

(4) トピックス (PEN より)

トンボの世界は不思議が一杯

産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門
生物共生進化機構研究グループ 二橋亮

「秋津島（秋津洲）」という単語をご存知だろうか。「秋津島」とは、古事記や日本書紀に登場する日本の古名である。秋津とはトンボのこと。つまり古代の人々は日本のことを「トンボの国」と呼んでいたのである。古くは弥生時代の銅鐸にもトンボの絵が描かれているし、現在でもトンボのモチーフが描かれた日用品は、ごく普通に見ることができる。童謡「赤とんぼ」は、子供から老人まで、ほとんどの日本人が口ずさめる数少ない歌と言っても過言ではないだろう。アキアカネの群れ飛ぶ空は、かつては日本の秋を代表する光景でもあった（図 1）。このように、トンボは日本人にとって、とりわけ馴染みの深い昆虫の一つといえそうである。

一方で、海外ではトンボはどちらかというと人気のない昆虫というイメージがある。トンボの英語名 "dragonfly"（竜

の虫）"には、不吉な虫という意味合いがこめられているという。ロシアではトンボとバッタに同じ "стрекоза" という単語が充てられており、トンボに対する関心が低かったことがうかがえる。これは、トンボの幼虫を示すヤゴという単語がある日本とは、大きな違いともいえる。

世界のトンボ、日本のトンボ、つくばのトンボ

それでは、トンボは世界にどのくらいの種類がいるのだろうか。現在までに記載されている種は、世界で約 6,000 種、そのうち日本から記録されているのは 203 種である [1]。ちなみに筆者が在住する茨城県からは 91 種が見つかっており [2]、産総研つくばセンターの周辺だけでも 60 種ほどが現在も生息している（図 2）。正岡子規の詠んだ「赤とんぼ、筑波に雲もなかりけり」という有名な俳句があるが、新型農薬の影響などで全国的に激減しているアカトンボの仲間も、つくばでは今でも多くみることができる。それに対して、筆者の出身地である富山県では、1998 年を境に個体数が激減し、アキアカネ、ナツアカネ、ノシメトンボの最も普通に見られた 3 種類のアカトンボが、2012 年に改訂された富山県版レッドデータブックに揃って取り上げられる事態に陥っている [3, 4]。筆者がつくばでアカトンボの研究を行っているときに、研究所の構内でアカトンボの収集に苦労しなかったのは、幸運だったと言えるかもしれない。



図 1 秋の青空を群れ飛ぶアキアカネ（生態写真は全て二橋亮撮影）。



チョウトンボ（成熟オス）



ナツアカネ（交尾）



アオヤンマ（交尾）



マルタンヤンマ（成熟オス）



キイトンボ（交尾）

図2 産総研つくばセンター内でみられるトンボの仲間。

意外に少ないトンボの研究

一般の人に馴染みの深いトンボであるが、研究の分野ではどのくらい着目されてきたのだろうか。行動学や生態学の分野では、トンボを用いた研究が進められてきた [5, 6]。カワトンボの仲間のオスが交尾の際に精子の置換を行うことは、教科書にもよく取り上げられている [7]。また、保全生物学の分野では、トンボが水辺環境のバロメーターとされることも多い。トンボのすぐれた飛行能力は、昆虫型羽ばたき機のモデルとなっていたり [8]、トンボの翅の構造を模倣した風力発電のプロペラが開発されたりもしている [9]。その一方で、発生学や生理学、分子生物学など、トンボの個体が持つ特徴・性質を実験室内で調べるという観点からは、世界的に見てもほとんど着目されてこなかった。たとえば、アカトンボの赤い色素が何であるのか、というレベルのことも、筆者が今年報告するまで分かっていなかったのである。これには、トンボは飼育が大変、採集が難しい、益虫なので害虫防除の面から研究する必要性がなかった、などいくつかの理由が考えられると思うが、先

に述べたように海外ではトンボに対する関心が薄かったという側面もあるのかもしれない。身近なトンボには、以下にあげるように基礎的な面から、応用的な面まで、多くの興味深いテーマがあるように感じている。筆者は、子供の頃からトンボが好きだったこともあり、トンボの国日本の代表として、トンボを用いた研究を世の中に広めることを、密かな目標としている。

トンボに見られる色と模様の多様性

トンボに見られる大きな特徴としては、色や模様の多様性があげられる。トンボは昼行性で、聴覚や嗅覚に比べて視覚がよく発達しているため、おもに見た目で相手を判断している。トンボのなかには、オスとメスで色や模様が大きく違うだけでなく、成虫になってからの成熟度合いによっても色を大きく変化させる種も多い [1]。これは他の多くの昆虫には見られない特徴である。たとえばシオカラトンボはオスが成熟すると麦わら色から水色に、アキアカネなど

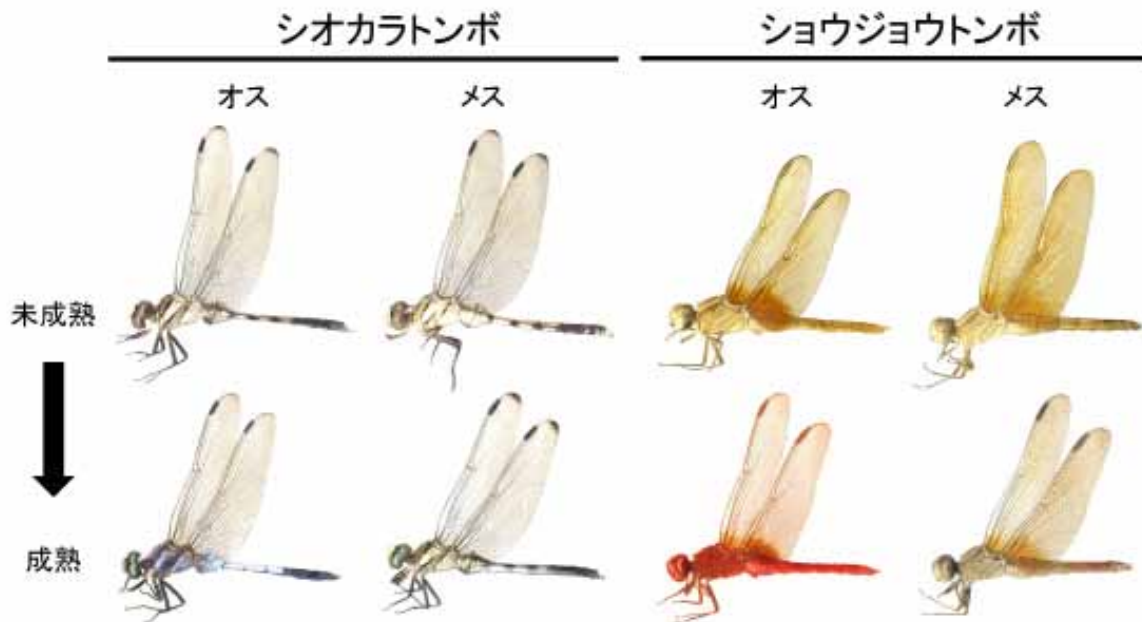


図3 シオカラトンボとショウジョウトンボの体色変化。

アカトンボの仲間は黄色っぽい色から鮮やかな赤色に変化する（図3）。色の変化は、繁殖行動の際のオスとメスの認識や、オス同士の縄張り争いなどに重要と考えられている。さらに、多くのトンボで、オスそっくりの色や模様を持つオス型のメスが時々見つかる。オス型のメスは、産卵する際に交尾相手以外のオスからの干渉を避ける効果があるなどと考えられているが、一部のイトトンボの仲間を除いて詳しく研究された例は少ない [5]。また、同じ場所に複数の近縁種が生息している場合、以下に紹介するようにお互いの種を見分けるために色や模様が多様化している場合もある。

日本で最も繁栄しているトンボの仲間は？

近縁な種のまとまりは、属としてグループ分けされているが、日本のトンボのなかで最も種数の多い属は何であろうか。答えは俗にアカトンボと称されている「アカネ属」で、21種が知られている。なお、アカトンボという和名の種類はなく、単にアカトンボという個体数の多いアキアカネやナツアカネを指していることが多い [1]。次に種数の多い属は、こちらもお馴染みのシオカラトンボ属で、日本から9種が知られている [1]。アカトンボとシオカラトンボは、どちらも歌のモデルになっているだけでなく、どちらも喜多川歌麿の浮世絵「画本虫選」にも登場している。これら2種は、一般の人々もよく目にするという点からも、日本を代表するトンボといえそうである。

興味深いことに、アカネ属は一つの場所で同じ時期に10種類以上見られることもある。アカネ属は、アカトンボと呼ばれるように赤くなる種が多いのだが、中には青いアカトンボのナニワトンボや黒いアカトンボのマダラナニワトンボとムツアカネ、生涯黄色っぽいまま赤くならないアカトンボのオオキトンボなど変わり種のトンボもいる。シオカラトンボ属でも、赤くなる種のコフキショウジョウトンボや、生涯麦わら色のままの種のハラボソトンボも知られている（図4）。近縁な種間でも、さまざまな色のパターンがあることから、これらのトンボは体色が形成されるメカニズムや、種分化の過程で体色が進化していく様子を調べる上で、格好の材料といえそうである [10]。



図4 体色の異なる近縁種：オオシオカラトンボのオス（上）とコフキショウジョウトンボのオス（下）。

アカトンボの体色変化メカニズム

それでは、トンボの体色はどのように発現しているのだろうか。カラフルなトンボの色の正体については、アオハダトンボの構造色 [11] など一部の例を除いて、ほとんど分かっていないのが現状だが、筆者は最近アカトンボの体色変化が、同じ色素の酸化還元反応によるという現象を、動物から初めて発見した [12]。アカトンボの赤い色素を分析したところ、キサントマチンと脱炭酸型キサントマチンという2種類のオモクローム系色素が主要な構成要素であることが分かったが、これらは2種類とも酸化還元反応によって色が可逆的に変化する色素であった。酸化還元電流の測定により、色素の還元型の割合を測定すると、成熟オスのみ90%以上の色素が還元型になっているのに対し、メスや未成熟のオスでは酸化型の色素もそれなりに持っていることが分かった。さらに興味深いことに、還元剤として機能するビタミンCを黄色いトンボに注入すると、通常は赤くならないメスまでもが、成熟オスのように赤く変化してしまうのであった (図5)。



図5 還元剤 (ビタミンC) の局所投与に伴うアカトンボの体色変化。矢印で示した部分に還元剤を投与した。

真夏の紫外線に耐えるトンボたち

還元型の色素を蓄えたトンボは、特に真っ赤なオスでは強い抗酸化能を持っていることも明らかになった (図6)。アカトンボの仲間は、オスが日当たりの良い場所で縄張りを作るが、そのような場所では紫外線によって発生する活性酸素からの酸化ストレスに対抗しているのかもしれない。そういえば、真っ赤なショウジョウトンボのオスは、日本で最も赤いトンボともいえるが、真夏に日向の池で縄張りを作る姿がよく見られる。ヒトが熱中症で倒れそうな炎天下で静止しながら縄張りを作るショウジョウトンボの赤いオスは、強い抗酸化能という他のトンボにはない性質を備えていたのである。

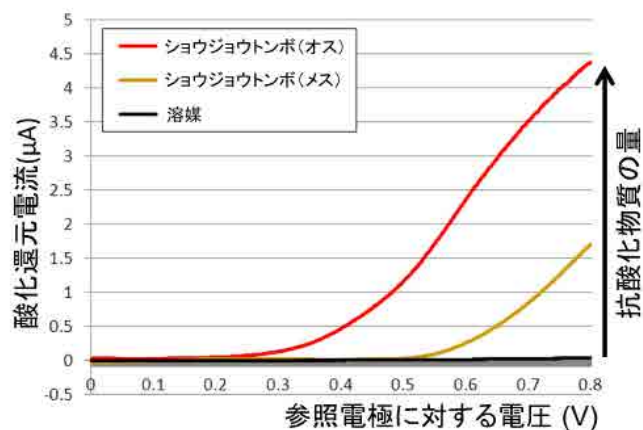


図6 酸化還元電流の測定による抗酸化物質の量の比較。赤い成熟オスでは抗酸化物質の量が多いことが確認された。

トンボは水辺環境のバロメーターともいえるが、真夏に日差しが強い都市部の公園で見られる種類は非常に限られている。そのような場所で見られる代表的な種が、真っ赤なショウジョウトンボと水色のシオカラトンボといえる。実はシオカラトンボについても、ショウジョウトンボとは全く別の方法で日差しに対抗していることが筆者らの研究でわかってきた。これに関しては、近い将来報告できればと考えている。

水に潜って産卵するトンボ

物質が水をはじく能力を撥水性とよぶが、たとえばハスの葉の表面や、渡りをするチョウとして有名なアサギマダラの翅の表面には、超撥水性がみられる [9]。トンボの撥水性に関しては、これまで詳しく調べられていなかったが、トンボのなかには水に潜って数十分にわたって産卵を続け、水中から脱出すると同時に飛び去って行く種も存在する。水中で産卵する種は、翅の表面に細かい毛が生えており、空気の膜を作ることでも水中でも呼吸ができると考えられている [13]。このような構造は、水陸両方に適応した生物素材としても興味深い。

越冬するトンボ

多くのトンボは、卵もしくは幼虫で越冬するが、なかには成虫のまま厳しい冬を過ごす種も知られている。日本には成虫で越冬するオツネトンボ、ホソミオツネトンボ、ホソミイトトンボの3種類のトンボが分布しており、いずれも体の細いイトトンボの仲間である。ホソミオツネ



ホソミオツネトンボ（越冬中の未成熟オス）



ホソミオツネトンボ（春に水辺で見られる成熟オス）

図7 成虫で越冬するホソミオツネトンボの体色変化。

ンボはつくば市周辺でもよく見かけるが、冬の間は林の縁で腹部を伸ばして止まって、見事に枯れ枝に擬態している（図7）。細いトンボに雪が積もったり、霜が降りたりすることがあっても死ぬことはなく、強い耐寒メカニズムを備えていると考えられる。その具体的なメカニズムはまだ分かっていないが、体液や細胞が凍るのを防ぐために、不凍タンパク質などが発現しているのかもしれない。これらのトンボは、暖かい冬の日には飛び回ることもあり、採集したトンボを冷蔵庫に1カ月ほど入れておいてから取り出すと、すぐに動き出すことができることから、環境変化にすぐに対応できる点でも興味深い。さらに、ホソミオツネトンボは冬を越すと、枯草色から鮮やかな水色に変化するが（図7）、季節に応じた体色変化が生じる仕組みも、現時点では全く分かっていない。

渡りをするトンボ

トンボは、その優れた運動能力が着目されることがある。

マルタンヤンマのオス（図2）は、およそ時速 50 km/h で飛翔するという観察例もある [14]。トンボのなかには、長距離を移動してくる種類も知られている。夏になると、橙色のトンボが駐車場や芝生の上で群れているのをよく目にするが、これは南方から毎年飛来してくるウスバキトンボである（図8）。ウスバキトンボは夏の間、世代交代を繰り返しながら日本全国のみならず世界中で見られるが、幼虫は冬の寒さに耐えられず、日本では八重山諸島をのぞいて冬を越せないと考えられている。また、オオギンヤンマやハネビロトンボなど、いくつかの南方系の種類は、台風が通過した後などに、南西諸島から飛来した個体が、北海道を含めた日本各地から記録されている [1]。筆者が興味深く感じているのは、ロシア方面から飛来してくる小さなアカトンボの仲間のタイリクアキアカネやオナガアカネである（図8）。アキアカネを一回り小さくしたようなこれらのトンボは、日本海側で秋にほぼ毎年見つかっているが、日本で発生することは極めてまれで、現時点では定着していないと考えられている。北西季節風が強まる10月中旬に、筆者の地元の富山県の海辺で空を見上げていると、



ウスバキトンボ（成熟オス）



タイリクアキアカネ（成熟オス）

図8 海を越えて飛来するウスバキトンボとタイリクアキアカネ。

タイリクアキアカネやオナガアカネが飛んでくることがある [15, 16]。これらのアカトンボが飛んでくるのは、だいたい 12 時から 14 時くらいことが多い。10 月中旬は朝の冷え込みが強いので、これらのトンボが飛びたてるようになるのは、午前 8 時くらいである。仮に、午前 8 時にロシアを出発して、昼過ぎに富山に来ていけるとすると、時速約 300 km/h と、飛行機並みのスピードである。しかし、日本海の上空を、変温動物の小さなトンボが 10 月の寒い夜も飛び続けてくるのかというと、それも難しそうな気がする。いずれにしても、小さなアカトンボが日本海を一気に移動してくるという能力は驚異的である。将来的に発信機をつけて追跡できないものだろうか。

トンボのモデル昆虫化に向けて

最近、キイロショウジョウバエやカイコ、コクヌストモドキなど全ゲノム配列が解読された「モデル昆虫」が増え続けている。遺伝子情報が揃っているか、という点で見ると、トンボは今でも非モデル昆虫の筆頭にあげられるだろう。筆者は現在、トンボのモデル昆虫化を目指して情報の蓄積を進めている。たとえば、亜種を含む日本産の全てのトンボの種類の部分的な核 DNA の ITS 領域およびミトコンドリア DNA の 16SrRNA 領域と COI 領域の配列を既に公のデータベースに登録済みである [17]。つまり、脚 1 本あれば、DNA を解析することで日本産の全てのトンボが同定可能になっているのである。正確にはモノサシトンボとオオモノサシトンボ、ベッコウチョウトンボとスキバチョウトンボの 2 つの組み合わせは、登録した部分では種差が見られず区別できないが、そもそもこれらの種類は同種である可能性も高そうである。環境アセスメントなどで、トンボの若齢幼虫が採集された場合は、これまでは同定不能として扱われてきたのだが、重要な場合は種を特定することが可能になっているのである。DNA 解析による種の同定という点では、トンボは日本の昆虫の先頭を走っているのではないだろうか。さらに、個々の遺伝子についても、次世代シーケンサーを用いた解析を現在多くの種で進めており、トンボの遺伝子情報がモデル昆虫に追いつくように日々邁進しているところである。

References:

[1] 尾園暁・川島逸郎・二橋亮, 2012. 「ネイチャーガイド 日本のトンボ」. 532pp. 文一総合出版.

- [2] 二橋亮・山中武彦・植村好延・久松正樹, 2012. 茨城県におけるトンボ目の採集・撮影記録. 茨城県自然博物館研究報告, 15. (印刷中)
- [3] 二橋亮, 2012. 富山県におけるアカトンボ激減の実態. 昆虫と自然, 47(8): 9-14.
- [4] 富山県, 2012. 富山県の絶滅のおそれのある野生生物レッドデータブックとやま 2012. 452 pp. 富山県.
- [5] Corbet, P.S. 1999. Dragonflies: Behavior and Ecology of Odonata. 864 pp. Comstock Publishing Associates.
- [6] Córdoba-Aguilar A. 2009. Dragonflies and Damselflies: Model Organisms for Ecological and Evolutionary Research. 304 pp. Oxford University Press, USA
- [7] Waage JK. (1979). Dual function of the damselfly penis: sperm removal and transfer. Science. 203(4383): 916-918.
- [8] 田中博人・高橋英俊・下山勲, 2008. 昆虫飛翔研究用の昆虫型羽ばたき機. 下澤楯夫・針山孝彦編「昆虫ミメティックス」 pp. 716-723.
- [9] 藤崎憲治. 2010. 昆虫未来学「四億年の知恵」に学ぶ. 263 pp. 新潮社.
- [10] 二橋亮. 2010. トンボにおける色と模様の進化. 生物科学, 62(1): 9-18.
- [11] 針山孝彦. 2008. 昆虫の彩り. 下澤楯夫・針山孝彦編「昆虫ミメティックス」 Pp. 30-40
- [12] Futahashi R., Kurita R., Mano H., Fukatsu T. 2012. Redox alters yellow dragonflies into red. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(31): 12626-12631
- [13] Tsubaki Y, Kato C, Shintani S. 2006. On the respiratory mechanism during underwater oviposition in a damselfly *Calopteryx cornelia* Selys. J Insect Physiol. 52(5):499-505.
- [14] 杉村光俊, 1976. 高知県中村市におけるマルタンヤンマの観察記録. 昆虫と自然, 11(6): 33-35.
- [15] 二橋亮. 1996. オナガアカネの飛来についての観察記録. Aeschna, (32): 21-22.
- [16] 二橋亮・二橋弘之・荒木克昌. 2000. タイリクアキアカネの飛来についての観察記録. Aeschna, (37): 29-31.
- [17] 二橋亮. 2011. DNA 解析から見た日本のトンボ再検討 (1). Tombo, 53: 59-66.

日本産トンボ全種を網羅した、
最新分類による日本初のパーフェクト図鑑

ネイチャーガイド

2012年7月上旬発売

日本のトンボ

定価5,775円(本体5,500円+税) A5判・上製・532頁 ISBN978-4-8299-0119-9

●著者●

尾園 暁(おその・あきら) 1976年生まれ。神奈川県在住の昆虫写真家。日本写真家協会(JPS)、日本トンボ学会会員。共著に『沖縄のトンボ図鑑』があるほか、各種図鑑、雑誌などに写真提供多数。

川島 遼郎(かわしま・いづろう) 1969年生まれ。昆虫・生物画家。日本トンボ学会会員。共著・分担執筆に『Handbook of Zoology, Coleoptera Vol. 2』(Waher de Gruyter)、『改訂 トンボの調べ方』(文研出版)、『徹底図解 昆虫の世界』(新星出版社)など。専門書や原著論文のほか、一般・幼少向け書籍の挿画多数。

二橋 亮(ふたはし・りょう) 1978年生まれ。(独)産業技術総合研究所常勤職員。トンボをはじめとした昆虫の研究を行っている。日本トンボ学会、日本動物学会、日本進化学会会員。共著・分担執筆に『富山県のトンボ』(富山県科学文化センター)、『改訂 トンボの調べ方』(文研出版)、『分子昆虫学』(共立出版)など。



本書の特色

- ・日本産トンボ全203種を掲載した初めての図鑑
- ・プロ写真家による撮り下ろし写真
- ・今後のスタンダードとなる、DNA 解析に基づく最新の分類
- ・プロ生物画家による精密な部分図を全種掲載

- ・分布図、出現期グラフ、解説、コラムにオリジナル情報多数
- ・英語による見出しも付記
- ・高精細印刷による鮮明な紙面

科ごとに色分け、DNA解析に基づき、最新の分類順に配列

成熟の♀をはじめ、未成熟成虫や幼虫の識別ポイントを、引き出し線で表記

卵・幼虫・成虫の出現期が一目でわかるグラフ

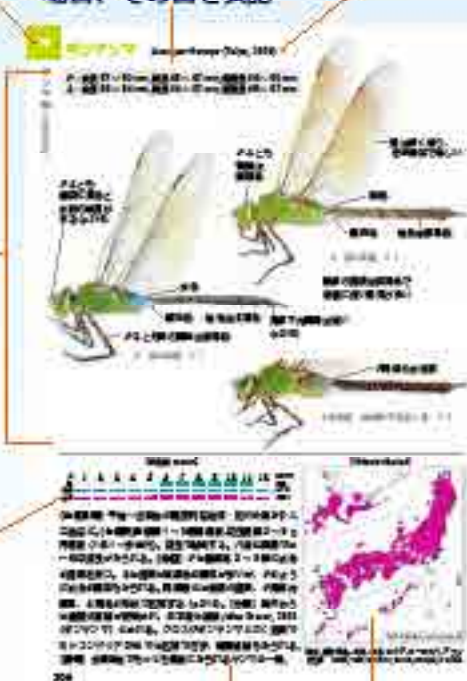
これまでの研究をふまえて新たに整理した種のオリジナル解説

環境省レッドデータリストのランクや国指定天然記念物の場合、その旨を表記

和名と学名に最新の分類を反映させた初めての図鑑

静止・飛翔・交尾・産卵・羽化などの野外写真を解説付きで掲載

全種について♂♀の同定ポイントとなる部分アップを精密線画で図示



科	属	種	分布	出現期	特徴
Zygoptera	Zygoptera	Zygoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Zygoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Zygoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Zygoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
Anisoptera	Anisoptera	Anisoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Anisoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Anisoptera	分布図	出現期グラフ	特徴
		Anisoptera	分布図	出現期グラフ	特徴

日本全国の生息状況をまとめた詳細な分布図

不思議な蝶の翅を模倣した物づくり

帝人株式会社 構造解析研究所 広瀬治子



図1 雄のモルフォ蝶

自然に学ぶ物作りの一つとして、我々は青く輝く翅を持つモルフォ蝶の自然の色について学び、それを模倣して繊維やフィルムとしての物づくりを行っている。モルフォ蝶は、北アメリカ南部から南アメリカにかけて80種ほどが生息する大型の蝶の仲間で、不規則な奇跡を描いて速く飛ぶのが特徴である。鮮やかな翅の色を持つのはオスで、ほとんどのメスはオスよりも地味な茶色であることが多い（図1）。この青く輝く翅には不思議が潜んでいる。

人間には、コバルトブルーに見える翅であるが、モルフォ蝶にはどんな色に見えるのだろうか。

色ってなに

色とは物理的な量・物質自体の性質ではなく、人間の視覚が作り出す心理的な量であり、脳が認識した感覚である。図2は人間の目の模式図である。人間の目の前面には第一

のレンズである角膜があり、まずここに光が達する。角膜は角膜上皮と実質、デスメ膜からなる約500 μm の硬いレンズで、313nm以下の短波長の光と1500nm以上の長波長の光が吸収される。次にやわらかい第2のレンズである水晶体に入り、380nm以下の光と780nm以上の光が吸収される。さらに、タンパク質でできたスポンジと水か

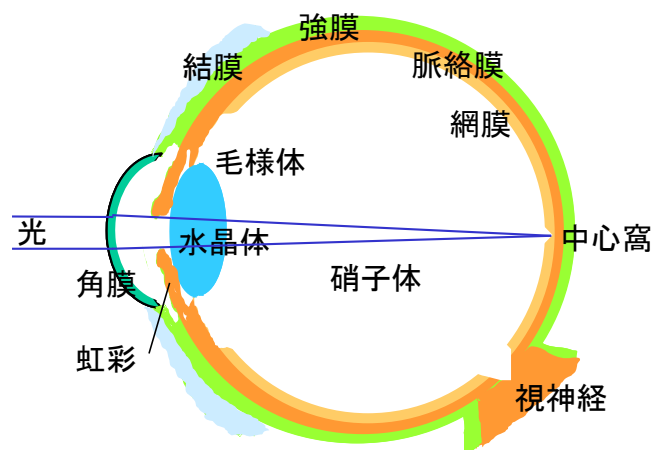


図2 目の構造

らなる硝子体を通し、380nm～780nmの光だけが網膜の視細胞に達する（図3）。このため380nm～780nmの光を可視光と呼んでいる。網膜には1億個以上の視細胞が存在し、青・緑・赤を感じる錐状体細胞と、明暗を感じる杆状体細胞が存在する。錐状体細胞には外節円板という膜構造があり、ここに光が達すると、膜にある視物質が、光を吸収して分子構造が変化し、ナトリウムイオンのゲートを閉じる。これによって細胞外にナトリウムイオンがたまって電圧が生じ、神経細胞を介して脳に刺激が伝達され、光を感じるようになるのである[1]。人間は、青・緑・赤の3色性の色覚を持つが、ミツバチは紫外線・青・緑の3色性、鳥類やアゲハは紫外線・青・緑・赤の4色性、そして多くの家畜は色覚をもっていない[2]。よって、牛や馬にはモルフォ蝶の翅は青色には見えていないはずである。

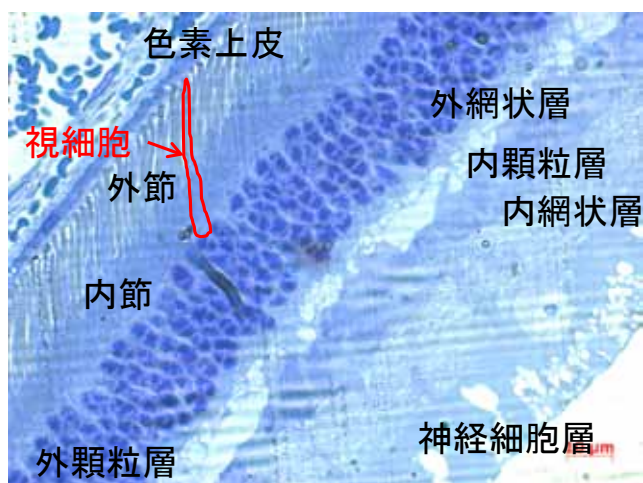


図3 網膜の光学顕微鏡像

美しい自然界の色

自然界には様々な色が存在するが、その色は「色素色」と「構造色」の2種類に大別される。前者は染料や顔料によるもので、物質中に含有された色素が補色の波長の光を吸収して残りの波長の光を乱反射することに因って発色する。後者は規則的な微細構造と光の反射・干渉によって生じる色である。この構造色には、モルフォ蝶の翅の色、玉虫の色、



図4 自然界の構造色

コガネムシの色、孔雀の羽の色、ハトの首の色、真珠の色、アワビ貝の色、イカの反射板の色、シャボン玉の色などが相当する（図4）。モルフォ蝶の翅には、青色色素は存在せず、翅の不思議な構造によって、鮮やかな青色を出している[3,4]。

モルフォ蝶の不思議な翅

モルフォ蝶の翅表面には、約50μm（幅）×約200μm（長）×約4μm（厚）の鱗粉があり、その鱗粉の断面を走査電子顕微鏡（SEM）で拡大して観察すると、「ラメラ（lamella）」と呼ばれる厚さ約70～80nm膜が、8～9層積み重なっている（図5）。丁度、左右に交互に8～9枚の柵を持つ細長いオープンシェルフのような形状になっている。ラメラとラメラの隙間は約140nm～160nm、オープンシェルフの上部は50nmで下部は約540nm、外からの光を下部まで取り込みやすい構造となっており、オープンシェルフとオープンシェルフは規則正しく立ち並ぶような形状になっている。このナノ構造が青色を作り出しているのである[5]。

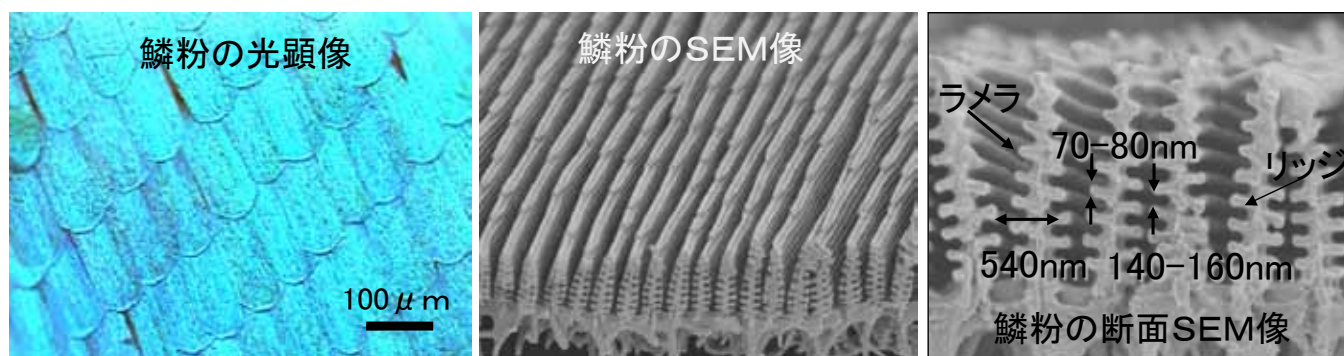


図5 モルフォ蝶の翅の光学顕微鏡像と走査電子顕微鏡像

ナノ構造と青色

多層膜に光が入射すると、界面（境界の表面）ごとに反射する「光の散乱・干渉作用」が起こる。複数の波が重なり、新たな波が出来たり、打ち消しあったりすることを干渉といい、波が強め合う干渉と弱め合う干渉がある。

光が屈折率の高い薄膜を通るとき、図6に示すように光Iは薄膜表面Aで屈折し、底面Bで反射し、表面Cから光I'として目に届く。この光I'と光II'が干渉し、ある波長の光が強め合い、ある波長の光が弱め合って、目に入射される。この時、図7に示した薄膜干渉理論から、反射波長 λ （目に入る色）と、反射率R（目に入る光の強度）は以下の式で表される。

$$\lambda = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2) \quad (1)$$

$$R = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2 \quad (2)$$

(n: 屈折率 d: 層厚 θ : 入射角)

干渉発色効果は $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda / 4$ の時最大となり、2つのポリマーの屈折率差が大きいほど発色強度は強くなることがわかる[6,7]。モルフォ蝶の翅に真上から光が照射された場合、光はラメラ層・空気層・ラメラ層・空気層と進むことになる。ラメラ（タンパク）の屈折率は1.5で厚さは約70nm、空気の屈折率は1.0で空気層厚は約140nm、 θ はゼロとなり、これらを式(1)に代入すると $\lambda = 490$ となり、青色の波長となる。

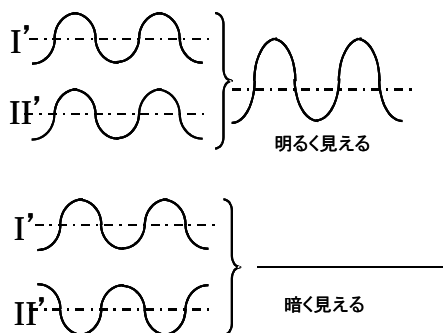
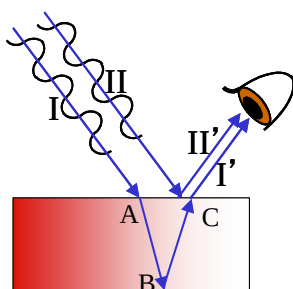


図6 薄膜干渉模式図

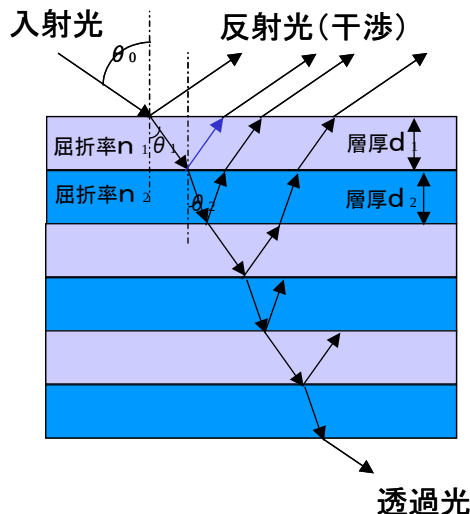


図7 薄膜干渉理論

自然界のナノ構造を観るために

自然界の生物の構造を知るために、まずは自分の目で観る（見るではない）ことから始まるが、人間の目の解像度は約0.1mm、さらに拡大して観るために光学顕微鏡を用いて、生体細胞から1 μ m (0.001mm) くらいの細菌を観ることができる。光学顕微鏡が作られたのは約340年前のことである。そしてさらに拡大して1nm (0.000001mm)の世界を観るためには、電子顕微鏡が必須である。“電子は波動としての性質を持ち、光より短い波長である”ことを発見したド・ブロイ、“電子は磁場および静電場（電界）によってレンズ作用をうける”ことを発見したブシュ、“電子は高電圧によって加速されると金属薄膜をも透過する”ことを発見したトムソンらの研究をへて、今から約80年前、1931年エルンスト・ルスカによって初めて電子顕微鏡が作られた。生物のナノ構造を電子顕微鏡で観るためには、前処理が必要で、様々な前処理手法が研究されている。また低真空での観察、非弾性散乱を用いた観察、新しい理論の収差補正装置の開発など、これからも新しい電子顕微鏡の開発・研究が進むと期待している[8,9]。

不思議な蝶の翅を模倣した糸づくり

構造発色のメカニズムの解明から、屈折率の異なる2種類のポリマーを張り合わせることで発色させる事が予測されたが、安定した色の再現、ナノレベルで層構造をコントロールすることが大きな課題であった。ポリマーの選択として、2種類のポリマーの屈折率差が大きいこと、2種類のポリマーが界面で剥離しないこと、繊維に加工しやすいこと、繊維として耐久性があり強伸度をもつこと等の条件を満たすポリマーとして、高屈折率のポリエチレンテレフタレート（PET）と低屈折率のナイロンを選択した。

しかし、PET とナイロン の屈折率差は僅か 0.05 で、モルフォ蝶の屈折率差 0.5 には大きくおよばない。そこで積層数を 61 層にし、層厚を 70nm ～ 100nm にコントロールし、繊維断面の短辺を 10 ～ 17 μm ・長辺を 40 ～ 70 μm の扁平にすることで、発色させることに成功した (図 8)。また層厚を数十 nm 変えることで青・緑・赤の色調を作り、150℃での乾熱収縮率を 4%以下にすることで発色品質の安定化を実現した。その他口金の設計、直接延伸方式の確立によりスケールアップすることができた。このモノづくりは、日産自動車と田中貴金属と帝人の 3 社で約 7 年をかけて共同研究開発をおこない、商業的な量産体制までにはさらに 2 年を費やして、やっと不思議な蝶の翅を模倣した糸、構造発色繊維モルフォテックス[®]が完成した (図 9) [10-14]。

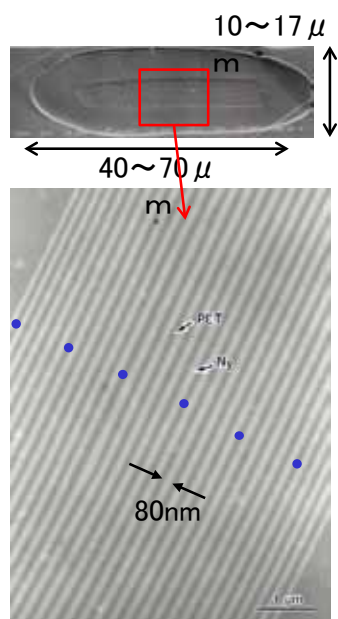


図 8 モルフォテックス[®]断面電顕像

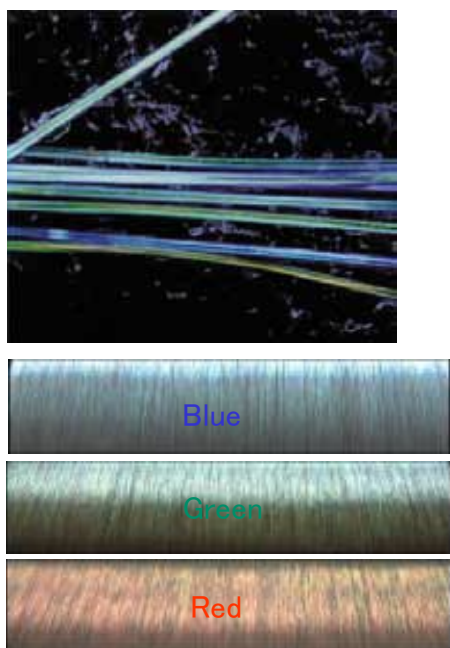


図 9 青・緑・赤色のモルフォテックス[®]

不思議な蝶の翅を模倣したフィルムづくり

自動車や電子・電気機器の外装材には、軽量で複雑な 3 次元形状成型が容易な高分子が多く用いられているが、近年差別化を図るためにその意匠性の向上が求められている。モルフォ蝶の発色メカニズムを模倣して、屈折率の異なる 2 種類の樹脂を 100nm 以下の層厚で、数百層交互に積層することによって光学干渉効果を使った構造発色超多層フィルム (MLF) を開発した (図 10)。2 種類のポリエステル樹脂は、それぞれ別の押し出し機で熔融され、熔融状態で積層された樹脂はシート状に押し出され、クエンチドラムで急冷。その後 Tg 以上の温度で縦・横に逐次 2 軸延伸され、オープン内で熱固定される。層厚を変えることで、青・緑・赤の反射色を作り出すことに成功した [15]。

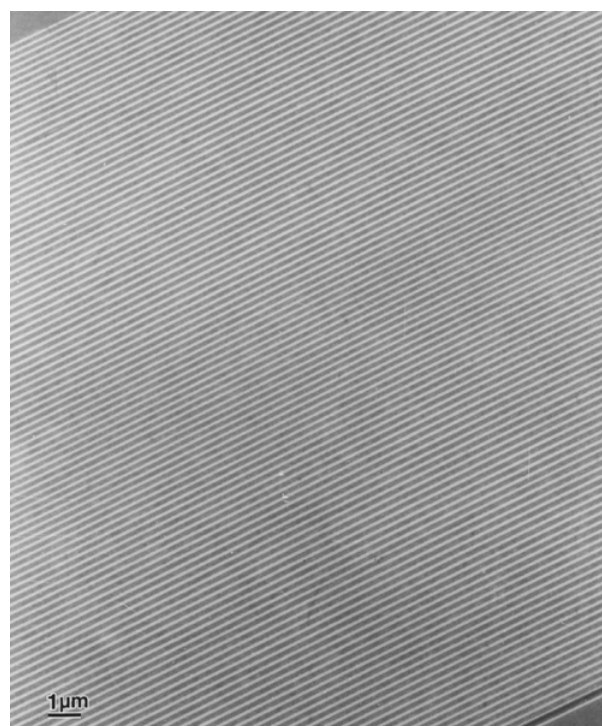


図 10 超多層フィルムの断面 TEM 像

不思議な蝶の翅を模倣した糸やフィルムを使って

光干渉繊維や超多層フィルムの色は、光沢を持ち、見る角度によって色が変わり、構造発色のために退色が無無く、染色しないので環境にやさしい色であることが特徴で、これらの特徴を生かして、長繊維としては、婦人用衣料、カーシート、スポーツ衣料、靴や靴、カーテン・インテリア資材など、短繊維にして、自動車車体の塗装、内装部品塗装、化粧品など、超多層フィルムは、自動車車体の外装、自動車のエンブレムや内装材、貼合紙、ラベル、パソコンの外面カバーへの応用が展開されている (図 11)。偽造が困難な高度な技術なので個人的には紙幣に採用いただければと思っている。



図 11 モルフォテックス[®]、モルフォトーン[®]、テイジンテترونフィルム MLF[®]を使った製品

自然を模倣した物づくり

今や、分子・原子スケールで製品を企画する時代になっている。最近では、0.1 ナノメートルサイズで、原子の1つ1つを画像にして可視化できるようになった。試料づくりの進化と電子顕微鏡の発達のおかげである。また構造発色繊維は、いろいろなノウハウと異分野連携から生まれた名品である。今後、日本が1つのチームになって、新たな製品化をめざすとともに、その生産メカニズムを学んで、環境負荷（エネルギーコスト）の低い製造方法を開発し、バイオミメティクスによる物づくりで世界をリードして行くことを願っている [16,17]。

References:

- [1] Richard G.Kessel, TISSUES AND ORGANS, W.H.FREEMAN AND COMPANY (1979)
- [2] 中原勝儼著、色の科学 (改訂版)、倍風館 (2000)
- [3] 長田義仁ら共著、バイオミメティクスハンドブック、エヌ・ティー・エス、102 (2000)
- [4] Janine M.Benyus 著、自然と生体に学ぶバイオミミクリー、オーム社 (2006)
- [5] H.Tabata, K.Kumazawa, M.Funakawa, J.Takimoto, M.Akimoto, Optical Review, 3(2),139(1996)
- [6] 筒井俊正ら共著、応用光学概論、金原出版 (1957)
- [7] J.A.Radford, T.Alfrey,Jr., W.J.Schrenk, Polym.Eng.

Sci.,13(3),216(1973)

- [8] 朝倉健太郎、安達公一著、電子顕微鏡をつくった人びと、(株)医学出版センター (1989)
- [9] アーミン・ヘルマン、ツァイス 激動の 100 年、新潮社 (1995)
- [10] 特許公報 2890984 号
- [11] 吉村三枝、高分子、52 (11) 826 (2003)
- [12] 下澤楯夫ら共著、昆虫に学ぶ新世代ナノマテリアル、エヌ・ティー・エス (2008)
- [13] 広瀬治子、次世代バイオミメティック材料の研究動向と異分野連携」に関するジョイントシンポジウム抄録、24 (2010)
- [14] 昆虫に学ぶ新世代ナノマテリアル、p.102、NTS (2008)
- [15] 小山松淳、プラスチックエージ、(2011 掲載予定)
- [16] 広瀬治子、高分子、60 (5) p.298 (2011)
- [17] 下村正嗣監修、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—、p.288、シーエムシー出版 (2012)

海の生き物に学ぶ低環境負荷型抗付着材料の創製 —フジツボに対するハイドロゲルの抗付着効果—

北海道大学 先端生命科学研究院 黒川孝幸、龔劍萍
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 室崎喬之
電力中央研究所 野方靖行

1. はじめに

海辺を散歩するとフジツボ類や貝類、藻類等の岩場にへばりついて生きている生物をよく見ることができる。これら海洋付着生物は海洋資源として有用な反面、汚損生物として負の側面も持ち合わせている。例を挙げると、船底に付着する事で水の抵抗を増し船の燃費に悪影響を及ぼす、養殖漁網の網の目を詰まらせる事で養殖魚を窒息死させる、取水口を詰まらせる事で臨海発電所の冷却機能を低下させる等があり、海洋付着生物は世界中のあらゆる海に関わる産業に大きな経済的損失を与えている。

これら海洋付着生物による汚損を防ぐため、これまで有機スズ系化合物（TBT、TBTO）が用いられてきた。有機スズ系化合物は海洋生物に対して非常に高い抗付着効果を示し広く用いられたが、一方で発がん性や内分泌かく乱作用を有する事が明らかとなり、国際海事機関（IMO）によって船底塗料としての使用禁止条約が採択された [1]。よって海洋汚染を引き起こさない次世代の抗付着材料の開発が急務となっている。低環境負荷型の抗付着材料としてこれまでに天然由来の抗付着物質 [2] やシリコンゴム [3] などが研究開発されてきた。しかしそれらの物質はコストや効

果等の面においていくつかの課題がある。

ところで、付着生物はどのような所に付着しているのだろうか。魚屋の店先を覗いた際、硬い貝の表面にフジツボ等が見られる事があるが、魚や海藻の表面が付着生物に覆われている事はない。実際、海洋付着生物が主に付着しているのは岩場や、船底（鉄鋼）、漁網（プラスチック）、コンクリート面などの硬い固体表面に限られる。魚類や藻類等、海の生き物の表面は全てソフトかつウェットなゲル状態にある。筆者らはこの現象からゲル状態の物質には海洋付着生物が付着しない、あるいは付着しづらいのではないかという仮説を立てた。

本稿では、モデル付着生物としてタテジマフジツボ (*Balanus amphitrite*) を用い、室内・フィールド両実験系におけるゲルの抗付着効果について紹介する。

2. ハイドロゲルとは

高分子ハイドロゲル（図1）は少量の高分子と多量の水から構成されており、高分子の網目が水を閉じ込め、外部へ

流れ出るのを防いでいるような構造となっている。金属やプラスチックなどの固体と異なるゲルの大きな特徴は、1) 多量の水を含んでいる事（体積の 60～99% が水分）、2) 非常に柔らかい事（弾性率が固体の 1/100～1/10,000）である。

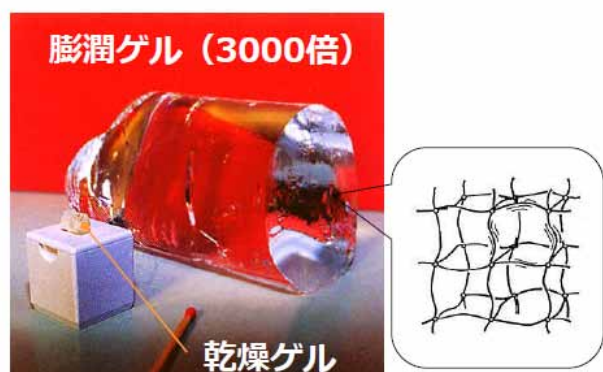


図1 水を吸って大きく膨潤するハイドロゲル

3次元的に架橋された高分子ゲルの弾性はゴムと同じく、エントロピー弾性である。エントロピー弾性は単位体積中の高分子部分鎖の密度に比例するので、大量の水を含んでいるゲルの弾性率は、その含水率に強く依存する。ゲルの含水率は一般的に膨潤度 q （水を吸って膨らんだ状態と乾燥状態のゲルの体積比）で記述される。水中で平衡膨潤した中性ゲルの弾性率 E は、

$$E \propto q^{-3}$$

の関係にあるため、ゲルの膨潤度 q の増加によって著しく下がる [4]。即ち、ゲルのソフトとウェットな性質は表裏一体の関係にあり、独立に変化させることができない。

ゼリーや寒天などの食品に代表されるように、ゲルは我々の身の回りにあふれている。我々人間の身体も歯・骨など一部を除いてゲルで構成されているといって過言ではない。当然海藻やクラゲ、魚など多くの海の生き物もゲル状態であると言える。

3. フジツボとは

フジツボは最もポピュラーな海洋付着生物であり、世界中の海洋に広く分布している。またその接着力が強く除去が困難なことから、フジツボの付着は非常に問題視されている。フジツボは一見すると貝のように見えるが、カニ・エビと同じ甲殻類の仲間である。余談であるが、食すると両者の中間の味がして大変美味である。

フジツボのライフサイクルは4つのステージに大別できる（図2）。フジツボには遊泳生活を送る幼生期が2期あり、

最初のノウプリウス幼生期に成長・脱皮を繰り返す。そして数日経つとソラ豆のような形状のキプリス幼生に変態する。このキプリス幼生は、先端部が感覚器官となっている前脚（第一触角）を有しており、着生の前段階に基板が付着に適しているかどうかを判別する為の「探索行動」を行う。着生する事を決めた場合、キプリス幼生は接着タンパク質を分泌し、基板にしっかりと固着し、成体とほぼ見た目が同じである幼稚体へと変態する。幼稚体以降、フジツボは成長と同時にセメントタンパク質を底面に分泌し、その付着範囲を広げていく [5]。

このようなフジツボの生態を考慮すると、1) キプリス幼生の付着基板選定の過程、2) 成体フジツボの成長過程、いずれの過程も視野に入れて抗付着戦略を立てる必要がある。



図2 フジツボのライフサイクル

4. キプリス幼生に対するゲルの抗付着効果

まずはじめに我々は、ゲルの化学的性質とキプリス幼生に対する抗付着効果について調べた [6]。図3はゲルを構成する高分子側鎖の官能基と、実験開始後5日目における着生数（ポリスチレン(PS)に対する着生数で規格化したもの）との関係を示したものである。図より、固体であるPSに比べてゲルや poly(dimethylsiloxane) (PDMS) に対するキプリス幼生の着生は低いことがわかる。合成高分子ゲルの官能基がヒドロキシル基・スルホ基の場合、極めて高いキプリス幼生に対する抗付着効果が見られる。一方、官能基がアミノ基の場合、ゲルにしては比較的着生率が高い結果となった。また天然高分子の場合、ヒドロキシル基を有するアガロースゲルに対してキプリス幼生の着生が全く見ら

れなかったのに対して、ヒドロキシル基とスルホ基を有する κ -カラギーナンゲルに対してはゲルの中で最も高い着生が見られた。なぜ κ -カラギーナンゲルの場合に他のヒドロキシル基・スルホ基ゲルと異なった傾向を示すのか、原因はよくわかっていない。また、ゲル存在下でもキプリス幼生の死亡率は 10% 以下であり PS のみの場合と比較しても違いはなく、ゲルはキプリス幼生に対して毒性を示さない事がわかった。このことから既存の薬剤除法型殺生剤とは異なるメカニズムでキプリス幼生の付着を防いでいることが推測される。

図 4 は規格化したキプリス幼生の着生数とゲルの弾性率の関係を示したグラフである。PS に比べ遥かにゲルの弾性

率は低く、着生数は少ない。ゲルの弾性率域に着目した場合、ゲルを弾性率の依存関係によって大まかに 2 グループに分類できる。即ち、官能基がヒドロキシル基とスルホ基のグループは着生数が弾性率（含水率）に依存せず、ほぼゼロである。一方、官能基がアミノ基のグループは弾性率の増加に伴って着生数が増えている。なぜ官能基によって弾性率に対するキプリス幼生の着生数の依存関係が変わるのかは未だわかっていない。

以上の室内での実験結果よりキプリス幼生はその探索行動を通して、ゲルの化学構造・弾性率（含水率）を認識しており、低弾性（高含水）な物性が抗付着に有効であることがわかった。これは今後抗付着ゲルを設計する上で重要な知見である。

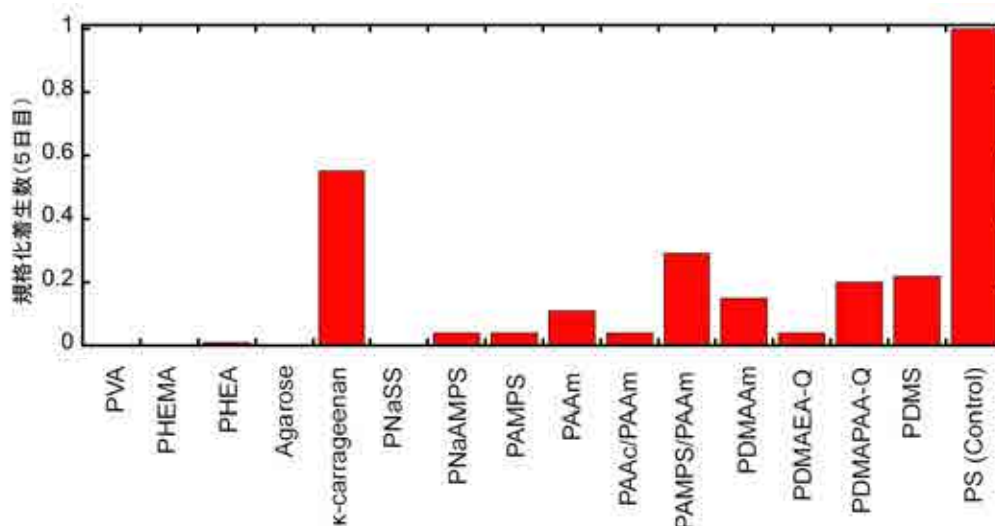


図 3 ゲルの官能基と規格化したキプリス幼生の着生数（実験開始後 5 日目） [6]

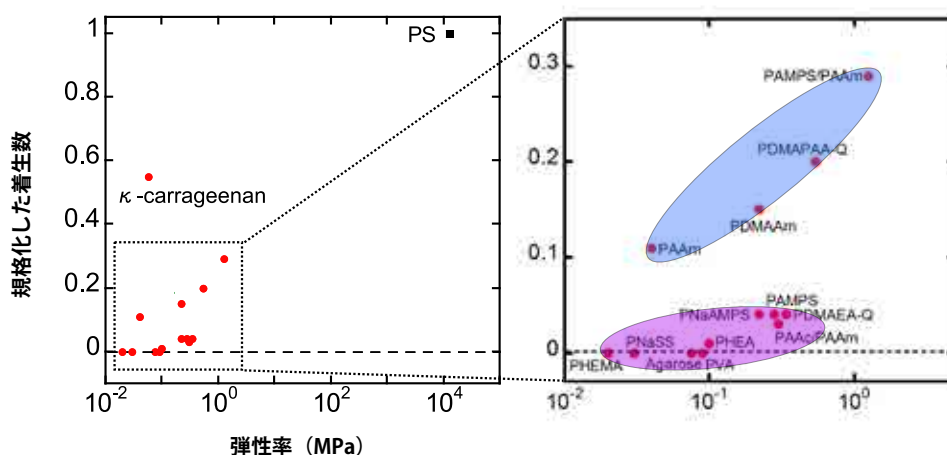


図 4 ゲルの弾性率と規格化した着生数の相関（実験開始後 5 日目） [6]

5. 海洋中での長期付着実験

前述の室内系着生実験より、多くのゲルにはフジツボのキブリス幼生に対する抗付着効果があることが明らかとなった。では実際の海洋環境下においてゲルは抗付着材料になり得るのであろうか？

海洋環境下での使用で最も問題になるのが耐久性である。実際、予備実験として前述の室内実験に用いたゲルを海洋中に浸漬した際、2カ月強でそれらのゲルのほとんどは破損し、失われた。しかし破損時までどのゲルにおいてもフジツボの付着は見られなかった。よって海洋中にて使用できる抗付着ゲルを世に送り出すためには、抗付着効果の他に高強度性を兼ね備える必要がある。近年著者らの研究グループは、これまでのゲルの常識を覆す非常に高強度なダブルネットワークゲル（DN ゲル）を開発した [7]。このゲルは重量の 8 ～ 9 割が水分であるにも関わらず、1000 ～ 3000% 以上の伸び率と数十 MPa もの破断応力を示し、高強度ゴムにも匹敵する力学物性を持つ。また物理架橋の PVA ゲルは DN ゲルほどではないが、引っ張りに対し、非常に丈夫なゲルであることが一般に知られている。これら DN ゲルと PVA ゲルを用いることで筆者らは海洋環境中でのゲルを用いた 330 日間の長期着生実験にはじめて成功した [8]。

図 5 (a) は、実験開始から 330 日後に引き上げた各基板に付着していたフジツボを、一個体ずつ分離し、並べたものである。この結果より、固体基板であるポリエチレンと比べゲル表面におけるフジツボの着生が極めて少ない事が明らかとなった。またフジツボのサイズを比較した場合、ゲル表面に着生したフジツボのサイズは固体と比べ小さい傾向が見られた。図 5 (b) は、各基板に付着したフジツボの面積が基板表面を占める割合を示したものである。PE 基板上はほぼ 100% フジツボに覆われ、隙間なく密集して付着していた。一方、ゲル上でフジツボに覆われている面積は 1 割にも満たず、隣り合った固体が間隔をあけて付着している様子が見られた。またフィールド実験より、ゲル上にはフジツボだけでなく、その他の海洋付着生物（ホヤ、海綿、海藻等）の付着も少ないこともわかった。このことから、海洋中においてゲルはフジツボだけではなく、その他の海洋付着生物に対しても抗付着効果を発揮していると考えられる。

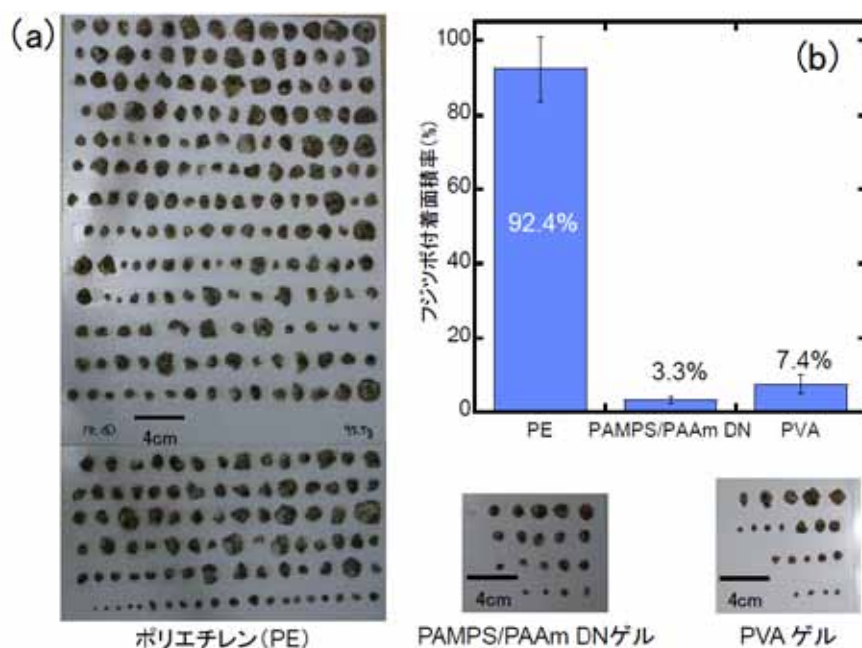


図 5 海洋中に各基板を 330 日間浸漬させた結果（基板面積：PE 144cm²、DN ゲル 144cm²、PVA ゲル 100cm²）

(a) 基板回収後、付着していたフジツボを分離し個体別に並べた写真、(b) 基板表面におけるフジツボの付着面積率 [8]

6. ゲル上におけるフジツボの成長過程

海洋実験の結果から、ゲル上に付着したフジツボのサイズが固体と比べた場合小さい事が明らかとなった。これは、1) 付着したフジツボがゲル上から剥離しやすい事 (Easy release)、もしくは、2) ゲル上では成長し難い事、の二つの可能性が推測される。そこで実際に実験室内にて各基板上でのフジツボの成長過程を観察しフジツボ成長過程におけるゲルの抗付着効果について調べた [9]。

前述のとおり一般的にハイドロゲルはキブリス幼生に対して高い抗付着効果を有する。本実験ではゲル中では比較的着生しやすく丈夫で取り扱い易い PAMPS/PAAm DN ゲルを用いた。またコントロールとして、ゲルと同程度に柔らかいが水を全く含まないシリコンゴムの PDMS、固体の PS を用いた。

図 6 は着生からの経過時間と PAMPS/PAAm DN ゲル、PDMS、PS 上におけるフジツボのサイズの関係を示したものである (DN ゲル、PDMS の弾性率は 0.47MPa)。着生直後の底面直径は何れの基板上でも 500 μ m 程度であり、成長初期 1 カ月程度はサイズに大きな違いは見られない。しかし 1 カ月を過ぎた辺りから DN ゲル、PDMS では PS と比べフジツボの成長速度が鈍化する傾向が見られた。特に DN ゲルと PDMS を比較した場合、硬さが同じであるにも関わらずゲル上でのサイズは PDMS に比べ小さい。この事からフジツボの成長には基板の硬さだけでなく親疎水性も効いている事がわかる。

図 7 は種々の弾性率の PDMS 基板からのフジツボ剥離率、剥離時のサイズについて示したものである。このグラフからフジツボのサイズがだいたい 2mm を超えた辺りから剥離が起こり始めている事がわかる。また剥離率と弾性率の間に相関性は見られなかった。同様の弾性率域において DN ゲル上においてもフジツボを飼育したが自然剥離は全く見られなかった。この事からフジツボの自然剥離は基板の硬さよりもむしろ親疎水性が重要であること、疎水基板上では剥離しやすいことが明らかとなった。以上、各基板の抗付着効果の特徴を表 1 にまとめる。

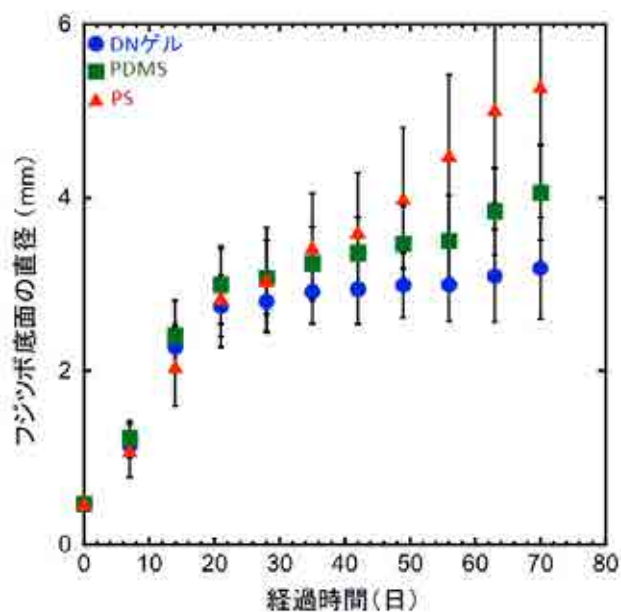


図 6 各基板上でのフジツボの成長過程 [9]

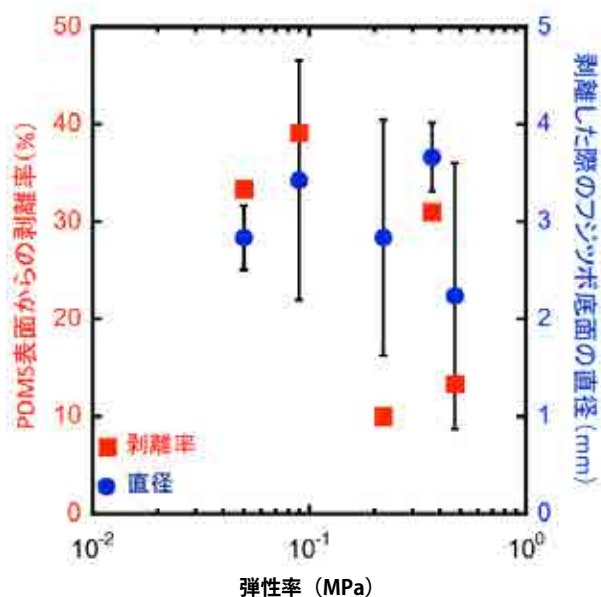


図 7 PDMS の弾性率とフジツボの剥離率、剥離時サイズとの関係 [9]

表 1 各基板の抗付着効果 [9]

基板の種類		弾性率 (MPa)	抗付着効果		
			キブリス幼生に対する 付着阻害効果	成体フジツボに対する成 長阻害効果	自然剥離効果
ソフト	DN ゲル	0.01	+++	+++	—
		0.05	+++	+++	—
		0.09	++	+++	—
		0.21	+	+++	—
		0.33	+	+++	—
		0.47	+	+++	—
	PDMS	0.01	+++	+++	—
		0.05	+++	++	++
		0.09	+++	+++	+++
		0.22	+	+++	+
		0.37	+	+++	+++
		0.47	+	++	+
ハード	PS	3000	—	—	—

[N.B.: +++ = とても高い, ++ = 高い, + = 低い, — = 効果なし.]

7. まとめ

以上の結果から、抗付着効果には、1) キブリス幼生に対する付着忌避作用、2) 成長阻害作用、3) 自然剥離作用の3つの作用がある事がわかった。ゲルの場合には特にキブリス幼生に対する付着忌避作用が高く、室内・海洋両実験結果において固体基板と比べ、付着数が少ない主な理由であると考えられる。また付着したキブリス幼生の成長が鈍く付着物表面に広がりにくい。特にヒドロキシル基とスルホ基を有するゲルは非常に強い抗付着効果を有する。原因はよくわかっていないが、海藻やホヤなどの海洋生物の表面を構成する高分子を調べる事でヒントが得られるかもしれない。

ハイドロゲルは化学物質を徐放せず、ほとんど水なので、安価かつ少ない材料で作製できるため、非常に低環境負荷型の抗付着材料になる事が期待される。しかし実用化にはまだ課題も存在する。海の生き物のような滑らかなゲル表面は、その高含水状態のために金属やプラスチックなどの異材料との接合が極めて難しいという側面を持っている。そのため現在筆者らはゲルの接着研究にも取り組んでいる。ゲルによる船舶や漁網などに対する抗付着技術は海洋産業の経済的損失を防ぎ、海洋環境の保全に貢献できると期待する。

References :

[1] IMO [Internet]. Resolutions summaries A.895(21) (1999).

[2] Fusetani N, Hirota H, Okino T, Tomono Y, Yoshimura E. "Antifouling activity of isocyanoterpenoids and related compounds isolated from a marine sponge and nudibranchs". J Nat Toxins 5. pp.249-259 (1996).

[3] Brady RF, Jr, Griffith JR, Love KS, Field DE. "Nontoxic alternatives to antifouling paints". J Coat Technol 59. pp.113-119 (1987).

[4] de Gennes PG. Polymer gels. "Scaling concepts in polymer physics". Ithaca: Cornell University Press. pp.128-162 (1979).

[5] 松村清隆, "キブリス幼生の付着機構 1 - 幼生はどのように付着場所を選択するか? -", 日本付着生物学会編、フジツボ類の最新学、恒星社厚生閣、p.142 (2006)

[6] Murosaki T, Noguchi T, Kakugo A, Putra A, Kurokawa T, Furukawa H, Osada Y, Gong JP, Nogata Y, Matsumura K, Yoshimura E, Fusetani N. "Antifouling activity of synthetic polymer gels against cyprids of the barnacle (Balanus amphitrite) in vitro". Biofouling 25

. pp.313-320 (2009).

[7] Gong JP, Katsuyama Y, Kurokawa T, Osada Y. "Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength". Adv Mater 15. pp.1155-1158 (2003).

[8] Murosaki T, Noguchi T, Hashimoto K, Kakugo A, Kurokawa T, Saito J, Chen YM, Furukawa H, Gong, JP. "Antifouling properties of tough gels against barnacles in a long-term marine environment experiment". Biofouling 25. pp.657-666 (2009).

[9] Ahmed N, Murosaki T, Kakugo A, Kurokawa T, Gong JP, Nogata Y. "Long-term in situ observation of barnacle

バイオミメティクスから生物規範工学へ

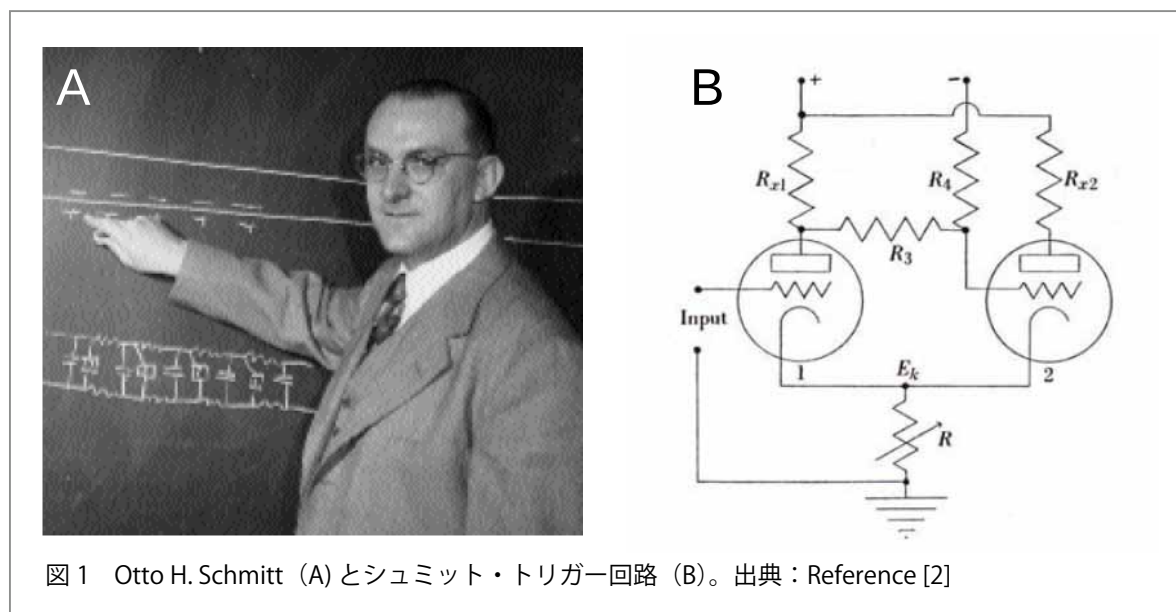
北海道大学 名誉教授 下澤楯夫

1. はじめに

あなたは、一日に何度コンピュータのクリックボタンを押しますか？ 何回タッチパネルをなぞり、何度入力キーを叩きますか？その度に動作している「シュミット・トリガー」という電子回路をご存知ですか？そして、それがヤリイカの巨大神経軸索膜のパルス発生機構に学んだものであることを知っていますか？

バイオミメティクス (Biomimetics) という言葉と概念を提唱したのは、Otto H. Schmitt (1913 ~ 1998 年) である (図 1A) [1-3]。彼は、アメリカ合衆国の中西部ミズーリ州セントルイス市のワシントン大学生物学部で学び、神経生理学を研究していた。

我々の日常は、彼が発明したシュミット・トリガー回路 (図 1B) に支えられている。パソコンでキーボードのキーを押したとき、マウスでクリックしたとき、さらにはタッチパネルに触れたとき、パルスを一発だけ出して何らかの要求があったことをコンピュータ本体に知らせている電子回路である。パソコン 1 台には、少なく見積もっても数十～数百個のシュミット・トリガー回路や、それから派生したワンショットマルチなどのパルス発生回路が使われており、現在の情報通信を支えている。もし世界中のシュミット・トリガー回路の百万分の一でも動作しなくなれば、全世界の経済産業活動は崩壊する。生物の技術 (生きる仕組み) を取り込むことが、社会に如何に大きな変革をもたらすかの好例である。



2. 工学が生物学から乖離できないことを示す幾つかの例

2-1 シュミット・トリガー回路 (例 1)

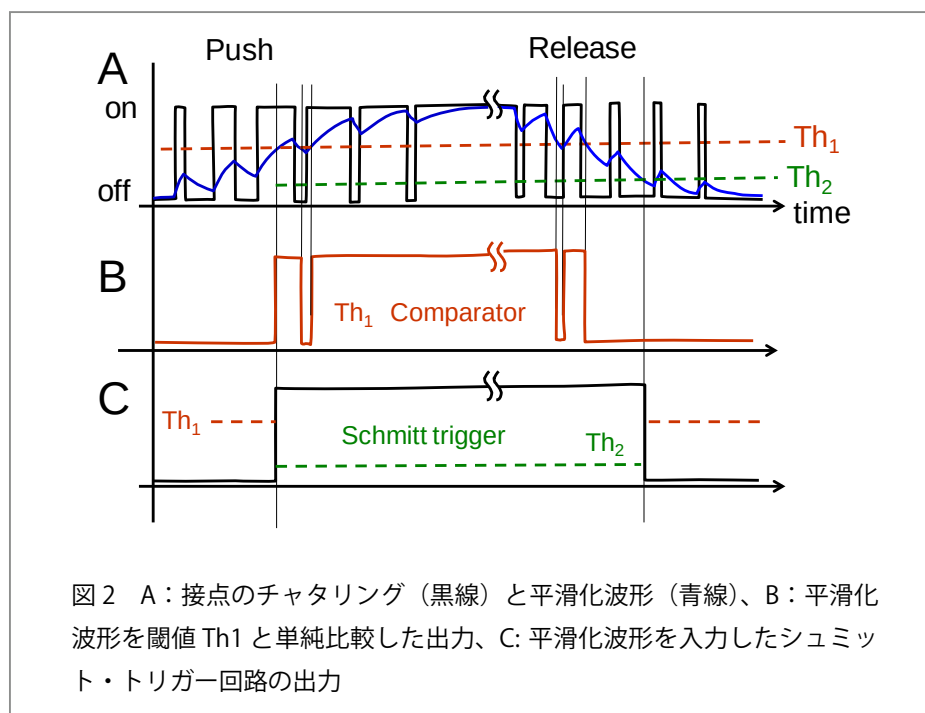
なぜ、我々の情報通信技術はかくも深くシュミット・トリガー回路に依存しているのだろうか？我々が指先でクリックボタンを押すと、マウスの中ではマイクロスイッチの接点が閉じ、検出側接点の電位はゼロから一定の値に変わる。この電圧あるいは電流変化を閾値と比較してクリックを検出する。しかし、接点の動作には非常に厄介な問題が潜んでいる。スイッチが閉じるとき接点の金属塊同士が衝突する。衝突面の損傷を軽減するためにも、弾性バネ材で機械的に緩衝せざるを得ない。しかしバネで支えられた接点同士が、衝突後に跳ね返され、バネで引き戻されて再び衝突し、を繰り返す「チャタリング」という現象が起こる (図 2A、黒線)。接点のオン・オフをそのまま見れば、パルスを幾つも出しながら、オン状態に落ち着いて行くのである。機械的接点である限り、このチャタリングは避けられない。チャタリングを認めたうえで、その効果を乗り越えて、単一のパルスとしてユーザ要求を表現する方策が必要である。

接点の後ろにコンデンサを入れて急激な電圧変化を抑える方策も、もともとカオス性の強いチャタリング振動に対しては、確実な効果を持たない。図 2A の青線波形は黒線で示したチャタリング波形をコンデンサで電氣的に緩衝した模式図である。単純な電圧比較回路で閾値 Th_1 と比べた場合には、複数のパルスを発射してしまう (図 2B)。これに対して、シュミット・トリガー回路では、入力 (青線波形) が閾値 Th_1 を越えると閾値自体を Th_2 に押し下げるフィー

ドバックが掛っている。このため、入力が新しい閾値 Th_2 以下になるまで出力は変化せず、パルスは一発しか出ない (図 2C)。

神経生理学者であった Otto H. Schmitt は、後にノーベル医学生理学賞を受ける Archibald Hill や Bernhard Katz、イカやタコなど頭足類の神経系に詳しい John Young と共同研究をしていた。彼は、ヤリイカの巨大神経軸索における神経パルスの発生機構を調べるうちに、その動作の本質を、ヒステリシスをもった閾値検出回路で表現できることを見抜いたのである。セントルイスのワシントン大学生物学教室で、1938 年のことであった [4]。すなわち、神経膜は刺激がある強さ (閾値) を越えるまでは興奮しないが、刺激が一旦閾値を越えれば興奮は行き着くところまで自己増強的に進む。その結果、反応出力は「全か無 (1 か 0)」型を示す。さらに、一旦興奮が始まればその後の刺激が如何に強くても、それ以上の興奮は暫く起こらない「不応期」を持っている。生物の情報通信系である神経の仕組みに学んだそれは、安定したチャタリング耐性を発揮して、現在の情報通信技術での思いもよらない広い用途が待ち構えていたのである。

確かに現在のコンピュータ技術の大部分は、ブール代数を基盤とするデジタル数学に支えられた、様々な論理処理回路の設計技術である。しかし、我々人間の意志表出をインターフェイスするシュミット・トリガー回路が無ければ、コンピュータはかくも有用な機械とはなり得なかったのも確かなのである。我々は、この生物学の知恵がもたらした恩寵に感謝すべきであろう。



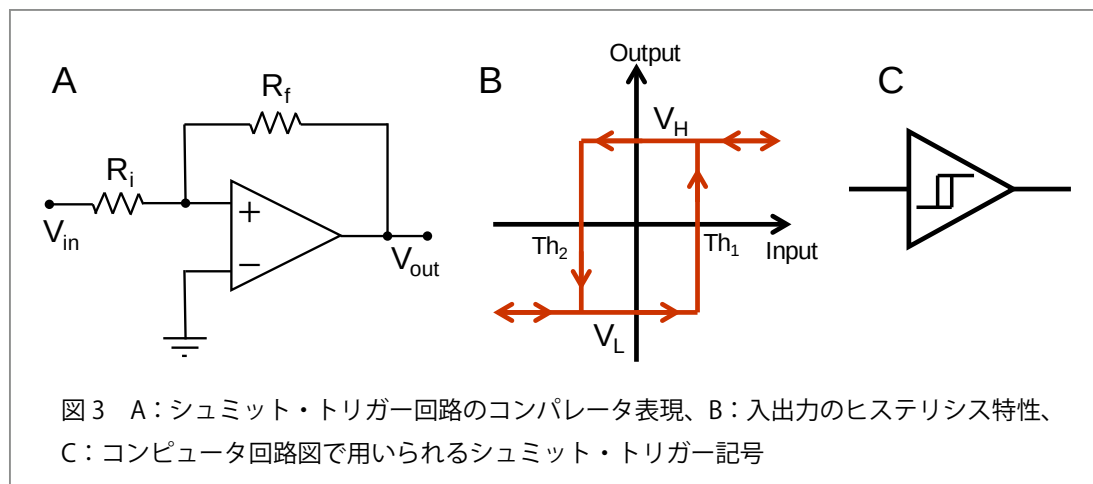
シュミット・トリガー回路は、電子工学系の学生にとって極めて基本的で有用な非線形回路で、その動作原理は van der Pol 方程式との関係も含めて、学部3年次までには必ず習得しなければならない。しかし、それがヤリイカの神経の仕組みに由来することを教える電子工学科は皆無であろう。かく言う筆者も、電子工学科の学部3年生のときにシュミット・トリガー回路の動作原理と使い方を学んだものの、それが神経由来であることを全く知らずにきた。理学部生物学科の助教授として10年以上も神経生理学を教えていたにもかかわらず、知らなかった。しかも、ポストク時代（コウモリソナー系の聴覚生理学）をワシントン大学生物学部で過したのに、である。それほど工学が自然科学から乖離してしまったのか、単に筆者が浅薄だったのか。シュミット・トリガー回路が生物由来であることを教えてくれたのは、このたび新学術領域「生物規範工学」の領域代表になった下村政嗣氏である。わずか6年前の2007年のことであった。我ながら、知らなかったこと、知らなかったことを恥ずかしく思う。

現在では、シュミット・トリガー回路は演算増幅器やコンパレータを用いて表現される（図3A）。入力信号電圧 V_{in} が深い負側にあるときには、その出力 V_{out} がどこにあるかと演算増幅器の+入力点の電位は-入力点の電位（ゼロ）よりも低いので、出力 V_{out} も負側の下限飽和点 V_L にある（図3Bの赤線左下端部）。入力電圧 V_{in} が上昇しても、 $Th_1 = -V_L \cdot R_f / R_i$ 以下ならば+入力点の電位は負なので、出力 V_{out} は下限飽和点 V_L に留まっている。入力電圧 V_{in} が更に上昇して $Th_1 = -V_L \cdot R_f / R_i$ をわずかも超えると、演算増幅器の+入力点の電位は-入力点の電位（ゼロ）より高くなり、その差が大きく増幅されて出力 V_{out} は上限飽和点 V_H に上昇する（図3Bの赤線上向き矢印）。 V_{out} が大きく正の V_H に振れると、増幅器の+入力点には R_f を通して正のフィードバックが掛かっているため、 R_f / R_i に分割された V_{out} が加わってその電位は更に引き上げられる。このため、たと

え最初の閾値越えが入力信号 V_{in} に重畳した雑音成分による偶発的なものであったとしても、増幅器の+入力点の電位がゼロ以下に戻ることは無く、その後に入力信号 V_{in} が多少増減しても出力 V_{out} は正の上限飽和点 V_H に留まる（図3Bの赤線右上端部）。出力 V_{out} が変化するのは、入力電圧 V_{in} が $Th_2 = -V_H \cdot R_f / R_i$ を下向きに切ったときで、増幅器の+入力点の電位が-入力点の電位（ゼロ）よりも負になるので、出力 V_{out} は下限飽和点 V_L に急激に切り替わる（図3Bの赤線下向き矢印）。すなわちシュミット・トリガー回路とは、出力が V_L の時には閾値 Th_1 を持つ比較器として動作し、入力信号（図3Bの横軸）が閾値を上向きに越えると出力を V_H に切り替えると同時に、閾値を負側の Th_2 に設定し直す、入力と出力（反応）の間にヒステリシス（一種の記憶）のある電子回路である。今日では、このヒステリシス特性こそがシュミット・トリガー回路のチャタリング耐性の本質とみなされており、コンピュータの回路設計上のシュミット・トリガーはヒステリシス素子を意味する図3Cの様な記号で表される。

電気接点の機械的チャタリングに限らず、タッチパネルなどのユーザーインターフェイスでも、チャタリング同様の問題が起こる。我々が一定の強さでタッチパネルに指を触れることなど出来るはずもなく、タッチセンサーの信号も多かれ少なかれ図2Aの青線の様な不規則な振動を伴う。そのまま、ある閾値と単純比較すれば図2Bのような複数パルスとなるから、シュミット・トリガー回路のヒステリシス特性で信号を処理して単一パルスとしている。

ところで、ヤリイカなど頭足類の巨大神経軸索は、どのような淘汰圧に対して適応した仕組み（技術）なのであるか？ 巨大という名が示す通り、直径が1mmにもおよぶ神経繊維である（通常の神経繊維の直径は数ミクロン以下で、ヒトでは最大でも直径20ミクロンである）。頭足類の巨大神経軸索は、逃避行動を起す運動神経であること、



活動電位の伝導速度が大きいことから、捕食者からの緊急逃避時間短縮の淘汰圧への適応と言われている。しかし、いわゆる巨大神経軸索は第3次の巨大神経で、その前に中枢から1次、2次と二つの巨大神経を介して星状神経節でシナプスを受けている。そのいずれも化学伝達シナプスなので、シナプス伝達だけで合計1.5ミリ秒もの遅れになる。したがって巨大であることは、逃避発現までの時間短縮ではなく、水力学的な運動様式への適応と見なさざるを得ない。筋張力の立ち上がり時間より短い時間内に、外套膜筋肉の全てを一斉に活動させなければ、水ジェットを作り出すポンプにはならない。外套膜の何処かで張力発生が遅れれば、そこは水圧に負けて膨らむ。膨らむ（他に比べて曲率半径が大きくなる）と、たとえ張力が発生しても、水を押し出す圧力は小さくなり水圧に負けてますます膨らんでしまい、ポンプとはならない。水力学的なポンプ系を構成する筋肉は、時間的に同期して張力を発生しなければ、心臓における心室細動と同様に使い物にならない。不応期は、ポンプの内部に水を再充填するまでの時間を保証するために必須である。不応期無しに立て続けにパルスを出せば、再充填が遅れてジェット推進自体が続かない。多数の筋細胞を同時に駆動するには大量の伝達物質を一時に放出しなければならない。イカの第3次巨大神経軸索は、多数の神経線維が融合したシンシチウムである。他の動物群の巨大神経軸索も水力学系と関係したことが多い。魚類のマウスナー細胞も、急激な方向転換のため、脊椎体節並び上の通常の遊泳パターンを打ち切って、体側面で水を一気に片方に押し出す水力学的ハードウェアである。ザリガニの巨大神経軸索も、腹部屈筋全体を同期収縮させて水を前方に押し出して後方への急速逃避を引き起こす。ザリガニ外側巨大神経から運動神経への接続は電気的シナプスで同期性を保っている。

シュミット・トリガー回路は陰極結合の（三極）真空管回路である（図1B）。三極管は1906年に発明され、その増幅作用の有用性ゆえに1914年には電話回線のリピータ（中継器）として汎用化されている。世界中の工学技術者が三極管回路の開発にシノギを削っていた筈である。しかし、20年以上を経ても工学サイドから三極管を用いたヒステリシス回路が提案されることはなかった。三極管の発明から32年後の1938年になってはじめて、生物の仕組みを調べていた神経生理学者によって生み出されたのである。もし、Otto H. Schmittのような生理学者がいなければ、情報通信技術がヒステリシス回路（図3C）を手にするのは更に遅れていたのである。

2-2 電池（例2）

1786年9月の、ある嵐模様の日、Luigi Galvaniは皮を剥いだカエルの肢を、銅の鉤にかけて、庭の鉄柵に吊るした。強い風に吹かれたカエルの肢が鉄柵に触れる度に、筋肉がピクピクと動いた。これを見てGalvaniは不思議に思い、更なる観察を重ね、5年後の1791年に「動物は電気を出しており、金属で外に道を作ると、電気が流れて筋肉が動く」という「動物電気説」を発表した。翌1792年にGalvaniの論文を見たAlessandro Voltaは驚いて、Galvaniの観察を一つ一つ確かめていった。その結果、動物が電気を出すのではなく、2種類の金属の接触が（カエルの肢の収縮の）原因であるとの「金属電気説」に達した。この後1793-1800年にわたる「ガルバーニとボルタの論争」は、Voltaの電池の発明で決着がついた（ということになっている）[5-8]。



図4 イタリアボローニャ市中心広場にあるGalvaniの銅像。皮を剥いだカエルの肢の標本を示している。写真は岡山大学教授酒井正樹氏提供[9]。

ボルタの電池（電堆）は、銀と亜鉛を張り合わせたものを塩水で湿した布切れで挟んで積み重ねたものであった。Voltaは物理学者とされているが、あくまで二つの金属の最良の組み合わせのみを問題にし、最後まで塩水（電解質、イオン）の重要性には気付いていない。Galvaniも金属の組み合わせの重要性には最初から気付いており、膨大な組み合わせの結果を記録している。しかし、「鉄」同士の組み合わせでも、カエルの肢が収縮することがあり、生きて

いるカエルの肢が電気を出しているとの結論に至ってしまった。現在でも純度の高い鉄を作ることは難しく、普通の鉄はロット毎に仕事関数の異なる異種金属のように振舞う。

ではなぜ、Galvani は嵐模様の日に、なぜ皮を剥いだカエルを、なぜ銅の鉤で、なぜ庭の鉄柵に吊るしたのか？どれ一つが欠けても、「発見」は起こらなかったではないか。実は、Galvani は天気予報を試みたのである。Galvani は、皮を剥いだカエル（イタリアでは食用、通常は銅の鉤に吊るす）が、摩擦起電機で作った電気にひどく敏感なことを既に知っていた。雷の正体が電気であるという、1752年のフランクリンの電気流体説の実験も知っていた。雷の正体が電気なら、嵐の前には空中の電気が増えるに違いない。ならば、皮を剥いだカエルという「高感度の検出器」を使えば空中の電気が増えたことが分かるだろう、と考えたのである。しかし期待どおりにはならず、全く予期せぬ「鉄柵に触れるたびの収縮」を見てしまった。しかし、それを更なる展開に導いたのである。セレンディピティの典型と言えよう。

このようにして電池が発明され、Volta は名声を得、電圧の単位はボルト (V) となった。しかし、全ては Galvani の勘違いから始まったのである。しかも Volta は、探検家 Humboldt がアマゾンで出会った電気ウナギ（馬をも殺す生物発電）を無視し続けた。この辺りから既に生物軽視の間違い、工学と生物学の乖離が始まっている。動物が電気を出していることは、Galvani の弟子 Carlo Matteucci が50年後の1838年に証明した。今日では、心電計、脳波計が日常の医学診断に使われている。のみならず、脳死判定の重要な道具として我々の死生観をすら支配している。生物の技術（生きる仕組み）に由来する工学技術が、我々の日常のあらゆる局面に関わっている。

その後、電池から得られる直流電流のお陰で、「電流の磁気作用（電気が動くと磁石になる）」が発見され（Ørsted、1820年）、すぐさまそれを応用して電流計が発明された。高感度の電流計は、Galvani にちなんでガルバノメータ（検流計）と呼ばれ、こんにちでは共焦点レーザ顕微鏡の走査系などにその名を残している。1831年、Michael Faraday は、「磁石が動けば電気が出るのではないか？」と逆を思い付き、苦心の末に証明し（電磁誘導の法則：発電機やアンテナの原理の発見）、発電機（ダイナモ）を作った。我々を、電気の時代へと導いたのである。ボルタの電池以前は、摩擦起電機による静電気しかない。静電気は、ライデン瓶に蓄えたとしてもその電荷量は少なく、放電時間も極めて短いので、有用な技術にも科学にも成り得なかった。洋の

東西を問わず、静電気（摩擦起電機）は所詮見世物に過ぎず、科学にはほとんど寄与しなかった。平賀源内のエレキテル（1776年）も肩こり治療器としての見世物であった。近代電気工学の父、物理学の父と讃えられる Faraday でさえも、静電気を第一種電気、電池からの電気を第二種電気と呼んで区別していた。電池が出来て初めて、電気現象の物理学が進歩し、蓄電池、無線通信など多様な応用技術への道が拓け、イオンなどの電気化学の理解も進んだのである。今のケータイ電話もインターネットも、全て「カエルのお陰」である。全てはカエルの持っていた技術（生きる仕組み）の解明から始まった。電池は、人類史上最大のバイオミメティクスである。工学はカエルの恩寵にも感謝すべきである。1998年には、ポーロニア市で Galvani 没後200年を記念した研究集会が開かれている [9]。

2-3 飛行機（例3）

ライト兄弟が初めて、空気よりも遥かに重い発動機付きの飛行機に乗って、人が空を飛び操縦できることを証明してみせたのは、110年前の1903年12月17日のことである [10]。人は、太古の昔から「鳥のように自由に空を飛ぶたい」と、ごく自然にイカロスの夢を追い求めてきた。ライト兄弟以前にも、Leonardo da Vinci をはじめ、多くの人々が飛行に挑戦したが、気球などのように「空気より軽い機械」以外は全て失敗していた。ライト兄弟の成功に勇気付けられてはじめて、動力航空機の技術開発が進み、それを支える流体力学も進歩した。勿論、現在の固定翼機はバイオミメティクスとは呼べない。空へ進出した代表的な動物である鳥も、それより遥か以前に空へ進出した昆虫も、羽ばたき飛行をしている。羽ばたき飛行は今でも流体力学的に難しい問題を含んでおり、生物から技術を学ぶバイオミメティクスの大きな分野である。昆虫の大きさで、昆虫の飛翔速度や飛翔距離、機動性を達成するのが、現代の流体力学屋さんの夢である [11]。

ライト兄弟の初飛行前後の物理学（流体力学）には奇妙な振舞いが見える。「空気よりも重い機体」を空中に持ち上げるのは翼に発生する揚力である。流体力学の基本原理を表した Navier-Stokes 方程式は、ライト兄弟の初飛行より58年も前の1845年に完成しており [12, 13]、現在はこの方程式の解として揚力の発生を説明している。現在、飛行の原理は純然たる物理学としての流体力学にある。しかし、当時の物理学者がこの方程式に基づいて飛行機の開発に寄与したという話は聞いたことがない。不思議なことに、ライト兄弟の初飛行以前は、新聞記者だけでなく物理学者までもが、空気よりも重い機械による飛行には否定的なのである。著名な物理学者であったスミソニアン協会の Samuel Langley が指導した飛行機に工学者の Charles

Manly が乗って栄冠を夢見たが、1903 年 10 月 7 日と 12 月 10 日（ライト兄弟の 7 日前！）の 2 度ともポトマック川に突っ込んで終わった。このこともあって、これも著名な科学者でアメリカ海軍天文台教授の Simon Newcomb は、「空気よりも重い機械が飛ぶことは科学的に無理がある」とインデペンデント誌で公に述べている [14, 15]。ライト兄弟の初動力飛行の僅か 2 カ月前のことである。自然界を見れば、鳥は明らかに空気よりも重いにも関わらず自由に空を飛んでおり、「空気より重い」ことを取り立てて問題にすることは理解しがたい。しかし、どの時代にも新しいことへの挑戦を「無謀」と貶して賢者を装うネガティブサイエンスの風潮もあるのである [15, 16]。当時のニューヨーク・タイムス紙もシカゴ・トリビューン紙も「ラングレイの飛行機械は大失敗に終わった」と書き立てている [17, 18]。極め付きとしては、かのケルビン卿 William Thomson ま で が "Heavier-than-air flying machines are impossible" と語ったと伝えられている（これは英国航空協会のメンバーへの就任を断った際の発言を、前後の文脈を無視して、誤解を誘うべく意図的に流布された可能性が高い [19]）。

ライト兄弟は、動力無しのグライダーや凧を幾つも試作しており、1 年前の 1902 年から「動力無しのグライダー飛行」と、「左右の翼端を逆向きにひねる操縦法」を何度も確かめている [20]。しかし、彼らの初動力飛行を報じた新聞は全米でたったの 3 紙に過ぎず、しかも多分に真実性を疑った文面だったという [21]。その動力飛行の真価が正しく報道されたのは、初飛行から 2 カ月以上過ぎた 1904 年 3 月であったという [21]。

つまり、初期の飛行機は物理学から派生したのではない。

少なくとも物理学は飛行機の創出に積極的には参画していない。現実には鳥が空を飛んでいるのに、物理学者は（賢明にも？）おっかなびっくり遠くから様子見するか、「飛べない」ことを（早めに）証明してみせる側にいたのである。ライト兄弟をはじめとする挑戦者たちは、世間の嘲笑いと物理学者達の見ても見ぬ振りの視線を浴びながら、どこをどう工夫すれば「鳥のように」飛べるのかを追求した。飛行機はやはり、バイオミメティクスなのである。翼端をひねる操縦法などは鳥の初列風切羽の使い方を思わせる。筆者は学生のとき、「Physicists can never fly, engineers can fly.」という言葉で、原理的には困難に見えても、自然界にあることなら挑戦する方により大きな価値があると教えられた。ちなみに、George Stokes はライト兄弟の飛行を知ることなく 1903 年 2 月 1 日に亡くなった。ライト兄弟の初飛行の 2 年後 1905 年には Einstein の特殊相対性理論が発表されて、物理学が万能感を撒き散らしながら世を席卷する時代となる。

2-4 ゴアテックス®（例 4）

ゴアテックス®という布地は、高い防水性能を持ちながらも通気性が良くムレない防水透湿性素材として有名で、登山や湿潤なアウトドア環境での作業着として高い評価を得ている [22]。その機能の核心部分は、幾層かの保護膜に挟まれた Gore-Tex membrane にある（図 5 の赤い四角、[23]）。この膜は撥水性の素材で出来ており、1 μm 程度の間隔の網目になっている。このように小さな撥水性の孔と接触した液相の水は、その表面張力（表面エネルギー密度）によって素材表面と 90 度以上の接触角を保つため、孔から気相へ向けて凸に飛び出した球面を形成する。表面張力の掛った球面は、球の内側へ向かって曲率半径に逆比例した圧力を生じるので、液相からその圧力以上で押されるま

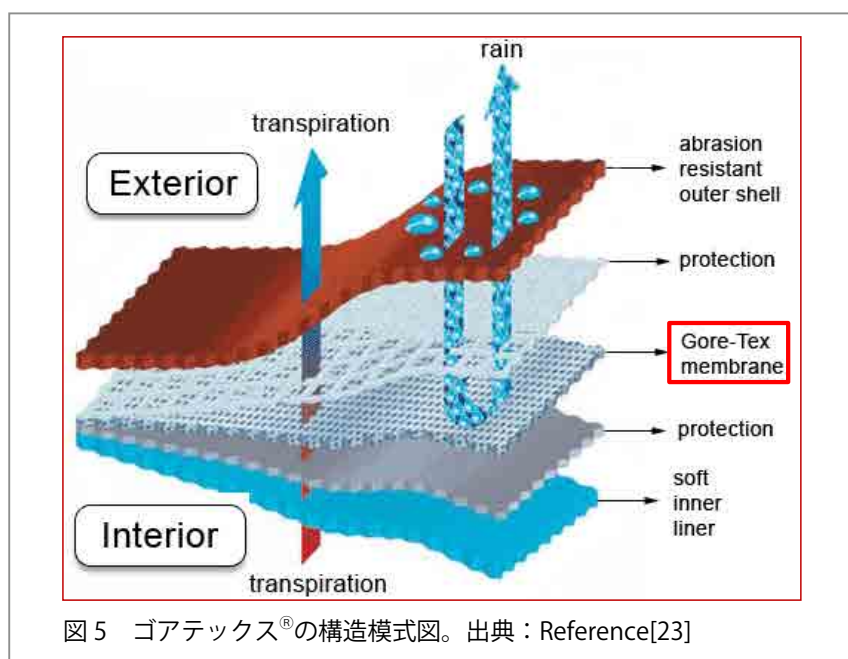


図 5 ゴアテックス®の構造模式図。出典：Reference[23]

で、バルクの水面を維持できる。ゴアテックス®は、3 気圧に耐えられるという [22]。もちろん孔から気相へ凸に盛りあがった半球状の気液界面からは水蒸気（気相水分子）が空気中に自由拡散するし、バルクの液相が無ければ水蒸気に対してはスカスカの孔である。これが Gore-Tex membrane の防水透湿性の原理である [24]。

しかし、表面張力（毛細管現象）は 1700 年代初めから知られており、1800 年代初頭には Young と Laplace によって物理法則としての定式化も完了している [25]。そんな物理法則そのものを利用した機能素材を作りだすのに、なぜ我々は 200 年以上も要したのであろうか？

自然界には、バルク素材としての撥水性はソコソコだが、ミクロンオーダーの凹凸構造を作って高い撥水性とガス交換機能を実現する技術を持った生き物がいる。その代表はアメンボである。アメンボは水面に立ち、水面を蹴って滑走できる。その肢に格別に高い撥水性を持たせている仕組みは、脚に生える撥水性の剛毛がその表面に幅 100nm 程度の微細な切れ込み溝を持つことである。液相の水は、こんなに小さな曲率半径の界面を形成することは出来ず（形成されたとしても、その水側に強く凹に曲がった気液界面は強い圧力で瞬時に水を押戻して）、剛毛表面に接する大きな曲率の平滑水面となってしまう [26]。一方、少しでもアメンボの生態を考えれば、肢だけでなく、その体表の撥水性もまた高いはずである。もし脚の撥水性だけが高く体表の撥水性が低くければ、水面が乱れて水滴で体表が濡れたとき、脚は水面上に出るが体は表面張力のため水面下に引きずり込まれ、立ち直ることは出来ずに溺れ死ぬ。

アメンボの翅や胸部、腹部などの体表は、基部径 500nm、長さ 2 ~ 3 μm のナノパイルで覆われている（図 6）。ナノパイルは約 1 μm 間隔、すなわち 10^6 本/ mm^2 という高密度で生えている。このような高密度のナノパイルが並んだ構造は、生物学者には 1940 年代から広く知られており、Plastron（物理鰓）と呼ばれている [24]。昆虫体表のクチクラは接触角が 105 度程度の弱い撥水性しか持たない素材であるが、直径 500nm の円柱状のナノパイルが 1 μm 間隔で並んでいれば、残った 500nm の隙間に形成された気相に向かって凸の気液界面は 2.5 気圧の水圧に耐えられる [24]。つまり水深 15m まで潜っても、ナノパイル列に接して張られた気液界面がつぶれることはなく、体の表面に数ミクロンの空気層が維持される。この空気層と液相の界面は光の屈折率境界でもあるので全反射を起こし、Plastron に空気層を作って潜水している昆虫の体表面は「銀色の膜」に覆われて見える。このような構造を持った昆虫は、長時間にわたって水にもぐったまま活動することが出来る。高密度のナノパイル外面と体表との間に形成された空気層の圧力は、小さな曲率半径で曲がった気液界面に働く表面張力のお陰で水相よりも圧力が低く、水に溶けた酸素分子が気液界面を通して空気層へ拡散してくるからである。

なぜ我々が、表面張力の物理からゴアテックス®まで 200 年以上も要したのか？の疑問に戻ろう。需要が無かったのか？ 微細な構造を作る技術が無かったのか？ 物体表面の撥水性はバルクの物性だけで決まると思い込んでいたのか？ いずれでもない。単に技術者が生物の技術（生きる仕組み）を見ていなかっただけ、微細な凹凸で撥水性を飛躍的に高めた事例が既に自然界にあるとは思ひもしなかつ

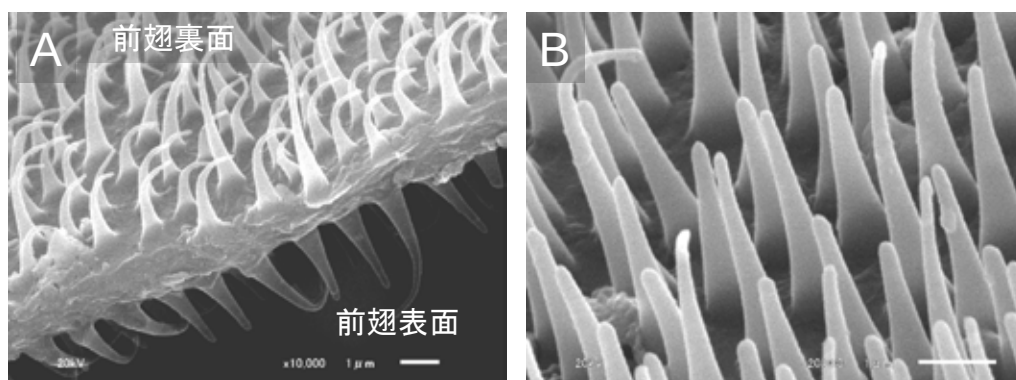


図 6 アメンボ体表の高密度ナノパイルの走査型電子顕微鏡像（JST 下村 CREST）

A：前翅の断面（おもて面と裏面）。普段は水に触れる筈のない裏面にもナノパイルが密生しており、水に濡れてはならない強い理由のあることが分かる。B：前翅のおもて面を 30 度傾けて見た像。スケールバーはいずれも 1 μm 。

ただけである。アメンボの撥水技術に注目していれば、もっと早く表面張力の物理を我々の技術に転化できたのではないだろうか？ もちろん、Gore-Tex membrane がバイオミメティクスであるとは、ゴア社は一言もしていない。

2-5 原子間力顕微鏡（例5）

図7はルリハムシ（A）と、その肢先のAの赤丸で囲んだ膨らんだ部分（跗節）の走査電子顕微鏡像（B）である。6本の肢先全てに跗節があり、ハムシは6つの跗節を交互に使って葉の表面を歩きまわる。葉の面が垂直でも、裏返しでも歩きまわることが出来る。水平なガラス面の下側を逆さになって歩くことも難なくこなす。もちろん、「歩く」ということは接着・脱着が可逆で、制御可能だということである。電子顕微鏡像（B）は、跗節の葉に接着する部分を葉の方からみた像である。跗節の下面から、直径2 μm 、長さ100 μm にもおよぶ細く長い棒が何百本も付き出ている。この微小な棒は先端近くで90度曲がって、幅5 μm 程のヘラのように平たく広がる。このヘラの（写真Bで左斜め下へ向いた）面が、葉やガラス面に接近すると互いに引き合うファン・デル・ワールス力が働くと考えられており、これらの微小な突起は「接着毛」と呼ばれている。接着部位の数の多さは、体重を支えるのに十分な接着力の確保につながることは理解できる。しかし、100 μm にもおよぶ極端に細長い棒状の腕は何を表しているのだろうか？

図7Bに見えるような5 μm サイズの接着毛先端のヘラに、少なくともピコニュートン（pN）程度のファン・デル・ワールス力が働くためには、相手が平板の場合、100 nm 程度まで接近している必要がある [27, 28]。また、ファン・デル・ワールス力を検出し利用するためには、これらの接着毛先端は十分にしなやかなバネに支えられている必要がある。pN 程度の力に引かれて変位しなければ、さらに接近してより強いファン・デル・ワールス力を受けて接着が確

立しないからである。相手表面の不規則な凹凸に追従して接近を確保するためには、接着毛先端は十分にしなやかなバネで支えられていなければならない。

最近、そのような目的の「非常にしなやかなバネ」が開発されて、ナノ計測技術として広く使われ、産業を支えている。原子間力顕微鏡（AFM）のプロープ（カンチレバー）である。AFMは、プロープ先端が対象物体から受ける pN 程度のファン・デル・ワールス力（原子間力の積分和）を nm 程度の変位に変換して、その変位を光学的に検出する装置である。AFM プロープのカatalogを見ると、最もしなやかなカンチレバーのバネ定数 k は 0.06 N/m 程度である。この AFM カンチレバーは、厚み 0.52 μm $\times$ 幅 30 μm の矩形断面で長さ 200 μm の片持ち梁である。材料力学の教科書を繰って、この寸法とシリコン単結晶のヤング率 180 GPa から矩形断面の片持ち梁先端でのバネ定数（復元力/変位）を計算してみると、カatalog値とほぼ一致する。バネ定数 $k = 0.06 \text{ N/m}$ は、単位をピコとナノに変えと、60 pN/nm に相当する。すなわち、60 pN の力で 1 nm 変位するバネ感度である。これが、こんにち我々の手に入る「最もしなやかなバネ」である。ハムシ跗節の接着毛を、直径 $2a$ 長さ l の円柱片持ち梁とみなせば、その先端でのバネ定数は素材のヤング率を E として、 $k = E \cdot \pi a^4 / 2l^3 \text{ N/m}$ で与えられる。昆虫クチクラは水分含量によってヤング率が8桁も変わる優れた素材で、甲虫の体表クチクラではおよそ 6-10 GPa ($6\text{-}10 \times 10^9 \text{ N/m}^2$) と測定されている [29]。このヤング率と $a = 1 \mu\text{m}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ m}$) および $l = 100 \mu\text{m}$ ($100 \times 10^{-6} \text{ m}$) を代入すれば、ルリハムシ接着毛の先端を支える棒のバネ定数 k の推定値として 0.01 N/m (10 pN/nm) が得られる。

すなわち、ハムシ跗節の接着毛は、市販のコンタクトモード AFM プロープ（約 10 万円 / 本）よりも「十分にしな

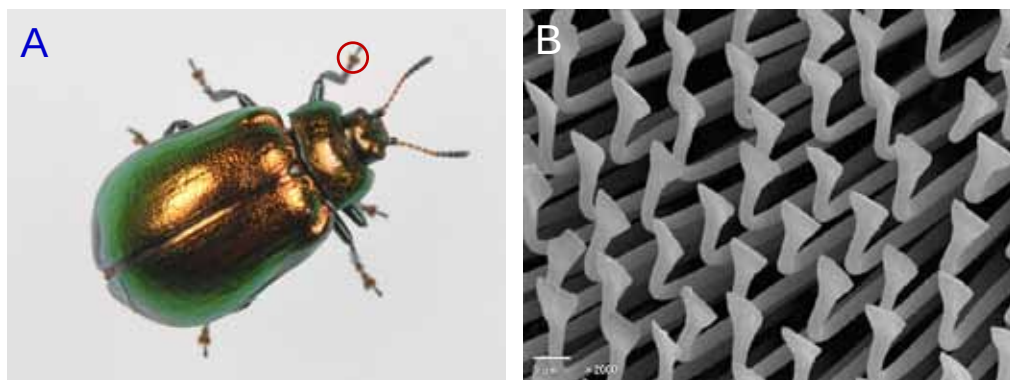


図7 ルリハムシ（A）とルリハムシ跗節の接着毛（B）、Bのスケールバーは5 μm 。写真はJST下村CRESTの堀繁久（A）と筆者（B）による。

やかなバネ」で、ファン・デル・ワールス力に引かれ、あるいは斥けられて変位し、対象表面の不規則な凹凸にも追従できて、接着できる。多くの昆虫はこのようなファン・デル・ワールス力を利用する技術を、我々より一億年以上前に、すでに実用化していたのである。昆虫の肢先のこのような微細な構造は、1800年代半ばから知られており、1970年代には多くの生物学者の知るところであった[30]。もし技術者や工学者が、「自然の性質」の表出としての昆虫の生き方とそれを支える構造に注意を払っていたら、我々はもっと早くにAFMを手中に出来たであろう。

3. 生物規範工学

ハムシ跗節の接着性やアメンボ体表の撥水性の仕組みは、ファン・デル・ワールス力や表面張力（これも物理的にはファン・デル・ワールス力と同じ起源だが）で説明できる。しかし逆に考えれば、我々のAFMの原理（ファン・デル・ワールス力の物理）はムシの接着毛の原理の「（一億年遅れの）再発見」に過ぎず、ゴアテックス®の撥水透湿性の原理（表面張力の物理）も昆虫のPlastronの原理の「再発見」に過ぎない。電池の原理（仕事関数の物理）も、我々生物の神経細胞のイオン濃淡電池の原理の「再発見」である。我々の近代科学が「発見し、制定した」と思い込んでいる法則は、昆虫がすでに発見し、生きる技術にまで纏め上げた自然の「性質」の再発見に過ぎなかったのだ。物理法則や数学は、自然の中から発見され、作られ、制定されるという。ならばなぜ、我々自身が「発見し、制定した」法則を活用して技術として使いこなすまでに、何十年もの歳月が掛るのか？ 自らが「作った」法則の使い方が分からないのだ。またなぜ、生物は何億年も前に「自然の性質」を技術（生きる仕組み）にまで纏め上げることが出来たのだろうか？

生物は神が指先を捏ね繰り回して創り出したのではない。その確たる証拠は生物の多様性にある。生物自身が、変異と淘汰を何億回も繰り返すことで、淘汰圧をかわして生き延びる仕組みと機能すなわち適応性を獲得してきた。この世界で機能を作り上げる道は、これしかないことを生物学は教えているのである。ネオダーウィニズムの旗手Richard Dawkinsによれば、進化は「論」ではなく「事実」である[31]。自然界には進化の証拠が満ち溢れており、多様な機能を持った多様な生物の存在自体が、この地球上で変異と淘汰による適応的構造の組み上げ、すなわち進化が起こったことを証明している。

生物の進化は構造と機能の転用の歴史である。多くの工学

者はそれすら知らないし、知ろうともしない。現実の世界の半分以上を占めるものに目をつぶり続けるのなら、工学は科学の資格を失う。

18世紀は数学の時代、19世紀は化学の時代、20世紀は物理学の時代、そして21世紀は生物学の時代と言われている。はじめの三つは「この世界は、どんな物で出来ていて、どんな力が支配しているかを教えてくれた科学」で、現在の工学の基盤を成している。では、生物学は何を教えてくれるのか？ それは「この世界にはどんな設計（仕組み）があり得るのか」である。工学とは「積極的に人工物を設計して自然と相互作用する人間活動」なのだから、工学は生物の技術（生きる仕組み）から学ばざるを得ない。現実の世界には生物が満ち溢れており、我々自身も生物なのだから。

一方で、この歴史上の発展の順はこれらの科学の単純さの順をも証明していることに注意して欲しい。かつての数学も物理学も化学も、複雑怪奇に見える生物現象を考察の対象から外して脇に置くことで身軽になり、大きく発展して今日の科学技術基盤としての地位を得た。確かに、生物学は数学・化学・物理学の発展の後でなければ開花できなかったし、数学・化学・物理学の理解なしには生物現象を深く理解出来ないことも事実である。しかし、裏を返せば、工学はこれまで単純な科学にしか頼ってこなかったのも事実なのだ。複雑な現実に対処すべき技術を単純な科学のみに頼って作り上げ得る、とするのも不思議な信仰である。

アメンボやハムシのところで述べたように、物理法則や数学からは「どうやれば機能が組み上がるか」は出てこない。数学や物理法則は、分析の道具であって、機能を組み上げる道具ではないからである。工学に真の合成理論は存在しない。上手くいった場合の分析結果を逆にたどることを、合成と呼んでいるにすぎない。機能（生物学用語では適応性）への組み上げには試作と評価（生物学用語では変異と淘汰）の繰り返し作業が必要なことは、工学技術者なら誰でも分かっている。にもかかわらず、工学や物理では、法則で自然の全てを説明できると思い込ませる教育が蔓延している。しかしそれでは、「部分と全体が等しい」という奇妙な論理を展開させることになる。大学の初年次の哲学や科学概論では、自然法則は現実世界で起こる現象から帰納的（Bottom-Up）に推論され、抽出されて、制定されることを教える。数学や物理法則は自然から抽出されたものであって、自然の一部分にすぎない。部分は部分であって、全体ではない。法則からの演繹（Top-Down）で自然の全てを説明しようとしてはいけない。

自然界から抽出された法則や理論からの演繹で現実を説明できても、技術が組み上がってくる訳ではない。生物も含めた現実の世界の事象から技術を見つけ出し、帰納的に作り上げる作業が必要である。生物学をも工学技術の基盤にしてはじめて、一体化した自然科学という健全な背骨を持った工学になる。確かに、制定済みの法則からの演繹的推論によって技術の有効な限界を確かめる作業も必要である。しかしその一方で、自然界では何億年にも亘る試作と評価を終えた技術が、生物の生きる仕組みとして使われ続けているのである。しかもそれは、我々の技術の多くが「高温高压」という力まかせの製造工程に頼っているのとは大きく異なっている。生物は、「常温常圧」で AFM カンチレバーと同等な装置をはじめ、全ての構造と機能を作り出している [29]。生物の技術は、持続可能な社会の在り方をも教えてくれるであろう。

4. おわりに

もっと自然を見ようではないか。もっと広い範囲に目を向けて自然を見よう。自然の半分以上を占める生命現象を見よう。生きている自然を見よう。博物館を見よう。これまでの工学は 18、19、20 世紀に発達した数学・化学・物理学だけで出来ていたが、工学の基盤に生物学も含めること、それこそが 21 世紀の工学としての健全な道だ。というのが、生物規範工学である。規範とは Normal (あるのが当然、見るのが当たり前、考慮に入れるのが当然) ということである。生物規範工学は、生物が持つ技術を我々の技術に転化し、我々の工学技術の体系を再編成することを目指している。

References :

- [1] <http://www.ee.umn.edu/users/schmitt/index.html>
- [2] http://160.94.102.47/Otto_Images/PavekOHSbio.pdf
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Schmitt
- [4] <http://iopscience.iop.org/0950-7671/15/1/305>
- [5] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/13/3/13_3_281/_pdf
- [6] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/13/4/13_4_407/_pdf
- [7] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/14/1/14_1_64/_pdf
- [8] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/14/2/14_2_151/_pdf
- [9] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/16/2/16_2_123/_pdf
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aviation

- [11] <http://sc-smn.jst.go.jp/playprg/index/342>
- [12] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%93%E3%82%A8-%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%82%B9%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F>
- [13] https://ia700701.us.archive.org/8/items/cbarchive_39179_onthetheoriesoftheinternalfric1849/onthetheoriesoftheinternalfric1849.pdf
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Simon_Newcomb
- [15] <http://www.garfield.library.upenn.edu/essays/v3p167y1977-78.pdf>
- [16] <http://www.garfield.library.upenn.edu/essays/v3p155y1977-78.pdf>
- [17] <http://www.skygod.com/quotes/times1903.pdf>
- [18] <http://query.nytimes.com/mem/archive-free/pdf?res=F40F15FC3B5D16738DDA10894D8415B838CF1D3>
- [19] http://en.wikiquote.org/wiki/William_Thomson_1st_Baron_Kelvin
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/Wright_brothers
- [21] <https://www.aiaa.org/SecondaryTwoColumn.aspx?id=5724>
- [22] <http://www.gore-tex.jp/technology/index.html>
- [23] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B4%E3%82%A2%E3%83%86%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9>
- [24] Mark Denny: "Surface Tension: the energy of the interface", In: Air and Water, Princeton University Press, New Jersey, 1993, 253-270
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Young%E2%80%93Laplace_equation
- [26] Gao X and Lei J: アメンボの撥水性の脚、訳: 辻井薫、昆虫ミメティックス(下澤楯夫・針山孝彦 監修)、NTS、東京、2008、382-384
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Waals_force
- [28] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%8A%E3%83%BC%E3%83%89-%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB>
- [29] Vincent JFV: 昆虫のクチクラに基づく材料設計論、訳: 小林秀敏、昆虫ミメティックス(下澤楯夫・針山孝彦 監修)、NTS、東京、2008、631-640
- [30] Gorb S: 昆虫の運動付属肢に着想を得た接着材料、訳: 後藤真紀子、昆虫ミメティックス(下澤楯夫・針山孝彦 監修)、NTS、東京、2008、372-381
- [31] リチャード・ドーキンス: 進化の存在証明、垂水雄二 訳、早川書房、東京、2009

(5) 国内外研究動向紹介

生物規範工学 第二回全体会議に参加して
公益財団法人山階鳥類研究所 山崎 剛史

2013 年 10 月 25 日、心配されていた 2 つの大型台風の直撃を免れ、生物規範工学の第二回全体会議が東北大学工学研究科中央棟（仙台市青葉区）で無事開催された。小雨の降る中、朝 8 時 50 分から始まったこの会は 17 時を過ぎるまで続き、各班のプロジェクトの進捗状況が報告されたほか、東北大学総合学術博物館の西先生の特別講演も行われた。筆者は A 班／総括班の分担者の一人としてこの会に参加した。ここではいくつかの講演を取り上げ、その内容を紹介したい。

文部科学省科学研究費補助金・生物規範工学は、A・B・C の 3 つの班、公募班、総括班によって実施されているが、このうち A 班は情報学の研究者と生物学の研究者がタッグを組み、バイオミメティクス・データベースシステムの構築を目指している。この班の進捗状況の報告として、国立科学博物館の松浦先生と北陸先端科学技術大学院大学の溝口先生が発表を行った。松浦先生は、「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」と題した発表を行い、生物学に関連する既存のデータベースとして、どのようなものがあるのかを概説したうえで、本プロジェクトで構築中のデータベースをその中に位置づけた。一方、溝口先生は、バイオミメティクスの社会受容を担う C 班との班間連携プロジェクトの一例として、「オントロジー工学とライフスタイル」という演題で話をされた。これは C 班の石田先生らがとりまとめた 2030 年の理想的なライフスタイルの一覧を実現するため、必要とされるアクションが具体的に何なのかを、オントロジー工学の手法を使って明らかにしていくという試みで、バイオミメティクスが今後目指していくべき方向性を明示する研究として、とくに重要なものだと言った。筆者は感じた。

B 班はバイオミメティクスの学理を深化させるために組織された班で、5 つのサブグループに分かれている。これらすべてのサブグループについて多岐にわたる進捗状況の報告があったが、そのうち B-1 班「生物規範界面デザイン」については、産業技術総合研究所の大園先生から「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」、千歳科学技術大学の平井先生から「自己組織化を利用した階層構造の作製」と題した発表があった。内容は、鮫肌などの生物の表面をまねて作成した新素材がどのような機能を持つのかを様々な測定法／評価法で探る、というものであ

った。鳥類学を専門とする門外漢の私にも、工学系の先生が研究を進める際の手法と発想がよく伝わるプレゼンテーションであり、A 班のメンバーとして、バイオミメティクス・データベースの構築を進めていくうえでとくに参考になった。

C 班は上述の通り、バイオミメティクスの社会受容を目的とした研究や活動を行うグループである。この班のプロジェクトの進捗状況の報告としては、産業総合研究所の阿多先生から「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」、東北大学の須藤先生から「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」と題した講演があった。阿多先生はバイオミメティクスの国際標準化動向について主に話をされたが、文部科学省科学研究費補助金・生物規範工学の立ち上げによって、国際標準策定の議論を日本がリードする場面が増えてきた様子が伝わってきた。一方、須藤先生の講演は、A 班の溝口先生の講演と対をなし、上述の班間連携プロジェクトを C 班の視点から紹介するもので、大きな可能性を感じさせる内容であった。

公募班については 4 題の発表があった。北海道大学の西野先生による「昆虫の聴覚器規範設計の解明に向けて」、信州大学の小林先生による「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」は、「生き物に学ぶ」という研究の重要な一過程がとくに強調されており、バイオミメティクス研究の好例との印象を強く与えるものであった。東北大学金森先生による「構造色材料による光制御とデバイス応用」は、構造色の応用的価値についての研究報告であり、鳥の研究者として構造色に以前から感心を抱いていた筆者にとって、大変興味深い内容であった。東北大学馬奈木先生による「生物規範工学に基づく技術の経済価値」は、バイオミメティクスが社会に及ぼす影響を経済学的に分析するという内容であり、新たに生じつつあるバイオミメティクスという学術分野の学際性を強く感じさせる講演であった。

特別講演として行われた、東北大学総合学術博物館の西先生による『「国立自然史博物館」を東北へ』においては、「生物に学ぶ」というバイオミメティクスのコンセプトにも鑑み、日本も他の国々と同じように、国立の自然史博物館を整備すべきだという提言がなされた。そこで語られていた夢は、標本コレクションの管理者を務めていると同時に、それを用いた研究を進める筆者にとって、とても共感のできる内容であった。

13-2 バイオミメティクス研究会レポート

2013 年 11 月 27 日(水)に 13-2 バイオミメティクス研究会は「バイオミメティクスの国際標準化と海外動向、五感に迫るバイオミメティクス」をテーマに、タワーホール船堀の 4 階研修室で開催された。前半の ISO/TC266 国際委員会の報告について聴講した。

はじめに、バイオミメティクス研究会委員長の下村政嗣教授からのあいさつの後、10 月 29～30 日にプラハで開催された第 3 回 ISO/TC266 国際委員会の報告があった。

WG2 -Biomimetic Materials, Structures and Components- については物質・材料研究機構の細田奈麻絵氏が状況を報告した。WG2 で議論する内容は、材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術に関するバイオミメティックな開発のフレームワークを提供するもで、議長の Dr. Speck(ドイツ)が辞任したため、日本のチームが引き継ぐことになった。今回の会議では草案書の半分程度までが議論され、表面についても扱うことを記載、専門用語と定義は WG1 との重複を避けるように整理、韓国から提案の生物表面の特徴と測定方法を詳しく記載すること、生物表面の特徴についてはドイツが作成した書類を参考とすること、ベルギーから提案されたバイオミメティック開発手法の図、日本が作成した表「生物の機能、分析の目的、期待される応用」などについて議論されたことが述べられた。草案書の残りの半分については今後 Web 会議審議する予定とのこと。今後の議論によるバイオミメティック製品開発のガイドラインは研究・開発者にとって大きな助けになることが期待される。

また、WG4 -Knowledge Infrastructure of Biomimetics - については JST の恒松直幸氏が状況を報告した。WG4 は日本が提案し採択されたもので、日本が幹事国となっている。プレリミナリーステージからはじめ、WG1-WG4 の内容を踏まえながら検討を進める予定。バイオミメティクスは工学と生物学の融合領域であるため、異分野連携を支援するデータベース化したシソーラスの作成が必要、そのために、バイオミメティクス用のシソーラスの設計手法について議論を始めようとしており、長年 JST が提供してきたシソーラスを用いた論文検索サービスなどの経験

を応用して、工学と生物学の専門用語がある程度まで相互に参照可能となるシソーラスを試作し、シソーラス設計のガイドラインをとりまとめる計画とのこと。これが実現すればバイオミメティクスの研究・開発において、さらに Technology-pull と Biology-push が加速するものと思われる。

帝人株式会社 構造解析研究所 広瀬 治子

13-2 バイオミメティクス研究会 バイオミメティクスの国際標準化と海外動向
五感に迫るバイオミメティクス に参加して

2013 年 11 月 27 日タワーホール船堀 4F 研修室において、高分子学会バイオミメティクス研究会 ISO/TC266 バイオミメティクス国内審議委員会主催の研究会が行われた。筆者はその内の 2 題の講演について紹介する。

まず、NPO 法人アスクネイチャー・ジャパンの星野敬子氏が「バイオミミクリー海外動向とアスクネイチャー・ジャパンの活動」について報告された。2013 年 6 月アメリカ・ボストンでバイオミミクリー3.8 第 1 回国際会議が開催され、世界各国から 250 名を超えるビジネスマン・研究者・学生が集合し、星野氏も参加した。焦点としてデータベースの構築があり、2008 年に構築された Ask Nature (<http://www.asknature.org/>) は無料で数千件の事例を閲覧できる検索サイトが作られていた。しかし、実用化に結び付けるものではなく、次のバージョンでは、実践につながるデータベースが考えられている。多様なプレイヤーと多様な分野がアイデアと実践を組み合わせるようなオンラインプラットフォームの構築が考えられており、我々もそういったデータベースの構築を作りたいと考えている。また、バイオミミクリー3.8 の代表の Janine Benyus 氏は生体模倣を‘バイオミミクリー’と謳っているが‘バイオミメティクス’でもかまわない、との情報で、word に強いこだわりはないということは意外な報告であった。またアスクネイチャー・ジャパンの活動は、2011 年産官学の連携によりその活動が始まった。産官学民のネットワークづくり、製品開発、子供の教育事業、地域づくりのコーディネートを行っている。ハウセンカの葉っぱの付き方を模倣し、フィボナッチ数列を用いて太陽光を効率よくあつめる太陽電池パネル「Solar Plants」の開発は面白いものであった。

もう 1 題は、山形大学大学院理工学研究科 野々村美宗先生の「ヘレン・ケラー問題：触覚による水認知のメカニズム」による講演であった。皮膚・指の触覚により水を認知するメカニズムを研究・模倣して工業的な応用（化粧品や衣料の開発や手術ロボットやバーチャルリアリティシステムの応用など）が期待されるもので、そのメカニズムについて報告された。指先は数 Hz～数百 Hz まで感じる事ができ、指先に加わる力学的刺激をオリジナルの手触り評価装置を用いて評価し、また指の運動を高速ビデオカメラで撮影し、指の固着・一気に滑るスリップ期の加速度等の

測定を行い、溶液による加速度の差異を明らかにした。

触覚による水の認知にはマイスナー小体とパチニ小体が関与していることが明らかにされた。皮膚の感覚としては、触覚器官であるマイスナー小体のほか、パチニ小体は高周波の刺激、ルフィニ終末は圧力・低周波・引っ張り刺激、メルケルは圧力刺激を感じることができるとのことであった。

心地よい触覚とは何か・不快な触覚とは何かを明らかにし、数値化をすることで、製品作りに生かすことができれば素晴らしいと思われる。

「Joint international symposium on“Nature-inspired Technology (ISNIT)
2014” and

“Engineering Neo-biomimetics V”」に参加して

出口 茂（海洋研究開発機構）

2月12日

・「Biomimetic Recognition and Patterning of Molecules on Water Surface」
国武豊喜氏（(財)北九州産業学術推進機構、理事長）

モレキュラーバイオミメティクス黎明期の1960年代に行われたコポリマーを用いて加水分解酵素の機能を模倣しようとした試みから、1972年に Singer と Nicolson が流動モザイクモデルを提唱したことを契機として始まった生体膜の研究とそれらを合成脂質で模倣しようとする試み、さらには最近の超薄膜の開発・応用と膜表面での水分子認識の重要性まで、「分子認識」をキーワードとしてバイオミメティクス研究の歴史的な流れを紹介された。

・「The challenge of the Biomimetic and Biomimicry for future: creation of platforms of Research and Innovation opened ? 」 Francis Pruche 氏（フランス、サンリス市、助役）

パリから約60キロ北にあるサンリス市が取り組んでいる CEEBIOS（Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis、European Center for Biomimicry）の紹介があった。CEEBIOS は、国、ピカルディ地域圏ならびにオワーズ県商工会議所のサポートも得て、バイオミメティクスを主題とした Center of Excellence を創設しようとするヨーロッパ初の試みである。今後は Ordener 周辺の兵舎の跡地を活用して、キャンパス、研究施設、研修施設、経済部門とカンファレンスエリアからなる施設を建設するとのことであった。今後の展開が大いに楽しみである。

・「Diagnosis of Various Biofluid Flow Phenomena and Biomimic Research」
Sang Joon Lee 氏（Pohang University of Science and Technology (POSTECH)、教授）

生物体内の流体輸送機構に関する講演が行われた。植物がポンプを使わずに水を100メートル近い高さにまで輸送する仕組みや蚊が血液を吸う仕組みなどを、X-

線 Particle Image Velocimetry (PIV)、ホログラフィック Particle Tracking Velocimetry (PTV)、時間分解 micro-PIV といった最先端の *in situ* 観察・測定技術を駆使して明らかにしようとする研究の結果や、それらを模倣して開発されたマイクロポンプなどが紹介された。

講演終了後は、会場を移してポスターセッションが行われ、若い参加者を中心に活発な議論が行われた。

公募班：株式会社富士通総研 第二コンサルティング本部 環境事業部 長谷川誠

「Joint international symposium on“Nature-inspired Technology (ISNIT)
2014” and
“Engineering Neo-biomimetics V”」に参加して

2014年2月12日～14日、雪祭り後の札幌で、日韓ジョイント国際シンポジウム「Joint international symposium on“Nature-inspired Technology (ISNIT) 2014” and

“Engineering Neo-biomimetics V”」が北海道大学学術交流会館を会場に開催され、材料科学、表面科学、流体力学、ロボティクス、生物学等、多岐に渡る36件の講演と42件のポスターセッションが行われた。以下では、主にバイオミメティクスの産業化の観点から興味深いと感じた点をいくつかご紹介したい。

特別講演では、フランス・サンリス市のPruche副市長が、“The challenge of the Biomimetic and Biomimicry for the future:creation of platforms of Research and Innovation open?”と題して、サンリス市に構築が進められているバイオミメティクス研究開発拠点CEEBIOS (European center of excellence in Biomimicry by the city of Senlis) について講演された。講演の中では、“Biomimetic city” (生態系の循環に学ぶ汚染ゼロの都市) や“Biomimetic Farm” (生態系を参考にした持続可能な農業システム) 等のコンセプトが紹介された。また、企業向けのトレーニングプログラムを作成していることが述べられ、対象と考えている産業として、化粧品、建設業、デザインが挙げられた。経歴を見ると、Pruche副市長はLOREALのBiotechnologie DepartmentのSenior Research Associateを兼務している。また、海外動向調査をしていると、フランスではBiomimeticという言葉で冠した化粧品が売られているようであり、化粧品産業はバイオミメティクスの有力な応用先のようなのである。

韓国・浦項工科大学校 (POSTECH) のSang Joon Lee教授のご講演は、生体の様々な流体现象のバイオミメティックな研究についてのお話で、分岐した血管の血流がスムーズに合流する現象が、渋滞の解消に役立つのではないかと述べておられた点が興味深かった。

財団法人電力中央研究所の野方靖之博士のご講演は、生物付着防止材料についてのお話だった。フジツボ等の海産生物の付着により、船舶のエネルギーコストは最

大 45%も上昇するとのことである。なぜ、電力中央研究所でこのような研究が行われているのかと思ったら、パワープラントを海水で冷却する装置に生物が付着し、効率が低下するためとのことで、なるほどと思った。まだまだ知らないところにバイオミメティクスが活用できる領域がありそうである。

京都大学の森直樹先生のご講演は、植物の防御システムのバイオミメティック的な側面についてのお話だった。植物は害虫に食べられた際に、害虫の口から分泌される化合物によって、揮発性の化合物を放出するようになっており、それが害虫の天敵（寄生バチや捕食者）を呼び寄せるといふ防御系を持っているそうだが、そのシステムを模倣して農業に応用できないかということだった。今回の講演のほとんどが工学への応用に関するものである中で、冒頭で、「バイオミメティクスは工学だけでなく農学にも応用できる」と述べられたのが印象的だった。

浜松医科大学の高久康春博士は、新聞等でも報道された「ナノスーツ」の最新の成果についてご紹介された。通常、電子顕微鏡観察は高真空下で行われるため、生物試料は水分の蒸発により収縮し、その構造は生きたままの状態とはかけ離れたものになってしまうが、ショウジョウバエやハチの幼虫など一部の生物がもつ細胞外物質を模倣した化学物質を生物試料に塗布することで「ナノスーツ」が形成され、生きたままで観察できるのである。ご講演では、電子顕微鏡観察の様子を動画で見せていただいた。写真でも、従来法と比べて見える構造が大きく異なることはよく分かるのだが、「ナノスーツ」を着せられたショウジョウバエの幼虫がクネクネと動いている様子を動画で見ると、インパクトが大きかった。昨年発表された技術の改良版 new"NanoSuit"を特許出願中とのことで、その詳細が気になるところである。

全体として、アカデミアからの基礎的な研究発表が多かったと感じた。今後、企業のバイオミメティクス研究への参画が進み、こうした場への産業界からの参加が増えることで、バイオミメティクスの産業応用も加速されるのではないと思う。民間企業から本プロジェクトに関わらせていただいている者として、その一助となれるよう、微力ながら貢献していきたい。

Joint International Symposium on “Nature Inspired Technology 2014” and “Engineering Neo-Biomimetics V”見聞録

京都大学農学研究科 森直樹

2014年2月12日（水）から2月15日（土）の4日間、北海道大学学術交流会館において、Joint International Symposium on “Nature Inspired Technology 2014” and “Engineering Neo-Biomimetics V”が開催された。工学的な内容も多く、農芸化学者である私に理解できる講演は少なかったが、印象に残った講演と会全体の雰囲気について私見を述べる。

12日のSang Joon Lee先生（Pohang University of Science & Tech.）のPlenary Lectureでは、動物・昆虫・植物と云った幅広い生物を材料に“Biofluid Flow Phenomia”をキーワードに研究を展開されており、迫力があつた。X-ray トモグラフィ（断層画像法）の詳細は理解できなかったが、オジギソウの葉が刺激によって先端から一対ずつ順番に閉じていく様子を、葉枕（ようちん）の維管束における水の移動により、膨圧が変化した結果から示していた。このようなミクロの水の動きを測定出来る技術に驚き、新たな“Bio-inspired Technology”を見た気がした。今更ではあるが、“Bio-inspired Technology”のポテンシャルを再認識した。

13日の高久康春先生（浜松医大）の「ナノスーツ」は驚愕の内容であつた。SEMの画像で動く昆虫を目の当たりにし、息をのんだのは私だけではなかったはずだ。この技術が医学的に大きく期待されるのはもちろんである。「ナノスーツ」が切り開く技術革新は何処まで広がってゆくだろうか？

14日の出口茂先生（JAMSTEC）のお話しはいつもながら興味深かつた。「何故、セルロースとは縁もゆかりもない極限状況に生息する新海の微生物がセルラーゼを生産出来るのか」は良く理解できないが、やはり自然は常に人智を超えているのであろう。また、セルラーゼの酵素活性をナノファイバー表面上のくぼみの大きさに測定するアイディアは素晴らしく、その発想の柔軟さには舌を巻いた。出口先生によると、新海微生物由来のセルラーゼは地上の生物が生産するものとはかなり性質が異なるとのこと。今後の展開が楽しみである。

その他にも興味深い講演は幾つもあつた。しかしながら今回私は、若手の大園拓哉先生（産業技術総合研究所）らが展開されている「微細なしわ構造」の研究が下村先生を中心とする生物規範工学の研究においてキーワードの一つとして位置付けら

れつつあることに興味を覚えた。そして、多くの若手研究者が「しわ構造」を種々の視点で捉え、独自の研究を展開している様子が伺えた。研究の一層の発展が期待される。

平成 24 年から生物規範工学が始まり、少しずつではあるが私にも工学的な発想に慣れつつある。相変わらず、私にとって物理・数学の言語の壁は高くかつ部厚いが、工学・数学と云った専門を異にする先生方から頂く一言が素通りせずに、頭の片隅に残るようになってきた。そして、下村先生の生物規範グループほど、異分野連携を真剣に考えている集団はないと確信した。この意味でも、今回のシンポジウムは私にとって意義深いものであった。近づく中間評価を乗り切り、日本初の本格的な挑戦である異分野連携を進める流れに少しでも貢献しつつ、農学の重要性も多くの工学系の先生方にアピールできればと思う。皆さん、頑張りましょう！

(6) 新聞・報道

【新聞・報道】

総括班

(1) WIRED (2013 年 1 2 月 3 日)

「生物から学ぶ未来のテクノロジー：進展するバイオミメティクス」がアップされ、国内外の研究開発動向と「生物規範工学」が紹介されました。

(2) 日経 BP Thec-On(Web 版) (2013 年 12 月 4 日)

11 月 27 日タワーホール船堀にて開催された 13-2 高分子学会バイオミメティクス研究会での講演が、“ISO の WG で生物模倣の 2 つのアプローチなどを議論”、“3D プリンタは生物模倣技術の有効なツールになる”として紹介されました。

(3) 日刊工業新聞 (2013 年 12 月 8 日)

バイオミメティクス ISO の世界動向に関する記事が掲載されました。

バイオミメティクスの国際標準化におけるドイツ提案は、製品デザインルールの標準化を目論むものであり、日本に打撃をもたらす可能性が高い。我が国の競争力確保に向けて、産官学が連携した早急な対応が求められる。

(4) 朝日新聞 (2014 年 3 月 2 日)

朝日新聞グローブの特集「むしにまなぶ」で、“なぜ、今「むし」なのか”において、領域代表と石田秀輝先生（総括班）のコメントが紹介されました。

(5) Science portal (2014 年 3 月 13 日)

平坂雅男先生(総括班)のバイオミメティクス市民セミナーの講演が Science Portal に掲載されました。

「バイオミメティクス、産業と国際標準化の課題」

A01 班

(1) Science portal (2013 年 12 月 5 日)

篠原現人先生(A01 班)のバイオミメティクス市民セミナーの講演が、Science Portal に掲載されました。

「魚類標本の活用、工学系の分野でも」

(2) Science portal (2013 年 12 月 26 日)

野村周平先生(A01 班)のバイオミメティクス市民セミナーの公演が、Science Portal に掲載されました。

「走査型電子顕微鏡(SEM)で見る“昆虫のナノ・マイクロ構造”

B01-3 班

(1) 日刊工業新聞 (2013 年 12 月 19 日)

第 2 回ネイチャー・インダストリー・アワードで、最高賞の OSTEC 賞を受賞した石井大佑先生(B01-2 班)と特別賞を受賞した穂積篤先生(B01-3 班)の研究が紹介されました。

(2) TBS (2014 年 1 月 14 日)

”100 秒博士アカデミー”に細田奈麻絵先生(B01-3 班)が出演し、近年発見された昆虫の水中歩行能力や、今注目を集めているヤモリの足の吸着機構などの解説をしました。また、カタツムリを模倣した汚れないタイルやモスアイフィルムなどのバイオミメティクス製品が紹介されました。

B01-4 班

(1) Science portal (2014 年 3 月 13 日)

サイエンスポータル科学ニュースにおいて「カブトムシの角は矛盾だった」という題で、高梨琢磨先生(B01-4 班)によるカブトムシの捕食についての論文(東京大学との共同研究)が紹介されました。

C01 班

(1) 日刊工業新聞 (2013 年 10 月 23 日)

「自然に学ぶモノづくり」連載の 11 回目では、「日本の自然観取り込む ヒントは江戸時代」という見出しで、東北大学の石田秀輝先生、古川柳蔵先生 (C01 班) が提唱している「自然観を取り込んだモノづくり」が紹介されました。

公募班

(1) 「コロイドおよび界面化学部会 ニュースレター 2013 年冬号 04 Colloid & Interface Communication -News Letter from DCSC-」
(2013 年 12 月 16 日)

藤井秀司先生 (公募班) の総説が表紙に掲載されました。

(2) 日刊工業新聞 (2013 年 12 月 16 日)

藤井秀司先生 (公募班) の記事「ホタテ貝殻 有効利用」が紹介されました。

(7) アウトリーチ活動

【アウトリーチ活動報告】

(1) バイオミメティクス・市民セミナー 2013 年度後期

2013 年 10 月 5 日(土)～2014 年 3 月 9 日(土)まで、北海道大学総合博物館 知の交流コーナーにて行われるバイオミメティクス・市民セミナーを行いました。

(2) 科学と社会をつなぐ祭典“サイエンスアゴラ”へ出展しました。

2013 年 11 月 9 日(土)、10 日(日)に科学技術振興機構(JST) 科学コミュニケーションセンター主催で東京お台場の科学未来館を中心とした会場で開催された国内最大のサイエンスのイベントであるサイエンスアゴラ(<http://www.jst.go.jp/csc/scienceagora/>)に、総括班の下村正嗣先生が新学術領域として展示すると共に、公開ワークショップを行いました。

(3) 我孫子市鳥の博物館 第 66 回企画展 鳥の骨展 ー空飛ぶ骨組みー

2013 年 7 月 13 日(土)～12 月 1 日(日)、B01-5 班の劉浩先生が鳥の骨展 ー空飛ぶ骨組みーを開催しました。鳥の運動性能に着目し、その骨組みの機能に迫る企画展が千葉県我孫子市にある鳥の博物館で開催されました。

(4) 千葉大学アカデミック・リンクセンター「1210 あかりんアワー」にてセミナーを行いました。

2013 年 11 月 12 日(火)、千葉大学にて B01-5 班の劉浩先生がセミナーを行いました。

(5) OASIS – Open Access Sharing Image System –

2014 年 2 月 5 日(水)～2 月 11 日(火)まで、A01-1 班の長谷山美紀先生が札幌市北 2 条歩行空間スマートフォンや、タブレットを使って、画像でコミュニケーションを行う新しい形の SNS を提供する OASIS のプロモーションを行いました。

(6) 広島大学で「生物・工学接着・粘着連携研究会」が開催されました。

2014 年 2 月 6 日(木)、公募班の藤井秀司先生が広島大学理学部で「生物・工学接着・粘着連携研究会」を開催しました。

(8) 各種案内

2014年8月24～28日に福岡で開催される、
15th IUMRS-ICA (International Union of Materials Research Societies,
International Conference in Asia) において Materials Technology Inspired by
Natural Phenomena and Natural Materials のセッションが企画されます。

<http://www.iumrs-ica2014.org/index.php>

http://www.iumrs-ica2014.org/symposia/symposia_A-3.php

「生物規範工学」も協賛しておりますので、奮ってご参加願います。 申し込み要旨
締め切りは、2014年2月5日です。 講演申し込みは下記サイトよりお願いいたします。

<http://www.iumrs-ica2014.org/cfp.php>

企画展「4億年、昆虫との手紙展。バイオミメティクス～いきものに学ぶイノベーション～」併設市民フォーラム

公開講演会

生物模倣技術（バイオミメティクス）がもたらす 技術革新と博物館の役割

海外の最新動向から見る我が国の課題：プロセスイノベーションとバイオミメティクス知識基盤

平成 26 年 3 月 31 日(月)

13時00分～16時40分（入館は16時まで）

日本科学技術振興財団 科学技術館
地下2階サイエンスホール

（東京都千代田区北の丸公園2番1号）

参加無料

- 13:00 開会の挨拶
東北大学 下村 政嗣 教授
- 13:05 「低炭素・循環・自然共生を同時に実現する環境・生命文明社会の創造に向けて」
環境省大臣官房秘書課 中井 徳太郎 課長
- 13:35 「自然に学ぶものづくりー生物を観る、知る、創る未来に向けて」
㈱ユニバーサルデザイン総合研究所代表取締役 赤池 学 所長
- 14:05 「博物学、生物進化・生物多様性からみた生物模倣技術」
東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻 伊藤 元己 教授
- 14:35 「欧州におけるバイオミメティクスの動向と博物館の役割」
帝人㈱ 平坂 雅男 知財部長
- 15:05 休憩
- 15:15 「バイオミメティクス研究における電子顕微鏡の役割と最新の観察法」
浜松医科大学 針山 孝彦 教授
- 15:45 「バイオミメティクスデータからの価値創出に関する最新動向」
北海道大学 長谷山 美紀 教授
- 16:15 「ナショナル・バイオミメティクス・イニシアティブとしての
バイオミメティクス・ビジネス協議会の発足に向けて」
東北大学 下村 政嗣 教授

アクセス



【主催】（独）科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業、
文部科学省科学研究費新科学領域「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、（株）エヌ・ティー・エス

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

平坂 雅男 (帝人株式会社 知的財産部 知財戦略室長)

バイオミメティクスの産業応用 - 世界動向と国際標準化 -

2013年12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



新たな科学の発展と共に特許出願が増加するという、産業化におけるサイエンス・リンケージが世界的な潮流となっています。今、バイオミメティクスに関する研究論文数が急増し、そして、産業化への期待と共に製品開発が本格化しようとしています。まさに、バイオミメティクスの産業応用の創成期であるともいえます。

先陣をきる欧州では、飛行機の機体の空気抵抗を減少させ、燃料効率の改善を図るためにサメの表面構造を模倣したコーティングが研究され、機械分野においても、トンボの飛行を模倣したトンボ型ロボットが開発されるなど、産業化に向けた動きが活発化しています。今回のセミナーでは、欧州での研究開発の最近動向をご紹介しますと共に、バイオミメティクスの国際標準化についてわかりやすく説明し、また、日本の課題についても話題と致します。



出典：Lufthansa 航空ホームページ



出典：FESTO社ホームページ

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

BIO MimETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

出利葉 浩司 (北海道開拓記念館 学芸副館長)

バイオミメティクスだけじゃない!! 博物館の活用法ー開かれた博物館をめざしてー

2014年1月5日(日)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分



バイオミメティクスという研究は、さまざまな生物を電子顕微鏡で細かく観察するところが出発点。そこからあらためて生物の特徴を考えてみよう。そして、同じような構造を持つ物質を現代科学の力で作ってみようということになるのでしょうか。それでは、なぜ、この市民セミナーは「博物館」でおこなわれるのでしょうか？それは、博物館が持つ莫大な標本を活用しようというのが、この研究の「隠し味」だからです。博物館というともまず思い浮かぶのは展示室ですが、

そこで展示されている資料は、博物館が所蔵する資料全体からすれば、ほんの一部でしょう。それでは、博物館の所蔵資料を利用するのはごく一部の研究者に限られるのでしょうか？今回のプログラムでは、これまでのお話からちょっと横道にそれて、博物館の楽しみ方について考えてみます。博物館というと展示を見るだけと思っていらっしゃる方は多いのではないのでしょうか？展示といっても、さまざまな「かたち」があります。ひと味違った展示の楽しみ方、博物館の利用の仕方、収蔵資料へのアクセスなどについて、お話しします。



オックスフォード大学 ビット・リヴァース博物館の展示



これも展示です (アメリカ合衆国国立自然史博物館にて)



国立アメリカ歴史博物館でのハンズオン

主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
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

山内 健 (新潟大学 自然科学系 教授)

生物の不思議を工学に生かす ーバイオTRIZという考え方ー

2014年2月1日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分



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ます。しかしながら、発明者の発想に頼ったケースバイケースでの材料設計が主となっており、生物の機能を工学技術に移転する手法の体系化は、非常に困難なのが現状です。本講演では、自然界に見られる高効率な生物機能を簡便かつ効率良く、工学技術に移転できる手法「バイオTRIZ」について、基礎から最新の研究動向までを紹介いたします。この方法では、生物の知恵をヒントにすることで、研究者が抱える技術矛盾を解決することが期待できます。



技術矛盾をどう解決するか

革新的問題解決法 (TRIZ) を利用した材料設計

生物の機能を工学に移転する

Hard

Soft



固体電解質を利用したEMF漏水検知センサー
(曲げにくいこと、大幅増強できないことが課題) ※センサー部は最大3cm



イオン液体を利用したEMF漏水検知センサー
(フレキシブルで大幅増強が可能)

主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物模倣工学」
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-jmu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

北條 賢（神戸大学 理学研究科 特命助教）

シジミチョウ、 その騙しのテクニック

2014年 3月 9日 (日)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分



他の生物の構造や機能を模倣しようとする

試みはなにも私達人間だけに限ったことでは

ありません。さまざまな生物が培ってきた長い歴史

の中からも、たくさんの巧妙な模倣技術を見出すことができます。

本セミナーでは生物個体間の相互作用、特に「アリと共生するシジミチョウ」

に関するトピックを中心に、生物が他の生物とのかかわり合いの中でお互いの

特徴を巧みに模倣し、自身の生存戦略へと応用する技術を紹介したいと思います。



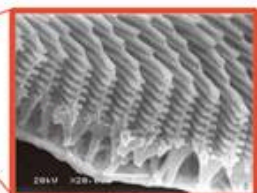
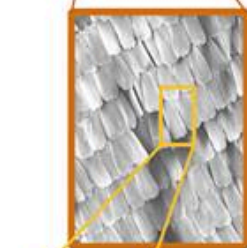
主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高分子学会北海道支部
北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

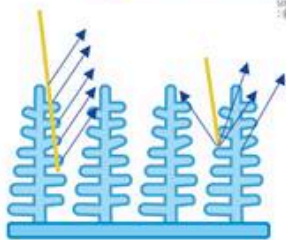
バイオミメティクス・市民セミナー



モスアイフィルム®
© 2011 住友



SEM写真
© 2011 住友



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

バイオミメティクス (Biomimetics) は、
生物模倣技術と訳します。

「カの口を模倣した痛くない注射針」「サメ
の皮膚を模倣した水抵抗の少ない水着」「ヤモリ
の指先を模倣した粘着テープ」、さまざまな分野での
新技術の応用と商品開発がなされています。

生物は、5億年の自然選択によって、人が頭で考える
デザインよりも優れたデザインを獲得しています。

博物館には多くの生物標本が収蔵されていますが、標本
を工学者の設計デザインの視点から見直すとうなるで
しょう。生物学者では解けなかった自然の造形美の意味が
解き明かされるかもしれません。そして生物のデザインから
アイデアを得て新しい技術が生まれるかもしれません。

動植物の持つ能力や形・機能などの特性を把握し、そこからヒント
を得て人工的に設計・合成・製造するのが「生物規範工学」です。

生物学と工学と博物館を結ぶ、**バイオミメティクス市民セミナー**では、
生物学者と工学者が、新しい視点で生物の見方を紹介します。

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

セミナー28：2014年4月5日(土)

魚津吉弘 (三菱レイヨン(株)リサーチフェロー)
「モスアイフィルムの意外な可能性」

セミナー29：2014年5月3日(土)：憲法記念日

Olaf Karthaus (千歳科学技術大学 教授)
「花粉を真似た材料」

セミナー30：2014年6月7日(土)

久保英夫 (北海道大学大学院理学研究院数学部門 教授)
「数学とバイオミメティクス」

セミナー31：2014年7月5日(土)

山崎剛史 (公益財団法人山階鳥類研究所・研究員)
「鳥とバイオミメティクス」

セミナー32：2014年8月2日(土)

高梨琢磨 (独立行政法人森林総合研究所
森林昆虫研究領域・主任研究員)
「生物が利用する音・振動のバイオミメティクス」

セミナー33：2014年9月6日(土)

穂積 篤 ((独)産業技術総合研究所
サステナブルマテリアル研究部門 研究グループ長)
「撥水／撥油材料の最新研究動向」

「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. 3

発行日 2014 年 3 月 31 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 生体分子デバイス研究分野研究室内

〒001-0021 札幌市北区北 2 1 条西 1 0 丁目

電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361