

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

- ・異分野刺激を生かせれば充分だ
曾我部 正博 (名古屋大学大学院医学系研究科) 6

(2) 評価委員からのメッセージ

- ・未来予測が教えるもの
亀井 信一 (株式会社三菱総合研究所) 10

(3) 研究紹介

生物規範工学 第二回全体会議 (2013年10月25日) 講演要旨

- ・オントロジー工学とライフスタイル
溝口 理一郎 (北陸先端科学技術大学院大学) 15
- ・バイオミメティクス基盤としての生物多様性情報データベースと自然史博物館
松浦 啓一 (国立科学博物館) 17
- ・自己組織化を利用した階層構造の作製
平井 悠司 (千歳科学技術大学) 19
- ・やわらかい微細構造作製とそのトライボロジー評価の現状
大園 拓哉、鈴木 航祐 (産業技術総合研究所) 21
- ・粗い界面における屈折と反射について
久保 英夫 (北海道大学) 23
- ・スーパーモスアイ構造を目指して
吉岡 伸也 (大阪大学) 25
- ・分子鎖を利用した界面における熱の制御
前田 浩孝 (名古屋工業大学) 27

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



・微細加工技術による生物規範を取り込んだ機能性表面創製 松尾 保孝（北海道大学）	29
・植物が持つウイルス抵抗性の利用と改変 三瀬 和之（京都大学）	31
・リポカリン、エレクトリックノーズの主要素材候補：その生理機能 中村 整（電気通信大学）	33
・「国立自然史博物館」を東北へ 西 弘嗣 先生（東北大学総合学術博物館）	35
・ラミニン固定化弾性率可変ゼラチンゲルを用いた iPS 細胞のフィーダーフリー分散培養 木戸秋 悟（九州大学）	37
・翅の損傷に対する補償メカニズム 安藤 規泰（東京大学）	39
・バイオミメティクス研究開発のためのテクノロジーガバナンス 安 順花、関谷 瑞木、 <u>阿多 誠文</u> （産業技術総合研究所）	41
・ライフスタイル・ニーズとテクノロジーのマッチング手法の開発－SECI モデルとオントロジー導入の可能性について－ 須藤 祐子（東北大学）	43
・昆虫の聴覚器規範設計の解明に向けて 西野 浩史（北海道大学）	46
・ゴカイを規範とした全方向移動型流体内推進ロボットに関する研究 小林 俊一（信州大学）	48
・構造色材料による光制御とデバイス応用 金森 義明（東北大学）	50
・生物規範工学に基づく技術の経済価値 馬奈木 俊介（東北大学）	52



(4) トピックス (PEN より)

- ・連載 生物規範工学 第十三回 生物規範飛行の学理とバイオミメティクス
劉 浩 (千葉大学大学院工学研究科) 5 5
- ・連載 生物規範工学 第十四回 昆虫における音・振動情報の機能解明と害虫防除への応用
高梨 琢磨 (森林総合研究所) 6 8
- ・連載 生物規範工学 第十五回 構造色が変化する生物とスマート材料設計へのヒント
不動寺 浩 (物質・材料研究機構) 7 5

(5) 国内外研究動向紹介

- ・生物規範工学全体会議・海洋研究開発機構合同講演会に参加して
大園 拓哉 (産業技術総合研究所) 8 2
- ・国際海洋環境情報センター (GODAC) および美ら海水族館総合研究センター見学会に参加して
平井 悠司 (千歳科学技術大学) 8 6
- ・「第 58 回高分子夏季大学 -未来を拓く高分子-」に参加して
関谷 瑞木 (産業技術総合研究所) 8 8

- (6) 新聞・報道 9 0
- (7) アウトリーチ活動 9 7
- (8) 各種案内 9 9



(1) 卷頭言

異分野刺激を生かせれば充分だ

曾我部 正博（名古屋大学大学院医学系研究科）



下村代表の要請で評価グループに参画することになったが、正直なところ重荷である。それでも渋々引き受けた第 1 の理由は、本新学術領域の主な標的レベルが「サブセルラーサイズ」であり、それは私自身が進めている細胞力覚のサブセルラー機構（ナノ-マイクロサイズのメカノセンシング機構）の研究にぴたりと一致したからである。第 2 の理由は、やるべきだとは思っていたが、自分にはできなかった「サブセルラー構造のデータベース作成」と「持続可能な循環型社会モデルの構築」が（A01 領域）と（C01 領域）の構想にしっかりと反映されていたからである。つまり、私は下村代表のマジックに見事に幻惑されたのである。とはいえ、私は一介の生物物理学者なので、その役割は（B01 領域）の、出口（工学）ではなく、その種になる基礎研究の評価であると勝手に決めている。

基礎研究は出口を意識しすぎてはその自由さを失い、しばしば中途半端な結果に終わる。むしろ対象の面白さに魅了されてその謎解きに集中するほうが、独創的でかつ本当に役に立つ成果につながる。新学術領域というシステムは各メンバーが抱いている科学者、工学者としての夢を、ときには予想外の形で実現する触媒の場であり、決して個人の研究を束縛すべきものではない。一方で、各人が蛸壺的研究に終始したのでは、あまりに勿体ない。せっかく用意された「異分野交流」の機会を生かさないと手はないと思うのである。

確立した研究者の「異分野融合」は不可能である。「異分野連携」は、それが自然で必然であれば試す価値はあるが、見せかけの連携は時間の無駄である。現実的には「異分野刺激」で充分であり、うまく行けば、その効果が各研究成果の中にそこはかたなく結晶するだろう。そのような成果が少しでも多く本領域から生まれることを切に願っている。これが現時点で私の言える総てであり、以下は蛇足に過ぎないが、私自身が見知った異分野刺激の一例を紹介して責を果たしたい。

私は 1973 年に大阪大学基礎工学部生物工学科（1967 年創立）を卒業した。当時の生物工学科は、生物物理学の 3 研究室（ヘム蛋白質、イオンチャネル、アクチンなどの構造機能関連、ゾーリムシの行動解析など）に加えて、脳神経生理学（シナプス可塑性、運動制御の神経機構）、数理生物学（神経回路モデル、階層システムの数理モデル）、制御工学（情報理論、マンマシン-インタフェース）の計 6 研究室で構成されていた。全くバラバラだが、一つの共通目標は、生物の脳に学び、新しい情報処理の理論やハードウェア（人工

知能)を開発することであった。基本精神はまさに“バイオミメティクス”そのものである。地道な神経生理学の手法でシナプス可塑性を解析する一方で、当時流行の非可逆過程の熱力学/ホログラフィー/カタストロフィー/ニューラルネットの理論に基づいて脳の学習記憶の情報処理機構を探るといった夢多き研究が進められていた。ところが、生物と工学の溝は、埋まるどころか、やればやるほど深まった。気づいてみれば、生物系はひたすら生物のメカニズム解析に没頭し、工学系は元々の専門分野に舞い戻って夢の異分野融合は見事に砕け散ったのである。

当時すでに遺伝情報が DNA の配列に刻まれていること、神経興奮がイオンチャネルの動態に基づくことなどは分かっていた。しかし、細胞内シグナル分子はおろかイオンチャネルの分子実体も全くの謎、ゲノムの詳細などはるか彼方で、見本となるべき生物や脳の仕組みを理解するだけでも夢のまた夢であった。こうした状況を冷静に振り返れば、生物工学科の野望の失敗は必然の結末であり、その主たる原因は科学発展の現状分析の甘さにあったと言わざるを得ない。プロジェクトを進めるには、絶えざる冷静な現状分析が必須不可欠なのである。そのときから 50 年経過して、生物のメカニズム理解は格段に進歩しており、現時点での領域代表を中心とした分析は概ね正しいと考えている。

生物工学科の目論見は失敗と書いたが、何の成果も生み出さなかったわけではない。教職員は異分野の刺激を享受し、嬉々として興味深い共同研究に没頭し、その興奮や喜びはひしひしと学生にも伝わってきた。そして最大の成果は、その刺激を受けて育った学生・院生であった。もともと彼らの間に専門分野の壁はなく、複数の研究室を出入りして頻繁に情報交換を行い、自然に異分野融合研究者として育ち、現在幅広い分野でユニークな研究者として活躍している。その経験からすると、期待すべきはこの新学術研究に参画している研究者というよりも、それよりはるかに若い世代である。既に下沢評価委員からクロスボーダーポストドクの養成が提案されているが、私は更に若い世代の養成も重要だと思う。異分野刺激の中で育った若者こそ宝物である。これを促進する方策が望まれるが、当面は各メンバーがこの新学術領域の面白さと興奮を各研究室に持ち帰って伝えることが現実的であろう。領域代表は気が気ではないだろうが、たかだか 4-5 年でブレークスルーが出るわけではなく、10-20 年後に花咲く種が播ければ充分成功だと、私は信じている。

少しだけ私の異分野体験を書かせていただく。生物工学科には修士卒業まで約 6 年間在籍し、群論、情報理論、量子力学、相対性理論、統計熱力学から生物物理学、生化学、生物学、神経生理学まで実に広範な分野を学び、一部を除いてどの分野もその気になれば何とかなるといった感触はつかめた。学ぶ過程は実に楽しかった。この中で特に統計熱力学が面白く、その生物学への応用を目指した。そこで、その当時唯一“1 分子計測”が可能なイオンチャネルを対象に選んだ。しかしその分子実体は謎だったので、精一杯の調査をして、

チャンネル分子として最も可能性のあるイノシトールリン脂質にたどり着いた。これを脂質平面膜中にチャンネルとして再構成し、単一チャンネル電流の計測と解析を目指したのである。何とか成功はしたが、膜中でのチャンネルの高次構造を決める手立てがなかった。そこで、有機化学者と協力して脂質類似の数多くの人工チャンネル分子を合成していただき、膜中での高次構造と機能の関係を解析した。また、動的構造の解析には分子動力学を使うしかなく、素人ながら講習を受けて、満足できる結果を得たのは研究を始めて 25 年後の 1999 年であった。丁度その頃に天然チャンネル蛋白質の高次構造が決められて研究の主流は完全にその方向にシフトし、私達の研究はあえなく片隅に追いやられることになった。

このような運命は薄々感じていたので、私なりに新しい可能性を探ってはいたが、良い解答を見つけられないでいた。そんな折に、私の講演を聴いた耳鼻科の医師から、“あなたの研究は内耳有毛細胞の機械受容チャンネルと耳毒性に関係するかもしれない”との示唆を受けた。それまで全く想像もしていなかった異分野からの刺激で心底驚いたが、それがきっかけで機械受容チャンネルが私のライフワークとなり、研究者として何とか生き延びることができたのである。この過程で、脂質平面膜、脂質生化学、薬理学、神経生理学、分子動力学など多様な実験を物怖じすることなく進められ、また臨床医学からの示唆を素直に受け入れることができたが、それは生物工学科時代の異分野教育の賜だと感謝している。

異分野刺激は重要だが、それを受け取る現役世代が見果てぬ夢に必死にかつ樂しげにチャレンジする姿を見せなければ、若者の魂には届かない。その夢のデザインの骨組みを描くのが、領域代表と総合班の最も重要な仕事であるが、生物の巧みなメカニズムを学んで工学に昇華しよう、というお題目だけでは意味がない。本学術領域がそのような薄っぺらなものではないことは承知している。主要実働部隊 B01 領域の両翼に配置された A01 領域「博物館学」と C01 領域「生物規範社会学」に、これまでの単純なバイオミメティクスを乗り越える意気込みと可能性が感じられる。B01 のメンバーは、絶妙に配置されたユニークな両翼から、大いなる刺激を受けて研究に生かしてほしい。もちろん(A01 領域)と(C01 領域)も同様である。その上で、「生物規範工学」に通底する高い志をもって必死に現場に臨む姿勢を研究室の若者に伝えていただきたい。そうした日常の努力こそ将来の宝物を育む最良の方法である。このユニークな構成の新学術領域が選定された背後には、このような期待があることを励みとしていただきたい。

(2) 評価委員からのメッセージ

未来予測が教えるもの

亀井 信一（株式会社三菱総合研究所）



将来に対する漠然とした不安感を背景に、最近「未来予測」を冠する書籍や特集記事を目にする機会が増えた。本年9月14日の日本経済新聞 NIKKEI PLUS1 のエコノ探偵団では「未来予測どうやっているの？」というタイトルで、人口や技術の進歩的考察が特集されている。

筆者は、シンクタンクという業界に属している。未来を予測しこれに基づき的確な提言を行うことを生業としている。前述の日経の記事でも紹介しているが、未来予測は極めて高度な技術を要し、必ずしも全ての精度が高いとは言えない。未来予測の難しさに関して、この業界でよく引き合いに出されるのが、1870年の「ロンドンの市街地は50年後に高さ3メートルの馬糞で埋め尽くされる」という予測である。よく知られているように、未来予測で最も精度が高いものは人口推計である。ロンドン予測は、人口増、交通のために必要な馬車の増加量、馬の需要増、馬糞の増加増を基にした個々には合理的な推計ではあったが、自動車の普及がこの予測を大きく覆してしまった。

我が国の未来予測の先鞭の一つが、1901年の報知新聞によるものである。今から110年以上前に100年後の予測を行った。その中には、今の言葉に翻訳すると、「新幹線は東京、神戸を2時間半で結ぶ」「インターネットで買い物をする、翌日には宅配便で配送される」「恋人たちは携帯電話で長電話をするし、もちろん国際通話もできる。テレビ電話も使われ始める」「大都市の交通として路面電車はなくなり、自動車のほか、地下鉄やモノレールが中心になる」「オフィスにも家庭にもエアコンがある」となる。110年も前の予測とは思えない精度である。これらの『工学的な』予測は驚くほど正確なことがわかる。

一方、「サハラ砂漠のような砂漠は、緑地に変えられている」「蚊やノミは、絶滅させられている」「台風を消滅させて被害を防いだり、地震が起きても被害を受けない建物や都市ができていく」「犬や猫などのペットと自由に会話をすることができる」というものもあり、『自然や生物』に関わる予測は、極めて不正確であるといえる。

我が国では過去40年以上にわたってデルファイ法による技術予測調査が行われている。比較的信頼性が高い調査ではあるが、90年代の調査では、「生物組織細胞によるクローン個体の実現は2015年～2023年」と予測していたが、実際には20年も前の1997年に

英国のロスリン研究所がクローン羊を生み出している。

「『工学的』な予測は驚くほど正確であるが、『自然や生物』に関わる予測は逆に極めて不正確である」という傾向は、古今東西を問わず、どうも真理らしい。それでは、「生物規範工学」はどうか考えればよいのか？ 筆者の最近の関心ごとである。本プロジェクトにその解を期待したい。



(3) 研究紹介
生物規範工学 第二回全体会議
(2013年10月25日) 講演要旨

生物規範工学 第二回全体会議

日時：2013年10月25日（金）8時50分～17時00分

会場：東北大学工学研究科 中央棟2階 大会議室（青葉山キャンパス）

●プログラム

8：50～9：00 領域代表 開会ならびに経過報告

9：00～9：40 計画研究 A班（野村班）

- ・溝口 理一郎 北陸先端科学技術大学院大学 「オントロジー工学とライフスタイル」
- ・松浦 啓一 国立科学博物館 「バイオミメティクス基盤としての生物多様性情報データベースと自然史博物館」

9：40～10：20 計画研究 B-1班（大園班）

- ・平井 悠司 千歳科学技術大学 「自己組織化を利用した階層構造の作製」
- ・大園 拓哉、鈴木 航祐 産業技術総合研究所 「やわらかい微細構造作製とそのトライボロジー評価の現状」

10：20～11：00 計画研究 B-2班（針山班）

- ・久保 英夫 北海道大学 「粗い界面における屈折と反射について」
- ・吉岡 伸也 大阪大学 「スーパーモスアイ構造を目指して」

11：00～11：10 休憩

11：10～11：50 計画研究 B-3班（細田班）

- ・前田 浩孝 名古屋工業大学 「分子鎖を利用した界面における熱の制御」
- ・松尾 保孝 北海道大学 「微細加工技術による生物規範を取り込んだ機能性表面創製」

11：50～12：30 計画研究 B-4班（森班）

- ・三瀬 和之 京都大学 「植物が持つウイルス抵抗性の利用と改変」
- ・中村 整 電気通信大学 「リポカリン、エレクトリックノーズの主要素材候補：その生理機能」

12：30～13：30 昼食

13:30~14:00 特別講演

- ・西 弘嗣 先生 東北大学総合学術博物館 「「国立自然史博物館」を東北へ」

14:00~14:40 計画研究 B-5班 (劉班)

- ・木戸秋 悟 九州大学 「ラミニン固定化弾性率可変ゼラチンゲルを用いたiPS細胞のフィーダーフリー分散培養」
- ・安藤 規泰 東京大学 「翅の損傷に対する補償メカニズム」

14:40~15:20 計画研究 C班 (石田班)

- ・安 順花、関谷 瑞木、阿多 誠文 産業技術総合研究所 「バイオミメティクス研究開発のためのテクノロジーガバナンス」
- ・須藤 祐子 東北大学 「ライフスタイル・ニーズとテクノロジーのマッチング手法の開発ーSECIモデルとオントロジー導入の可能性についてー」

15:20~15:30 休憩

15:30~15:45 公募研究

- ・西野 浩史 北海道大学 「昆虫の聴覚器規範設計の解明に向けて」

15:45~16:00 公募研究

- ・小林 俊一 信州大学 「ゴカイを規範とした全方向移動型流体内推進ロボットに関する研究」

16:00~16:15 公募研究

- ・金森 義明 東北大学 「構造色材料による光制御とデバイス応用」

16:15~16:30 公募研究

- ・馬奈木 俊介 東北大学 「生物規範工学に基づく技術の経済価値」

16:30~16:50 班間連携に関する報告

- ・細田班(B01-3) – 森班(B01-4)
- ・野村班(A01-1) – 石田班(C01-1)

16:50~17:00 総括班評価グループ講評

- ・下澤 楯夫 先生

所属班：A01 班

所属機関：北陸先端科学技術大学院大学

氏名：溝口 理一郎

所属機関住所：〒923-1292 石川県能美市旭台1-1

e-mail：mizo@jaist.ac.jp

研究キーワード：オントロジー工学，ネイチャーテクノロジー，
行為分解木，ライフスタイル



オントロジー工学とライフスタイル Ontological Engineering and Life Style

1. はじめに

A 班：北陸先端大の溝口と阪大産研のグループと C 班：東北大学の石田研究室との班間共同研究一環として行われている，オントロジー工学(1)と Life Style バックキャストイング(2)の融合研究の現状を紹介する。

2. 研究の概要

2030 年の Life Style のひな型は石田教授等の努力によって 1000 を超す候補から優れた Life Style が 50 あまりに絞り込まれて検討の対象となっている(2)。Life Style 研究の目的の一つに、バックキャストイング法を用いて、現在我々を取り巻いている環境と折り合いをつけつつ、対象とする Life Style をどのようにして実現すれば良いかということに関する示唆を与えることがある。

一方、溝口研究室ではオントロジー工学研究の一つとして、人工物の機能構造をコンピュータ理解できるように表現することを可能にする機能分解木という考えとその構築を支援する OntoloGear と呼ばれるツールの開発を行ってきた(3)。この研究では、OntoloGear を行為分解に一般化して Life Style の分解木を作製することで、石田研究室の研究を実現することに貢献している。オントロジー工学と Life Style 研究の融合という興味深い Collaboration である。

手法の本質はゴール分解という考えにある。とにかく、達成したいゴールを方式と呼ばれる概念を用いつつ、具体的に達成したいゴールと人間の満足という精神的なゴールに分解するのである。図1に電柱を木に似せて作ってエコ発電もするようにして、景観を損なわず、街角の至る所でエコエネルギーの利用者が集い、小さな社交の場となっていると言

所属班：A01 班

所属機関：国立科学博物館 館長付

氏名：松浦 啓一

所属機関住所：〒305-0005 茨城県つくば市天久保 4-1-1

e-mail：matsuura@kahaku.go.jp

研究キーワード：自然史博物館、自然史標本、データベース、
表面構造、生物多様性情報



バイオミメティクス基盤としての生物多様性情報データベースと 自然史博物館

Building a platform for biomimetics project by biodiversity databases and natural history museums

1. はじめに

1980年代から自然史博物館は収蔵標本のデータベース化を行ってきた。1990年代後半になると自然史標本のデータベースや生物群（例：魚類や哺乳類など）に特化したデータベースが構築されるようになった。この状況を推進するため、2001年に国際プロジェクトとしてGBIF (Global Biodiversity Information Facility 地球規模生物多様性情報機構)が設立され^(2,3)、現時点で4億1千万件を超える生物多様性情報がGBIFポータルを通じて公開されている。これらのデータベースはバイオミメティクス研究の貴重な道標とリソースを提供するが、同時に限界もある。その最大の課題は形態の画像情報がマクロレベルに留まっていることである。自然史博物館では、この課題を克服するための活動が行われている。

2. バイオミメティクスから見た生物多様性情報データベースと自然史博物館の課題

生物多様性情報データベースや自然史博物館のデータベースは標本情報や観察情報のメタデータを提供することに主眼が置かれている。そのため形態情報は限られており、とりわけ画像情報は不十分である。このため自然史博物館では表面構造に重点を置いてデータ収集を行っている。データ収集の過程で分類群による表面構造の多様性に大きな相違がある事が明らかになった。自然史博物館のデータ収集の現状と今後の方向性についても報告する。



Fig.1 Biodiversity databases: left, GBIF (Global Biodiversity Information Facility); right, FishBase.

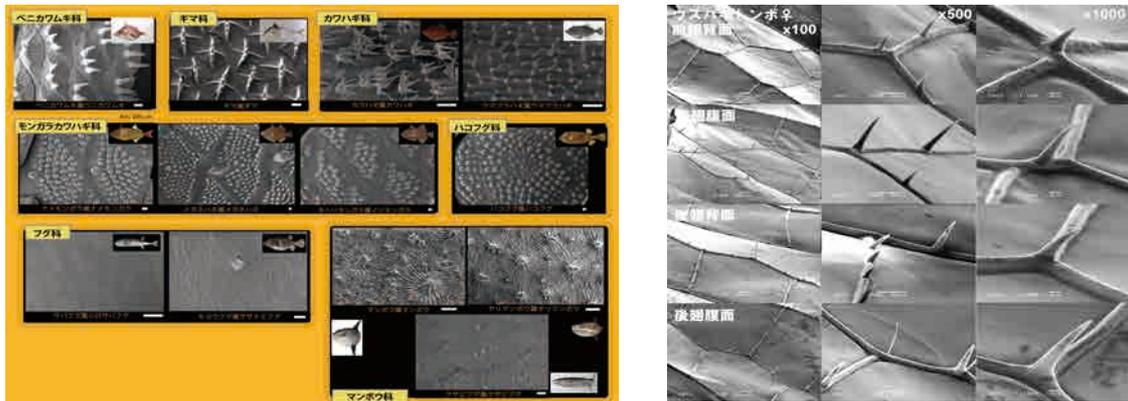


Fig.2 SEM images of tetraodontiform fishes (left) and dragonfly (right).

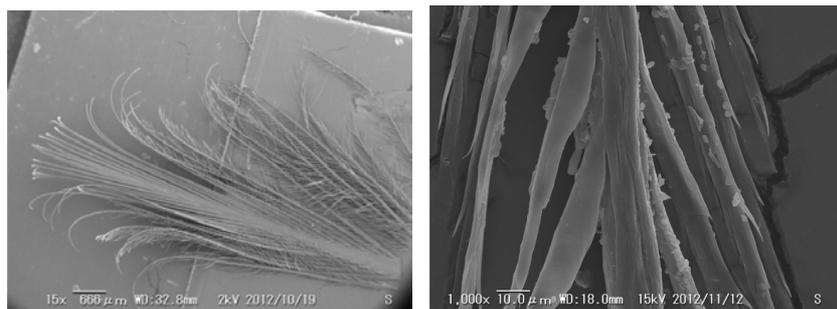


Fig.3 SEM images of birds feather. Left, *Eudyptes chrysocome*; right, *Nipponia nippon*.

参考文献

- (1) 生物多様性政策研究会, 生物多様性キーワード事典. 中央法規出版株式会社; 東京, 2002.
- (2) 松浦啓一, 学術月報, 2004, 57(12), 1064-1069.
- (3) 松浦啓一, 遺伝, 2007, 61(4), 36-41.

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、しわ、ディンプル



自己組織化を利用した階層構造の作製 Preparation of Hierarchical Structures by Self-organization

1. はじめに

B01-1 班(生物規範界面デザイン)では、生物の「動き」とその「制御」、変形能を有する界面凹凸形状かつ濡れた(ウェット)界面に着目、やわらかく変形可能な生物界面に見られる防汚機能や摩擦特性制御を、人工系を構築して解明することを目的としている。そこで、まずは自己組織化を利用し生物表面に存在する様々な微細構造の作製を試みた。

2. サメ肌模倣表面の作製

A01-1 班の篠原先生から頂いたサメ肌の電子顕微鏡(SEM)像より、サメ肌表面にはリブレット構造以外にも小さなディンプル構造を有している、階層構造を持ったサメがいることが確認された。サメ肌のリブレット構造は整流効果を産み出していると言われているが、ディンプル構造の機能は明らかではない。そこで人工系で似たような構造を作製、各種測定を行うことでその機能の特定を行いたいと考えた。我々の班では自己組織化を利用したピラー構造化膜⁽¹⁾と座屈を利用したしわ構造の形成⁽²⁾に関して報告しており、それらを組み

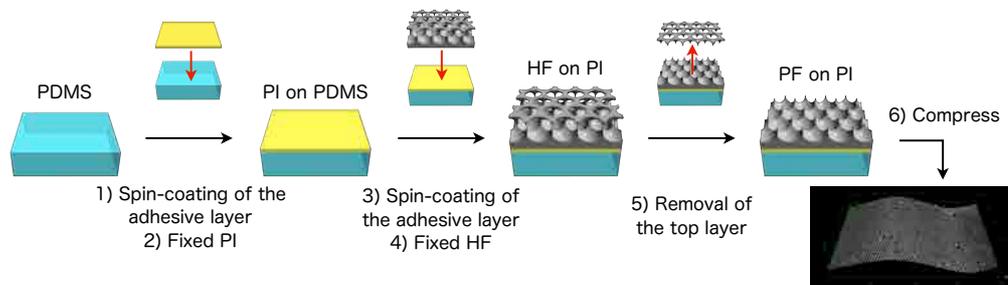


Fig.1 Schematic preparation procedures and a laser microscope image of the shark-skin mimetic surface

合わせることでサメ肌模倣表面の作製を行った (Fig. 1)。

3. 耐久性を有するしわ構造の作製

サメ肌のリブレット構造に代表されるように、周期的なしわのような構造は摩擦を減らしているであろう生体表面に多数観察される。しかしながら既知の技術で人工的に作製されたしわ構造は、機械的な刺激により剥離やひび割れといった問題が生じていた。そこでこれらの問題を解決するために、弾性体表面近傍により硬い材料でできたポラス状薄膜を埋め込むことで耐久性を有するしわ構造の作製を考えた。Fig.2 にその作製方法を示す。埋め込む硬い層として自己組織化を利用して作製可能な高分子ハニカム状多孔質膜の上面を利用し、ポリジメチルシロキサン (PDMS) に埋め込むことでしわ構造の形成に成功した (Fig.2(b,c))。また、ハニカム状多孔質膜にあらかじめ金属を蒸着することでその埋め込まれる硬い層のヤング率も変えることができ、しわ構造の周期も制御可能であることが示唆された (Fig.2(d))。さらに構造を作製後に高分子を除くことで、内部に空孔を有しつつしわ構造を形成させることにも成功した (Fig.2(e-g))。この内部空孔は潤滑剤などを保持することが可能だと考えられ、荷重がかかったときにこの空孔から潤滑剤が滲み出すことで、より摩擦力が下がるのではないかと期待される。今後はこれら得られた材料の表面特性を測定して行く予定である。

参考文献

- (1) Yabu, H.; Hirai, Y.; Shimomura, M. *Langmuir* **2006**, *22*(23), 9760–9764.
- (2) Ohzono, T.; Shimomura, M. *Phys. Rev. B* **2004**, *69*(13), 132202-132206.

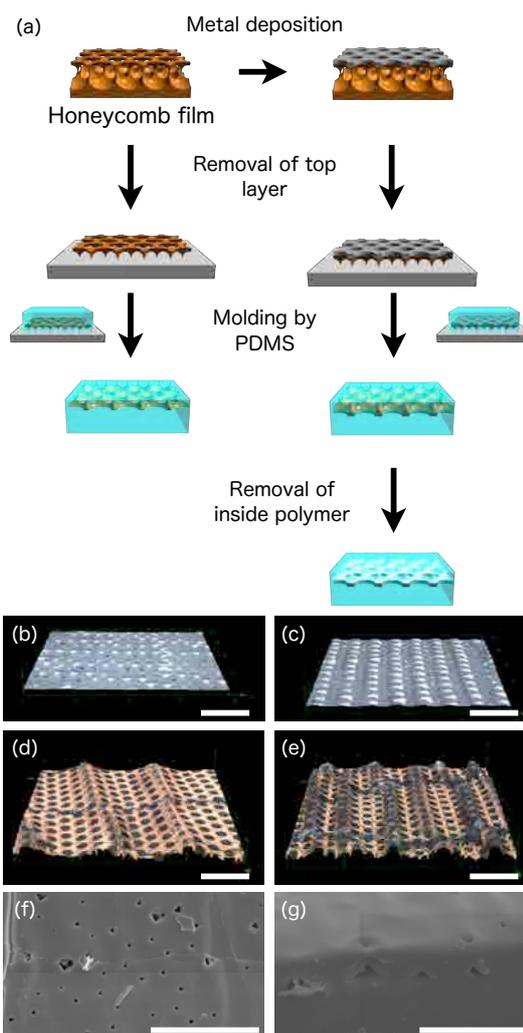


Fig.2 (a) Schematic preparation procedures of wrinkle surfaces. Laser microscope images of a polymer network filled in PDMS (b) before and (c) after compression and a metal network filled in PDMS (d) before and (e) after removal of a polymer network. SEM images of a metal network filled in PDMS after removal of a polymer network. (f) Top and (g) cross-sectional view. Bars; 30 μm

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、鈴木 航祐

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：トライボロジー、表面凹凸構造、ゲル、構造可変



やわらかい微細構造作製とそのトライボロジー評価の現状 Fabrication of soft microstructures and their tribological tests

1. はじめに

当 B01-1 班（生物規範界面デザイン）の長期目標概略は以下である。生物の「動き」とその「制御」には、生物表面と環境の界面が重要であるが、その界面作用として、変形能を有する界面凹凸形状と液体に濡れた（ウェット）界面に着目し、やわらかく変形可能な生物界面に見られる防汚機能、摩擦特性制御、吸着脱離機能のメカニズムを、人工系を構築することで解明する。その結果、新しい摩擦制御界面システムや吸着脱離システムを開発する。

この長期目標に向け、初年度であるH24年度の計画は、弾性体やそのウェット材料の表面において、微細構造の作製とその表面の化学修飾法の調査であり、その一つの成果として、トライボロジーテストにおいて重要であると考えられる比較的大きな周期の表面座屈構造（リンクル）をシリコンゴム弾性体上において作製することに成功した。この構造はその構造可変性を利用し光拡散機能（図1）があることが分かり報告もしている⁽¹⁻³⁾。現在、この構造を用いてドライな条件下で摩擦力評価を行っており、その中間結果を報告したい。

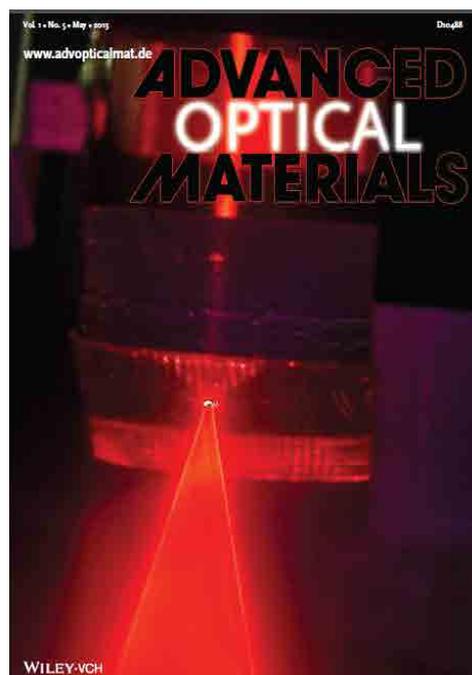


Fig.1 Tunable optical diffuser based on deformable wrinkles. The optical path of the diffused laser beam transmitted through shape-tunable wrinkles with a periodicity in the range of hundreds of micrometers is visualized.

図2のようにボール圧子を、サブミリメートル程度の比較的大きな周期のリンクル構造に押し付け、側方運動させ、その場合の摩擦力を測定している。同時にその接触面を光学顕微鏡で観察している(図3)。現在、摩擦力の時間依存性、荷重依存性、リンクル構造の深さ依存性、移動方向依存性について、その解釈と解析を含め、検討を行っている段階であるが、少なくともリンクル構造の有無は明らかに摩擦挙動に影響することは分かった。今後この解析を行うとともに、ウェットな潤滑作用のある液体を介した挙動を調べることを目指す。

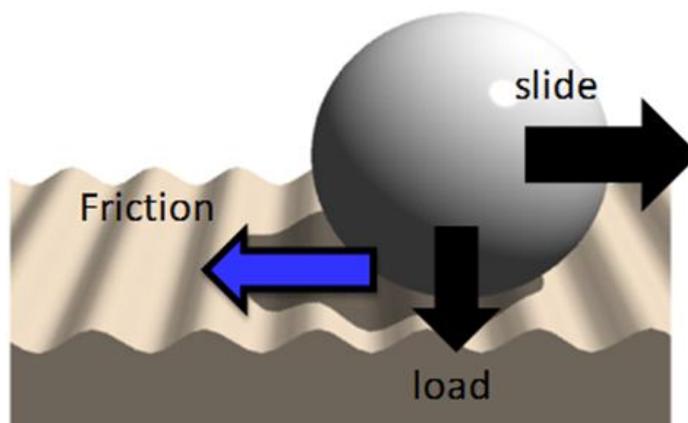


Fig.2 Schematic of dry friction measurement on the deformable microwrinkles.

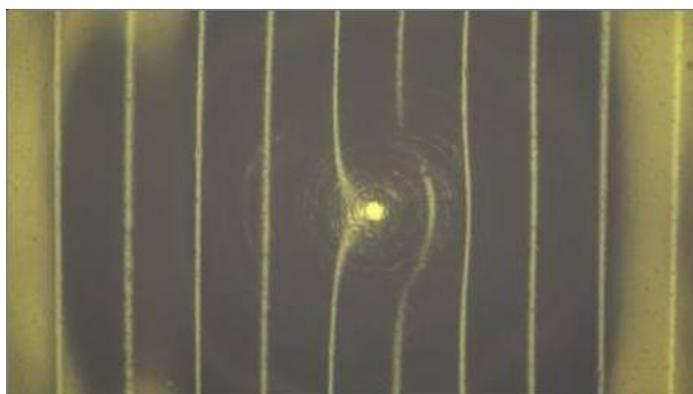


Fig.3 Optical image of the deformed structure of wrinkles under a dry-sliding friction test. The bright spot at the center corresponds to the frictional interface.

参考文献

- (1) Ohzono, T.; Suzuki, K.; Yamaguchi, T.; Fukuda, N. *KOBUNSHI RONBUNSHU* **2013**, *70*, 179-184.
- (2) Ohzono, T.; Suzuki, K.; Yamaguchi, T.; Fukuda, N. *Adv. Opt. Mater.* **2013**, *1*, 374-380.
- (3) 大園拓哉, 特願 2013-023033.

謝辞

本研究は、MEXT/JSPS KAKENHI Grant Number 24120003 の助成に基づき行われた。

所属班：B01-2 班

所属機関：北海道大学大学院理学研究院

氏名：久保 英夫

所属機関住所：〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

e-mail：kubo@math.sci.hokudai.ac.jp

研究キーワード：スペックル，粗面，強度分布



粗い界面における屈折と反射について

On the refraction and reflection in a rough interface

1. はじめに

最近、とある研究集会で、人の営みは「Maximizing the reward, not minimizing the error」という原理によって特徴付けられるという話を聞いた。数理物理では、現象はポテンシャル・エネルギーを最小化するように実現されることが公理とされており、エラーを最小化することに心血を注いでいると言っても過言ではない。その様な教育を受けてきた著者にとって、生命現象にあってはエラーの最小化より、報酬の最大化が主導原理であるという上述の主張にはインパクトがあった。例えば、学習成果が挙げれば報酬を受けられることがわかると、さらに学習意欲が高まり、それによってポジティブ・フィードバック(図1, 図2)がかかるというのが報酬の最大化の典型例だろう。また、PTSD にあっては、本人にとって苦痛以外の何物でもないような気持ちが繰り返し襲ってくるが、その苦痛もまたある意味での報酬と考えれば同じ原理に従っていることになる。何れの事象もエネルギー最小の原理からはずれて、概念的なパターン形成-自己組織化-を行っていると観ることができる。



Fig.1 Positive feedback.

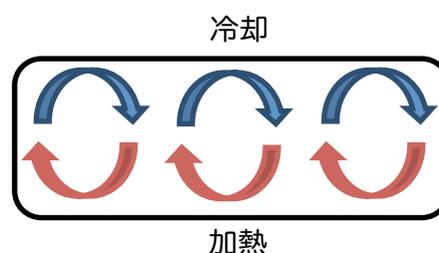


Fig.2 Heat convection.

2. ショウジョウバエの眼

人が従来の考え方で反射板を作成する場合、可能な限り滑らかな面を作ろうとすると思われる(曲率一定の意味でエネルギー最小)。一方、昆虫の眼は所謂、モスアイ構造を有しており、生命活動を維持していく上で重要な様々な機能を発現させている(報酬の最大化)。ただし、遺伝情報に何らかの欠損があると規則正しいパターンが形成されないことが知られている。ショウジョウバエの場合に、その原因の特定が木村賢一博士を中心に精力的に進められている(図 3 参照)。以上を踏まえると、平坦な界面とパターンのある界面を連続的につなぐようなラフネスのある界面における光学を考えることに意味があると思われる。

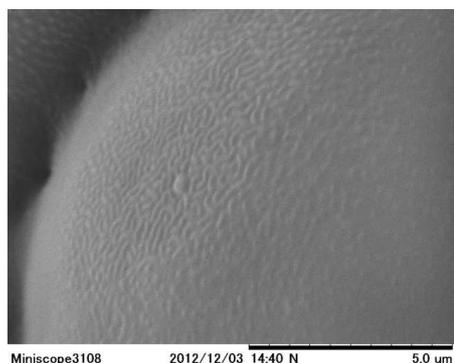


Fig.3 spa^{pol}(sparkling-poliert) mutant.

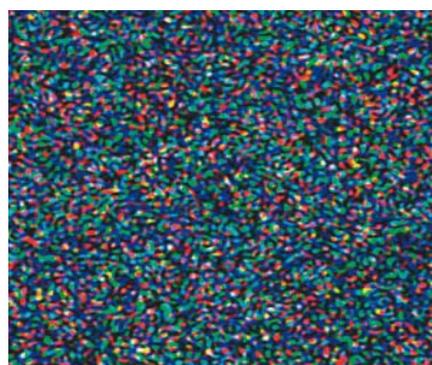


Fig.4 Speckle pattern⁽¹⁾.

3. スペックル

ラフネスのある紙や壁面から反射されるレーザー光をみると、図 4 のようにぎらぎらと輝いて見えたり、物体表面がざらざらして見える。このような模様はスペックルと呼ばれ、粗面の凹凸によりランダムに散乱されたレーザー光が干渉することによって生じる現象である。スペックル模様の強度分布や平均径を求めるにはランダムな干渉を統計的に処理する必要がある。具体的には、凹凸を高さの関数として表したとき、その統計分布がガウス分布に従うと仮定する。すると、複素振幅の標準偏差を σ とするとき、光の強度が I である確率密度関数 $P_I(I)$ と位相が θ である確率密度関数 $P_\theta(\theta)$ は次のように表される⁽²⁾：
$$P_I(I) = \exp(-I/(2\sigma^2))/(2\sigma^2), \quad P_\theta(\theta) = 1/(2\pi)$$
こうした統計量を用いて、突然変異種ではどれだけ規則性が崩れているのかを測る指標を提案できればと考えている。

参考文献

- (1) 魚住 純, 北海学園大学大学院工学研究科紀要, 8: 63-74.
- (2) 朝倉 利光, 魚住 純, 電子科学研究, 4: 3-12.

謝辞

本考察を進めるにあたり、有益な議論をして戴いた B01-2 班の皆様に感謝致します。

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

所属機関住所：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-3

e-mail：syoshi@fbs.osaka-u.ac.jp

研究キーワード：モスアイ構造、モスアイ効果、反射率



スーパーモスアイ構造を目指して Toward super moth-eye structures

昨年 10 月に行われた新領域のキックオフシンポジウムにおいて、B01-2 班の研究テーマの一つに“モスアイ効果”を取り上げることを発表した。微小な突起が光の波長よりも短い間隔で周期的に配列した構造はモスアイ構造と呼ばれ、光の反射を抑制する働きがあることが知られている（モスアイ効果）⁽¹⁾。しかし、突起が配列する様子は、昆虫の種類によって大きく異なっている。例えばオオタバゴガの複眼では、突起は規則正しく結晶状に並んでいるのに対して、セミの翅ではアモルファス状に乱れた配列が観察される。B01-2 班では、生物が持つ光学構造が、欠陥を含んでいるにもかかわらず、なぜうまく機能するのか（あるいはどんな場合には機能しないのか）に注目しており、モスアイ構造をその具体的な研究対象として取り上げたのである。私は 1 年前、次のような研究方針を考えていた。

「乱れた構造は光を散乱させるから、セミの翅の反射率は高いはずだ。蛾の複眼の場合には、微弱な光を検出するために、コストをかけて突起配列をより規則的に作っているに違いない。構造の乱れと反射率の上昇を定量的に対応づけて、乱れの許容度合いをはっきりさせようではないか。」

その後一年間、数値計算や実験を行って研究を進めたところ、私はいろいろと誤解をしていたことが分かった。あらためて書くと、モスアイ構造とは“光の波長以下の間隔で、微小な突起が周期的に並んだ構造”であり、その構造は光の反射率を抑制する。これは正しい。私の勘違いは、論理を逆に出来ると思っていたところにある。すなわち、反射率を抑制するためにはモスアイ構造をもたねばならないと思っていたが、そうではなかった。反射率を抑えるだけなら、突起配列は周期的でなくても良いし、突起の間隔が光の波長よりも小さい必要もない。

モスアイ効果を確認するために、三角形の突起が一次元に並んだモデルを用いて、反射率の理論計算を行った結果を図 1（左）に示す。仮定したのは屈折率が 1 と 1.5 の界面

で、格子定数は 250nm、垂直入射で TE 偏光を仮定している。短波長領域では回折光が発生するためにスペクトル形状は複雑であるが、突起を高くすると、反射率が減少する様子が確認できる。反射率が減少し始める波長は、突起が高くなるにつれて長波長にシフトする。次に、突起の配列に乱れを加えて計算を行った。例として、格子定数に対して最大 20% の位置の乱雑さを導入した場合の計算結果を図 1 に示す。角度依存性を調べると、乱れによる光散乱は角度が大きい方向（横方向）において増大することが分かった（図 1 真中）。これは、配列の乱れが光の位相に与える影響が、横方向に散乱する場合に大きくなることから説明できる。しかし、角度に関して積分した全反射率は、乱れがない場合に比べてほんのわずかにしか上昇していない（図 1 右）。乱れの度合いを変えて計算を行ったところ、反射率の上昇が顕著になるのは、突起が並んでいるとは言えない程度にまで乱れが大きくなってからであることが分かった。さらに、突起の間隔（格子定数）についても検討を行ったところ、光の波長よりもはるかに大きな三角形であっても、アスペクト比が高ければ反射率は小さいままであることが分かった。深い溝を持つ構造では、光は複数回の反射を経ないと上方向に向かわないからである。

このような結果を踏まえて、いわゆるモスアイ構造にはどんな利点があるのか、モスアイ構造を超えるモスアイ構造がありうるか議論したい。

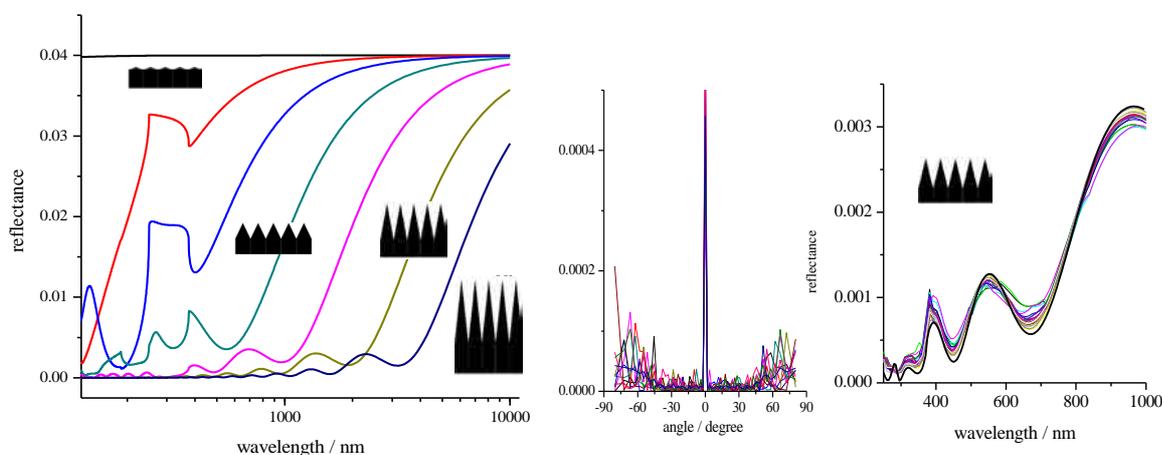


Fig.1 Theoretically calculated reflectance for moth-eye model structures. Dependence of the height of triangles on reflectance (left), the angular dependence of scattered light intensity at 510 nm for 10 structures with irregularities (center), and their reflectance spectra integrated over the angle (right). For the calculation with irregularities, the aspect ratio of the triangle is set to be two and the maximum position randomness is 20% of the lattice constant.

参考文献

- (1) Stavenga, D. G.; Foletti, S.; Palasantzas, G.; Arikawa, K. *Proc. R. Soc. B: Bio. Sci.* **2006**, *273*, 661-667.

所属班：B01-3班

所属機関：名古屋工業大学 若手研究イノベータ養成センター

氏名：前田 浩孝

所属機関住所：〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

e-mail：maeda.hirotaka@nitech.ac.jp

研究キーワード：熱伝達，表面官能基，有機-無機ハイブリッド膜



分子鎖を利用した界面における熱の制御

Control of heat transfer at material interfaces utilizing molecular chains

1. はじめに

カタツムリの殻のような生物体表面の微細構造が優れた表面特性を発揮することが知られている。このような生物機能を組み込んだ高機能実用基板表面の創製が B01-3 班の目標となる。半導体への応用を考えると、その界面における熱エネルギーの制御は重要な役割を担う。固体内の熱伝達については、フォノンによる熱伝導として理解されているが、界面については未だ十分な知見が得られていない。

蓮の葉の撥水性に学び開発された技術として、穂積らは有機-無機ハイブリッド膜を用いることで、動的はつ油性に優れた機能を持つ表面の合成に成功している⁽¹⁾。これは表面官能基間の駆動可能なスペースが重要な役割を担うと考えられている。この種の官能基の運動性により、赤外吸収領域が変化することから、界面における熱伝達に影響を及ぼすと想定される。ここでは、官能基としてアルキル鎖に注目し、その運動性と熱伝達の関係について研究の進展状況を報告する。

2. 実験

表面官能基の導入には、浦田らの報告に倣って有機-無機ハイブリッド膜を、テトラエトキシシラン(TEOS)とドデシルトリエトキシシラン (DTES) を出発原料に用いて合成し

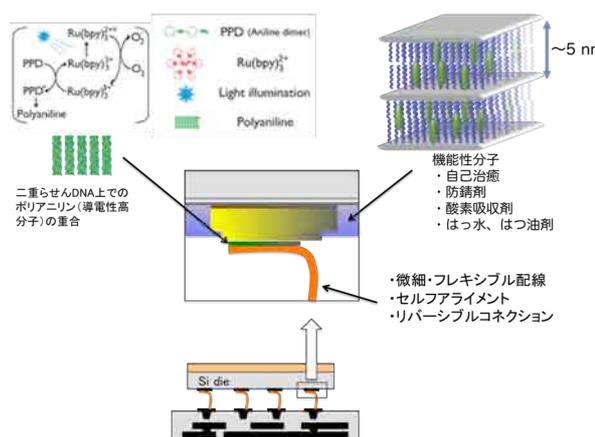


Fig. 1. Speculated image of B01-3 group's goal.

た⁽²⁾。アルキル鎖の運動性を変化させるために、単独で加水分解反応を施したアルコキシドと施さなかったものを共縮重合後に基板上にコーティングを行った。

3. 結果

FT-IR スペクトルから見積もられる膜のアルキル鎖の運動性は、アルコキシドの単独加水分解反応の違いにより変化した。コーティング回数がアルキル鎖の運動性に及ぼす影響を調査した結果、単独加水分解反応を行った場合は、アルキル鎖の運動性は積層回数とともに増加する傾向にあるが、単独加水分解反応を行わずに作製した膜では、そのアルキル鎖の運動性は低下した (Fig. 2)。XRD による解析の結果、単独加水分解反応を行わない場合にのみ、コーティング回数を増加させることで層状構造が形成されたことから、積層コーティング膜の構造が運動性に影響を及ぼすと推測される。また、どちらの場合においても、膜厚は積層回数とともに増加した。

熱拡散率は単独加水分解反応を行わない場合、アルキル鎖の運動性の増加とともに、増加した (Fig. 3)。一方、単独加水分解反応を行った場合は、その運動性の増加にも関わらず、熱拡散率は大きな変化を示さなかったことから、表面官能基の運動性の増加が熱拡散率に影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- (1) Hozumi, A.; Cheng, D. F.; Yagihashi, M. *J. Colloid Inter. Sci.* **2010**, *132*, 582-587.
 (2) Urata, C.; Cheng, D. F.; Mashed, B.; Hozumi, A. *RSC Adv.* **2012**, *2*, 9805-9808.

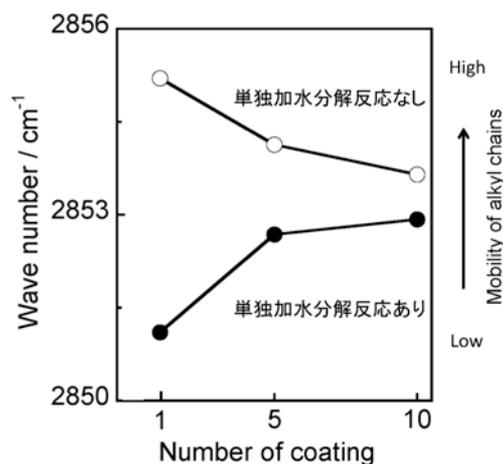


Fig. 2. Relationship between wave number due to the alkyl chains of the coatings and the coating number.

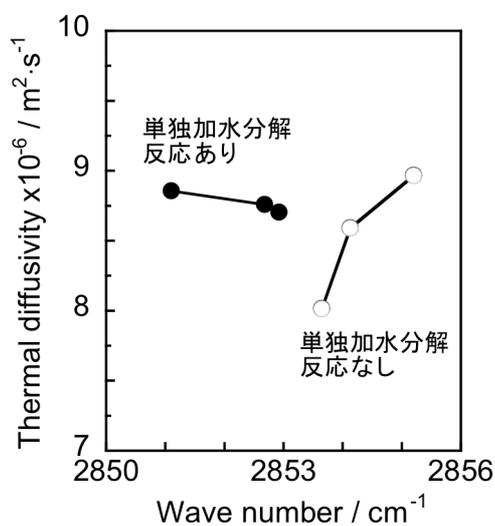


Fig. 3. Relationship between thermal diffusivities of the coatings and wave number due to the alkyl chains.

所属班：B01-3班

所属機関：北海道大学電子科学研究所

氏名：松尾 保孝

所属機関住所：〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目

e-mail：matuo@es.hokudai.ac.jp

研究キーワード：微細加工、表面構造、バイオナノデバイス



微細加工技術による生物規範を取り込んだ機能性表面創製 Creation of functional surfaces based on neo-biomimetics by nanotechnology fabrication

1. はじめに

微細加工技術は半導体デバイスのみならず、材料化学・エネルギー・バイオナノデバイスと幅広い分野に用いられるようになってきている。特に Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) による微小構造作製やナノインプリント法との組み合わせによって様々な材料表面に大面積での表面加工が実現されつつある。これまで行ってきた研究でも、表面・界面の組成変更や微細構造作製により機能性を大きく改変あるいは改善したデバイス作製を可能としてきた^[1,2]。そこで、微細加工技術をバックグラウンドに接着・接合表面の設計などを進めつつ、実デバイスからの要求を満たしながら生物規範を取り入れた表面構造構築に向けた研究を推進している。

2. 非対称形状表面によるマイクロパーツ輸送

実装用の小型抵抗・コンデンサなどのマイクロパーツは品質検査時の輸送に平面を非対称振動させることで一方向への運動を誘起するパーツフィーダを利用している。しかしながらメカニカルな負荷が大きく、マイクロパーツと平面の凝着力が運動に大きく影響するサイズ領域となるために、新しい輸送性能を持つパーツフィーダが要求されている。そこで、平面を非対称形状としたマイクロパーツフィーダを提案し研究を進めている[3]。フィーダ表面にのこぎり歯のような非対称形状加工を施すことでパーツと平面の非対称接触を誘起し、対称な平面振動のみでの一方向輸送を実現する。サブミリ以下のスケールでの運動においては慣性力だけでなく、フィーダ表面から受ける摩擦力や凝着力の影響をも考慮する必要があり、理論的な検証にはモデル化可能な非対称形状加工表面が要求されてくる。ダイシングやレーザー加工によりシリコンウエハ上ののこぎり歯形状加工を行ってきた

が、より精度の高い表面形状を得るために MEMS 技術を用いたナノ微細加工技術による表面作製を行った。具体的にはシリコン(221)面上にストライプパターンをフォトリソグラフィによって形成し、異方性ウエットエッチング液を用いることで異なる傾斜角(約 15 度と 54 度)を持つ非対称構造を作製した (Fig.1)。

この表面上にセラミックチップコンデンサを配置し、振幅 0.2mm、100Hz~140Hz の駆動周波数を作用させてダイナミクス解析を行った。その結果、120Hz において輸送速度がピークを持つ一方向輸送 (12.6sm/s)を実現することができた。今後は、摩擦・凝集力を制御可能なバイオミメティック界面の構築により運動ダイナミクス制御を試みていく。

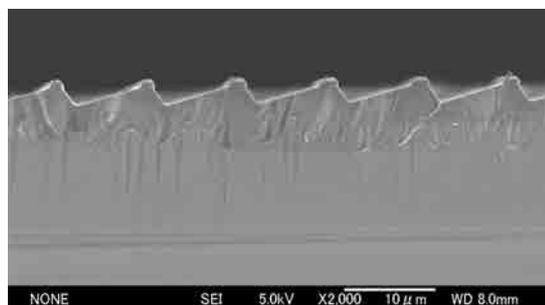


Fig.1 SEM image of periodic structure on silicon wafer fabricated by the anisotropic etching (Cross Section)

3. 今後の研究展開

凝着・摩擦は非常に興味深いテーマであると共に、日常的に様々な場面で適度な凝着・摩擦が要求されている。紹介したパーツ輸送のようにデバイス・システムとして要求されている構造に生物由来の表面を取り入れることで、新しい機能生表面の創出を目指していく。

参考文献

- (1) Hirai, Y.; Yabu, H.; Matsuo, Y.; Ijiro, K.; Shimomura, M., "Biomimetic bi-functional silicon nanospine-array structures prepared by using self-organized honeycomb templates and reactive ion etching" *J. Mater. Chem.* **2010**, *20*, 10804-10808.
- (2) Kumano, H.; Nakajima, H.; Iijima, H.; Odashima, S.; Matsuo, Y.; Ijiro, K.; Suemune, I., "Enhanced Photon Extraction from a Quantum Dot Induced by a Silver Microcolumnar Photon Reflector" *Appl. Phys. Express* **2013**, *6*, 062801.
- (3) Mitani, A.; Sugano, N.; Hirai, S., "Micro-parts Feeding by a Saw-tooth Surface" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **2006**, *11*, 671-681.

謝辞

紹介したパーツ輸送研究は三谷篤史氏が代表であり、微細加工に関して共同研究を行った。機能性界面の構築については非常に貴重なコメントとお力添えを頂いていることからここに感謝します。

三谷篤史 (博士 (工学)) 札幌市立大学デザイン学部・講師

E-mail: a.mitani@scu.ac.jp



所属班：B01-4班

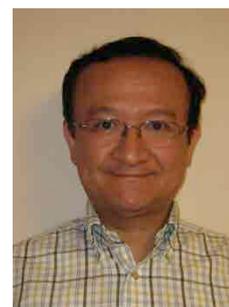
所属機関：京都大学大学院農学研究科植物病理学研究室

氏名：三瀬 和之

所属機関住所：〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

e-mail：kmise@kais.kyoto-u.ac.jp

研究キーワード：植物RNAウイルス、RNA複製、細胞間移行、
イネ、抵抗性



植物が持つウイルス抵抗性の利用と改変

Utilization and Modification of Virus Resistance in Plants

ウイルスは、作物における重要な病原体のひとつである。ウイルスが植物に感染する際、ウイルス因子と宿主因子が相互作用し、感染が成立する。これらの相互作用はウイルスの複製、細胞間移行、全身感染、病徴発現や宿主の抵抗反応の誘起に影響する (Fig. 1)。近年、各過程に参与するウイルス因子は急速に解析されてきたが、宿主因子の実体や因子間の相互作用に関する報告は少なく、それはウイルスの感染機構解明やウイルス病の防除法開発の大きな障壁となっている。

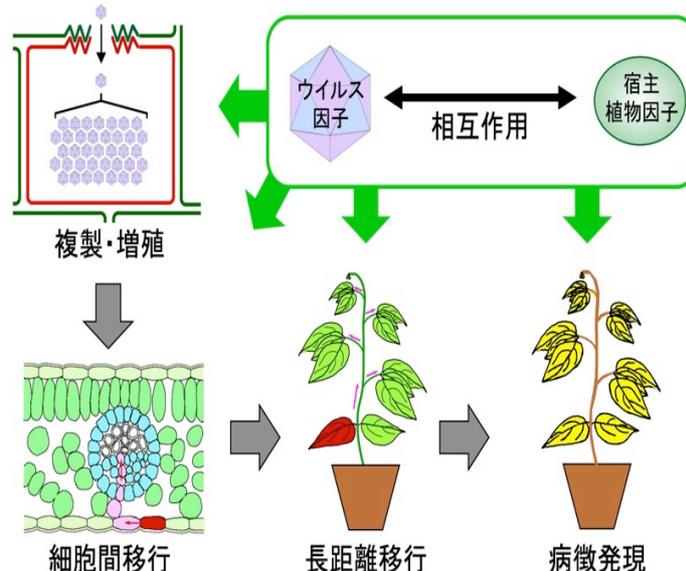


Fig. 1 Interactions between virus factors and plant factors.

植物ウイルスは感染細胞を大きく改変する。これらの構造変化として葉緑体やミトコンドリアなどのオルガネラの構造変化、膜や膜小胞の増生あるいは細胞間をつなぐ構造である原形質連絡の改変などが見られ、ウイルス複製やウイルスの細胞間移行への関与が示唆されている⁽¹⁾。植物細胞内におけるこれらサブセラーサイズの構造は、近年多くの植物ウイルスの遺伝子操作系が確立され、種々の顕微鏡が開発されてきたことによって初めて発見されてきたものであり、植物ウイルス研究におけるサブセラーサイズ構造の研究の重要性は増大してきている⁽¹⁾。

Brome mosaic virus (BMV)は直径 27 nm の小型球状モデルウイルスで、3分節のゲノム RNA と 1 本のサブゲノム RNA に 4 個のタンパク質をコードしている(Fig. 2)。近年、BMV のある系統 (BMV-F) が、重要作物でありモデル植物でもあるイネに感染することが発見された⁽²⁾。我々はこれまでに、BMV に対する抵抗性遺伝子がジャポニカイネに存在し(Fig. 3)、少なくとも一細胞におけるウイルス複製に影響していることを明らかにしてきた。現在、その遺伝子単離を進めている。また、BMV の種々の系統がイネに異なる感染性を示すことを発見し、その差異に基づき、宿主特異的な細胞間移行に關与するウイルス因子 (2a タンパク質) を同定している(Fig. 4)。本研究では、ジャポニカイネに存在する抵抗性遺伝子あるいは 2a タンパク質のアミノ酸配列の差異に異なる結合性を示す植物因子の遺伝子を単離・同定し、ウイルス感染が誘導・改変する植物のサブセルラー構造との関連を検証する。さらには、サブセルラーサイズ構造の誘導・改変阻害による新規病害防除技術の構築を目指す。

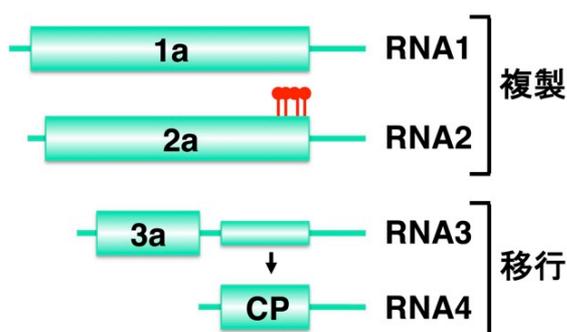


Fig. 2 Genome organization of *Brome mosaic virus* (BMV).



Fig. 3 BMV-F infects *indica* rice (cv. Habataki) but not *japonica* rice (cv. Koshihikari).

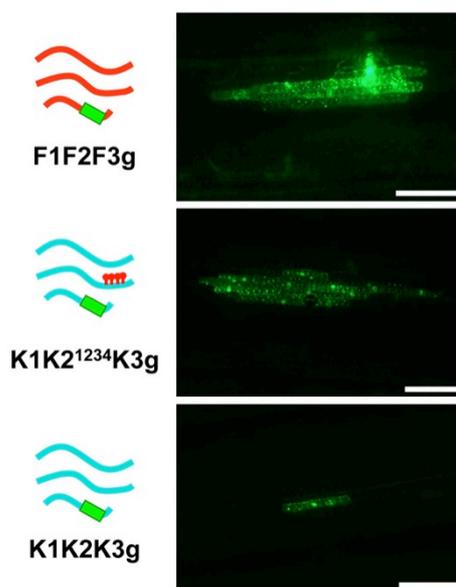


Fig. 4 Cell-to-cell movement ability of BMV-F in the leaves of *indica* rice (cv. IR64) is conferred by four amino acid substitutions in the C-terminal region of the 2a protein.

参考文献

- (1) Laliberté, J.-F.; Moffett, P.; Sanfaçon, H.; Wang, A.; Nelson, R. S.; Schoelz, J. E. *Front. Plant Sci.* **2013**, *4*, 203.
- (2) Ding, X. S.; Schneider, W. L.; Chaluvadi, S. R.; Rouf Mian, M. A.; Nelson, R. S. *Mol. Plant-Microbe Interact.* **2006**, *11*, 1229-1239.

所属班：B01-4班

所属機関：電気通信大学大学院情報理工学研究科

氏名：中村 整

所属機関住所：〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

e-mail：tad@pc.uec.ac.jp

研究キーワード：神経生理学、化学感覚、受容体、
匂分子結合蛋白質



リポカリン、エレクトリックノーズの主要素材候補 ：その生理機能

Lipocalin, the candidate core material for the electric nose: how it works in the biological nose

1. はじめに

脊椎動物の嗅粘膜に発現するリポカリンは様々な匂い物質と相互作用し、匂い物質結合蛋白質 (OBP)とも呼ばれる。OBP の発見当初は匂い受容体の可能性も考えられたようだが、その後、嗅細胞の繊毛膜に存在する数百~1000 種のG蛋白共役型の嗅覚受容体 (OR) の存在や嗅細胞の脳への投射様式が明らかにされ、匂い物質のわずかな分子構造の違いも匂いとして判別できるメカニズムの大筋が明らかになった。我々のグループでは、この嗅覚神経系を模したエレクトリックノーズの開発を目指しているが、膜蛋白質のために取り扱いが困難な OR を用いることは当面は避け、水溶性の OBP を元にして構築する可能性を追求している。その中で、現在まで把握しきれていない OBP の生理的役割を明確にすることを旨として電通大を中心として研究を進めている。

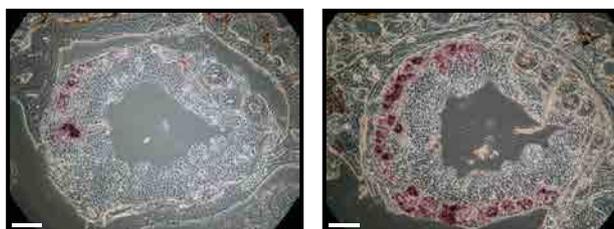


Fig. 1 Localized expression of two type of lipocalins (OBPs), Cp-Lip1 (left) and Cp-lip2 (right) in the newt nasal cavity visualized by the *in situ* hybridization technique⁽¹⁾ (bar: 200 μ m).

我々は従来イモリを材料に嗅細胞の匂い受容機構の研究を行ってきたが、比較的近年になって、その嗅上皮に2種のOBPがそれぞれ異なる領域で合成・分泌されている (Fig.1 参照) ことを見出した⁽¹⁾。そのような分布がどのような意味を持つのか、大変興味深いところである。しかし、OBPの役割には以前より2説があり、疎水性の匂い物質を嗅粘液に取り込み運搬をすることによる応答増大を重視する説 (Fig. 2, ①②)と、アルデ

ヒドなど毒性の匂い物質を嗅細胞から素早く除去することが主機能 (結果的には応答の減少) とする説 (Fig. 2, ③④) との間で意見が分かれている。

我々は、遺伝子発現で得たりコンビナント OBP をイモリ嗅上皮表面に散布して匂い応答 (嗅電図: EOG) への影響を検討した⁽²⁾が、intrinsic な OBP の効果との判別が必要となり、改めて、嗅上皮表面の洗浄の効果を検討した。その結果、洗浄によって OBP に高親和性の匂い物質に誘発される EOG は増大し、低親和性の匂い物質に対する EOG には大きな変化はないことが観察された。またイモリに蛋白合成阻害剤を与えて時間を追って試料を準備して測定すると、OBP 高親和性の匂い物質を用いた場合の洗浄による EOG の増大は時間とともに減小することを観察した。これらの結果はまだ予備的なものであるが、嗅上皮表面の OBP は、スカベンジャー、あるいは強い毒性から嗅細胞を守るフィルターとして機能していることを示唆している。現在、これらのデータを充実させるとともに、単一嗅細胞の応答測定やコンビナント OBP の活用など、多面的な実験によって OBP2 種の作用の実体を明らかにすることを目指している。

参考文献

- (1) Iwasa, T.; Mandula, G.; Urano, K.; Takahashi, T.; Sawada, K.; Okano, K.; Nakamura, T. *Jpn. J. Taste Smell Res.* **2008**, *15*, 211-220.
- (2) Noumi, Y.; Takahashi, T.; Sawada, K.; Iwasa, T.; Nakamura, T. *Jpn. J. Taste Smell Res.* **2009**, *16*, 545-548.

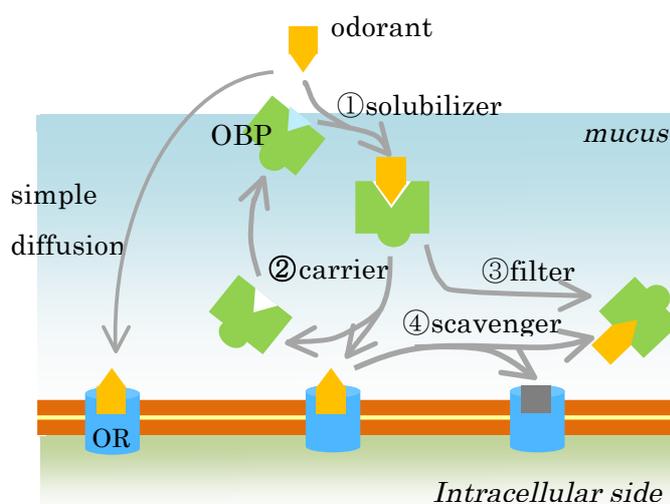


Fig. 2 Possible roles of the lipocalin (OBP) in the olfactory mucus.

所属機関：東北大学学術資源研究公開センター

東北総合学術博物館

氏名：西 弘嗣

所属機関住所：〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

e-mail：hnishi@m.tohoku.ac.jp

研究キーワード：自然財、自然史博物館、震災復興、形態学情報、
デジタルコンテンツ



「国立自然史博物館」を東北へ

Make the Natural Historical Museum in Tohoku

1. はじめに

自然環境を保全するには、まず自然環境を知る必要があります、それを教えてくれるのが自然史標本である。しかし、東日本大震災では自然史研究が軽視されていることが露呈し、多くの自然史標本が無に帰した。この現状から脱却するには、自然史標本を継続的に収集・保全し、既存の博物館等施設や大学などと連携して自然環境を総合的に研究し、その成果の活用を図る自然史研究拠点、「国立自然史博物館」の設立が必要とされる。

そこで、学術会議では自然史標本の文化財化分科会が設置され、自然史標本の保存に関する議論がなされた。その提言を受けて、「大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン策定」において「自然史科学のイノベーションを目指す国立自然史博物館の設立」の提案を行った。「国立自然史博物館」は、パラサイエンティストを擁し、アジアと世界を先導する組織を目指し、幾多の最先端機器を駆使して自然史研究に新局面を開き、貴重な自然史財のバックアップ機能を実現する。また、生物の分布や個体群の変動予測、あるいは自然環境の持続性に配慮した国土および資源利用への提言、科学教育や環境教育などにも貢献することも目的と機関である。

2. 学術的な意義

「国立自然史博物館」は、新しい自然史科学のイノベーションを目指す。例えば、3次元 CT スキャナやバーチャル画像装置等の最先端形態解析機器で得た内部構造情報に、次世代シーケンサで解析したゲノム情報を加味し、新しい観点から種を把握することで分類学を刷新する。また、DNA 情報と標本情報を統括したデータベースは、ABS（遺伝資源へのアクセスと利益配分）問題にも有用である。加えて、そこに集約される自然史科学のリ

ソースと情報は、他の応用科学にも利益をもたらす。例えば、ネイチャーテクノロジーの一翼を担うバイオミメティクス研究も推進もその目的に含まれる。それだけでなく、後継者養成が危惧されている自然史分野においても、その成果を通じた社会貢献が期待できる。このように、基礎と応用の両面において研究に貢献する「国立自然史博物館」設立の学術的意義はきわめて大きい。

3. 東北につくる意義

広い気候帯と多様な生物相、複雑な地質・地形を有する日本列島を網羅するには、複数の「国立自然史博物館」を、東南海地震想定地域から離れた地方、例えば東北と沖縄に設立することが望ましい。東北地方は、今回の大震災にともなう津波で甚大な被害を受け、数多くの博物館が被災した。被災した標本に関しては、再収蔵されていないもの、十分な修復を受けていないものも、数多く存在する。このような自然史標本を再収蔵し、きたるべき南海・東南海地震に備えるという、リスクマネジメントの面からも新たな施設が、東北地方には必要とされる。

すなわち、「東北国立自然史博物館」は、北方地域の多様性研究の拠点、東北大震災に関連した情報をもつこと、予想される南海・東南海地震に対応できる施設であることの3つが付加的な機能として必要とされる。具体的には、1) 北方地域（北海道・東北）の自然史標本の収蔵・研究、2) 被災博物館の自然史標本の再収蔵、3) 震災からの復興状況のモニタリング（津波による環境変化や放射能）、4) 震災記録の保存と展示、5) 防災教育拠点、6) 将来の災害に対する自然史標本の保全（日本各地の標本の分散保存）もあわせて行えるような組織・機関を目指す。

以上のように、「国立自然史博物館」を東北と沖縄に設置し、日本の自然史研究をさらに進めて行くことができれば、自然史研究の大きなイノベーションを創成することが可能となる。

所属班：B01-5班

所属機関：九州大学先導物質化学研究所

氏名：木戸秋 悟

所属機関住所：〒819-0395 福岡市西区元岡744CE11-115

e-mail：kidoaki@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

研究キーワード：メカノバイオマテリアル、細胞運動制御、
幹細胞、細胞外マトリックス設計



ラミニン固定化弾性率可変ゼラチンゲルを用いた iPS 細胞のフィーダーフリー分散培養

Feeder-free dissociated culture of iPS cells on the laminin-fixed elasticity-tunable gelatinous gels

iPS 細胞は体細胞へ Oct3/4, Sox2, Klf4, c-Myc の 4 遺伝子を導入し、細胞を初期化することによって得られる人工の多能性幹細胞である[1]。ES 細胞と同等の三胚葉分化能を有し、さらに倫理面での問題を回避できることから、医療応用への期待は非常に大きい。その応用に際しては、未分化状態を維持したまま高速・大量に増殖させることが重要であるが、現在のところ確立されている二種の培養方法（フィーダー細胞層利用、およびフィーダーフリーマトリゲル利用）はどちらも生物由来の原料を元に経験的に決定された条件での培養法であり、培養基材の化学的・力学的特性の明確な定義がなされているとは言えない。細胞培養基材の化学・力学特性は幹細胞の分化誘導を行い、分化の系統決定をする重要なファクターであることが知られており[2]、これら二つの特性を正確に定義した基材の設計が求められている。そこで本研究は基材の表面化学と弾性率の両設計要件を明らかにすることで iPS 細胞の未分化・分化操作のための弾性基材の作製を行い、iPS 細胞のメカノバイオロジーを操作することを目的とする。培養基材の設計を行うためには、iPS 細胞の標準的な培養で不可欠とされるフィーダー細胞を用いず、かつ弾性率可変の培養基材が必要とされる。この設計要件に対して本研究では、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)[3]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の作製を検討した。今回、StG ゲル上への LAM 固定条件の最適化を行い、設計基材上での細胞培養、さらに設計基材上培養後の未分化性維持について調査を行った。

作製したゲル表面に水溶性カルボジイミド(EDC)溶液(0.5 mg/ml, pH 4.8)を反応させ

た後、LAM 溶液を滴下し 4 °C で一定時間おいた。PBS で洗浄後 LAM に対し免疫染色を行い、ゲル表面の蛍光観察を行った。その結果、LAM の反応濃度の増大に対して、ほぼ線形に免疫染色の蛍光強度の増大が見られた。反応濃度の調節により既存の培養系であるマトリゲル表面と同等量の LAM を固定することができ、さらに固定した LAM の安定性については固定後 7 日間程度でやや固定量の現象はみられたが、14 日後も一定量が固定されていることが確認された。

続いて、50 kPa の弾性率を有する StG ゲル上における LAM 固定濃度に依存した細胞増殖挙動の観察の結果、LAM 反応濃度 0.5, 1.0 mg/ml にて作製した基材上において、既存のマトリゲル上培養系を遥かに上回る増殖率を達成できた。LAM の低濃度条件と高濃度条件においては細胞の増殖は観察されなかった(Fig.1)。0.5 mg/ml 条件基材上で培養を行った細胞を通常培養方法である MEF 上に再播種したところ、iPS 細胞のコロニー形成がみられ、今回の設計基材上での培養後も表現型が維持されていることが示された。7 日間培養を行ったそれらの iPS 細胞を、フィーダー細胞であるマウス胎児線維芽細胞 (MEF) 上に再播種し培養を行った後、4 種の未分化マーカーについて免疫染色を行

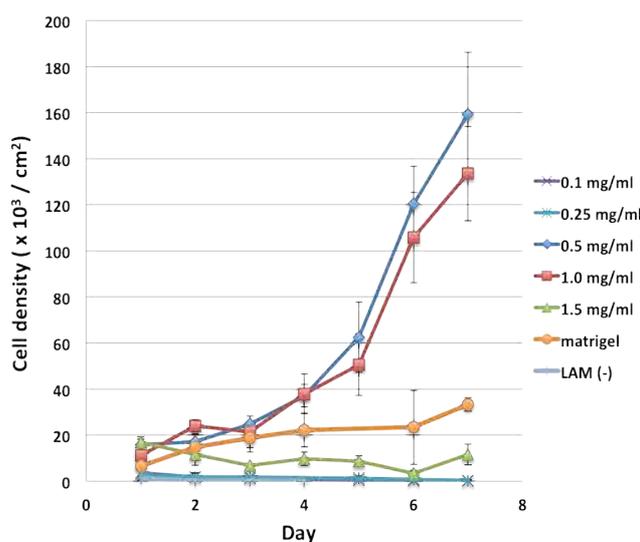


Fig.1 Density of cell cultured on LAM fixed StG gel

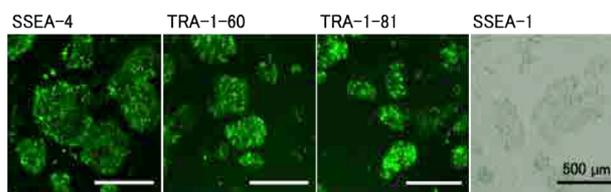


Fig.2 Immunostaining of undifferentiated markers

った結果、3 種のポジティブマーカー(SSEA-4,TRA-1-60,TRA-1-81)は全て陽性、ネガティブマーカー(SSEA-1)は陰性を示し、未分化を維持していることが示された(Fig.2)。

以上の結果から LAM 固定化ゼラチンゲルが iPS 細胞の高速増殖に有効であるとともに、その高速増殖のための LAM 固定量の至適密度条件および基材の至適弾性率条件の存在が示唆された。

参考文献

- (1) Asashima, M.; Ueno, N. et al. *Cell Differ. Dev.* **1989**, 27, 53.
- (2) Shibuya, M. *Cancer Sci.* **2003**, 94, 751.
- (3) Lo, C-M.; Wang, H-B.; Dembo, M.; Wang, Y-L. *Biophys. J.* **2000**, 79, 144.

所属班：B01-5班

所属機関：東京大学 先端科学技術研究センター

氏名：安藤 規泰

所属機関住所：〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

e-mail：ando@brain.imi.i.u-tokyo.ac.jp

研究キーワード：羽ばたき飛行，筋骨格系，神経系，

感覚フィードバック



翅の損傷に対する補償メカニズム

Mechanism for compensation of wing damage in insect flapping flight

1. はじめに

昆虫は2~4枚の翅の羽ばたき運動により、トンボのホバリングやハエの逃避のように空中で高い機動性を発揮することができる。また、体重や重心の変動や翅の損傷に対しても姿勢を保持し飛行を継続することができる。このような昆虫の優れた飛行能力は、神経系による制御だけでなく、しなやかな翅や外骨格、そして筋の物性によるところも大きいと考えられる^(1,2)。また、神経系による制御では、情報処理や信号伝達による時間遅れが不可避であるが、物性そのものに飛行を安定化させる作用があるのであれば、情報処理の時間遅れや負荷の低減にもつながる。多くの昆虫は片翅の一部を切断しても飛行することができるが、この左右の翼面積の補償運動は、明瞭な物性変化と様々なレベルでの神経系への感覚入力を伴うため、この2つの役割を調べる対象として適している。また近年の報告では、翼面積の非対称性の増大に伴い、物性から神経系による補償に遷移し羽ばたき振幅を調整することが示唆されている⁽³⁾。その一方で、この補償のメカニズムの詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、この翅損傷に対する補償メカニズムに階層的な要素があると考え、これらの機能と相互関係について明らかにすることを目的とした。

2. 進捗状況

補償メカニズムを構成する要素として、①筋骨格系の物性が補償的に働く、②自己受容器で自身の状態の変化をフィードバックして筋制御、③平衡感覚や視覚情報で自身の姿勢の乱れをフィードバックして筋制御、そして④運動学習による筋収縮のゲイン調整が考えられ、これは応答速度の速い→遅い順に当てはまる。現在は①~③について実験を進めて

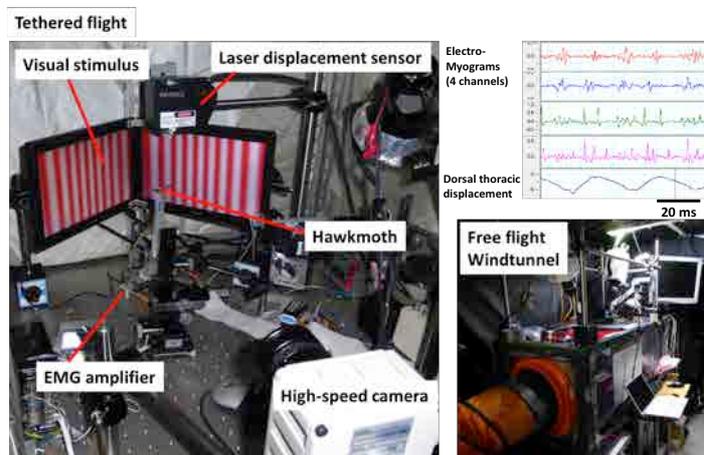


Fig.1 Experimental setup

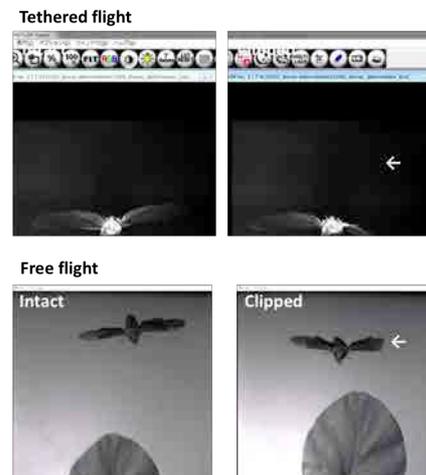


Fig.2 Flight behavior

いる。①、②と③の違いは、前者は飛行せずとも羽ばたいていれば生じる現象であり、後者は飛行していることが前提となる。そこで、昆虫を固定して羽ばたかせた状態（拘束飛行）と自由飛行での羽ばたき運動と飛翔筋の活動を観察し、両者の比較を行うこととした。拘束飛行の実験装置では、羽ばたき運動を高速度カメラで撮影し、飛翔筋の活動は、レーザ変位計による外骨格の変位と飛翔筋電位で計測した（Fig. 1）。実験と並行してデータ解析を進めているところであるが、拘束飛行では、翅慣性モーメントの減少によると考えられる羽ばたき周波数の増加と切断側の羽ばたき振幅の増加が認められたが（Fig. 2）、自由飛行で見られるような振幅の調整に関連した飛翔筋活動タイミングの変化は観察されなかった。詳細な考察は現在準備を進めている自由飛行実験（Fig. 1）と比較する必要があるが、翼面積の減少を補償するための基本的な羽ばたき運動の変化は、物性もしくは自己受容器フィードバックのレベルで生じている可能性がある。今後は、観察された羽ばたき運動の力学的考察も加えて、昆虫の安全な飛行のメカニズムに迫りたいと考えている。

参考文献

- (1) Nakata, T. ; Liu, H. *Proc. R. Soc. B* **2012**, 279, 722-731.
- (2) Snodgrass, R. E. In *Principle of Insect Morphology*; McGraw-Hill; New York, 1935, pp 228-248.
- (3) Hedrick, T. L.; Springthorpe, D.; Fernández, M. J. *J. Exp. Biol.* **2012**, 215, 3631-3638.

所属班：C01班

所属機関：産業技術総合研究所ナノシステム研究部門

氏名：安 順花、関谷 瑞木、阿多 誠文

所属機関住所：〒305-8568 つくば市東1-1-1

産総研つくばセンター中央5-2

e-mail：masafumi-ata@aist.go.jp

研究キーワード：社会インプリケーション、バイオミメティクス国際標準化、
テクノロジーガバナンス



バイオミメティクス研究開発のためのテクノロジーガバナンス Technology Governance for Facilitation of Biomimetics R&D

1. 社会との双方向コミュニケーションに基づく実践的テクノロジーガバナンス

科学技術のコミュニケーションは、一般には研究者から市民に対するアカウントビリティの課題として位置づけられる。市民が科学技術を理解していないことから起きる問題が議論され、市民の科学リテラシーの向上をどう図るかが科学者のコミュニケーションの課題であり責務とされてきた。しかし今日、科学技術と社会とのインターフェイス領域で起きている様々な問題を正視するなら、市民が科学技術を理解していないことより、科学者が社会を理解していないことから起きている問題の方が深刻である。市民の科学技術リテラシーより先に、科学者の社会リテラシーの向上を図るべきではないだろうか。バイオミメティクスに関する管理策や産業化のための標準が整わない段階で、その将来価値を損なわないような研究開発をどう進めるのか。大事なことはバイオミメティクスの研究開発の現状をリアルタイムで社会に説明責任を果たしていきながら、同時に管理策や標準といった課題への取組みがどのように進められ、それが研究開発や産業化にどのように影響を与えることになるのかを研究者・技術者に伝えていくことである。この影響がいわゆる "Societal Implication" であり、我々が PEN^[1] に最新の科学技術動向だけでなく、科学技術政策、リスク管理策、規制動向といった内容を編集し、多くの研究者・技術者に向けて配信してきたのはこのような思いからである。真に有益で効率的な社会との双方向コミュニケーションはどう実践されるべきなのか、PEN がバイオミメティクスの研究開発の推進にどのような役割を果たしてきたのか、我々がすすめてきたバイオミメティクスのテクノロジーガバナンスの実践をそのような視点で見ただけであれば幸いである。

2. バイオミメティクス国際標準化動向

昨年10月にベルリンにあるドイツ標準化機構(DIN)でISO/TC266 Biomimeticsの第1回総会が開催され、バイオミメティクスに関する国際標準化活動の実務が開始された。総会において、日本はデータベースに関する新しいワーキングアイテムの提案を行った。今年5月22-23日にフランスで開催されたTC266の第2回本総会に先立ち、JISCバイオミメティクス国内審議会のメンバーが欧州およびアジアのTC266参加国を訪問し、日本からの提案内容の説明と、この作業への協力を依頼した。その結果、日本からの提案「Knowledge Infrastructure for Biomimetics」はPreliminary Stageからの出発であるがTC266の第4作業委員会(WG4)として活動を開始することになり、科学技術振興機構の恒松氏がWG4のコンビナーに就任することが決まった。また、物質・材料研究機構の細田氏のWG2のプロジェクトリーダー就任が決まるなど、ISO/TC266における日本の存在感が増しつつある。これからさらに国内における産学官の枠組みによる戦略会議の重要性が増してくる。バイオミメティクスの研究開発とその産業化の振興のためにどう対応すべきか、さらに議論を重ね、実践していきたいと考えている。

筆者が対応しているWG3 Biomimetic Structural Optimizationでは、バイオミメティクな構造最適化のアルゴリズムの標準化が進められている。メルセデスベンツ社のバイオニックカーの設計コンセプトが独り歩きしている感があるが、このWG3の活動で重要なことが2点ある。一つはここで議論している構造最適化はものづくり・商品化のデザインコンセプトまで含むことである。現在欧州では、エコデザイン指令にみられるように、工業製品のデザインは環境規制の対象であり、将来的にはバイオミメティック製品のマネジメント、認証に結びつく課題である。もう一つは、ここで議論されている構造最適化のアルゴリズムは特許化され、ソフトウェアのビジネスも始まっている点である。国際標準となった場合に特許のロイヤリティの問題、ソフトウェアの購入といった課題への対応を迫られる可能性が大きい。共にビジネス戦略に直結する課題であり、そのことを意識した対応が求められている。なおこの課題はたとえば"Rotus Effect"といった意匠に対しても同様な対応が求められることを忘れてはならない。

今月末からISO/TC266 Biomimetics第3回総会がチェコのプラハで開催される。日本のバイオミメティクスの研究開発と産業化に資する対応を図る。

参考文献

(1) Public Engagement with Nano-based Emerging Technologies, ISSN2185-3231
産総研ナノシステム研究部門ナノテクノロジー戦略室発行

所属班：C01班

所属機関：東北大学大学院環境科学研究科

氏名：須藤 祐子

所属機関住所：〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20

e-mail：yuko@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

研究キーワード：ライフスタイル、テクノロジー抽出、
ニーズ/シーズ・マッチング



ライフスタイル・ニーズとテクノロジーのマッチング手法の開発 -SECIモデルとオントロジー導入の可能性について- Lifestyle based needs and technology matching method -Possibility for the introduction of SECI model and Ontology-

1. はじめに

不可避の厳しい環境制約を乗り越えるには、人と地球の両方を考えたテクノロジーのパラダイムシフトが必要である。そのためテクノロジー創出システムとは、環境制約下でも心豊かに暮らせるライフスタイルを描き、そこに必要なテクノロジー要素を抽出して自然界にシーズを探し、探し出したテクノロジーをリ・デザインして製品・サービス・制度として市場に投入するというものである。このようなシステムを構築することで、生物規範工学を効果的に社会へと普及・浸透できると考えている。

本システム構築における課題の一つが、バックキャスト思考によって創出されたライフスタイルから導出されるニーズと唯一持続可能な社会を有する自然を構成するテクノロジー・シーズとのマッチングである。ニーズ/シーズ・マッチングのプロセスにおいては、ライフスタイル・デザイン手法の開発、ライフスタイルからテクノロジー要素を抽出する手法の開発、テクノロジー要素と自然界のシーズとのマッチング手法の開発、が課題である (Fig.1)。これらの手法は互いに重なる部分が存在する連続的なものであり、どのように連続させて全体のマッチングを行うかが重要である。

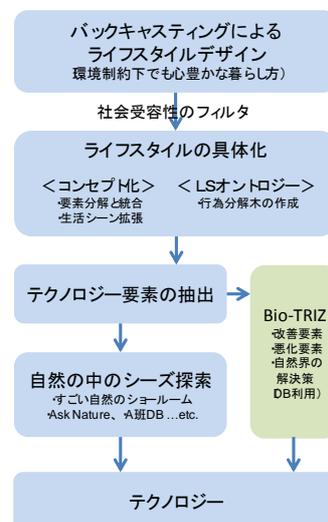


Fig.1 Flow of lifestyle and technology matching.

2. アプローチ方法と成果

ライフスタイルを描いてテクノロジー要素を抽出し、さらに自然界のテクノロジーまで到達するためには、描いたライフスタイルの具体化が必要である。文章で書かれた抽象的要素を多く含むライフスタイルを具体化してテクノロジー要素およびテクノロジーを抽出する手法として、コンセプト化 (SECI モデル: 暗黙知と形式知を相互の行き来するモデル) とオントロジーの 2 つの手法を検討した。

コンセプト化では、ディスカッション形式をとることで、描かれたライフスタイルの根底にある概念の共有化やライフスタイル・イメージの統一化が可能となった。また、イラストに表す (Fig.2 左) ことで、ライフスタイルから抽出したテクノロジーのある生活シーンだけでなく、その周辺的生活シーンまで表すことができ、それにより新たなテクノロジー要素を抽出することができる可能性も見出した。オントロジー手法では、描かれたライフスタイルを行為と方式に細かく分解して行為分解木を作成する (Fig.2 右) ことで、暗黙的だったライフスタイルの構造を明らかにし、テクノロジー要素が抽出され易くなった。ライフスタイルが解決しようとする環境制約や社会課題を行為分解木に付加したり、心の豊かさの分解木も作成することにより、ライフスタイル中のどのような行為が制約や課題の解決につながるのか、また、心の豊かさにつながるのか、ということを示すことができるようになった。これらの手法により、テクノロジー要素を具体化し、求める自然界を構成するテクノロジー抽出まで到達できる可能性が示された。

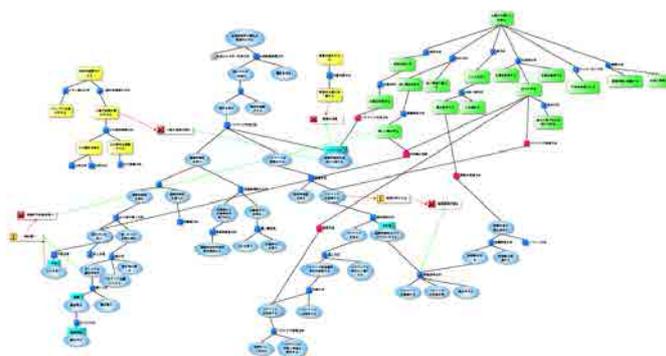


Fig.2 Embodying of a lifestyle “Resources of electricity in household is bio-fuel made from garbage”. Left: an illustration through conceptualization. Right: a functional decomposition tree based on ontology.

3. 今後の展開

ライフスタイルの具体化によりテクノロジー要素の抽出が進んだが、コンセプト化にしてもオントロジー導入にしても、最終的にどこまで明示化すればテクノロジーを抽出できるのか、あるいは、これら手法のアウトプットの違いをどのように考察すべきか等の検討が必要である。また、具体化だけではテクノロジーまで到達できない場合には、Bio-TRIZ

を用いることを考えている (Fig.1)。Bio-TRIZ は改善要素と悪化要素のマトリックスから解決策となり得る原理として自然界にある原理を提案する方法であり、A01 班のデータベースも含めて多くのデータベースの情報とリンクする予定である (本年度中にパイロット版完成の予定)。また、国際標準化の認証において特に重要である「生物の解を明確化」して「原理の抽出」が為されているかの判断に Bio-TRIZ が有用になると考えており、今後の検討課題である。

謝辞

ライフスタイルの行為分解木を作成するにあたり、北陸先端科学技術大学院大学の溝口理一郎教授 (A01) に多大なご協力をいただいております。

所属班：公募研究班

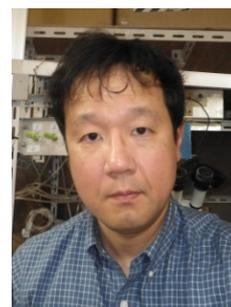
所属機関：北海道大学

氏名：西野 浩史

所属機関住所：〒060-0812 札幌市北区北12条西6丁目
中央キャンパス総合研究棟 2号館 04-205室

e-mail：nishino@es.hokudai.ac.jp

研究キーワード：生物・生体工学、昆虫、聴覚、鼓膜



昆虫の聴覚器規範設計の解明に向けて

Toward understanding of design principles of an insect auditory organ

地球上には我々の耳と異なる道筋で進化した「もうひとつの耳」が存在する。それが昆虫の耳である。1 億年前（白亜紀）のバッタ目の化石にはすでに鼓膜を持つ聴覚器が見いだされる。変動する陸生環境の中で、長い時間をかけて進化してきた聴覚器は 1. 小型、2. 高感度、3. 高再生能などの特徴を持つ。一方、ショウジョウバエの網羅的遺伝子スクリーニングからは、聴感覚細胞で発現する機能タンパク質の 97% が共通であることが明らかになっている（Senthilian et al., 2012）。

機能分子をカンブリア紀共通の祖先から引き継ぎつつ、異なる構造を作り上げた昆虫の聴覚器の生理学的研究には 70 年の伝統がある。特筆すべき成果として、数十個の聴覚細胞の各々が特定の周波数帯に応じる「レンジ弁別」を行っていること（Oldfield et al., 1986）、個々の聴覚細胞が脊椎動物でも知られるような刺激の機械的増幅機構をもつこと（Göpfert and Robert, 2006）、を挙げることができる。

しかし、鼓膜に入力した音がどこをどう伝わって聴覚感覚細胞を刺激するのかについての知見はほぼ皆無である。聴感覚細胞の本体は機械的ひずみに応じる「有桿感覚子」と呼ばれる原始的な機械受容器で、振動受容器と構造的な差異はほとんどない（高梨ら、2013）。よって、昆虫の聴覚器を聴覚器たらしめるのは、むしろ音のエネルギーを効率良く弦音器官に伝えるための媒体の特殊化にあるとあってよい。

本研究の目的は生物工学者（工学部、岡嶋孝治）との連携を通じて、初年度で聴覚器全体の 3 次元立体構築、2 年目で AFM を用いた細胞の粘弾性計測、イオンコンダクタンス顕微鏡を用いた細胞の表面構造の精査を行うことで、昆虫の聴覚器設計にひそむ「規範」を見いだすことにある。

私はコオロギの前肢の脛にある鼓膜器官を研究対象としている。コオロギ聴覚器の可聴範囲は昆虫の中ではヒトに近い（帯域：数十～10 KHz；最適周波数：4 kHz；閾値：28dB）、生物模倣の観点からもすぐれている。音は鼓膜→気管→支持細胞→聴感覚細胞の順に伝達される。聴覚器の小型化に寄与するのが、支持細胞群が自己組織的に結合したテント状の「マス」構造である。私は対比染色法の改良を重ね、半透明のこのマスを共焦点レーザー顕微鏡下で可視化することに成功した（図1A）。その結果、マスは聴感覚細胞の刺激受容部位(樹状突起)と直接のリンクを持つ小さな支持細胞とマス本体の機械的支持に寄与すると思われる大きな支持細胞の二種類から構成されていることが明らかとなった（図1B）。両者の形状は線維芽細胞（fibroblast）に似る。現在、細胞群の三次元立体構築を進めている。

また、コオロギ類の聴覚器官の特徴として、「鼓膜が脛の前と後ろに2つある」ことが挙げられる。音の受容に最適の構造をしている後ろ側の鼓膜に対し、前側の鼓膜は厚く、音の入力によってほとんど共振しないため、その機能は長い間謎とされてきた。私は体表のクチクラとその裏に張り付いている半透明の真皮（hypodermis）を分離する技術（といっても手技であるが）を用いて、前側の鼓膜の挙動を非侵襲的に観察することに成功した。その結果、膜直下には厚みを持った白い細胞層があり（図1C）、これがウインクするような独特の挙動を示すことを確認した。これは筋収縮なしにおこる運動で、気管の体積変化によってもたらされる。私はこの運動がマス全体、もしくは一部の共振モードに変化をもたらし、聴感覚細胞に重要な性質を付与するのではないかと想像している。

以上、私の研究は始まったばかりであるが、思いがけない発見もあり、初年度の計画を上回るペースで進んでいる。コオロギの聴覚器は上皮、結合、神経組織が集まってできた精緻なシステムだが、脊椎動物の内耳に比べ、アクセスははるかに容易である。今後、単離培養系の確立、非侵襲的機械計測、モデル化などにおいて、分野横断的研究が進むことを期待したい。

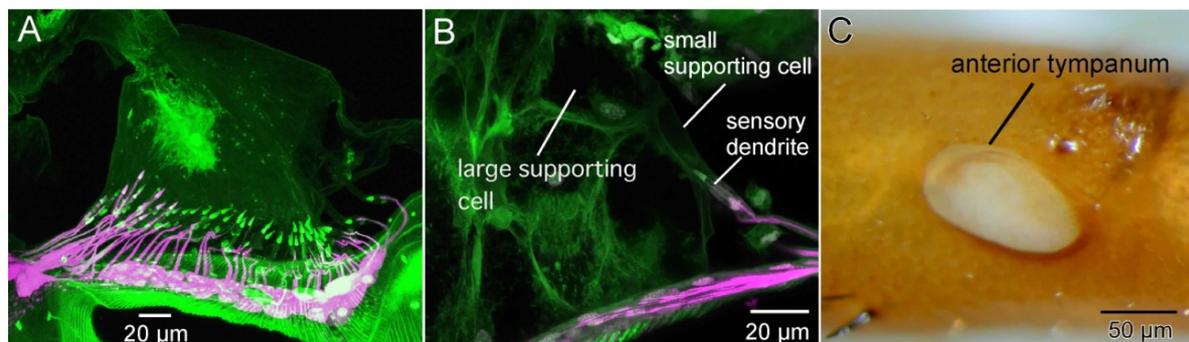


Fig. 1 **A** The tympanal organ. Sensory neurons (magenta) and supporting cells (green) are differentially stained. **B** Subcellular attachment site between a sensory dendrite and a supporting cells. **C** Anterior tympanum of the cricket prothoracic leg.

所属班：公募研究班

所属機関：信州大学繊維学部

氏名：小林 俊一

所属機関住所：〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1

e-mail：shukoba@shinshu-u.ac.jp

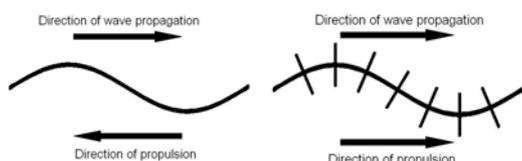
研究キーワード：ゴカイ，水中推進，生物規範ロボット



ゴカイを規範とした全方向移動型流体内推進ロボットに関する研究 Omni-Directional Propulsion Robot in Fluid Modeled on Bending Movement of Polychaete Worm

1. はじめに

生物の屈曲運動に伴う遊泳方向についてみると、ゴカイのような体表面に突起を持つ生物と滑らかな体表面を持つ生物とで異なり、体表面の流体抵抗の法線方向成分と接線方向成分の大小関係が逆であるためである(図 1)。そこで、抵抗の法線方向成分と接線方向成分を自由に变化させれば、屈曲運動を全く変えずに全方向の移動が実現できると考え、図 2, 3 に示すフィン角度を可変とした全方向移動型の流体内推進機ロボットを開発した⁽¹⁾。本研究では体表面に突起を持つゴカイと繊毛虫の構造や動きを観察、低レイノルズ数環境における 3次元で全方向に移動する生物規範型推進ロボットを開発する。ここではゴカイのいぼ足の挙動と新たな推進ロボット設計について述べる。



(a) Nematode worm (b) Polychaete worm

Fig. 1 Movement of worm.

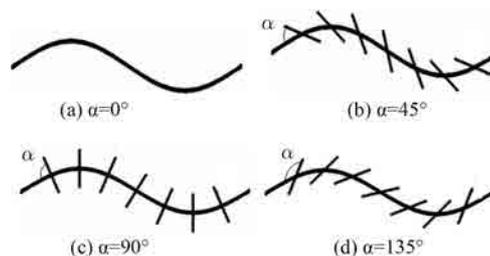


Fig. 2 The angle of projecting protrusions.



Fig. 3 Photograph of the omni-directional multi-link propulsion robots.

2. ゴカイのいぼ足の動作

図4に示すようにゴカイの産卵時の遊泳におけるいぼ足の動作解析を行った。なお、ここでは浜松ダイビングショップで撮影された遊泳映像を用いた。図5に解析結果を示す。

いぼ足は屈曲の外側（山側）のときに速い動きでパワーストロークを行い、内側（谷側）でゆっくりとリカバリーストロークを行う。この動きによって推進速度が向上している。現在、このパワーストロークとリカバリーストロークのタイミングと動きを変えることにより、全方向移動に寄与する方法を検討している。

3.新規推進ロボットの設計

Fig. 6に新規推進ロボットのイメージ図を示す。いぼ足に相当するフィンを体軸の左右に用意する。それらの動きを制御することによって全方向移動を図るものである。なお、フィンの上下方向の角度を変更することで3次元的な動きを実現させていく。ここでは述べなかったが、突起物に相当するマスティゴネームがある鞭毛・繊毛虫に関しても同様に取り組んでいきたい。

参考文献

(1) Kobayashi, S.; Fujii, K.; Yamaura, T.; Morikawa, H. *J. Robotics Mechatronics* **2011**, 23(6), 1073-1079.

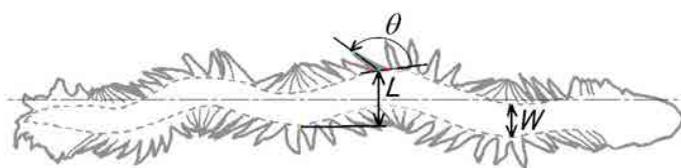


Fig.4 Motion analysis of parapodium. θ : Angle of a parapodium, W : Body width, L : Lateral position of basal portion of a parapodium.

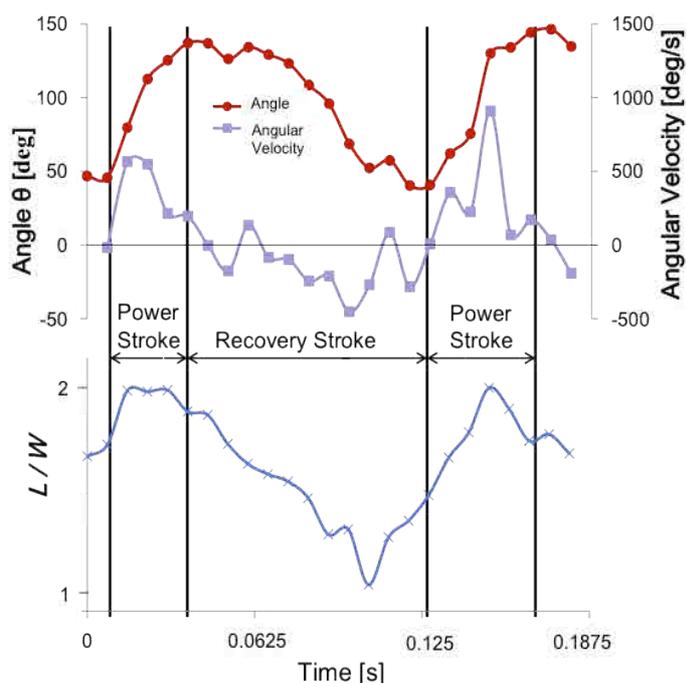


Fig.5 Angle and lateral position of a parapodium.

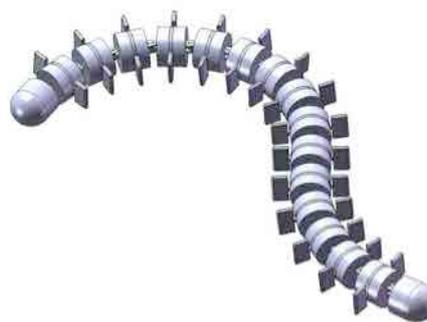


Fig.6 Image of new propulsion robot.

所属班：公募研究班

所属機関：東北大学

氏名：金森 義明

所属機関住所：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-01

e-mail：kanamori@hane.mech.tohoku.ac.jp

研究キーワード：構造色、ナノ光学素子、カラーフィルタ、
デバイス、微細加工



構造色材料による光制御とデバイス応用

Structural color materials for optical control and their device applications

1. はじめに

構造色は、微細構造に由来する発色現象であり、自然界には、孔雀やタマムシの翅（はね）のように非常に鮮やかな構造色が多く存在する。中でもモルフォチョウの翅のように広い視野角で発色できることから、工業的利用価値が高い。我々の研究グループでは、構造色の特性を、イメージング、光情報処理、光通信といった今日の光情報化社会に欠かせない光・電子デバイスへ応用することに興味を持っている。本稿では、これまでの研究の紹介および今後の研究について述べる。

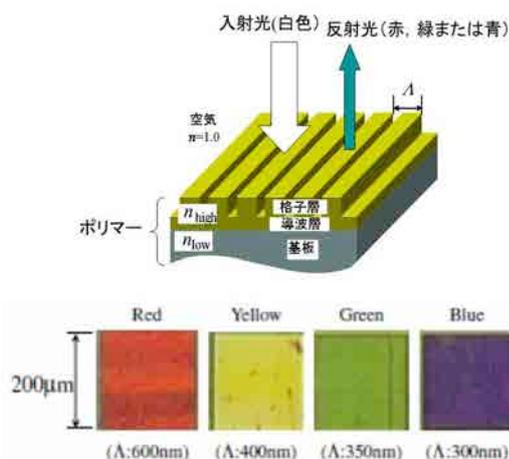


Fig.1 Structure (upper) and produced reflection-type structural colors (lower).

2. 構造色利用カラーフィルタ

2.1 反射型フィルタ⁽¹⁾

導波モード共鳴の原理に基づき反射型のRGB カラーフィルタを実現した。ナノインプリント法により製作した(図 1)。

2.2 透過型フィルタ⁽²⁾

Si の分散、干渉、導波モード共鳴の複合的な光学特性により透過型のRGB カラーフィルタを実現した (図 2)。

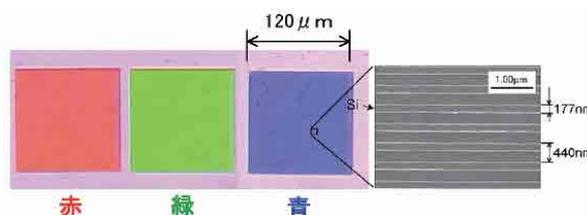


Fig.2 Transmission-type structural colors.

3. 構造色構造とナノ機械の融合デバイス

3.1 波長チューナブルフィルタ⁽³⁾

導波モード共鳴による発色波長は格子周期に強く依存するので、自立周期構造の周期をマイクロアクチュエータで制御して、波長チューナブルフィルタを実現した(図 3)。

3.2 反射強度可変フィルタ⁽⁴⁾

クジャクの羽根の発色原理とされるフォトニック結晶を可動することで、構造色の反射強度を調節できるフィルタを実現した(図 4)。

4. 今後の研究

本公募研究では、三原色 (RGB) 構造色材料の高機能化と集積化に関する研究を行っていく。具体的には、①RGB 構造色材料の実現、②高機能化 (視野角、分光帯域、分光効率の向上)、③集積化 (ピクセルアレイ化およびピクセルサイズ超微細化) を達成し、新しい発色原理の超解像フルカラーフィルタの実現を目指す。

進捗の一例として、二次元周期の導波モード共鳴格子からなる構造色利用カラーフィルタの開発を進めており、図 5 には製作したカラーフィルタの SEM 写真を示す。このような構造にすることで、垂直入射時の偏光依存性の問題が解消され、また、視野角特性が向上する。

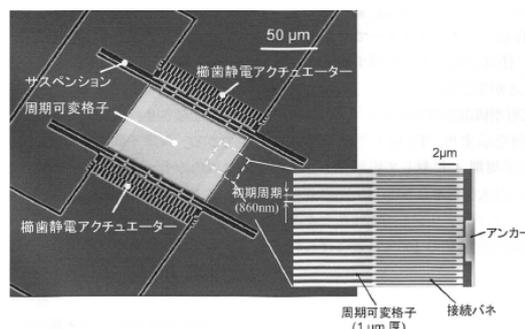


Fig.3 Pitch-variable structural color filters.

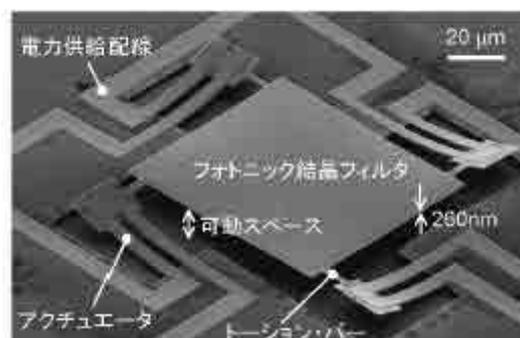


Fig.4 Intensity controllable filters using movable photonic crystal filters.

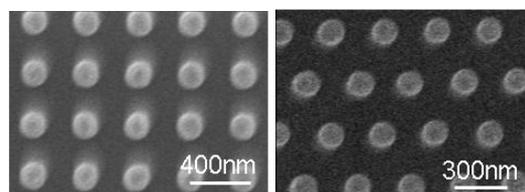


Fig.5 An example of SEM pictures of structural color filters we have developed.

参考文献

- (1) Kanamori, Y.; Katsube, H.; Furuta, T.; Hasegawa, S.; Hane, K. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2009**, *48*, 06FH04.
- (2) Kanamori, Y.; Shimono, M.; Hane, K. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2006**, *18*, 2126-2128.
- (3) Kanamori, Y.; Matsuyama, N.; Hane, K. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2008**, *20*, 1136-1138.
- (4) Kanamori, Y.; Kitani, T.; Hane, K. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 031911.

所属班：公募研究班

所属機関：東北大学大学院環境科学研究科

氏名：馬奈木 俊介

所属機関住所：〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字6-6-20

e-mail：managi.s@gmail.com

研究キーワード：生物規範工学、開発投資、リアルオプション分析、
ディスカウントキャッシュフロー分析



生物規範工学に基づく技術の経済価値

Economic Valuation of Biomimicry Technology

1. はじめに

経済の将来予測をする上で、経済を構成する消費者の選好、生産者にとって利用可能な技術、さらに資源の量といった要素の把握は重要である、生物規範工学に依拠した新技術の導入は、これらすべてを大きく変化させることが考えられる。新技術である、「サブ・セルラーサイズ構造の技術」は枯渇性資源の利用を必ずしも前提としないことから、これまで経済の大きな課題のひとつとしてとりあげられてきた経済発展と資源の枯渇のトレード・オフを解決する可能性を持っている。この可能性を考慮し、生物規範工学により開発される新技術が経済にもたらす影響を明らかにするのが、本研究の目的である。

近年、企業によるグリーン技術に対する開発投資が活発である。(Segerson et. al. 1999; 馬奈木ら 2012) 本研究では、グリーン技術の新規開発の一種として生物規範工学に基づく技術をとらえる。現状においては、技術開発プロジェクトへの投資根拠として用いられる、リアルオプション分析とディスカウントキャッシュフロー分析の両方を、分析の枠組みと

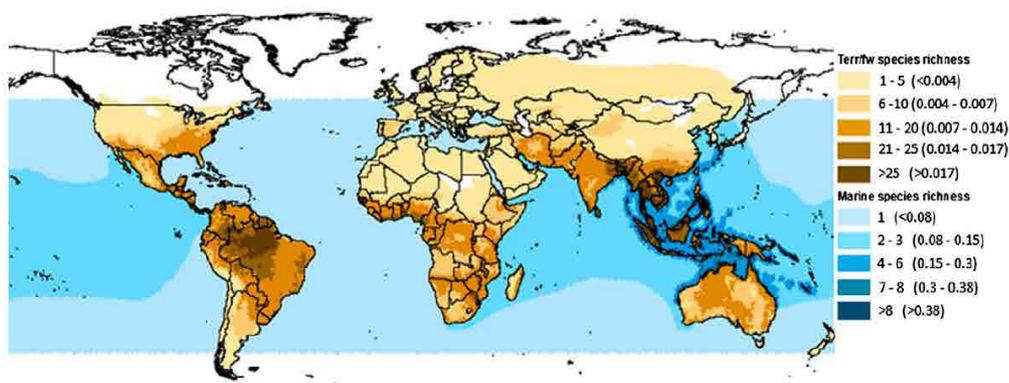


Fig.1 Global Species Richness Distribution of Reptile Assessment (Bohm et al., 2013).

して応用し、本研究に適した手法の開発を行っている。より具体的には、Schwartz(2004)や Swartz et al. (2000)で用いられた手法を、グリーンイノベーションに関する研究(Fujii et. al, 2013)を参考に調整している。また Toyo (2011)のようなデータベースを利用するなどして、生物規範工学に基づいた技術の製品化を行っている企業に関する情報を整備している。今後、将来における新技術が生み出す経済利益を評価することともに、図 1 のように世界に分布する生物の多様性を確保することの意義を、経済学的な側面から考察をしていく予定である。

参考文献

- (1) Amram, M.; Kulatilaka, N.; Real options: Managing strategic investment in an uncertain world (Vol. 4, p. 3). Boston: Harvard Business School Press, **1999**.
- (2) Bohm, M.; Collen, B.; Baillie, J. E.; Bowles, P.; Chanson, J.; Cox, N.; Cheylan, M.; The conservation status of the world's reptiles. *Biological Conservation*, **2013**, *157*, 372-385.
- (3) Fujii, H.; Iwata, K.; Kaneko, S.; Managi, S.; Corporate environmental and economic performance of Japanese manufacturing firms: empirical study for sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, **2013**, *22*(3), 187-201.
- (4) Schwartz, E. S.; Patents and R&D as real options. *Economic Notes*, **2004**, *33*(1), 23-54.
- (5) Schwartz, E. S.; Moon, M.; Evaluating Research and Development Investments, In *Innovation, Infrastructure and Strategic Options*, M. J. Brennan and L. Trigeorgis (eds), Oxford University Press, **2000**, 85-106.
- (6) Segerson, K.; Miceli, T. J.; Voluntary environmental agreements: good or bad news for environmental protection? *Journal of environmental economics and management*, **1998**, *36*(2), 109-130.
- (7) Toyo; Corporate Social Responsibility Database, TOYO KEIZAI INC, **2011**.
- (8) 馬奈木俊介・林良造（編著）『日本の将来を変えるグリーン・イノベーション』中央経済社, 2012.