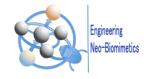
生物多様性を規範とする革新的材料技術

Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity



(4)2014年7月31-8月1日 新学術領域「生物規範工学」全体会議・ 合同研究会

所属班:B01-1班

所属機関:千歳科学技術大学

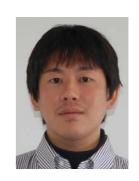
氏名:平井 悠司

所属機関住所:〒066-8655

北海道千歳市美々758-65

e-mail: y-hirai@photon.chitose.ac.jp

研究キーワード:サメ肌、自己組織化、摩擦、しわ、ディンプル



自己組織化を利用した耐久性階層構造の作製

Preparation of Durable 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。我々は特にサメ肌の階層構造(図1)に着目し、ポリジメチルシロキサン(PDMS)上にポ

リイミドの薄膜を接着剤で接着、その上に自己組織化を利用して作製されたピラー構造化膜を固定化ことで、サメ肌模做階層構造の作製を行ってきた。しかしながら一般的な高分子の微細構造は力学的に弱く、摩擦測定は困難であった。そこで、摩擦測定に耐えうる耐久性を有する自己組織化階層構造の作製を行ったので報告する。

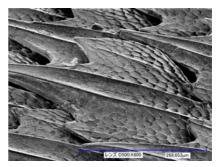


Figure 1. The photograph of a shark skin surface.

2. 耐久性サメ肌模倣表面の作製

耐久性を有するディンプル構造を作製するため、自己組織化を利用して作製されるハニカム状多孔質膜を鋳型に、PDMSでマイクロレンズアレイを作製した(1)。また、しわ構造の元となる PDMS とポリイミドの複合材料の作製を既報(2)の通りに行った。その後ポリイミド前駆体溶液を 500 rpm で 5秒、のち 1000 rpm で 10 秒、上記の PDMSポリイミドフィルム複合体上にスピンコートし、PDMS のマイクロレンズアレイを接

着、室温で 2 時間、80°Cで 30 分、180°Cで 30 分アニーリングすることでポリイミド 前駆体を熱架橋させ、ポリイミドフィルム上にポリイミドのディンプル構造を作製した。 構造作製後の表面はレーザ顕微鏡にて観察を行った。

3. 作製した階層構造の表面観察

図に作製したそれぞれの段階でのサンプル表面のレーザ顕微鏡像を示す。マイクロレンズアレイの鋳型として孔径約 15 µm の空孔を有する自己組織化ハニカム状多孔質膜を利用した(図 2(a))。ハニカム状多孔質膜を利用して作製された PDMS マイクロレンズアレイはハニカム状多孔質膜を形成する際鋳型となった水滴と同様の曲率を持つ周期的なレンズ状構造が観察された(図 2(b))。またマイクロレンズアレイを鋳型としてポリイミド上に構造転写された表面には、マイクロディンプル構造の形成が確認され、ポリイミドのマイクロディンプル構造の作製に成功した(図 2(c))。その後この構造表面を圧縮したところ、周期的なしわ構造が観察され、マイクロディンプル構造も破壊されることなく残っていたことから、耐久性を有する材料でマイクロディンプル構造と周期的なしわ構造を持つ階層構造表面の作製に成功した(図 2(d,e))。ポリイミドで作製されたディンプル構造は多少の力で表面を擦っても微細構造が破壊されなかったことから、今後は摩擦力を測定していく予定である。

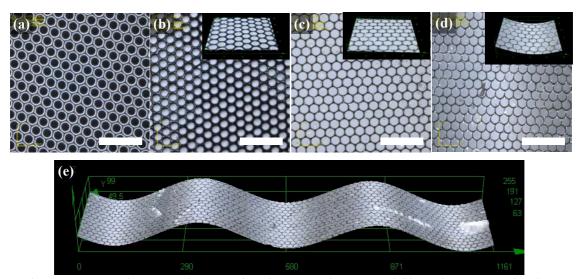


Figure 2. Laser microscope images of (a) honeycomb-patterned films, (b) PDMS microlens arrays, (c) before and (d,e) after compress the surfaces of hierarchical structures. (bars; 80 μm)

参考文献

- (1) 平井悠司、藪浩、海道昌孝、鈴木厚、下村政嗣, *高分子論文集*, **2013**, 70(5), 193-198
- (2) Kosuke Suzuki, Yuji Hirai, and Takuya Ohzono, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6(13), 10121–10131

所属班:B01-1

所属機関:工学院大学 工学部 応用化学科

氏名:小林 元康

所属機関住所:〒192-0015東京都八王子市中野町2665-1

e-mail: motokoba@cc.kogakuin.ac.jp

研究キーワード:高分子合成、表面改質、濡れ、接着、摩擦



カテコール化合物を利用した高分子材料の表面改質 Surface modification of polymeric matericals by cathecol derivatives

1. はじめに

イガイやムラサキガイなどの貝類は足糸の先端から接着タンパクを分泌し岩礁などに付着している。この接着タンパクを構成するアミノ酸に 3,4-ジヒドロキシフェニル-L-アラニン(DOPA)が含まれており、これが酸化ケイ素をはじめとする金属酸化物などキレートを形成するとともに、酸化カップリング反応を経て架橋することで強固な接着層を形成することが知られている。MessersmithやDemingらはこの分子と類似の構造を有するドーパミンを用いて様々な材料表面の改質することができることを報告している ²¹。本研究班では

ポリイミド薄膜やポリビニルアルコール(PVA)ゲルによる可変微細構造の形成を検討しているが、これら高分子材料表面の化学的改質が課題であった。そこで、本研究では高分子材料表面に強固に付着し表面特性を制御可能なドーパミン誘導体を合成し、さらに表面開始重合法と組み合わせることでポリマーブラシからなるナノ薄膜の調製を試みた。

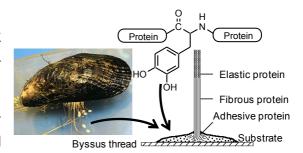


Figure 1. Byssus thread of mussel and adhesive protein containing 3,4-dihydroxyphenyl-*L*-alanine moiety¹⁾

2. 実験

Scheme 1 のようにドーパミン誘導体を合成し、0.5%水溶液を調製した。これに tris バッファーと NaOH を加えて pH = 8.5 に調製し、ポリイミド(カプ

トン)フィルムを室温 6 時間浸漬した。これを真空下 100 °C にて 3 時間乾燥させた。この薄膜を反応容器に入れ、 $CuBr_2$ 、2,2'-ビピリジル、メタクリル酸 3-スルホプロピルカリウム塩(SPMK)、 H_2O 、アルコルビン酸を順次加えて室温で 3 時間静置した。得られた薄膜を水およびエチレングリコールで洗浄し、大気中室温で乾燥させた。

Scheme 1. Surface modification of polyimide film by surface-grafting of super hydrophilic poly(SPMK) from surface-immobilized dopamine-containing alkylbromide.

3. 結果と考察

塩基性水溶液条件下においてドーパミン誘導体をフィルム表面に吸着させ、 架橋させることでポリイミドフィルム上に臭化アルキル基を固定化した。さら に表面開始原子移動ラジカル重合を行い poly(SPMK)を生長させた。膜厚、生 成ポリマーの分子量は未測定であるが、フィルムと同時に同様の反応処理を行 ったシリコン基板には膜厚 50-60 nm の poly(SPMK)ブラシが形成されている ことを確認している。

得られた基板の対水静的接触角を測定した(Figure 2)。未処理のフィルムの接触角は 52° であったが、poly(SPMK)をグラフトした後には 8° 以下まで低下し

表面が親水化したことが明らかである。また、同様の表面改質が PVA ゲル表面でも実行可能であることを確認した。poly(SPMK)をグラフトした表面は優れた濡れ性を示し³⁾、水中で極めて低い摩擦係数を示す⁴⁾ことが知られていることから、ポリイミドフィルム

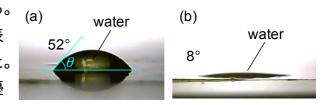


Figure 2. Water contact angle on Kapton® polyimide film (a) before (untreated film) and (b) after surface- grafting of poly(SPMK)

表面においても水潤滑が実現し低摩擦を示すことが期待される。

参考文献

- (1) Deming, T. J. Curr. Opin. Chem. Biol. 1999, 3, 100-105.
- (2) Fan, X.; Lin, L.; Messersmith, P. B. *Biomacromolecules* **2006**, *7*, 2443-2448.
- (3) Kobayashi, M.; Terayama, Y.; Yamaguchi, H.; Terada, M.; Murakami, D.; Ishihara, K.; Takahara, A. *Langmuir* **2012**, *28*, 7212-7222.
- (4) Kobayashi, M.; Terada, M.; Takahara, A. *RSC Faraday Discussions* **2012**, *156*, 403-412.

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:モスアイ効果、乱れた構造、頑強性、尺度

不干涉性、自己組織化



乱れた構造が創る頑強な機能について 一尺度不干渉性の観点から

Robustness of functions arising from an irregular structure - from the view point of noninterference among scales

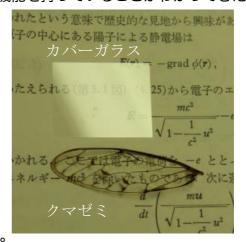
本稿は、吉岡伸也先生を中心に B01-2 班で進められている研究内容に基づくものであることを始めにお断りしておきます。

1. 乱れた構造と頑強性

生物はその体表表面にサブセルラーサイズの微細構造を様々にデザインし、多機能性を獲得している。例えば、モスアイが高いアスペクト比(表面構造の深さ)を持つ突起構造を規則的に配置することにより、高性能な反射防止効果を有していることは良く知られている。しかしながら、セミの翅にも規則性が乱れているものの類似の構造が観察され、しかもそれが十分な反射防止効果などの機能を持っていることがわかってきた。

右図は、カバーガラスが光を強く反射するのに対して、クマゼミの翅は配列の乱れにもかかわらず優れた透過性を示すことを如実に示している。

このように多少の乱れがあっても必要な機能を発現できるのであれば、トップダウン型の情報処理に頼らず、自己組織化を利用することが生物の材料設計の指針となっていると思われる。



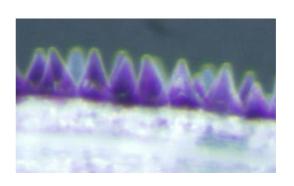
ただし、モスアイと較べてセミの翅の構造が乱れているのは、自己組織化のプロセスの

影響というよりも、折りたたまれた状況で形成されることが原因ではないかと考えられる。

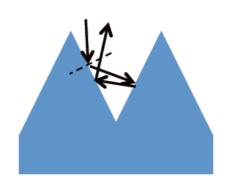
2. スケール変化と頑強性

ビオラの花弁表面にも数十ミクロンサイズの突起構造がある。この構造も反射防止効果を有しており、花弁の色をより鮮やかなものとしている。つまり、所謂、モスアイ効果はサブセルラーサイズに特有な現象ではなく、スケール変化に対して頑強な性質であることが見出された。





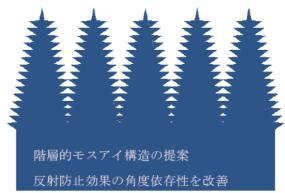
その光学的なメカニズムは、右図のような光の幾何光学 近似による描像において、反射が繰り返されることにより、 反射光の強度がどんどん小さくなっていくことにある。 その効果は、本質的にはアスペクト比により決まるが、 反射波の強度の角度依存性は突起のサイズや間隔をパラ メータに持つ。しかし、この幾何光学的反射防止構造とモ スアイ構造をフラクタル様に組み合わせた下図のような階



層的構造は、単体の幾何光学的反射防止構造がもつ角度依存性を改善することが検証されている。

3. 尺度不干渉性について

異なるスケール、例えば、異なる波長間に相互作用が生じるとき、尺度干渉性があるという。蝶の羽ばたきが地球の裏側の天候を左右するというバタフライ効果は微小なスケールと大域的なスケール



が相互作用を起こすことに起因するので、尺度干渉の典型例である。一方、対象となる系が尺度不干渉性をもつとき、ある入力に対する出力を調べるには、入力を異なるスケ

ールに分解し、それぞれの出力を求めてから、それらの総和をとれば良い。上に挙げた例からモスアイ効果は構造のサイズによらず発現することがわかるので、モスアイ構造は少なくとも自然光の強度の範囲では尺度不干渉性をもつと言える。それ故、セミの翅の例のように、突起の間隔が多少乱れても、それに起因する擾乱が反射防止効果を弱めるようなことはなく、また異なるサイズの構造を合成しても危険が生じないのだと考えられる。しかし、形態発生のプロセスにおいて、均一なアスペクト比を持つ突起構造がどの様な自己組織化現象によってもたらされるのかは興味深い未解決問題である。

所属班:B01-2

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:石井 大佑

所属機関住所:〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

e-mail: ishii.daisuke@nitech.ac.jp

研究キーワード: Max 5 ワードでお願いします。



自己組織化形成プロセスによるタマムシ模倣表面の創製

Development of Biomimetic Surfaces of a Jewel Beetle by a Self-Organization Process

1. はじめに

B01-2 班では、生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスの開発を目的としている。今回は、生物表面の自己組織的な形成プロセスの解明、および、自己組織化により作製した規則構造に由来する構造色の発現を検討した結果を報告する。

2. 生物表面構造の形成プロセスである自己組織化による構造色の作製

研究期間内に、タマムシの構造色の発現機構を明らかにし、その機構を規範とした模倣表面を自己組織化プロセスにより作製する。最終的にはタマムシのシグナルを光学的に操作した害虫駆除機構へと展開する。これまでに、ヤマトタマムシの表面構造を解析すると、クチクラの表角皮(epicuticle)がもつナノ構造の多層膜干渉によって発色していることがわかった。緑を呈する部分(図1A、C)は、赤を呈する部分(図1B、D)の層の厚さよりも薄い。この構造色は、ヤマトタマムシ間での種内信号であり、雌雄の弁別ではなく同種個体の認識として用いられていることを行動学的に確認した。同様の構造色をもつミドリフトタマムシを規範とし、オパール粒子の自己組織化を利用して模倣表面を作製することに成功した。具体的には、タマムシ実物をマスターピースとし、PDMSモールドを介してカーボン粒子含有エポキシ樹脂のレプリカを作製した後、コロイド粒子懸濁液に浸漬して自己組織的に湾曲表面にオパール被覆層を形成させた(図1E、F)。分光装置で光学特性を評価すると緑部と紫外部に同じような反射ピークをもつスペクトルを忠実に再現でき(図1G)、ミドリフトタマムシのepicuticleの発色の仕組みを模倣できていた。鞘翅の断面を透過型電子顕微鏡観察するとオパール粒子の層状構造が観

察でき(図1H)、本手法で構造色を精密に模倣できることを確認した。今後は、タマムシ模倣レプリカを用いて、タマムシのシグナルを光学的に操作し、害虫駆除の可能性を調査し、構造の最適化を図る。

タマムシの構造色を模した表面構造の自己組織化技術

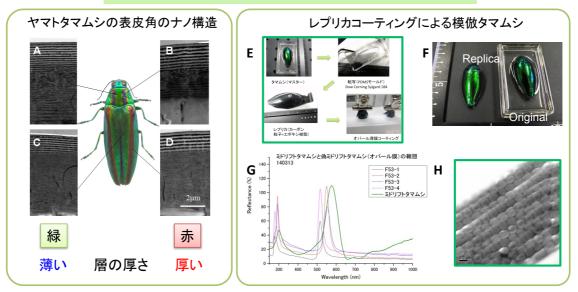


Fig. 1 Development of biomimetic surfaces of a Jewel Beetle by a self-organization process.

3. 生物のサブセルラーサイズ構造の自己組織化の解明

研究期間内に、昆虫の複眼表面構造と脚先の毛状構造(SETA)の形成過程を中心に、クチクラのサブセルラーサイズ構造形成過程を明らかにし、今後の材料設計やプロセスの転換への指針とする。現在までに、昆虫のクチクラ形成に関する発生生物学的解析のモデル生物として、遺伝子操作可能なキイロショウジョウバエを研究対象の中心に据え、複眼表面構造と SETA の自己組織化形成機構を解析している。野生型のショウジョウバエはおよそ 800 個の個眼からなる複眼を左右に一個ずつもち、各個眼は角膜レンズ表面に固有のニップル構造パターンをもつ。特定の遺伝子の働き方を変化させると大きなニップルや波形のニップルパターンに表面構造が変化する。このように遺伝子の働きを変化させたときに生ずるニップルパターンの変化を、発生ステージごとに経時的に観察を行い、超微細構造の自己組織化がどのような仕組みで決定されるのか、サブセルラーサイズ構造からナノ構造までの形態変化を追跡している。今後は、自己組織化と超微細構造の関連性の詳細を明らかにするために、その理学的背景を推測し、robustnessをもった生物のものづくりを規範とした自己組織化による工学的超微細構造形成技術の指針として提案を目指す。また、B01-1 班との班間連携により、マイクロリンクルの自己組織的形成機構との関連性を検討する。

所属班:A01班

所属機関:北海道大学大学院情報科学研究科

氏名:長谷山美紀

所属機関住所:〒060-0814北海道札幌市北区北14条西

9

e-mail: miki@ist.hokudai.ac.jp

研究キーワード:バイオミメティクス・データ検索



バイオミメティクス・データ検索基盤の実現と技術創出

Realization of Biomimetics Data Retrieval Platform and Technological Innovation

1. はじめに

バイオミメティクスは、生物学と工学などの異なる研究分野が連携し、新しい技術を 創出する科学技術である。技術創出の加速を目指し、異なる分野の知識共有を支援する バイオミメティクス・データ検索技術の開発が開始され、2年が経過した。発想支援型 の画像検索理論(1)-(3)に基づき、大量の画像をその類似性に基づき効果的に表示すること で、利用者に望む情報を獲得するための気づきを与える検索基盤の実現が試みられてい る。本稿では、試作システムを紹介し、実際に生物学者により撮像された顕微鏡像を投 入して得られた検索結果を分析する。

2. バイオミメティクス・データ検索

バイオミメティクスの異分野連携を支援するバイオミメティクス・データ検索の試作システムが、発想支援型検索(1)-(3)を基にして開発された。システムには、昆虫、鳥類、魚類の SEM 画像データベースを準備した。このシステムを利用する事で、データを保持する研究者が自身のデータを登録し、他者のデータと融合したデータベースの閲覧が可能となる。また、データを保持する研究者が、自身の画像を質問画像としてデータベースを検索する機能を備え、画像による画像の検索が可能である。

この検索機能を用いることで、知識が少ない異分野の情報を獲得することが可能となる。実際の利用では、産業界に存在する外部に開示が困難な画像データを質問として、公開された学術データを検索するための機能として有用である。具体的に、材料画像を質問画像として生物画像データベースを検索した結果を図に示す。図より、生物・材料

など全く異なる分野のものであっても、互いに表面構造が類似する画像であれば、検索 が可能となることが理解できる。

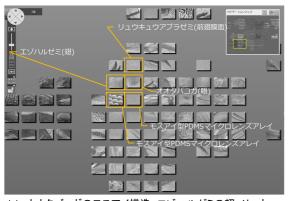
以上のように、バイオミメティクス・データ検索システムを利用することで、生物と 材料という全く別の分野であっても画像の類似性で関連付けができることが示された。 この例は、異分野の知識共有の可能性と新たな技術創出を示唆するものと考える。生物 学に蓄積されたデータと工学のデータを有機的に連携することで材料開発に新技術の 創出が期待できる。

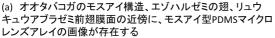
3. むすび

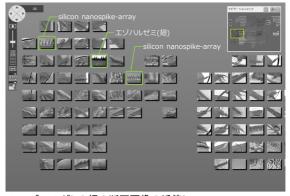
異なる研究分野に蓄積された大量のデータの背景には、分野に固有の貴重な知識が存在する。社会が解決を望む問題は複雑さを増し、問題の所在さえ見え難い現状で、個別の研究分野に知識が蓄積するだけでは、解決の方策を見出すには限界がある。バイオミメティクスは、現在の社会が抱える問題を解決する試みと捉えることができる。知識の蓄積としての異分野データベースの連携を通して、産業の創出を支援する産学連携プラットフォームの実現が望まれる。

参考文献

- (1) 長谷山 美紀, "画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース," 電子情報通信学会誌, vol. 93, no. 9, pp. 764-769, 2010.
- (2) Miki Haseyama, Takahiro Ogawa, and Nobuyuki Yagi, "A Review of Video Retrieval Based on Image and Video Semantic Understanding," ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol. 1, no. 1, pp. 2-9, 2013.
- (3) Miki Haseyama and Takahiro Ogawa, "Trial Realization of Human-Centered Multimedia Navigation for Video Retrieval," International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 29, no. 2, pp. 96-109, 2013.







(b)エゾハルゼミの翅の断面画像の近傍にsilicon nanospike-arrayが存在する

図 試作システムの検索結果と分析

所属班:A班

所属機関:国立科学博物館

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:画像データベース、表面構造、鳥類、魚類、

昆虫



昆虫、鳥類及び魚類の表面構造の画像を収録したデータベース 構築

Progress Report on Builiding an Image Database of Surface Structures of Insects, Birds and Fisehs

1. はじめに

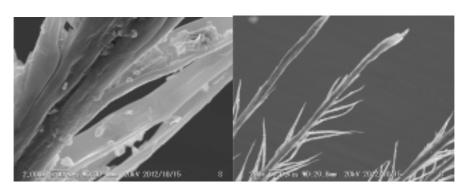
A 班には 3 つの生物系小班がある。野村小班(国立科学博物館)は昆虫、山崎小班(山階鳥類研究所)は鳥類、そして篠原小班(国立科学博物館)は魚類のデータ作成を担当している。生物系小班は動物の表面構造を SEM やデジタルマイクロスコープによって撮影し、画像データベース担当の長谷山小班に提供している。また、各動物群の適応に関するテキストデータを作成し、オントロジー担当の溝口小班に提供している。生物系小班の収集した画像に基づいて画像データベースが構築され、オントロジーデータベースも構築されつつある。しかしながら、現在まで生物系研究者と工学系研究者の連携に進展は見られていない。生物系小班は工学系研究者に連携を呼びかけているが、目立った反応がない。この点を改善しなければ新学術領域の研究目標である異分野連携は達成できないであろう。

2. 生物系小班の 2013 年度末までの活動

データベースに格納する画像の件数は当初 5 カ年で 10,000 件を目指していたが、機材と人材の確保に成功した結果、計画をはるかに上回る画像を収集できた。画像件数は現時点ですでに約 12,000 件を超えている。内訳は、SEM 画像約 170 種 10,500 件 (昆虫 約 60 種 8,000 件、鳥類 約 40 種 1,000 件、魚類 約 70 種 1,500 件)、デジタルマイクロスコープ画像約 60 種 500 件(魚類のみ)、X線 CT 画像約 200 種 600 件(鳥類のみ)、マルチスペクトル画像約 200 種 600 件(鳥類のみ)である。

生物の適応についてまとめたテキストファイルの整備については、種レベルおよび科レベルの分類群を対象に作業を進め、これまでに約210分類群(昆虫約60分類群、鳥類約80分類群、魚類約70分類群)の処理を終え、ほぼ当初計画通りである。

人材育成・普及啓発活動・班間連携にも取り組み、野村小班は国立科学博物館において研究集会「昆虫の飛翔に関するワークショップ」を開催し(2013 年度)、山崎小班は収集した X 線 CT 画像を用い、B01-5 班と共同で鳥類の運動に関する博物館展示用コンテンツを開発、我孫子市鳥の博物館、水戸市立博物館での普及啓発活動に活用した(2013 年度)。篠原小班は静岡県駿河湾(2012 年度)、高知県土佐湾(2013 年度)において魚類試料の採集を伴う講習会・研究集会を B 班と連携して開催した。



SEM images of feather of *Nipponia nippon*.

3. 今後の計画

生物の適応を種レベルまたは科レベルでまとめたテキストデータについては、各年度 100 分類群 (昆虫 30 分類群、鳥類 40 分類群、魚類 30 分類群)について作成する。画像データ (SEM 画像・デジタルマイクロスコープ画像・X線 CT 画像・マルチスペクトル画像)については、各年度 2,400 件(昆虫 1,500 件、鳥類 500 件、魚類 400件)の作成を目標に据え、以下の点に留意する。(1) B 班で新開発されたナノスーツ法(試料からの気体・液体の流出を防ぐ SEM 画像撮影技術)を取り入れ、人為的変形の少ない、自然状態の形態を観察できる高品位の SEM 画像を集める。(2) B 班と協議のうえ、興味深い発見が期待できる構造(例えばモスアイ構造、吸盤、棘など)を持つ分類群を選定し、重点的に調べる。また、生物系 3 小班は、構築したデータベースを活用し、昆虫・鳥類・魚類の形態的特徴を比較・検討し、機能と進化の解明につながる情報を整理する。

参考文献

(1) Nomura, S; H. Kamezawa, H.; Arai, S. Elytra, Tokyo, new series, 2013, 3, 31-43.

- (2) Nakae, M.; Sasaki, K.; Shinohara, G.; Okada, T.; K. Matsuura, K. 2014, J. Morphology, 275, 217-229.
- (3) 野村周平, 2014, PEN, 4, 12-18.

所属班: C-01

所属機関:地球村研究室

氏名:石田 秀輝

所属機関住所: 〒891-9222 鹿児島県大島郡知名町徳時 910

e-mail: emile.h.ishida@gmail.com

キーワード:持続可能な社会、ライフスタイル、オントロジー工学



持続可能な社会に求められるテクノロジー開発手法の創成に向けて

Development of the Technology for the Creation of Sustainable Society

1. はじめに

1992年、ブラジル/リオ・デ・ジャネイロで開催された『環境と開発に関する国際連合会議』(地球サミット)には、172 カ国からのベ 4 万人を超える人々が集まり、国際連合の史上最大規模の会議となるとともに、持続可能な開発を旨とする『アジェンダ 21』が採択され、世界に大きな影響を与えた。それから 20 年を経た 2002年6月、再度リオで地球サミット (リオ+20) が開催されたが、環境と成長の両立が重要との抽象的な方向は採択されたものの、それに対する具体的な施策や数値は何も決まらず閉幕した。この 20 年、先進国は持続可能な社会を創るために多くの努力をしてきた、しかし、現実は理想からますます乖離し、このままでは 2030年頃、文明崩壊の引き金を我々自らの手で引くかもしれない瀬戸際にあることも事実である。

では、環境と成長の両立に必要な要件とは何か? そこに必要なテクノロジーが具備すべき用件とは何か? 今あらためて考え、定義する必要がある。

2. 環境と成長の両立に必要な要件(1-2)

少なくとも近代型の成長はエネルギーや資源の消費を増大する発散型の成長であった。また、エコ・テクノロジーの市場投入が環境劣化に大きくは貢献できないことも明らかになっている今、求められているのは、厳しい地球環境制約の中での成長であり、過去に経験したことのない成長の形である(Fig.1)。

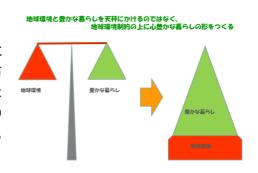


Fig.1 Thinking approach

3. ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチ (1-2)

環境と成長の両立のためには、1)厳しい環境制約の中での心豊かなライフスタイルを(バックキャスト思考ーFig1 右側の思考ーで)考える。2)ライフスタイルに必要なテクノロジー要素を抽出する。3)完璧な循環をもっとも小さなエネルギーで駆動する自然の中にその要素を見つけ、4)サステイナブルのフィルターを通して、具体的なテクノロジーとしてリ・デザインする必要がある(Fig.2)。

例えば、トンボの風力発電機開発例では、Fig.3 のような環境制約下で心豊かなライフスタイルをイメージし、そこからテクノロジー要素を抽出く低速で滑空可能>、自然の中にその素材を探すくトンボの翅>。トンボはレイノルズ数 10⁻³程度の領域で飛翔しており、この領域では、トンボの翅の凸凹

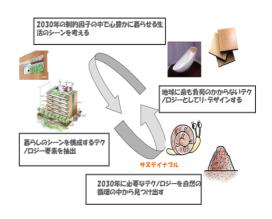


Fig.2 Tech, creation system

が小さな渦を創り、それが粘性の高い空気をベルトコンベアに載せるように後方に運んでいることが明らかになった(Fig.4)。この原理を用いて開発された発電機(Fig.5)は、従来では達成されなかった風速 1m/s でも 18%の高効率性能を示す(Fig.6)。

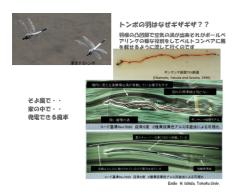




Fig.4 Airflow around the wing

Fig.5 Micro wind generator

4. ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチの展開

ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチが、従来のテクノロジー創出手法と全く異なる結果を導き出すことは明らかとなたが、これを一般解とするためには、いくつかの問題を解決しな

1) ライフスタイルからテクノロジー要素を抽出する

ライフスタイルイメージを一般的には300-400字の 文章にするが、そのライフスタイルイメージは一般に抽 象的なものが多く、テクノロジー要素の抽出は研究者の センスに負うところが多かった。

そのため、オントロジー工学を導入して、ライフスタイルの行為分解木を用いる方法を検討している(世界初)

(Fig 7)。すでに、10個程度の行為分解木が出来ておりライフスタイルを分解することにより、それを構成するテクノロジー要素、心の豊かさに繋がるテクノロジー要素や行為などが表現できることが明らかとなっている⁽³⁾。さらに50個程度の分解木を作成し、環境制約下で心豊かな暮らしを考えるためのテクノロジー要素や



2030年、昔の様に石油を使って電気を創ることは離しくなりました。原子力発電も2011年の福島第一原発の事故をきっかけに、先進国では運転がほとんど止まりました、途上国でも放射性廃棄物の処理など、先進国に頼っていた分を自分達で処理するにはあまりにコストが掛り、ほとんどの国でその使用をあきらめているようです。その代わり、薄いけれど大量にある自然エネルギーを旨く使う知恵比べが始まりました。エネルギーの使い方も随分変わってきました。今では、庭先でくるくる回る小さな発電機が子供たちの羨望の的です。何放って、自分で貯めた電気は自分で使うことが出来るからです。昨日貯めた電気で少しだけゲームをしました。今日貯める電気は、本当はでよりかけたとう時間のおばあちゃんの補聴器の電気が無くなりかけたと今朝聞いたので、おばあちゃんにフレゼントしようと思っています。明日は、少したくさん風が吹くといいなぁ・・・とでいて変更などを思いながら空とくるくる回る発電機を眺めるのがとても幸せです。

Fig.3 Example of the life-style

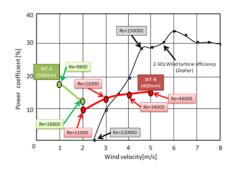


Fig.6 Performance curves of micro wind and already on the market generator

オントロジー工学の導入

「木造電柱は総合小型発電機のハブ」の行為分解木

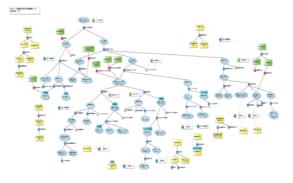


Fig.7 Behavioral decomposition tree

行為がどの程度存在し、共通するものがどの程度の頻度で現れるのか明らかにしたい。

2) テクノロジー要素のリ・デザイン

最終的には、テクノロジー要素の具体的な形を創出する必要があるが、これには Bio-Triz などの手法導入を考えている。

参考文献

- (1)石田秀輝・古川柳蔵、地下資源文明から生命文明へ、東北大学出版会 2014
- (2) Emile H. Ishida, Nature Technology, Springer 2013
- (3)Yuko Suto, Shoko Fuji, Ryuzo Furukawa, Riichiro Mizoguchi, Emile H.Ishida, Development of matching process aginst lifestyle and technology- Specification of lifestyle -, Joint International Symposium on Nature-inspired Technology (ISNIT) 2014 and Engineerigng Neo-Biomimetics V,Sapporo, Japan, February 12 15, 2014.

所属班: C-01

所属機関: 新潟大学工学部

氏名:山内 健

所属機関住所:〒950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050

e-mail: yamauchi@gs.niigata-u.ac.jp

研究キーワード:バイオTRIZデータベース、

マイクロバイオリアクター、ポリビニルアルコールゲル



生物機能を工学技術に転用するための支援方法 ーバイオ TRIZ データベースー

Design of new functional materials by bio-TRIZ data base

1. はじめに

近年、高効率・高性能な生物機能を材料設計に取り入れる生物模倣工学の研究が活発に進められている。しかしながら、その応用範囲は広く、ケースバイケースでの材料設計が主となっており、生物技術の体系化は非常に困難である。さらに国際標準機構 (ISO) ではバイオミメティックスに関する規定について検討されており、国際基準でのバイオミメティック材料の創出が求められている。

そこで本研究では、材料設計のアイデア創出法として知られる TRIZ(トゥリーズ)に着目して、効果的に生物機能を材料工学に移転する方法について検討した。この手法はバイオ TRIZ と呼ばれる問題解決法で、これまでの工学的なアプローチに 150 万種以上も存在するといわれる生物の仕組みを取り入れて、問題解決のヒントとして提案するという発想である。我々は、この手法を確立することを目的に、工学的な技術矛盾を解決するために有用となる、生物の仕組みを提供するデータベース(バイオ TRIZ データーベース)の構築を検討している。

ここではその一例として、マイクロバイオリアクターの新たな設計・開発を取り上げて、持続可能な社会の構築における新たなモノづくりの可能性について説明する。

2. バイオ TRIZ による問題解決

バイオ TRIZ による問題解決について、マイクロバイオリアクターの反応速度の向上について説明する。

近年、小型化、高性能化、省エネルギー化の観点から抗体や酵素といった生体機能性

物質を担持したマイクロバイオリアクターやマイクロバ イオチップの研究が進展している。

しかしながらその多くは高分子樹脂、活性炭、金属酸化物 といったドライな流路表面または流路内に生体機能性物 質を固定化、充填するものが多く、反応速度を高めようと すると、材料の質量および形状、システムの圧力などの阻 害要素が発生する。バイオ TRIZ データベースを活用する ことで、この工学的な矛盾を解決する方法として小腸の柔 突起を模倣した材料の有用性が提示された。そこで、実際 に新規な高分子ゲルバイオリアクターの開発を検討した ¹⁾。 具体的にはバイオ TRIZ を導入した材料設計に基づいて、 多孔質シリコンウェハー上で、ポリビニルアルコール (PVA)水溶液を凍結と融解を繰り返すことにより、微小な 突起構造を有する PVA ゲルを作製し、この微細構造を有 する PVA ゲル中に酵素を包括固定し、酵素反応場として の評価を行った。酵素を固定化した PVA ゲルに突起構造 を付与することで、絨毛のような生体環境を in vitro で再 現することができ、高効率な生化学反応デバイスとしての 応用が可能であることが分かった。

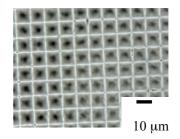




Figure 1 Surface structure of a gel with arrayed micro rods.

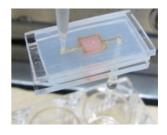


Figure 2 Micro-bioreactor of a gel with arrayed micro rods.

3. バイオミメティック材料の開発におけるバイオ TRIZ の活用

バイオミメティック材料の開発においては、①既存技術・材料から問題を抽出、②問題解決のための生物機能を探索、③探索した生物機能の原理を抽出・一般化、④材料を創製して最適化を検討、という過程を経る必要がある。バイオ TRIZ データベースによる検索の特長は、過程①~③のを経ながら生物機能を工学に移転するためのヒントを提供できる点にある。

以上のとおり、厳しい環境制約の中での心豊かなライフスタイルを築くために、バイオ TRIZ は問題解決ツールとして役立ち、新たなテクノロジー要素の創出を可能にすると期待できる。

参考文献

(1)西山 聖, 横田裕貴, 山内 健, 坪川紀夫, 小林秀敏, 深見一弘, 作花哲夫, 尾形

幸生, 高分子論文集, 2013, 70(7), 331-336.

所属班:B01-5班 生物規範メカニクス・システム

所属機関:千葉大学工学研究科

氏名:劉浩

所属機関住所:〒263-8522千葉市稲毛区弥生町1-33

e-mail: hliu@faculty.chiba-u.jp

研究キーワード:生物飛行システム,バイオメカニクス,

力学シミュレーション、バイオミメティクス



スズメ蛾とハチドリの柔軟翼が同じ法則に従う変形で空気力学性能を向上するのか?

B01-5 班では、生物規範メカニクス・システムの一環として生物飛行の組織・器官― 個体スケールの階層間連結に基づく生物飛行メカニクス・システムの学理探求を行うと ともに、生物規範型飛行ロボットの設計指針の確立と自律型昆虫型飛翔バイオロボット の実現を目指している。これまでは、昆虫羽ばたき飛行の動力学・流体力学・材料力学・ 飛行制御を統合した生物飛行統合力学シミュレータを構築するとともに、生物飛行、生 物規範型ロボット及びバイオミメティクス流体機械(風車ローター)を実験検証・原理 確立する上ことが可能な世界トップレベルの回流型超低速風洞とステリオ DPIV 流体 計測システムを整備した(図 1,劉·田中 G)。大規模なマルチメカニクス連成解析、高 速度ビデオ撮影及び風洞実験により、蛾やハチドリは精巧な構造により柔軟翼の受動的 な変形(曲げ、ねじり及びキャンバー)が効率的に空気力を発生させることを明らかに した。これらの柔軟翼の慣性力と流体力の力学場による受動的な変形が個体サイズに依 存する多様性をも示唆する。さらにこのような生物柔軟翼の受動的変形機能を規範とし た、自由に翼変形を制御可能な柔軟伸縮皺フィルム人工翼の開発に成功し羽ばたき飛行 ロボットへの応用を目指している。一方昆虫羽ばたき飛行の神経・骨格系(安藤 G)につ いて、羽ばたき運動中の外骨格の変形を、対応する飛翔筋活動、羽ばたき運動計測と組 み合わせて、昆虫の外骨格の挙動解析を中心に行った。 また翅の損傷に対する補償メカ ニズムを神経・筋肉系、および外骨格の構造の特性の両面から明らかにするために、神 経系で補償を行うのに必要な感覚情報の推定を行った。一方、高性能流体機械のバイオ ミメティクス・デザイン(劉·田中 G)として、飛翔生物翼の優れた空気力学特性(マ イクロ渦の発生・制御、柔軟構造) や静音構造(マイクロ構造による渦制御や騒音抑制) を回転型流体機械(図2:生物規範翼をもつ風車、フクロウ翼静音機構)に応用するこ とを目指し、産学連携でバイオミメティクス・デザインを流体機械に適用することで、 次世代革新的な生物規範型流体機械の研究開発をも実施している。



図1回流型超低速風洞と DPIV 流体計測システム 図2生物規範流体機械の研究開発

最近飛翔生物の柔軟翼の変形や空気力学性能に対して統一的な法則が存在するのかを 研究するために、昆虫であるスズメ蛾(Hawkmoth, Agrius convolvuli)と鳥であるハチドリ (Hummingbird, Amazilia amazilia)の異なる種の羽ばたき翼の変形と空気力学性能に関して、 総合的に評価を行った結果、下記のような結果がわかった。1)形態的には、体重 0.95g のスズメがと 5.3 g のハチドリは、翼長さがそれぞれ 36 mm と 71mm となり、アスペ クト比が 2.9 と 3.9 で大きく違う。2) 羽ばたき運動(図3)は、周波数がそれぞれ 39Hz と 29Hz とで大きな相違があるが、ほぼ同じ振幅をもち、positional angle, elevation angle が比較的同様な時間的変化を見せる。3)羽ばたき翼の翼スパン(長さ)方向のねじりに 大きな相違が観察され、その度合いを表す feathering angle (図4) は翼端ではハチドリが スズメガより3割以上大きくなる。しかしながらこれらの feathering angle に対して翼長 さで無次元化を図ると非常に似たような分布となることがわかる。4)スズメガとハチド リの柔軟翼と仮想的な剛体翼の計算流体力学モデルを用いて空気力学性能を比較すると、 両方は垂直力 (揚力) が約 31~33%アップ、効率も 14~15%アップとなる。以上により、 翅脈と薄膜を有するスズメガの翼と、羽と筋骨格をもつハチドリの翼は、異なる形態や構 造を持つ異種の飛翔生物の翼でありながら、似たような羽ばたき運動、且つ柔軟翼の変形 を見せており、しかもそれらの空気力学性能もかなり近いことが明らかになった。この結 果は、飛翔生物の柔軟羽ばたき翼のサイズ効果に関する統一的な法則の構築、さらに生物 規範とする羽ばたき飛行ロボットの柔軟翼設計原理の創出につながるものと期待される。

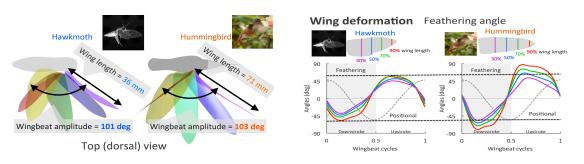


図3 スズメガとハチドリの羽ばたき運動 図4スズメがとハチドリの翼変形

所属班:計画研究B-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



細胞運動における弾性境界曲率応答性の原理探究

Study on the curvature effect of elasticity boundary on cell motility

細胞運動は生体組織の構築・形態形成と恒常性の維持をはじめ、免疫反応・炎症反応などの生体防御応答や、がん細胞の転移現象など、生体活動の諸局面における重要な基礎現象である。細胞運動の制御は、生体においては細胞の走性を駆動する様々な因子(液性化学因子、表面固定化学因子、電気化学勾配、光、周囲力学場勾配)によって行われており、その細胞外環境の精密な模倣は細胞行動を操作する生体材料設計の基盤技術の拡充において本質的であり、バイオミメティックスの観点からの重要課題の一つでもある。当研究室ではこれまでに、細胞の周囲力学場の精密設計による細胞メカノタクシスの誘導と操作技術の開発を進めてきた。これまでに細胞メカノタクシスの誘導には、細胞一体の接着界面内における特定の閾値以上の弾性勾配強度の設計が不可欠であることを明らかとしてきた[1]。

しかし一方、これまでに確立されたメカノタクシスの誘導条件〜シャープな弾性境界においてのみメカノタクシスは起こる〜からは、この走性が特に局所的な現象であるとともに、実際の生体内においてクリアな一直線のシャープな弾性境界が存在する場所というのは稀にしか存在せず、生体内での細胞運動としていかなる場面で活用され得るかという点について必ずしも明確な理解が得られているとは言えない。実際の生体中では、弾性境界は直線線形の状況というものはほとんどなく、むしろ様々な場所でそれぞれの状況に特有の曲がった形状や弾性境界の方が現実的にはほとんどを占めるはずである。生体はいろいろな曲率を有する組織から構成されており、興味深いことにそれらの曲率に応答して異なる細胞種が棲み分ける挙動も見られる。そこで、本研究では、細胞運動、特にメカノタクシスの弾性境界の曲率応答性の原理を調べるために、異なる曲率半径を有する弾性境界を弾性マイクロパターニング技術を用いて系統的に作製し、細胞運動の応答性を解析した。光硬化性スチレン化ゼラチンの 30wt%—(phosphate buffered

saline) (PBS) ゾル溶液 (3.0% sulfonyl campher quinone 含有) に可視光を照射し、

ラジカル重合反応による光架橋にてゼラチンのゲル化を行った。自作の PC 描画像縮小投影光リソグラフィ装置を用い、光照射パターンの導入および光照射時間の制御を通じて、弾性境界の形状を変化させたマイクロ弾性パターニングゲルを作製した。ゲルの弾性率分布は原子間力顕微鏡を用いた微視的圧入試験により測定した。これらのゲル上に 3T3 線維芽細胞を 1.5×10³ cells/cm² の密度で播種し、8時間インキュベーター内で培養した後、15分間隔で 24時間のタイムラプス観察を行った。細胞の運動軌跡は弾性境界と相互作用を起こした細胞について 12時間分の軌跡を解析した。

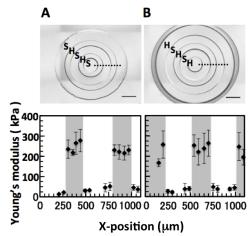


Fig.1. Microelastically-patterned gelatinous gel containing multiple elasticity boundaries with different curvatures.

曲率半径 50,100,250,500,750,1000 μ m の異なる曲率の円形パターニングゲルを作製し(硬領域:300kPa, 軟領域:10kPa)(Fig.1), 細胞の運動軌跡の解析を行った。その結果、硬領域に向かう凸境界については曲率半径が大きい場合(500,750,1000 μ m)、弾性勾配がメカノタクシス誘起条件を十分に満たしているにも関わらず、硬領域指向性運動は誘起されなかった。しかし、曲率半径が 250 μ m 以下になると硬領域指向性が誘起され、半径 100 μ m の弾性境界において最もその誘起効率が高くなった(Fig. 2)。一方、硬領域に向かう凹境界については曲率半径 750 μ m 以上の大きな弾性境界においては硬領域指向性が誘起されたが、500 μ m では偏向運動は消失し、100 μ m 以下の条件においては軟領域指向性運動が顕著となった(Fig. 2)。このよう

な弾性境界形状条件に依存したメカノタクシス特性の変化には、細胞自体の形状との相互作用や、境界形状に起因するゲル界面の水平弾性率分布の摂動等が影響する可能性が考えられる。曲がった弾性境界におけるゲル内部の応力分布を解析したところ、50~100μmの凹境界においては境界近辺での内部応力が直線境界に比べて高まる傾向がある、これが軟領域指向性運動に寄与したものと考えられた。

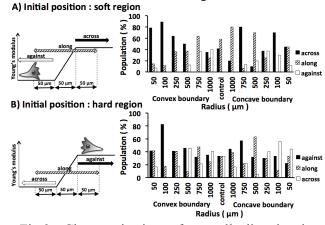


Fig.2. Characterization of overall directional movements of cells interacting with the elasticity boundaries with different curvatures.

参考文献

1) T. Kawano, S. Kidoaki, *Biomaterials*, **32**, 2725-2733(2011)

所属班:B01-4班

所属機関:東京大学先端科学技術研究センター

氏名:光野 秀文

所属機関住所: 〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

e-mail: mitsuno@brain.imi.i.u-tokyo.ac.jp

研究キーワード:ガ類、フェロモンブレンド、性フェロモン

受容体、嗅覚受容細胞



ガ類の受容体によるフェロモンブレンドの検出機構の解明 Elucidation of detection mechanism of pheromone

blend in moth

ガ類のオスは、メスが放出する種特異的な性フェロモンを検出し、同種のメス個体を識別する。これまで 1000 種類を超える昆虫種から性フェロモンが同定されており、その大半は複数成分が異なる比率で構成されるフェロモンブレンドであることが報告されている(1)。オス個体は、フェロモンブレンドの構成成分を検出するとともに、それらの構成比率を検出することで、同種のメス個体を識別している。近年、性フェロモン成分を検出する受容体が発見され、各成分はこれら受容体で検出されていることが明らかにされてきた(2-3)。しかし、フェロモンブレンドの構成比率が性フェロモン受容体でどのように検出されるのかは明らかにされていない。そこで、本研究では、様々なガ類から性フェロモン受容体を同定し、受容体によるフェロモンブレンドの検出機構の解明を目的とする。これにより、複数成分から成るガスの新たな検出方法の提案につなげたい。1)性フェロモン受容体遺伝子の単離と機能同定

性フェロモン受容体はカイコガで初めて同定されて以降、現在までに 10 種類程度の昆虫種で報告されている $(^{2-3})$ 。しかし、一つの昆虫種で各性フェロモン成分に対応する受容体が同定された例はほとんどない。そこで、2~4 成分から成るフェロモンブレンドを利用するガ類(スカシバ類、スズメガ類、計 10 種類)を対象に、性フェロモン受容体の単離と機能同定を試みた。その結果、既知の性フェロモン受容体とアミノ酸類似性の高い候補遺伝子を各ガ類から複数種類単離することに成功した。アフリカツメガエル卵母細胞を用いた機能解析手法により、候補遺伝子のうちヒメアトスカシバから単離した受容体(NpOR1、NpOR3)が性フェロモン成分である(E,Z)-3,13-octadecadien-1-ol(EZ) (E,Z)-3,13-octadecadien-1-ol(EZ) (EZ) (EZ) (EZ)-3,13-octadecadien-1-ol(EZ) (EZ) (EZ)

それぞれ特異的に応答を示すこと、NpOR1 及び NpOR3 は既知の性フェロモン受容体 と同程度の感度を持ち濃度依存的に応答することが分かった。以上の結果から、NpOR1 と NpOR3 はヒメアトスカシバの各性フェロモン成分を検出する受容体であることを 示した。現在、その他の候補遺伝子の機能同定を進めている。

2) 性フェロモン受容体を発現する嗅覚受容細胞の割合

ヒメアトスカシバは EZ 体と ZZ 体を 9:1 の割合で含むフェロモンブレンドを利用する。受容体によるフェロモンブレンドの検出機構を調べるため、まず RT-PCR を用いて触角における性フェロモン受容体の発現量の違いを調査した。その結果、主成分に反応する NpOR1 は NpOR3 よりも転写量が多く、受容体ごとに触角での発現量が異なることが示唆された。次に、触角の嗅覚受容細胞における性フェロモン受容体の発現様式を in situ ハイブリダイゼーションを用いて調査した。その結果、受容体ごとに発現する嗅覚受容細胞の数が異なることを見出した(図 1)。主成分に応答する NpOR1 を発現する細胞の割合は NpOR3 を発現する細胞よりも多く、その各受容体を発現する細胞の比率は性フェロモン成分の構成比率と類似した傾向を示す。このことから、ヒメアトスカシバのオスは触角の性フェロモン受容体を発現する嗅覚受容細胞の比率を調整することでフェロモンブレンドの構成比率を検出している可能性が示唆された。

今後、他の複数種類のガ類について性フェロモン受容体を同定し、生体触角での発現 様式を調査することで、受容体によるフェロモンブレンドの検出機構を一般化したい。

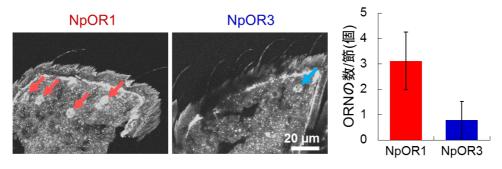


Fig.1 Expression of pheromone receptors in olfactory receptor neurons of male antennae.

参考文献

- (1) Byer, J.A. J. Anim. Ecol. 2006, 75, 399-407.
- (2) Sakurai, T.; Nakagawa, T.; Mitsuno, H. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, 101, 16653-16658.
- (3) Mitsuno, H.; Sakurai, T. et al. Eur. J. Neurosci. 2008, 28, 893-902.

謝辞

本研究で用いたガ類は鳥取大学農学部中秀司准教授よりご提供いただきました。心より感謝いたします。

所属班:B01-4班

所属機関:独立行政法人 森林総合研究所 森林昆虫研究

領域

氏名:高梨 琢磨

所属機関住所:〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

e-mail: takanasi@affrc.go.jp

研究キーワード:振動、行動、感覚、昆虫、害虫防除



カミキリムシにおける振動情報の機能解明と害虫防除への応用

Vibration Signals in Cerambycid Beetles and their Application to Pest Control

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。例えば、捕食者が接近時に発する振動をいち早く検知して捕食者を回避する種、そして配偶者の発する振動を手がかりに配偶者を認識する種などがある(1-2)。このように振動は、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、カミキリムシをはじめとする甲虫における知見は、未だ充分に蓄積されていない。そこで演者のグループは、異なる環境に生息する甲虫として、草本に生息するラミーカミキリと樹木に生息するマツノマダラカミキリを対象に研究を進めている。

1. ラミーカミキリの振動情報

草本は風による植物体の揺れによって低周波の振動刺激を受けやすいのに対し、樹木ではそのような低周波振動を受けにくい。ラミーカミキリが生息する草本植物であるカラムシの振動特性を解析したところ、風による振動は30Hz 程度の周波数成分が卓越していた。一方、ラミーカミキリの着地や歩行によって生じる振動は30Hz 以上の周波数成分も強く、風による振動とは特性が大きく異なっていた(Fig.)⁽³⁾。

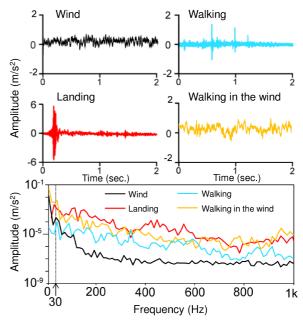


Fig. Vibrations generated by wind, a beetle landing on a leaf, a beetle walking on a leaf, and a beetle walking on a leaf in the presence of wind.

昆虫において、固体を伝わる振動は捕食者や配偶者の接近を感知するために用いられる。そのため、葉の上に生息するラミーカミキリにとって、葉を伝わる振動が生物由来なのか、または風による非生物的な要因によるものなのかを識別する能力は重要である。そこで、ラミーカミキリに周波数や振幅の異なる振動を与え、生物由来の振動に対して、フリーズ反応(歩行の停止)や驚愕反応といって特異的な反応をするかどうか検証した。その結果、ラミーカミキリは、他個体の着地や歩行に由来する振動の周波数成分に対して、敏感に反応を示すことが明らかになった。

2. マツノマダラカミキリの振動情報と害虫防除技術への応用

マツノマダラカミキリの成虫はマツ材線虫病を伝播し、マツに壊滅的な被害を与えている害虫である。我々は、マツノマダラカミキリが低周波の振動によって、驚愕反応・フリーズ反応等の行動反応を示すことを明らかにしている。また、我々は振動がマツノマダラカミキリの肢に内在する弦音器官(感覚器の一種)により感知されることを甲虫で初めて発見した^②。弦音器官は、多数の感覚細胞が細長い弦に付着しており、肢の接地面(マツ他)から振動を受容することができる。

これらの振動情報の機能を応用することで、害虫の行動を制御し、防除につなげることができる。振動を発生させる装置としては、超磁歪素子(磁界によってひずみを生じる合金にコイルを巻き、交流電流を流すことで振動を発生できる)が有用である。これにより、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でき、殺虫剤の使用を控えることで生態系への影響を最小限にした被害防止が可能となる。なお超磁歪素子によるモデル試験として、マツに振動を与えて、マツノマダラカミキリに忌避をおこすことには成功している。また、マツノマダラカミキリの産卵や摂食が、振動によって阻害されることも示している⁽²⁾。

振動を用いた害虫防除技術は、森林害虫のカミキリムシだけでなく、振動に感受性のある害虫種にも広く適用可能であるという特長をもつ。今後、振動情報に関する知見が様々な昆虫において蓄積することで、本防除技術が果樹や農作物等の被害対策など、広範囲に用いられると期待される。

参考文献

- (1) Kojima, W.; Ishikawa, Y.; Takanashi, T. Biol. Let. 2012, 8, 717-720.
- (2) 高梨琢磨, 深谷緑, 小池卓二, 西野浩史, 生物科学 2013, 65,102-107.
- (3) 高梨琢磨, 椿玲未, 北島博, 細田奈麻絵, 日本音響学会聴覚研究会資料 **2014**, *44*, 195-196.

所属班:B01-3 生物規範階層ダイナミクス班

所属機関:独立行政法人 物質・材料研究機構

氏名:細田 奈麻絵

所属機関住所:〒305-0044

茨城県つくば市並木1-1

e-mail: Hosoda.Naoe@nims.go.jp

研究キーワード:昆虫、バイオミメティクス、接着、振動、可逆



昆虫から学ぶ接着技術

Bonding technology learning from insects

1. はじめに

ハムシ、テントウムシ、カミキリムシなどの昆虫は、葉や茎さらにはガラスの様な平らな表面上であっても垂直にも天井のような反転状態でも歩くことができる。本研究は、昆虫の優れた可逆的な接着のしくみを技術に取り入れるため、生息環境における昆虫の脚の接着特性の調査、接着原理の解明を行い、得られた知見を基に接着機構の設計と技術移転を行うことを目指している。研究の推進に当たり、新学術領域「生物規範工学」の班内及び班間連携を実施し、若手育成を目的に異分野で構成された研究班を股がったクロスボーダーポスドクを採用することも積極的に行った。以下はこれまでの研究活動の概要である。

●昆虫ミメティクスによるクリーンな水中接着法の技術開発に成功

大気中で生息する昆虫(ハムシ)が「泡」を利用して水中を歩けることを世界で初めて発見した。この水中歩行のしくみを解明し、「泡」を利用した「クリーンな水中接着法」の技術開発に成功した。その後クリーンな水中接着法の研究を発展させ、水中のみならず大気中でも高い接着性が得られる接着構造体の製作に成功した。(出願特許:2件)

●昆虫の脚裏を覆う分泌液の接着への影響に関する研究:班内・班間連携

ハムシ、テントウムシ、カミキリムシなどの昆虫の脚裏は分泌液で覆われており接着に寄与している。分泌液の接着への寄与を詳細に調べる目的で班内・班間連携により分泌液の成分、特にこれまであまり調べられていない水性成分の分析、液体のヒステリシスの影響、表面自由エネルギーの影響について調査している(Fig.1 参照)。

- ●異分野を股がる研究者の育成(クロスボーダーポスドク): 班間連携 生息環境に適応した昆虫の振動反応性と脚裏の接着機構の研究課題を実施するにあたり、異分野をクロスした2名の若手研究者の育成を実施し研究成果が得られた。
- 新しい接合技術開発: 班内連携

昆虫の研究から得られた知見を基に、セルフアライメント、可逆的接合を実現するため 班内の研究者の連携により接着機構及び被着基板の製作を現在推進している。

●A 班の生物の画像データベース作りに寄与:班間連携 昆虫の脚裏の電子顕微鏡像の多量のデータを A 班が取り組んでいる生物の画像データ ベースに提供した。

●国際標準化に貢献

今後のバイオミメティクスを応用した製品化にあたり、国際標準規格(ISO)では"Biomimetics"の組織(TC266)を設置し審議している。B01-3 班から国際&国内プロジェクトリーダー1名(細田)、国内審議委員1名(穂積)が貢献している。

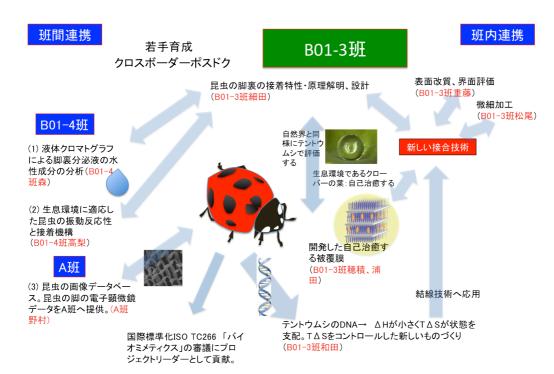


Fig. 1 The cooperation state between the groups on the study on biomimetic adhesion.

所属班:B01-3班

所属機関:独立行政法人産業技術総合研究所

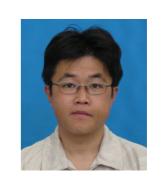
氏名: 穂積 篤

所属機関住所:〒463-8560

名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞2266-98

e-mail: a.hozumi@aist.go.jp

研究キーワード:自己組織化、層状化合物、防錆皮膜、自己修復



自己修復型防錆皮膜

Anti-Collosion Films With Self-Repairing Properties

金属材料の耐食性を向上させる手法として、金属表面の超はっ水化処理に注目が集まっている(1-2)。しかしながら、このような人工表面は、摩擦や摩耗等のダメージにより、表面を被覆している分子の剥離、構造の劣化や崩壊、不純物の堆積等が起こると、その機能が著しく低下し、永久に回復しない。これに対し自然界では、例えば、メロンや蓮の葉は分泌液を放出して、傷の補修、超はっ水性、セルフクリーニングといった優れた機能を発現、持続させている(3)。このような生物体の自己補修、機能維持メカニズムに学び、機能性分子(例えば防錆剤)が持続的あるいは何らかの刺激により徐放されるような皮膜を開発することができれば、材料の耐久性・寿命が著しく向上することが期待される。また、皮膜を積層構造化することにより、最表面層の機能が劣化した場合でも、それを剥離除去することで、表面機能の回復が期待できる。本講演では生物の自己補修、機能維持メカニズムに学んだこれまでにない高性能防錆皮膜について報告する。

本研究では、アルコキシド(テトラメトキシシラン:TMOS)、アルキルシラン(デシルトリエトキシシラン: C_{10})、エタノール、塩酸の混合溶液に防錆剤であるトリルトリアゾール(TTA)を 6 wt%添加して調製した前駆液を UV/オゾン洗浄した各種基板にスピンキャストし、風乾することで、TTA 含有層状ハイブリッド皮膜(以下、 C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜と表記)を得た。



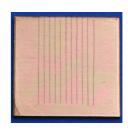


Fig.1 Cu substrates with scratches after submersion in 5 wt% salt water for 24 h (left: C_{10} -hybrid film/Cu and right: C_{10} -TTA hybrid film/Cu substrates, size: $2cm\Box$).

皮膜の自己修復性を評価するため、銅基板に成膜した C₁₀-TTA ハイブリッド皮膜に 予めナイフによりスクラッチを入れ、5 wt%の塩水中に室温で 24 時間浸漬した。比較 のために,防錆剤を添加してない $C_{_{10}}$ -ハイブリッド皮膜も同様に評価した。図 1 から も明らかなように,浸漬 24 時間後, C_{10} -ハイブリッド皮膜(左側)はスクラッチ部位 だけでなく,周辺部位も腐食が進行しているのに対し, $\mathsf{C}_{\scriptscriptstyle 10}$ -TTA ハイブリッド皮膜(右 側)はいずれの部位も腐食が進行していないことが確認された。X線光電子分光法(XPS) により, C₁₀-TTA ハイブリッド皮膜のスクラッチ部位と非スクラッチ部位の表面状態を 分析したところ、TTA に由来する窒素がスクラッチ部位において高濃度で検出された ことから、TTA がスクラッチ部位に移行し、腐食の進行を抑制していることが確認さ れた(自己修復性の確認)。続いて、ダメージを受けた際の皮膜機能の回復性を評価す るため、皮膜に波長 172 nm の真空紫外(VUV)光を照射し、強制的に皮膜表面のア ルキル基を光酸化して表面を親水化した(前進接触角(θ_{a})/後退接触角(θ_{b}) = $<5^{\circ}$ / -)。 その後、皮膜最表層をテープにより剥離除去し、表面の状態を調べたところ、層の一部 が残存してはいるものの大部分が除去されていることが明らかとなった。また、剥離に より新たに露出した表面の水滴接触角を測定したところ,初期の水滴接触角($heta_{ ext{ iny a}}/ heta_{ ext{ iny g}} =$ $110^{\circ}/100^{\circ}$)とほぼ同じ値($\theta_{\rm A}/\theta_{\rm R}=108^{\circ}/96^{\circ}$)まで回復していることを確認した。こ れにより、ダメージを受けた表面層が剥離除去され、内部のはっ水性表面が再び露出し ていることが確認された(機能再生の確認)。最後に、塩水噴霧試験(JIS Z 2371) により、皮膜の長期耐食性を評価した結果を図 2 に示す。未処理、SiO。皮膜を被覆し た銅基板は、わずか 2 時間で腐食が始まった。 С, -ハイブリッド皮膜を被覆した銅基板 は約 8 時間で腐食が始まったのに対し、 C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜を被覆した銅基板 は 2000 時間以上経過しても、腐食は確認されず、優れた耐食性を示すことが明らかと

なった。また、アルミニウムに対しても同様の結果が得られたことから、実装材料(例えばワイヤーボンディング)へのコーティングにより長寿命化、信頼性向上が期待できる。

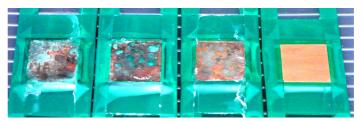


Fig.2 Cu substrates after salt water spraying test for 2000 h (Cu, SiO_2 film/Cu, C_{10} -hybrid film/Cu, and C_{10} -TTA hybrid film/Cu).

参考文献

- (1) Hozumi, A.; Kim, B.; McCarthy, T. M. Langmuir 2009, 25, 6834.
- (2) Qian, B.; Shen, Z. Langmuir, 2005, 21, 9007.
- (3) Wang, X.; Liu, X.; Zhou, F.; Liu, W. Chem. Commun 2011, 47, 2324.

所属班:公募班

所属機関:北海道大学大学院 情報科学研究科

氏名:有村 博紀

所属機関住所:〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目

e-mail: arim@ist.hokudai.ac.jp

研究キーワード:バイオミメティクス・データベース、 オープンイノベーションプラットフォーム、シソーラス



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

Biomimetics Database as a Platform for Open Innovation

1. はじめに

「バイオミメティクス・データベース」は、生物学や材料科学等の異分野のデータベースを大容量画像データ検索技術により横断的に検索し、類似の画像をクラスタリングして提示することで、新たな気付きを提供する発想支援型のデータベースであり、技術革新と新産業育成の基盤になるものとして構築が進められている。また、ISO/TC266では、日本の提案で設置されたWG4において、バイオミメティクスの研究開発に資する知識インフラの国際標準化について議論を行っている。

本研究では、異分野連携を促進するオープンイノベーションプラットフォームを実現するために、海外動向と国際標準化の活用を踏まえて、バイオミメティクス・データベースに必要なデータ構造、具備すべき機能、機能を実現するための技術、運営方法を提示することを目標としている。目標の達成に向け、これまで、海外動向調査・分析と国際標準化活動、産業応用に関する調査・分析(企業インタビュー)を実施してきた。本発表ではデータベースの海外動向と国際標準化活動を中心にその経過を報告する。

2. バイオミメティクス・データベースに関する海外動向調査・分析

国際標準化の方策を検討するにあたり、海外におけるバイオミメティクス関連のデータベースの構築状況を把握するために、海外主要国・地域(EU、ドイツ、英国、フランス、米国)のバイオミメティクス関連の研究プロジェクトを調査・分析したところ、

ドイツで新規材料開発への応用を目的とした極限環境生物のデータベース作成を行うプロジェクト⁽¹⁾が 1 件見られた。また、研究プロジェクトではないが、米国において生物の機能の情報やその応用事例を検索できるデータベース"Ask Nature"が見られた⁽²⁾。総じて、バイオミメティクス関連のデータベース構築の動きはほとんどなく、また、見出された事例も個別分野のデータベース構築や過去情報の整理に留まっており、我が国が国際標準化をリードできる状況にあることが分かった。

3. バイオミメティクス・データベースの国際標準化活動

本公募班では、コンビーナである独立行政法人科学技術振興機構の恒松直幸氏、プロジェクトリーダーである北陸先端科学技術大学院大学の溝口理一郎教授とともにWG4における国際標準化活動を行っている。昨年 10 月にプラハで開催された ISO/TC266第3回総会において、生物学と工学のデータベース連携に必要となるシソーラスの作成の指針を標準化の対象とすることを合意し、それを踏まえ、国内 WG4 でスコープの改訂案を取りまとめた。さらに、企業の研究者等へのインタビュー調査の結果を踏まえて、標準化作業の進め方を検討し、①機械工学と材料工学を対象にシソーラスを試作し、それをもとに作成の指針を取りまとめること、②既存のシソーラスは個別分野に分かれており、生物学と工学の専門用語を直接関係付けることは難しいため、抽象的な機能の概念を体系化した機能オントロジー⁽³⁾を経由してそれらをつなぐことを決定した。現在、10 月にベルギーで開催される第4回総会での提案に向けて準備を進めている。

4. まとめ

これまで、海外のデータベース構築の状況を把握するとともに、国際標準化の方策を検討する中で、必要なデータ構造や機能、機能を実現する技術について検討してきた。今後は、EUの Horizon2020 を中心とした海外動向の調査・分析と国際標準化活動を継続して行うとともに、企業の研究者等へのインタビュー調査を深掘りして実施し、バイオミメティクス・データベースに求められる機能や運営方法を検討、提示する。

参考文献

- (1) フライベルク工科大学,
 - http://tu-freiberg.de/exphys/biomineralogy-and-extreme-biomimetics, (参照 2014-07-09)
- (2) Biomimicry 3.8 Institute, http://www.asknature.org/, (参照 2014-07-07)
- (3) 古崎 晃司, 來村 徳信, 溝口 理一郎. 生物多様性を規範とした材料技術開発支援 に向けたバイオミメティック・オントロジーの試作. The 27th Annual Conference of

the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2013.

所属班:公募研究班、B01-5 班

所属機関:千葉大学

氏名:田中 博人

所属機関住所: 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区 1-33

e-mail: htanaka@chiba-u.jp

研究キーワード: Self-organized wrinkles, Parylene,

Flapping wing, Micro robotics



自己組織化シワによる小型羽ばたき機用翼膜の剛性制御

Stiffness Control of Wing Membranes with Self-Organized Wrinkles for Micro Ornithopters

1. はじめに

昆虫や鳥などの飛翔生物を規範とした小型羽ばたき機では、翼面の受動的変形によって迎え角が適切に保たれ大きな空気力が発生する。羽ばたき機の翼構造は一般的に、比較的高剛性のフレームに薄いプラスチックフィルムを張って製作され、翼の剛性はフレームの形状にほぼ依存する。本研究の目的は、翼フィルム自体にも剛性を異方的に与えることにより、翼面の受動的変形を高い自由度で設計し、空気力学特性を向上することである。そのために、翼フィルムに微小なシワを配向させ、フィルムの曲げ剛性と引張剛性を異方的に制御する方法を提案する。

2. 微小シワを持つパリレンフィルム翼膜

想定する翼サイズは、翼長が 50 mm から 100 mm のハチドリほどの大きさとし、 翼周りの流れに影響がないシワの大きさとして波長 1 mm 以下、振幅 0.5 mm 以下 とする。このようなマイクロスケールのシワ形状をセンチメートルオーダの広さで実現

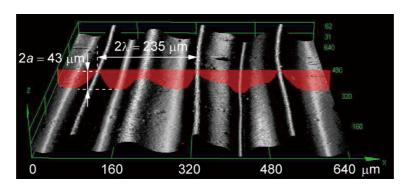


Fig. 1 Surface profile of the self-organized wrinkles.

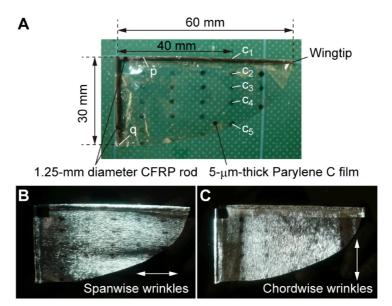


Fig. 2 Fabricated wings with and without parallel wrinkles

する方法として、シワの自己組織化的発生現象を利用する。これはエラストマーなどの 弾性基板の表面に高剛性の薄膜を密着させた状態で基板を圧縮すると、圧縮方向に応じ て表面にシワが瞬時に発生する現象である(*)。本研究では、シリコーンエラストマー基 板表面に生成したシワをモールドとして利用し、シワ表面上にパリレンフィルムを成膜 してリリースすることで微小シワを持つ独立したパリレンフィルムを取り出した。

シワがフィルム剛性に与える影響を調べるために、平行に配向したシワを持つパリレンフィルムの引張試験を行った。フィルム厚は 4 μ m で、シワの波長は約 120 μ m、振幅は約 20 μ m である(Fig. 1)。その結果、シワに垂直な方向の引張弾性率はシワ平行方向に比べて 18% の値となった。また、フィルムの曲げ剛性はシワによって 100 倍以上増加することが断面 2 次モーメントから推定された。これにより微小シワの配向方向によってフィルムの剛性を変えられることが示された。

さらに、この平行シワ付きフィルムと高剛性ロッドを用いて翼を製作し、固定羽ばたき機構で羽ばたかせて翼面変形と垂直空気力を計測した(Fig. 2)。その結果、翼弦に平行にシワを配向させると後縁部の極端な曲げ変形が抑制され、シワが無い場合に比べて垂直空気力は 220% となり、フィルム剛性の異方的制御によって羽ばたき翼の空気力学的特性を向上できることが示された。

参考文献

(1) Genzer, J.; Groenewold, J., Soft matter with hard skin: From skin wrinkles to templating and material characterization. *Soft Matter* 2006, 2 (4), 310-323.

所属班:公募班

所属機関:独立行政法人海洋研究開発機構

氏名:出口 茂

所属機関住所: 〒237-0061 横須賀市夏島町2-15

e-mail: shigeru.deguchi@jamstec.go.jp

研究キーワード:バイオクレプティックス/ナノバイオ

テクノロジー/セルラーゼ/深海微生物



材料科学からアプローチするバイオクレプティックス

Biokleptics with Materials Science Approach

Rawlings らは、最近 biomimetic research を bioinspired、 biomimetics、 biokleptics の3つに分類することを提唱した(1)。biokleptics (klept-、from Greek kleptēs 'thief) とは、"a biological reagent is used to aid a synthetic process"と定義される。生物 を規範とした biokleptics を考える上で最も興味深いのは、地球の生態系を数の上で支 配し炭素循環などで重要な役割を担う微生物である。しかしながら大きさが数 µm しか ない小さな生物が持つ機能・有用性を「いかにして学ぶか?」には、未だ多くの課題が 残されている。

我々は、材料科学の知見を応用した微生物機能のセンシングに関する研究を進めてき た。直径数十 nm のセルロースナノファイバーからなるヒドロゲル表面(Fig. 1)に、 インクジェットパターニング装置を用いて極微量(100pL 以下)のセルラーゼ溶液を 滴下すると、セルロースが酵素加水分解を受けて三次元ネットワーク構造が破壊された 結果、ゲル表面にピットが形成される(Fig. 2)。3D レーザー顕微鏡を用いた非接触

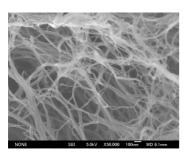


Fig. 1. SEM image of cellulose hydrogel. 3D network of nanofibrous cellulose are seen.

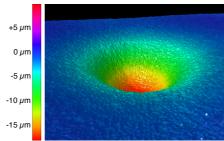
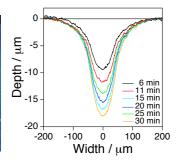


Fig. 2. 3D height map of a pit Fig. 3. Change of a formed on the surface of cellulose hydrogel in 31 min after depositing the pit as a function of 90 pL of the cellulase solution.



cross-sectional profile of reaction time.

表面分析によって、反応時間に伴うピット体積の変化を測定したところ、ピット体積が反応開始直後は時間とともに直線的に増加することを見出した(Fig. 4)。直線の傾きより求めたピット形成速度(セルロース加水分解速度)は滴下したセルラーゼ溶液量に比例したことから(Fig. 5)、ピット体積がセルロースの酵素分解評価の定量的な指標として利用できることが分かった。またピット形成の際に加水分解されたセルロースの重量は数 ng であり、ピット体積がセルロース酵素分解をアッセイする超高感度な指標であることもわかった。

昨年度は数値シミュレーションによるピット形成過程の解析も試みたが、測定の時間分解能が低いために実験とシミュレーションの比較が困難であった。そこで新たな3Dレーザー顕微鏡(レーザーテック社製Optelics Hybrid)を導入した。高速イメージングが大きな特長の新装置は4つのピットの体積を約20秒で測定可能であり、測定の時間分解能を大幅に向上することに成功した(Fig. 6)。他にもゼラチンゲルを基質としたプロテアーゼの活性測定、さらには酵素加水分解を利用したゲル表面のパターニングに向けた予備的検討を進めた。

これらと並行して深海から分離した新規微生物が生産するセルラーゼの解析も進めた。太陽光が届かず光合成とは無縁の深海に生息する微生物が、進化・適応の過程で獲得したセルロース分解のメカニズムと陸上生物のセルロース分解メカニズムには様々な違いがあると予想される。昨年度は、GE09 株および TYM08 株のドラフトゲノムシーケンスを取得し、セルラーゼをコードしていると思われる遺伝子を複数同定した。現在、組み換え実験によるセルラーゼの発現およびその機能解析を東京大学のグループと共同で進めている。

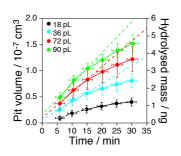


Fig. 4. Change of the volume of the pit formed after depositing various amount of the cellulase solution.

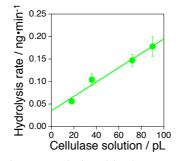


Fig. 5. Relationship between measured hydrolysis rate and the amount of deposited cellulase solution.

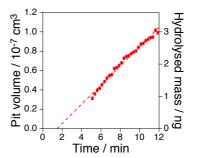


Fig. 6. Change of the pit volume measured by the new instrument. Time resolution of the measurement is significantly improved.

- (1) Rawlings, A, E.; Bramble, J. P.; Staniland, S. S. Soft Matter 2012, 8, 2675-2679.
- (2) Deguchi, S.; Tsudome, M.; Shen, Y.; Konishi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. Soft Matter 2007, 3, 1170-1175; Tsudome, M.; Deguchi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. Appl. Environ. Microbiol. 2009, 75, 4616-4619.

所属班:B01

所属機関:大阪工業大学

氏名:藤井秀司

所属機関住所:〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1

e-mail: syuji.fujii@ oit.ac.jp

研究キーワード:微粒子、リキッドマーブル、泡、界面

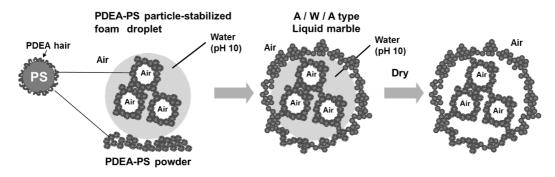


微粒子由来凹凸構造を利用する気液分散体の安定化

Stabilization of Gas-Liquid Dispersed Systems Utilizing Rough Surface Structure Formed by Particles

微粒子が気液界面に吸着することでリキッドマーブル(LM, Water-in-Air 型分散体)、 泡(Air-in-Water 型分散体)の安定化が可能であることが知られている⁽¹⁾。微粒子の界 面吸着現象は界面張力を駆動力としており、現行の重力支配下における他律的エネルギ 一消費型のものづくりに対し、自律的省エネ型のものづくりを可能にする。

これまでに、発表者らを含めた数研究グループによって、疎水的表面を有する粒子は LM⁽²⁾を、親水的表面を有する粒子は泡⁽³⁾を安定化し、単一粒子表面への水の濡れ性が、分散系を決定する重要な因子であると報告されてきた⁽¹⁾。しかし発表者らは最近、親水的表面を有する一種類の高分子粒子で、LM および泡、両系を安定化できるという、単一粒子表面への水の濡れ性だけでは説明できない興味深い現象を見出した。粒子集合体が界面に吸着することで分散体が安定化している事実を考慮に入れると、この現象を理解するには、粒子集合体が形成するサブセルラーサイズの凹凸を有する表面における水の濡れ性に着目することが重要との着想に至った。



Scheme 1 Diagram illustrating preparation of air-in-water-in-air (A/W/A) type dispersed system

高分子粒子乾燥体の走査型電子顕微鏡観察の結果、サブミクロンメートルサイズの粒子から形成される数十ミクロンメートルの粒子凝集体を確認した。このことから、LMの作製に用いる粒子乾燥体表面には粒子の凝集体由来の凹凸が存在するといえる。粒子乾燥体上における水滴の接触角を測定した結果、118°と求まり、親水的に振舞う粒子表面(接触角52°)とは異なり、撥水性を示すことが明らかになった。これは、凹凸を有する粒子乾燥体表面の凹部に空気が存在

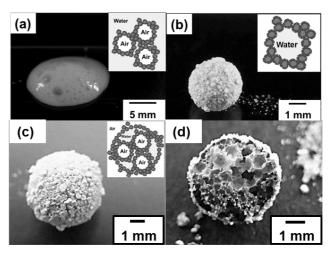


Figure 1 Digital photographs of (a) PDEA-PS particle-stabilized foam, (b) liquid marble stabilized with PDEA-PS particles, (c) A/W/A type liquid marble and (d) cross section view of the dried A/W/A type liquid marble.

し、疎水性表面として振る舞う準安定 Cassie-Baxter 状態をとったためだと考えられる。 Figure 1 (a)および(b)に、高分子粒子によって安定化された泡および LM のデジタルカメラ写真を示した。粒子安定化泡 (Figure 1 (a))を高分子粒子乾燥体上に滴下して転がすことで、A/W/A型LMの作製に成功した(Figure 1 (c))。また、Figure 1 (d)に乾燥後の A/W/A型 LM の断面のデジタルカメラ写真を示した。断面図から内部に多数の空洞を確認した。これは、内部に導入された泡が乾燥したものだと考えられる。以上の結果から、濡れのモードの違いを利用することで、粒子安定化泡を大気中で安定化した A/W/A型 LM の作製が可能であることを明らかにした。

References

- (1) (a) Fujii, S.; Murakami, R. KONA Powder Particle J. **2008**, 26, 153-166.; (b) McHale, G.; Newton, M. I. Soft Matter **2011**, 7, 5473-5481.
- (2) a) Dupin, D.; Armes, S. P.; Fujii, S. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 5386-5387. b) Fujii, S.; Kameyama, S.; Armes, S. P.; Dupin, D.; Suzaki, M.; Nakamura, Y. *Soft Matter*, **2010**, *6*, 635-640. c) Fujii, S.; Suzaki, M.; Armes, S. P.; Dupin, D.; Hamasaki, S.; Aono, K.; Nakamura, Y. *Langmuir*, **2011**, *27*, 8067-8074. d) Fujii, S.; Aono, K.; Suzaki, M.; Hamasaki, S.; Yusa, S.; Nakamura, Y. *Macromolecules* **2012**, *45*, 2863–2873. e) Ueno, K.; Hamasaki, S.; Wanless, E. J.; Nakamura, Y.; Fujii, S. *Langmuir* **2014**, *30*, 3051-3059.
- (3) a) Fujii S.; Ryan, A. J.; Armes, S. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 7882-7886. b) Fujii, S.; Iddon, P. D.; Ryan, A. J.; Armes, S. P. *Langmuir* **2006**, *22*, 7512-7520. c) Fujii S.; Mochizuki, M.; Aono, K.; Hamasaki, S.; Murakami, R.; Nakamura, Y. *Langmuir* **2011**, *27*, 12902-12909.

所属機関:株式会社ペコIPMパイロット

氏名:浦野 知

所属機関住所: 〒860-0004熊本県熊本市中央区新町4

丁目4-7

研究キーワード: scaling, animal physiology,

population ecology, integrated pest management(IPM), egg shell

公開講演会 下澤名誉教授古稀記念特別企画

シュミットニールセンの「スケーリング:動物設計論」を翻訳 して~下澤教授に教えられたこと

Japanese translation of "Scaling: Why is animal size so important" and

What I've been taught by Professor T. Shimozawa

1. 下澤楯夫「動物比較生理学講義」

下澤教授の生理学の講義を受けたのは、1984年であったか、85年であったか、その両年であったか、すでに記憶が曖昧になっている。なにしろこわい先生だった。数学の苦手な生物学志望学生には、難しい内容だった。ただ、毎回、思考上の石積みの練習をするような喜びがあった。練習に使う石は、熱や光などの概念と動かしがたい法則である。その講義には、名言がちりばめられていて、なかでも、生物学を生業とする覚悟について語られた言葉を、その後、私は何百回となく、仕事仲間に伝えてきた。曰く、「物理学、化学は、道具やものさしにつけられた名前だ。だから、物理学者や化学者は、なにか持ってこられたときに、"これは、うちの道具では測れません。"というときがある。生物学は、"生物"という対象につけられた名前だ。だから、なにか生きものを持ってこられたら、なにがなんでも、このわけのわからないものを測らなければならない。そのために、物理の道具も化学の道具も使う。使えなかったら、物理や化学の専門家に、"鍛え直せ"と突き返すことができる。」

いま、私は、農業生態系に関する情報サービスを仕事としている。特に、わけのわからない作物の病気や害虫の個体群を、いろいろな道具で測る。そのとき、"分野外です"と逃げることはできない。なんとか、測ろうとする。繁殖して、増えたり減ったりするもののすべてが当社の取扱い対象である。特に、数理モデルと統計手法を専門的に使う。測れないときには、「鍛え直せ」「鍛え直せ」と、自分に言い聞かせながら、数学を生

業とする人に教えを乞いに行く。

その下澤教授の動物比較生態学では、K. シュミットニールセンの"Animal Physiology - Adaptation and Environment"を教科書として用いていた。その講義の終わり近く、「これから、本で勉強するなら、一人の著者が書いたものを読みなさい。共著だと、考え方や思想がぼやける。一人の著者が、一つの視点、一貫した思想のもとに著した本を選びなさい。」と言われた。考え方を確立すべき時期の学生に向けた言葉だったが、今でも未知の分野を学ぶとき、使える教えである。

そのとき、勧められた幾冊かのうちのひとつが、教科書と同じくK. シュミット・ニールセンの" Scaling *Why is animal size so important?* "であった(Fig.1)。

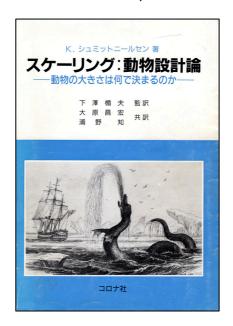


Fig.1 Japanese translation of "Scaling: Why is animal size so important" (Knut Schmidt-Nielsen, 1984)_o

2. シュミットニールセンの「スケーリング:動物設計論」を翻訳して

そんなわけで、数年後、農学部で Scaling の本読み会を主催した(1990年~'91年)。農学部と理学部の大学院生が主体だった。そこへ思いがけず下澤教授が参加してくださったので、読みと理解は格段に深まった。

素晴らしい本だった。どの章においても、生きものに物理法則が与える制約と可能性のせめぎあいが、鮮明なイメージの連続で描き出されている。なかでも第4章 卵のスケーリングに、私は夢中になった。鶏卵の殻には直径約 17μ mの細い穴が、およそ 1万個開いている、これらすべてを寄せ集めると面積約 $2.3 \,\mathrm{mm}^2$ 、長さ(すなわち卵殻の厚さ)約 $0.35 \,\mathrm{mm}$ の管になる。また、実際に卵殻越しに気体を拡散させることによ

って、この仮想の「管」の形状を測ることができる。この管は、卵の内側からの水分の蒸散を抑えつつ、外側からの十分な酸素供給を担う。私は、物理的制約と、概念上の「管」の計測方法に大いに魅かれた。本読み会のメンバーであった大原昌宏氏は、系統分類学が専門である。それで、卵殻の形状・構造の系統に興味を持たれたのではないかと思う。 二人で、いろいろな鳥の卵の電子顕微鏡写真を撮影した。

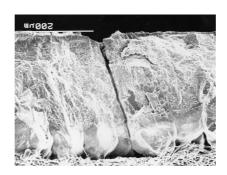


Fig.2 SEM image of the egg shell of the chicken, *Gallus gallus domesticus* (cross-section surface).

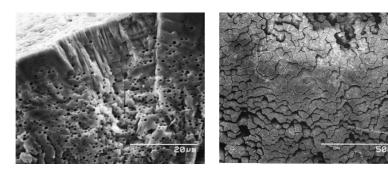


Fig.3 SEM image of the egg shell of the Grey Wagtail, *Motacilla cinerea* (cross-section surface).

Fig.4 SEM image of the egg shell of the Japanese Quail, Coturnix japonica (surface).

ニワトリの卵の殻の断面には、本書において記述されているような、見事な細い管があった(Fig.2)。ところが、キセキレイの卵では、殻の空気穴はスポンジ状になっており、1本1本の細い管ではない(Fig.3)。また、ウズラの卵殻の表面には、微細なタイルを敷き詰めたような構造が見られる(Fig.4)。

さて、先述の本読み会がもととなって、後に下澤教授の提案で、この本の翻訳をする ことになった。作業にあたったのは、下澤(監訳)、大原、浦野の3人である。

当時は、ワープロもなかったので、分担して訳文をつくり、それぞれタイピストに打ってもらって3人で回し読みし、修正意見を加筆し、分担者が再度検討して修正する、

それをまたタイプしてもらい回し読みするという作業を繰り返した。私の拙い読解力では、翻訳の助けになったのか、邪魔をしたのか、今では疑問に思うが、とにかく得難い訓練を受けたことは間違いなかった。

この訳本には、原著にはない大きな特典がついている。それは、下澤教授による「訳註」である。原著には、AからEまで、5つの附録がついている。これらはシンボル、アロメトリー式の解説の他、基本的な数式とその説明の必要最小限のものである。訳本では、これらに加えて、A´、およびFからLまで、豊富に図を使った8つの附録が「訳註」として加えられている。いずれも、物理法則と生物のメカニズムを下澤教授が明快に解説したもので、「訳註」とするより、小冊子にして傍らに置きたいような見事な内容となった。

3. 測れないものを測れるように

下澤教授の講義のなかでも、強烈な印象を受けたのは、細胞膜の構造の解明であった。まだ、電子顕微鏡もない時代に、膜を透過する物質の濃度変化のグラフのみを使い、いかにして、未知の構造を推定したのか。そこで用いたドナン-ギブスの膜平衡の難しい数式のすべてを思い出すことはできないが、そのプロセスと思考法は、いまでも仕事をする際の強固な礎となっている。つまり、見えないものを見えるように、測れないものを測れるようにする、それが道具としての科学である、という考え方である。望遠鏡しかり、万有引力の式しかり。後年、個体群生態学(Population ecology)の使い手として、これを総合的害虫管理(IPM: integrated pest management)に役立てるために会社を設立した際、名称を「株式会社ペコ I P Mパイロット(Peco IPM Pilot Co., Ltd)」としたのも、科学が真に人の役に立つことができるなら、大学以外でもこれを道具として必要とする人たちがいるに違いないと考えたからである。会社パンフレット1号のおもて面(Fig.5)には「見えないものを見えるように、測れないものを測れるように」と記し、裏面には「データが採られたときに、景色の向こう側にあったものを再構成します。」と宣言した。「下澤生理学」が、遠いところで実を結んだ事例として紹介する次第である。



Fig.5 Brochure of Peco IPM Pilot Co., Ltd.

所属班:総括班 評価グループ

所属機関:北海道大学 名誉教授

氏名:下澤 楯夫

所属機関住所:〒060-0808札幌市北区北八条西5丁目

e-mail: tsmz@es.hokudai.ac.jp

研究キーワード:空気と水、物理的性質、生物進化、多様性



マーク・デニー著「空気と水」について

On book "Air and Water" by Mark Denny

1. はじめに

生物規範工学の普及に向けた教科書の一つとして、Mark Denny 氏の著作「Air and Water」を翻訳出版しようと考えている。この本は 1988 年の全米動物学会年会で Denny 氏が行ったシンポジウム講演がきっかけになっている。生物学者が空気と水の中の生物の違いをどう捉えているかの幾つかの講演の導入部分として、空気と水の物理 を簡単にまとめて話すように頼まれて行ったものである。

「まえがき」によれば、Denny 氏は二つ返事で引き受けたものの、シンポジウムが

近づいてから不安に駆られた。流体の物理が生物に与えた影響については、入門書に書き古されている。それ以外に何を話せば良いのだろうか?彼は焦って図書館へ行き、急いでHandbook of Chemistry and Physicsをめくり始めた。数ページ行ったところで、少し落ち着いて来た。同じ温度変化に対する粘性率の変動は、水より空気の方が大きいことが出ており、面白そうに見えた。更に数ページ進むと、低周波音は乾燥空気中よりも湿潤空気中を遠くまで届くことを発見した。これには何か生物学的な影響があるに違いない。それから、空気の電気抵抗の記載があり、それは海水の200億倍だと書いてあった。ヤッタ!これは何かある。さらに、気体分子の空気中での拡散係数は、水中で

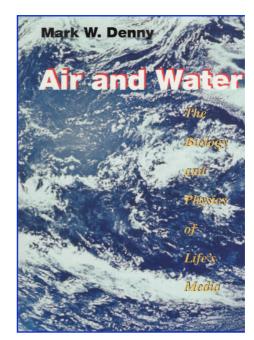


Fig. 1 "Air and Water" by Mark Denny, Princeton University Press, 1993

のそれの10,000倍もある。 この違いは代謝にどんな 影響を及ぼすのだろう か?ページをめくればめ くるほど、益々面白くなり、 さらに追いかけ続けた。

その「あとがき」で、 Denny氏は「ここまでの 14 章にたくさんの理論 を紹介した。しかし、そ の価値はそこに並べた 結論にあるのではなく、 読者が自分の周りの世 界から何か新しく興味

著名な生物学者J.S.B. ホールデンの一般向け講演の後で、 信心深いある御婦人の質問: ホールデン先生! たとえ進化に何十億年も使えたとしても、たった一個の細胞から、骨や筋肉、神経や心臓、感情を持った脳をそなえた複雑な人体にまで辿り着くことが出来ないのです。」 J.S.B.ホールデンの答え: しかしマダム、あなたご自身がおやりになったことなのですよ。それもたったの九ヶ月しかかけずに! まず、自分自身を含めて、現実に生物がいることを、我々の技術と学理の大前提にしよう。 物理学崇拝 盲信 妄想)からの訣別: 生物が生き延びている技術 仕組)から出発して、自然法則 原理)を再構築する気概を持とう。

Fig. 2 We are biological existence, and therefore should rely on Biological Sciences as the bases for the sustainable engineering.

深いことを見つけ出す可能性にある。著者が望んでいるのは、何時の日か読者が腰かけて、風に揺れる樹、歩き回る甲虫、池に躍るさざ波を見ていて、大きな疑問についてのヒントの一片が突然心の中に納まること、である。」と述べている。

これは正に、これまでの何度かに亘る本領域の集会で、演者が生物規範工学のあるべき姿として、皆さんに託して来た望み (Fig. 2)とほぼ同じモノである。しかし、我が国の生物学者の多くは、物理や数学が嫌いだから生物学者になっており、我が国の工学者の大部分は大学レベルの生物学教育を受けたことが無い。この「不」自然科学が作り

出す持続「不」可能社会から脱却するためには、次世代の生物学者をもっと物理に強く、次世代の工学者をもっと生物に明るくする必要がある。それが、この国の生物規範工学が先ず到達すべき目標と採るべき道である。勿論、望むだけで現実が変わる訳ではないから、現状を変える作業を始めるしかない。その一つが本書の翻訳出版である。

2. 内容の例示

少し風変わりな、その内容を幾つか紹介する。誰も が一番良く知っている水と空気の物理的な違いは、密 度すなわち同じ体積を占める流体の質量である。1 リ ットルの水は1リットルの空気の約800倍の質量を持

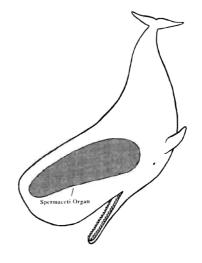


Fig.3 Sperm whale acts as an aquatic "hot air balloon".

っていて、この著しい違いが幾つかの重要な生物学的な結末をもたらす。例えば、魚はヒレを動かすことなしに海底から少し上を漂うことが出来るが、鳥は翼を必死で打たなければホバリング出来ない。熱気球のように空中に浮かぶ陸棲生物はいない。しかし、熱気球として移動する方法を見出した水棲生物がいる。マッコウクジラである(Fig. 3)。このクジラの前頭部には、一匹で2.5トンにもおよぶ大量の白濁色の脳油(鯨蝋)で満たされた器官がある。この脂質の混合物は、33~29°Cの範囲でかなりの密度変化を見せる。温度が低くなると脳油は"凍って"高密度になる。この温度範囲における脳油の密度変化は1~2%で、おなじ温度範囲での水のそれ(約0.1%)よりかなり大きい。このクジラは脳油の温度を素早く変えることが出来て、その浮力を調節できる。

「拡散」の章には、昆虫で酸素を細胞に送り届けている小さな管は、実は行き止まりの盲管で、能動的には換気できないことが書いてある。この細い盲管(二次、三次の気管および気管小枝)の一番細いものは、直径がわずか 200 nm しかなく、長さは 1 mm にも達する(Fig.4)。直径が酸素分子の平均自由行程(約 80 nm)に近い小気管は、

拡散輸送効率が低下する。昆虫の飛翔筋で は、これらの小さな換気されていない管が、 莫大な時間率で周囲の細胞に酸素を供給 できなければならない。飛翔中の昆虫の筋 肉 1 m³は、酸素を毎秒 6.5 モル消費する。 言い換えると、筋肉 1 m³毎に、空気 1 m³ 中にある酸素全てを1.3秒で使い果たして いる。これらから計算すると、気管の最大 長は約 1.2 mm になる。 もし昆虫が空気か ら筋肉までもっと長い経路を持ちたいの なら、拡散だけでは不十分である。これが、 大型の昆虫はその主幹気管を能動的に換 気しなければならない理由である。Ogの水 中での拡散係数は空気中での 1/10,000 だ から、同じ型の拡散に依存した呼吸系は、 水中では全く上手く行かない。

「水面波」の章には、水面に浮かんだ物体は、その長さに等しい波長の波を作り出すことが書いてある。波の伝わる速さは波長によって物理的に決まっている。カモな

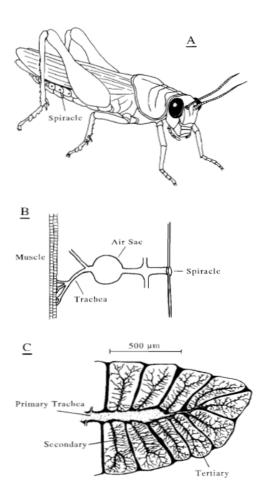


Fig. 4 Spiracle (A), tracheae (B) and further ramification to smaller tracheoles (C).

どの水鳥がその速さ以上のスピードで移動しようとすると、自分が作り出した波に自分の体を乗り上げる仕事、すなわち造波抵抗を受けることが説明されている。

「光」の章では、水は空気よりも強く 光を吸収するので、光は媒体としての水 の中へは比較的短い距離しか入り込めな



Fig. 5 A swimming duck creates a wave equal in length to the duck's "hull".

いことが示されている(Fig. 6)。光は 50 m の空気を、強度を全く減らすことなく横切る。しかし、同じ厚さの水を横切れば、強度は著しく減衰する。入射した青色光の78%だけはまだ残っているが、入射赤色光は実質的に何も残らない。水による光の減衰は、生物に影響を与える。先ず、光の急激な減衰は、水棲植物が効率的に光合成出来るのは、水面近くだけであることを意味する。弱い光条件に特化適応した植物でさえ、約 200 m より深いところでは効率的な光合成は出来ない。海洋の平均深度は約 4000 m であるから、光の減衰特性は、

地球の水の約 95%を光合成を 行う植物の生息域から排除して しまっていることが分る。

3. おわりに

Denny 氏と同じく「何時の日にか、物理に強くなった次世代の生物学者と、生物に明るくなった次世代の工学者が、生物の生きる技術や常温常圧での製造プロセスの秘密を我々の技術に転換できることを願って」、本書の翻訳出版を実現したい。

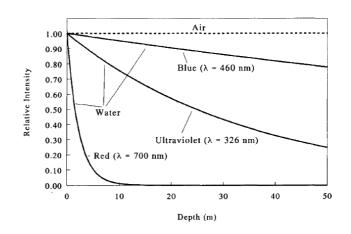


Fig. 6 Visible light passes through 50 m of air un-attenuated, whereas the intensity of light passing through 50 m of water is drastically reduced.

参考文献

- (1) Mark Denny, Air and Water, Princeton Univ. Press; Princeton, New Jersey, 1993
- (2) Clerke M. R., The head of the sperm whale. Sci. Amer: 1979, 240(1):128-141

謝辞 演者からの日本語版への翻訳の申し出を快く承諾いただいた Mark Denny 氏に感謝する。