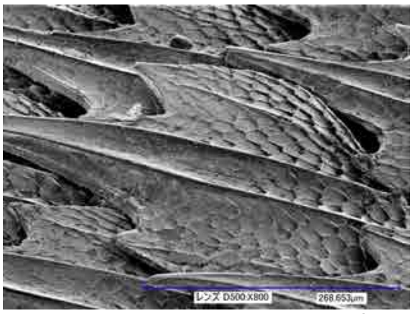


Figure 1. The SEM image of a shark skin surface.

自然界には表面微細構造により発現した機能を有する生物が多数存在している。有名な例としてはサメ肌表面のリブレット構造が有り、整流効果によって流体抵抗を軽減していると考えられている。またサメ肌表面を実際に電子顕微鏡で観察したところ、リブレット構造以外にもディンプル構造を有する階層構造を形成させている種がいることが明らかとなった(図１)。生物は不要な構造を形成させることはあまりないと考えられるので、これらのディンプル構造にも何か機能が有るのではないかと考えた。我々は自己組織化を利用して作製される高分子ハニカム状多孔質膜を鋳型として用いてマイクロレンズアレイを作製、このマイクロレンズアレイをさらに鋳型として用いて光架橋性樹脂などで構造転写することでマイクロディンプル構造の作製に成功している[1]。一方で、自己組織化を利用し、周期的な座屈構造を有する“しわ”の作製にも成功している[2]。これらの自己組織化構造はサメ肌表面に形成している階層構造と同様のスケールであることから、これらの構造を組み合わせることでサメ肌模倣構造の作製が可能であると考えた。そこで、サメ肌表面の階層構造の機能を解明するために人工的に模倣材料を作製したので報告する。

ポリスチレンと両親媒性高分子を利用してハニカム状多孔質膜を作製した。その後、

触媒を加えて良く撹拌したポリジメチルシロキサン(PDMS)の前駆体をハニカム状多孔質膜に真空オーブン中で脱気しながら流し込み、80℃で５時間熱架橋させた。架橋後はクロロホルムを用いてハニカム状多孔質膜を除くことで、ディンプル構造を作製するためのマイクロレンズアレイを作製した[3]。次に、上記と同様の方法でフラットなPDMS 基板を作製し、60 分間紫外オゾン処理することで表面を活性化させ、10wt%接着剤のイソプロパノール溶液を 1500 rpm で 90 秒スピンコートした。接着剤が硬化する前にポリイミドフィルム(厚み 12.5 μm) を貼付け、40℃のオーブンで４時間アニーリングし、ポリイミドフィルムを接着させた。その後ポリイミド前駆体溶液をスピンコートし、PDMS のマイクロレンズアレイを接着、室温で２時間、80℃で 30 分、180℃で 20 分アニーリングすることでポリイミド前駆体を熱架橋させ、ポリイミドフィルム上にポリイミドのディンプル構造を作製した。構造作製後の表面はレーザ顕微鏡にて観察を行った。また表面機能の測定として、摩擦力の測定を行った。

図２に作製したそれぞれの段階でのサンプル表面のレーザ顕微鏡像を示す。自己組織化を利用して作製された高分子ハニカム状多孔質膜の表面には孔径約 15 μm の空孔が規則的に配列している様子が観察された(図２(a))。ハニカム状多孔質膜を利用して作製された PDMS マイクロレンズアレイは周期的にハニカム状多孔質膜を形成する際鋳型となった水滴と同様の曲率を持つ構造が観察された(図２(b))。またマイクロレンズアレイを鋳型としてポリイミド上に構造転写された表面には、マイクロディンプル構造の形成が確認され、ポリイミドのマイクロディンプル構造の作製に成功した。その後これらの構造の表面を圧縮したところ、周期的なしわ構造が観察された(図３)。その際マイクロディンプル構造も破壊されることなく残っていたことから、マイクロディンプル構造と周期的なしわ構造を持つ階層構造表面の作製に成功した。

図４にこれらの表面での摩擦力測定結果を示す。表面にマイクロディンプル構造の無い、フラットなポリイミド表面の場合、しわ構造を形成させることで摩擦力が大きく低下することが確認された。これは潤滑剤が構造表面と摩擦基板との間に十分に存在しているからだと考えられる。一方で、表面にディンプル構造

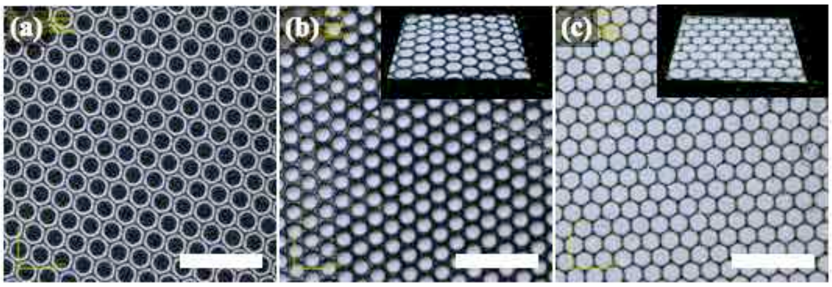


Figure 2. Laser microscope images of (a) honeycomb-patterned films, (b) PDMS microlens arrays, and (c) dimple structures. (bars; 80 μm)

を作製した場合、しわの有無にかかわらず、フラットな場合と比べて大きく摩擦力が低下していることが確認された。また微細構造が表面に有るとき、高速になると摩擦力が低下する傾向が観察され、微細構造自体に摩擦力低減効果が有ることが確認された。これらの結果から、マイクロディンプル構造自体にも摩擦力を低下させる機能はあるものの、サメ肌の持つリブレットで十分に摩擦力を下げることができるため、マイクロディンプル構造には粘液などを表面に保持させるなど、別の機能を有している可能性が示唆された。

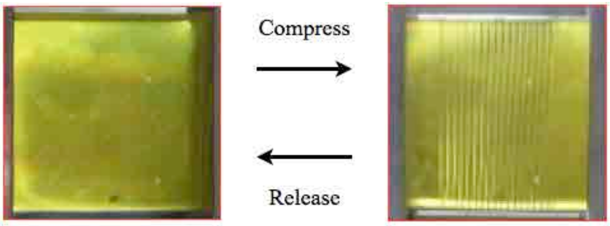


Figure 3. Photographs of before and after compress the sample surface.

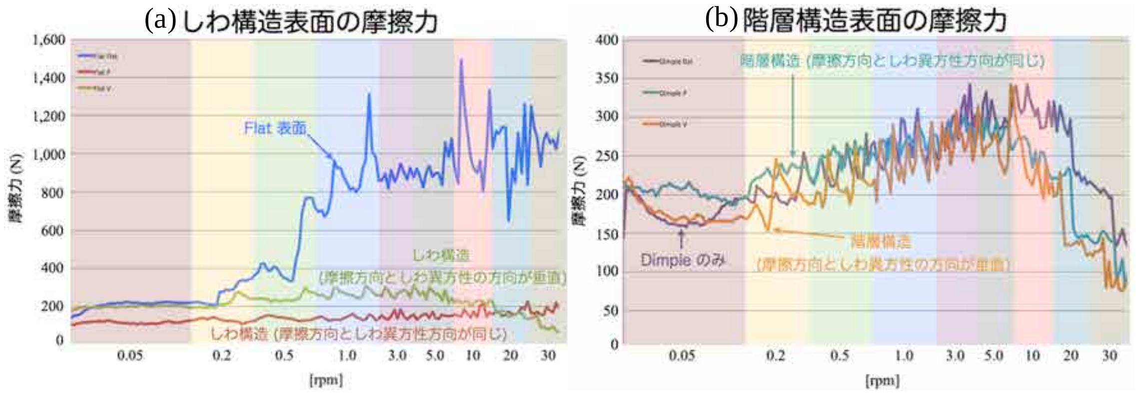


Figure 4. Graphs of friction measurements of (a) wrinkle structures and (b) biomimetic hierarchical structures.

参考文献

[1] 平井悠司、藪浩、海道昌孝、鈴木厚、下村政嗣, 高分子論文集, **70**(5), p193-198 (2013)

[2] Kosuke Suzuki, Yuji Hirai, and Takuya Ohzono, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014, **6**(13)

[3] H. Yabu, Y. Hirai, M. Shimomura; *Langmuir*, **22**(23), p9760-9764 (2006)

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」（No.24120003）を受けて行われた。また、摩擦力の測定は北海道大学の黒川孝幸准教授、小池智氏のご協力で行われた。

（4）トピックス (PENより)

寄稿

フランスにおけるバイオミメティクス

帝人株式会社　平坂雅男

1. はじめに

東北大学下村政嗣氏を代表とする ISO/TC266 Biomimetics 日本審議委員会のメンバーが 2013 年 4 月に、フランスのサンリス（Senlis）市を訪問し、ヨーロッパにおけるバイオミメティクス研究拠点の構築計画を聞く機会を得た。また、5 月にも同メンバーがサンリス市を再度訪問している。本報告では、サンリス市の研究拠点の計画を紹介するとともに、その背景となるフランス政府の動き、標準化、企業動向などについても調査した結果をまとめた。フランスでは、Biomimétisme, Biomimétiques, Biomimicry 等の用語が使用されている。Biomimétism は、Biomimicry と同様な言葉として使用されているが、哲学的な意味を含めて用いられ、技術に関連することだけでなく、組織やサービスなどを含む広義の意味で、イノベーションにつながる技術として認識されている。

2. フランス政府の動き

2007 年 3 月フランス上院から「持続可能に寄与する科学技術ー生物多様性は打撃か、チャンスか？ー」と題した報告書が発表されている [1]。現在の工業プロセスはエネルギーや原料コストなどの問題に直面しており、一方、生物プロスセスにはそれらを解決する多くの策があると考えられている。そして、生物多様性にも起因する生物の成功例に学び、ナノテクノロジーにより進歩したバイオテクノロジーと生物学との組み合わせが次の産業革命を生み出すとしている。

この報告書に続き、エコロジー・持続可能開発・国土整備省（CGDD）は、「グリーンエコノミクス実現のためのバイオミメティクスの役割に関する調査報告」を 2012 年 10 月に発表した [2]。この調査報告では、バイオミメティクと経済、バイオミメティクスの産業の現状と将来、持続可能な農業生態系の開発への利用などについて言及している。

フランスにおける現状の課題は、この分野における研究が多く行われているが、企業での開発やバイオミメティク製品とよべるものがほとんどない状態である。また、バイオミメティクスの技術は環境経済の観点からも有望である

が、研究が進んでいないことから、この分野での研究資金を増加し、研究者交流により研究を加速する必要があると考えている。さらに、バイオミメティクスへの関心は高まりつつあるが、米国やドイツのように先導する団体がなく、情報共有の場がない状態にある。このため、学際領域研究の促進、基礎研究の重視、産学連携、ライフサイクル評価、標準化などについての対応が必要であることを指摘している。

バイオミメティクスの応用において、持続可能性を評価することは、製造プロセス全体を解析しなければならないことから難しい課題であると述べているものの、研究開発拡大のための公共投資の必要性を指摘し、また、バイオミメティクスはグリーンエコノミクスの観点から、高い可能性を秘めた技術革新の方法であることも指摘している。そして、バイオメミティクスの利用促進のために、研究開発や製造方法の技術革新などのプロジェクトを推進すべきであると結論づけている。

一方、バイオミメティクスの防衛用途への応用についても考えられている。フランス国防省の下部組織である装備総局（DGA; Direction Générale de l'Armement）の B. Mortaigne は、サンリス市のバイオミメティクス拠点におけるオープニング会議で、「バイオミメティックスの軍事応用におけるイノベーション」と題した講演を行っている [3]。

防衛システムの将来に関して、新技術の探索やその技術の産業化の可能性について言及している。DGA の研究とサイエンスイノベーションのためのミッション（MRIS ;Mission pour la recherché et l'innovation scientifique）には、9 科学分野、①情報工学とロボティクス、②流体構造、③通信技術、④ナノテクノロジー、⑤フォトニクス、⑥材料化学とエネルギー、⑦生物学とバイオテクノロジー、⑧人間工学、⑨環境と地球科学が設定されている [4]。

材料・プロセス研究のターゲットとしては、構造材料、機能材料、化学、除染、プロセスシミュレーション、発電・蓄電などのエネルギー物資や技術が含まれている。

バイオミメティクスの具体的な応用としては、装備品の快適性を追求するナノ構造材料や繊維、衝撃保護として貝殻や真珠の層構造に着目、ステルス性ではカメレオン機能や光学的反射特性の利用、エンジン部品では鳥の翼からのヒント、検出センサとして生物の目の機能を模倣、エネルギー技術としてのバイオミメティクス触媒、保護・低抵抗の観点からバイオフィルムや撥水・親水技術、除染における生物の毒性除去機能の活用、また、新燃料としての藻類を代表とするバイオリソースの可能性をあげている。研究の成果については、公表されている MRIS の 2011 年次報告書には記載されていないが、今後のその一端が報告されることになる。

3. サンリス市のバイオミメティクス拠点

フランスでの一連の政府報告書が公表される以前から、ヨーロッパでの動きは始まっている。非営利団体 Biomimicry Europe は、J. Benyus, G. Chapelle , L. Schuitenrani らが中心となって、2006 年に設立された。Biomimicry Europe の主なミッションは、欧州でのバイオミメティクスの普及である。その後、バイオミメティクス

図１　バイオミメティクス拠点のコンファレンスセンターとなる建屋

フランス委員会（日本のNPO法人に対応する組織で、フランスではアソシエーションと呼ばれる組織）が、2010年にパリで設立された。そして、2012年秋には、欧州における最初の研究開発クラスターとして、パリから50km北に位置するサンリス市にバイオミメティクス拠点の構築が発表された。

サンリス市は、12世紀から13世紀に商業で栄えた地域で、現在では、中世の城壁や街並みが観光地となっている。サンリス市には、市近郊のコンピエーニュで亡くなったフランス革命で活躍したミッシェル・オルドネ将軍の名に由来するオルドネ・キャンプがあり、今まで、フランス陸軍第41通信連隊が駐屯していた。この部隊が撤退した後の駐屯地（100,000m^2）に、バイオミメティクス拠点を設立するために、現在、研究施設、ホール、ビジネスセンター、オープンラボ、住居を含む総合的な施設の整備が進められている。旧兵舎をそのままの形で利用し内部を整備し活用する予定で、歴史的な外観は保つ計画である。例えば、敷地内の乗馬訓練施設（図1）は、コンファレンスセンターとして活用される計画である。

現在、資金調達の段階ではあるが、基盤構築に1.6百万ユーロ、研究開発施設に2.6百万ユーロ、研究者の住居に3.8百万ユーロ、敷地整備に2百万ユーロ、ビジネスセンターに1百万ユーロ、企業支援に0.3百万ユーロと、総額にして約12百万ユーロの経費が必要と報じられている [5]。

サンリス市に拠点を形成するメリットとしては、地域の持続可能な開発のための戦略に適合していることや、サンリス市近郊のラン（Laon）市の産業・農業資源クラスター（IAR; Industries & Agro-Ressources）のミッションにも適合していると言われている [6]。さらに、ピカルディ・ジュール・ヴェルヌ大学、電子電気工学技術高等学院（ESIEE）や、バイオバレーと呼ばれる地区にあるコンピエーニュ工科大学（UTC）、ラサール工科研究所、国立産業環境災害研究所（INERIS）、機械工業技術センター（CETIM）、また、有機化学・鉱物学高等学院（ESCOM）等と距離的に近いメリットもある。そして、フランスの航空産業を支えるAEROLIA社のメオルト（Méaulte）市の工場との距離も近い。企業との連携については、ロレアル、ソフィプロテオル（Sofiprotéol）、アルケマ、クラリアント等の企業名があがっている。サンリス市訪問時の情報によれば、この研究拠点に15企業が参加する予定になっている。

サンリス市のPruche副市長は、「このプロジェクトは、バイオミメティクス発展に向けた研究機関と企業とのコラボレーションの場の構築でもあるとともに、地域経済の発展にも寄与する。」と述べている。このプロジェクトにより、バイオミメティクス拠点で350名の雇用が創出され、また、120から140名の学生が初期に受け入れられる見込みである [7]。

4. 標準化の動き

フランスの標準化への動きは、2011年5月にドイツ規格協会（DIN）が国際標準化機構（ISO）に提案したことから始まり、翌月には、フランス規格協会（AFNOR）が戦略評議会（CoS; Comites Strategiques）、標準化評議会（CN ; Commissions de Normalisation existantes）、および、3,000名を超える関係者に対してアンケートを実施した。その後、アンケート結果を参考にフランス案が起草され、2011年9月にはAFNORから提案書が提出されている。2020年までにバイオミメティックによる新たな市場が創出されること、また、ISO規格の重要性を考えるとフランスは標準化作業に参加することが不可欠と考え、専門委員会（TC ;Technical Committee）のスタートに賛成票を投じた。各国の投票の結果、2011年12月にはISO/TC 266 Biomimeticsがスタートし、2012年にはAFNORがISO/TC266に対応する組織となり、同年10月の第1回TC266会議には、2名の担当者が出席している。また、2013年5月にパリで開催された第2回会議には、AFNORの担当者のみならず、サンリス市副市長やバイオミメティクスフランス委員会からも担当者が出席している。さらに、会議期間中には、サンリス市のバイオミメティクス拠点構築が紹介され、サンリス市への訪問も企画された。このサンリス市での会合では、Loiseleur市長が自らバイオミメティクス拠点への期待をISO委員会メンバーに対して語っている。

5. フランスにおけるバイオミメティクス研究

フランス国内の有力な研究者は、エコロジー・持続可能開発・国土整備省の調査報告書 [2] に記載されている。J. Casas（Research Institute for the Biology of Insect）は、昆虫の空気センシングのメカニズムを、MEMSセンサの設計に応用する研究を行っている。T. Coradin（LCMCP：The Laboratory of Condensed Matter Chemistry of Paris）は、珪藻における珪化メカニズムを複製した生合成システムの研究を行っている。M. Fontecave（Collège de France）は、金属タンパク質の構造と反応性を解析し、化学合成における選択的触媒反応への応用を研究している。Y. Le Maho（フランス国立科学研究センター：CNRS）は、

オウサマペンギンの生態系調査を行っているが、ペンギンが胃の中に蓄えた栄養素で、過酷な環境のなかで孵化したひよこ（雛）を養うための能力に着目し、タンパク質の構造解析から食品の保存や新薬創出のための抗菌性の研究につなげている。また、C. Vendrely（l'universite de Cergy-Pontoise）は、蜘蛛の糸の研究から生体材料への応用を考えている。

一方、欧州連合（EU）の研究枠組み計画（Framework Program）は、世界最大規模の産学官連携イノベーションシステムであり、2007 年から 4 項目のプログラム（協力、構想、人材、能力）に基づいた第七次研究枠組み計画（FP7：期間は 2007 年～ 2013 年）がスタートしている。FP7 の実施にあたり、500 億ユーロ以上が EU 予算から支出されている。現在、フランスが代表国となっている FP7 のバイオミメティクスの関連の研究プロジェクトは 10 以上ある。その多くの研究プロジェクトは終了したが、研究内容は触媒、光合成、細胞工学と分野は様々である。現在、フランスが代表国を務めている実施中のプロジェクト（2013 年 5 月時点）は 2 件であり、そのひとつに、グルノーブル工科大が中心となる細胞工学研究としてのバイオミメティクフィルムの研究がある。具体的には筋骨格系の研究が進められている。また、CNRS のチームは、アクチンのダイナミックスをバイオミメティクアッセイにより評価する研究を行っている。

一方、研究支援組織もあり、そのひとつである Biomimethic は、シンクタンクであり、また、投資ファンドを有している。設立の背景には、ローヌ・アルプ州の高機能繊維競合クラスター、アルザス - ロレーヌ地方の繊維産業クラスター、ピカルディ地方の IAR、また、北フランスのノール・パ・ド・カレー地域の持続可能に寄与する材料開発クラスター（MAUD; Matériaux et Applications pour une Utilisation Durable）の支援のためとも言われている。Biomimethic は、年次フォーラムやコンサルティングを通じてのバイオミメティクスの普及活動、および、産業化に向けた研究支援を行っている。これらの運営費は、年間 200 万ユーロである。

また、Institut INSPIRE は、2008 年に設立された団体で、生物多様性に基づく戦略を企業や地方自治体に提供するコンサルティングを行っている。バイオミメティクスに関しては、Biomimicry Europe と提携するなど、研究支援活動にも力を入れている。

中小企業の支援組織としては、2009 年に設立されたパリ地域イノベーションセンター（Le Centre Francilien de l' Innovation）がある。地方政府と起業支援イノベーション振興機構（OSEO）からの支援とともに、企業からの出資で運営している。バイオメミティクス関連では、Eurobios 社（シミュレーションソフト）、Kinomé 社（木に関するエンジジニアリングとコンサルティング）、そして、Eel Energy 社（海流発電）を支援している。

7. 企業の動き

大手企業のエアバスの航空工学研究部長である D. Darracq によれば、エアバスでは蓮の葉の表面の撥水性を航空機のアイシング対策として応用する研究を進めている [8]。また、摩擦の特性を実現するようなサメ肌に触発された " リブレット " の研究を行っている。サメの肌は滑らかではないが、代わりに溝の形で微細構造を作っており、この構造によりサメは泳ぐ際の摩擦を低減し、エネルギー効率と速度を向上させていることがわかっている。実際の飛行試験で、このようなサメ肌構造の表面が効果をもたらし、CO_2 排出量を削減することが確認されている。このサメ肌リブレットは、ルフトハンザ航空が検証実験を実施しており、ルフトハンザ航空のホームページでも取りあげられている。

一方、翼端のウィングレットは、飛行性能を向上させるために、草原に生息する鷲の翼の形状に触発されている。このようなウィングレットは A380 で採用され、また、同様に、A320 はさらに空力効率を増加させる大きなフィン "Sharklets" が装備されている。バイオミメティック研究においては、最適化問題を解決するために遺伝的アルゴリズムを使用している。最近では、同社のホームページから、巡航高度では鳥の編隊飛行のような航法を導入することで空気抵抗を減らし、燃料消費を抑制できるような技術や、また、鳥類の骨構造を模倣して航空機の機体構造を設計するなどの将来技術にも関心が高いことがわかる。

バイオミメティクスによる設計として、ルノーのコンセプトカー "Twin'Z" には、木からインスピレーションを得たとされる自動車のホイールキャップが装着されている。一方、化粧品のロレアルは、毛髪の研究からセラミドがキューティクルを保護し毛髪保護効果があることを明らかし、人工セラミドを開発しヘアケア用品に利用している。

バイオミメティクスの技術を探索し、自社での活用を検討している企業もある。スエズ・エンバイロメント（Suez Environnement）社は、フランスに本社を置く水処理・廃棄物処理会社であるが、2010 年に投資ファンド "Blue

Orange" を立ち上げ、水処理・廃物処理への革新的技術の開発支援を行っている。初期段階では、0.5 から 200 万ユーロの投資が可能である。具体的には、生物学的プロセスによる有機物の分解技術や水処理機器の部品デザインにバイオミメティクスを活用することに関心が高い [9]。

7. おわりに

フランスにおけるバイオミメティクスへの関心は高く、政府、バイオミメティクス拠点となるサンリス市のような地方自治体、大学・研究機関、そして、企業が急速に連携を図ろうとしている。ドイツの BIOKON のような団体はないものの、今後、サンリス市のプロジェクトを中心とした組織体制ができるであろう。政府は、バイオミメティクスを科学技術政策として位置づけ、環境技術としての関心が高いだけでなく、防衛技術としての応用展開を図ろうとしていることは驚くべきことである。フランスが提言しているように、政府による研究開発投資、学際領域研究の促進、産学連携などが着実に前進している印象を受けた。

References：

[1] P. Laffitte, C. Saunier: “Les apports de la science et de la technologie au développement durable, Tome II : La biodiversité : l'autre choc ? l'autre chance ?”, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (2007).

[2] Commissariat general au developpement durable: “ Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France”, Études et documents - Numéro 72 – October, 2012.

[3] B.Mortaigne: “Innovation dans les applications de Défense Intérêt du biomimétisme”, Biomimétisme Senlis、20 September, 2012.

[4] Directio Générale de l’Armemen: “Mission pour la rechercheet l’innovation scientifique Bilan 2011” (2012).

[5] “Le quartier Ordener va devenir une technopole”, Le Parisien 7 Octorber 2012.
http://www.leparisien.fr/

[6] D. Gronier: “Chimie verte et développement durable”, Biomimétisme Senlis, 20 September, 2012.

[7] “Un centre pour copier la nature va éclore”, Le Courrier picard 19 September, 2012.

[8] H. Meddah: “Chez Airbus, la nature reste une source d’inspiration” , L'usine Nouvelles, www.usinenouvelle.com, 15 September, 2010.

[9] D. Helaine: “Le Biomimétisme：vecteur d’Innovation pour les métiers de l’Environnement ?”, Biomimétisme Senlis, 20 September, 2012.

寄稿

生物の不思議を工学に移転する技術 －バイオ TRIZ という技法－

新潟大学工学部　山内健
大阪大学基礎工学部　小林秀敏

はじめに

近年、高効率・高性能な生物機能を材料設計に取り入れる生物模倣工学、いわゆるバイオミメティクスの研究が活発に進められている [1]。生物模倣工学あるいはバイオミメティクスに関する論文も年々増えており、産業における実用化への期待も日増しに高まっている。蓮の葉の表面構造に倣った自己洗浄型ペイント、ヤモリの足裏の微細構造からヒントを得た脱着が容易なテープ、蛾の複眼の構造を模倣した無反射フィルム、サメの皮膚を模倣した高速で泳ぐことのできる水着、ハコフグの骨格を取り入れた車体設計、モルフォチョウの構造色を実現したパッケージラベルなどがよく知られている。生き物の種類は 150 万種以上といわれており、膨大な数の機能が報告されているが、どの生物機能に着目すれば、新材料の開発に役立つのか、また、最適な材料設計に結びつくのかは未知数である。選択肢がありすぎて、一つに的を絞れないという矛盾に悩まされる研究者も多い。すなわち現在の生物模倣工学では、ケースバイケースの材料設計が主となっており、無尽蔵の生物機能の一部しか利用されておらず、必要とする技術要素を見つけ出す効果的な方策もないのが現状である。それゆえ生物機能を工学技術に結びつける方策の体系化は、この分野を発展させていくうえで必要不可欠なものといえる。偶然のひらめきに頼るのではなく、発明や問題解決の定石を体系化した指標があれば、技術革新への大きな扉となると期待できる。

工学的な課題解決法には、いろいろな手法が知られている。ビジネスフレームワークを活用した SWOT 分析、ロジックツリー、オズボーンのチェックリスト、マインドマップをはじめ、品質工学における QC 法、タグチメソッドなど様々な方法が導入されて、成果を上げている。その中の一つで、機械工学における材料設計のアイデア創出法として、TRIZ が 1990 年代から様々な分野で取り上げられるようになった。TRIZ はトゥリーズと発音される。TRIZ は、ロシアの特許審議員であった Genrikh Saulovich Altshuller 氏が、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。ロシア語で発明的問題解決理論を意味する "Теория решения изобретательск их задач" の頭文字をとっている。下線部はキリル文字で、それぞれ T、R、I、Z を表している。この方法の特徴は、工学技術を解決するため

の原理原則が提示されており、解決したい問題をパターン化することで、研究分野を問わず問題解決のヒントが得られる点にある [2-6]。 すなわち、250 万件の特許例を解析して得られた問題解決の原理が、40 個の宝の箱に詰まっており、その宝箱から、自分の直面している問題に適した解決法のヒントを探し出すということになる。ロシアで開発されたこの技法が、1989 年のベルリンの壁の崩壊とともに世界中に知られるようになり、1990 年代になって各分野で導入され始めた、古くからある新しい学問といえる。日本では、1997 年に三菱総合研究所が TRIZ ソフトを世に広め、多くの企業による TRIZ の工学的利用が行われている。また、2005 年に日本 TRIZ 協議会が発足し、2007 年には日本 TRIZ 協会が設立されている [7]。

TRIZ は、世の中の矛盾、ジレンマを解決するヒントを提供している。3E トリレンマという言葉が叫ばれて久しいが、いまだに我々はこの 3 つの矛盾を解決できないどころか、ますます深刻な負のスパイラルに落入っているといえる。3E トリレンマとは、Economy が発展すれば、Energy が必要となり、Environment が破壊されるため、すべての E が良い方向に進むことはできないという矛盾である。新興国の発展が目覚ましく、3E トリレンマは今後、さらに深刻となる時代を迎えるであろう。環境破壊を食い止めながら、心豊かに暮らせる未来社会はないものだろうか？今こそ、氷河期をはじめ活火山の大爆発や巨大隕石の衝突など、地球環境の大きな変動の中でサバイバルを繰り返してきた賢い生き物の知恵を、拝借したいと思うのは至極当然のなりゆきではないだろうか。生き物の知恵を偶発的なひらめきではなく、定石によって工学に反映することができれば、地球にやさしい賢い解決法となると期待できる。40 の宝箱に 150 万種の生物が持っている知恵を詰めて問題解決のヒントとして提案するという発想がバイオ TRIZ である。

地球にやさしく賢い解決法は？

バイオ TRIZ は前バース大学教授の J. F. V. Vincent 氏らによって提唱された新しい概念である。自然界に見られる高効率な生物機能を、TRIZ における 40 の問題解決原理に取り入れて体系化するというものである。例えば、金属工学や機械工学では、材料に孔を開けるということは材料強度の低下を意味する。しかしながら、生物は孔を開けることで亀裂を停止させる精巧な仕組みを作り出して、材料の強度を維持しながら同時に軽量化も実現している。このように、生物機能は特許となる新技術の宝庫であり、次世代材料開発のヒントを提示するとともに、新たなエンジニアリング・デザイン教育への貢献も期待できる。次世代材料の開発では自然調和、低環境負荷、バイオマス利用などを考慮する必要があり、低エネルギーで有効に機能する材料の創製が必要不可欠となっている。

以下で、TRIZ の簡単な概説、バイオ TRIZ の説明と実例の紹介、この分野の世界的動向について紹介する。

TRIZ について

TRIZ の特長は、工学技術を解決するための原理原則が提示されており、解決したい問題をパターン化することで研究分野を問わずに問題解決のヒントを得ることができる点にある。①プリンシプル、②プレディクション、③イフェクツなどいくつかの活用法があるが、ここでは 40 の解決原理を有効利用するプリンシプルを活用した問題解決法を紹介する。プリンシプルでは表 1 に示す 39 項目にわたる物理特性を ” 解決したい問題 ” と “ 改善すると不具合が生じる問題 ” として 39 × 39 のマトリックスを作る。各マス目には表 2 に示す 40 の解決原理の中から適切な方法が記載されていて、この原理をヒントに解決案を考える方法である。このマトリックスは「矛盾マトリックス」といわれている。例えば、「離れたところでも利用できる指示棒を開発したいが、指示棒の体積が大きくなってしまう」という課題があるとする。改善点は「指示棒の長さ」で矛盾点は「体積が大きくなってしまう」となる。これを矛盾マトリックスに当てはめると、図 1 のように、3 行 7 列目のマス目に、解決案のヒントとして 7. 入れ子構造、14. 多次元移行などが提示される。前者であれば、釣竿式に伸縮するペン型の指示棒、後者であれば、空間を移動することに想起されたレーザーポインターなどの発想に至ることができる。

この TRIZ の長所は、種々の学問・技術について専門性が低くてもアイデアが生まれやすいため、専門外の研究に関しても様々なアイデアを提案することができる点にある。

表 1　TRIZ における 39 の物理特性

（１）　移動物体の重量
（２）　静止物体の重量
（３）　移動物体の長さ
（４）　静止物体の長さ
（５）　移動物体の面積
（６）　静止物体の面積
（７）　移動物体の体積
（８）　静止物体の体積
（９）　速度
（１０）力（強さ）
（１１）応力または圧力
（１２）形状
（１３）物体組織の安定性
（１４）強度
（１５）移動物体の動作時間
（１６）静止物体の動作時間
（１７）温度
（１８）照度
（１９）移動物体のエネルギー消費
（２０）静止物体のエネルギー消費
（２１）出力
（２２）エネルギー損失
（２３）物質損失
（２４）情報損失
（２５）時間損失
（２６）物質の量
（２７）信頼性
（２８）測定精度
（２９）製造精度
（３０）物質が受ける有害要因
（３１）物体が発する有害要因
（３２）製造の容易性
（３３）操作の容易性
（３４）修理の容易性
（３５）適応性または融通性
（３６）装置の複雑度
（３７）検知と測定の困難度
（３８）自動化の範囲
（３９）生産性

表 2　TRIZ における 40 の問題解決原理

（１）　分割原理
（２）　分離原理
（３）　局所性質原理
（４）　非対称原理
（５）　組み合わせ原理
（６）　汎用性原理
（７）　入れ子原理
（８）　つりあい原理
（９）　先取り反作用原理
（１０）先取り作用原理
（１１）事前保護原理
（１２）等ポテンシャル原理
（１３）逆発想原理
（１４）曲面原理
（１５）ダイナミック性原理
（１６）アバウト原理
（１７）他次元移動原理
（１８）機械的振動原理
（１９）周期的作用原理
（２０）連続性原理
（２１）高速実行原理
（２２）「災い転じて福となす」原理
（２３）フィードバック原理
（２４）仲介原理
（２５）セルフサービス原理
（２６）代替原理
（２７）高価な長寿命より安価な短寿命原理
（２８）機械的システム代替原理
（２９）流体利用原理
（３０）薄膜利用原理
（３１）多孔質利用原理
（３２）変色利用原理
（３３）均質性原理
（３４）排除/再生原理
（３５）パラメータ変更原理
（３６）相変化原理
（３７）熱膨張原理
（３８）高濃度酸素利用原理
（３９）不活性雰囲気原理
（４０）複合材料原理

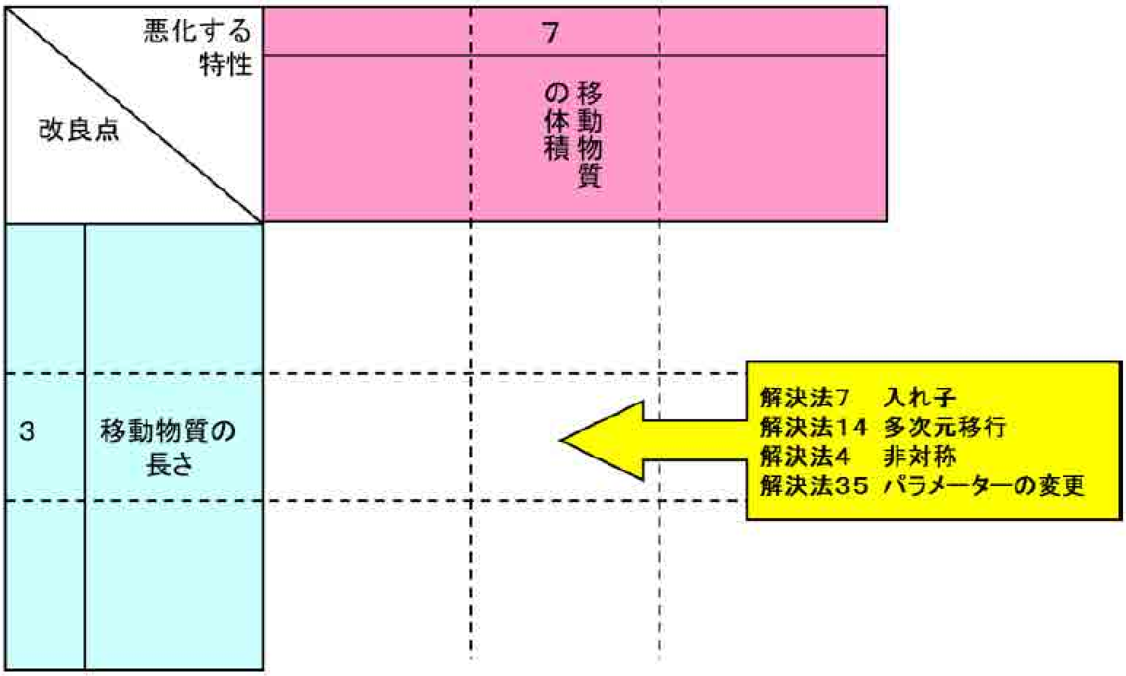


図 1　問題解決のためのマトリックス

詳細については既書を参考願いたい [2-6]。

バイオ TRIZ について

ここまで TRIZ による問題解決法の仕組みについて説明してきた。この手法では、必ずしも解が 1 つでない課題に対して、問題点を的確に発見をすることで、専門性が低くても様々なアイデアを提案して実用的な解決方法を導き出すことができる。

この技術問題解決法は、次世代材料開発への転用も期待されている。次世代材料の開発では、自然調和、低環境負荷、バイオマス利用などを考慮する必要があり、低エネルギーで有効に機能する材料の創製が不可欠となっている。J. F. V. Vincent 氏らはバイオ TRIZ という新しい概念を提唱している [8-13]。自然界に見られる高効率な生物機能を TRIZ における 40 の問題解決原理に取り入れて体系化している。

ここで、生物の機能を工学特許に移転するバイオ TRIZ の発想について、いくつかの例を挙げて紹介する。

例 1：孔の有効利用

不動物体の耐久性を改善したいが、物質の量が問題となる場合、31．多孔質利用の原理が有効である。TRIZ では機械工学の観点から金属、無機材料に孔をあけることは材料の劣化を意味するため、多孔質構造は限られた利用となっている。一方、多孔質は、生物界では様々なところで用いられており、植物は網目状の導管で水を輸送し、昆虫は外皮に孔を開けることで亀裂を停止させる精巧な仕組みを作り出し、材料の強度を維持しながら軽量化も実現している。また、ハチの巣は六角形を配列することで、平面を効率的に利用している。三角形、四角形でも平面を隙間なく充填できるが、六角形は機械強度に優れているだけでなく、1 ユニットあたりの空間が他の形状に比べ広い。さらに、ハチの巣作りの作業を観察すると、3 方向に移動するだけで六角形を作り出せるため、作業が単純で非常に効率的である。この仕組みを利用した特許事例でみると、絆創膏の材料強度を維持しながら伸縮性の改善と薬液量の増加を図る手段として、ハニカム構造の絆創膏が開発されている [14]。

生物にヒントが！

例 2：マイクロバイオリアクターの改善

近年、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、流路材料の質量増加が障害となる場合や、生物関連物質の増量が必要になる場合がある。この問題に対しては、表 2 の 18. 機械的振動原理、19. 周期的作用原理、29. 流体利用原理、38. 高濃度酸素利用原理が有効な解決手法として挙げられる。TRIZ の解答例では、18. 機械的振動を利用して問題解決をする手法が有効と考えられ、システムに機械的振動を与えることで、酵素固定化微粒子間の空隙を生み出し、生化学反応の効率を向上させ、流路も確保するなどが発案される。一方、バイオ TRIZ では、ヒトデの管足や小腸の柔突起のような、ロッド配列構造の付与が発想できる。柔突起が海藻のように揺らぐので、溶液が流速を落とさずに流れていくことが期待できる。実際、マイクロロッド状ゲルの配列体を用いたバイオリアクターが、高性能なリアクターとして機能することが報告されている [15]。また、TRIZ では、19. 周期的作用原理から、洗浄速度を維持しながら水量を抑える技術として、断続的に水を噴射するウォシュレットが開発されている。一方、バイオ TRIZ では、カタツムリの移動やヒトデなどの管足の屈曲と伸縮など 29. 流体利用原理に対応した水力学的なヒントが生まれている。

以上、一例を挙げたに過ぎないが、TRIZ はこれまで我々の社会を支えてきた金属や金属酸化物などハードなマテリアルの開発やそれらがパーツとなった機械系のシステム構築に適応していたのに対して、バイオ TRIZ による解決案のヒントは、生物のしなやかさに基づくソフトなマテリアルによる材料開発やシステム構築に適している。バイオ TRIZ を利用することで、自然調和、低環境負荷、バイオマス利用などを考慮した低エネルギーで有効に機能する材料の創製およびシステム構築が期待できる。さらには既存の特許に対して、新たな解決法を提案することになるので、専門性が低くても生物の機能や仕組みを用いて、様々なアイデアを提案することで、新たな特許を生み出すことができる。

バイオ TRIZ のグローバルな動き

イギリスでは前述の Vincent 氏の共同研究者らが Bio-TRIZ Ltd を創立して、企業との共同研究、特許化、バイオ TRIZ 講習会、ワークショップ、啓蒙活動などを積極的に行っている [16]。ここでは Bio-TRIZ を体系化したデータベースの構築にも取り組んでいる。また、英国ブルネル大学の D. Harrison 氏らは環境負荷の要素を取り入れたチャート図と TRIZ を併用することで、バイオ TRIZ の支援ができることを唱えている [17]。環境負荷の要素として、1. 原料の量、2. エネルギーの利用量、3. 高機能化、4. 健康および環境破壊の危険度、5. 原料の希少価値、6. リサイクルの可能性の 6 項目をチャート軸として、矛盾マトリックスの 39 項目にわたる物理特性と関連づけながら、問題を解決するという手法である。一方、アメリカのジョージア工科大の A. K. Goel 氏らはバイオ TRIZ を問題提起型の解決法ととらえ、解決案提示型で生物機能を工学技術に移転する手法を提案している [18]。両方を比較すると図 2 のようになる。(a) に該当するバイオ TRIZ では、問題の再定義を的確に行うことがアイデア創出の重要なポイントとなり、自分たちの技術を利用できる生物の解を見つけ出せれば、有効なアイデアになりやすいと考えられる。一方、解決案提示型 (b) の場合は、生物機能の原理を利用した工学的技術をどのように探し出すかがポイントとなる。

おわりに

ここまで、バイオ TRIZ という手法を紹介して、生物の不思議を工学に移転する可能性について探った。生物機能は新たな特許となる技術の宝庫であり、生物機能を整理して、その中に潜む規則性を理解することで、工学の定石とすることができれば、新たなエンジニアリング・デザインへの貢献が期待できる。TRIZ を利用したことのある方は、思い描いたとおりにはアイデアが出るわけではないことを実感されていると思う。バイオ TRIZ も産声を上げたばかりの手法なので、玉手箱を開けても年を取るだけかもしれない。多くの研究者が集い、研鑽を積むことでなんとか打ち出の小槌としたいものである。

人々が生物の仕組みに憧れを持つ背景には、古から飛べない人間が大空を飛翔する鳥に憧れるのと同じ心理が、今の日本社会にあるからであろう。大震災による自然への畏敬、復興における自然エネルギーの見直しはもちろんだが、グローバル社会の本質をとらえることが難しく、そのうえプレーヤーが新興国に変わろうとしているゲームの勝ち方が分からないという閉塞感が、我々を生物の知恵に憧憬させている一因であろう。これらの問題を解決して、心豊かに暮らせる未来社会の実現には、技術革新も大切であるが、技術だけでなく、要素技術を集積したシステムをどのよう

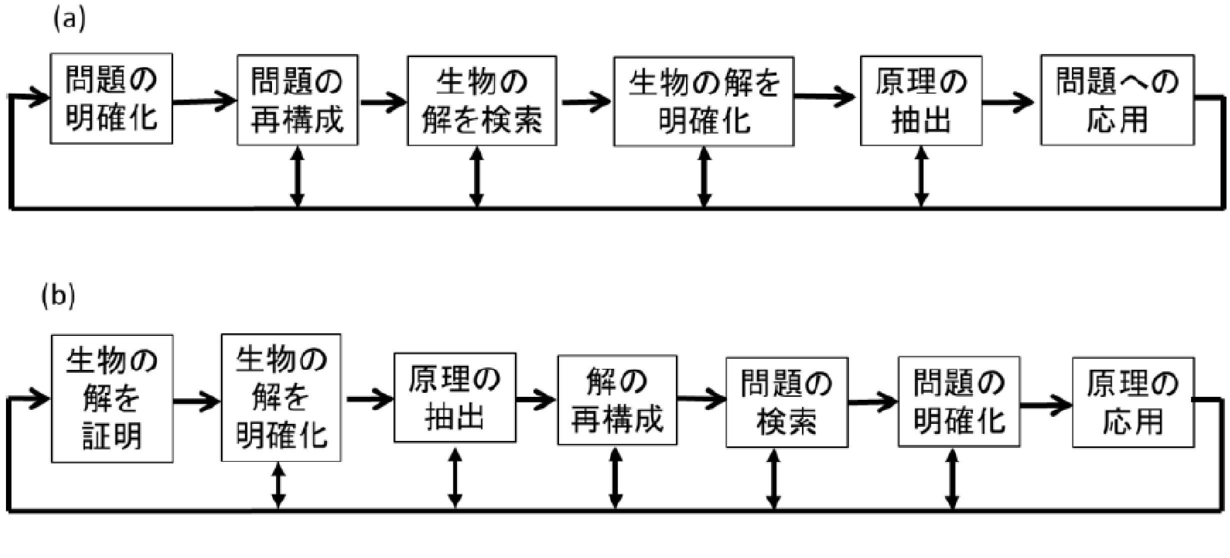


図 2　生物模倣による課題解決
(a）問題提起型の解決過程、(b）問題解決型の解決過程

に構築するかが成功のカギであろう。生物の共存共生の仕組みを真剣に学ぶことで、解決の糸口が見いだせるのではないだろうか。バイオ TRIZ はシステムの改善にも大きな力を発揮できるので、このバイオ TRIZ を通して生物の知恵が心豊かな社会の構築に貢献することを期待したい。

References：

[1] 下村政嗣、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、Science & Technology Trends, 9-27 (2010) など、多数

[2] G. S. Altshuller, Godon and Breach science publishers, 1-223 (1984).

[3] 澤口学、VE と TRIZ、56 － 153、同友館（2002).

[4] 笠井肇、開発設計のための TRIZ 入門、35-175、日科技連出版社（2006)

[5] 粕谷茂、図解これで使える TRIZ/USIT、15-74、日本能率協会マネージメントセンター（2006)

[6] 長谷部光雄他、はじめようカンタン TRIZ、日刊工業新聞社（2007)

[7] 日本 TRIZ 協会 http://www.triz-japan.org/

[8] J. F. V. ビンセント、バイオミメティックスハンドブック、エヌティーエス、3-14 (2000).

[9] J. F. V. ビンセント、バイオミメティックスの新展開、エヌティーエス、9-25 (2002)

[10] J. F. V. Vincent and D. Mann, TRIZ in Biology Teaching, the TRIZ Journal, September (2000).

[11] D. Mann, Integrating knowledge from biology into the TRIZ framework, the TRIZ Journal, October (2001).

[12] D. Mann, Complexity increases and then, the TRIZ Journal, January (2003).

[13] J. F. V. Vincent, Biomimetics – its practice and theory, J. R. Soc. Interface, 3, 9, 471-482 (2006).

[14] 石田寧他、特許公開 2007-236831 (2007).

[15] 西山聖他、Bio-TRIZ を導入した高分子ゲルバイオリアクターの開発、高分子論文集、70, 7, 331 － 336(2013)

[16] Bio-TRIZ Ltd　http://www.biotriz.com

[17] E. Jones and D. Harrison, Investigating the use of TRIZ in Eco-innovation, The TRIZ Journal, September (2000)

[18] A. K. Goel, An information-processing account of creative analogies in biologically inspired design, Eighth ACM Conference on Creativity and Cognition, Atlanta, Nov 2011, pp. 71-80. (2000)

寄稿

ハイブリッド材料創製のツールとしての接合技術

（独）物質・材料研究機構　主任研究員　重藤暁津

1. 接合による材料ハイブリッド化

昨今、ハイブリッドというキーワードが様々な分野で用いられている。自動車におけるガソリンと電力のハイブリッド使用や生物、植物などの品種改良など、ハイブリッド化の対象は多岐にわたるが、総じてその目的は、それぞれのモノが持つ複数の機能や特長を統合することにある。焦点を材料科学に絞ってみると、ハイブリッド化の意義は実に明確で、「相反する物性の両立」と言及して過言ではないと考えられる。たとえば、車体や建築資材などに用いられる構造材料やスマートフォンなどの電子機器材料では、柔軟性がありかつ丈夫で軽量な性質が求められるようになっているが、これらの性質を司る物性“強さと粘さ”や“堅さと脆さ”は相補的な関係にある。したがって、この問題を単一の材料で解決するためには、材料内部の結晶構造や電子状態の高度な制御や、別種原子の挿入など、複雑な材料創製手法が必要である。そのようにして得られた高機能な単一材料は、材料全体にわたり均質な特性を発現できるという利点がある反面、製造・加工手法の複雑化にともなう生産コストの増加や、特殊なプロセス雰囲気などの使用による環境的負荷の増大が課題となる。そこで、複数の材料のアセンブリが昨今盛んに試みられている。アセンブリという単語からは一見、機械部品の組み立てのようなイメージを受けることが多いが、アセンブリの第一義は“合同”や“会合”など、複数の機能を統合し、より良い性能を発揮するように努めるということにある。材料のアセンブリには、接着、接合、コーティングなど広範な工学的手法が含まれる。これらの手法は、複数の材料の表面間を接触させてある反応を引き起こし、その結果として物性的に連続的な界面を形成し、その界面を介してハイブリッド化された材料全体が獲得可能な物性範囲を従来のものより拡張するというものである（図 1）。

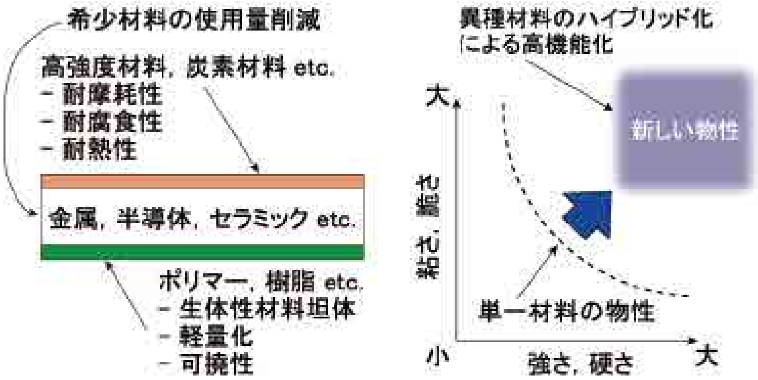


図 1　材料ハイブリッド化がもたらす物性の向上

2. 電子実装分野での接合技術

材料ハイブリッド化の特長を活かす傾向が強い分野の一つとして、電子デバイス製作ならびにその実装技術が挙げられる。軽量小型携帯機器に見られるように、現在の LSI にはアナログやデジタルなどの異種信号を高密度に混載することが強く求められているが、このためには、従来の実装技術が搭載対象としてこなかった新しい材料 - たとえば有機材料や生体親和性材料 - を適用し、その担体基板と従来の電子回路を統合する必要がある。この要求に従来の半導体微細加工技術に基づいた基板上の一括形成の進展でのみ対応することは難しいため、それぞれの基板を個別の工程で形成した後、必要な機能に応じて任意の組合せでアセンブリしてシステム化をする手法を考案しなければならない。さらに、軽量小型の特長を失わないためには、それぞれの基板を層状に薄型化し、3 次元積層することが不可欠である（図 2)。そして、このようなアセンブリ構造を十分な機械的・電気的信頼性を有する状態で得るためには、異種材料が同一面上に混在する表面全体で良好な接合性が確保されなければならない。

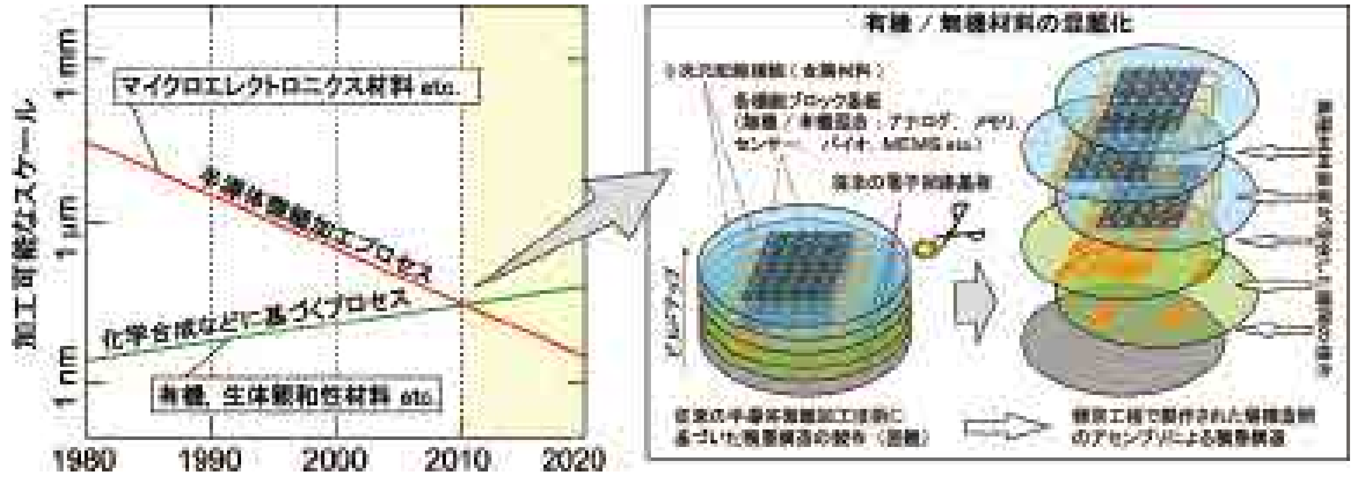


図 2　材料の加工可能なスケールの傾向ならびにアセンブリが可能にする多機能な有機無機混載電子実装技術の模式図

電子実装分野における接合技術を用いた材料ハイブリッド化では、1）低温、2）大気圧、3）低毒性、4）接合界面の良好な電気的機械的性能、が主要なキーワードである。まず、1）の接合プロセスの低温化は、熱膨張係数の大きく異なる材料を±数ミクロン以下の位置決め誤差で接続するのに必須である。また、従来の加熱を要する接合手法の多くでは、材料融点の半分近い高温を保持する必要があったことに比べると、消費電力の低下につながることも期待できる。低温化に明確な基準はないが、有機基板の耐久性やガラス転移温度などに基づき、多くの文献では 150 ℃～ 200 ℃程度を目安としている。次に、2）や 3）に示されるプロセス雰囲気に関する条件は、真空雰囲気や有毒薬剤を用いないことによる装置構造の簡易化や低環境負荷化を進行させるために必要である。理想的には材料の種類を問わず通常大気中で全手順が実行できることが望ましいが、大気中では高真空雰囲気と異なり、接合性に大きく関与するパラメタが複数同時に出現するため、大気圧の不活性ガス雰囲気などで代替することも十分に実現性がある。このことについては後述する。さらに、このような低温大気圧の雰囲気で異種材料間に形成された接合界面微細構造

の経時的な振る舞いは、従来の手法で形成されたものと異なることが多く、結果として接合性能や長期的な信頼性に大きく影響するため、接合進行のメカニズムや接合後の構造変化を明確にすることが求められる。当然、これらの技術的要求を全て満たすことは容易ではない。もっとも重要なキーワードである低温化については、金属低温拡散接合に基づく手法 [1] や酸化物親水化接合と金属拡散接合を組み合わせた手法 [2]、接着剤の役割を果たす物質を間に挟む手法 [3] など、様々な先駆的な試みがなされてきた。また、真空雰囲気中でのビーム衝撃を用いる手法 [4] は、材料の表面が本来有する結合力を発揮させるように表面を改質するため、信頼性が高い接合界面を得るのに貢献してきた。しかし、どの手法においても、低温化に加えて異種材料への汎用性を大気圧雰囲気中で獲得することが課題として残されていた。

3. 水を接着剤代わりに用いたハイブリッド接合

前述のビーム衝撃を用いる手法を例にとり、異種材料の接合性について述べる。通常、大気中にさらされている材料表面には様々な物質が吸着し、化学的に安定な層が形成されている。このため、単純に二つの材料を接触させても結合しないことが多い。しかし、たとえば宇宙空間のように、吸着する物質が極端に少ない真空雰囲気で衝撃を与えてこの安定な層を除去すると、材料内部の原子層がこれらの物質とつないでいた“手”が取り残されることになる。このような表面どうしを接触させれば、余っていた“手”どうしが再びつながれ、安定な一つの物体になる（図 3a)。この原理を用いた手法では材料どうしが直接常温で接合されることから界面の高い信頼性が期待でき、現在は半導体基板の接合装置などで広く実用化されている。しかし、この手法が有効に働くのは金属材料と共有結合性材料にほぼ限られるという問題がある。その他のイオン結合性材料や有機材料などには、表面の安定な吸着物層の除去に加え、接着剤の役割を果たす層が形成される必要がある（図 3b)。この接着剤の役割を果たす層には実に多種多様な物質が利用可能で、乱暴な表現をすれば、接合したいそれぞれの材料と電子のやりとりが可能な物質であれば何でも良いと言える。最近では、極薄膜を形成する技術が成熟している金属材料や半導体材料を用い、イオン結合性材料とその他の材料をハイブリッド接合した事例が報告されている [5, 6]。この方法には、絶縁体材料に導電性をある程度有するイオンを導入することや、極薄膜構造の制御が難しいなどの課題が散見されるものの、異種材料が常温域で強固に接合されることが実証され、一部が工業用接合装置に応用されている。

大気圧雰囲気中でのハイブリッド接合は、この技術をもう一歩進展させたものである。まず、前述の極薄接着層を用いた接合手法を、有機・生体親和性材料にまで拡張するためには、これらの材料に汎用性の高い、金属や半導体以外

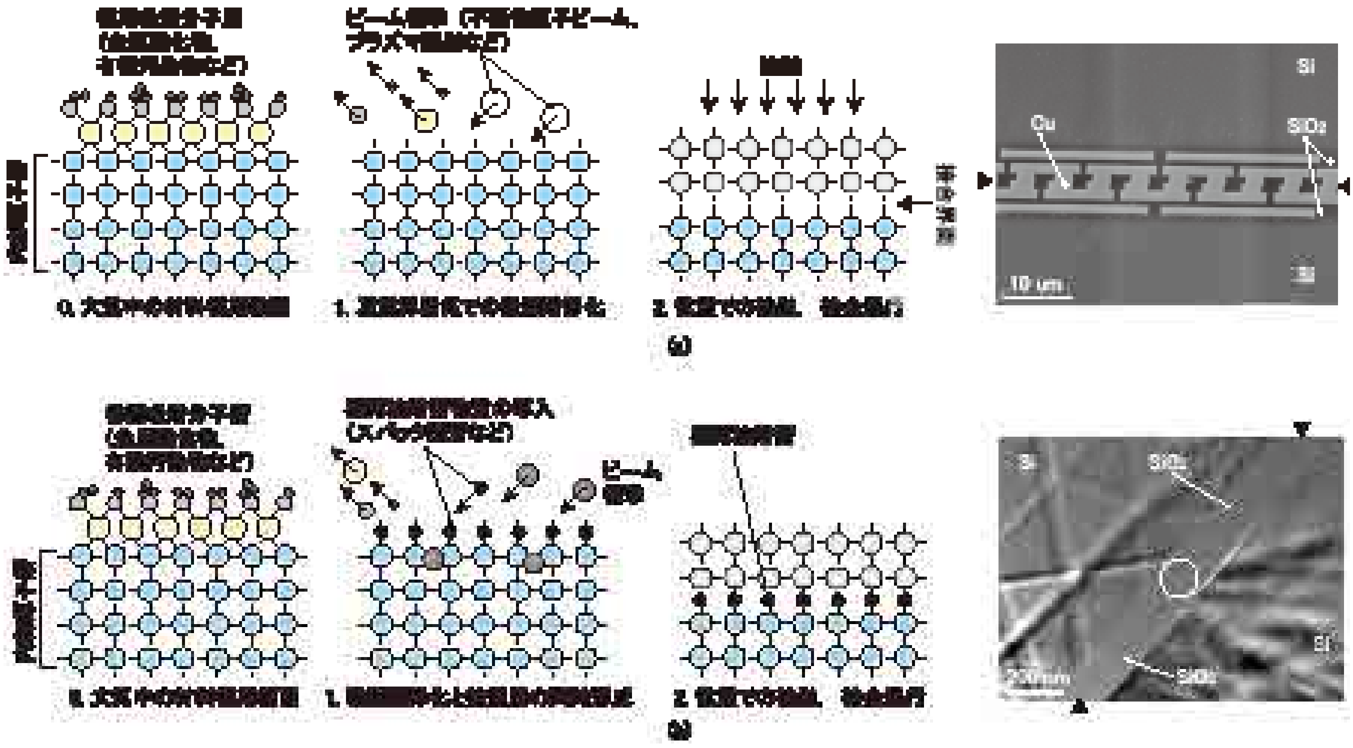


図 3　真空雰囲気中でのビーム衝撃を利用した常温接合プロセスの模式図。(a) 金属・共有結合性材料のプロセスならびに微細銅電極の常温直接接合事例、(b) イオン結合性、有機材料のプロセスならびにシリコン酸化物薄膜の常温接合事例

の物質の架橋層も形成できるようにすることが望ましい。また、大気圧雰囲気では、たいていの場合は材料表面に何らかの物質が吸着することが避けられない。そこで、大気圧雰囲気中での吸着分子層形成と同時にその層に架橋能を発現させ、プロセスの“手間”を省く方法が考案された[7]。接合性に影響するパラメタは 1）架橋層の化学的構造、2）架橋層の厚さ、の二つである。1）の架橋層を形成する物質は、常温域の低温条件下でも材料表面間にある程度の引力を発生させ、表面どうしが接触した状態を保持できるような化合物でなければならない。また、2）については、150℃程度の低温領域で強固な接合強度を得ることと、導電性材料間の界面では十分なトンネル電流を発生させなければならないことから、架橋層の厚さを母材原子が接合プロセス中に拡散可能な距離以下に留める必要がある。これらを可能にする有力な物質として挙げられるのが“水”である。配線材料に用いる金属や、絶縁層に用いられるガラスなどのイオン結合性材料、ならびに可撓性基板材料のポリマーや樹脂の本来の表面の多くには、水分子の導入により金属水和物や親水性官能基が形成され得る。このような親水化された表面間では、水素結合により常温域でもある程度の接合性が維持され、その後に低温加熱して脱水縮合を促進させることで強固な接合界面が得られる。また、水分子を含む架橋層の厚さは、ある程度の時間までは材料表面に入射した水分子の数に比例することが明らかになっている。水分子を導入する時間が一定であれば、入射水分子の数は体積あたりの水分量に比例するため、適切な表面分析器と温湿度計を用いて層厚と水分量の関係を一度測定すれば、容易に架橋層厚を適切な値に保つためのプロセスウィンドウを決定できる。水を使った低温大気圧雰囲気でのハイブリッド接合の実例として、銅、シリコン酸化物、ポリマー材料の混載が挙げられる。この事例では、それぞれの材料表面の吸着分子層を除去し、必要に応じて酸化物を一部還元した後、水蒸気を導入した大気圧の窒素雰囲気に表面を暴露し、その後常温で試料表面を接触させ、150℃まで加熱している（図 4）。これにより、単一のプロセスでは接合が困難であった異種材料が、どの組合せにおいても強固に接合され得ることが実証された。最近では、材料の初期表面の改質に真空紫外光などを用いる方法も提案されており [8]、接合プロセスの全手順が大気圧雰囲気で実行可能になってきている。

4. ハイブリッド接合の課題と展望

前項では水を接着剤の代わりに用いて異種材料を低温大気圧雰囲気でハイブリッド接合する手法を紹介した。ここで強調したいのは、この手法は通常は大気中で容易に入手できる物質を用い、プロセス負荷を格段に減らした状態で異種材料をハイブリッド化できることを実証した一例に過ぎないということである。むしろ、従来の高温加熱を用いる接合手法では、水分子が引き起こす材料表面での意図しない化学反応や加熱時の発泡などの問題から、水の存在は邪魔であることが多かった。これに対し、前述の手法では、材料表面に対する水分子の吸着挙動を明らかにし、吸着量の適正量を定めることで、接合性に寄与する分以外の“多すぎる水”を排して接着剤としての機能を有効に発現させている。つまり、ハイブリッド接合技術の要は、材料内部の結合メカニズムに対応した最表面構造の改質と、異種接合材料に汎用可能な化学結合手の探索・生成である。繰り返しになるが、材料表面に架橋性化合物を生成し得る物質は数多く存在するため、そのような物質に対してこれらの検討が良好に成されれば、架橋材料が水である必然性は全くない。そのため、本来、接合とは異なる目的で材料に施されてきた様々な処理 – 洗浄や研磨など – で用いられる雰

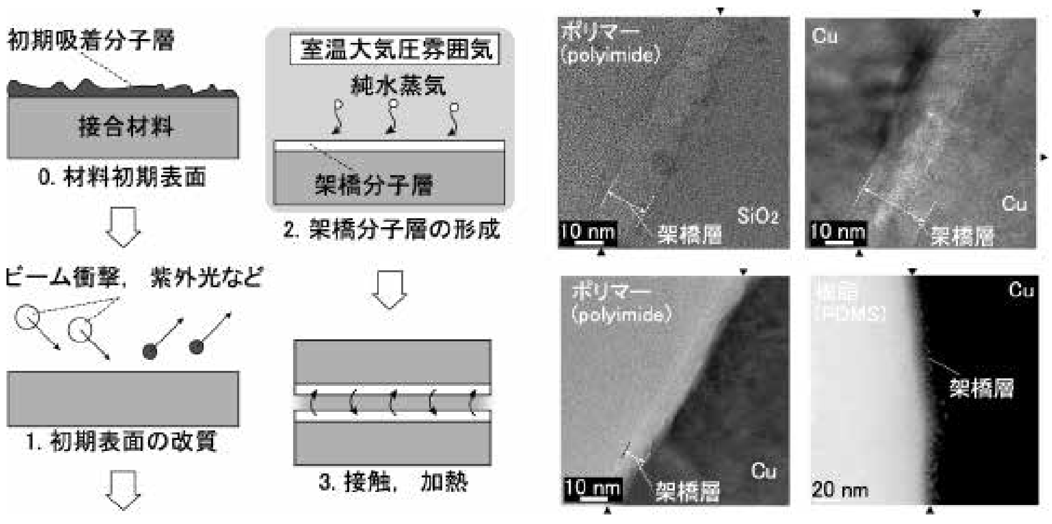


図 4　水を接着剤代わりに用いた低温大気圧異種材料混載接合プロセスの模式図ならびに有機、無機材料の混載接合事例

囲気をそのまま架橋形成プロセスとして使用することも十分可能と考えられる。このことは、長い技術的な歴史を有し、接合性の獲得や信頼性の確保のための知見が蓄積されている従来の接合手法においても、装置などのプロセス実行環境の大幅な改変なしでハイブリッド接合に対応できる可能性を示唆している。これにより、電子実装材料のみならず、既存の工業用材料の高機能化も迅速に進むことが期待される。

工業用材料、たとえば建物や機械外殻などに用いる構造材料にハイブリッド接合の導入を検討することのもう一つの利点が、従来の信頼性予測理論を利用できることにある。接合技術の商業的な利用に際して、大面積で良好な接合性を確保することは大きな課題の一つであるが、低温大気圧雰囲気で形成される架橋層を用いた新しい接合界面では、接合達成のメカニズムが界面ごく近傍の原子レベルでの化学的・物理的相互作用によるものなので、界面形成から経時的な構造変化に至る挙動が従来の接合手法によるものと異なる。2013 年 4 月に大阪で開催された電子実装関連技術の国際会議 International Conference on Electronics Packaging（ICEP）においても、国際電子機器製造者協会（International Electronics Manufacturing Initiative：iNEMI）のレビュー講演で、材料の多様化が従来の一元的信頼性評価手法による寿命予測の難しさを加速していると明確に指摘されている。つまり、材料内部やハイブリッド界面でそれぞれ異なる結合状態がもたらすナノメータスケールのごく初期の欠陥成長が、ミリメートルやメートルスケールの亀裂進展に達するまでの過程を連続的に予測できる信頼性評価手法の開発が今後急がれる。 2013 年 5 月に米国で開催された Electronics Components and Technology Conference（ECTC）では、拡散理論を 3 次元に展開し、化学反応の結果生じた機械的な形状の違いが信頼性にもたらす影響を解析する試み [9] などが報告されている。新しい界面に必要な新しい故障解析手法が、先達の拡散理論や破壊力学を基に開発されるような“温故知新”が、高度な材料複合化のツールとしての接合技術の完成度を高めていくと期待される。

References：

[1] A. Fan et al., ECS lett., 10 (1999)
[2] P. M. Enquist, Proc. ASET, 3D-SIC (2007)
[3] V. Dragoi et al., Proc. SPIE Vol. 5116 (2003)
[4] H. Takagi et al., Appl. Phys. Lett., 68 (1996)
[5] R. Kondou et al., Proc. IEEE 60th ECTC (2010)
[6] R. Kondou and T. Suga, Proc. IEEE 61st ECTC (2011)
[7] A. Shigetou and T. Suga, J. Electronic Materials, Vol. 41 (2012)
[8] A. Shigetou et al., Proc. IEEE/CPMT ICEP (2013)
[9] R. Furuya et al., Proc. IEEE 63rd ECTC (2013)

＊連絡先：重藤暁津 ＜ shigetou.akitsu@nims.go.jp ＞

（５）国内外研究動向紹介

所属班：B01-3 班
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
氏名：穂積篤，Gary Dunderdale

Conference Report: IUMRS-ICA

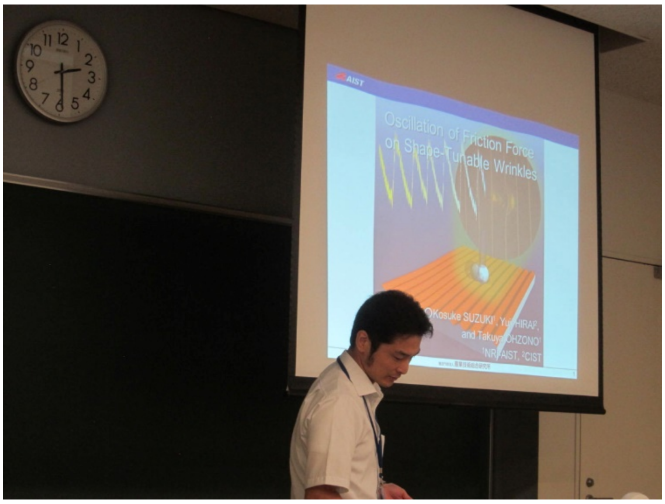
We attended the IUMRS-ICA Fukuoka conference between August 24th and 30th. The session was Materials Technology inspired by Natural Phenomena and Natural Materials. An oral presentation was given titled “Green Synthesis of Stimulus-Responsive Superoleophobic Polymer Brushes and Their Applications in Oil/Water Separation and Water Purification” lasting for 15 minutes with 5 minutes of questions at the end from the audience. The presentation concentrated on our past results of generating surfaces on which oil drops can easily slide based on water soluble polymer brushes. This work has recently been published in the journal *ACS Applied Materials and Interfaces*. Results on how this oil repellency can be switched on or off via external stimuli such as pH value, salt concentration, or temperature was also presented for the first time. New research based on water repellent polymer brushes submerged in oils was also communicated. The presentation was well received and several questions were asked raising some interesting discussion points. One questioner wanted to know about the polydispersity of the prepared polymers which are attached to the substrates surface. It was explained that polydispersity of our polymer is not key to generating the oil repellent behavior, and that polydispersity is simply a number rather than a measurable property. Further we explained that key aim of our research is to generate surfaces from which oil is strongly repelled, rather than study the mechanism. Another question focused on one of the unexpected findings in the stimuli-responsive nature of the polymer brush surfaces. The questioner wanted more information of the results and a reason for the unexpected result. This information was given, and a

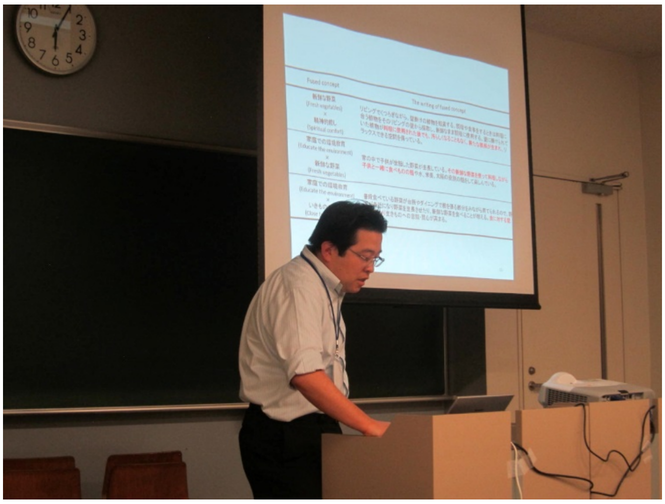
theory proposed why this unexpected result was obtained but stressed that currently we do not know the exact reason. This will be the subject of future experiments and research.

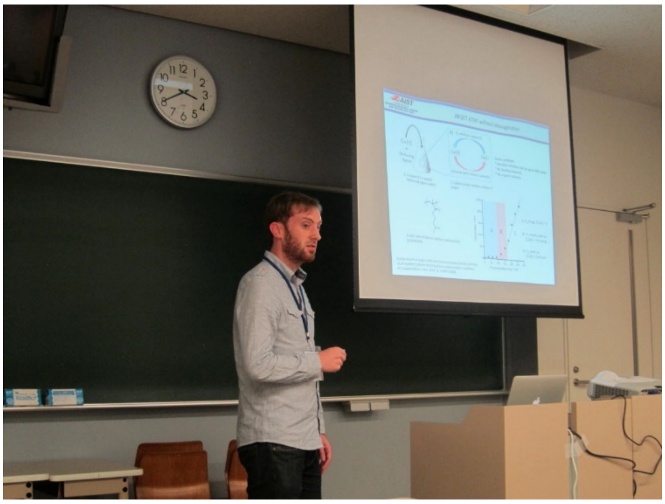
I also attended several other presentations in the same session concerned with similar research topics. Prof. Shimomura gave a particularly interesting presentation (Biomimetic water transportation device based on wharf roach Ligia exotica) of how water is transported up the legs of a small insect (Wharf Roach Ligia Exotica), and researchers from Nagoya Institute of Technology gave a similar talk also on water transport of surfaces similar to those of insects (Water and oil transport with open capillary channels mimicking animal). These presentations gave me several ideas for new research directions we could follow in our future work and design principles which we could use for current research.

Other research presentations were unconnected with our research theme but were interesting and could be useful in the future perhaps. For example researchers from Nagoya Institute of Technology gave a presentation on how small insects can be seen through an electron microscope by firstly coating the insect with a nanosuit consisting of a polymerized surfactant complex (Analysis of inner structures of biomimetic thin-film “Nanosuits”).

Overall the conference was a well hosted event at a suitable location in Fukuoka. Conference chairs kept strictly to the allocated schedule leading to fluid running of the presentations.


Oscillation of Friction Force
on Shape-Tunable Wrinkles





所属班：B01-2 班
所属機関：大阪大学　生命機能研究科
氏名：吉岡伸也

第63回高分子討論会「生物模倣による新規機能制材料・次世代型プロセスの創成」に参加して

2014年9月24－26日、第63回高分子討論会（長崎大学）において「生物模倣による新規機能性材料・次世代型プロセスの創生」と題するセッションが開催された。客観的な会議報告をすることは私の力量を超えているが、初日（9/24日）に発表された中で印象に残った講演をいくつか紹介したい。

バイオミメティクス分野は、生物学者と工学者が同じくらいの数で参加するのが理想形ではないだろうか。しかし、現状では応用開発を目指す研究に比べて、生物サイドの研究が少なく、ややバランスが悪いように感じている。そのこともあって、24日最初の室崎先生（千歳科学技術大学）の講演は印象に残った。フジツボなどの着生生物は、船底につくと航行の燃費を悪化させる。また、

発電所の取水口が汚れると動作に影響を与えかねない。それらの問題の解決の糸口を探るため、フジツボが着生位置を決める段階であるキプリス幼生の行動を詳しく調べた研究報告である。キプリス幼生が一体何を判断基準に着生位置を決めるのか？無数にあるパラメータの中から、現象の本質を探るプロセスには、サイエンスとしての面白さを感じた。発表では、様々な形状を持つ表面構造を作成し、探索行動を詳しく観察することで、着生しやすい表面とそうでない表面があることを明確に示された。今後、キプリス幼生の探索行動について、さらに知見が深まることを期待したい。

東北大学の和田先生は新しい原理に基づく高速CDスペクトルの測定装置について報告された。既存の装置の分析感度と測定時間を大幅に改善し、既に新しい研究成果が得られていることを紹介された。ともすれば、“分析装置は機器メーカーが作るもの”と思い込み、研究者はユーザーになってしまいがちである。測定原理を一から見直し、新しい装置を開発することの重要さをあらためて学んだ気がする。今後、この装置を用いて次々と研究成果が生み出されるのではないだろうか。

産総研の浦田先生の研究も印象に残った発表の一つである。多くの生物は分泌物を出して、撥水効果や摩擦の低減を図っている。そのような芸当は生きているから可能であって、バイオミメティクスとして模倣せよと言われても、材料科学に疎い私にはどうしてよいのかさっぱりわからない。しかし、浦田先生はゲルに離漿性と呼ばれる性質を持たせることで液体の枯渇を防ぎ、機能を持続させる材料を開発した。もちろん現実的な応用までには、解決すべき課題は

あるのだとは思うが、生物の分泌を模倣したこのような工夫がありうることに新鮮さを感じた。

午後には、下澤先生（北海道大学名誉教授）による招待講演が、「鰯の頭も信心から」という演題で行われた。酒の肴であった鰯（煮干し）が輝いていることに疑問を抱き、すぐに電顕観察を行ったとのこと。その行動の素早さには頭が下がる。電顕観察によってグアニン結晶と思われる薄片が煮干しの輝きの原因であることを推定した後、話題はモスアイ構造の多機能性に移った。この研究のきっかけも、太陽光の下で輝きを放たないエゾハルゼミに不思議さを感じた日常的な観察にあるという。セミの翅の表面構造（モスアイ構造）は、光の反射を抑制する機能だけでなく、昆虫を滑落させる性質を持つことを、分かりやすい動画を用いて示された。また、そのことを利用して、光の反射防止フィルムとして開発された材料が、そのまま誘蛾灯に転用できることを実証機の製作と併せて紹介された。発表を聴いていて特に印象に残ったのは“信心”と研究について語られた場面である。鰯の頭の観察では、何か新しいものを生み出すほどには、信心はまだ十分ではなかったが、セミの翅に関しては十分であったのだろう、と冗談めかして話された。もちろん、研究の進展には様々な要因があり、信心の深さだけで成否がきまるわけではないだろう。しかし、研究活動は論理的に攻めるだけでは行き詰ってしまうことがほとんどである。そのとき何が突破口となるのか、どうやったらセレンディピティーが見つかるのか。そこには、ある意味“信心”としか表しようながい、研究者のこだわりが重要なのかもしれない。自然を手本にして新しいテクノロジーを生み出すこの分野の研究者

の一人として、生物に学ぶという“信心”を一層深くせねばと思った。夜に食べたきびなごの輝きが信仰の一つの対象になりそうである。

ところで会議が行われた長崎ほど平和を祈念するのにふさわしい場所はないだろう。私が宿泊したホテルは思いがけず爆心地のすぐそばに位置していた。原爆資料館の展示物に悲惨さを感じながら、一抹の不安を抱いた。サメ肌に学ぶことは魚雷の性能を上げることにはならないのか、昆虫の飛翔に学ぶことは新たな殺傷兵器の開発につながらないのか。バイオミメティクス研究はいくつかの成功例を除いては、まだまだ発展途上であるし、そのようなことを気にする段階ではないかもしれない。しかし、研究が真に平和で持続可能な社会の創生につながるにはどうしたらよいのか、という問題意識を忘れてはならないと感じた。

所属班：C01 班
所属機関：新潟大学　自然科学系
氏名：山内健

第63回高分子討論会「生物模倣による新規機能制材料・次世代型プロセスの創成」に参加して

２日目は、本特設テーマのキーワードの一つである「材料科学と生物学の有機的な融合」について、基調講演としてナノテクノロジーと細胞工学の融合に関する講演があり、基調講演とともに①材料工学の視点で捉えた微細構造制御とバイオミメティックス、②生物工学の視点で捉えた微細構造制御とバイオミメティックス、③生物機能の工学技術への移転、④バイオミメティックス情報の活用法についての研究発表が行われ、活発な議論が展開された。それぞれについて報告する。

基調講演
「ナノインプリントによる微細構造形成と生体模倣との接点」
宮内昭浩氏（日立）

日立製作所の宮内氏から、「ナノインプリントによる微細構造形成と生物模倣との接点」という演題で、ナノインプリントの基礎から最新研究の動向、ナノインプリントで形成できる微細構造、自然界に存在する生物表面との類似性についての説明があった。蓮の葉、ヤモリの足、ガの眼の構造とナノインプリント材料の比較をはじめ、ナノピラー上で培養した肝細胞が細胞塊を形成し、代謝反応を発現する研究例などの紹介があった。細胞の周りには細胞があること

を理解しながら現象を見つめないと本質が分からないとう話が印象的だった。

①材料工学の視点で捉えた微細構造制御とバイオミメティックス

「バイオテンプレート法により作製した金属マイクロコイルの構造特異的機能」

鎌田香織氏（JST-ERATO 彌田超集積材料プロ）

　直径 40μm程度の光合成らせん藻類をテンプレートに金属マイクロコイルを創製することに成功し、さらにマイクロコイルの配向分散シートも開発していた。

「ポリアミン系架橋化ゲルの構造設計とテンプレート機能」

相馬大貴氏（神奈川大工）

数億年前に誕生したバイオシリカがポリアミンを巧みに利用して美しいマイクロ構造のシリカを形成することに着目して、ポリアミン系架橋ゲルを合成し、その構造の同定と結晶挙動について研究していた。このゲルを反応場としたシリカ複合体の合成も検討していた。

高規則性ポーラスアルミナを用いたナノ「インプリントプロセスによるモスアイ構造の形成」柳下崇氏（首都大都市環境）

　陽極酸化と口径拡大処理により高機能性ポーラスシリカアルミナを作製し、このアルミナ用いたナノインプリントプロセスで、モスアイ構造の形成を行っていた。この手法を用いることで簡便なプロセスで、シームレスな大面積モスアイ構造の作製が可能となった。

②生物工学の視点で捉えた微細構造制御とバイオミメティックス

「ナノスーツ-薄膜重合による高真空と大気における生命維持」

針山孝彦氏（浜松医大）

「生きている生物を電子顕微鏡で見てみたい」という研究原点の話からはじまり、ナノスーツ法という高真空下で生きたまま生物を観察できる画期的な生物観察法の説明と観察結果に関する報告があった。界面活性剤 Tween20 を塗布して、電子線やプラズマ照射により薄膜を形成するという簡便な手法で、様々な生物体の観察映像の紹介があった。

「カーボンナノマテリアルを複合した両親媒性分子のプラズマ重合薄膜の光発熱特性」

柴垣秀人氏（名工大院工）

ナノスーツの機能化のため、Tween20 に機能性ナノ物質を導入することを目的として、カーボンナノマテリアルを複合した両親媒性分子のプラズマ重合の作製とその光熱特性について検討していた。カーボンナノホーンを複合することで、ナノスーツは近赤外線照射で、表面温度を制御できることが報告されていた。

「蝶の鱗粉のジャイロイド構造:配向特性と偏光特性」

吉岡伸也氏（阪大生命機能）

マエモンジャコウアゲハの鱗粉がジャイロ構造であることに着目して、コン

ピュータモデリングや３D プリンターを利用することで、優れた配向特性や偏光特性を有する材料を開発していた。

③生物機能の工学技術への移転

「高分子ダイナミクスを用いた生体模倣型信号処理デバイス」

浅川直紀氏（群馬大理工）

　工学的視点から生き物がノイズを利用する仕組み「確立共鳴」に着目して、π共役高分子による生体模倣型信号処理デバイスを開発していた。閾値がゆらいだ非線形外場応答特性を有するπ共役高分子の電気物性ゆらぎを用いることで、確率的閾値素子の開発が可能であることが示されていた。

「細胞メカニクス・システム:アクティブタッチによる基質の硬さ感知」

小林剛氏（名大院医）

　生物工学の視点で細胞の運動性を評価する研究報告で、細胞が硬さを感知して移動すること、内部因子群が運動特性を設定していることなど、生物の運動機能を精巧に解析することで、生命活動を理解する取組が報告された。特に機械刺激受容（MS）チャンネルの有用性が報告されていた。

「細胞運動表現型診断のための微視的培養力学場」

木戸秋悟氏（九大先導研）

　運動中の接着細胞 in situ で直接識別し、分離するという新しいタイプの細胞クロマトグラフィーに関する報告を行っていた。細胞の種類によって基材表面

の硬領域を指向する走性（メカノ・タクティクス）は異なることを明らかにし、この特性を利用した細胞の運動中での直接分離が可能であることが示されていた。

「カミキリムシにおける振動情報の機能解明と害虫防除への応用」
高梨琢磨氏（森林総研）

生物の重要な交信手段である振動のうち、固体を伝わる振動に着目して、生物の忌避を行う取り組みについて、報告していた。ラミーカミキリムシとマツノマダラカミキリムシの振動情報を解明し、高出力の振動発生装置を用いて、松の木からマツノマダラカミキリムシを害虫防除に成功した例などの報告があった。

「高分子からアプローチするバイオクレプティクス」
出口茂氏（海洋機構）
セルラーゼ活性を超高感度でセンシングできる手法を確立し、深海生育するセルラーゼ生産菌を分離することに成功していた。陸上生物とのセルロース分解メカニズムの違いなどを検討中とのことであった。特異的な環境に生存する生物に学ぶこともバイオミメティックスならではの発想であることを再認識できた。

「フナムシのオープン流路構造を模倣した安全装置をもつ微小流路」
石井大佑氏（名工大若手イノベータ養成センター）

水を主成分とする生命体においては、流体を利用した高性能な仕組みが多くみられる。本研究では、フナ虫が水を体内で輸送する仕組みを観察することで、安全装置の存在を見出し、この安全装置を再現することで、効率的に溶媒を垂直に輸送するバイオミメティック材料を開発していた。

「木の導管構造を模倣したゲルキャピラリによる液体の長距離輸送」

菅谷幸平氏（名工大院工）

毛細管現象と浸透圧に着目して、木の道管が水を輸送する仕組みを学ぶことで、ゲルを用いて道管を模倣した新規な長距離液体輸送システムを開発していた。

④バイオミメティックス情報の活用法

「昆虫の微細構造の観察からバイオミメティクス研究基盤の創成へ」

野村周平氏（国立科博）

昆虫インベントリー、特に走査型電子顕微鏡の画像からの発想想起について報告があった。いろいろな昆虫のモスアイ構造の説明から、生物の分類、生態キーワード、生育環境など 28 項目を網羅しているインベントリー情報まで幅広く概説していた。

「バイオミメティクス・データ検索基盤と新材料開発」

長谷山美紀氏（北大院情報 ）

ビッグデータの活用という観点で、生物と材料についての様々な画像情報を

取り込んだデータベースから、類似画像を検索する手法についての説明があった。思いがけない情報の獲得が可能であり、さらにバイオミメティックスに関する工学的「気づき」の想起が可能であることを材料開発例も示しながら説明されていた。

「バイオ TRIZ を利用したソフトマテリアルの表面加工」

山内健氏（新潟大工）

　ＴＲＩＺという技術矛盾を解決するためのツールをバイオミメティックスに導入したバイオＴＲＩＺという手法について、製品化のための道筋を交えて解説していた。

禁煙
撮影禁止

研究発表時間割
12分経過 1鈴
15分経過（発表終了）2鈴
24分経過（質疑応答終了）3
発表者
控席

表時間割
経過 1鈴
経過（発表終了）2鈴
経過（質疑応答終了）3

禁煙
撮影

時間割
過　1鈴
過（発表終了）2鈴
過（質疑応答終了）3鈴
発

時間割
1鈴
（発表終了）2鈴
（質疑応答終了）3鈴
禁煙
撮影
禁止
発表者
控席

撮影
禁止

禁煙
撮影

所属班：B01-3 班
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
氏名：浦田千尋，穂積篤

TECHBizEXPO 2014 に参加して

2014 年 10 月 24 日にポートメッセ名古屋（名古屋市）で開催された第 4 回次世代ものづくり基盤技術産業展（TECHBizEXPO），特別セッション「バイオミメティクスがもたらす技術革新」において，下村領域代表他，計 5 名の領域メンバーが特別講演を行った。

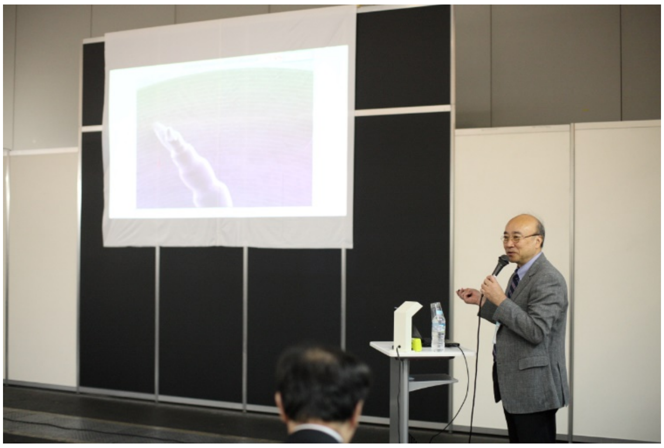
・「バイオミメティクス研究開発の国内外動向」
下村代表
B01-3 班　穂積篤

はじめに，下村代表から，バイオミメティクスの国内外の最新研究開発動向と，生物学・博物学と材料工学・その他の工学とを情報工学を介して連携させる学際融合に基づいた我々の新しい取り組みについて紹介があった。

・「ナノスーツ（NanoSuit®）法による生体の生態観察〜生きたままの生物を高倍・高解像度で電子顕微鏡観察する〜」

B01-2班　針山孝彦

特定の生物が電子顕微鏡内で一定の間，生命維持できるという発見に基づいて開発された**「ナノスーツ（NanoSuit®）法」の開発エピソード，具体的な観察事例の紹介があった。**生物がもつ細胞の外側にある物質（ECS）が，電子線重合によって極薄い薄膜の服（NanoSuitの素材）となって生物の全身を覆うため，超高真空下でも生存できる。ECSをもたない生物には適用できなかったが，研究開発を進めた結果，界面活性剤とプラズマ重合を利用することで，生きたままで様々な生物を電子顕微鏡観察できるようになった。



・「発想支援型検索システムとバイオミメティクスデータベース」

A01班　長谷山美紀
小川貴弘

膨大な生物学データから工学へ繋げるための発想支援において，重要な役割を担うと期待されている新しい画像検索基盤，長谷山先生エンジンの開発経緯，その使用方法についての紹介があった。生物データベースに含まれる大量の画像を活用することで，テキスト情報による検索の限界を超えた『バイオミメティクス検索基盤』が可能となるとのことである。本検索基盤は，今まで昆虫や鳥類，魚類など個別のデータベースに蓄積されたデータを統合し，材料科学や機械工学など広く工学研究者や産業界の利用を可能としている。今後，本検索システムを活用することで，生物の構造や機能から着想を得た，新しい技術が生みだされることが期待できる。

・「生物に学んだ多機能性表面の創製」

B01-3班　浦田千尋

穂積篤

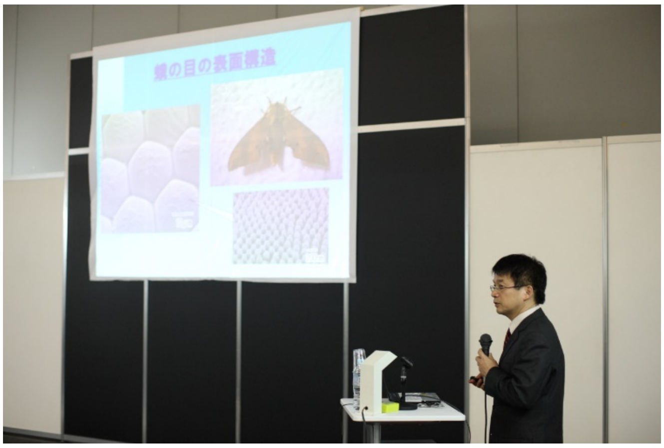
生物の表面は，分泌液/物質を継続的に分泌することにより，その優れた表面機能（濡れ，摩擦，自己洗浄，修復等）を長期間維持している。これに倣い，分泌液/機能性分子が継続的に分泌する新しい機能性薄膜の紹介を行った。層状構造を持った有機／無機ハイブリッド膜の層間に防錆剤を導入することで，初期の金属（銅）光沢を維持した状態で，優れた防錆機能（塩水噴霧 1000 時間以上）を得ることが可能となった。

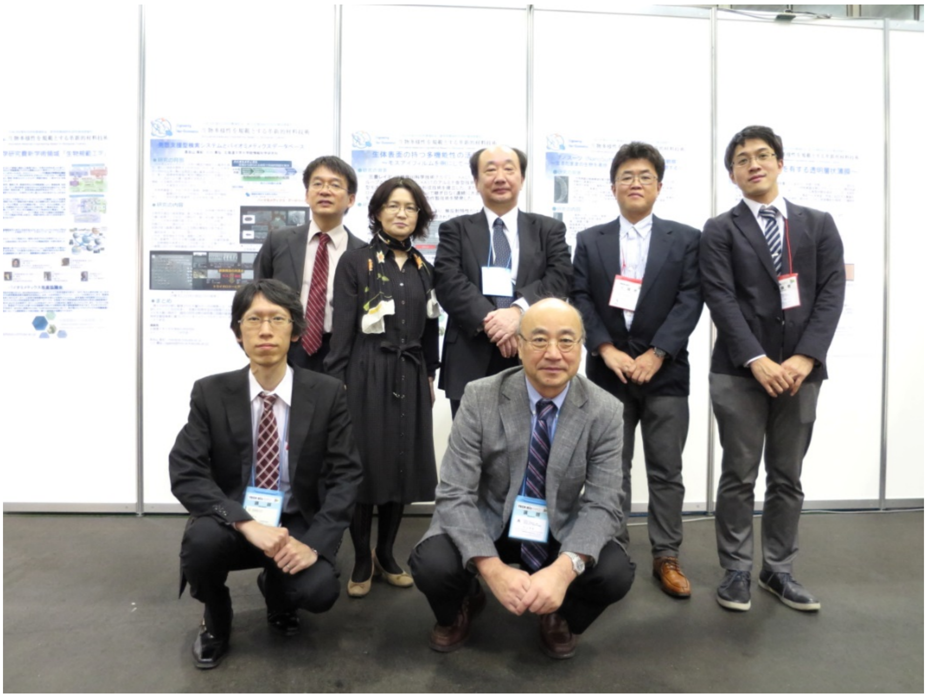
・「生体表面の持つ多機能性の活用 ～モスアイフィルムを例にして～」

産学連携グループ　魚津吉弘

蛾の複眼の表面構造（100 nm 程度の大きさのナノパイル構造）は理想的な反射防止構造を有している。**モスアイ表面は**この反射防止機能の他にも，超撥水特性や超親水特性といった機能がある。昆虫類がその表面に付着できないことを見出し，害虫駆除技術へ応用した事例の紹介があった。

展示会最終日の朝一番のセッションであったにも関わらず，大変盛況であった。この研究分野が社会から注目されていることを改めて痛感した。





所属班：B01-3 班
所属機関：名古屋工業大学　工学（系）研究科（研究院）
氏名：前田浩孝

3rd Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS)に参加して

2014 年 10 月 31 日（金）にウインクあいち（愛知県産業労働センター）で 3rd Nagoya Biomimetics International Symposium が開催された。丸一日かけて、8 件の招待講演があり、予定時間を超過するほど活発な議論が行われた。講演は材料研究をベースとするものでありながら、表面や分子設計のような様々な視点からの最近動向を得る機会となり、工学を専門とする私にとっても興味深く各講演を拝聴した。その中で海外から参加された研究者の講演について以下に紹介する。

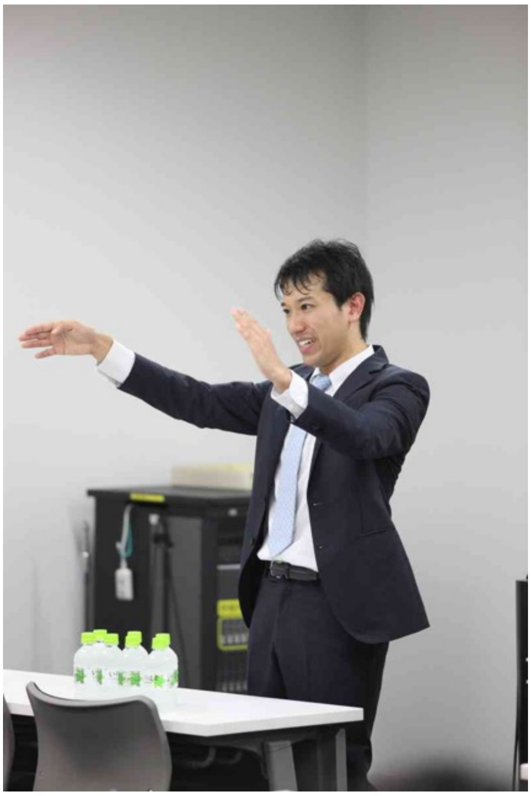
Chinese Academy of Science の Su Zhaohui 教授は、濡れ性のチューニングに関する御講演であった。Layer-by-Layer によりポリアニオンとポリカチオンからなる多層膜をマトリックスとして構築し、対イオンの濃度を変化させることで、水のみならず油に対しても接触角を変化させることが可能とし、かつ、リバーシブル性をも併せ持つものであり、新しい表面設計指針が提唱された。

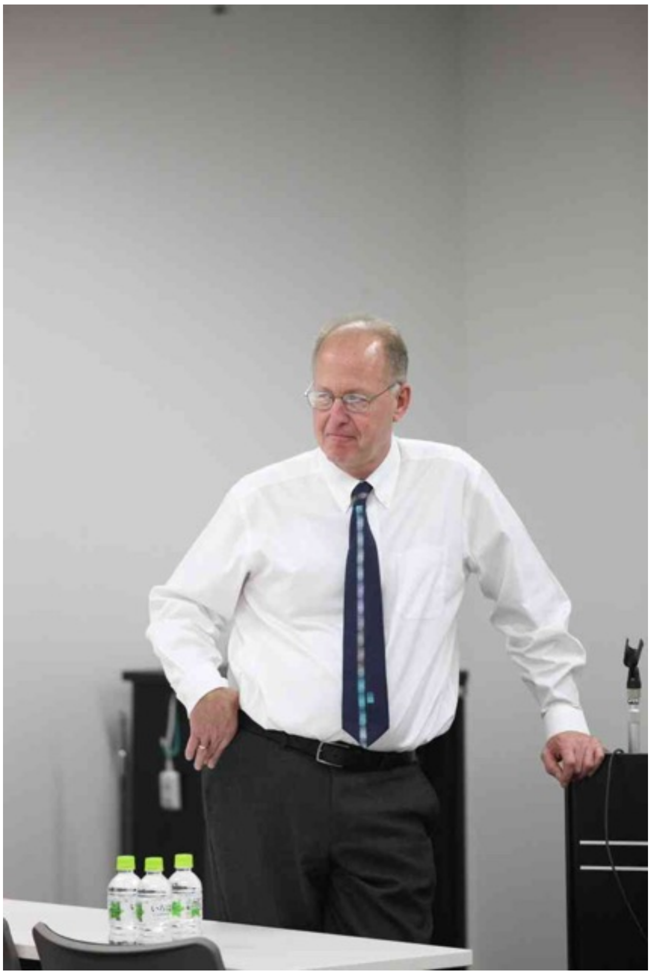
KAIST の Haeshin Lee 教授は、二枚貝の一種であるイガイの接着タンパク質の一つである Mefp-5 に注目し、最小単位分子構造が類似したドーパミンを利用した表面修飾による高機能性材料を紹介され、ナノレベルでのバイオミメティクスの可能性が示された。

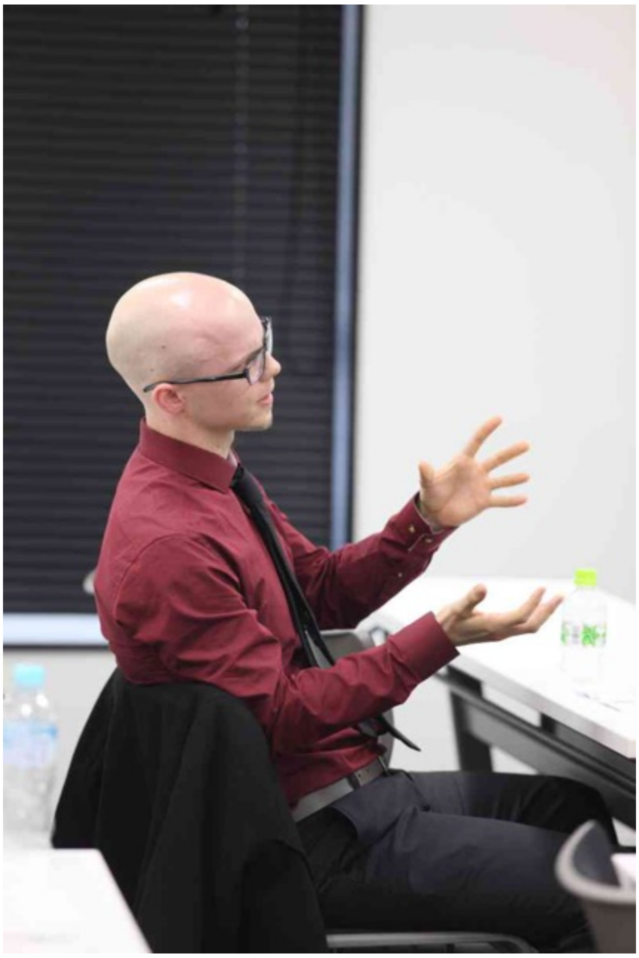
University of Massachusetts の Thomas J. MaCarthy 教授の御講演は、材

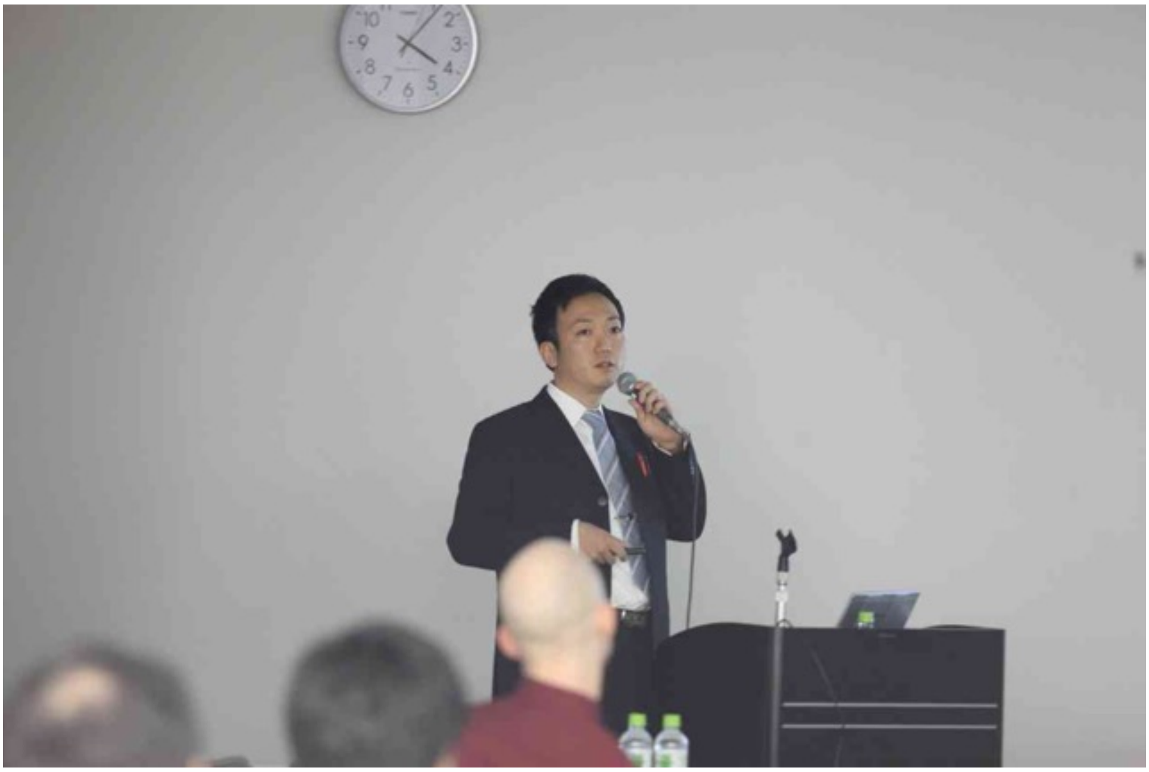
料表面における水の挙動に関する基礎から応用研究の内容であった。ディップコーティングと表面構造を利用した堆積手法は、表面自由エネルギーを巧みに制御したものであった。また、接触角の測定に用いられるYoungの式の正当性について述べられ、表面科学の奥深さを感じられた。

　本シンポジウムには、産学官の研究者が参加しており、各分野における連携の重要性とともに、バイオミメティクス研究の広がりが感じられた。このようなシンポジウムに産業界の参加者がさらに集うことで、基礎研究から得られた技術・知見の応用展開をさらに加速できる良い機会になるはずである。また、学生の参加も多数見られ、生物規範工学が構築しつつある新しい学問への興味を持つ、次世代を担う研究者が増えつつあると感じた。









所属班：B01-1 班
所属機関：千歳科学技術大学 総合光科学部 バイオマテリアル学科
氏名：平井悠司

成形加工シンポジア'14
プラスチック成形加工学会第 22 回秋季大会
飛翔のトキ ~日本から世界に羽ばたく成形加工~ に参加して

2014 年 11 月 14,15 日に新潟県朱鷺メッセでプラスチック成形加工学会第 22 回秋季大会が開催され、三菱レイヨンの魚津吉弘先生がセッションオーガナイザーを努めるバイオミメティクスに関連する「自然に学ぶ成形加工」と言うセッションが設定された。基調講演では領域代表の千歳科技大の下村政嗣教授が、「自然に学ぶ設計と加工」と言うタイトルで講演を行い、バイオミメティクスとは何か、どのような思想の研究などかを分野外の人に分かりやすく説明されていた。また、本領域からは低ヒステリシス表面の作製に関して穂積篤先生(B01-3 班)、寒天微粒子を利用した多孔質アクチュエータ、生物の問題解決法を利用した新規なシリコーン樹脂の作製と物性評価に関して山内健先生およびそのグループ(C01-班)、フナムシの流路に関する研究を石井大佑先生のグループ(B01-班)、ノイズを利用した生物信号処理技術を利用した人工素子の開発に関して浅川直紀先生(公募班)、およびサメ肌模倣構造の作製と摩擦力測定に関して私のグループ(B01-班)から学生が発表した。その他に、大阪大学の齋藤彰先生がモルフォ蝶の青色を人工的に再現、応用に向けたインプリント加工に関しての発表や山形大学の伊藤浩志先生等のグループからロールインプリントに関する研究発表が有り、機能性フィルムを大量生産する際の問題点やどのように解決していくかについて発表が有った。また、ポスターセッションでは若手研

究者のポスター賞が設定されており、本領域の名工大、石井先生(B01-班)がポスター賞を受賞された。

セッションオーガナイザー
を務められた魚津先生

基調講演をされている
領域代表の下村先生

（6）新聞・報道

【新聞・報道】

総括班

（1）日刊工業新聞（2014年7月25日）

7月２5日の日刊工業新聞で、”みんなで考える心豊かなライフスタイルと、自然に学ぶモノづくり”において、モノづくり日本会議が主催したシンポジウムにおいて石田秀輝先生と領域代表の講演が紹介されました。

石田先生の演題は”２１世紀・環境の世紀に心豊かにくらすということ”、領域代表の演題は”バイオミメティクスって何？　何故。今、生物に学ぶのか”でした。

（2）日刊工業新聞（2014年7月31日）

2014年7月31日付の日刊工業新聞の一面で、生物模倣技術が紹介されました。

「環境省、実用化へ基準　生物から学ぶモノづくり」

（3）日経産業新聞（2014年8月5日）

2014年8月5日付の日経産業新聞で、生物模倣技術が紹介されました。

「いきものに学ぶ　カワセミのくちばし→新幹線」

（4）日経産業新聞（2014年8月6日）

2014年8月6日付の日経産業新聞で、生物模倣技術が紹介されました。

「いきものに学ぶ　蚊の口→痛くない注射器」

（5）日経産業新聞（2014年8月7日）

2014年8月7日付の日経産業新聞で、生物模倣技術が紹介されました。

「いきものに学ぶ　ガの目→水はじくフィルム」

（6）TBS（2014年8月13日）

TBSの「ひるおび」という番組の　”直撃！そのスジのイチ番人気～ニッポンの底力～”　において、石田秀輝先生の解説で”生き物から学ぶ最新情報「バイオミメティクス」って？”が紹介され、バイオミメティクスの未来像が「我慢しなくても豊かに暮らせる世界」であることに言及しました。

（7）週刊新潮（2014年8月14日）

2014年8月14･21日週刊新潮夏季特大号で、赤池学先生（総括班）の記事が掲載されました。
「生物規範工学」という最先端テクノロジー

（８）北海道新聞（2014年8月16日）
2014年8月16日付の北海道新聞で、下村政嗣先生（総括班）の記事が掲載されました。
「バイオミメティクス」産業化を　千歳科技大や北大博物館「北海道を研究拠点に」

（９）中日新聞（2014年8月16日）
中日新聞　こどもウィークリーの”ニュースなう”「生物の力をまねて生かす」において、石井大佑先生（B01-2班）のセミの翅に学ぶ撥水材料、井須　紀文先生（総括班）のカタツムリに学ぶ建材、長谷山美紀先生（A01班）の画像検索システムが紹介され、領域代表のコメントが掲載されました。

（１０）朝日放送（2014年9月18日）
2014年9月18日23：17から放送の「ビ―パップ　ハイヒール」（朝日放送）に、石田秀輝先生（総括班）が出演しました。
http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=QsjYt5g51t4

（１１）日刊工業新聞（2014年10月21日）
モノづくり日本会議が主催する第二回新産業技術促進検討会「NEDOのナノテク・材料開発の方向性」において、領域代表が”ナノテクノロジーとビッグデータが支えるバイオミメティクス”に関する講演を行ったことが記事になりました。第二回新産業技術促進検討会は、9月19日（金）に東京（ホテルグランドパレス）で開催されました。
http://www.nedo.go.jp/events/EF_100024.html

（１２）日本能率協会　JMAマネジメント（2014年11月1日）

テーマ企画「自然から学ぶものづくり　バイオミメティクスの動向」において、キーパーソン・インタビュー記事「バイオミメティクス」の最新動向について、領域代表のインタビューが掲載されました。

（１３）日本能率協会　JMAマネジメント（2014年11月1日）
テーマ企画「自然から学ぶものづくり　バイオミメティクスの動向」において、キーパーソン・インタビュー記事「バイオミメティクス推進協議会の設立で高まる親ビジネス創出への期待」について、高分子学会の平坂雅男事務局長（総括班）のインタビューが掲載されました。

（１４）NHK総合（2014年11月5日）
11月5日（水）23:30から放映のNHK総合テレビ　NEWS WEB　において、「ハネカクシの翅の折りたたみ機構の解明」に引き続き、モルフォテックスやゲッコテープ、カタツムリに学ぶ建材、自動走行ロボットなどのバイオミメティクスの紹介があり、バイオミメティクスの現代的意義やデータベースの重要性に関する領域代表のコメントが放送されました。

A01班
（１）中日新聞（2014年8月16日）
中日新聞　こどもウィークリーの”ニュースなう”「生物の力をまねて生かす」において、石井大佑先生（B01-2班）のセミの翅に学ぶ撥水材料、井須　紀文先生（総括班）のカタツムリに学ぶ建材、長谷山美紀先生（A01班）の画像検索システムが紹介され、領域代表のコメントが掲載されました。

B01-2班
（１）中日新聞（2014年8月16日）
中日新聞　こどもウィークリーの”ニュースなう”「生物の力をまねて生かす」において、石井大佑先生（B01-2班）のセミの翅に学ぶ撥水材料、井須　紀文先生（総括班）のカタツムリに学ぶ建材、長谷山美紀先生（A01班）の画像検索システムが紹介され、領域代表のコメントが掲載されました。

（2）静岡新聞　びぶれ（2014年9月11日）
2014年9月11日付の静岡新聞　びぶれで、針山孝彦先生（B01-2班）、石井大佑先生（B01-2班）、下村政嗣先生（B01-2班）のナノスーツの研究が紹介されました。

（3）科学新聞（2014年9月19日）
2014年9月19日付の科学新聞で、針山孝彦先生（B01-2班）、石井大佑先生（B01-2班）、下村政嗣先生（B01-2班）のナノスーツの研究がJASIS2014で展示されたことが紹介されました。

B01-4班
（1）日経新聞（2014年10月26日）
2014年10月26日付の日本経済新聞で、奥田先生（B01-4班）のネムリユスリカの研究が紹介されました。

（7）アウトリーチ活動

【アウトリーチ活動報告】
（１）2013年5月9日、出口茂先生（公募班）が横須賀高等学校・海洋研究開発機構横須賀本部で「深海の極限環境と生物」という講演を行いました。

（２）2014年1月29日-31日に東京ビックサイトで行われた第13回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議にて、出口茂先生（公募班）が「深海から生まれたナノテクノロジー」というブース出展およびセミナーを行いました。
http://www.nanotechexpo.jp/main/

（３）2014年7月25日、国立科学博物館の大学パートナーシップ事業のひとつである「大学生のための自然史講座」において約30名の参加者を対象にA01班の篠原現人研究主幹が「日本人と魚の関わり方の多様化」という授業を行い、魚とバイオミメティクスの関係について説明しました。
http://www.kahaku.go.jp/learning/university/partnership/03.html

（４）2014年9月20～21日、八丈島地熱館の第５回企画展にて、小学生高学年から中学生向けにフナムシの研究を例にとってバイオミメティクスのアウトリーチ活動を行いました。
http://www.geothermal-hachijo.com/test/event/eco/eco.html

（５）2014年9月23日に、名古屋市科学館で針山孝彦先生（B01-2班）が「のぞいてみよう！ミクロの世界公開講座」を開催しました。水分の多い生物でも生きたまま電子顕微鏡で観察できるという『ナノスーツ』のお話をしました。
http://www.ncsm.city.nagoya.jp/visit/attraction/event/2014/261.html

（６）2014年10月22日～24日に”ポートメッセなごや”で開催される第４回次世代ものづくり基盤技術産業展において本領域の展示をおこないました。
http://www.techbizexpo.com

10月24日には”バイオミメティクスがもたらす技術革新”というセミナーにおいて、領域代表、穂積篤先生（総括班、B01-3班）、針山孝彦先生（B01-2班）、長谷山美紀先生（A01班）、小川貴弘先生（A01班）、浦田千尋先生（B01-3班）、魚津吉弘先生（B01-2班）が、講演を行いました。

http://www.techbizexpo.com/event/index1024.html#no23

（7）2014年11月3日、領域代表が、名古屋市科学館で開催された「のぞいてみようミクロの世界！」特別講座において、「バイオミメティクス：生物に学ぶ技術革新」について市民向けの講演を行いました。
http://www.ncsm.city.nagoya.jp/visit/attraction/event/2014/post_263.html

（8）各種案内

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

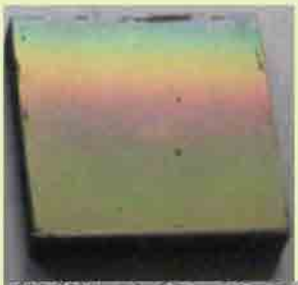
平井悠司 （千歳科学技術大学　バイオ・マテリアル学科　専任講師）

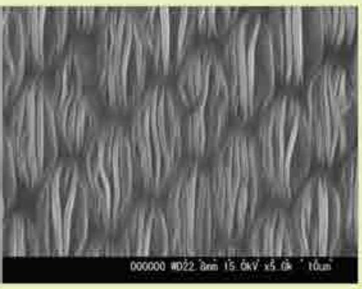
微細構造による機能 ～摩擦を中心に～

2014年10月5日（日）

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

「摩擦」は非常に身近な現象で、私たちが歩く時も止まる時も常に起こっている現象です。しかしながらそのメカニズムは非常に複雑で、未だにほとんど解明されていないと言えます。産業的にも摩擦の制御は非常に重要で、特に車などではエンジン内部の摩擦によりエネルギーをロスし、さらに摩擦によって発生する摩耗によって部材の損傷まで引き起こします。しかしながら低摩擦な表面ばかりが必要ではなく、ブレーキには高摩擦な表面が必要とされるなど、摩擦のコントロールが非常に重要な要素となっています。一方で、ヘビをはじめとする生物も摩擦とは切っても切れない関係であり、進化の過程で様々な表面機能を獲得してきました。本講演では摩擦の基礎から生物の摩擦特性、人工的な摩擦制御模倣材料の作製について講演致します。



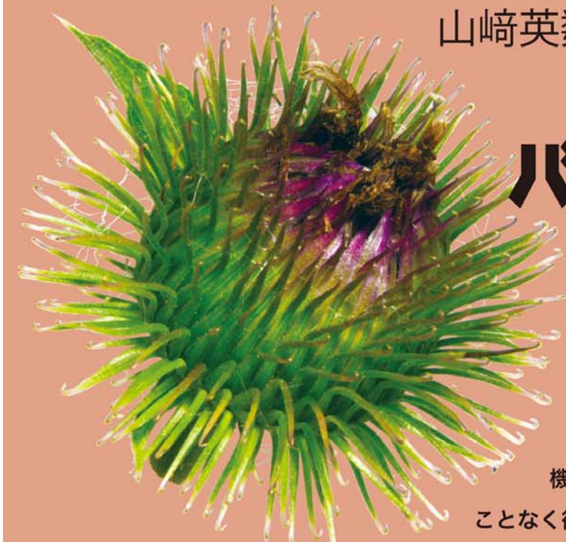


主　　催：北海道大学総合博物館
共　　催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
協　　賛：高分子学会北海道支部
千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター

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

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー



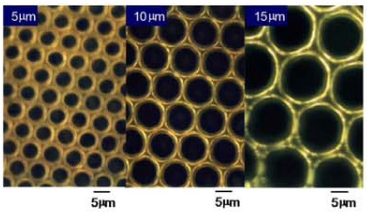
山﨑英数　（富士フイルム 生産技術センター 統括マネジャー）

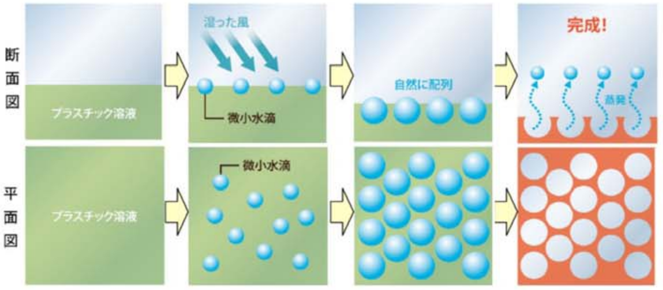
モノづくりと バイオミメティクス

2014年11月1日（土）

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

自然界に存在する生物は、生きるためにさまざまな機能を身につけています。その多くは、特別な材料を使うことなく微細構造をもつことで機能を発現しています。たとえば、蛾の眼の反射防止機能、蓮の葉の撥水機能などです。私たち人間が、この微細構造をまねて生活に役立つ商品を実用化するには、モノづくりの技術が必要不可欠です。従来、私たちは、多くの工程や高温高圧の条件を必要とするモノづくりを用いてきました。今後、自然を守りながら、私たちが永続的に発展していくためには、省エネルギーと機能発現を両立できるモノづくり革新が必要です。その一つの解として、自然現象に存在する水滴の自己組織化現象を応用した、常温常圧の単一工程で微細構造を実現した新しいモノづくりを紹介させていただきます。また、生物と同様に企業も環境変化に順応し生き残るために何が必要か、そういった事例も織り交ぜながら皆様と未来のモノづくりについて語り合いましょう。





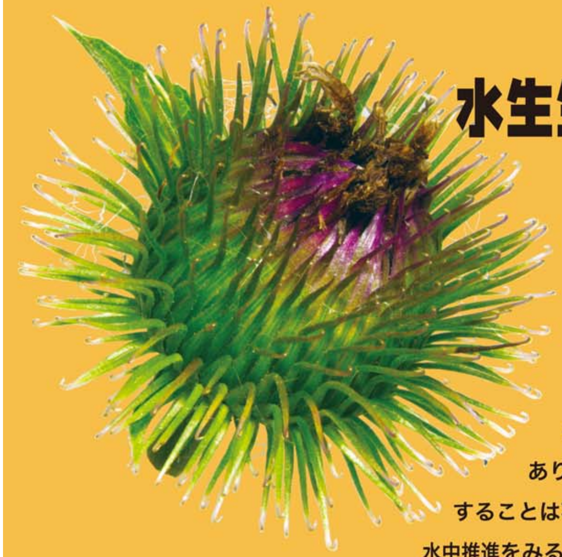
微細構造の製造方法
▶水滴が自ら整然と配列する「自己組織化現象」を応用した製造工程（右）▲作製された構造の例（上）

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

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

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー



小林俊一　（信州大学　学術研究院　教授）

水生生物の泳ぎを規範とした水中推進ロボット

2014年12月6日（土）

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

魚の泳ぎは素晴らしい！人間には真似できないものであります。このメカニズムを船舶の水中推進に応用しようとすることは不思議なことではありません。しかし、現状の船舶の水中推進をみるとスクリュープロペラばかり・・・生物の泳ぎとは違ったものです。人工物に生物の動きを適用することは理に合わないか・・・いや、単なる推進機構ではなく、水中ロボットのような様々な環境での移動を考えると、スクリュープロペラでは難しいところも移動しなくてはならず、生物の動きから学んだほうがうまくいくはず！そんな考えで水中推進ロボットを開発してきました。水中で生息する生物は様々ありますが、ここではゴカイの遊泳を規範とした全方向推進が可能な水中ロボット、また、魚型ロボットの尾びれに相当するフィンを可変剛性化した推進メカニズムについて紹介させていただきます。

全方向推進が可能な水中ロボット

可変剛性フィン

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

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

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

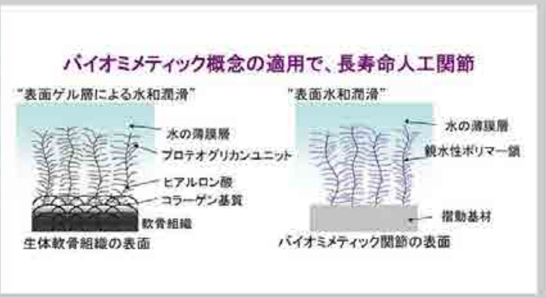
石原一彦 （東京大学大学院工学系研究科 教授）

生体構造を模倣した身体に優しい医療デバイス

2015年1月10日（土）

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

私たちの関節では、スムースに動くために軟骨組織が大きな役割を果たしています。運動器官の病気の根本的な治療として 50 年以上の歴史のある人工関節置換術は、関節の代替をする機能を持っていますが、人工関節に利用されている材料が摩耗するために、一生使い続けることができません。そこで、軟骨組織の表面の特徴を人工的に再現する、新しい材料技術を開発し、これを人工関節に応用することを考えました。表面に細胞膜と類似した構造を作り、水を吸い込むことで高い潤滑特性を得ることができ、歩行パターンを模した試験では、最長で 70 年間の耐久性を持つことがわかりました。このことは、人工関節の寿命を人生と同じ程度にすることができたと言えます。ここでは、その材料設計の考え方と人工関節への応用について解説します。



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

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

「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. 3 No. 2
発行日　2014 年 11 月 21 日
発行責任者　下村政嗣（千歳科学技術大学）
編集責任者　穂積　篤（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