

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

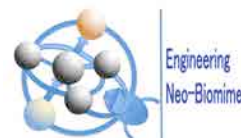
(2) 評価委員からのメッセージ

- ・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



・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) 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）



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えている科学者、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と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 年でブレイ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かなるという感触はつかめた。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楽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。将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、将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と、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る」「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言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

うような Life style を分解する木の一部を図示している。青のノードがこれまで議論してきた通常のゴールであり、緑のノードが今回拡張した精神面のゴールである。明示的には青色のゴール達成が分解されていくのであるが、それと並行して常に心の豊かさを意識してそれが暗黙的にせよ、どのように達成されているかを図示する。そして、いずれの場合においても、ゴールがどのように達成されるのかという方式概念の抽出に気を配りつつ分解を行い、最終的には現行の技術、開発すべき技術、取るべき政策／施策、なすべき行為などへと分解して行く。このようにして、Life style を分解する方法論も確立することが出来れば、一定の貢献になると思われる。

参考文献

- (1) 溝口, 役に立つオントロジー工学, PEN September 2013 Volume 4, Number 6.
- (2) 石田 他, ネイチャー・テクノロジー, milsil, Vol.4, No.2, 2011.
- (3) 高藤 他, オントロジー工学に基づく技術知識統合管理システムの発展とビジネス展開, 人工知能学会論文誌, Vol. 26, No. 5, pp.547-558 (2011)

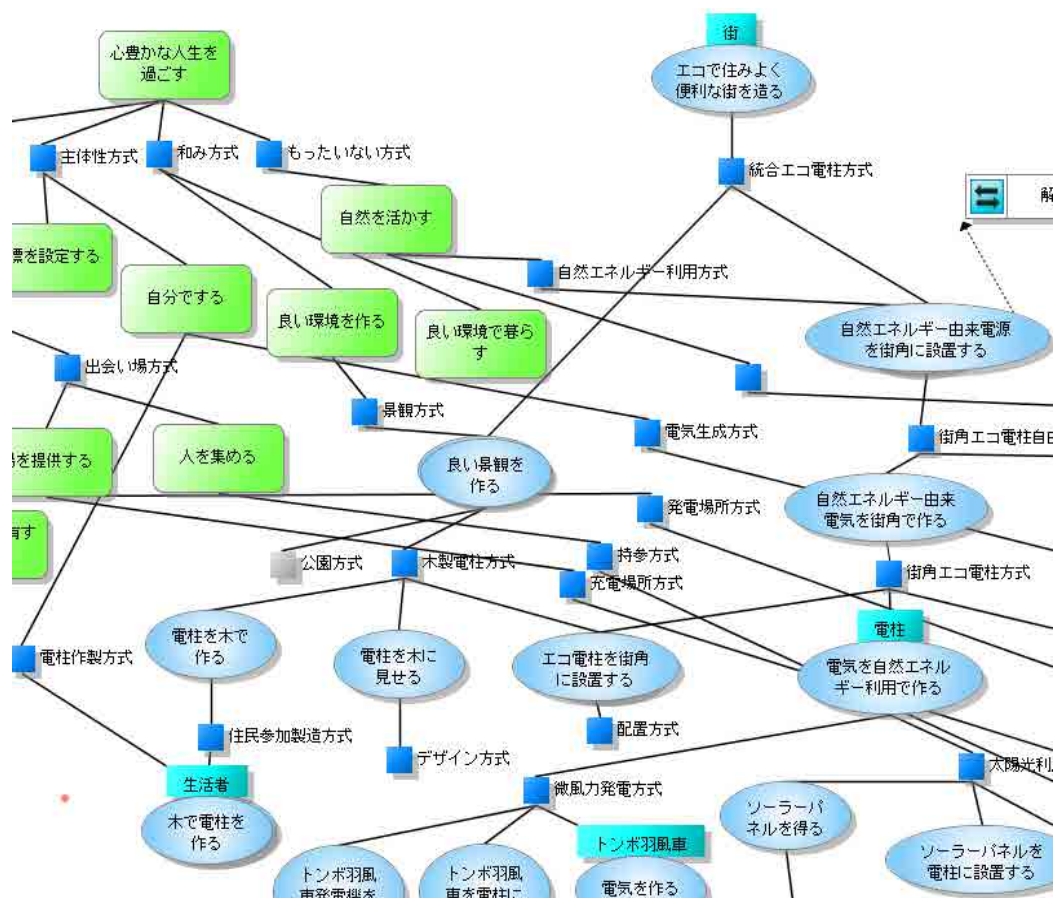


図1 ライフスタイル分解木の一部

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.

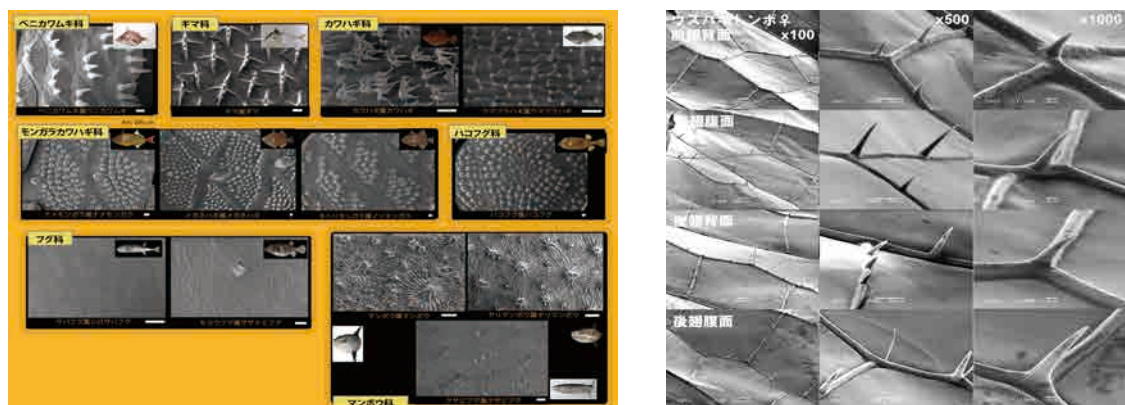


Fig.2 SEM images of tetraodontiform fishes (left) and dragonfly (right).

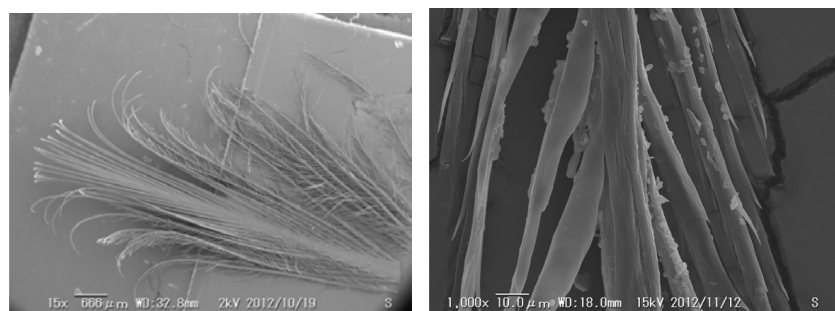


Fig.3 SEM images of birds feather. Left, *Eudyptes chrysocome*; right, *Nipponia nippon*.

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 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、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

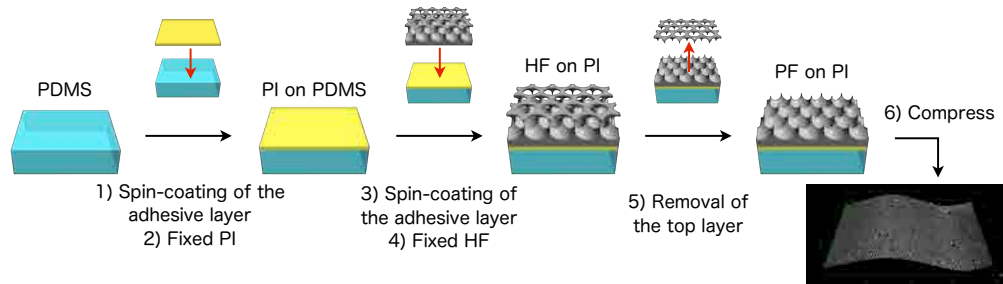


Fig.1 Schematic preparation procedures and a laser microscope image of the shark-skin mimetic surface

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ー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.

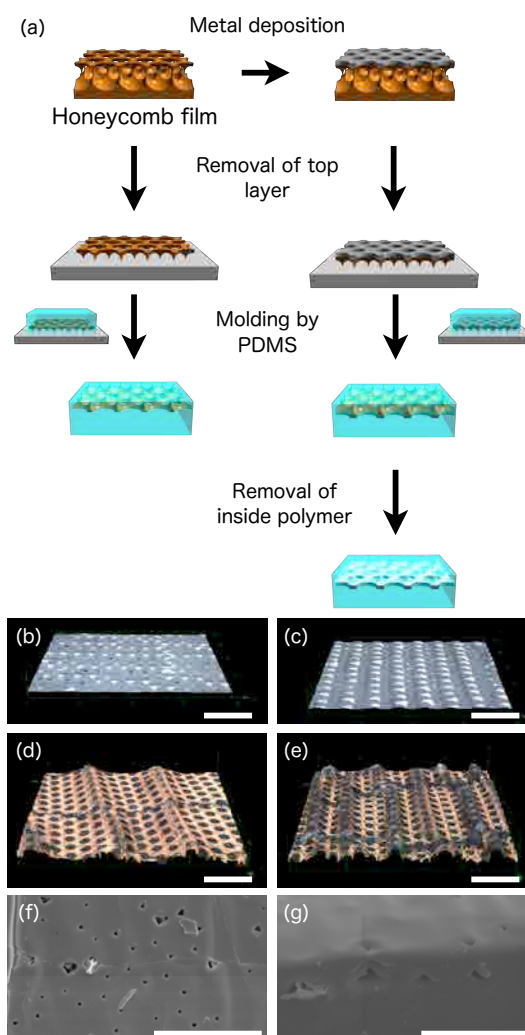


Fig.2 (a) Schematic preparation procedures of wrinkle surfaces. Laser microscope images of a polymer network filled in PDMS (b) before and (c) after compression and a metal network filled in PDMS (d) before and (e) after removal of a polymer network. SEM images of a metal network filled in PDMS after 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マテリアルの表面において、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。

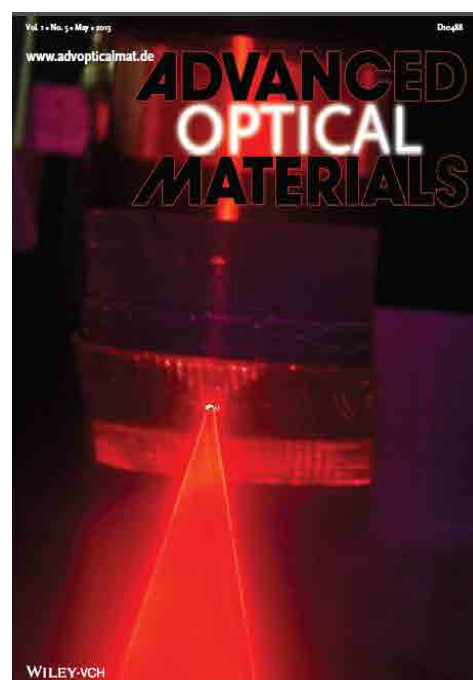


Fig.1 Tunable optical diffuser based on deformable wrinkles. The optical path of the diffused laser beam transmitted through shape-tunable wrinkles with a periodicity in the range of hundreds of micrometers is visualized.

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。

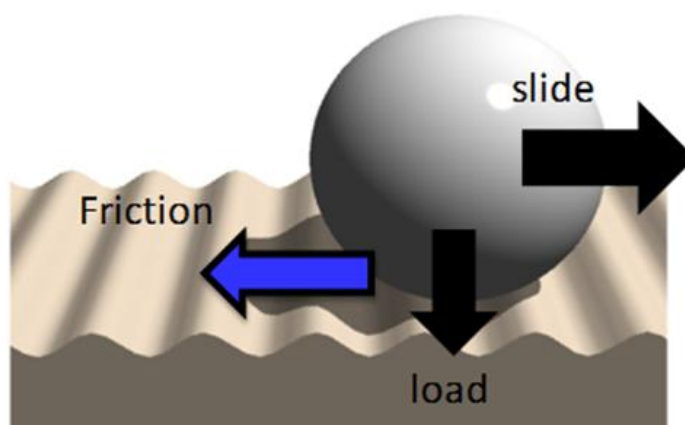


Fig.2 Schematic of dry friction measurement on the deformable microwrinkles.

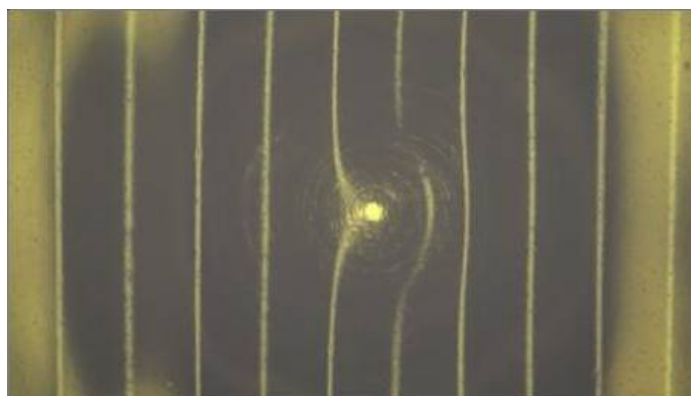


Fig.3 Optical image of the deformed structure of wrinkles under a dry-sliding friction test. The bright spot at the center corresponds to the frictional interface.

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ck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-を行っているとお観ることができる。

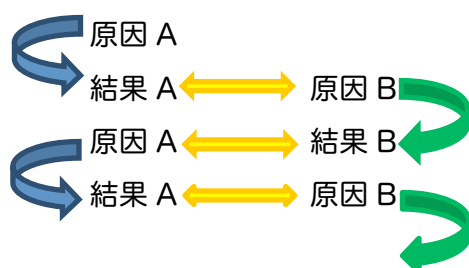


Fig.1 Positive feedback.

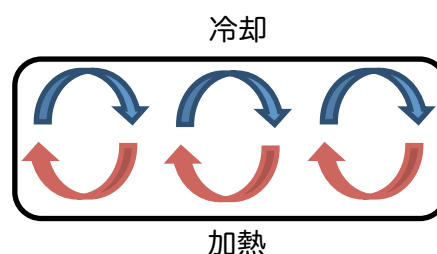


Fig.2 Heat convection.

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。

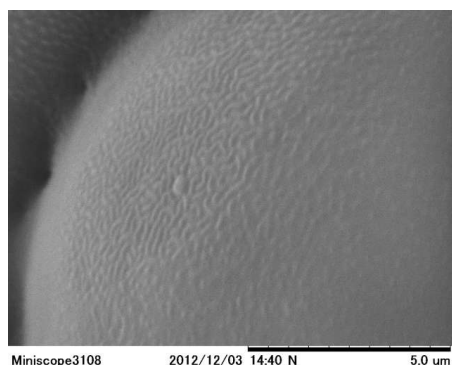


Fig.3 spa^{pol}(sparkling-poliert) mutant.

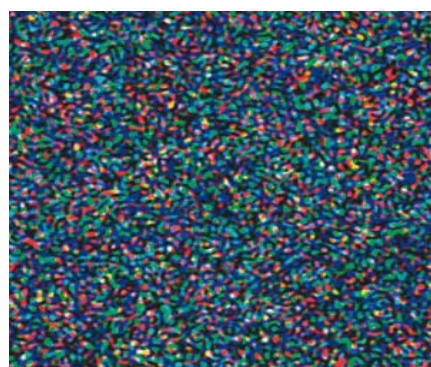


Fig.4 Speckle pattern⁽¹⁾.

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、セミの翅の反射率が高いはずだ。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）に関し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。

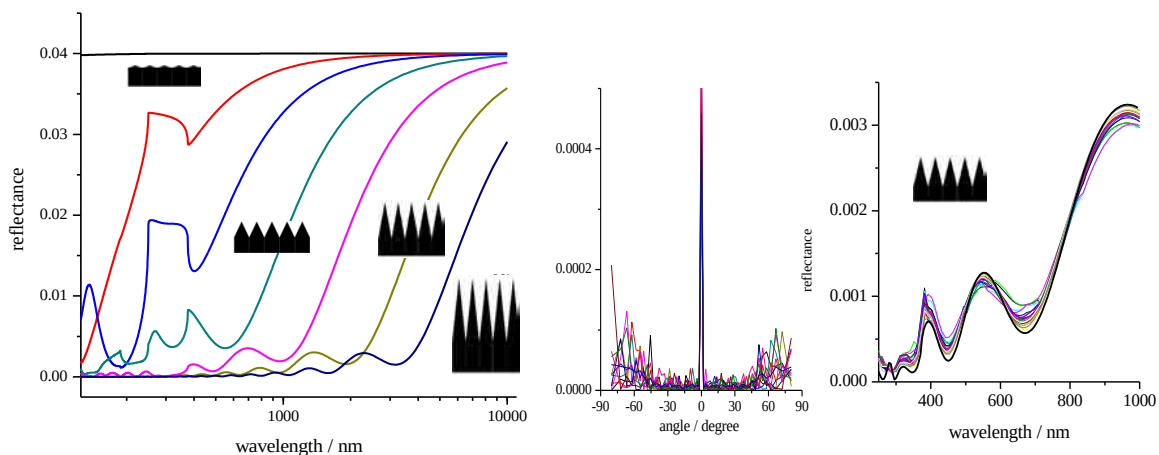


Fig.1 Theoretically calculated reflectance for moth-eye model structures. Dependence of the height of triangles on reflectance (left), the angular dependence of scattered light intensity at 510 nm for 10 structures with irregularities (center), and their reflectance spectra integrated over the angle (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。

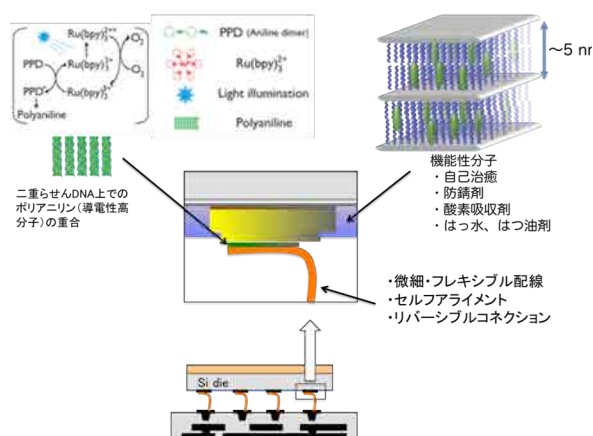


Fig. 1. Speculated image of B01-3 group's goal.

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、動的是は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

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.; Masheder, B.; Hozumi, A. *RSC Adv.* **2012**, 2, 9805-9808.

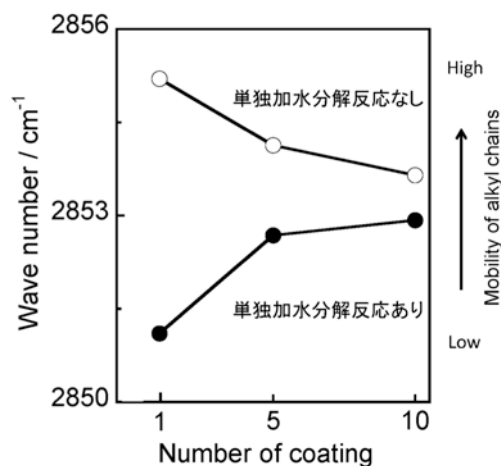


Fig. 2. Relationship between wave number due to the alkyl chains of the coatings and the coating number.

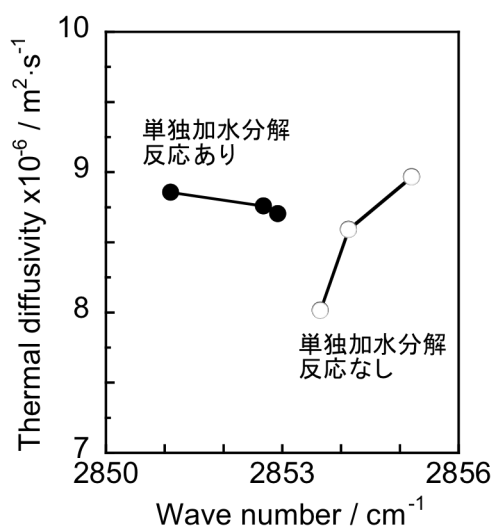


Fig. 3. Relationship between thermal diffusivities of the coatings and wave number due to the alkyl chains.

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に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。

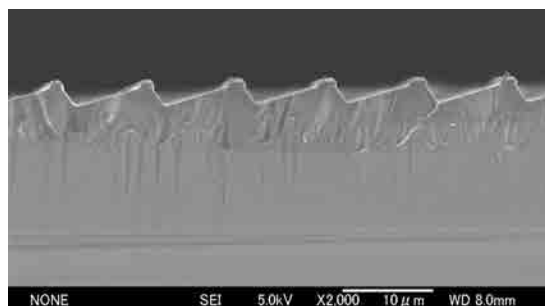


Fig.1 SEM image of periodic structure on silicon wafer fabricated by the anisotropic etching (Cross Section)

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 nanospoke-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

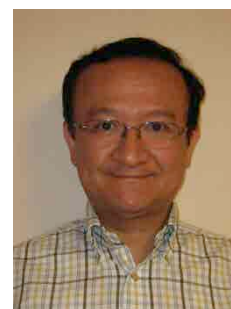
所属機関：京都大学大学院農学研究科植物病理学研究室

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。

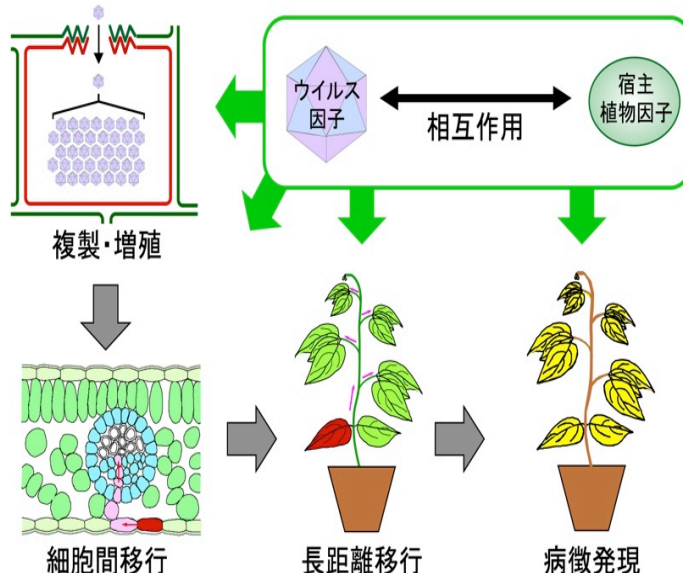


Fig. 1 Interactions between virus factors and plant factors.

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。

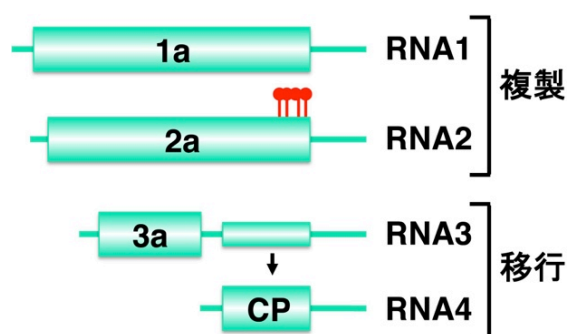


Fig. 2 Genome organization of *Brome mosaic virus* (BMV).



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

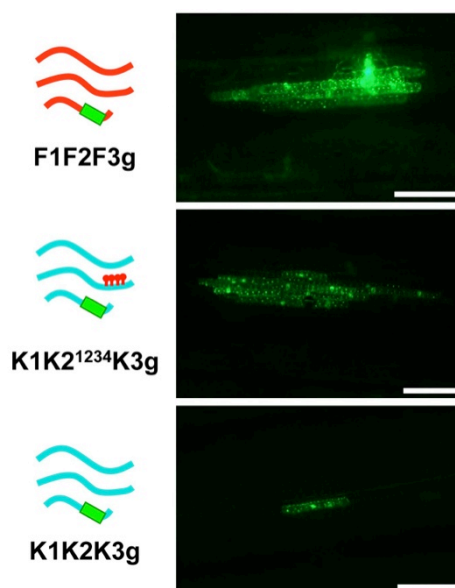


Fig. 4 Cell-to-cell movement ability of BMV-F in the leaves of *indica* rice (cv. IR64) is conferred by four amino acid substitutions in the C-terminal region of the 2a protein.

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。

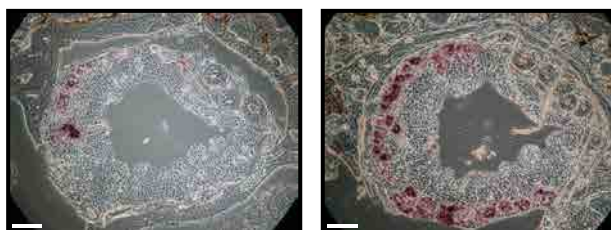


Fig. 1 Localized expression of two type of lipocalins (OBPs), Cp-Lip1 (left) and Cp-lip2 (right) in the newt nasal cavity visualized by the *in situ* hybridization technique⁽¹⁾ (bar: 200 μ m).

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リコンビナント 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。

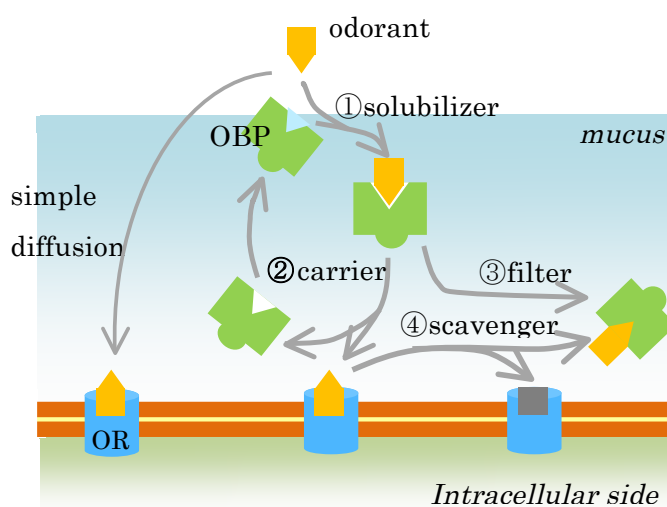


Fig. 2 Possible roles of the lipocalin (OBP) in the olfactory mucus.

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.

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、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 geletinous 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

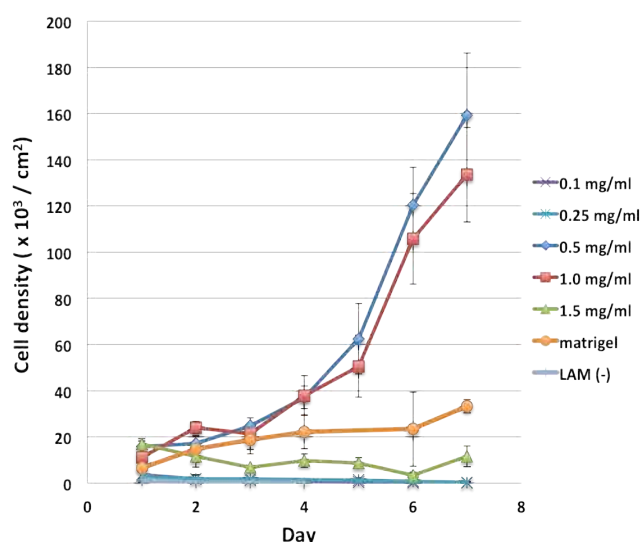


Fig.1 Density of cell cultured on LAM fixed StG gel

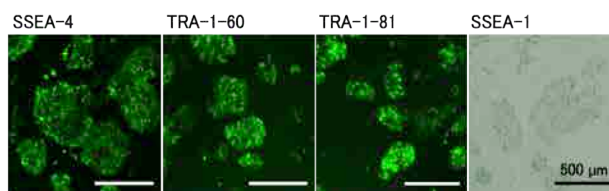


Fig.2 Immunostaining of undifferentiated markers

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

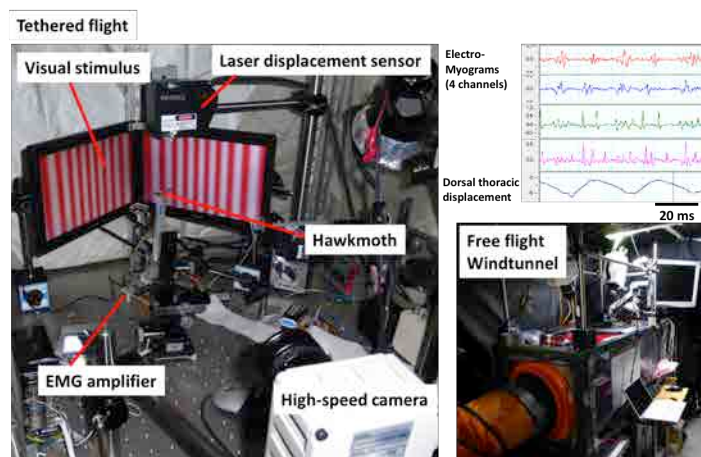


Fig.1 Experimental setup

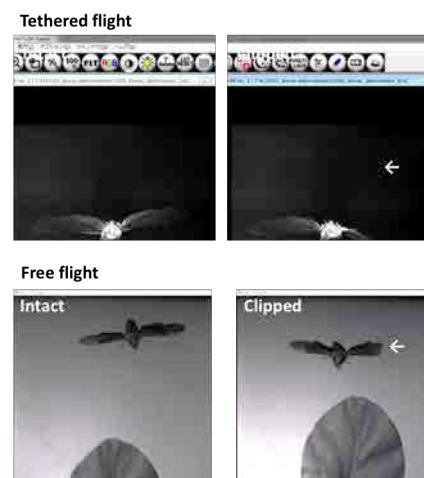


Fig.2 Flight behavior

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タ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いただければ幸いである。

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、バイオミメティッ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。

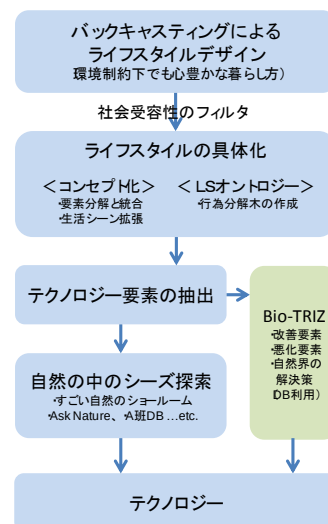


Fig.1 Flow of lifestyle and technology matching.

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、その周辺の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、ということを明示できるようにもなった。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。

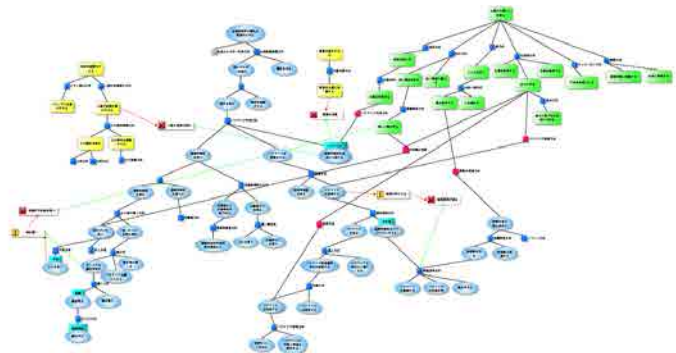


Fig.2 Embodying of a lifestyle “Resources of electricity in household is bio-fuel made from garbage”. Left: an illustration through conceptualization. Right: a functional decomposition tree based on ontology.

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

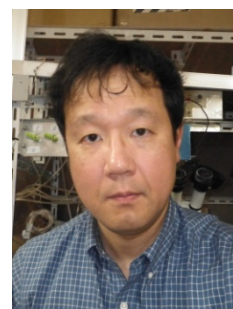
氏名：西野 浩史

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いってよい。

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化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。

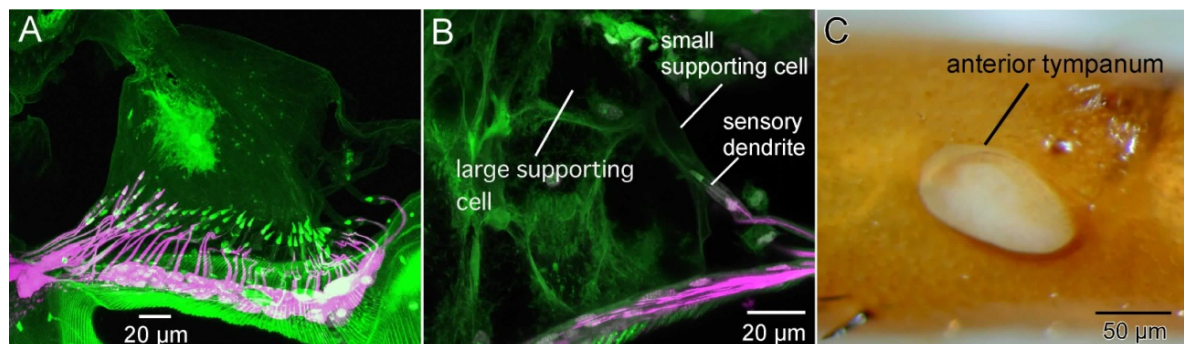


Fig. 1 **A** The tympanal organ. Sensory neurons (magenta) and supporting cells (green) are differentially stained. **B** Subcellular attachment site between a sensory dendrite and a supporting cells. **C** Anterior tympanum of the cricket prothoracic leg.

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

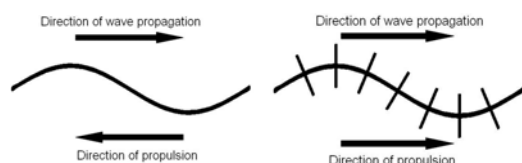
研究キーワード：ゴカイ、水中推進、生物規範ロボット



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.

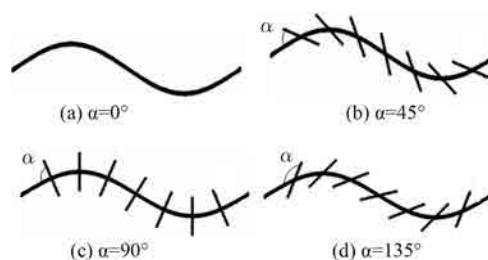


Fig. 2 The angle of projecting protrusions.



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.

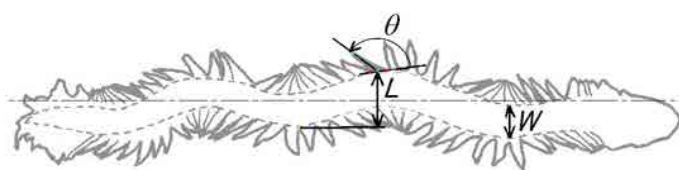


Fig.4 Motion analysis of parapodium. θ : Angle of a parapodium, W : Body width, L : Lateral position of basal portion of a parapodium.

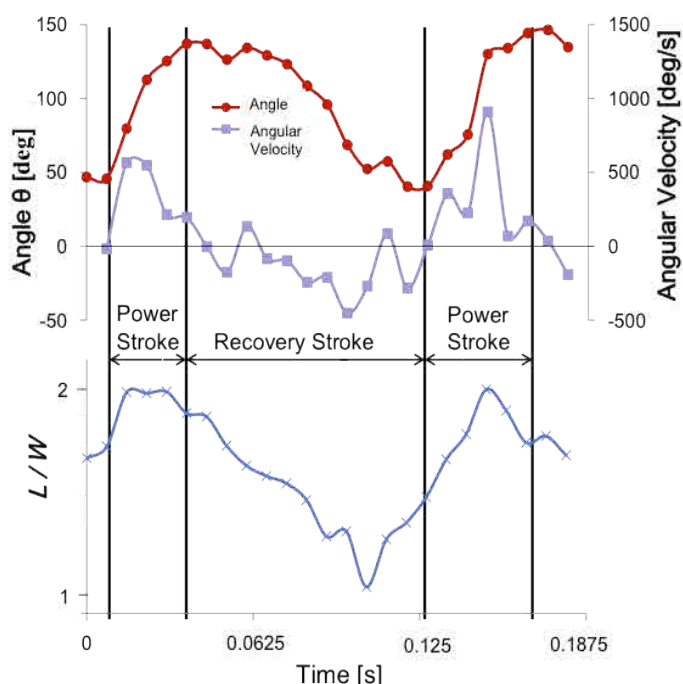


Fig.5 Angle and lateral position of a parapodium.

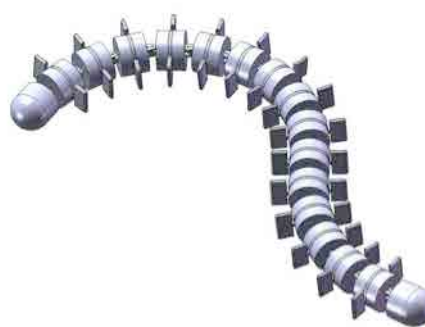


Fig.6 Image of new propulsion robot.

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。

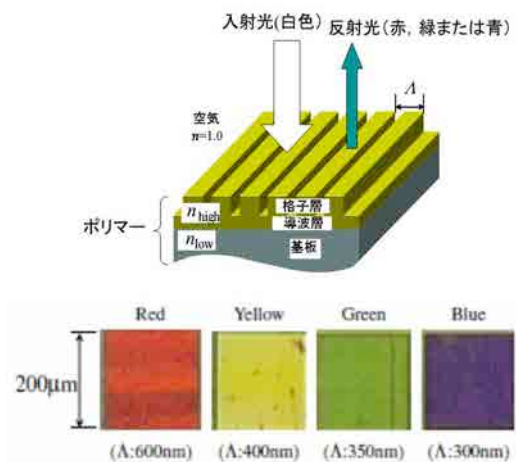


Fig.1 Structure (upper) and produced reflection-type structural colors (lower).

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)。

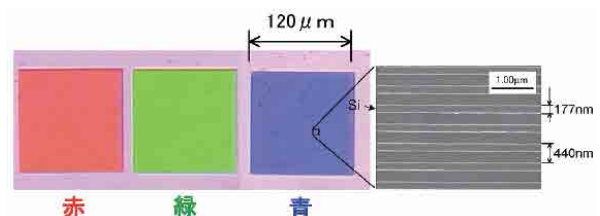


Fig.2 Transmission-type structural colors.

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。

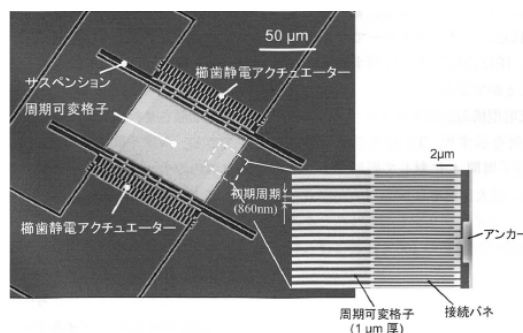


Fig.3 Pitch-variable structural color filters.

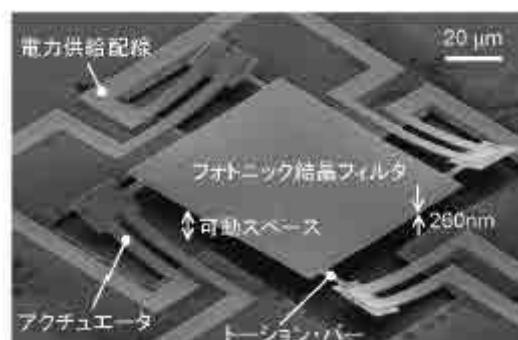


Fig.4 Intensity controllable filters using movable photonic crystal filters.

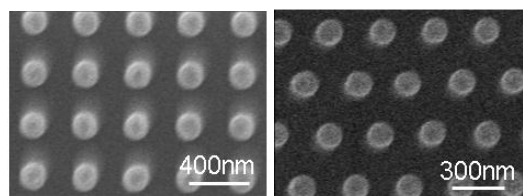


Fig.5 An example of SEM pictures of structural color filters we have developed.

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

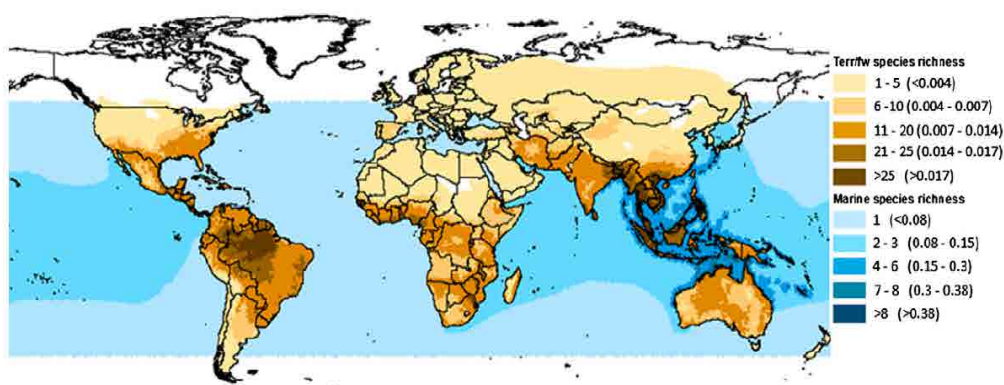


Fig.1 Global Species Richness Distribution of Reptile Assessment (Bohm et al., 2013).

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.

(4) トピックス (PEN より)

生物規範飛行の学理とバイオミメティクス

千葉大学大学院工学研究科 劉浩

要約

昆虫や小鳥のような生物の飛行は、バイオミメティクスの重要な分野の一つとして注目されている。近年生物規範飛行を一つの複雑なシステムとして捉え、生物の羽ばたき飛行における空力性能、安定性及び制御原理を統合的に研究し、生物を規範した超小型羽ばたき飛行ロボットの設計指針の創出及び開発が進められている。本稿では、生物規範飛行のバイオメカニズム(学理)とバイオミメティクス(生物模倣)について解説する。

1. はじめに

地球上のおよそ1万3千種類の鳥や哺乳類のような温血脊椎動物のうち、約1万種の鳥(約9千種類)やコウモリ(約1千種類)が大空を舞うと言われている。昆虫は更に種が多く、100万種とも1000万種を超えとも言われる。生態学的影響や生物資源の総量を考えると、昆虫はこの地球上でもっとも繁栄しているグループで、支配的な地位を占めていると言っても過言ではなかろう。飛翔生物、ことに昆虫がこれほど異例な繁栄をもたらした数多くの理由の一つに、まずその優れた飛翔能力があげられる。今から4億万年も前、デボン紀時代の地球上に最初に出現した昆虫は、水中を泳いだり地上を走り抜けたりすることよりも、ずっと省エネの飛行行為を選択することにより、行動範囲を格段に広げることができた。昆虫の多くは、空中で静止飛行や前進飛行、急旋回や急上昇及び急降下など

の曲技飛行をごく自然にこなしている。長い間の自然淘汰によって、飛翔の習性は精巧で効率的になり、飛行に使う器官は極限まで進化してきた。その結果、昆虫は人工物の飛行機よりずっと優れた飛翔能力を有する。

飛翔生物は人工物の飛行機よりずっと優れた飛翔能力を有する。人間は最高速のスプリンターでもせいぜいその速さは3~4身長/秒であるが、地上をもっとも速く走り抜ける動物であるチータでもそのトップ速度は約18体長/秒となる。人工飛行体の傑作である超音速戦闘機では、最高速度がマッハ3(~3200km/h)、およそ32機長/秒に達する。一方普通の鳩でも、通常90km/hの速度で悠々と大空を飛び、これは秒速75体長以上になる。ジェット機は、時速1000km/hでおおよそ5機長/秒に達するが、体長1cmぐらいのミツバチは、通常50km/hの速度で飛んでいて、925体長/秒にも達する。さらに飛行体胴体の回転(ロール)運動を見てみよう。高度な曲技飛行(aerobatics)能力を有する、例えば旋回性能のよい飛行機のロール率は毎秒約720度と言われるが[6, 7]、ツバメは何と5000度以上のロール率をこなせる。普通、航空機の最大許容の正の重力加速度は、4~5Gであり軍用機の場合で8~10Gであるのに対して、多くの鳥は毎日100回以上の10~14Gの加速度を繰り返し受けていると言われる[6, 7]。

近年災害時における空撮、農業散布や沿岸監視、テロ現場での情報収集等を目的として、長さ・幅・高さ共に15cm以下、質量と荷重合計が50g以下の小型飛行体(Micro Air Vehicle, MAV)の研究開発が盛んに行われている。そ

ここで、生物学や力学、計算工学や生物模擬工学等を専攻とする多くの研究者が昆虫と鳥のような飛翔生物からその設計指針を見出そうと、昆虫や鳥の羽ばたき飛行の原理解明を急いでいる。我々の身の周りには、翼長 1m 程度の鳥から 1mm 程度の昆虫までさまざまな飛翔生物が存在しているが、それらは長い自然淘汰の結果、それぞれの環境下で力学的に洗練されたものであるため、その中に MAV 設計の指針となる優れた設計図が無数に存在すると思われる。昆虫と鳥のような飛翔生物は、羽ばたき飛行を駆使し、ホバリング、前進及び急旋回のような曲技飛行を簡単にこなすことができ、人工飛行体よりはるかに優れた飛翔能力を有する。近年スーパーコンピュータを使って、実際昆虫を対象に、厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレーション研究が行われて [1-5]、生物飛行に潜んでいる新しい力学現象や生物の自由飛行メカニズムを明らかにすると同時に、鳥や昆虫サイズの小型飛翔体のためのブレークスルーとなる設計指針の創出が期待されている。

2. 昆虫と鳥の飛翔

昆虫や鳥のような生物の飛翔は、滑空飛行 (gliding and soaring)、すなわち羽ばたき運動がなく固定翼によるエネルギー消費最小の受動的飛行 (passive flight)、または無パワー飛行 (unpowered flight) と羽ばたき飛行 (flapping)、つまり能動的飛行 (active flight)、またはパワー飛行

(powered flight) とに分かれる。羽ばたき飛行は、飛翔生物が重力に逆らいながら空気抵抗を克服して推進する際に使われる。昆虫や鳥は、自分の体重を支えながら前進飛行や後退飛行、そして急旋回や方向転換などのための推進力を同時に発生させなければならない。それ故に、羽ばたき飛行の流体力学の基本原理は、羽ばたき翼とまわりの空気の流れとの相互作用によるものであり、つまり羽ばたき翼の形状や運動がどれだけ有効に揚力 (lift) と推力 (thrust) を同時に発生させることができるのかということになるのである。

2.1 パワー飛行：羽ばたき

鳥、コウモリ及び昆虫は、静止飛行や前進飛行の際に様々な羽ばたき運動を使って揚力と推力を発生させている。図 1 に示すように、大型鳥は、比較的簡単な翼端の軌跡を残す。例えば、アホウドリの羽ばたき翼は楕円のような軌跡を描くが、バッタやショウジョウバエのような小さな昆虫は、相当複雑な羽ばたき様式を見せる。またハトやハチは 8 の字のパターンを、カブトムシやホホアカクロバエはもっと複雑な軌跡を示す。

静止飛行 (Hovering Flight)：静止飛行は、前進速度がない故に最もエネルギーを消費する羽ばたき飛行である。ある飛翔生物が静止飛行をこなせるかどうかは、その生物のサイズや翼の慣性モーメント、翼運動の自由度や翼形状などの諸要素に依存する。静止飛行には、対称ホバリング

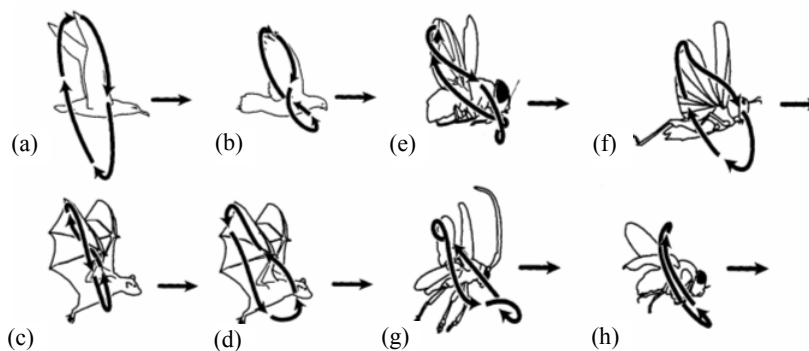


図 1 Wing tip paths relative to the body for a variety of flyers, as indicated by the arrows. (a) albatross, fast gait; (b) pigeon, slow gait; (c) horseshoe bat, fast flight; (d) horseshoe bat, slow gait; (e) blow fly; (f) locust; (g) June beetle; (h) fruit fly. Adopted from Alexander, (Alexander, 2002).

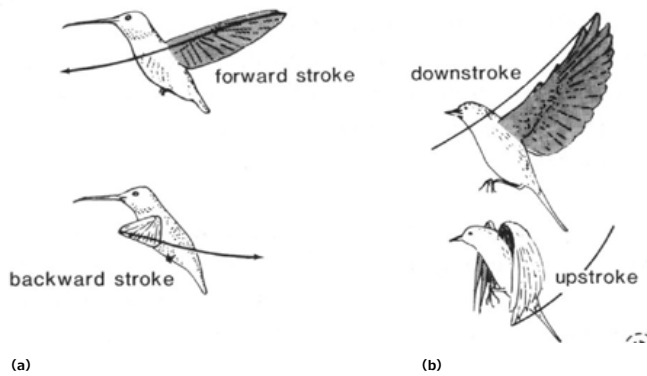


図 2 Schematic of hovering flapping wing kinematics: a symmetric hovering and b asymmetric hovering (Norberg, 1990).

(symmetric hovering) と非対称ホバリング (asymmetric hovering) との 2 種類のモードがある。対称ホバリングは、ハチドリや昆虫がよく利用するもので、通常胴体が立っており翼が水平面内を大きな角度で羽ばたきする (図 2a)。この場合は、羽ばたき翼が打ち下しと打ち上げの時にほとんど対称な運動を行うため、翼の反転する時以外ほとんど揚力が発生している。非対称ホバリング (図 2b) は、主にコウモリや鳥の飛行に観察されており、羽ばたき面 (stroke plane) が通常傾斜しており、翼が低速前進飛行のような羽ばたき運動を行う。こういう飛翔生物は、打ち下しと打ち上げの間では翼を反転させることができないため、主に打ち下ろす際に揚力を発生し、打ち上げ時に翼を後方へ曲げるにより抵抗を低減させる。

$$k = \frac{\omega c}{2U_{ref}} \quad (1)$$

ここでは、 ω 、 c 及び U_{ref} はそれぞれ羽ばたき翼の角速度、翼の代表翼弦長及び前進速度である。図 3 に示すように、羽ばたき翼の非定常流体力学効果が無次元周波数に依存するため、飛翔生物の揚力と推力への定性的な評価がその質量と無次元周波数の相関を調べるにより行うことができる。全体的に、無次元周波数は生物の大きさと質量が増大するにつれ減少する傾向にあり、小さな飛翔生物が大きなものより非定常な流体力学を利用すること示唆する。

2.2 無パワー飛行：滑空飛行

前進飛行 (Forward Flight): 図 1 に示すように、昆虫や鳥は、通常高速前進飛行の際に垂直面内において大きな振幅で翼を上下羽ばたかせるが、前進速度を減少する時に、ヘリコプターがローター角度を変えるようにその羽ばたき面をより水平に傾斜させるようにする。前進飛行の流体力学性能は、式 (1) のような羽ばたき速度と前進飛行速度の比を表す、ある無次元周波数で評価することができる。

飛翔生物は、滑空の際に通常翼を一杯伸ばしながら空気の流れ方向に対して運動方向をやや下向きにすることにより、降下する際に重力によって推力を得る、と同時に揚力も発生する。結果として運動方向と水平方向より滑空角度が得られ、揚抗比 (揚力と抗力の比) で定義される。この揚抗比は、生物のサイズ及び飛行速度に関係しており、通

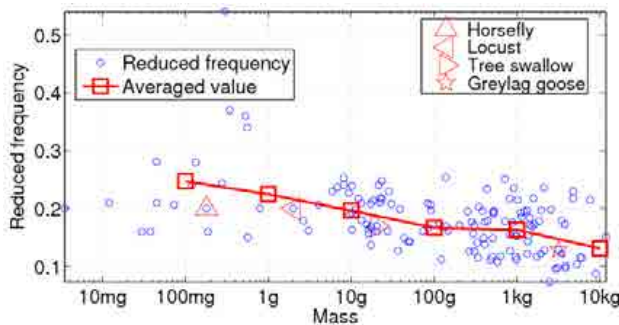


図 3 Mass versus reduced frequency for birds and insects (Shyy et al. 2007).

常レイノルズ数（慣性力と粘性力の比）の増加とともに向上する。それ故に揚抗比は高ければ高いほど滑空は浅くなる。大きな飛翔生物は高いレイノルズ数で飛行する故に、大抵大きな揚抗比を持つ。また、多くの鳥は重力のパワーを利用して滑空する際に、羽ばたきせずに上昇することもできるが、これは soaring という。つまり、重力を用いるよりも、大気中の浮力により発生する上昇気流のエネルギーを巧みに利用するのである [8]。

2.3 幾何学相似則とスケーリング

幾何学相似則（Geometric similarity）は、慣性力、重力、粘性力及びダイナミック力のオーダーを測る尺度として、次元解析を通じて異なる物理量間を関係付けることができる。もし昆虫や鳥は幾何学的に相似であると仮定するならば、一定速度の飛行に関してその重量 W などは、式 2 の

ように代表長さ l により表せる。

$$S \sim l^2, \quad W = L = mg \sim l^3 \quad (2)$$

次元解析に基づいた生物飛行スケーリング（scaling）は、諸パラメータによる飛行特性の空気力学効果を評価するには非常に有効である。Tennekes[9] は、図 4 の The Great Flight Diagram に示されるように、昆虫や鳥から飛行機に至ってそれらの巡航速度、重量及び翼荷重の関係を考慮して興味深いスケーリング則にまとめた。この図 4 から、飛行体のサイズの相違から、簡単に異なる種間の比較や関係づけを行うことができる。つまり、このスケーリング解析によると、飛行体のあるパラメータ、例えば、翼長さがどれだけ他のパラメータ、例えばその胴体質量に関係するかを推測することができる。

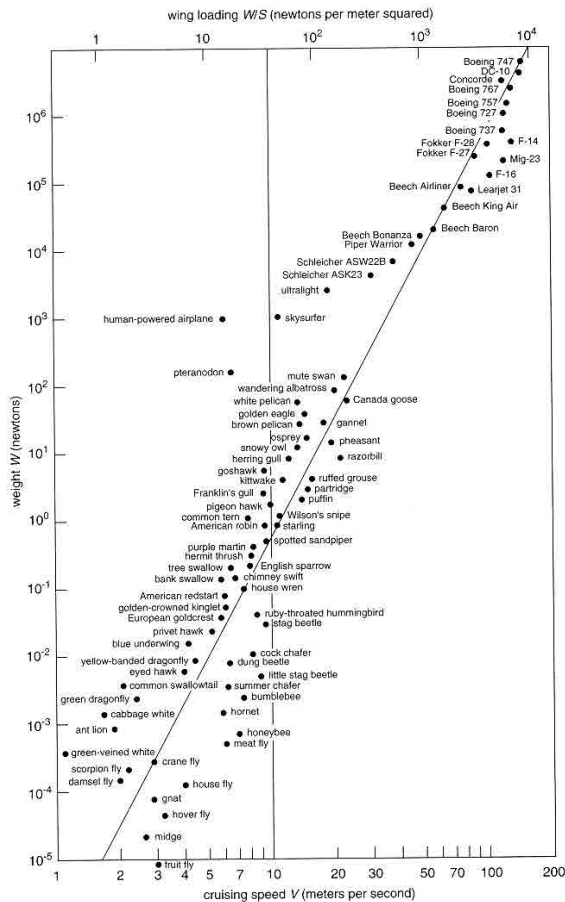


図 4 Relationship between wing loading, weight and cruising speed. The shaded region indicates the expanded parametric range surrounding the projected size, speed and weight for MAV. Adopted from Tennekes (Tennekes, 1996).

翼長さ (Wingspan, b) : 飛翔生物の翼長さは、通常次元解析を行う際にその質量に関係づけられる。

翼面積 (Wing Area, S) : 昆虫や鳥の翼面積はそれらの翼長さより比較的に大きな変化を示す (Norberg, 1990) [10]。例えば、ハチドリは一般に同程度の他の鳥よりも大きな翼面積を有すると知られている。

アスペクト比 (Aspect Ratio, AR) : アスペクト比は、翼長さと翼面積の関係を表し、羽ばたき飛行生物の飛行特性の指標として式 (3) のように定義される。

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (3)$$

一般に小さいアスペクト比は高い機動性や操縦性をもたらすが、高いアスペクト比は揚力に由来する誘導抵抗を低減させる効果がある。同様に高アスペクト比を有する揚抗比 L/D 、すなわち滑空比 (glide ratio) はアスペクト比とともに増加する。最大なアスペクト比を有する鳥は、実際滑空時間の大半を羽ばたきではなく滑空飛行に使っている種に属すると観測されている。

翼荷重 (Wing Loading, W/S) : 定常飛行における揚力と重量の釣り合いを考えると式 (4) が成り立つ。

$$L = W = 1/2 \rho U^2 S C_L \rightarrow W/S = 1/2 \rho U^2 C_L \quad (4)$$

ここでは、 U は空気速度、 ρ は空気密度である。これにより、翼荷重と巡航速度は一般に重量とともに増加していることが明らかであり、つまり翼荷重が大きいくほどその生物が早くて飛べねばならぬということになる。

羽ばたき周波数 (Wing-beat frequency) : 翼の骨格の主要機能は飛行中に周囲に力を伝達することである。しかしながら、この伝達される力は大きくなりすぎると骨格や筋肉の損傷につながる。こういう制限は、飛行筋肉に依存するパワーとともに、羽ばたき飛行生物の羽ばたき周波数の上限と下限をきめることになる (Pennycuick, 1996) [11]。

2.4 羽ばたき翼のパワー制限

大きい飛翔生物は小さい飛翔生物より低い周波数で羽ばたきする。Pennycuick [11] は、飛翔生物にある固有周波数 (natural frequency) が存在し、しかもそれがその翼の物理特性と克服すべく力に依存することを仮定することに基づき、式 (5) のような羽ばたき周波数の相関を導出した。

$$f = (mg)^{1/2} b^{-17/24} S^{-1/3} I^{-1/8} \rho^{3/8} \quad (5)$$

これはある飛翔生物の羽ばたき周波数を推定するに使えるという。ただし、その生物の質量 (m)、翼長さ (b)、翼面積 (S)、翼の慣性モーメント (I)、そして空気密度 (ρ) は既知量とする。

上限と下限 (Upper and Lower Limits) : スケーリング解析は、羽ばたき周波数 f がパワーと構造の制限を影響するため、鳥のサイズや羽ばたき生物の運動限界に対して有用な情報を提供することができる。これまでは、パワー出力及び羽ばたき周波数レベルの推定と筋肉の占める割合に関しては多くの研究は行われてきた [10, 11]。Pennycuick [11] は、パワー飛行時の最も大型鳥のサイズに基づき、羽ばたき飛行できる飛翔生物の質量の上限が 12 ~ 15 kg になると結論づけた。大型鳥は水平飛行 (すなわち静止飛行) を維持するだけの揚力を発生できない。小型鳥は色んな羽ばたき周波数を利用する能力が備えている。しかしながら体重 1 g 前後の飛翔生物は筋肉が収縮後にその収縮メカニズムをリセットするのに時間がかかるというもうひとつの上限が存在する [10]。これにより静止飛行できる鳥とコウモリの最小質量はそれぞれ 1.5 g と 1.9 g と推定される。

抵抗とパワー (Drag and power) : 飛行機のように飛翔生物は、飛行のために十分なパワーを生産して揚力を発生しながら抵抗を克服しなければならない。羽ばたき無しの滑空飛行のとき、必要とされる大半のパワーはポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの変換により生み出している。羽ばたき飛行の場合は、パワーは飛行筋肉のなす仕事率となる。この際に飛行体に働く全空気力学抵抗 (D_{aero}) は、揚力に由来する誘導抵抗 (induced drag, D_{ind})、翼形状及び摩擦抵抗に依存する形状抵抗 (profile drag, D_{pro})、そして胴体だけに依存する有害抵抗 (parasite drag, D_{par}) という 3 つの成分からなり、つまり $D = D_{ind} + D_{pro} + D_{par}$ となる。また前進飛行は、これらの 3 つ抵抗成分に対応する 3 つのパワー成分: その反力が揚力と推力を生み出す渦伴流の発生に必要な仕事率である誘導パワー (induced power, P_{ind})、形状抵抗を克服するのに必要な仕事率である形状パワー (profile power, P_{pro})、そして胴体の有害抵抗を克服するのに必要な仕事率である有害パワー (parasite power, P_{par}) がある。他に翼だけを動かすのに必要なパワー、すなわち慣性パワー (inertial power, P_{iner}) がある。従って、飛行に必要な全パワー (P_{tot}) はこれらの和、 $P_{to} = P_{aero} + P_{iner} = P_{ind} + P_{pro} + P_{par} + P_{iner}$ なる。ただし、このパワーは、単なる飛行に必要なパワーであるが、パワー入力には等しくない。これは、飛行筋肉がその機械的効率 $\eta < 1$ により制限され、なおかつあらゆる生物がかねらの自分自身の新陳代謝に調整されるため、パワー入力は通常必要な全パワーを上回ることになる。また最も共通のパワー飛行の速

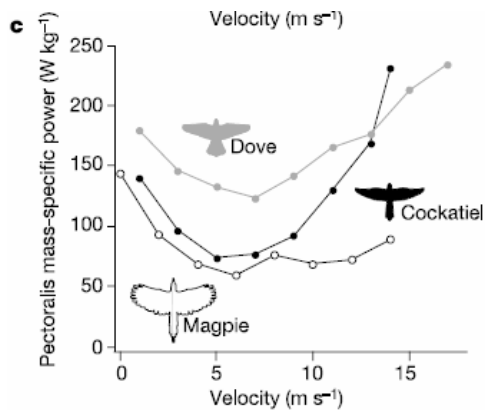


図5 Pectoralis power as a function of flight velocity. Comparative mass-specific pectoralis power as a function of flight velocity in cockatiels, doves and magpies. Bird silhouettes are shown to scale, digitized from video (Tobalske et al., 2003).

度カーブは、図5のようにU字型となり、多くの飛翔生物の飛行で観測されている。

3. 生物規範飛行の力学シミュレーション

自分の縄張りを守るために正確な位置にぴったりと停留ホバリングしているハナアブ (*Syrphidae*) の飛行安定性や、他の昆虫を餌として捕まえるときのトンボの並はずれた機動性など、昆虫は極めて鋭敏な飛行制御を見せる。昆虫が如何にして、羽ばたき飛行の安定性と機動性を実現しているかを解明することは、その飛行性能を模倣し、同程度サイズの MAV の開発にとって非常に興味深い研究テーマである。昆虫の驚くべき飛行性能は、豊かな感覚フィードバックや羽ばたきのための複雑な筋肉系、運動の幅広い変化や非定常空気力学メカニズムの多様性など、数多くの要素の総合的な結果である。その中、羽ばたき飛行の空気力学は非常に重要である。

飛翔生物まわりの流れは、いくら複雑でもその流体を支配するナビエ・ストークス方程式 (Navier-Stokes equation) によって記述できるため、羽ばたき飛行の流体力学は実際昆虫や鳥のような飛行体に対して翼の動的羽ばたき運動及び翼・翼と翼・胴体の相互作用を考慮した多物体系まわりの非定常流れの解を求めることになる。以下では、著者が最近開発した、生物の羽ばたき飛行を厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレータについて、生物飛行の幾何学モデリング、生物飛行の運動学モデリング、そして生物飛行の流体力学モデリングといった3つの項目について簡単に説明す

る。またその昆虫羽ばたき飛行の流体力学メカニズム解明への応用、とくに昆虫飛行のサイズ効果について紹介する。

3.1 生物羽ばたき飛行モデリングの座標系

図6に示すように、生物羽ばたき飛行モデリングにおいては3つの座標系が導入される。1) 翼固定座標系 (xw , yw , zw)、原点が右翼の回転軸にあり、その周りを羽ばたきする。2) 胴体固定座標系 (xb , yb , zb)、原点が質点中心にあり、胴体と一緒に動く。3) グローバル座標系 (X , Y , Z)、すなわち慣性座標系となる。胴体姿勢は、水平方向に対してなす羽ばたき面角度 (stroke plane angle η) と胴体角度 (body angle χ) で表し、3つの回転角度を胴体固定座標系においてはそれぞれ pitch 角 β 、roll 角 ψ 及び yaw 角 γ と定義する。また翼位置パラメータは羽ばたき面において、打ち下しと打ち上げの時の翼端軌跡をそれぞれ実線と点線で表し、また羽ばたき角 (positional angle ϕ) を y_{sp} 軸と yw 軸の羽ばたき面に射影した yw' 軸のなす角と、面内運動角 (elevation angle θ) を翼軸 yw と羽ばたき面内軸 yw' の間の zw 軸まわりの回転と、迎え角 (angle of attack α) を翼 yw まわりの回転 (feathering) とそれぞれ定義する。

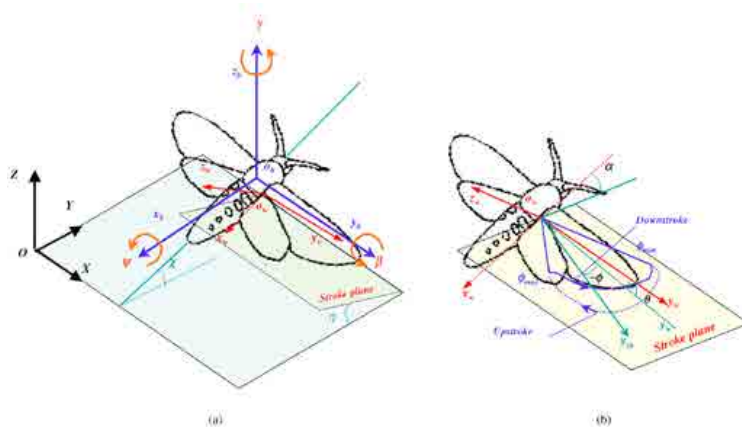


図6 Definitions (a) of the wing-fixed system (x_w, y_w, z_w), the body-fixed system (x_b, y_b, z_b), and the global system (X, Y, Z); the stroke plane angle η and the body angle χ ; the angles of pitch β , roll ψ , and yaw γ with respect to the body-fixed system. (b) Wing position parameters within the stroke plane: the wingtip path, the positional angle ϕ , the elevation angle θ , and the angle of attack α . (Liu, 2009)

3.2 幾何学モデリング (Morphological modeling)

昆虫は羽ばたきで自重を支える上向きの揚力と前向きの推進力を同時に発生する。その羽は通常体重の数パーセントしかない超軽量構造にもかかわらず、毎秒数百回もの往復運動をこなす超高強度を有するものである。図7の中の体長5cmぐらいの大型昆虫、スズメガ (Hawkmoth) の羽形態や内部構造、羽ばたき飛行の3つの運動を示す。表面の鱗粉を落とした昆虫の羽が羽の付け根から放射線状に伸びる内部が空洞となる20数ミクロンの翅脈と、それらの間を覆う2ミクロンぐらいの薄膜からなっていることがわかる。更に生きている昆虫の羽の翅脈の中を液体 (血液) が流れていて、それは高周波数で羽ばたく羽の強度を補強する重要な役割を果たしていると推測される。

生物の自由飛行を再現するため、羽・胴体の3次元形状だけでなく、慣性力や慣性モーメントの計算に必要な羽の厚みや翅脈分布などをも正確に計測できる手法を開発した [3]。実際の昆虫の羽・胴体のリアリスティックな3次元幾何学形状モデリングや計算力学格子生成等の諸手法や技術を開発した。本方法では、幾何学モデリングは、昆虫や鳥の翼・胴体の3次元幾何形状を楕円近似とした微分幾何学手法と構造格子生成法と複雑な形状と羽ばたき運動を有する多物体システムに対応できる重複格子法を導入した [4, 5]。図7にリアリスティックな翼胴体形状をもつスズメガ (hawkmoth, *Agrius convolvuli*)、ミツバチ (honeybee, *Apis mellifera*) 及びショウジョウバエ (fruitfly,

Drosophila melanogaster) の幾何学モデル及び計算格子を示す。

3.3 運動学モデリング (Kinematic modeling)

飛翔昆虫は、主に翅の羽ばたき運動で飛んでいる。多くの昆虫はハチやハエのように1対の翅をもっているが、なかにはトンボやチョウのような4枚の翅を有するものも多々ある。昆虫の羽ばたき周波数は大抵20から最大1000Hzを超えるともいわれている。鳥類と異なって、昆虫の羽ばたきを引き起こす筋肉及び制御系統は、全て固い外骨格の中に収められている。アホウドリのような大型の鳥は、羽の付け根と中ほどにそれぞれ間接を持つ2関節型の羽ばたき機構を持ち、打下ろしと打上げて羽の面積を変えることができる。一方、ハチドリなどのような小さい鳥類と昆虫の羽ばたきに使われる筋肉や骨格の構造は、羽の付け根にのみ関節を有する1関節の機構をもち、ガのような大型昆虫の直接飛翔筋駆動タイプと、ハエのような小型昆虫の間接飛翔筋駆動タイプの2種類に大別できる。生物の筋肉は、機械と異なって収縮する際にのみ力を発生し、伸張する際にはエネルギーを蓄えることができない。大型昆虫は羽ばたき周波数が低いため、飛翔筋の収縮が神経パルスに同期して行われるが (同期筋)、小型昆虫では神経パルスがなくても、自動的に繰り返されるようになる (非同期筋)。両者の境界は約80Hzと見られている。

運動学モデリングは、胴体角度や羽ばたき面角及び翼運動の3つ角度の時間的変化と羽ばたき運動に伴って移動・変形する動的格子生成を統合させて、羽ばたきによる自由飛行を再現可能なものである [4]。図8はスズメガ、ミツバチ及びショウジョウバエの翼運動の3つ角度の時間的変化、表1はそれらの羽ばたき振幅、羽ばたき周波数、羽ばたき面角、胴体角及びアスペクト比、そしてそれらにより計算されたレイノルズ数と無次元周波数を示す (表1)。ただし、空気の動粘性係数を $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ とする。

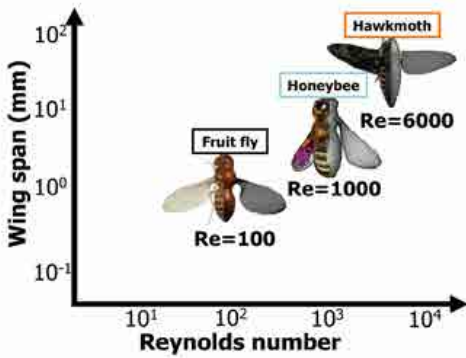
生物羽ばたき飛行の力学シミュレーションを行う際に、力学相似性を考慮して無次元パラメータのレイノルズ数と無次元周波数 (Reynolds number and reduced frequency)

はよく使用される。通常静止飛行に対してレイノルズ数は式 (6) のように定義することができる。

$$Re = \frac{U_{ref} L_{ref}}{\nu} = \frac{2\Phi f R c_m}{\nu} = \frac{\Phi f R^2}{\nu} \left(\frac{4}{AR} \right) \quad (6)$$

ここでは、代表長さ L_{ref} を平均翼弦長 c_m と、代表速度 U_{ref} を $U_{ref} = \omega R$ (ただし、 R は翼長さ、 ω は翼平均角速度、 $\omega = 2\Phi f$ 、 Φ は羽ばたき振幅、 f は羽ばたき周波数) とそれぞれする。また静止飛行時の無次元周波数は式 (7) のように定義される。

$$k = \frac{\pi f c_m}{U} = \frac{\pi c_m}{2\Phi R} = \frac{\pi}{\Phi AR} \quad (7)$$



(a)



(b)

図7 Morphological models and computational grids: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, honeybee, *Apis mellifera*, and fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009); (b) A hawkmoth and its wings without scales.

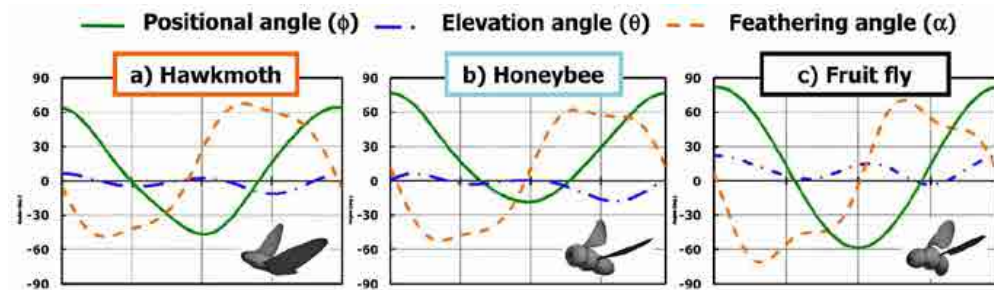


図8 Hovering wing kinematics: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009)

表 1 A summary of stroke plane angles, aspect ratio, Reynolds numbers, and reduced frequencies for three insects (hawkmoth, honeybee, and fruitfly) (Liu and Aono, 2009).

	Stroke plane angle (β)	Aspect ratio ($AR=2R/c_m$)	Reynolds number ($Re=U_{ref}c_m/\nu$)	Reduced frequency ($k=\pi f c_m/U_{ref}$)
Hawkmoth	39.8°	5.28	6300	0.298
Honeybee	0°	8.12	1123	0.244
Fruitfly	0°	6.13	134	0.212

4. 昆虫規範飛行の学理

昆虫や鳥の羽ばたき飛行の流体力学は、大抵 $O(10^1)$ から $O(10^5)$ に至るまでの低レイノルズ数領域において高い非定常性を有し、通常複雑な羽ばたき運動や柔軟構造をもつ翼の変形などによる大規模な渦流れといった特徴を示す [4, 12]。それ故に従来の高いレイノルズ数領域における飛行機の流体力学理論に比べて、まだ多くの疑問が残る理路整然と説明できる理論がないと言われている。この生物羽ばたき飛行における流体力学メカニズムを解明するのに一つチャレンジングな問題としては、つまり羽ばたき翼まわりの大規模な渦流れや伴流構造がどのように発生しているのか、さらにそれらがどのように揚力や推力の発生と関係づけているのかといった本質的な質問に解を出すことになるのである。最近の研究では、昆虫や鳥及びモウモリの羽ばたき飛行における非定常空気力学原理の多様性と重要性が明らかになっている。それらは、殆ど非定常的な揚力を向上させるメカニズムであり、いわゆる、両翅が大きな角度で羽ばたきし反転の際に互いにぶつかり、かつ迅速に反転するような羽ばたき運動であり、小さい昆虫の羽ばたき飛行によく見られる clap-and-fling、翼の急速な回転により迎え角を増大させる pitch-up rotation、反転前の翼が通過した後にできた後流を捕獲する wake-capture、そして打ち下しと打ち上げの際に翼前縁に見られる強い前縁渦が大きな力をもたらす leading-edge vortices などがあ

4.1. 力学シミュレーションが解き明かす昆虫規範飛行のバイオメカニズム

静止飛行はあらゆる昆虫に観測されている昆虫の特技である。昆虫静止飛行の流体力学のサイズ効果はレイノルズ数によって特徴づけられる。図 9 は上述の 3 種類の昆虫近傍の渦構造 (a) hawkmoth, $Re=6300$; b) honeybee, $Re=1000$, c) fruitfly, $Re=134$ 、図 10 は後流構造及び下向きのジェット流れ (downwash) をそれぞれ示す。3 種

類の昆虫のサイズ及びレイノルズ数や羽ばたき運動が異なるにもかかわらず、ある共通している特性が見られる。つまり、羽ばたき翼が並進運動を開始する間もなく、一対の馬蹄渦 (a pair of horseshoe vortices) が形成され、それが前縁渦、後縁渦及び翼端渦からなり、尚かつ次第に一つ翼全体を包むような強い渦リング (vortex ring) に発展していくことと、その渦リングの中心 (core) を下向きの強いジェットが流れていくことが 3 種類の昆虫の静止飛行に共通に見受けられる。この渦リングは打ち下しと打ち上げの終わりに翼から剥がれ、後流に大きな格子状の渦構造を残す。しかしながら、レイノルズ数の違いによって渦ダイナミクスや後流構造及び揚力などの発生 (図 11) との相関には、定量的に顕著な相違も見受けられる。

さらに図 11 に示される時系列の垂直力より周期平均垂直力を計算することにより、打ち下し時と打ち上げ時に発生する力がサイズまたはレイノルズ数に依存することが分かる。つまり、スズメガは 6:4 ~ 7:3、ミツバチでは 5:5、そしてショウジョウバエでは 4:6 となっており、その比率はサイズやレイノルズ数とともに減少するという。一方、鳥の場合は Warrik ら [13] は PIV 計測に基づいた解析によりハチドリ

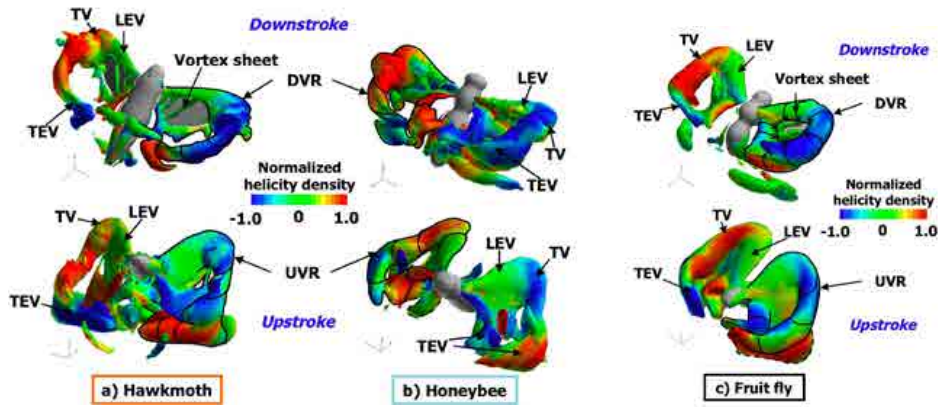


Figure 9 Vortex structures in terms of leading-edge vortex (LEV), trailing-edge vortex (TEV), wing tip vortex (TV), downstroke vortex ring (DVR), and upstroke vortex ring (UVR) about a hovering insect: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster*. Note that magnitude of iso-vorticity surfaces is 0.6 and color of iso-vorticity surfaces is normalized by helicity density. (Liu and Aono, 2009)

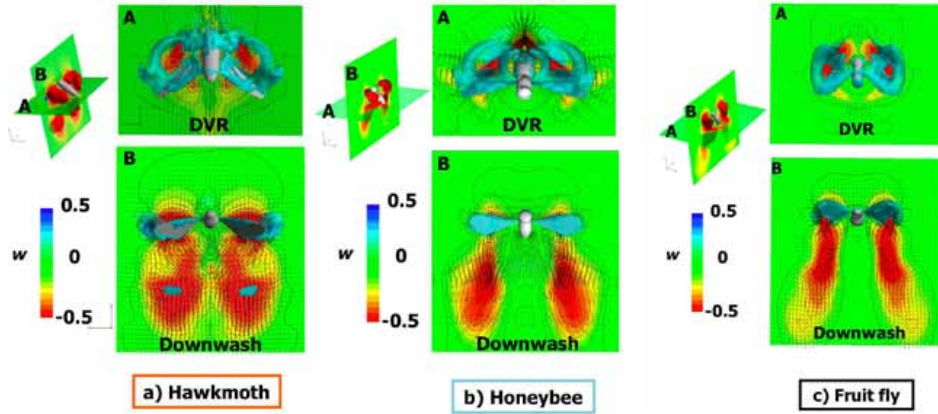


Figure 10 Downwash wake topologies about a hovering insect: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009)

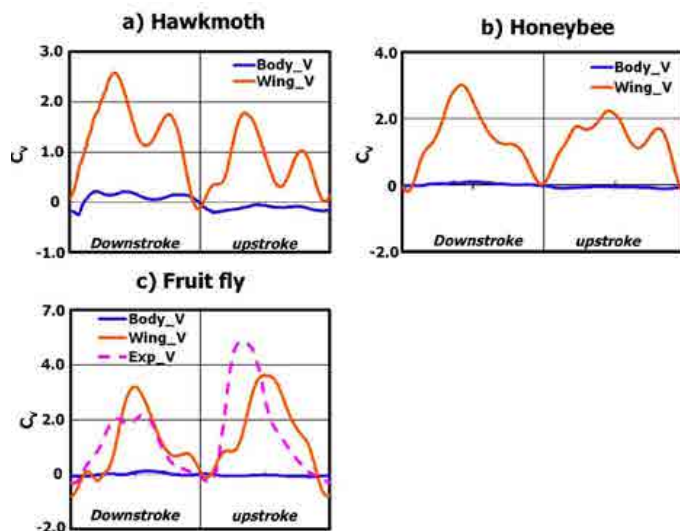


図 11 Time courses of vertical force coefficient over a flapping cycle: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster*. Orange and blue lines indicate vertical force acting on two wings and body, respectively (Liu and Aono, 2009).

4.2. 生物規範メカニクス・システム

生物規範飛行からさらに視野を広げて生物の動き（運動）における生物規範メカニクス・システムを整理すると、図 12 のようにナノサイズの分子やタンパク質から、ミクロンサイズの細胞やバクテリア、ミリサイズの昆虫や魚類、そしてメートルサイズのイルカやクジラまで、実に 11 桁もの広大なスケールにわたり、生物の運動は、これだけ多様性に富んだ生物の形態や運動には共通している性質があり、つまり生物運動と生物運動における力学現象に周期的変化が空間方向に伝播する現象、ミクロスケールのブラ

ウン運動、ミリスケールの屈曲運動や羽ばたき、メータスケールの乱流など、いわゆる波動性が存在することがわかる。生物の動きは、各スケールにおいて船や飛行機の人工物のような“直線的な推進”ではなく、横の運動、いわゆる波動によるものが殆どであり、これらの“最適化された”運動機構が非定常性と波動性の調和によるものと考えられる。筆者は、この現象を「生物流動波 (Biofluid-wave)」と称したい。今後はこの生物流動波というコンセプトを導入し、新しい視点に立って、生物規範メカニクス・システムにおける非定常性と波動性を考察し、統一的に取り扱う学理を創出することを期待している。

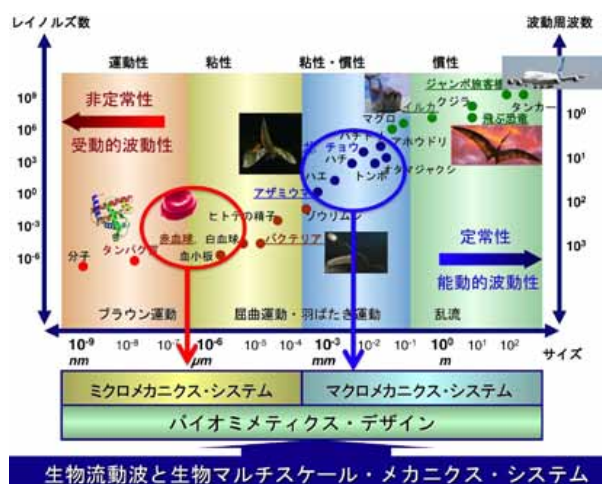


図 12 Toward multi-scaled mechanics system: a biofluid-wave theory

例えば、細胞のミクロメカニクスは、その周囲における種々の静的ないし動的な機械力学的環境（力学場）を感知して自らの機能（細胞の力覚特性）を調節する。細胞を医療用資源として最大限に活用しその機能を十二分に制御して用いるためには、細胞外環境の生物学的条件のみならず力学場条件の両要因の適切な設計に基づく細胞操作材料～メカノバイオミメティック材料～の確立が極めて重要である。一方、昆虫飛行のマクロメカニクスは、複雑な神経・筋・運動・力学などからなる生物飛行システムであると同時に、時空的に動的変化（飛行行為の維持や修復、環境変化への適応・進化）を行うことから、一つの開放型システムとなる。昆虫飛行の形態・機能の最適現象と環境変化に対する適応機構の統合的な解明が自律飛行可能な昆虫規範型飛行ロボットの開発と、生物飛行の多様性や進化への理解にとって極めて重要である。

5. 生物規範飛行のバイオミメティクス

生物規範飛行のバイオミメティクスの研究、ことに昆虫サイズの MAV の研究開発が近年急速に発展を遂げているが、昆虫レベルまでのダウンサイジングの過程における理論体系や設計指針などが確立されていない [4, 5, 12]。現在自律飛行可能な MAV 機体が殆ど固定翼や回転翼を有するものであり、静止飛行可能な者が室内無風状態で 5~10 分間しか飛べない回転翼型に限って昆虫の羽ばたき飛行性能には遠く及ばない。一方長い自然淘汰により洗練された昆虫飛行メカニズムを解明し究極な設計指針を見出そうという研究が 90 年後半から世界的に急増し一流科学誌 Nature と Science に 20 編もの論文が掲載され、熾烈な競争となっている [1, 2, 14]。昆虫や MAV のようなミリサイズの飛行マイクロマシンになると、例えば翼のような翅脈を有する弾性膜構造が多機能を同時発揮する可能性が極めて大きい故に、昆虫飛行の最適現象の解明と自然環境において自律飛行可能な昆虫サイズ MAV の開発には、羽ばたき飛行における構造・流体・ダイナミクスといった多物理的現象を統合的に解明することが不可欠である。これまでは最も成功している生物規範型羽ばたき飛行ロボットとしては、AeroVironment 社が開発したサイズ約 15cm、重さ約 20g のナノハミングバード (<http://www.avinc.com/nano>) が挙げられる。この羽ばたき MAV は、鳥を規範した胴体と翅を持ち、8 分間程度のホバリング飛行を実現して尚かつ静止飛行から時速 18 km/s ぐらいの前進飛行への遷移を可能である。ただし、飛行時の制御システムはほぼ従来のヘリと同じものを使用し、飛行モードに関係なく飛行体の姿勢は常にほぼ垂直に保つ必要がある。

近年筆者のグループでは厳密な幾何学・運動学・力学モデルに基づき生物羽ばたき飛行を再現できる、「生物型飛行の力学シミュレータ」[3-6]を開発し、多様な生物羽ばたき飛行における非定常流体力発生メカニズムの解明を行い、生物飛行と生物規範型小型飛行体への応用を進めている。これにより昆虫や小鳥の羽ばたき飛行時の非定常力発生メカニズムの統合的な解明 [3 - 6, 12]、線形と非線形の動的安定性解析により羽ばたき飛行安定性解析及び制御モデリング、さらに昆虫膜翼の構造・流体連成解析や自由飛行における空気力学・飛行力学の連成解析などの統合的な研究を実施している。一方、これらの研究成果に基づき、重さ 2.6 g 前後の昆虫やハチドリのサイズのような超小型生物規範型羽ばたき飛行ロボット（図 13）を開発した。4 枚の翼をもち、ハチドリと同程度の大きさで、重さ 2.6 g、超小型モーターによって 1 秒間に 30 回以上の高速で羽根を動かし、空中で数分間羽ばたきすることができる。搭載している赤外線センサーによって上下左右に向きを変えたり、8 の字飛行も可能である。ただし、ホバリングや外乱時の安定飛行を実現するには、さらに例えば、昆虫が利用している optic flow などのような生物独特な制御原理を解明し、超小型羽ばたき飛行ロボットに適用することが不可欠である。



図 13 A hummingbird-inspired, flapping robot (千葉大学、劉浩研究室).

一方、生物規範飛行のバイオミメティクスのもう一つの応用は、最近昆虫や鳥の優れた空気力学性能を有する翅（翼）を規範して、高性能の風力発電風車や扇風機のような回転型流体機械の研究開発が盛んに行われている。自然に学ぶものづくりとして、超低環境負荷で高機能の生物のメカニズムやシステムを学び、それらをテクノロジーとしてデザインしなおす研究開発は、今、注目され、世界中で活発に進められています。これは、単なる生物のある特定の翅形

状や機能を真似るのではなく、生物多様性に富んだ生物規範システムのソフトデザイン思想を工業製品のデザインに取り込むことが重要であり、つまり「環境・人間・機械の調和」と目指す生物規範工学の創出が持続発展可能な社会の一つの切り札になることを示唆し、今後大いに期待されている。

6. おわりに

生物飛行は、数ミリのハエから数センチのチョウやガまでの昆虫、数センチのハチドリから1mの白鳥、太古の数メートルと言われる空飛ぶ翼恐竜に亘り、多様なサイズや形態、運動性能や機能を見せる。とりわけ、最近注目されている昆虫は、毎秒数十回から数百回も羽ばたきする翅の運動が数多くの飛翔筋によって制御され、その結果自重（揚力）を支えながら、静止飛行や急旋回、急速なターンや突風などに対しても姿勢を保って飛行を継続できる。この飛行制御は、神経・飛翔筋・羽ばたき運動・空気力の発生にいたる内部・外部間の双方向の制御機構が同時に働いて初めて自律飛行を実現できる。この外部の空気力の発生機構だけでも、実に翅の非線形な羽ばたき運動、非線形な翅の材料力学的変形、非線形な低レイノルズ数流体力学現象、そして非線形な安定性・制御系に総合的に支配されて、非常に複雑で非線形なダイナミクス・システムである。

この生物の「飛行システム」を構成する各サブシステム（神経—筋—羽ばたき運動—力学・多物理現象）に対して、羽ばたき飛行における構造・運動・流体・制御の力学モデルと神経・飛翔筋モデルからなる基本要素解析を行い、さらにそれらの要素モデルを統合して、生物飛行の統合力学・神経制御シミュレータを構築することにより、複雑なシステムとしての生物飛行への統合的な解析と基本原理の解明の研究が大きな課題である。これにより、生物飛行における多様なサイズ、形態、運動特性、機能の機構を明らかにするとともに、次世代3次元空間を自由自在に飛行可能な昆虫型バイオロボットのイノベーションにつながることが期待される。さらに、複雑な生物システムにおける「開放型システム機構」の解明が生物飛行バイオミメティクスという領域に止まらず、他の学問分野や領域にもインパクトや波及効果を与える可能性も潜んでおり、今後機械工学や航空工学、材料工学や計算工学、生物学やデザイン工学等の異分野間の横断的な学際融合が重要になってくる。

References :

- [1] Ellington, C.P., Van Den berg, C., Willmott, A.P., and Thomas, A.L.R., Leading-edge vortices in insect flight, *Nature* 384(1998), 626.
- [2] Dickinson, M.H., Lehmann, F.O., and Sane, S.P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science* 284(1999), 1954-1960.
- [3] <http://www.simulation.jst.go.jp>
- [4] Liu H. Integrated modelling of insect flight: from morphology, kinematics to aerodynamics. *J. Comput. Phys.* 2009; 228: 439-459.
- [5] Aono H, Liang F and Liu H. Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight: an integrated computational study. *J. Exp. Biol.* 2008; 211: 239-257.
- [6] Liu H and Aono H. Size effects on insect hovering aerodynamics: an integrated computational study. *Bioinspiration & Biomimetics*. 2009.
- [7] 劉浩、力学シミュレーションが拓く昆虫の飛翔メカニズム「遺伝」、Vol. 61, No. 1, 50-56, 2007.
- [8] Alexander, DE. *Nature's flyers*. Johns Hopkins University Press, 2002.
- [9] Tennekes, H. *The simple Science of Flight (From Insects to Jumbo Jets)*. MIT Press, 1996.
- [10] Norberg, UM. *Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution*. Springer-Verlag, 1990.
- [11] Pennycuik, CJ. Wingbeat frequency of birds in steady cruising flight: New data and improved predictions. *J. Exp. Biol.* 1996; 199: 1613-1618.
- [12] Shyy W, Liang Y, Tang J, Viiiru D and Liu H. *Aerodynamics of low Reynolds number flyers*. Cambridge University Press, 2007b.
- [13] Warrick DR, Tobalske BW and Powers DR. Aerodynamics of the hovering hummingbird. *Nature*, 2005; 435: 1094-1097.
- [14] Hedenström A, Johansson LC, Wolf W, von Busse R, Winter Y and Spedding GR. Bat flight generates complex aerodynamic tracks. *Science*, 2007; 316: 894-897.

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

独立行政法人森林総合研究所 森林昆虫研究領域 高梨琢磨

1. はじめに

「へあれ松蟲が鳴いてゐる ... あゝおもしろい蟲のこゑ。」
秋の夜長に鳴く虫は日本人に古くから親しまれている。多くの昆虫は固体を伝わる振動や空気中を伝わる音に敏感であり、様々な場面でこの能力を利用している [1]。例えば、異性の発する音を手がかりに配偶相手を認識するコオロギ [1]、捕食者であるコウモリの発する音をいち早く感知し逃避するガ [2] などがある。このように音や振動は、情報として様々な機能を持つことが明らかにされつつあるが、害虫における知見は、未だ充分に蓄積されていない。

近年、環境や健康への配慮から、害虫防除のための殺虫剤が使用できなくなる例がでてきている。殺虫剤の代替となる捕食者（天敵）やフェロモン剤等を用いた防除法も存在するが、対象害虫種は限られているため、広範囲の害虫に適用できる新しい防除法の開発が望まれている。また、振動や音を用いた防除法の開発の試みはなされているが、成功例は少ない [3]。

本稿では、著者らの研究グループによる森林害虫であるマツノマダラカミキリの行動・生理学的知見と防除試験の成果を中心に、カブトムシなど他の甲虫類における振動情報を用いた行動、ガ類の超音波情報、そして音・振動を用いた害虫防除について解説する。

2. マツノマダラカミキリの振動情報：回避行動・生殖行動と振動受容器

マツノマダラカミキリは、マツ材線虫病（マツノザイセンチュウによるマツ枯れ病）を媒介し、我が国のマツ類（クロマツ、アカマツ、リュウキュウマツ）に壊滅的な被害を与えている重要害虫である。安全性が高い害虫防除法の開発の必要性が高まってきているなか、著者らは振動を用いた害虫防除技術の開発を目指して、マツノマダラカミキリの振動情報の機能解明と応用研究を進めている [3-6]。以下、これらの成果について解説する。

最初に、マツノマダラカミキリの振動に対する行動反応を観察した。振動刺激は、周波数（25Hz-10kHz）と振幅を変化させたサイン波（パルス長 0.1 秒、パルス間隔 0.9 秒）として加振器に出力し、静止中の個体に与えられた。行動観察の結果、本種は広い周波数帯の振動刺激に対して驚愕反応（脚・触角の自発運動）や発音（胸部摩擦器の運動）等の回避行動を示した。特に、1kHz 以下の低周波成分に対し、高い反応度が見られた（図 1A） [4]。

次に、振動受容器を組織学的手法により検索した。まず塩化ニッケルを用いた逆行性染色により、マツノマダラカミキリの脚、触角、胸部の神経と感覚受容器を観察した。その結果、脚の腿節中に発達した弦音器官（腿節内弦音器官）

を持つことを、甲虫類で初めて発見した。腿節内弦音器官は多数の神経細胞が細長い内突起（クチクラ）に付着する構造をとっており（図 1B）、脚の接地面から振動を鋭敏に受容する機能を持つことが強く示唆された [4]。

続いて、腿節内弦音器官の振動受容器としての機能を行動実験より検証した。まず 6 本全ての脚について腿節内の内突起（図 1B）を外科手術により抜き取ることで、弦音器官を完全に除去した。弦音器官を除去した個体は、振動刺激を与えたところ、歩行中にフリーズ反応を示さなかった。一方、無処理個体は振動刺激に対してフリーズ反応を示し、100Hz の振動刺激に対してはほとんどの個体が反応した。以上の結果から、本種は腿節内弦音器によって 1kHz 以下の低周波振動を受容することが明らかになった [4]。

マツノマダラカミキリは振動を回避行動だけでなく、生殖行動においても利用する。また、視覚刺激に対して触角を大きく動かす反応は振動刺激によって強化された [5]。これらの結果より、振動は視覚による認識を補完し、配偶者の存在を示す情報として作用すると考えられる。マツノマ

ダラカミキリは同種だけでなく異種の昆虫や鳥類等の捕食者の接近も、寄主木に発生する振動によって認識することが可能と推測される [3]。このようにマツノマダラカミキリは、情報の発信者が捕食者であるのか配偶者であるのか振動の特性から識別し、前者であれば回避行動を示し、後者であれば触角を動かして配偶者を探索すると考えられる。また、この触角の振動による反応は腿節内弦音器官を除去するとほとんど見られなくなる [5]。このことから、回避行動と同様、腿節内弦音器官が触角の反応にかかわる振動を受容していると考えられる。

マツノマダラカミキリは同種個体や異種の動物の動きにより寄主木に生じる振動を感知するだけではなく、それとは全く別の原因で生じる寄主木の振動を感知できると想定される。本種の産卵対象である衰弱したマツは、通水阻害（水ストレス）が原因となって、周囲長のひずみの変化や微小な高周波振動（アコースティック・エミッション）を多発する。著者らはマツが衰弱する過程において、マツ自体が特異的な振動（以下、自発振動）を発することを測定した [3]。このマツの自発振動は低周波成分からなり、マツの

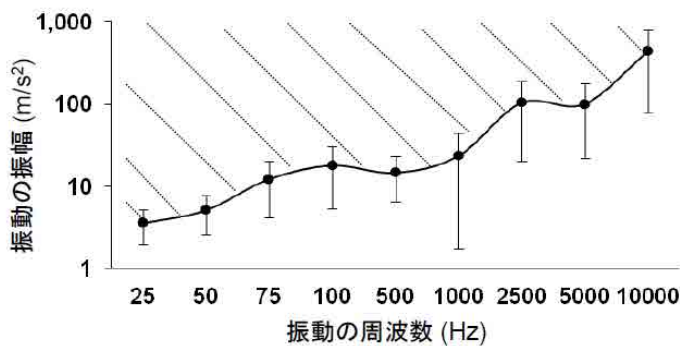


図 1 A 回避行動の反応域

マツノマダラカミキリの回避行動の反応域（斜線部）。曲線は反応をおこす最小の振動の振幅値（閾値）（平均値±標準偏差）。

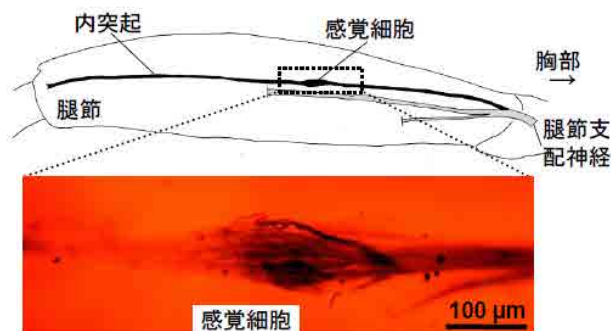


図 1 B 振動受容器

マツノマダラカミキリの腿節内弦音器官。上図：感覚細胞は腿節支配神経から分岐し、細長い内突起に付着する。下図：塩化ニッケルにより染色した点線枠部の感覚細胞の拡大図。

衰弱過程での水分生理状態が大きく変化する特定の時期に多発した。次に、マツの自発振動を再現してマツノマダラカミキリに与えたところ、産卵数の増減は見られなかったが、マツ上の定着率は増加し、産卵行動の時間が短縮された [3]。このことから、マツノマダラカミキリはマツの自発振動を寄主木の情報として認識することが示唆された。本種はマツの揮発性成分に誘引されて産卵をおこなうが、この揮発性成分に加えて振動を産卵に利用していると考えられる [3]。

3. カブトムシの振動交信

カブトムシは、誰でも知っている昆虫である。カブトムシの蛹が動いて振動を発することは、飼育愛好家の間では知られていたが、その役割については分かっていなかった。カブトムシの幼虫は、腐葉土中に集団で生活し、糞と腐葉土の混合物を用いて蛹室とよばれる部屋を作り、その中で蛹になる。しかし、蛹室の壁はもろく、わずかな衝撃でも簡単に崩れてしまう。野外において地中の蛹室と幼虫の分布を調べたところ、両者は平均約 6 cm という近距離にみられた [7]。幼虫は土中を活発に動き回るため、蛹室は周りの幼虫に壊される危険性が高いように思われる。しかし、野外と同程度の高密度で幼虫を飼育しても、蛹室が幼虫に破壊されることはほとんどない。これらのことから、蛹の発する振動が、幼虫から蛹室をまもる機能を持つのではないかと考え、検証実験をおこなった。

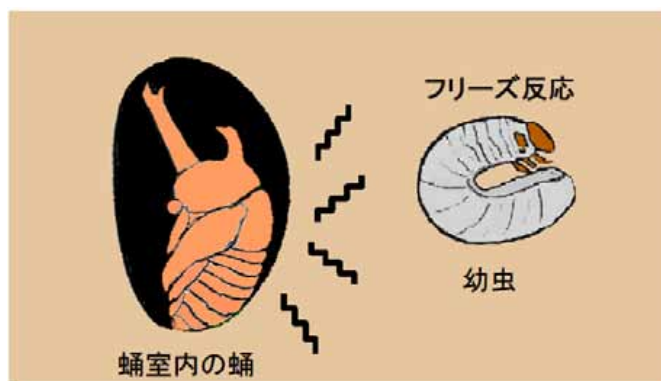
蛹の振動を加速度計により記録・解析したところ、100 Hz 以下の低周波成分を多く含み、規則的な 3～7 個のパルスにより構成されていることがわかった。高速度カメラによる観察と振動測定を同時におこなったところ、このパ

ルスは、蛹が蛹室内で腹部を回転させるときに、蛹室の壁に背面を打ち付けることで生じることも明らかとなった [7]。

次に、カブトムシの蛹が発する振動の機能を明らかにするための実験をおこなった。蛹の回転運動が幼虫からの防衛に役立っているならば、蛹室内の蛹の生死、つまり回転運動の有無は幼虫による蛹室の破壊に大きく影響するはずである。蛹室と幼虫を同一容器内に入れ、蛹室が幼虫に壊されるかどうかを調べた。その結果、蛹が生存している蛹室は、ほとんど壊されることがなかったが、蛹をあらかじめ凍結により死亡させると、多くの場合、蛹室は幼虫によって壊された。次に、空の蛹室のそばで蛹の振動を再生したときに、同一容器内にいる幼虫が蛹室を壊すか検証した。その結果、振動パルスのないバックグラウンドノイズを対照実験として再生したときに比べ、蛹の振動を再生したときは、壊される蛹室の割合が著しく減少した。一連の実験から、蛹は、近付いてきた幼虫に対し振動を発し、蛹室が壊されるのを防いでいることが示された (図 2) [7]。

幼虫は蛹の振動を感知したとき、土中でどのような行動をとるのだろうか。土中の幼虫を観察するのは困難だが、幼虫が動くことで生じる微弱な振動によって幼虫の行動を評価することができる。この振動を加速度計で測定し、蛹の振動を再生する前後で、幼虫の発する振動の頻度がどのように変化するか調べた。幼虫の発する振動は、蛹の振動を再生する直前まで継続的に記録されたが、蛹の振動を再生後の約 10 分間ではまったく計測されなくなった [8]。このことから、蛹の振動を感知した幼虫がフリーズ反応をおこしたことがわかる。フリーズ反応は、昆虫が捕食者を察知したときに行動を停止するという普遍的な反応である。カブトムシの幼虫は、蛹の振動だけでなく、幼虫の有力な

図2 カブトムシの振動交信
蛹室内の蛹は、幼虫が近づくと振動を発し、幼虫にフリーズ反応（行動の停止）をひきおこすことで蛹室の破壊を防ぐ。



捕食者であるモグラの発する振動に対しても、忌避的な反応を示すことがわかっている（図 2）。また、蛹の振動はモグラの振動と類似していることも確認した [9]。その上、蛹が振動を発しない他のコガネムシ科（ハナムグリ亜科・スジコガネ亜科）の幼虫も、カブトムシの振動によってフリーズ反応を示すことが見出された [8]。したがって、振動を感じて動きを止めるフリーズ反応は、捕食者を避けるうえで有利になるという理由から、コガネムシ科の幼虫にもともと備わっていた習性といえよう。カブトムシの蛹はこの性質を逆手にとって、捕食者を模倣した振動で他の幼虫を欺き近づかないようにしていると考えられる [8]。

4. 甲虫類の振動情報

振動により誘発される行動は、上述のマツノマダラカミキリやカブトムシをはじめ、様々な昆虫分類群で確認されている。甲虫類において、摩擦器官による音発生は相当数知られているが、これに対して振動による行動に関する報告例は 6 科と少ない（表 1）[6]。これらの振動情報は、1) 捕食—被食関係、2) 性的関係、3) 社会・共生関係の 3 タイプにわけられる。1) 捕食—被食関係の例は本稿で紹介したマツノマダラカミキリのほか、オウシュウイエカミキリやコロラドハムシにおける振動受容による擬死・フリーズ反応等の回避行動が含まれる。また、砂漠の地表面下に生息するキリアツメゴミムシダマシの近縁種は、風により生じる振動を感知して風に吹き寄せられた餌を得ることができる。2) 性的関係において、シバンムシの一種やカシノナガキクイムシ、ゴミムシダマシ科における振動による配偶行動などがあげられる。オウシュウイエカミキリでは、オスが発する摩擦音が振動としてメスに伝わり、メスの配偶行動に影響する。3) 社会・共生関係の例は甲虫類においてこれまで報告されていなかったが、本稿で紹介

したカブトムシの蛹と幼虫間の交信 [7] が相当する。

5. ガルの超音波交信

アワノメイガ（トウモロコシの害虫）は音圧（音量）の小さい超音波を異性間の交信（性的関係）に用いる [2,10]。オスは、メスが放出する性フェロモンに誘引されてメスに近づくと、翅を垂直に立てて細かくはばたかせる。この時、オスは微弱な超音波の求愛歌（計測距離 1 cm で 46 dB SPL）を発する（図 3）。超高速カメラを用いた発音行動と超音波の解析などから、オスは前翅と胸部にある特殊化した鱗粉を摩擦させ、超音波を発生させていることが明らかになった（図 3A）[10]。この超音波は種特異的であり、近縁種のアズキノメイガ（豆類の害虫）やヨーロッパアワノメイガ（トウモロコシの重要害虫）の発する超音波とは、周波数・時間構造の特性が大きく異なっている（図 3B）[11]。メスの鼓膜器官はオスが発する超音波（ピーク周波数 40 kHz）を感知するが、超音波の音圧が小さいために雌雄間の距離が 3 cm を超えると聞き取ることができない（図 3C）[10]。

アワノメイガの超音波を再現して交尾行動を観察したところ、オスの求愛超音波はメスの逃避を防ぐことが分かった [10]。オスは、発音によってメスを留まらせ、繰り返し交尾を試みることで、交尾の成功率を上げる。鼓膜器官をもつガは、コウモリの超音波を感知してフリーズ反応（飛翔・歩行の停止）を示し、コウモリの捕食を回避する [2,12]。本来、捕食者によって誘発されるこのフリーズ反応を、アワノメイガは交尾のために利用していると考えられる [10]。

音圧の低い求愛超音波は、ごく近距離でのみ有効である

表 1 日本産・外国産甲虫類における振動の利用

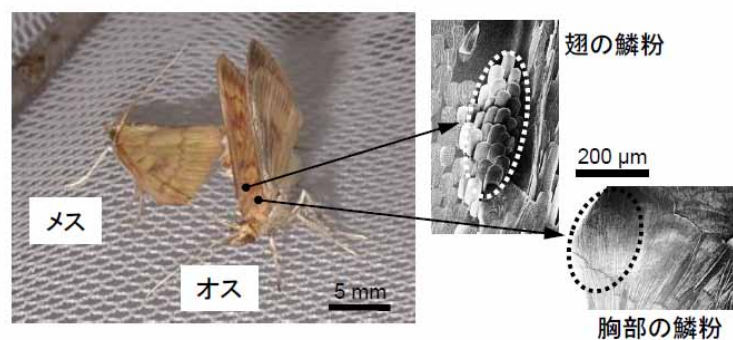
科名	捕食—被食関係	性的関係	社会・共生関係
カミキリムシ	+	+	?
シバンムシ	?	+	?
ゴミムシダマシ	+	+	?
コガネムシ	+	?	+
ハムシ	+	?	?
ナガキクイムシ	?	+	?

[10]。一方、誘引と防衛に用いられる超音波の音圧は大きく、有効範囲は広い。ガの求愛超音波による近距離交信は、複数の分類群において広く存在するため、普遍的なものであると考えられる [13]。微弱な求愛超音波は捕食者や競争相手による盗聴を避けることが可能である [10]。交尾相手のメスだけにささやくラブソングは、コウモリとの攻防戦の結果生じたガ類の巧みな戦略と言える。

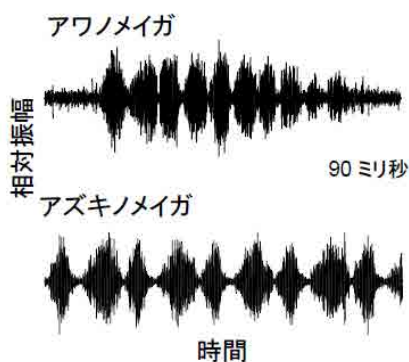
最も多く、捕食者に対する防衛（表 1 では捕食—被食関係に相当）をおこなう種もあった [2,10,13]。これらの音の周波数は、5kHz 未満の低周波から 125kHz の超音波までと様々で、30-90kHz の超音波が最も多かった。また、発音器官も多様であり、胸部の振動膜が最も多くみられ、次いで胸部や翅、腹部の摩擦器官、咽頭の気流による発音も含まれた [2]。

表 2 に、日本産ガ類 24 種の発音の機能を示した。ヤガ科 3 種、ヒトリガ科 3 種、コブガ科 2 種、メイガ科 4 種、アワノメイガを含むツトガ科 7 種、シャクガ科 2 種、スズメガ科 3 種において発音が報告されており、その機能は交尾（表 1 では性的関係に相当）のために用いられることが

A アワノメイガの発音器官



B 超音波



C 超音波と聴覚

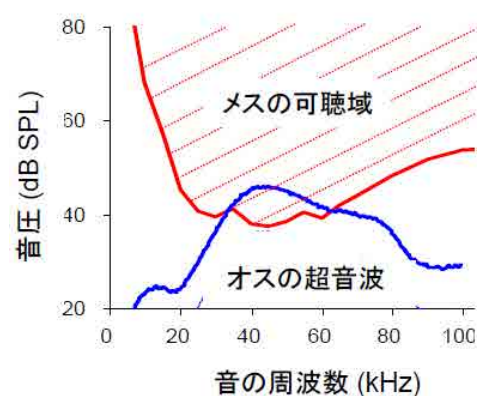


図 3 アワノメイガの超音波交信

A) アワノメイガの発音器官である翅と胸部の特殊化した鱗粉（写真：中野亮博士）。B) アワノメイガと近縁種アズキノメイガの超音波の 90 ミリ秒あたりの波形。C) アワノメイガにおけるオスの超音波とメスの聴覚。

表2 日本産ガ類における音の利用

種名	科名	交尾	防衛
ハスモンヨトウ	ヤガ	+	—
カブラヤガ	ヤガ	+	—
トビシジアツバ	ヤガ	+	—
ヒトリガ	ヒトリガ	—	+
アカハラゴマダラヒトリ	ヒトリガ	+	+
キマエホソバ	ヒトリガ	+	+
アオスジアオリンガ	コブガ	+?	+?
サラサリンガ	コブガ	+?	+?
コハチノスツブリガ	メイガ	+	—
ガイマイツツリガ	メイガ	+	—
ハチノスツブリガ	メイガ	+	—
ノシメマダラメイガ	メイガ	+	—
モモノゴマダラノメイガ	ツトガ	+	—
ニカメイガ	ツトガ	+	—
マエアカスカシノメイガ	ツトガ	+	—
クワノメイガ	ツトガ	+	—
アワノメイガ	ツトガ	+	—
アズキノメイガ	ツトガ	+	—
シロオビノメイガ	ツトガ	+	—
ヨモギエダシヤク	シヤクガ	+	—
ウコンエダシヤク	シヤクガ	+?	—
シモフリスズメ	スズメガ	—	+?
メンガタスズメ	スズメガ	—	+?
オオシモフリスズメ	スズメガ	—	+?

6. 音・振動を用いた害虫防除への応用

害虫の音・振動情報を活用することで、害虫の行動制御、つまり忌避や摂食・産卵阻害をひきおこすことが可能となる [3,12]。そして、これらの行動制御を利用した新たな防除技術の開発につながる。

ガ類において、超音波情報による行動制御とそれによる害虫防除技術の開発は欧米を中心におこなわれてきた [12]。一方、近年国内においても、果樹（モモ）の害虫を対象として特筆すべき成果が報告されている。小池（2008）は、コウモリの超音波を模倣した超音波パルスで果樹園周辺において発生させて超音波の「バリア」をつくることで、アケビコノハやアカエグリバ（ヤガ科）等の侵入を防止させる画期的な技術を開発した [14]。この他、果樹研究所の中野亮研究員らは、モモノゴマダラノメイガ（ツトガ科）のオスが発する超音波は、同種のメスとの交尾に必須である

上、オスがメスに接近するのを阻害することを示した [15]。この超音波情報を模倣することで、新たな行動制御による防除技術の開発が期待される。

振動を用いた行動制御による防除技術の開発は、マツノマダラカミキリを対象に可能である。実験室内において、振動によってマツノマダラカミキリの産卵を完全に抑制できた。また、マツの食害も減少し、振動により忌避がおこることも示された [3]。

以上のマツノマダラカミキリに関する結果から、微弱な振動を樹木等の媒体に発生させて害虫の行動を制御し、産卵や摂食の阻害、忌避等によって防除するための手法を考案、国際特許を出願した。振動を発生させる装置としては、小型で周波数可変域が広い超磁歪素子という材料が有用と考える。例えば、景勝地・公園等のマツ名木毎に高出力の振動発生装置を取り付けてマツを守ることが可能であり、また生態系への影響を最小限にした被害防止が可能となるだろう。また、音・振動を用いた害虫防除は、音・振動に感受性のある害虫種に広く適用でき、環境に配慮した防除技術として需要が高まるだろう。今後、音・振動情報に関する基礎的知見がさらに蓄積し、実用化がすすむことで、本防除法が広く用いられることが期待される [3]。

7. おわりに 生物音響学とバイオミメティクス

生物音響学は、生物の音・振動情報と交信、知覚、さらに物理と工学などを含んだ研究領域である。著者は、これまで紹介した昆虫の音・振動情報の機能や応用に関する研究から、さらに一歩進み生物音響学とバイオミメティクスの統合へと研究領域を広げ、応用につなげたいと考えている。例えば、寄生バエ（発音するコオロギに定位する）の鼓膜器官に模倣した小型音源定位センサー [16] や、昆虫の定位・識別のためのコウモリの超音波ソナー [17] の応用は、音・振動に着目したバイオミメティクスであるといえる。音・振動に関する昆虫の卓越した能力は、動物体の定位・識別システムや害虫防除などの技術開発に寄与し、昆虫に限定されない新しい応用分野を発展させると期待できる。

謝辞

本稿で紹介した一連の研究成果は、中野亮研究員（農研機構果樹研究所）、西野浩史助教（北海道大学）、小池卓二教授（電気通信大学）、小島渉氏・深谷緑博士・石川幸男教授（東京大学）らとの共同研究によるものである。本稿執筆をご

推薦してくださった下村政嗣教授（東北大学）、森直樹准教授（京都大学）、バイオミメティクス研究会の先生方に感謝申し上げる。

References:

- [1] Greenfield, M. D. Signalers and receivers. Oxford University Press, Oxford (2002)
- [2] 高梨琢磨, 中野亮 ガルの多様な超音波発音機構とその機能. 次世代バイオミメティクス研究の最前線 - 生物多様性に学ぶ -, バイオミメティクス研究会編, シーエムシー出版 133-137 (2011)
- [3] 高梨琢磨 マツノマダラカミキリにおける振動情報の機能解明と応用. 植物防疫 66: 297-299 (2012)
- [4] 高梨琢磨, 深谷緑, 西野浩史 カミキリムシにける振動反応性と感覚受容器. 日本音響学会聴覚研究会資料 40, 293-296 (2010)
- [5] 深谷緑, 高梨琢磨 カミキリムシの多種感覚情報利用システムー振動という「曖昧」情報の重要性. 日本音響学会聴覚研究会資料 40, 297-302 (2010)
- [6] 高梨琢磨, 深谷緑 カミキリムシは振動を感知し, 回避行動や配偶行動を行う. 昆虫の発音によるコミュニケーション, 宮武頼夫編, 北隆館 52-64. (2011)
- [7] Kojima, W., Takanashi, T. and Ishikawa, Y. Vibratory communication in the soil: pupal signals deter larval intrusion in a group-living beetle *Trypoxylus dichotoma*. Behavioral Ecology and Sociobiology 66, 171-179 (2012)
- [8] Kojima, W, Ishikawa, Y. and Takanashi, T. Deceptive vibratory communication: pupae of a beetle exploit the freeze response of larvae to protect themselves. Biology Letters 8: 717-720 (2012)
- [9] Kojima, W, Ishikawa, Y. and Takanashi, T. Pupal vibratory signals of a group-living beetle that deter larvae: are they mimics of predator cue? Communicative and Integrative Biology 5: 262-264 (2012)
- [10] Nakano, R., Skals, N., Takanashi, T., Surlykke, A., Koike, T., Yoshida, K., Maruyama, H., Tatsuki, S. and Ishikawa, Y. Moths produce extremely quiet ultrasonic courtship songs by rubbing specialized scales. Proceedings of National Academy of Sciences USA 105: 11812-11817 (2008)
- [11] Takanashi, T., Nakano, R., Surlykke, A., Tatsuta, H., Tabata, J., Ishikawa, Y. and Skals, N. Variation in courtship ultrasounds of three *Ostrinia* moths with different sex pheromones. PLoS One 5: e13144 (2010)
- [12] 中野亮 チョウ目害虫における超音波を用いた行動制御技術. 植物防疫 66: 300-303 (2012)
- [13] Nakano, R., Takanashi, T., Fujii, T., Skals, N., Surlykke, A. and Ishikawa, Y. Moths are not silent, but whisper ultrasonic courtship songs. Journal of Experimental Biology 212: 4072-4078 (2009)
- [14] 小池明 超音波を利用した果樹のヤガ類被害防止技術の開発. 植物防疫 62: 549-552 (2008)
- [15] Nakano, R., Takanashi, T., Ihara, F., Mishiro, K., Toyama, M. and Ishikawa, Y. Ultrasonic courtship song in the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera: Crambidae). Applied Entomology and Zoology 47:87-93 (2012)
- [16] Ono, N., Saito, A. and Ando, S. Bio-mimicry sound source localization with gimbal diaphragm. IEEE Transactions on Sensors and Micromachines 123: 92-97 (2003)
- [17] 松尾行雄, 高梨琢磨 エコーロケーションに基づいた昆虫の空間定位. 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会論文集, 8H26 (2012)

構造色が変化する生物と スマート材料設計へのヒント

(独) 物質・材料研究機構
先端フォトニクス材料ユニット 不動寺浩

1. はじめに

様々な生物において構造色と呼ばれる色素に因らない発色現象が観察される [1]。代表例としてモルフォ蝶の青いメタリックな金属光沢が構造色であることは広く知られている。メラミン色素を含む黒い素地の上にクチクラと呼ばれる棚状の多層膜構造が形成され、白色光のうち青色のみが選択的に反射される。

硬い外皮をもつ甲虫類、たとえばタマムシ、クワガタ、カブトムシ、カナブンなどでも構造色は観察される。ニホンタマムシは2種類のクチクラが積層した多層膜干渉により構造色が発色する。正倉院の玉虫厨子に代表されるように、古くより装飾素材として利用されてきた。鳥類では虹色の羽が美しいクジャク、濃紺のカワセミ、あるいは青色～緑色のハチドリ羽毛など、多様な色彩の構造色が人々を魅了している。

水中生物に目を向けると、魚類の表皮（虹色素胞）の中に屈折率の高いグアニンと呼ばれる板状結晶（無色透明）が積層しており、薄膜干渉あるいは多層膜干渉により可視光を反射する。この現象はタチウオ、サンマ、カツオなどが銀白色に輝く原因でもある。さらに、一部の生物では構造色が変わることが50年以上前より知られていた。たとえば、英国の M. F. Land は1966年にホタテ貝の目の構造色に関する報告を行っている [2]。その中で塩濃度を変化させることで、浸透圧変化によって構造色が可逆的に変化することと、この現象がグアニンの板状結晶の配列間隔が変化するためだと報告している。

近年、ナノテクノロジーの進展にともないこのような生物の構造色変化に関する学理研究やその仕組みを模倣し、環

境応答型の高機能材料開発に応用しようという研究が盛んになりつつある。

2. 構造色が変わる生物

ルリスズメダイ（コバルトブルー）は代表的な熱帯魚として知られており、青色が選択反射されることで構造色が発色している（図1）。さらに、このコバルトブルーは外部から刺激を与えると、体表が変化する。東邦大学の藤井・大島らの研究により、運動性虹色素胞と呼ばれる組織と

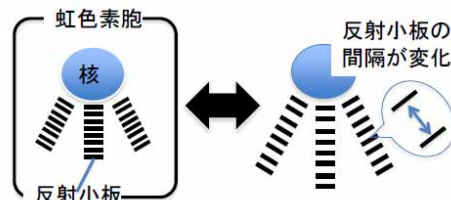


図1 ルリスズメダイ（コバルトブルー）と虹色素胞の構造色変化の仕組み

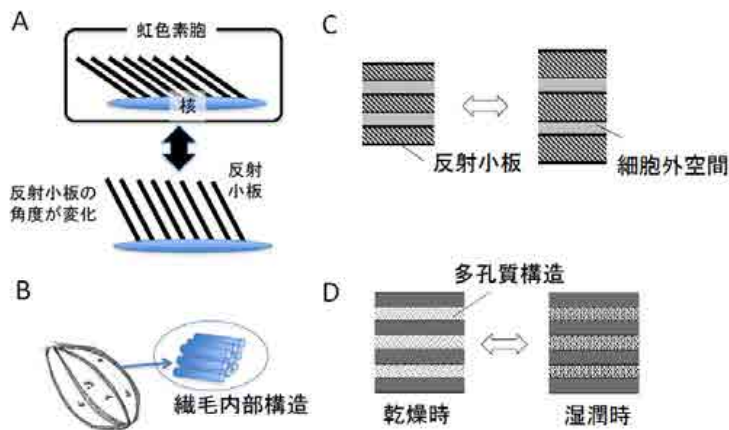


図2 様々な構造色が変化する生物とその仕組み

- A: ネオンテトラ (ベネチアン・ブラインド)
- B: クシクラゲ (ビート運動)
- C: 頭足類 (イカ・タコ類)
- D: 甲虫類

その内部で構造色に変化する仕組みが明らかとなった [3]。図1の写真下のイラストにあるよう、反射小板（グアニン結晶板）の間隔が変化するため、回折波長が長波長側へシフトするため体表が青から緑へと短時間で変色する。

図2に様々な生物における構造色に変化する仕組みを紹介する。運動性虹色素胞の一つとして、熱帯魚のネオンテトラではベネチアン・ブラインドのような仕組みで構造色に変化する。図2Aに示す積層した反射小板の傾きの角度変化によって、反射小板から回折する波長が変化するためである [4]。

また、内部構造の角度変化に依存した構造色に変化する生物として、ある種のクシクラゲにおいて、あたかも、虹色のネオンサインが点滅するような発色現象が報告されている [5]。図2Bのような繊毛内部に円筒が積層した周期構造によって入射した白色光が選択的に反射されるため構造色が生じる。海中で漂っているクシクラゲの繊毛が脈動によって、構造色に変化する美しい動画がインターネット上に公開されている。

イカやタコなどの頭足類の構造色変化の模式図を図2Cに示す。これらの構造色変化は、反射小板の多層膜干渉に起因する [6]。反射小板の厚みが変化することで、構造色に変化する。体色変化で、捕食者への警戒・擬態（カモフラージュ）そして仲間との間におけるコミュニケーションの手段として利用されていると考えられている。

水中と異なり、地上の生物では屈折率変化を利用する構造色変化が多数報告されている [7]。例えば、モルフォ蝶の羽は撥水性で通常は水をはじくので構造色は変化しない。しかし、有機溶媒に漬すと、鮮明な青色が黄色あるいは緑

色へと構造色に変色する。クチクラの周囲の屈折率が変化することがその原因である。また、一部の甲虫類では、クチクラの3次元の多孔質構造を有している。多孔質の隙間を体液で充満させる、あるいは大気中の水分が吸着することで構造色の発色を制御する（図2D）。クチクラが空気と大きな屈折率差があるのが、湿潤することで屈折率差が小さくなるあるいは消失することが原因である。代表的な研究例として、カリドテラ・エグレギガとよばれるハムシの1種は、刺激を与えると1～2分で体表を金色から赤色へ変色する。このハムシでは外皮の色を構成する構造色と赤色素のうち構造色が消失し赤色のみが残る。

ここまで見てきたよう、グアニンの反射小板の間隔が変化、反射小板の角度変化、そしてクチクラの周囲の屈折率変化が生物の構造色を動的に変化させる。

3. 構造色に変化する材料設計

虹色素胞における反射小板の間隔制御する仕組みを模倣して高機能の光学材料を設計する方法として、図3に示す2つの原理が試みられている [8]。一つは屈折率の異なる薄膜を積層した多層干渉である。もう一つは粒子径の揃ったコロイド粒子を自己集積によって形成した3次元周期構造体（オパールコロイド結晶）におけるブラッグ回折である。多層膜はスピンコーターやディブコーターを利用し、異なる薄膜を1層ずつ繰り返し積層することで形成することができる。また、ブロック共重合体と呼ばれる高分子がミクロ相分離により、自己組織化により屈折率の異なる領域に別ラメラ構造と呼ばれる多層膜を形成する [9]。また、屈折率の異なる2層膜をロールアップあるいは多重に重ねあわせる簡便な方法も提案されている [10]。

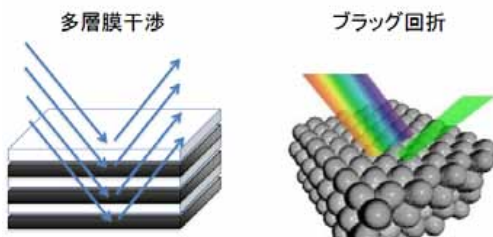


図3 屈折率の周期変化による構造色：2種類の薄膜が積層した多層膜による干渉現象、粒子径の揃ったコロイド粒子が最密充填した規則配列によって生じる可視光のブラッグ回折

一方、オパールコロイド結晶は、溶液中で分散したコロイド粒子が基板上に自己集積により規則的に堆積することで形成される。代表的な成膜法は移流集積プロセスであり、親水化した基板をコロイドサスペンションのビーカーに漬け、オープンで蒸発する方法と基板をビーカーより低速で引き上げる方法である。溶媒の蒸発による溶液のキャピラリーの流れによってコロイド粒子が蒸発界面まで移動し、適切な条件で配列面が揃った3次元周期構造を形成することができる。移流集積プロセスでは面心立方最密充填で(111)面に配向した結晶成長が起るため、構造色は主にこの(111)面の面間隔からブラッグ回折に依存する。なお、この回折波長 λ は(111)面の面間隔 d_{111} 、平均屈折率 n 、白色光の入射角 θ によって

$$\lambda = 2d_{111}\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$$

として表すことができる。

図3のいずれのナノ構造体も配列周期や屈折率を変えると構造色に変色する。現在、様々なセンサー素子や構造色を利用した表示素子など、新材料の機能開発とその応用が進められている。次節ではオパールコロイド結晶の構造色に変化する研究例として、膨潤現象と応力変形を紹介する。

4. オパールコロイド結晶の構造色

4.1 オパールコンポジット材料

コロイド粒子が最密充填したオパールコロイド結晶の隙間をエラストマー（弾性体）で充填することで粒子間隔を可変になったコンポジット材料を作製することができる。ここでは著者らの開発したコンポジット材料を図4に示す[11]。ポリスチレン粒子（PS、ポリサイエンス社、粒子径202nm）が規則配列したオパールコロイド結晶の隙間

をシリコンエラストマー（PDMS、ダウコーニング社、Sylgard184）で充填している。走査電子顕微鏡を用いオパール薄膜の表面と断面の微細構造を観察した。断面部よりコロイド粒子が積層方向に規則配列していることが分かる。この配列状態を図4左上に図示する。立方最密充填構造CCPで(111)面の面間隔 d_{111} によって構造色を決定する。なお、ポリスチレン粒子及びシリコンエラストマーの屈折率はそれぞれ1.59及び1.40であり、その差は0.2程度にすぎない。

4.2 膨潤現象による構造色変化

図5ではPDMSエラストマーの膨潤により面間隔を拡大する。写真にあるように、オパールコンポジット材料を溶媒に浸すとPDMSエラストマーが溶媒を吸収する。イラストに示すようにエラストマーの体積が膨張する結果、粒子配列面の面間隔も d_1 から d_2 へと拡大する。この写真では乾燥部の紫（青）色と湿潤部では赤色へ変色していることが観察される。揮発性の有機溶媒（オクタン）を用いておりオパールフォトリソニック結晶をビーカーより引き上げ乾燥させると元の赤色の状態に回復する。この構造色変化は有機溶媒の種類に影響を受ける。すなわち、シリコンエラストマーが吸収する溶媒量に応じて、膨潤状態も変化するため構造色も変化する。著者らは分子量の異なるシリコンオイルを用い、紫色から赤色の可視光域全体にわたって任意のカラー選択が可能であることを報告している。さらに、回折光の反射ピークのシフト量を利用することで、簡

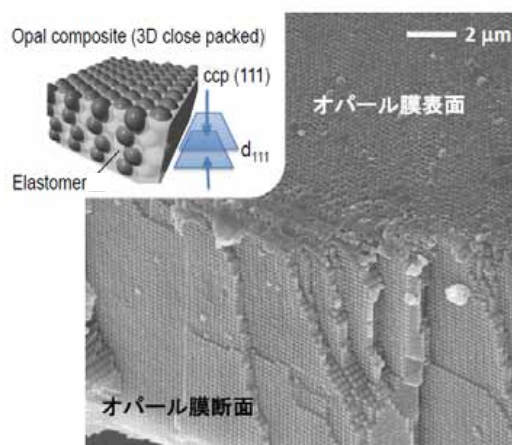


図4 オパール薄膜のポリスチレン粒子間をシリコンエラストマーで充填した微構造の電子顕微鏡写真と模式図(ccp(111)面配向)

易型の検査法としての応用も期待される。

4.3 応力変形による構造色変化

図6ではエラストマーの変形により面間隔を圧縮させる。オパールコンポジット材料の初期状態は赤色の構造色を呈している。この試験片を1軸方向に伸張するとボアソン比の関係から試験片の厚さ方向は圧縮する。この関係は水平方向に働く引っ張り応力と歪みの関係は

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = E(\Delta L / L_0)$$

ここではヤング弾性率 E 、初期長 L_0 、伸張量 $\Delta L = L - L_0$ である。また、ボアソン比 ν を使って

$$\varepsilon_z = -\nu(\sigma_x / E) = -\nu(\Delta L / L_0)$$

となるので厚み方向の歪み ε_z は縮小する。従って、イラストに示すよう粒子配列面の面間隔は d_1 から d_2 へと縮小することになる。ブラッグ回折ピークが630nmから580nmまで短波長方向へシフトし、構造色もそのシフト量に応じ赤色から黄色、緑色へと変色する。変形によって構造色が変わることが分かる。試験片を元の状態に戻す

と構造色も元の赤色へ回復する。構造色が応力変形に応じて変色する新材料であり、歪みや応力センサーへの応用を検討している。

5. オパールコロイド結晶の構成粒子と成膜プロセス

最後にオパールコロイド結晶についてその原料や作製プロセスの視点より考察してみる。まず、図4に示したオパール薄膜は単分散ポリスチレン製のコロイド粒子が基本構成要素である。図7にその合成プロセスを示す。主要な構成要素であるポリスチレン粒子は、基礎化学品の一つであるスチレンモノマーの重合により合成する。スチレンモノマーを純水（溶媒）中で攪拌しながら微量のラジカル重合開始剤（この実験では水溶性アゾ系試薬を使用）を添加し、ソープフリー乳化重合反応による1ステップで合成する。ここではポリスチレン粒子合成は加熱温度70℃の窒素ガス雰囲気中で数時間経過すると、写真Aのように乳白色のコロイドサスペンションが生成する。溶媒は水系でかつ合成

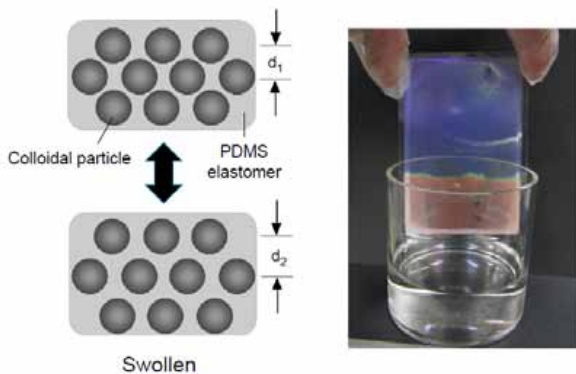


図5 膨潤による構造色変化、シリコンエラストマーが溶媒を吸収することで配列周期が拡大 ($d_1 \rightarrow d_2$)

文献8のFig.6より転載、© 2011 National Institute for Materials Research and IOP Publishing Ltd.

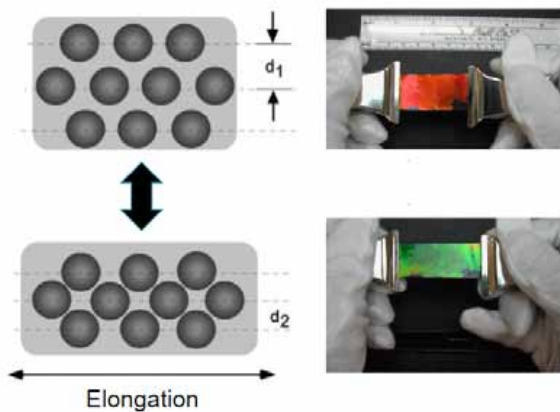


図6 応力による構造色変化、シリコンエラストマーが伸びること垂直方向の配列周期が縮小 ($d_1 \rightarrow d_2$)

文献8のFig.7より転載、© 2011 National Institute for Materials Research and IOP Publishing Ltd.



図7 ソープフリー乳化重合によるコロイド粒子の調整：
スチレンモノマーが純水中にてラジカル重合反応
A：ポリスチレン懸濁液（90% 以上の高い収率）
B：高い単分散性（粒子径：232nm）

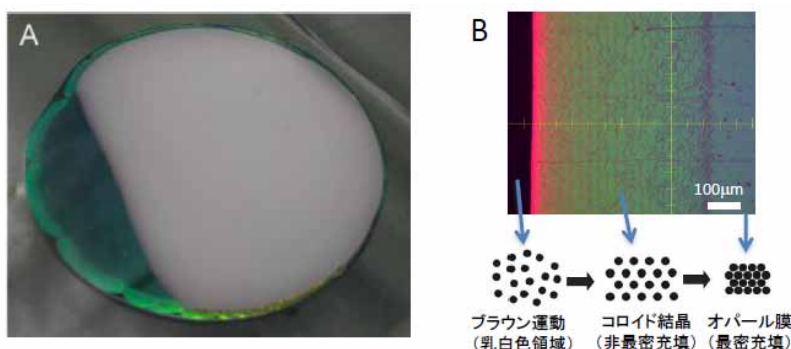


図8 オイル被覆法による人工オパール薄膜の結晶成長
A：シリコンウエハ上への成膜
B：界面付近の顕微鏡観察

に必要な加熱温度も比較的小さい。また、写真Bに示すように、単分散性が極めて高く、かつ、合成収率も90%以上と歩留まりが高い（廃棄ロスが低い）ことがこの合成プロセスの特長の一つである。なお、ポリスチレン粒子の粒径（写真Bでは ϕ 232nm）は合成温度及びモノマー濃度で制御可能である。粒子径が揃っている原因はラジカル重合の初期段階の核生成とその後の粒成長が最適な条件になっているためである。比較的少ないエネルギー消費で低コストの工業原料であるスチレンモノマーから、純水中で合成できるため環境負荷の少ない合成プロセスであると言える。

コロイドサスペンションに分散したコロイド粒子を適切な条件で蒸発させると、自己集積現象によりオパールコロイド結晶を形成することができる。このような成膜プロセスは、3次元規則構造を形成するボトムアップ型のナノテクノロジーの一つと言える。成膜方法は数多く提案されているが、ここでは著者の開発した成膜法を図8に示す[12]。図8写真Aは3インチのシリコンウエハ上で202nmのポリスチレン粒子が成膜している途中である。親水処理した

基板表面をコロイドサスペンション（乳白色）で被覆し、さらにその上面をシリコンオイルでカバーする。このシリコンオイル層が、サスペンションからの水の蒸発をコントロールする。図8の写真Aの左部分は緑色に変色しており、この部分はオパールコロイド結晶が形成している領域である。乳白色と緑色の界面付近を顕微鏡で観察したのが図8写真Bで、顕微分光スペクトルの解析を踏まえ、写真下部に示すような過程を経由して結晶化が進行していると考えている。すなわち、ブラウン運動でランダム運動しているコロイド粒子が界面にて非最密型のコロイド結晶を形成し、さらに粒子間隔が縮小し最終的に最密充填することでオパール膜を形成する。このように室温にて自己集積現象を利用した成膜プロセスなので、少ないエネルギー消費で簡単に3次元規則構造を形成できるため、環境負荷の小さい作製プロセスと言える。

6. おわりに

生物の構造色は古くより物理学者や生物学者の知的探求心

を魅了し、学理的な視点から研究が進められてきた。また、最近の研究の新潮流として生物の構造色の仕組みから、新規光学材料の設計へ反映させる生体模倣材料の研究も盛んになってきている [13]。本稿では構造色の変化に焦点を絞って、構造色に変化する生物とそれにヒントを得た構造色に変化する新材料として著者らの人工オパール薄膜の研究例を紹介した。また、この人工オパールは低コストの工業素材を用い、室温に近いマイルドな条件で自己集積現象によって3次元規則構造が形成できる。生物の構造色の発色の仕組みと比べ、単純であるものの新しい発色原理に基づくスマート材料あるいはインテリジェント材料と呼べる新材料を設計することができた。生物の多種多様で複雑な構造の足下にも及んでいないが、その仕組みを理解することは非常に重要であると考えている。

References :

- [1] S. Kinoshita and S. Yoshioka (eds.) "Structural Colors in Biological Systems: Principles and Applications" Osaka University Press (2005); Serge Berthier "Iridescences: The Physical Colors of Insects" Springer-Verlag (2006); 木下修一「生物ナノフォトンクスー構造色入門」朝倉書店 (2010)
- [2] M. F. Land, J. Exp. Biol., 45, 433 (1966).
- [3] R. Fujii and M. Oshima, Zool. Sci., 2, 885 (1985).
- [4] S. Yoshioka, B. Matsuhana, S. Tanaka, Y. Inouye Y. N. Oshima and S. Kinoshita, J. R. Soc. Interface, 8, 56 (2011).
- [5] V. Welch, J. P. Vigneron, V. Lousse and A. Parker, Phys. Rev. E, 73 041916(2006).
- [6] A. R. Tao, D. G. DeMartini, M. Izumi, A. M. Sweeney, A. L. Holt A and D. E. Morse, Biomaterials, 31, 793 (2010).
- [7] L. P. Biro and J. P. Vigneron, Laser Photonics Rev., 5, 27(2010).
- [8] H. Fudouzi, Sci. Technol. Adv. Mater., 12, 064704 (2011); Open Journal doi:10.1088/1468-6996/12/6/064704
- [9] J. J. Walsh, Y. Kang, R. A. Mickiewicz and E. L. Thomas, Adv. Mater., 21, 3078(2009).
- [10] M. Kolle, "Photonic Structures Inspired by Nature" Springer, Berlin (2001).
- [11] H. Fudouzi, Adv. Powder Technol., 20, 502(2009).
- [12] H. Fudouzi, J. Colloid Interface Sci., 275, 277(2004).
- [13] L. P. Lee and R. Szema, Science, 310, 1148(2005); C. Sanchez, H. Arribart and M. M. G. Guille, Nat. Mater., 4, 277(2005); A. R. Parker, Phil. Trans. R. Soc. A, 367, 1759(2009); O. Sato, S. Kubo and Z. Z. Gu, Acc. Chem. Res., 42, 1(2009); J. Wang, Y. Zhang, S. Wang, Y. Song and

(5) 国内外研究動向紹介

B01-1班：産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 大園 拓哉

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

開催場所：クラウンプラザホテル沖縄ハーバービュー

日時：2013 年 7 月 1 日～2 日

外気は気温摂氏 30 度超、高湿度に対して、7/1 からの全国的節電要請が唯一出ていない沖縄のためか、冷房がかなり効いた会場での開催となった。8:30 より、午前は各班 25 分程度、午後は公募班から核 15 分程度、その後、合同講演会として、(1) 北海道大学 長谷山美紀先生、(2) 海洋研究開発機構 白山義久理事 (3) 美ら海水族館 佐藤圭一先生からの先生のお話を聴講した。その内容について掻い摘んで紹介したい。

冒頭、領域代表から 1 年目評価コメントについての領域としての対応に言及された。総花的な研究のまとめ、産学連携推進について、C 班の重要性の主張など、3 つについてポイントに言及があった。以下講演順にコメントする。

阿多氏、C 班の取組：バイオトリツの活用方法についての説明やテクノロジーガバナンスの実践（国際標準化はナノテクより、テクノロジーハイプ挙動において速いタイミングで進んでいる、PEN による 2 次情報発信とサイエンスコミュニケーション活動）についての説明があった。関谷氏：国際標準化についての進捗と今後について詳細な状況報告があった。ドイツの認証ビジネス（検査協会）の推進の動き、韓国の表面微細構造濡れ性評価の WG の立ち上げの動きなどの報告があった。下村代表のコメントとして、当日の NHK クローズアップ現代（評価委員の赤池学氏出演）へ取り上げられる報道の盛り上がりや、政府の成長戦略における標準化の重要性に言及があった。

劉先生、B-5 班の取組：シミュレーターによる可変構造体の飛行安定性に及ぼす影響を調べた結果など説明、弾性可変飛行体が何故よいのかへの機構の観点からの質問もあり活発な議論が行われた。木戸秋先生：細胞のメカノタクシスとその制御についての成果（エレクトロスピニングによる光架橋高分子を用いた 3D での細胞運動制御への拡張等）を説明された。下村代表のコメントとして、領域一般に班内、班間の連携への意識向上を目指すべきという点があった。

森先生、B-4 班の取組：蛾の性フェロモンの導入説明から、特定のフェロモンの組み合わせ（ブレンド）による応答性、認識性の研究について言及された。また、寄生ハエの音響応答性について、ネムリユスリカ研究における研究進展の説明。室蘭工大（岩佐先生代理、埴田（タダ）氏）電子鼻センサー＝匂い分別センサーを FET 集積および SAW センサ

ーで構成に向けた匂い感受タンパクの調査研究を説明。下村代表のコメント、化学センサについてのセンシングの受容体レベルでの（脳機能よりも原始的なレベル）一般的なアルゴリズムは存在するのか、あればそこから設計が可能なのではないか？との一般性への発展性に関する質問などあり活発なやりとりがなされた。

細田先生、B-3 班の取組：バイオミメティクスか否か、を意識すべきとの指摘や、“バイオロジープッシュとテクニカルプル”どちらも生物と工学の組み合わせが重要であることなどに言及された。また個別研究成果として昆虫の足の接触関連の成果を中心に説明があった。重藤先生：大気圧低温混載接合に関する詳細な説明があった。

針山先生、B-2 班の取組：玉虫の構造の生理学的研究や、人工系の構築について言及された。吉岡先生：シジミ蝶の翅の選択反射の実験とモデルについての研究について説明があった。

大園、B-1 班の取組：可変微細構造とトライボロジーに関する取組と成果を説明。室崎先生：フジツボ付着界面、ハニカム構造ピラー構造の影響等の研究の説明し、活発な質疑応答がなされた。

野村先生、A-1 班の取組：生物からのデータを収集提供を目的。昆虫、鳥類、魚類からデータの提出から、データベースの構築まで概説された。また個別成果としてカブトムシの角の断面図やマンボウの体表の微細構造などは特に新規に分かった構造がみられることに触れた。SEM 以外にも有用な画像データの収集に努めることにも言及された。山崎先生：山科鳥類研究所のコレクションからの鳥類体色の電子顕微鏡撮影、反射スペクトルのデータ収集などからトキの化粧行動についての報告があった。頭部から黒い分泌物を出して羽毛に色を付ける非常に珍しい着色方法である点や、凹凸溝構造とそこへの黒色物質がトラップの影響について触れた。我孫子市鳥の博物館でのアウトリーチ活動の広告にも触れた。下澤先生から、一般的なメッセージを工学側に伝えるために、データを収集する際に機能を意識した収集方法を工夫するとデータの価値が上がるのではとのコメントがあった。

公募班：有村先生：バイオミメティクス・データベースのオープンイノベーションプラットフォームへの展開と題して、それに必要な具体的情報、機能、運営手法について概説された。

公募班：浅川先生：生体におけるノイズの利用を模倣し、エネルギー効率を高めた素子を狙う。電気回路や計算では確立共鳴素子はできているが、それを材料そのもので実装することを狙うことに言及。P3HT という有機分子を用いて、その構造（相転移）のゆらぎを利用することに言及された。薄いエネルギーを効率よく利用する 1 つの方法としての可能性に言及した。

公募班：田中先生：変形に着目した翼の設計と効果を調査する研究について説明があった。シワ構造を利用したプロセス技術と、評価の計画について紹介した。

公募班：植木先生：ホヤ類による各種金属の濃縮能についての研究、特にバナジウムの濃縮還元機構（分子機構、遺伝子機構）、腸内細菌、接着機構—防止機構（公募研究内容）。研究方針の説明。幼生の付着挙動の解明（フジツボとの関連性、差異にも言及）などへも言及された。

公募班：山口先生：ヤモリ模擬構造の研究について、特にヤモリのひげ状構造（ピラー）構造の曲り梁構造の重要性について指摘され、材料変形に着目した摩擦制御表面の研究計画に言及した。

公募班：カートハウス先生：花粉のバイオミメティクスの研究についての公募研究提案の紹介があった。表面構造を持つ機能微粒子の合成を狙い、花粉の生成機構の紹介とそこからの学びについて言及された。ウイーン植物園のデータベースについても言及した。

公募班、藤井先生：微粒子由来凹凸構造、リキッドマーズの研究の紹介。低環境負荷型のキャリア媒体としての可能性に言及された。

公募班：出口先生：材料科学からのアプローチ、バイオクレプティクス（バイオ由来の酵素を持ってきて使う）、深海微生物が持っているセルロース分解機構解明（マリンスノウとして深海に沈殿した結晶性のセルロースを分解して生活）、地上との差異は何かなどの問題意識について研究計画に言及された。

評価委員：藤崎先生からの講評とコメント：究極目標は生物の技術体系の構築を通じて持続性社会を実現することにどう答えていけるのかを意識すべきである、社会にアピールする目玉研究を領域から選択すべき、工学と生物学者の相利共生関係の構築。ダウンサイジングによるエネルギー消費抑制への意識の重要性、を指摘された。

合同講演会（１）北海道大学 長谷山美紀先生：ISO/TC266 Biomimetics 第１回総会日本国内審議会における発表概要についての説明があった。WG４の立ち上がりの経緯についても説明した。望む情報に到達するためのDB検索システムについて実際の検索操作を示して紹介下さった。それに対して、画像検索を利用した関連情報への到達手法を解決法として紹介された。

合同講演会（２）海洋研究開発機構 白山義久理事：生物規範工学と海洋生物学、JAMSTECの紹介があった。また線虫（Nematoda）の多様性に代表されるように、フィールドワークで採集されるのは新種の場合のほうが多いぐらいという指摘があり興味深い。また例えば、音響的な効果は海では重要であるが、その観点から工学につながらないかなどの問題提起のご指摘も頂いた。線虫とゴカイの運動なども同様に興味深いことに言及された。海洋酸性化による多様性の減少への危惧。サンゴへの影響、例えば構造維持のた

めの力学などは工学、理学の知識が必要かというコメントも印象深かった。

合同講演会（３）美ら海水族館 佐藤圭一先生：サメ類の多様性について紹介いただいた。５３３種あることや、大きく分けて２グループであることなど、また非常に多様な形、大きさ、性質の写真をオーバービュー頂いた。プランクトンを捕食するもの、ここ１０年で１００種新種が発見されていたり、深海で光るものもいることを教えていただいた。またサメは２５％が肝臓であり、油分により浮力を調整するためと説明されていた。サメは軟骨魚類であり、すべての骨が軟骨でできていることも強調されていた。特に、ご研究内容である、サメの繁殖について興味深い内容紹介を頂いた（交尾の方法、卵生、胎生、両方あるなど、また、胎盤のあるサメもいる（かなり珍しい）ことなど）。また水族館のジンベイザメ１８年でやっと成熟し、これから繁殖行動について調査していくことにも言及されていた。

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

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

7月1日に開催された科学研究費「生物規範工学」全体会議・海洋研究開発機構合同講演会に引き続き、2日には名護市にある国際海洋環境情報センター（GODAC）と美ら海水族館総合研究センターの見学会に、晴天に恵まれた中、汗をかきつつ33名が参加した。

まずは那覇市内を抜け、高速道路をって一路名護市の国際海洋環境情報センター（GODAC）を目指した。バスからは本州とは違う植生の沖縄の自然を見ることができ、前日の懇親会の疲れも感じることも無く快適に1時間程度の旅程を過ごした。GODACに到着後は海洋研究開発機構(JAMSTEC)の鈴木様からご挨拶を頂き、その後萩堂様より施設の概要と、JAMSTECが運営しているデータベースについてご紹介頂いた。その中でもJ-EDIというデータベースは、これまでの深海探索で得られた膨大な情報や動画を公開しており、これまで知らなかったことがもったいないと言わざるを得ない、非常に有用なデータベースが有ることを知ることができた。そして実際にデータベースへ入力する様子もご説明頂き、その後は館内の展示を自由に見学した。館内には深海調査に関するデータや調査船の模型などもあり非常に興味深い展示であった。

GODAC 見学会の後は、美ら海水族館へと向かった。その途次、昼食は本部町にあるハワイ食堂と言う食事どころで、事前に注文をしておいた沖縄名物の料理を堪能させて頂いた。ハワイ食堂の窓からはきれいな海を眺めることができ、食事後にバス出発まで若干の余裕があったので、食堂の裏手に広がる美しい海に行き、その景色を眺めることが出来た。(今回は天候に恵まれた出張でしたが、残念ながら私が海に近づけたのはこの間の5分程度でした)

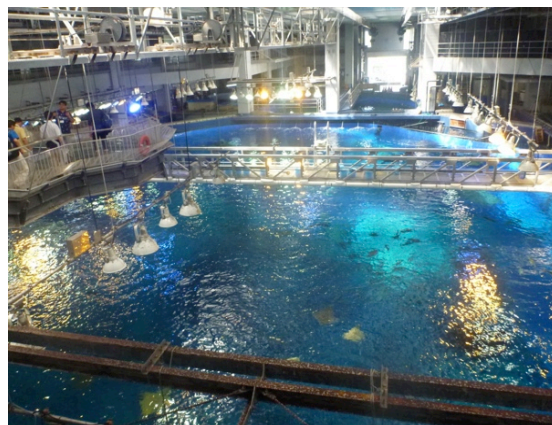


晴天に恵まれた中、バスに乗り込む様子(左図)、GODACでの萩堂様のご紹介の様子(右図)

美ら海水族館ではまずは水族館内の見学を行った。圧巻だったのはやはり大水槽における、ジンベイザメやマンタを始めとする様々な魚が回遊している様子であった。その他にも実際にヒトデやナマコに触れたり、大きくてカラフルな伊勢エビが多数生息している水槽があったり、色々な種類のサメ肌を実際に触れたり、興味深い展示の数々であった。ざっと水族館内を見学した後は、美ら海水族館の佐藤様に大水槽のバックヤードに連れて行って頂き、ジンベイザメとマンタの食事方法の違い(吸い込む&流れ込む)などの説明を受けるとともに、実際にその様子を観察させて頂いた。また美ら海水族館の水は水族館としては世界一きれいだということをお聞きした。それは美ら海水族館では沖合の海水を常時取り込み濾過して使用しているからだそうで、近隣の海できれいな海水が大量に得られる沖縄だからこそその理由であった。美ら海水族館が多くの人を引きつける理由として、様々な魚がいるだけでなく普段はあまり気がつかないところにも他の水族館とは大きく違う魅力が隠れていることを実感することができた。

そして水族館見学後はバスで那覇市のホテルまで戻ったのだが、参加者は県外からの参加者が主であり、バスでの長距離移動や興味深い施設見学、慣れない沖縄の高温多湿に疲れきり、ほとんどの方が眠りにつかれての帰路でした。その後は急遽、JAMSTEC の鈴木様を迎えての懇親会が開かれ、沖縄最後の夜を堪能させて頂きました。

また、個人的に佐藤様には B01-1 班で研究を進めているサメ肌についての研究を行うために、サメ肌サンプルの提供をお願いし、快諾して頂けるなど実り多い見学会となった。



ハワイ食堂からの眺め(左図)と大水槽バックヤードでの餌やりの見学(右図)

産学連携グループ：産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 ナノテクノロジー戦略室 関谷 瑞木

「第 58 回高分子夏季大学 –未来を拓く高分子–」に参加して

2013 年 7 月 17 日水曜日から 19 日金曜日の 3 日間にわたって、(公社) 高分子学会主催の第 58 回高分子夏季大学が、広島県広島市内にある広島国際会議場を会場に行われた。2013 年の夏季大学のテーマは「未来を拓く高分子」で、筆者は最終日 19 日に開催されたバイオミメティクス分科会でバイオミメティクス国際標準化に関する最新動向を報告する機会を得た。

夏季大学 2 日目の 18 日の夜、夏季大学の講師を囲む会が行われた。広い会場には大きな円卓が分科会ごとに配置され、各テーブルの周りを飲み物片手に講師と参加者が囲むカジュアルな会である。バイオミメティクス分科会のテーブルの周りは、学生、大学院生、若手研究者によって隙間なく埋められており、会場への到着が遅れた筆者は場所を確保するのが難しいほどであった。1 時間ほどの会では、どのような研究がバイオミメティクスの研究といえるのか、どのような応用が考えられるのか、メディアのなかのバイオミメティクスなど、議論が盛り上がった。

19 日のバイオミメティクス分科会講演は、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」(生物規範工学) 領域代表の下村政嗣氏の問題提起「今なぜ、生物模倣(バイオミメティクス) なのか?」を皮切りに計 5 名の講師が話題を提供した。筆者は「バイオミメティクス研究開発の国際動向」とのタイトルで、昨年 10 月から国際標準化機関(ISO) で議論が始まったバイオミメティクスの国際標準化活動、ISO/TC266 Biomimetics の現在の進捗、今後の議論の行方などを紹介し、各国のバイオミメティクスの研究開発動向について簡潔に報告した。日本工業標準調査会(JISC) のバイオミメティクスの国内審議委員会は、高分子学会のなかに昨年発足したバイオミメティクス研究会がその役割を担い、高分子学会が国内審議委員会の事務局を引き受けている。

日頃研究に没頭されておられる皆さんは、バイオミメティクスの国際標準化活動は自分の研究からずいぶんと距離があるように感じておられるのではないかと思います。しかし、今 ISO/TC266 で進められている産業化のためのルール作りの議論は、近い将来の研究開発、さらにはその先の産業化の行方を左右するということを認識していただけたらと思う。バイオミメティクスの国際標準化は、研究開発の本格化とほぼ時期を同じく始まり、バイオミメティクスへの将来インパクトへの期待や関心の高まりと共に注目されるようになってきた。このような状況のなかで、昨年来日本がバイオミメティクスの国際標準化活動に関し

て、事前に提案国であるドイツと議論を重ね、ISO/TC266 第 1 回総会の後は日本提案をワーキングアイテムにするために参加国の標準化機関との折衝を進めるなど、積極的に国際標準化に対応してきたことを紹介した。

下村氏は分科会の口火を切る講演で、バイオメティクスを、「様々な分野の融合によって全く新しい学問を創出しようとする試み」と表現した。このような新興の科学技術には様々な不確実性がつきものであり、しかもその不確実性を克服するためのツールに欠けている。この不足を埋めるものがテクノロジーガバナンスであり、ISO/TC266 への積極的な取組みはその一環である。バイオメティクスの国際標準化活動では、ナノテクノロジーの国際標準化の取り組みを様々な点で参考としている。ナノテクノロジーは、バイオメティクス同様に学際として展開してきた新興の科学技術であり、その研究開発の道のは、新興の科学ならではの科学的な不確実性を乗り越え、社会との合意を形成しようとしているバイオメティクスの研究開発にとって、多くの教訓を示している。今後もこのような視点で、バイオメティクスの研究開発とその産業化を支援していこうと考えている。

第 58 回高分子夏季大学の会場となった広島国際会議場は、広島市内を流れる太田川の中州にある平和記念公園に位置している。今夏の容赦ない暑さが作り出す陽炎の向こうに原爆ドーム揺らいでいるのを多くの参加者が見たことと思う。より良い未来を科学技術によって切り拓いてゆくために今何をすべきか、を全国から集まった参加者と議論するのに相応しい場であったと思う。

(6) 新聞・報道

【新聞・報道】

総括班

(1) NHK・クローズアップ現代（2013年7月1日）

『生物に学ぶイノベーション ～生物模倣技術の挑戦～』

軽く、かたい「アワビの貝殻」の構造をまねした新素材でつくる宇宙船、炭素繊維より軽く、強く、しなやかな「クモの糸」でつくる自動車のボディー、壁や天井を自在に移動する「ヤモリの足」の仕組みを取り入れた強力な粘着テープ。いま、厳しい生存競争の中で生物が進化させてきた機能を模倣する「バイオミメティクス（生物模倣技術）」により、革新的な技術が次々と生まれようとしている。電子顕微鏡やナノテクノロジーの進化により、生物の「神秘のメカニズム」を分子レベルで解明、再現できるようになってきたのだ。次世代技術として期待される一方で、日本では昆虫学や動物学の研究者と工学系の技術者との連携が弱く、製品化の動きは欧米に大きく遅れを取っているのが現状だ。“生物のパワー”をどう技術開発に生かし、イノベーションにつなげていくのか。加速する企業や大学での研究の最前線を追い、可能性と課題を探る。

(2) 日刊工業新聞（2013年8月14日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の一回目では、“生物模倣技術に究極のエコ探る”という見出しで、石田秀輝先生（総括班、C01班）が主催した沖永良部島シンポの紹介、エコジレンマとネイチャーテクノロジーの重要性、領域代表による「生物規範工学」の紹介が掲載されました。

(3) 日刊工業新聞（2013年9月4日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の四回目では、“ナノテク進展 走る欧米”という見出しで、平坂雅男氏（総括班）の海外動向調査報告と、日本が周回遅れにある状況について領域代表のコメントが紹介されています。

(4) 日刊工業新聞（2013年9月11日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の5回目では、“5題話 染料なしで 鮮やかな色”という見出しで、平坂雅男氏（総括班）による帝人モルフォテックス、魚津吉弘氏（総括班）による三菱レイヨン モスアイフィルム、の紹介がされました。

(5) 日刊工業新聞 (2013 年 9 月 11 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 5 回目では、”5 題話 染料なしで 鮮やかな色”という見出しで、平坂雅男氏（総括班）による帝人モルフォテックス、魚津吉弘氏（総括班）による三菱レイヨン モスアイフィルム、の紹介がされました。

(6) 日刊工業新聞 (2013 年 9 月 25 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 7 回目では、”生物規範工学への道（上） 構造解明 飛躍的進歩”という見出しで、科博の野村周平先生（A01 班）による昆虫の顕微鏡観察の最新動向、北大の長谷山美紀先生（A01 班）が開発した画像検索エンジン、浜松医科大学の針山孝彦先生（B01-2 班）が開発したナノスーツ法の紹介がなされ、研究代表のコメントが掲載されました。

(7) 内外情報調査会 会報誌 J2TOP 10 月号 (2013 年 10 月 1 日)

科学技術ジャーナリストの山田久美さんの特集記事、”生物に学べ、なぜ今、「バイオミメティクス」なのか”において、生物規範工学プロジェクトがスタートしたこと、三菱レイヨンのモスアイフィルム、帝人の構造色フィルムなどが紹介され、長谷山先生と国立科学博物館（A01 班）の昆虫画像データベースにも言及されています。

A01 班

(1) JSTnews 8 月号 (2013 年 8 月 1 日)

「次世代バイオミメティクス最前線 進化する生物模倣の世界」と題して、「長い年月をかけて進化した生物の体には、生息環境に適応した優れた機能が備わっている。その優れた機能を活用することで、さまざまな工業製品が開発されるようになった。こうした手法は、バイオミメティクス（生物模倣技術）と呼ばれ、近年、スポーツ用品や建材、医療などの幅広い産業に利用され始めている。バイオミメティクス研究は、電子顕微鏡技術とともに幕を開けた。その電子顕微鏡の限界を乗り越える技術「ナノスーツ」の登場によって、「生きたままの観察」が可能になり、第2の幕が上がろうとしている。さらに生物の画像とその生態や機能を集積・共有し、研究を促進する動きもある。生物が何億年の歴史の中で獲得してきた独特の機能を学び、応用することで、省エネや安全、環境適合の持続可能な人類文明の創造に、弾みをつけようとしている。」が紹介されました。これらの成果は、領域代表者（下村政嗣教授）のJST戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)の一環として行われたものです。

(2) 日刊工業新聞 (2013 年 9 月 25 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 7 回目では、「生物規範工学への道 (上) 構造解明 飛躍的進歩」という見出しで、科博の野村周平先生 (A01 班) による昆虫の顕微鏡観察の最新動向、北大の長谷山美紀先生 (A01 班) が開発した画像検索エンジン、浜松医科大学の針山孝彦先生 (B01-2 班) が開発したナノスーツ法の紹介がなされ、研究代表のコメントが掲載されました。

B01-1 班

(1) 日本経済新聞 (2013 年 8 月 6 日)

『フジツボ付着防ぐ材料』東北大、塗料より割安に

B01-2 班

(1) Newton 第 33 巻 第 7 号 (2013 年 7 月 7 日)

「蒸発を防ぐ”防護服”生物を生きたまま電子顕微鏡で高解像度観察する手法が開発された」この研究は領域代表者 (下村政嗣教授) の JST 戦略的創造研究推進事業 (JST-CREST) の一環として行われたものです。

(2) NHK (2013 年 7 月 16 日)

NHKワールドTV科学技術情報番組「Science View」のサイエンスニュースウォッチで紹介。この研究は領域代表者 (下村政嗣教授) の JST 戦略的創造研究推進事業 (JST-CREST) の一環として行われたものです。

(3) JSTnews 8 月号 (2013 年 8 月 1 日)

「次世代バイオミメティクス最前線 進化する生物模倣の世界」と題して、「長い年月をかけて進化した生物の体には、生息環境に適応した優れた機能が備わっている。その優れた機能を活用することで、さまざまな工業製品が開発されるようになった。こうした手法は、バイオミメティクス (生物模倣技術) と呼ばれ、近年、スポーツ用品や建材、医療などの幅広い産業に利用され始めている。バイオミメティクス研究は、電子顕微鏡技術とともに幕を開けた。その電子顕微鏡の限界を乗り越える技術「ナノスーツ」の登場によって、「生きたままの観察」が可能になり、第 2 の幕が上がろうとしている。さらに生物の画像とその生態や機能を集積・共有し、研究を促進する動きもある。生物が何億年の歴史の中で獲得してきた独特の機能を学び、応用することで、省エネや安全、環境適合の持続可能な人類文明の創造に、弾みをつけようとしている。」が紹介されました。これらの成

果は、領域代表者（下村政嗣教授）の JST 戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)の一環として行われたものです。

(4) 日本経済新聞（2013 年 8 月 20 日）

『流出油回収に新材料 フナムシの脚まねる』この研究は領域代表者（下村政嗣教授）の JST戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)の一環として行われたものです。

(5) 日刊工業新聞（2013 年 9 月 25 日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の 7 回目では、「生物規範工学への道（上） 構造解明 飛躍的進歩」という見出しで、科博の野村周平先生（A01 班）による昆虫の顕微鏡観察の最新動向、北大の長谷山美紀先生（A01 班）が開発した画像検索エンジン、浜松医科大学の針山孝彦先生（B01-2 班）が開発したナノスーツ法の紹介がなされ、研究代表のコメントが掲載されました。

(6) Science Portal（2013 年 10 月 10 日）

バイオミメティクス・市民セミナー「発生遺伝学とバイオミメティクス」(2013 年 8 月 3 日、主催：北海道大学総合博物館、協賛：高分子学会バイオミメティクス研究会、高分子学会北海道支部)。

B01-3 班

(1) 日刊工業新聞（2013 年 9 月 11 日）

産業技術総合研究所の穂積篤先生（B01-3 班）と浦田千尋先生（B01-3 班）が開発した、耐熱性と透明性を兼ね備えた撥油性塗膜が紹介されました。WEB での記事は『産総研、有機フッ素化合物使わない高耐熱で透明な撥油性塗膜を開発』。

(2) 化学工業日報（2013 年 9 月 11 日）

産業技術総合研究所の穂積篤先生（B01-3 班）と浦田千尋先生（B01-3 班）が開発した、耐熱性と透明性に優れた撥油膜が紹介されました。WEB での記事は『産総研 高耐熱の透明撥油塗膜開発』。

(3) J-Net21（2013 年 9 月 11 日）

産業技術総合研究所の穂積篤先生（B01-3 班）と浦田千尋先生（B01-3 班）が開発した、耐熱性に優れた透明撥油性皮膜が紹介されました。

(4) Yahoo! ニュース (2013 年 9 月 11 日)

産業技術総合研究所の穂積篤先生 (B01-3 班) と浦田千尋先生 (B01-3 班) が開発した、耐熱性に優れた透明撥油性皮膜が紹介されました。

(5) 日経産業新聞 (2013 年 9 月 12 日)

産業技術総合研究所の穂積篤先生 (B01-3 班) と浦田千尋先生 (B01-3 班) が開発した、耐熱性に優れた透明撥油性皮膜が紹介されました。WEB での記事は『産総研、有機フッ素化合物を用いずに耐熱性に優れた透明はつ油性塗膜を開発』。

(6) 日経バイオテク ONLINE (2013 年 9 月 12 日)

産業技術総合研究所の穂積篤先生 (B01-3 班) と浦田千尋先生 (B01-3 班) が開発した、耐熱性に優れた透明撥油性皮膜が紹介されました。

(7) マイナビニュース (2013 年 9 月 12 日)

産業技術総合研究所の穂積篤先生 (B01-3 班) と浦田千尋先生 (B01-3 班) が開発した、耐熱性に優れた透明撥油性皮膜が紹介されました。

(8) 日刊工業新聞 (2013 年 9 月 18 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 6 回目では、「日本の生物模倣 多機能性 新素材に応用」という見出しで、穂積篤先生 (B01-3 班) による防錆機能を有する自己治癒性薄膜の研究成果が紹介されました。

(9) 朝日新聞 (2013 年 9 月 19 日)

産業技術総合研究所の穂積篤先生と浦田千尋先生 (B01-3 班) が開発した、耐熱性と透明性を兼ね備えた非フッ素系撥油性塗膜が紹介されました。

(10) 日刊工業新聞 (2013 年 10 月 9 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 9 回目では、「動き出す ISO 産業化見据え駆け引き」という見出しで、ドイツが議長国になって提案された Biomimetics ISO TC266 の現状について紹介されました。国際標準化委員会においては、我が国からは、細田奈麻絵先生 (総括班、B01-3 班) が WG2 のプロジェクトリーダー、JST の恒松直幸氏が WG4 のコーディネーターに就任しています。記事では、阿多誠文先生 (C01 班) と領域代表のコメントが掲載されました。また、「生物規範工学」からは多くのメンバーが、高分子学会バイオミメ

ティクス研究会に設置された国内審議委員会の委員に就任し、産業界、学協会との強力な連携のもとで国際標準の議論をすすめています。

(11) 日経産業新聞（2013 年 10 月 11 日）

『虫などの構造に注目 省エネ製品開発に応用』という見出しで、細田先生、石井先生の研究が紹介されました。この記事では、国際標準化の動向についても言及されています。

C01 班

(1) 日刊工業新聞（2013 年 7 月 1 日）

石田秀輝先生（C01 班）がコーディネーターを務めるモノづくり日本会議：ネイチャー・テクノロジー研究会が募集した『2030年の「心豊かなライフスタイル」コンテスト』の入賞作品が紹介されました。

(2) 日刊工業新聞（2013 年 8 月 14 日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の一回目では、『生物模倣技術に究極のエコ探る』という見出しで、石田秀輝先生（総括班、C01 班）が主催した沖永良部島シンポの紹介、エコジレンマとネイチャーテクノロジーの重要性、領域代表による「生物規範工学」の紹介が掲載されました。

(3) 日刊工業新聞（2013 年 8 月 21 日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の二回目では、『暮らし方の描き方 理想の未来像から逆算』という見出しで、石田秀輝先生、古川柳蔵先生（C01 班）のバックキャストिंगによるライフスタイルデザインについて紹介されています。

(4) 日刊工業新聞（2013 年 8 月 28 日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の三回目では、「不便な昔に豊かさ探る」という見出しで、古川柳蔵先生（C01 班）の90歳ヒアリングについて紹介されています。

(5) 日刊工業新聞（2013 年 10 月 2 日）

「自然に学ぶモノづくり」連載の8回目では、『生物規範工学への道（下）持続可能な技術体系に』という見出しで、劉浩先生（B01-5 班）が開発した『羽ばたき飛行ロボット』の紹介がなされ、生物模倣の歴史と現代的な意義について、石田秀輝先生（総括班）と研究代表のコメントが掲載されました。

(7) アウトリーチ活動

【アウトリーチ活動報告】

(1) NHK ラジオ深夜便「昆虫から学べ、人間社会の未来」

2013年6月4日放送のNHK ラジオ深夜便の『明日へのことば』において、総括班評価グループの藤崎憲治先生が「昆虫から学べ、人間社会の未来」について紹介されました。

(2) 「千葉市科学館企画展：生きものへのまなざし～生物の美と科学に迫る～」

不動寺浩先生（B01-2班）が開発した構造色が変化するフォトニックラバーシートが、千葉市科学館にて開催された「生きものへのまなざし～生物の美と科学に迫る～」において、カワセミのイラスト（箕輪義隆氏作品）と並べて展示されました。期間中は見学者が実際にゴムシートを引き延ばして構造色が変化することを体験しました（2013年6月14日～6月23日）。

(3) NHK 総合「視点・論点」

2013年8月9日放映のNHK 総合「視点・論点」において「昆虫と振動」が取り上げられ、B01-4班の高梨琢磨先生が、昆虫（カブトムシ、カミキリムシ他）の振動情報と害虫防除について解説されます。

(4) 多根まきワークショップ「衣の文化」

2013年8月11日、福島市教育委員会主催の「多根まきワークショップ」において、古民家での糸とり体験とバイオミメティクスの講演会が開催され、下村領域代表（総括班）が講演をおこないました。

(5) NHK 総合「ダーウィンが来た！」

2013年8月25日放映のNHK 総合『ダーウィンが来た！』の『カブトムシ&クワガタ特集』で、B01-4班の高梨琢磨先生が、森林総研でのカブトムシの振動実験に出演されます。

(6) 大阪市立科学館・特別講演会「色の彩えんす」

2013年10月26日、大阪市立科学館において、一般向けの特別講演会『色の彩えんす』が行われます。B01-2班の針山孝彦先生が構造色について講演します。

(8) 各種案内

BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

木村 賢一 (北海道教育大学 教育学部 教授)

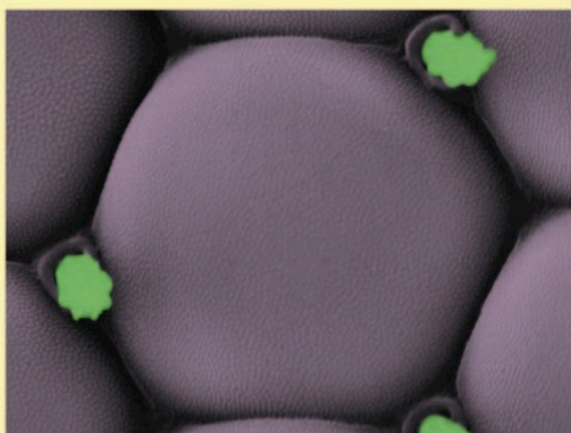
発生遺伝学と バイオミメティクス

2013年 8月 3日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分

生物は、複雑な構造や機能を低いエネルギーコストで見事なまでに作り上げてきました。生物がもつ機能や構造に加え、その形成過程も学び、作り方まで模倣するというのが、今後のバイオミメティクスのひとつの方向性ではないでしょうか。生物の複雑な形づくりのための“レシピ(手順書)”は、遺伝子の中に書かれています。遺伝子の突然変異などを利用し、形づくりの材料を変えたり、レシピの一部を変更したりすると、できあがってくる生物の形も変化します。その変化の過程を観察し、形づくりのレシピを明らかにしていこうというのが“発生遺伝学”です。本セミナーでは、昆虫の微細なクチクラ突起構造のつくりかたについて紹介したいと思います。



主催：北海道大学総合博物館
共催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高分子学会北海道支部

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

BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

篠原 現人 (国立科学博物館 動物研究部 研究主幹)

魚類学者から見た バイオミメティクス

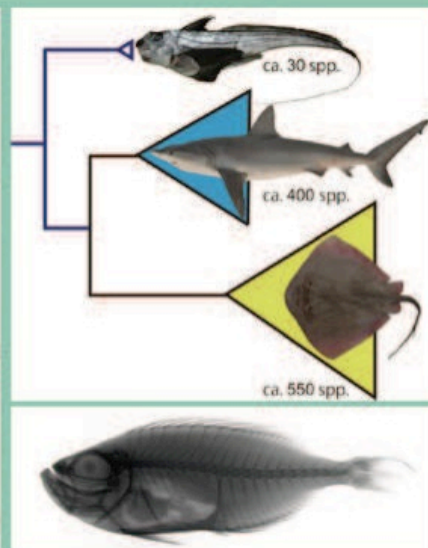
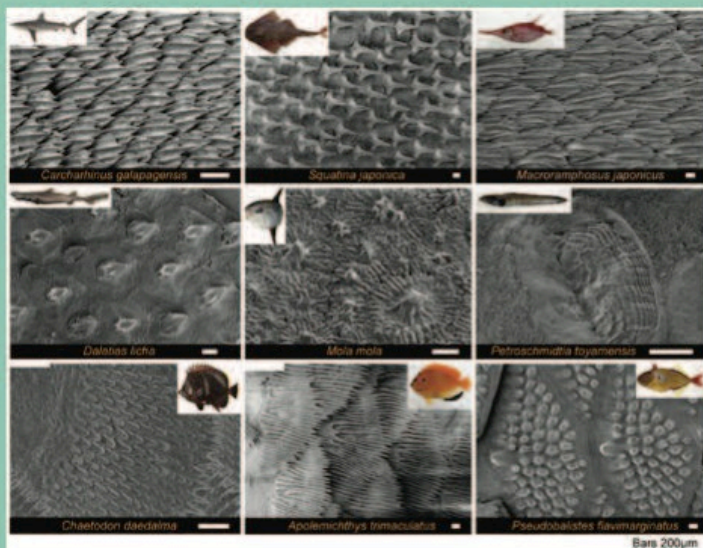
2013年9月7日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分



魚類に関する研究分野をひとまとめにして魚類学 (Ichthyology), その研究者を魚類学者 (Ichthyologists) と呼びます。魚類学の成果として、毎年 300 種前後の新種が発見されており、生物多様性の研究において目が離せない存在です。魚類学者たちは博物館や大学に保管されている膨大な量の魚類標本から分類学、系統学、生態学などに関するデータを日々集めています。魚類学とバイオミメティクスとの出会いにより、魚類標本やそれらのデータからは、生物学の枠を超えた新たな価値がみいだされることが期待されています。



主催：北海道大学総合博物館
共催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高分子学会北海道支部

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

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

野村 周平 (独立行政法人 国立科学博物館 動物研究部 主任研究員)

昆虫の SEM 写真から読み取る バイオミメティクス

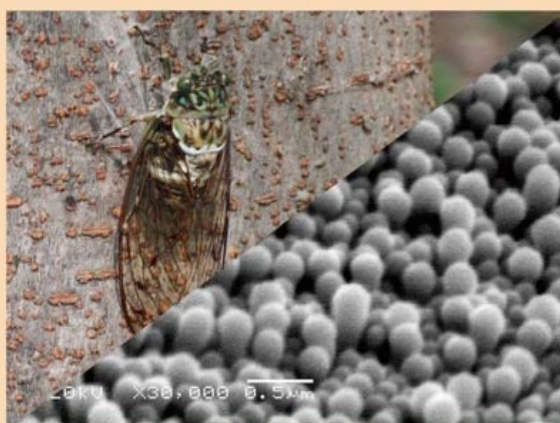


2013年10月5日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分

走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真は、資料の色を反映することができない白黒写真であるが、他の顕微鏡では不可能な高倍率、高解像度での生物の表面構造の観察が可能である。特に昆虫の形態情報が不足しがちな1ミクロン前後の微細表面構造とその機能について、SEM写真は非常に多くの情報を与えてくれる。私たちが知っているようで知らない、または知っているはずなのに忘れていた昆虫の微細構造の例を挙げ、筆者らが撮影したSEM写真を多く用いて解説する。



主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
協 賛：高分子学会 北海道支部

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

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

大園 拓哉

(産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門
ソフトメカニクス研究グループ 研究グループ長)

リンクル(しわ)とバイオミメティクス

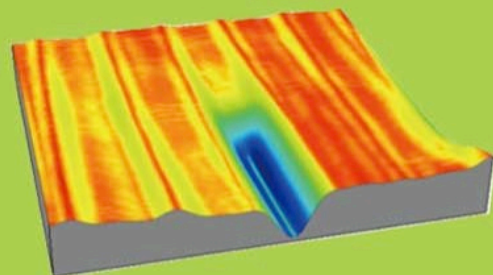
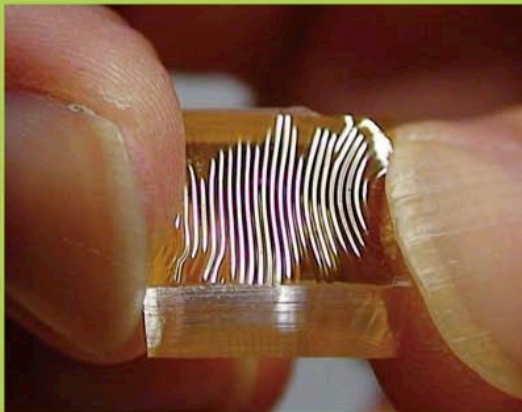
2013年11月2日(土)

会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分



多くの生物の表面には、様々なサイズの凹凸構造があり、生物と外界との間で、光などとの非接触的な相互作用や、液体や固体などの物質との直接的な相互作用がおこるとき、それぞれの生物や外界の環境に応じた機能があることが明らかになりつつあります。例えば、指紋の構造には手触りに重要な役割があるということです。ここではそのような凹凸構造の基本である波状構造に着目し、人工的に作られた「リンクル(しわ)」と生物がもつ類似構造の機能を比較しながら、その工学的応用の展開を紹介します。



主催：北海道大学総合博物館
共催：科学研究費新学術領域「生物規範工学」
協賛：高分子学会北海道支部

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

2nd Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS)

- 会期: 11月18日(月)10時00分～16時50分
会場: ウィンクあいち(愛知県産業労働センター) 中会議室 11階1101室
〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅4丁目4-38
交通: ・ JR名古屋駅桜通口からミッドランドスクエア方面 徒歩5分
・ ユニモール地下街 5番出口 徒歩2分。
詳細は、右記サイトをご参照ください。 → <http://www.winc-aichi.jp/access/>
主催: 独立行政法人 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門
名古屋工業大学 若手研究イノベータ養成センター ライフサイエンス部門
名古屋工業大学 環境調和セラミック材料研究会
文部科学省 科学技術研究費補助金(新学術領域)「生物規範工学」
協賛: 高分子学会 バイオミメティクス研究会

定員: 100名

参加費: 無料(研究交流会費:5000円)

エンジニアリングネオバイオミメティクスを指向した表面・界面に関する最先端の研究を展開している国内外の第一線の研究者を招き講演会を開催する。また、産学官をはじめ、異分野領域に所属する研究者、技術者の交流の場として広く開放する。

「生物多様性を規範とする革新的材料技術」ニュースレター Vol. 2 No. 2

発行日 2013年10月23日

発行責任者 下村政嗣（東北大学）

編集責任者 穂積 篤（独立行政法人 産業技術総合研究所）

制作 「生物規範工学」領域事務局

北海道大学電子科学研究所内

〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目

電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361

URL <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html>