

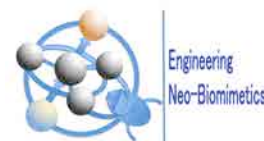
生物規範工学

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—

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

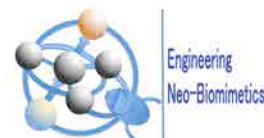
Part A01-1: Database Building for Biomimetics

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



・ オパール結晶薄膜塗工による模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
・ 生物規範メカニクスシステム：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 Micromechanics 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

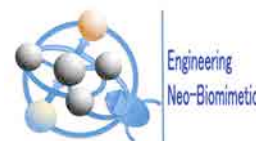
- ・ 生物の不思議を工学に移転する技術 – バイオTRIZ という技法 –

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 ープロジェクト後半に向けてー

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、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て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。

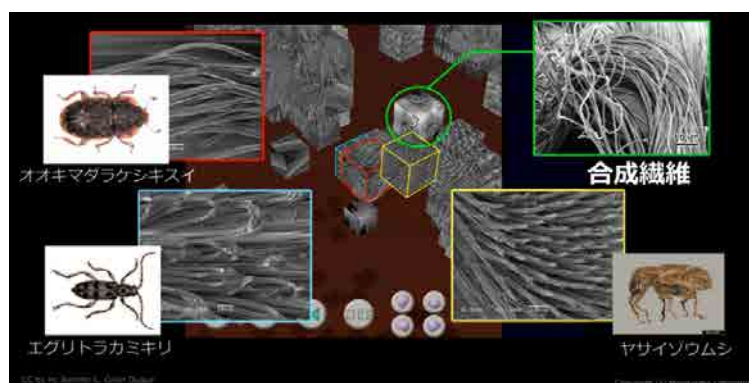


Fig. 1 A sample of search by the biomimetic data platform including SEM image of an artificial fiber mixed with SEM images of insect microstructures.

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点に絞込む。(1) 昆虫の分野では、B01-2 班の研究内容とかわりの深い「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ー-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。

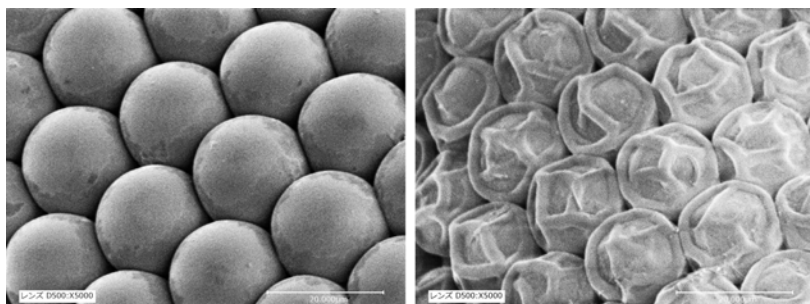


Fig.2 SEM photos of the surface of compound eye of a mosquito, *Aedes albopictus*; left –photo by nano-suits method; right – photo by dried sample.

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。

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

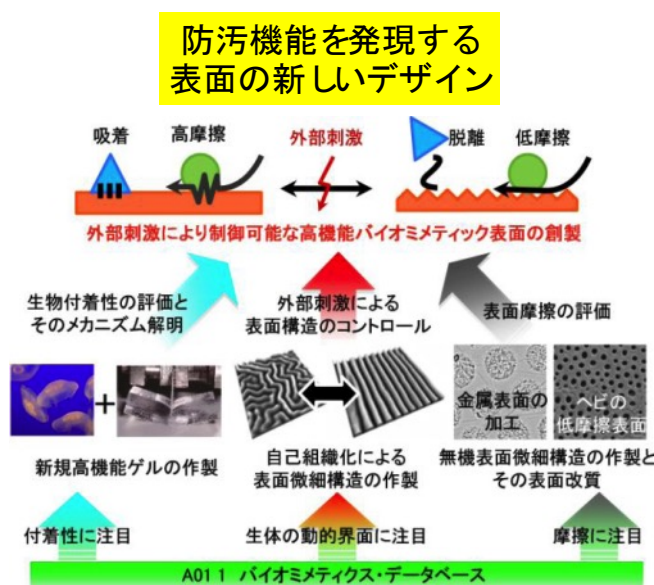
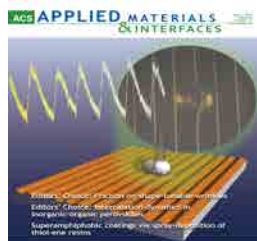


Fig.1 Research strategy of B01-1 team

成果も得られている⁽⁵⁾。

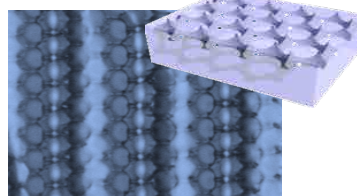
自己組織化を利用した微細構造

sub-mm スケール構造の
詳細な摩擦測定法の確立



鈴木、平井、大園、
ACS Appl. Mater. Interface,
6, 10121, (2014)

新規耐久性
“しわ”構造の作製



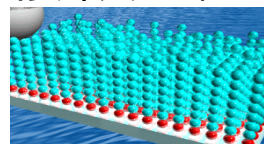
大園、平井、鈴木、下村等、
Soft Matter 10, (2014)

ゲル表面のパターン化と
境界摩擦測定



黒川、グン等
Soft Matter
10, 3192-3199 (2014)

微細表面の
修飾法の確立



小林等、発表準備中

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模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

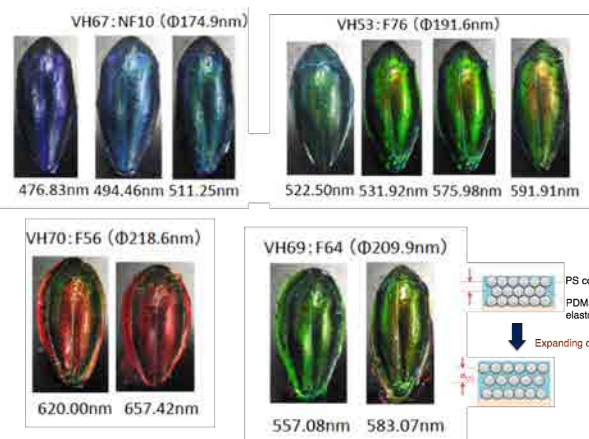


Fig.1 A wide variety structural color of biomimetic jewel beetles. The structural color is tunable by the colloid sphere size and the interspacing of colloid array, d_{111} . Here PS is Polystyrene and PDMS is Polydimethylsiloxane.

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（ $\theta - 2\theta$ ）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）。

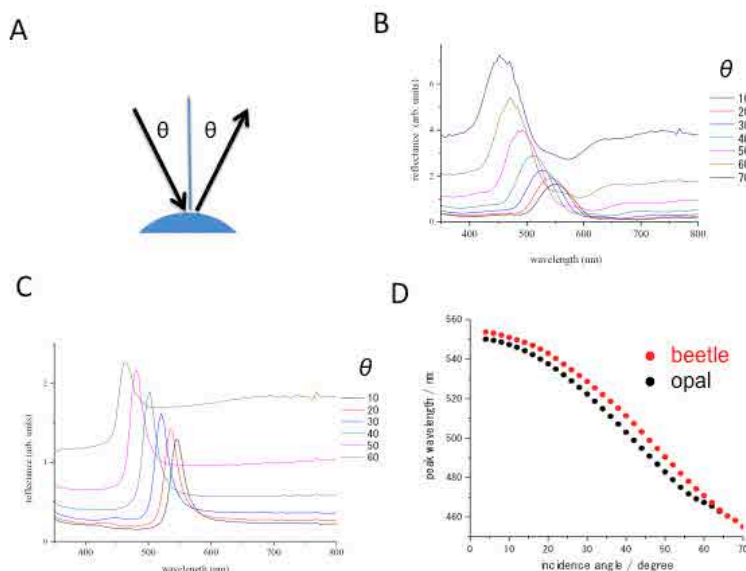


Fig.2
Reflection spectrometric analysis. A: Setup of measurement, B: Original jewel beetle, C: Opal (Biomimetic jewel beetle) and D: Diffraction peak as a function of tilting angle.

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。

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

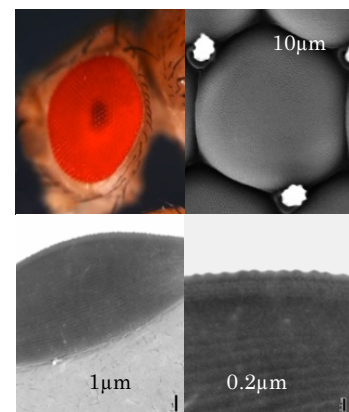


Fig.1 Corneal nipples in the compound eye of *Drosophila*.

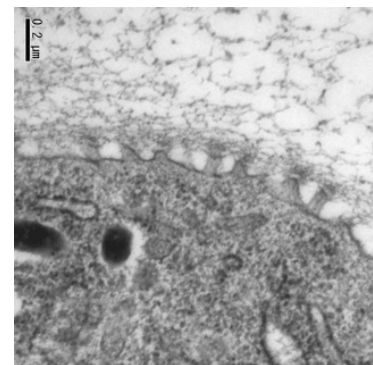


Fig.2 Microvilli and corneal formation

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。

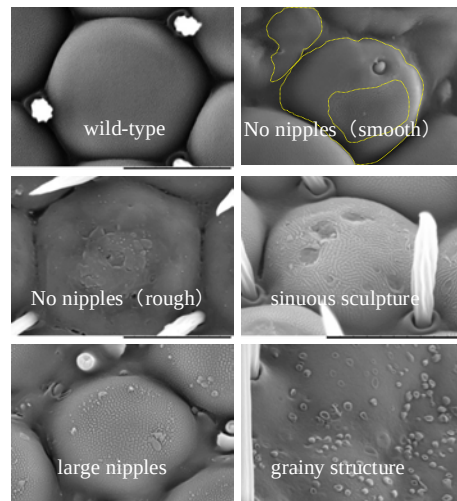


Fig.3 Various patterns of corneal nipples in *Drosophila* mutants

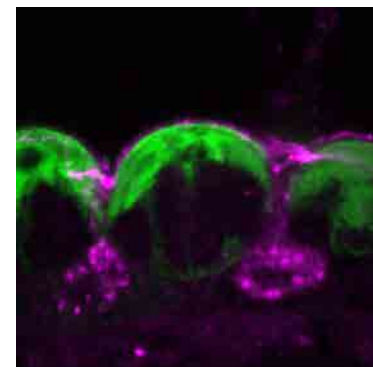


Fig.4 Cone cells (green) and new epicuticular protein (magenta)

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、はっ油性、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/はっ油性）を詳細

に調査したところ、優れたはっ水／はっ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／はっ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。

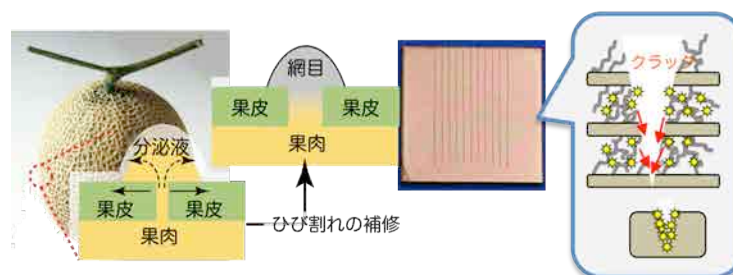


Fig.1 Anti-corrosion film with self-repairing properties learned from a muskmelon surface.

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。サブセルラー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

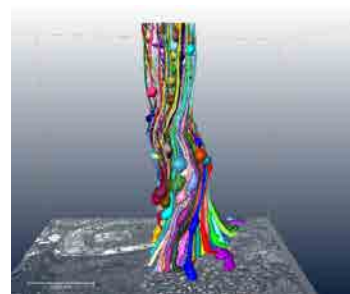


Fig. 1 3D structural image of a basiconic sensillum including 105 dendritic processes.

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) や驚愕反応といった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⁾。

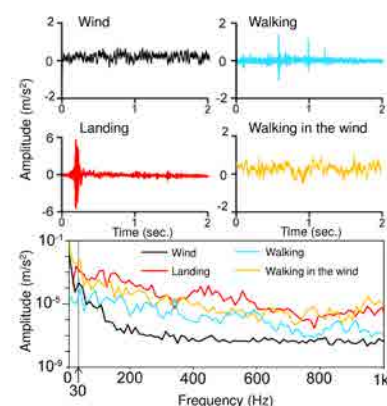


Fig. 2 Vibrations generated by wind, a beetle landing on a leaf, a beetle walking on a leaf, and a beetle walking on a leaf in the presence of wind.

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



生物規範メカニクスシステム：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 Micromechanics 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

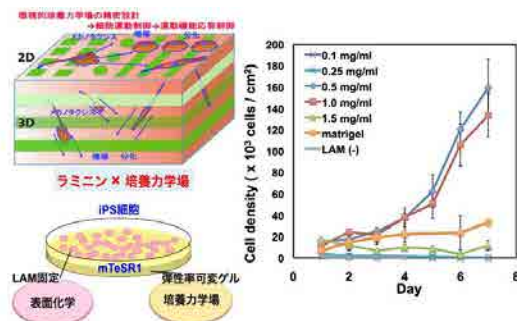


Fig.1. Rapid enhanced proliferation of iPS cells on laminin-fixed gelatin gels.



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、これらの臓器・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ตอบสนอง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ン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ン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⁾。

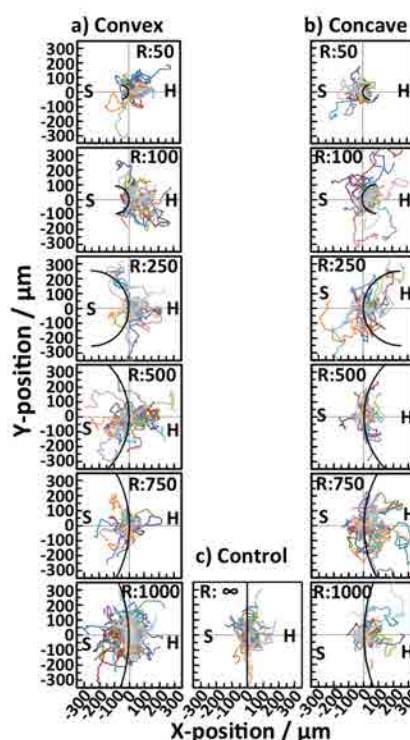


Fig.3. The starting position-superimposed cell trajectories around the elasticity boundaries with different curvatures R s (μm) for convex (a), concave (b), and linear control (c). H and S indicate hard and soft region, respectively.

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：独立行政法人産業技術総合研究所

氏名：安順花、関谷瑞木、○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回本会議がベルギー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。

評価のためにはと言わないが、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、 $V < V_{\text{TFT}} = 10\text{V}$ 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、 $V > V_{\text{TFT}}$ 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)。

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)によって遂行された。

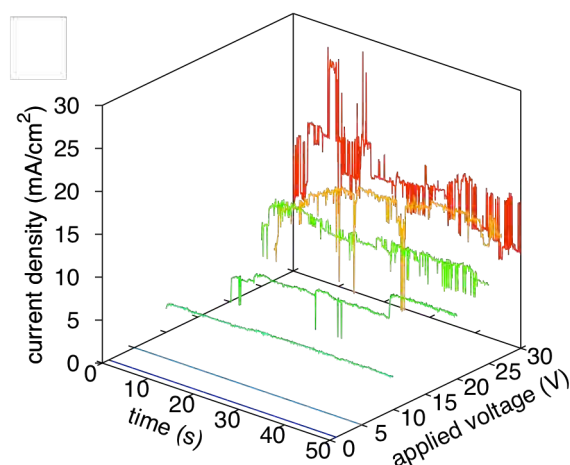


Fig.1 Results of noise measurements for the Au/P3DT/Au element. The time course of current density under a constant applied voltage is presented for various applied voltages.

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ン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。

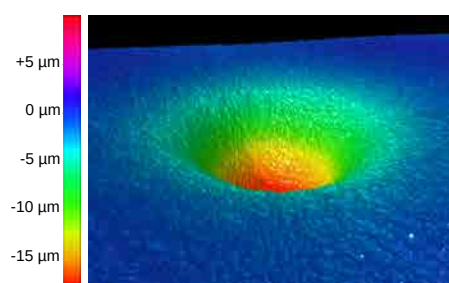


Fig. 1. 3D laser image of a pit formed on the surface of cellulose hydrogel in 31 min after depositing 90 pL of the cellulase solution.

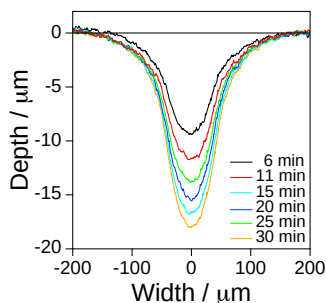


Fig. 2. Change of a cross-sectional profile of the pit as a function of reaction time.

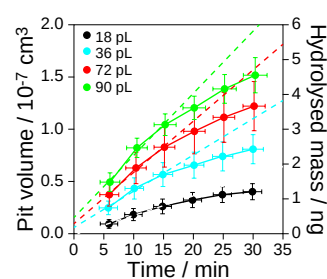


Fig. 3. Change of the volume of the pit formed after depositing various amount of the cellulase solution.

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「バイオテクノロジー」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 plant 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

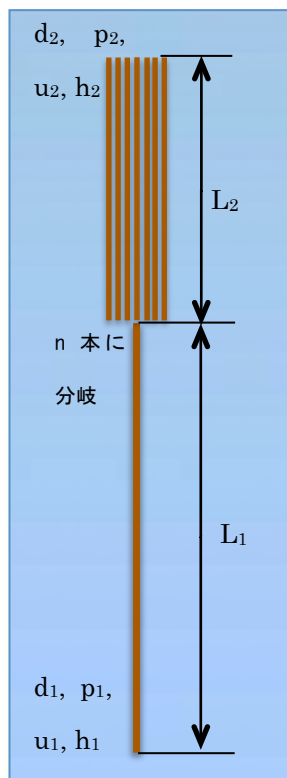
植物において根からの吸水→導管→気孔からの蒸散の一連の流れを蒸散流(transpiration streaming)という。このメカニズムについては諸説あってよくわからない。何故よくわからないかというと、仮説としての説明が多く、それを裏付けるデータが乏しいということが原因である。導管内の流量、気孔からの蒸散量、水ポテンシャル、導管・篩管の寸法や数、導管壁・葉の細胞などと水との接触角、など物理的諸元が分からないなかで流動モデルの確認をするということが続けられてきた。植物生理学の人たちは水ポテンシャルと表現するギブスの自由エネルギーの高低差から吸い上げが行われると考えている。流体屋から見ると、エネ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。分岐管の先端には気孔が付いていて、大気に開放されている。



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

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho u_1^2 + p_1 + \rho g h_1 = \\ \frac{1}{2} \rho u_2^2 + p_2 + \rho g h_2 + \zeta_v \frac{1}{2} \rho u_1^2 + n \zeta_b \frac{1}{2} \rho u_2^2 + n \zeta_t \frac{1}{2} \rho u_2^2 \end{aligned}$$

ここに、 $\zeta_v = \lambda_v \frac{L_1}{d_1}$, ζ_b , $\zeta_t = \lambda_t \frac{L_2}{d_2}$ 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

Fig. 1 Simple model of vessel

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

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。

$$(1 + n\zeta_b + n\zeta_t) \frac{1}{2} \rho u_2^2 = (1 - \zeta_v) \frac{1}{2} \rho u_1^2 + (p_1 - p_2) + \rho g (h_1 - h_2) \quad \dots (1)$$

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、 $L_1=15\text{m}$, $d_1=100\mu\text{m}$, $u_1=100\mu\text{m/s}$, $h_1=0\text{m}$, $p_1=?$, $L_2=5\text{m}$, $d_2=5\mu\text{m}$, $u_2=?$, $h_2=20\text{m}$, $p_2=1\text{atm}$ と仮定しよう。水の動粘性係数 $\nu=1\times 10^{-6}$ とすると、 $\text{Re}=d_1 u_1/\nu=0.01$ であり、 $\lambda_v=6\times 10^3$ である。この値から $\zeta_v=\lambda_v L_1/d_1=1\times 10^9$ である。したがって、右辺第 1 項は $(1-1\times 10^9)\times (1/2)\times 1000\times (100\times 10^{-6})^2=-5\times 10^3$ [Pa] である。右辺第 3 項は $1000\times 9.8\times (0-20)=-2\times 10^5$ [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、 $(p_1-p_2)>2\times 10^5$ 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 $u_2=100\mu\text{m/s}$, $\text{Re}=5\times 10^{-4}$, $\lambda_t=1\times 10^5$ であり、 $\zeta_t=\lambda_t L_2/d_2=1\times 10^{11}$ と求められる。 $\zeta_b=0.5$ と仮定すると、左辺の値は $(1+400\times 0.5+400\times 1\times 10^{11})\times (1/2)\times 1000\times (100\times 10^{-6})^2=200\times 10^6$ [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。 $u_2=0.4\mu\text{m/s}$ 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 $n=1\times 10^5$ 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 5 7 %、毛細管現象 3 5 %、浸透作用 8 % という寄与度がわかった。

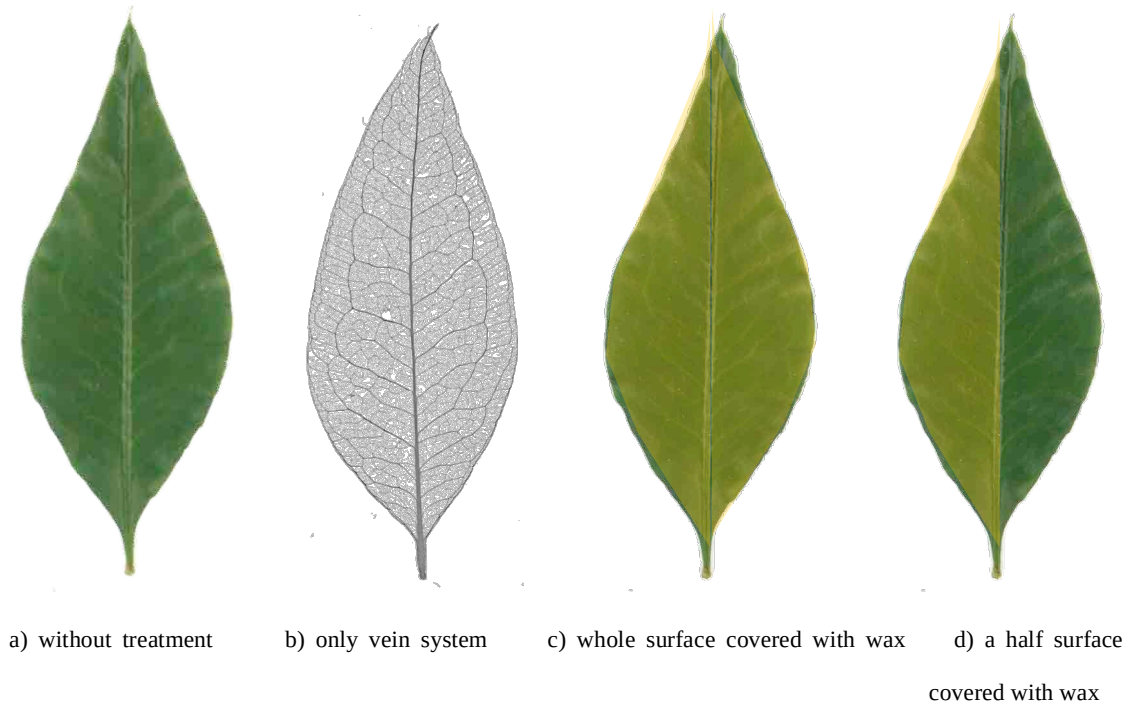


Fig. 2 Tested treatment leaves

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

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によって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 年のバイオメテックス研究会（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。

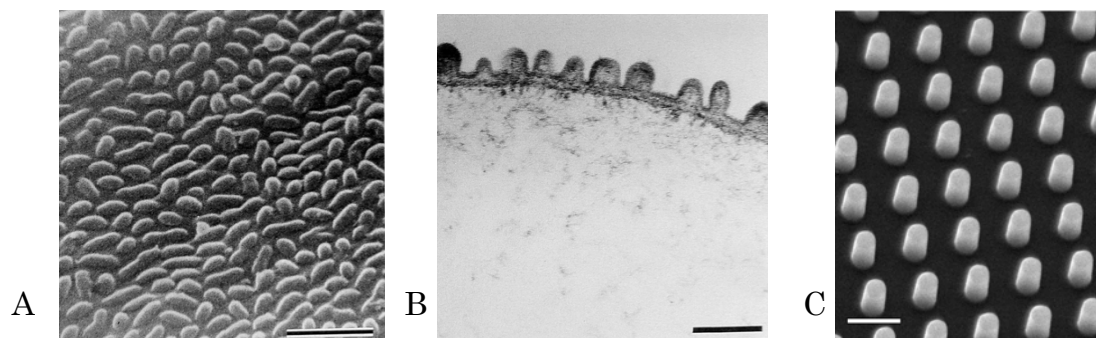


Fig. 1. (A, B) Nipple array on the tunic surface of a botryllid ascidian (Scale bar = 0.5 μm). (C) Nanopillar sheet fabricated by nanoimprint technology (Scale bar = 1 μm).

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)。

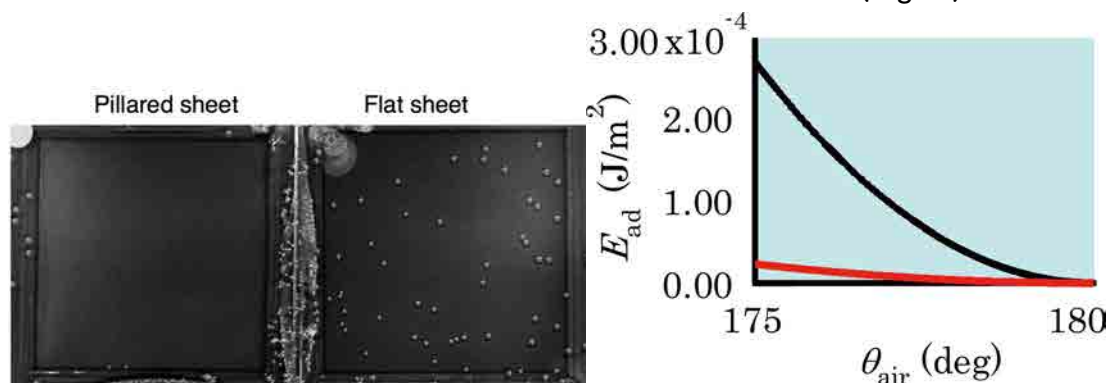


Fig. 2. (A) Attachment of bubbles on the hydrophilized pillared sheet and flat sheet. (B) Simulation of adhesion energy per unit area of a bubble on flat (black line) and pillared surface (red line) at various wettability of the surface. θ_{air} , contact angle of the bubble.

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 $2\text{ }\mu\text{m}$ のピラー、直径 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 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（被囊表面）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)。

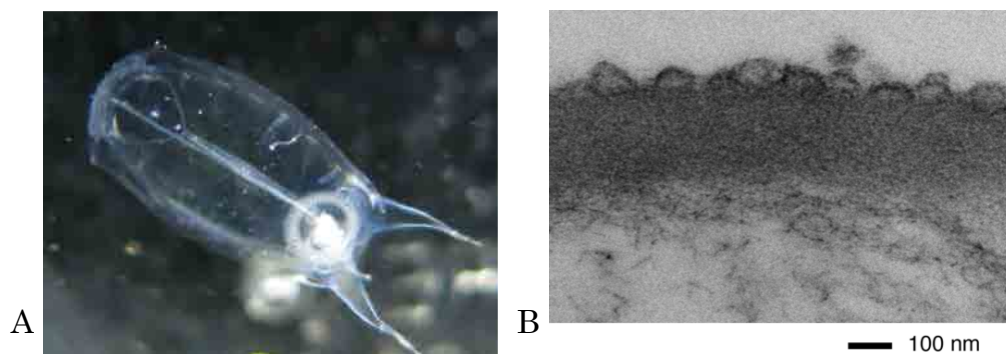


Fig. 3. (A) An individual of *Thalia rhomboides*. (B) TEM image of the tunic surface.

サルパの被囊は透明度が高く、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、被囊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 Lorian 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。

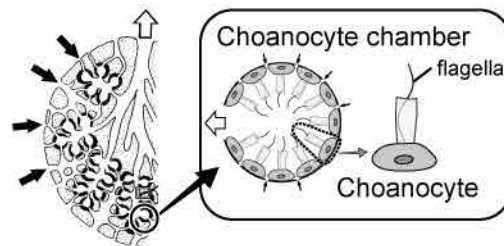


Fig. 2 Schematic image of sponge aquiferous system.

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えることができ、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)。

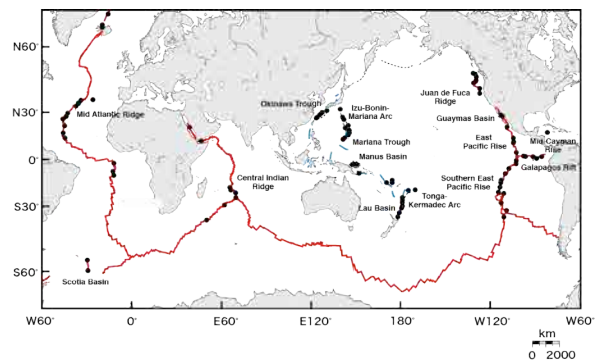


Fig.1 Location of various deep-sea hydrothermal vent systems in global ocean. Red line shows mid-oceanic ridge and blue line shows subduction arc-backarc systems.

3. スケーリーフットの特異性

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、これまでには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くとくど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」を用いてかいい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、かいいいフィールドの特定の間だけに生息し、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。

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いいフィールドの「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



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.

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、かいいいフィールドから 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の特徴を有していた。遺伝的には、かいい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。かいい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（かいい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。

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



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い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い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

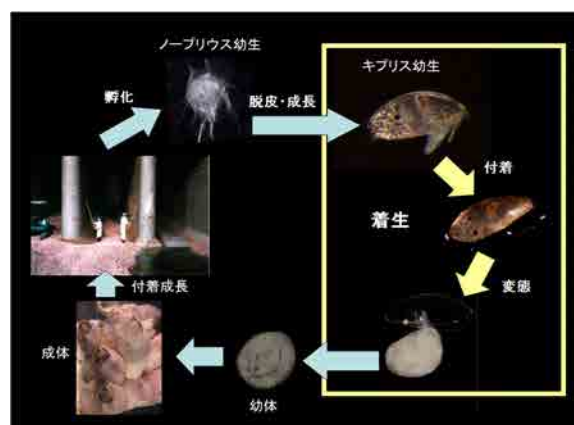


Fig.1 Lifecyle of barnacles.

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。

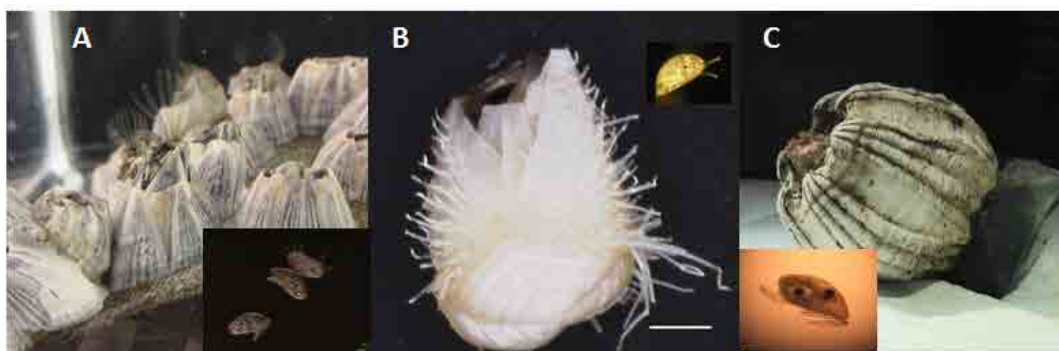


Fig.2 External shapes of test barnacle species (adult and cypris larvae).

A: *Balanus amphitrite*, B: *Acasta dofleini*, C: *Coronula diadema*

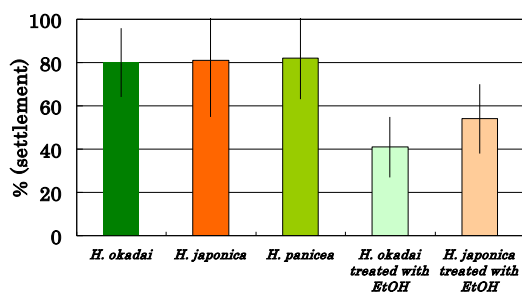


Fig.3 Settlement rates of cypris of *A. dofleini* toward the surface of three species sponge, *H. okadai*, *H. japonica*, and *H. panicea* after 48 hours.

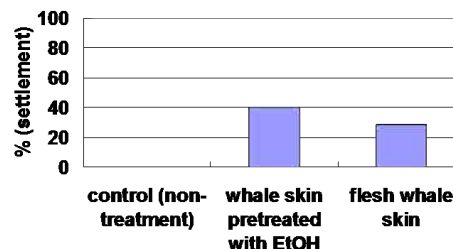


Fig.4 Settlement rates of cypris of *C. diadema* toward the surface of petri dish after 48 hours.

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 7 5 8 - 6 5

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

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あり、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

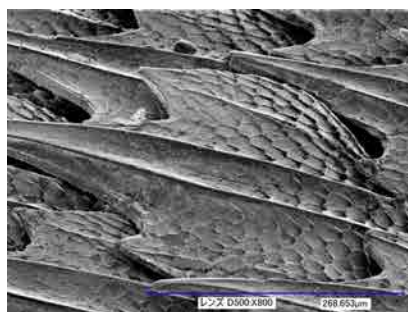


Figure 1. The SEM image of a shark skin surface.

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、

触媒を加えて良く攪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プ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℃のオープンで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鑄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鑄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

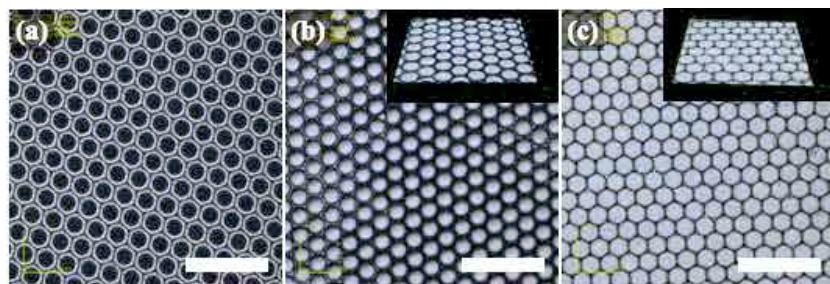


Figure 2. Laser microscope images of (a) honeycomb-patterned films, (b) PDMS microlens arrays, and (c) dimple structures. (bars; 80 μm)

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

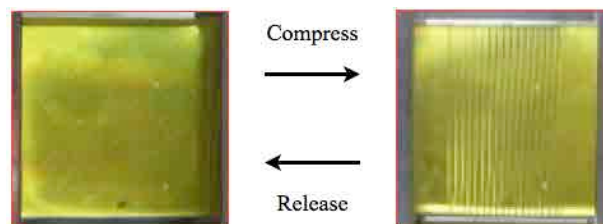


Figure 3. Photographs of before and after compress the sample surface.

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。

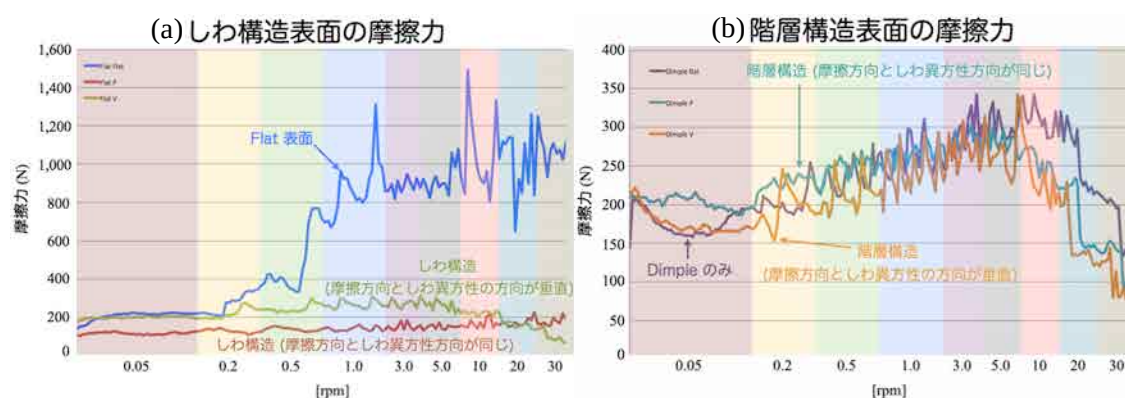


Figure 4. Graphs of friction measurements of (a) wrinkle structures and (b) biomimetic hierarchical structures.

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。