

「食と農」の博物館 展示案内 No.68

展示期間■2014.10.1～2015.3.15

東京農業大学「食と農」の博物館

〒158-0098 東京都世田谷区上用賀2-4-28

TEL.03-5477-4033

FAX.03-3439-6528

(URL)<http://www.nodai.ac.jp/syokutonou/>

開館時間 午前10時～午後5時 (4月～11月)
午前10時～午後4時30分 (12月～3月)

休館日 月曜日(月曜が祝日の場合は火曜)・毎月最終火曜日
大学が定めた日(同時休業がありますのでご注意ください)

開館10周年記念展示 第2弾

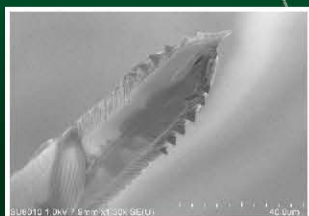
「バイオミメティクスを超えて!」

—昆虫などの生き物や
自然に学ぶものづくり—

Beyond Biomimetics:
Monozukuri by Learning
from Insects, Animals and Nature

表紙説明

蚊の針の先は、先端部のギザギザの部分針と皮膚との接点を少なくしているため、人が痛みを感じにくい。これを利用して株式会社ライトニックスが痛くない注射針を開発した。



開催にあたり

本学農学科では植物、微生物、昆虫類など多様な生き物を対象として、食糧、観賞用植物などの持続的利用を目指し、教育・研究しています。長い年月を生き続けてきた地球上の生き物は、様々な環境の変化に適応し、進化してきたため、われわれ人間が驚くようなきわめて優れた機能を備えています。

この生き物の優れた機能性を模倣し、活用することで、人間の生活を豊かにする、様々な材料やシステムなどが開発されています。こうした手法は「バイオミメティクス」と呼ばれ、近年、異分野・境界領域の融合により新しい潮流ができつつあります。

ご存知のように、わが東京農業大学は農業分野だけでなく、多方面の分野でも生き物たちの利活用について教育・研究している大学であり、このバイオミメティクスという新しい科学技術の分野をもリードできる可能性を十分秘めていると言っても過言ではありません。

今回の「食と農」の博物館10周年記念展示の前半は、「農と祈り」という日本の「農」の根幹にある、古くからの思想・人と農との関係・共生と祈りについて、教職・学術情報課程と「食と農」の博物館の共催で行われてきました。それに続く第2弾は「バイオミメティクスを超えて！」—昆虫などの生き物や自然に学ぶものづくり—と題して農学科が主体となり、開催する運びとなりました。是非この機会に生き物の機能性などを存分に活用した、革新的なものづくりの実際を多くの皆様にお楽しみいただければと思います。あわせて、未来へ向けて挑戦する農学科にもご理解、ご支援の程よろしくお願い致します。

東京農業大学 農学部農学科
農学科長 小池安比古

20世紀のバイオミメティクスを超えなければ 未来に繋げない！

東京農業大学 農学部農学科 教授 長島孝行

「自然」は、しなやかさを持った「ひとつのシステム」である。当たり前という言葉かもしれないが、つい忘れがちなことでもある。

そして、自然のもの、生き物のものは完璧に近い。例えば普通に存在する軽元素を材料に常温・常圧でナノサイズにまでおよぶ完璧なものづくりを行う。更にはそこに研ぎ澄まされた機能性と安全性をも持たせている場合が殆どである。

人類はこれまでその「もの」を人工的に作ろうとしてきた。しかも、その素材を石油という枯渇するひとつの資源に集中させてしまった。これが20世紀型のバイオミメティクスと考えると良いだろう。その結果、20世紀の利便性は大きく増し、ものも溢れ、一見豊かな社会が誕生したように思えた。ところが、人の心はこれとは平行することなく不安だけが心に積もっていく現象が見え始めた。本来科学技術は人類が抱える不安を取り除くのが本業の一つであったのに、どういう訳か現在はそうならないように思えてくる。

街角で聞く言葉にハッとしたことがある。それは献血車の前で聞こえるアナウンス、「血液は人工で作ることはできません」である。科学者の中には科学にはできないものはない、という研究者もいる。しかし、私はできないものがある、ことを認識することが人類を持続させる上で重要なキーワードだと思っている。

例えば、ヤモリの足は裏に生えている200万本ものミクロンレベルの枝分かれをした細い毛が空気を押しのけることにより生まれるファンデルワールス力(分子間力)により、50gもあるヤモリでも様々な場所への接着が生まれる。決して粘着物質がある訳ではない。この微細な構造を人間が作り靴底や手袋に用いれば、ガラスの側面なども簡単によじ登れるものができる。

これを例にとって考えると、問題は二つある。

一つは、この微細な構造物などを作るのに相変わらず石油を用いていることだ。バイオミメティクス(生物模倣技術)はそういう科学がまだ多いことも事実であるが、それが変わってきたという話は後出の下村先生の特別寄稿を参照して頂きたい。

生物のものを真似て石油で作る、という20世紀の科学から脱却できていない。キーワードは地球社会システムの持続性だ。できるものなら再生可能資源やリサイクルできる素材を材料にして欲しい。枯渇する資源をひたすら消費し、人類だけが一時的恩恵で生活を築く。これでは、30世紀まで持続しない。勿論、この技術を全否定するつもりはない。医学などの分野では当然こうした技術も必要だ。

二つめは、バイオミメティクスでは、ヤモリの足裏の微細構造が実現できた段階で、もはやその真似られた側の生物が地球上からいなくなっても問題ない存在になることである。これでは生物の多様性の保護の概念は生まれてこない。やはり、30世紀まで持続する可能性は低い。

当たり前のことだが、21世紀以降のものづくりは、ローテク、低エネルギー投資、脱石油技術であり、自然を真似るだけではなく、自然に学ぶ、自然のものを良質に使う時代であって欲しい。つまり、持続するものづくりは、自然のシステムに逆らわず、資源の循環を実現させること以外にはないような気がしてならない。

今回はバイオミメティクスで世界をリードしている下村政嗣先生に、これまでのバイオミメティクス(生物模倣技術)を総括して頂き、未来に向けた(生物模範工学)について「進化するバイオミメティクス」と題して本展への特別寄稿をお願いした。非常に参考になる論文である。

生き物に学んだものづくりの具体的事例をこれからいくつか述べて行こうと思う。読んでいくうちに頭が慣れて、こんな生き物のこんなところを利用していけば、こんなものづくりが出来るのではないか？こんなものがあたらいいな、などを創造できるのではないだろうか。





銀色に光り輝く繭

マダガスカルに生息するアゲマ・ミトレイは銀色に輝く繭を作る唯一のガである。年間3キロしか取れず、生きたものを採集したら直ちに絶滅してしまうかもしれない。そこで私達は、成虫が出て行った繭のみを入手し、ジュエリーなどの需要を考えている。この他にも金色、銅色の繭を作るガ類も生息する。

1 タマムシのように 自ら発色する金属

クジャクの
発色機構もこれに
類似している



タマムシは色素をもたず、あの綺麗な色を出す。しかも間違うことがない。これは、皮膚の層状構造をナノレベルでピタッと合わせることで、緑、紫と作り分ける。実にすばらしい。しかも温度差があっても出来る色が同じだ。更には常圧でも同様である。

このメカニズムを利用して、私達はステンレスに応用した。これなら、石油系の塗料も含まれず、ステンレス表面近くのナノ構造によって自らが発色し、しかもオールステンレスの為、リサイクルが出来る。ここは非常に優れた点である。しかもこの技術を用いると変色することも、錆びることもない。

現在この方法で200色近い色を再現できるようになっている。ステンレス製のキッチンがピンクや黄色のタマムシ発色だったら台所仕事もいっそう楽しくなるに違いない。やがてこの技術が車のボディに用いられれば、錆びることも、変色することもなく、ワックスを使うこともなくなる。しかも、簡単にリサイクルできるのである。素晴らしいとは思わないだろうか。



タマムシの
発色機構を
模倣した製品

チョウの仲間は綺麗な種類が沢山いる。その殆どが色素による色であるが、中には構造によって色を発色させているチョウもいる。その代表的なものがモルフォチョウであり、青く輝く翅を持っている。これを模倣したのが帝人株式会社のもルフォテックスである。

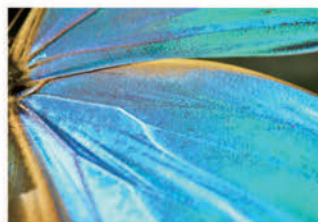
自然界の色は2種類に大別され、「構造色」と「色素色」がある。光の波長あるいはそれ以下の微細構造に白色光が当たって発色する現象を構造発色と呼ぶ。この構造色は、光のエネルギーの一部が失われることによる発色でないことから、構造が保存されている間は、退色や劣化を生じることなく永遠にその色が保存される。

現代の多くの色素は石油由来のものが多く、その色素によるアレルギーも少なくない。このような理由からモルフォチョウの鱗片の構造を模倣した繊維が誕生した。

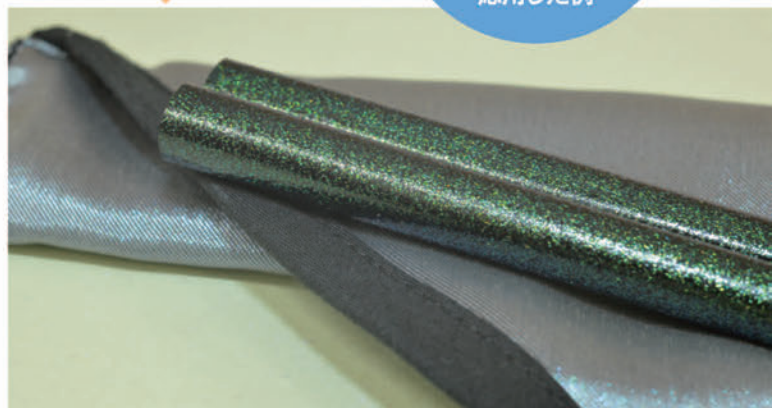
この繊維は屈折率の異なる2種類のポリマー(PETとNylon)をナノレベルで張り合わせることで発色させることが可能となった。但し実際のモルフォチョウの鱗片に比べ屈折率差が少なく(蝶の0.5に対し0.05)積層数を61層にして繊維断面を扁平にし、層厚を70~100nmにコントロールし発色に成功した。また、層厚を変えることで青・緑・赤のキラキラ光る色調の繊維を作り出した。

しかしながら、繊維そのものが重いこと、車などに塗装した場合の強度などに問題もあり、生産が止まっている。

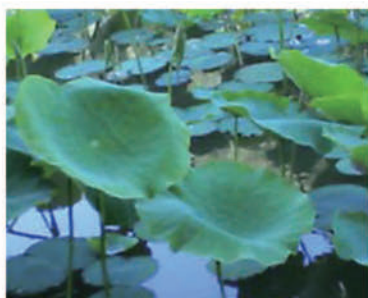
2 チョウのように 発色する繊維



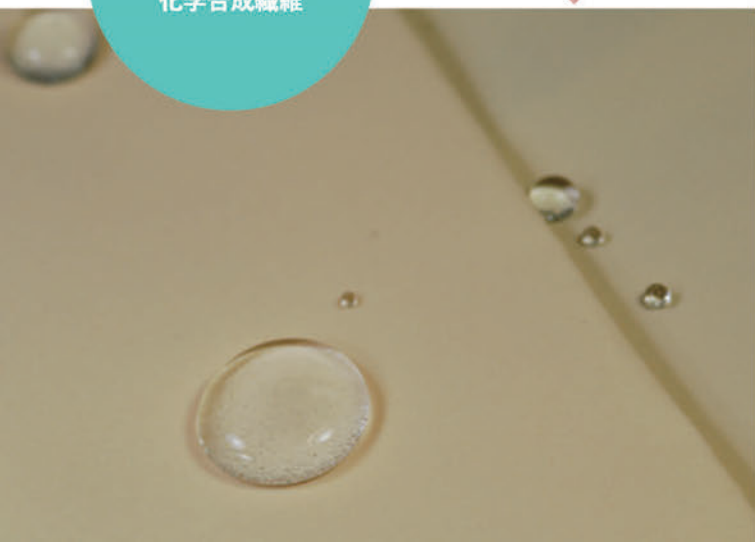
ブルーに輝くモルフォチョウの発色を模倣した化学合成繊維とそれをくだいて著に応用した例



3 ハスのように 撥水する布



ハスの表面構造を模倣した化学合成繊維



ハスやサトイモの葉の上に水玉が出来るのは誰もが知っている。実際にハスの葉を電子顕微鏡で見ると規則的な凹凸があり、この構造によって綺麗な水玉が形成される。また、葉の表面に汚れがあっても、雨が降ればその汚れは水玉にくっついて葉の表面を転がり、葉は常に綺麗な状態を保つことができる。この性質をロータス(ハス)効果と名付け、1998年にドイツの植物学者らが特許を取った。

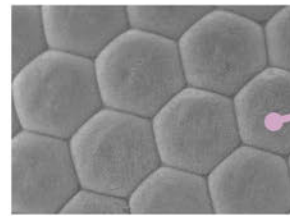
ドイツのある企業はロータス効果を塗料に応用した。屋根や外壁に塗って、雨が降れば汚れも流されるというものだ。日本でも帝人ファイバーが、ハスの葉を研究し、これを模倣して化学繊維を開発した。繊維をハスの葉のように凹凸に織ることで、その構造が壊れない限り超撥水の機能は失われない。実験では通常の撥水加工に比べると耐久性があることが確かめられている。また、テーブルクロスなどに使用すれば、水、醤油なども直ぐに玉になり汚れにくい。勿論、レインコートや帽子などにも使える。このロータス効果をもつ商品が次々に世界中で開発されている。

■ 展示解説

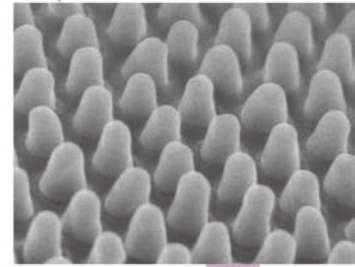
最近テレビのコマーシャルでも目にするが、モスアイ(ガの眼)パネルが話題になっている。ご存知のように多くのガは夜間に飛翔する。つまり暗い中でもある程度ものを見ることが出来るということだ。昆虫の眼は複眼と呼ばれ、数百、数千の個眼が隙間なく集合して出来ている。その一つ一つの個眼は、レンズ系・感覚細胞系の規則的なものからできている。ガも全く同じである。更にガのレンズ表面には、コルネアル・ニップルと呼ばれる、約200ナノの規則的な乳頭状突起があり、これがあることにより外部から入ってきた僅かな光を全く無駄無く神経細胞に伝える機能を持っている。

このナノレベル乳頭状突起の構造をフィルムなどに模倣したらどうなるか？通常、ガラスと空気の界面では屈折率が急激に変化するため光の一部は反射してしまうが、模倣したフィルムはガの眼のように、可視光線の波長より小さい周期の突起が存在するために、屈折率の変化が緩やかになる。その為に光を殆ど反射しなくなる、というものである。

この無反射フィルムは、博物館、美術館、水族館などのガラスに利用すれば様々な角度からみても良く見え、満足度が格段にアップする。同様なことは色んな場面で利用できそうである。既に大日本印刷や三菱レーヨンなどで開発されている。



ガの眼(電子顕微鏡写真)
(六角形のひとつひとつを
個眼という)



個眼の点の部分を
さらに拡大した写真

ガの眼のように 光らない 無反射フィルム



アクリル
フィルムを
使った写真

モスアイ
フィルムを
使った写真

カタツムリのように 汚れないタイル



炭酸カルシウムから成る殻を維持するためにコンクリートをもなめるカタツムリだが、殻の表面は常に綺麗であることに驚かされる。前東北大学工学部の石田秀輝教授によると、カタツムリの殻には特別な構造があるらしい。表面を電子顕微鏡で観察すると規則的な凸凹の溝があり、この非常に細かい溝に水が溜まって薄い水の膜が作られる為、ベトベトした油などが付きにくくなっているという。

このメカニズムを利用し、株式会社LIXILはタイルなどを開発した。前頁に述べたハスの葉と似たところがあるが、油等に強いようで、車の排気ガスなどで汚れた壁を綺麗にするには大量の石油由来洗剤が必要となる。しかしこのタイルの場合、雨が自然に落としてくれるらしい。同社はタイル以外にもトイレ、風呂、流し台なども開発し、何もしないでいつもピカピカのものづくりを開発している。

カタツムリの
殻の表面構造を
模倣した外壁



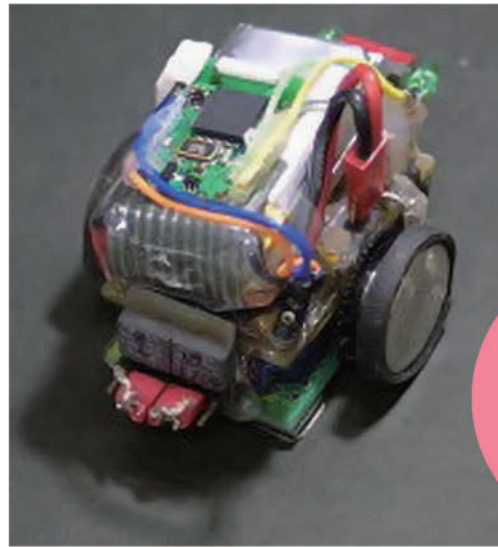
昆虫の動きには意味がある。それらの動きは様々な状況下で、効率的かつ確実に環境情報を受け取ることができる。その代表的なものにカイコガのジグザグクルリンという動きが知られている。この動きに着目し「匂い源探索ロボット」を東京大学の神崎亮平教授が開発した。

カイコガの雄は、性フェロモンを感知すると反射的に直進方向へと移動する。そして、匂いが薄れると小さなジグザグターンから大きな回転歩行に移るのである。動きの途中で再度、性フェロモンを感知すると反射的な直線歩行に移る。この繰り返しによって雌に近づいていくのである。

カイコガのジグザグクルリンとそれに関わる神経回路を解明して、フェロモンを感知する神経回路を電子回路で再現することで「匂い源探索ロボット」作り出した。この動きは常に変化する匂い環境下で、数メートル離れた匂いの感知を可能とする。

この他にも音源を感知するロボット、六本足で歩行するロボット、昆虫が操縦するロボットが開発されている。

昆虫のような動きをするロボット



カイコガの性フェロモンを感知するロボット



エチゼンクラゲを利用した森林づくり

エチゼンクラゲを利用した水分吸収性チップ



一時期大量発生し、漁師に大打撃を与えたエチゼンクラゲだが、現在、天然の土壌改良材としての注目が集まっている。エチゼンクラゲの体はコラーゲンを多く含む間充ゲル組織をもつため高い水分保持能力を有し9割以上を水分が占めている。愛媛大学の江崎次夫名誉教授らの研究グループはこれを乾燥させチップにし、施肥することにより土壌の保水力を向上させようと考えた。クラゲチップは50gに対し8倍の400ccの水を吸収することができる。また、窒素やリン酸も大量に含み最終的には微生物に分解され土壌に吸収されるので有機肥料としての効果も期待できる。実際に愛媛県の山火事跡に施肥したところ1年間で通常区に対しクラゲ施肥区は60cm増しの成長量が確認された。枯損率に関しても半分程度に抑えられることが判明した。クラゲチップは今後砂漠などの乾燥地帯への転用が期待されている。



日本発！ エシカル昆虫コスメ



今やシルクは糸として使われるだけのものではない。繭の93%、そのうち75%はフィブロインタンパク質からできている。近年、このフィブロインタンパク質の機能性として、生体親和性・吸脂性・紫外線遮蔽性・難消化性・制菌性など、驚くべき機能が明らかになっている。フィブロインはカイコの絹糸腺と呼ばれる器官から液状で分泌される。

最近では、一度吐かれた糸を、カイコの粉と絹糸腺細胞のゴルジ体で生成されるタンパク質と同じ状態まで戻すことができる技術も開発された。

このタンパク質の機能を利用すれば、皮脂が浮きにくく保湿力の高い、化学物質過敏症の方にも安心して勧められるコスメができる。また、摂取することで、体内の脂肪を吸着するダイエット素材にもなりえる。すでにこうしたコスメ・サプリメントが発売されている。

また、このようなタンパク質の利用においては綺麗な形の繭である必要がないため、カイコが羽化した後の繭や、糸として使えないとはじかれたくず繭もなんら問題なく利用することができる。



水溶性
シルクバフと
水だけでつくった
美容液

カブトエビを利用する 無農薬水田作り

生きた化石とも云われるカブトガニに容姿が良く似たエビが日本の水田には時々みられる。3センチ程度のオタマジャクシにも似たこのカブトエビは、かつては田の草取り虫とも呼ばれた本来便利な生き物なのである。1960年代になると日本は自動車産業が全盛期をむかえ、化学農薬が増産、農業分野には多くの農薬が持ち込まれた。田の草取り虫は注目されることなくいつしか忘れ去られてしまった。

1993年頃、私達はこのカブトエビの除草能力に改めて注目し色々調べた結果、除草能力の高さはもとより、農薬などの化学物質に極めて敏感であることから農薬

のチェックもできることが解った。また、卵は乾燥させると10年、100年もクリプトビオシス(無代謝休眠)をすることも解った。近年では、無農薬にしたことからカブトエビが発生する水田が良くみられる。また農業を暫く止めていた福島の水田から発生した例もある。これはかつて日本中にいたカブトエビが農薬を大量に使用する以前に産み落としていた卵なのだと思う。

近年ではこうした特徴を逆に活かし、カブトエビに除草をお願いし、除草剤を全く撒かない無農薬水田(カブトエビ水田)が色んな地域に取り入れられている。同時に無農薬にした水田には多くの生き物が戻り、生物多様性がみられるようになっている。埼玉県秩父市吉田地区(中山間地域)では、東京農大とこの取り組みを17年以上実践し、豊かなむらづくり事業で農林水産大臣賞を受賞している。生き物そのものを利用し、米作り、そして街づくりまでも実践しているものづくりである。

ヤマユガ科などの多くの昆虫がシルクを作り出す。ヤマユガ科のシルクには、カイコにはない特性を持っている。ヤマユガ科の糸の断面を電子顕微鏡で観察してみると、シルクナノチューブと呼ばれる約200nmの穴が無数に存在している。その穴は筒状になっており、約200nmの間隔でナノフィラメントを形成している。このナノ構造を持っているため、軽くて温度や湿度調節にも優れ、臭いも吸着してくれるという。さらに、紫外線のA、B、C波を強くカットする特性もある。

この機能性を利用して、東京農大は、シキボウ株式会社と共同でエリシルクを利用した天然機能性新繊維「エリナチュレ(2013年キッズデザイン賞受賞)」を開発した。エリシルクの繊維は細く切れやすい為、長繊維としての利用は難しかった。「エリナチュレ」は長繊維に加工した綿とヤマユガ科の繊維を特別な方法で30%混紡したものである。綿100%の繊維に比べて、11%軽く、UVカット性を12~14%上昇、アンモニア消臭性も21%上昇することができる。これらは、化学的な後加工することなく天然素材のまま機能性を発揮されるため、皮膚の弱い乳児や、アレルギー体質の人にも安心して使用することが出来る素材として、また洗えるシルクとして高い注目を集めている。

その他にも、金色や緑色などユニークなシルクもあり、天然のシルクを利用したものづくりが研究が行われている。



未知なるシルクが 繊維を変える

様々な種類の
繭から産まれた
天然機能性新繊維



カブトエビと
それを利用した
除草剤無しの水田
(宮城県東松島)



10周年記念展示での特別商品として、カブトエビマークの入ったタムシ発色スプーン・フォークを開催期間限定で生協から発売します。200本の特注で新潟燕市の中野科学との連携商品です。素材はオールステンレスですが、塗料を塗らずに発色させています。この機会に是非ご覧ください。デザインはゼミの学生で、色は4色を揃えました。

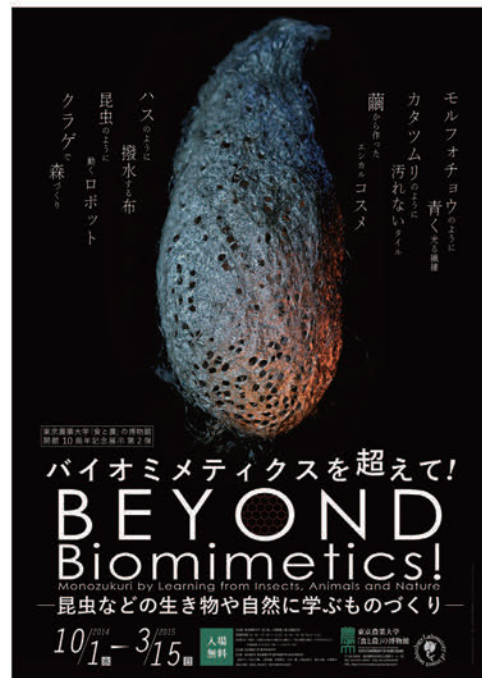
未来に繋げる、未来を創る

あなたは、未来に20世紀の利便性中心の生活を希望しますか？それとも自然との共存を希望しますか？

ヒアリングの結果、今世紀初めには6割以上の回答が前者であったのに対し、その10年後には回答が逆転した。地球環境問題の意識の影響からだと思うが、「自然との共存優先」の答えを出したのである。これは、日本人の「豊かさの尺度」が既に変化していることを示す。言い方を変えれば「ものの豊かさ」から「心の豊かさ」を求めはじめているということだと思う。

では、「心豊かな暮らしのかたち」とはどんなものなのだろうか？そして未来へつなげるためには、その中でテクノロジーはどのようにマッチングしなければならないのだろうか？そしてその先にあるライフスタイルのかたちはどうなんだろうか？

そんな未来の在りかたを本展示が考えるきっかけとなれば幸いである。



あとがき

日本は生物多様性に富んだ国である。この生物多様性からは、生態系サービス、環境保全以外にも、今回示したように生物の特性や生物の素材等を良質に活かしたものづくりは、持続的社会的構築に貢献できるのである。

「食と農」の博物館10周年記念展示の前半「農と祈り」は、現在・過去の「農」への日本人の想いだとすれば、後半の「バイオミメティクスを超えて!」は、未来への「農を含めた自然」への想いかもしれない。しかし、自然に対して正面から向かい合い、自然と共に生きようとする原型思想は、縄文時代から我々は脈々と無意識のうちにも受け継いできたものであるように思えてならない。その思想の一つが八百万の神なのだろう。そして私達が求めている未来とはもしかしたら「懐かしい未来」であるのかもしれない。

最後に私の同志でもある、ユニバーサル総合デザイン研究所の赤池学、東北大学名誉教授の石田秀輝、千歳科学技術大学教授の下村政嗣の諸氏には改めてお礼を申しあげたいと思う。また、動かない私に対して良く動いてくれるゼミ学生にはこの紙面をかりてお礼を申しあげる。今回の展示はその学生達にお願いした。

東京農業大学 農学部農学科 教授 長島孝行

進化するバイオミメティクス —生物模倣技術から生物規範工学へ— Toward Engineering Neo-Biomimetics

千歳科学技術大学
高分子学会
バイオミメティクス研究会
文部科学省科学研究費
新学術領域「生物規範工学」

下村 政嗣

1. バイオミメティクス？バイオミクリー？

2011年8月12日付けのFinancial Timesオンライン版は“*Inspired, naturally*”と題する記事において、San Diego動物園が2010年10月に上梓した報告書“*Global Biomimicry Efforts : An Economic Game Changer*”で「Biomimicryの分野が、米国において15年後に年間3000億ドルの国内総生産、そして2025年までに160万人の雇用をもたらす」という経済予測を行ったことを報じた。さらにSan Diego動物園は、2012年8月にZurichにおいて、Zurich動物園、Biomimicry Europe、Biomimicry 3.8などとの共催で“*Biomimicry Europe Innovation and Finance Summit*”を開催している。2回目のサミットは2014年9月4日にZurichであった。

Financial Timesをして“産業革命に匹敵する”と言わしめたBiomimicryとは、何だろうか？2010年に名古屋で開催されたCOP10（生物多様性条約第10回締約国会議）に先駆けて2009年に提言された「日本経団連生物多様性宣言」の“行動指針とその手引き”においても、「5-1 自然の摂理と伝統に学ぶ技術開発を推進し、生活文化のイノベーションを促す」科学技術としてバイオミクリーが取り上げられ、その例として、「絹糸の新繊維への応用」や「モルフォチョウの羽の構造の発色技術への応用」、「フクロウの羽やカワセミのくちばしの形の新幹線の空気抵抗低減への応用」「カタツムリの殻の構造を汚れにくい建材技術への応用」「ハスの葉の微細構造の撥水技術の応用」などが紹介されている。つまり、バイオミクリーとは、「生物模倣技術」な

のである。しかし、生物模倣という言葉は古くから知られており、Biomimetics(バイオミメティクス)の邦訳である。何故、バイオミメティクスではなく、バイオミクリーという言葉が使われるのであろうか？

バイオミクリーの命名者は、“*Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*”(邦訳「自然と生体に学ぶバイオミクリー」)の著者であり、Biomimicry 3.8の創設者でもある生態学者Janine Benyus博士である。一方、Biomimeticsの命名は1950年代後半に遡る。「シュミット・トリガー」と呼ばれる電気回路を発明したOtto Schmittによる命名であることが判っている。“バイオミメティクス”と“バイオミクリー”の微妙なニュアンスの違いには、SchmittがBiomimeticsを命名してから半世紀、エネルギーや資源、環境が問われる現在において、科学技術のありかた、とりわけ生物模倣の役割が問い直されているように思われる。

生物模倣が、「持続可能性」に向けた問題解決へ寄与すべきであることは、Benyusが2008年に開催した会議の主題である“*Biomimicry’s Climate-Change Solutions : How Would Nature Do It?*”に反映されている。生物模倣は、経済活動のみならず環境問題解決の救世主として世界的な期待を担っているのである。経団連の生物多様性宣言の背景には、ドイツ政府と産業界の動向がある。ドイツ連邦環境・自然保護・原子炉安全省(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU))は、2007年版生物多様性条約国家戦略に関する白書“*National Strategy on Biological Diversity*”において、“*Innovation*

and employment”の項で3頁を費やして紹介している“biological diversity and its innovation potential”という節で、「生物多様性が動植物をヒントにした高性能技術の開発を可能にすること」に言及している。さらにボンで開催されたCOP9において、民間企業による生物多様性保全活動を目的として、BMUによる支援のもとに「ビジネスと生物多様性イニシアティブ “Biodiversity in Good Company”」を発足した。そのホームページの冒頭を飾るキャッチフレーズ“Without Biological Diversity No Economic Diversity”は、生物多様性の保全が、経済活動の大前提となる生物資源、遺伝子資源、バイオマス等のエネルギー資源、などの安定的な確保と供給を保證することを意味している。生物多様性が無ければ、経済活動そのものが無いことは、自明なのである。

2. バイオミメティクスの歴史

生物模倣の考え方は古くからある。Otto Schmittは、神経システムにおける信号処理を模倣して、入力信号からノイズを除去し矩形波に変換する電気回路として知られている「シュミット・トリガー」を発明した。材料への応用はさらに古く、我が国ではマジックテープとして知られる面状ファスナー (VELCRO®)は、植物の種が動物に付着することを模倣した製品化である。さらに、Du Pont社のWallace Carothersが1935年に発明したナイロンが絹糸を模倣した繊維であることは良く知られている。ナイロンに限らず、繊維産業はバイオミメティクス産業であると言っても過言ではなく、帝人と日産が開発した構造色繊維であるモルフォテックスはその流れにあると考えると、その開発の時期がはやかったことも不思議ではない。

1970年代になりバイオミメティクス研究は、化学の分野において、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣しようとするBiomimetic Chemistryとして世界的な潮流を迎える。これは、X線構造解析によって生体触媒である酵素の反応部位の化学構造が明らかになったこと

で、有機化学の手法を用いて生体反応を分子論的に解明することができるようになったからである。80年代に盛んになった人工光合成の研究は色素増感太陽電池の基礎を明らかにし、ゲルアクチュエーターの研究は人工筋肉などの発明をもたらした。その後、分子生物学の大きな展開によって遺伝子を中心として生命現象を解明する研究が生物学の主流になっていくなかで、1980年代後半からはLB膜や分子エレクトロニクスの台頭と相俟ってBiomimetic Chemistryの主流は「分子集合体の化学」や「超分子化学」に向かうことになり、分子ナノテクノロジーの基礎をかたち作る。

一方、機械工学や流体力学の分野でもバイオミメティクス研究の潮流がおり、昆虫の飛翔や魚の泳ぎを真似たロボットや、コウモリの反響定位や昆虫の感覚毛を模倣したソナーやレーザーなどが開発された。新幹線の形状がカワセミのくちばし形状を模倣してトンネル突入時の流体抵抗を低減することや、パンタグラフにフクロウの風切羽の構造を適用することで防音効果が得られることは良く知られている。“機械系バイオミメティクス”の研究は衰退することなく継続し、軍事産業、鉄道や船舶、航空機産業のみならずマイクロマシンやMEMSなどの先端技術分野のみならずエコ家電製品などにも影響をあたえている。

そして、今世紀に入り、材料研究の分野においてバイオミメティクス研究の新潮流が欧米を中心に注目を集めるとともに、その実用化の動きがはじまりつつある。蓮の葉の超撥水性、ヤモリや昆虫の足の接着性、サメ肌の流体抵抗低減化、蛾の眼の持つ無反射性、モルフォ蝶の鱗粉が放つ構造色など、生物表面に形成されるナノ・マイクロ構造に起因する特異な機能を模倣して、テフロンを使わない撥水材料、接着物質を使わない粘着テープ、スズ化合物を使わない船底防汚材料、金属薄膜を使わない無反射フィルム、色材を用いない発色繊維などが開発されている。個々の研究開発の詳細については各章に委ねるとして、これらの発見は、博物学と呼ばれる自然史学や分類学とナノテクノロジーの連携によっ

てなされたものである。

前世紀末からのナノテクノロジーの世界的な展開は、電子顕微鏡による観察をより身近なものにした。生物の表面は構造を有しており、多くの場合、ナノからミクロンにいたる領域において階層性を持っている。この大きさはナノテクノロジーの対象となる領域である。電子顕微鏡は、生物が有するナノからマイクロに至る階層構造を明らかにした。ナノテクノロジーが従来の科学技術と際だって異なる特徴は、その対象物の大きさが電子顕微鏡による観察や解析を不可欠とするサイズであり、それゆえに、共通の観察・解析手法を通した生物学と材料科学の連携の可能性を内包することにある。ナノテクノロジーの世界的な発展とその成果によって、走査電子顕微鏡SEMの性能は向上し広く普及した。それまでニッチであった生物の「サブセルラー・サイズ構造」のミクロ構造が明らかにされたのである。生物学者や分類学者が明らかにした生物の持つ表面階層構造をヒントにして、材料ナノテクノロジーの研究者が類似の構造を人工的に製造し、その構造に起因した機能を人工的に発現させようとする研究が欧州、とりわけドイツと英国から生み出された。材料科学の成果は、生物学にフィードバックされる。ここに、生物学

と工学のwin-winの共同研究のループが出来上がった。

3. バイオミメティクスの現代的意義：持続可能性にむけたパラダイムシフト

「技術」とは、「自然に働きかけ、利用して生き残る術(すべ)」であり、人間にもまた生物にも、それぞれの「技術体系」がある。「人間の技術体系」と「生物の技術体系」を比較すると、用いる「物質」や「エネルギー」、そして「ものづくりの方法」は明らかに違っている。福島原発事故は、「人間の技術体系」が地球環境の「持続可能性」に対しては解決すべき課題が多いことを改めて明らかにした。やや極端な言い方をすると、産業革命やIT革命以来「人間の技術体系」は、「化石資源や原子力をエネルギー源」とし、「鉄、アルミ、シリコン、そして希少元素」などを原料として、「高温、高圧条件やリソグラフィ」を駆使してモノを作り、情報や価値を生み出してきた。一方、植物や動物は、「太陽光や化学エネルギー」を用いて、「炭素を中心とする有機物 (CHOPINS)」を主として、「常温、常圧で分子集合や自己組織化」によって、場合によっては「時間」をかけながらモノを作る、「生物の技術体系」とも言うべき仕組みを持っている。地球環境の持続可能性の観点

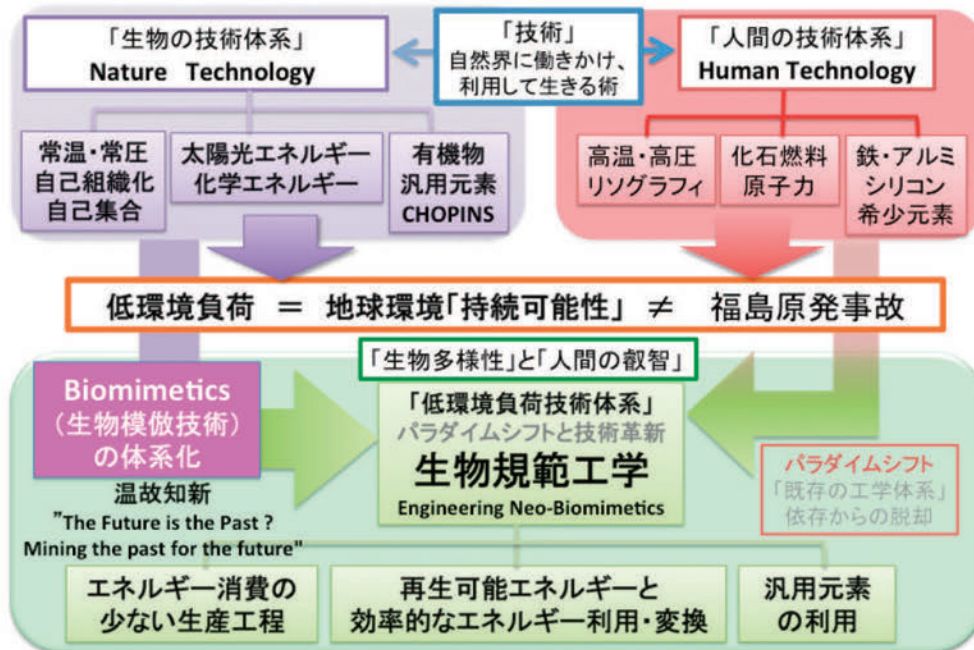


図1 人間と生物の「技術」の比較と、「生物規範工学」の提唱

からすると、「生物の技術体系」は低環境負荷である。「高炭素」社会による「完全な炭素循環」が達成されているのだ。40億年をかけた生物の進化適応は、「壮大なるコンビナトリアル・ケミストリー」であり、生物の多様性はその結果なのである。

今、世界が改めて“バイオミメティクス”“バイオミクラー”に注目する理由は何であろうか。それは、既存の工学体系だけに依存することから脱却するために、生物の生き残り戦略の結果である「生物の多様性」に学び、「人間の叡智」を組み合わせることで、「新しいパラダイムに基づく技術革新」に基づく「低環境負荷技術体系」を構築することにある。“バイオミメティクス”がもたらすパラダイムシフトと、“バイオミクラー”が問う持続可能性への寄与を統合し、技術革新をもたらす総合的エンジニアリングとしての「生物規範工学」を提唱する(図1)。

「生物規範工学」が目指すものは、「汎用元素を利用」し、「効率的なエネルギー利用・変換」と「省エネルギー型のものづくり」によって、「持続可能性」に資するものである。バイオミメティクスは、どのようなパラダイムシフトをもたらすのであろうか？

ナガヒラタタマムシと呼ばれるオーストラリアに生息する甲虫は、数十キロ先の山火事を感じてそこに産卵する。山火事の跡には捕食者がいないからだと考えられている。ボン大学動物学教室のH. Schmitz博士らは、複眼の後ろに配列している球状の細胞群が、高感度の赤外線センサとして働くことを明らかにした。球状細胞は硬いクチクラの外壁で覆われており、その内部は細い水路が3次元に張り巡らされた“運河構造”になっている。液体に満たされた運河構造の底には、メカノセンサとして作用する感覚毛があり神経系につながっている。硬いクチクラの殻に閉じ込められた狭い空間で熱膨張した液体は感覚毛を押すことで、外部の“熱情報”は効果的に“力学情報”に変換されて神経系に伝達される。「生物の技術体系」では、閉じ込められた空間をうまく利用して、熱エネルギーから力学エネルギーへの変換によって情報を得ているの

である。一方、「人間の技術体系」ではどうするであろうか？例えば、化合物半導体の量子効果を利用した赤外線センサが開発されている。

また、コオロギは気流変化によって捕食者の存在を感知することが知られている。尾部にある気流感覚毛は、広い周波数範囲をカバーするため大きさの異なる感覚毛を並べた感覚子アレイを構成しており、雑音のなかから有効に信号を取り出すことができる。コオロギの気流感覚細胞のエネルギー閾値は、ブラウン運動エネルギー kT 程度であり感覚器としての究極にあると言われている。これは、電子工学出身の昆虫生理学者である下澤楯夫北海道大学名誉教授によって発見された。コオロギは、アスペクト比の大きな“毛”を使うことで、気流による位置の変位エネルギーを細胞に伝えている。空気と生体内の粘性は大きく違うが、テコの原理が巧妙に使われている。「人間の技術体系」では、加熱金属の熱損失と風速が比例することを利用した“熱線流速計”などが使われるが、コオロギは加熱する必要のないセンサを持っているのである。二つの技術体系では、「作動原理」が異なるのである。

「生物の技術体系」におけるもう一つの重要なパラダイムは、生産プロセスである。英国バース大学のJ. Vincent教授は、TRIZ (Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch) と呼ばれる発明的問題解決理論を用いて、生物と人間が工業的に作るモノの要素の解析を行った(図2)。その結果、生物は「情報」や「空間」、「構造」を有効に利用しているのに対し、工業技術は「エネルギー」や「物質」に多くを依存している。つまり、生物は主として炭素や酸素、窒素など(CHOPINS、Iは無機物)を使って核酸やタンパク質のように「情報」を有する分子を作り、それらは細胞や組織などの「構造」や「空間」を階層的に形成する。それには「時間」も必要となる。一方、人間は、ユビキタスではあるものの酸化物で存在する鉄、アルミ、シリコンと、ガリウムやヒ素などの希少元素とされる物質も使い、多量のエネルギーを必要とする高温高圧プロセスやリソグラフィなどの工程を駆使して、機械、化学製

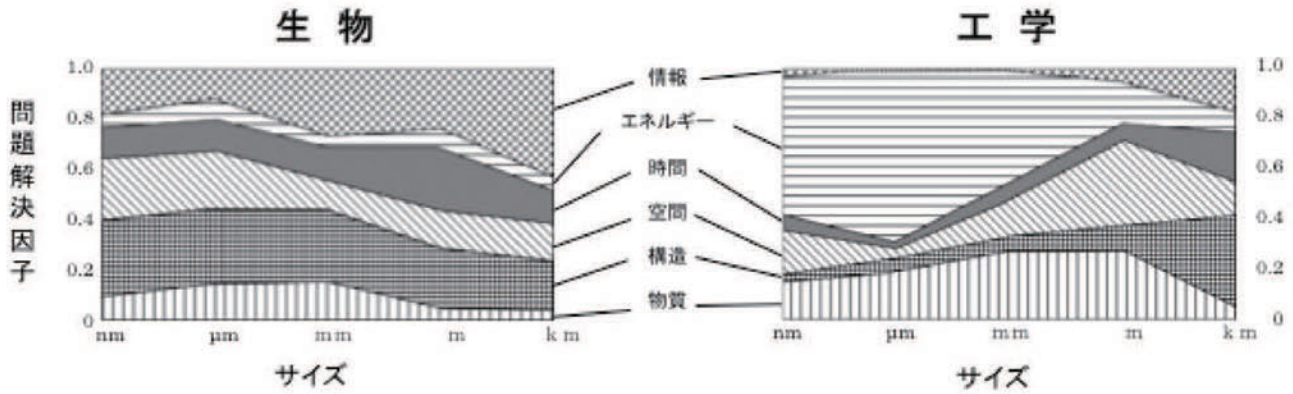


図2 Vincent教授による生物と人間の技術の比較

品、半導体デバイスを「短時間」で製造する。

生物の構造形成のおもとなる過程は、遺伝子によってプログラムされた複雑な化学反応プロセスの組み合わせである。遺伝子によってつくられた脂質分子やタンパク質は、自己集合によって高次の構造体を作りあげていく。また、生物の表面構造の多くは、細胞の分泌物であったり、死骸であったりする。どのような分泌物をどのタイミングで細胞の外に出すのかは遺伝子にプログラムされているものの、一旦細胞から分泌された物質が構造を形成するプロセスは、例えば液晶分子が自発的にナノ・マイクロ構造を形成するように、その時の環境に決定される物理化学に支配されたプロセスである。つまり生物は、分子の自己集合や分子集合体の自己組織化などを生物学的環境だけでなく、非生物学的環境においても有効に利用していると考えられる。

バイオミメティクスにおいては、多くの場合、まず、電子線描画やリソグラフィなどトップダウン型ナノテクノロジーによって作製された“初期モデル”によって原理確認が行われる。実用化に向けたステージでは、効率よくかつ安価に製造することが求められることになる。ナインプリントなどの金型技術、インクジェットなどのパターン化技術、結晶成長技術、ブロックコポリマー・リソグラフィーやマイクロ・コンタクト・プリンティングなどの自己集合現象の利用、散逸構造などの自己組織化現象の利用など、これまでにナノテクノロジーで使用されている様々な製造技術を総合的に検討し、生物型

の生産技術を模索することが可能であろう。化学反応プロセスだけで構造化材料を作製することは困難であるが、将来的には自己集合や、自己組織化のような物理プロセスを組み合わせることで、高次に階層化された材料を創ることは可能である。

4. 我が国の課題

著者が科学技術政策研究所「科学技術動向」“生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流”(2010年5月号)で指摘したように、欧米においてバイオミメティクスが注目される背景には、「生物の技術体系」が持つ、エネルギー・資源ならびに環境問題に対する革新的な解決の規範(Paradigm Shift for Innovation)に対して、人類の自然認識体系として本来一体のものであるべき自然史学、生物学、化学、物理学、数学、材料科学、農学、医学、機械工学、情報学、環境政策学、社会学、経済学、等の諸学問を再架橋して総合的に取り組もうとする、学術融合を重んじる文化的風土と積極的に異分野連携を誘う科学技術政策がある。一方、自然史学を中心とする生物学とナノテクノロジーの連携は、我が国においてはほとんど注目されていなかった。我が国が欧米における研究潮流の後塵を拝すことに危機感を持ち、「基礎科学から産学共同にいたる異分野連携」の必要性を共通認識として、生物学、材料科学、機械工学、農学、環境学、博物館、生物模倣技術に関心のある企業、などの研究者、開発者が国際会議や国内研究会などの定期的な学術交流と出版活動(“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—”(下村政嗣監修、シーエムシー出版、2011年))を始めたことに端を発し、平成24年度から文部科学省科学研究費新学術領域において「生物多様性を規範とする革新的材料技術(生物規範工学)」がスタートした。さらに、バイオミメティクスの国際標準化の議論が始まった今、我が国におけるバイオミメティクスの新潮流を産業展開に結びつけるために、National Biomimetic Initiativeとも言うべき産官学のプラットフォームである「NPO法人バイオミメティクス推進協議会」が発足した。

生物に学ぶパラダイムシフトを体系化し、持続可能性に向けた技術革新をもたらすであろう「生物規範工学」の実現は、博物学、生物学を中心とする基礎科学の連携、機械工学や材料科学などの応用科学の連携、産学連携、企業間連携、など日本が最も苦手とする異分野連携を必要とする。生物の多様性を反映した豊富なインベントリーを所有する博物館の役割は大きい。工学的に使えるバイオミメティクス・データベースは、異分野連携のためのオープン・イノベーションのプラットフォームであり、国際競争力の源になる。さらには企業やアカデミクスの研究・開発者に対するリカレント教育のみならず、理科

離れが言われて久しい我が国の初等中等教育における理科教育にも大きく寄与できるはずである。近代国家の科学技術のあるべき姿を見つけ出すことができそうに思う。

これまで人類は、自然を学び、生物を使うバイオテクノロジー(生物工学)によって豊かな社会を創ってきた。これからは、ナノテクノロジーの展開によってより深く自然を学び、生物の生き残り戦略に学ぶバイオミメティクス(生物模倣)によってパラダイムを変換し、持続可能性のための技術革新である総合的エンジニアリング(生物規範工学)の構築が急務である。

参考書

- (1) 下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流」文部科学省科学技術政策研究所「科学技術動向」(2010年5月号)
- (2) バイオミメティクス研究会編「次世代バイオミメティクス研究の最前線」シーエムシー出版(2011年)
- (3) 文部科学省 科学研究費新学術領域「生物規範工学」、高分子学会 バイオミメティクス研究会、エアロアクアバイオメカニズム学会 監修「生物模倣技術と新材料・新製品開発への応用」技術情報協会(2014年)
- (4) 赤池学「生物に学ぶイノベーション—進化38億年の超技術」NHK出版新書(2014年)

memo

A large grid of small dots for writing, consisting of 20 columns and 25 rows.



開館10周年記念展示 第2弾：

「バイオミメティクスを超えて！」 —昆虫などの生き物や自然に学ぶものづくり—

Beyond Biomimetics: Monozukuri by Learning from Insects, Animals and Nature

- 期 間：**2014年10月1日(水)～2015年3月15日(日)
場 所：東京農業大学「食と農」の博物館 1階 企画展示室
Food and Agriculture Museum, Tokyo University of Agriculture
www.nodai.ac.jp/syokutonou
開館時間：10:00～17:00 (4月～11月) / 10:00～16:30 (12月～3月)
※入館は閉館時間の30分前まで
休 館 日：月曜日(月曜日が休日の場合は火曜日)・毎月最終火曜日・大学が決めた休日
冬期休館12月24日(水)～1月5日(月)
入 場 料：無料
催 事：トークセッション

- <第1回>「次世代のバイオミメティクスを語る」
下村政嗣 千歳科学技術大学 バイオ・マテリアル学科 教授
長島孝行 東京農業大学 農学部農学科 教授
【日時】平成26年12月13日(土) 13:30～15:00
【会場】「食と農」の博物館 2階 セミナー室
- <第2回>親と子供のためのトークショー「昆虫ロボットの未来」
神崎亮平 東京大学 先端科学技術研究センター 教授
長島孝行 東京農業大学 農学部農学科 教授
【日時】平成26年12月20日(土) 13:30～15:00
【会場】「食と農」の博物館 1階 映像コーナー
- <第3回>「昆虫の雑学に学ぶ」
友国雅章 前国立科学博物館 研究員
長島孝行 東京農業大学 農学部農学科 教授
【日時】平成27年1月10日(土) 13:30～15:00
【会場】「食と農」の博物館 1階 映像コーナー

主催：東京農業大学 農学部農学科

企画・展示制作：東京農業大学 農学部農学科 昆虫学研究室(長島ゼミ)・征矢大輝・上原佳織・石塚啓史・大友一輝・
小林由紀子・遠山友稀・矢部慎也

展示指導・監修：長島孝行 農学部農学科 教授

展示・催事のお知らせ

■企画展示

開館10周年記念展示 第2弾「バイオミメティクスを超えて！」—昆虫などの生き物や自然に学ぶものづくり—

【期間】平成26年10月1日(水)～平成27年3月15日(日)

【主催】東京農業大学 農学部農学科

【企画】東京農業大学 農学部農学科 昆虫学研究室(長島孝行教授と所属学生)

■常設展示

【1階展示室】東京農業大学の紹介(2人の学祖、建学以来の歴史等)、鈴木梅太郎のオリザニン、二母性マウス「かぐやKAGUYA」
材鑑標本、進化生物学研究所コレクション 他

【2階展示室】古民家の再現ジオラマと古農具コレクション(平成26年3月28日に展示開始)、ニワトリの剥製標本コレ
クション、住江金之コレクション(色々な酒器)、農大卒業生の蔵元紹介