

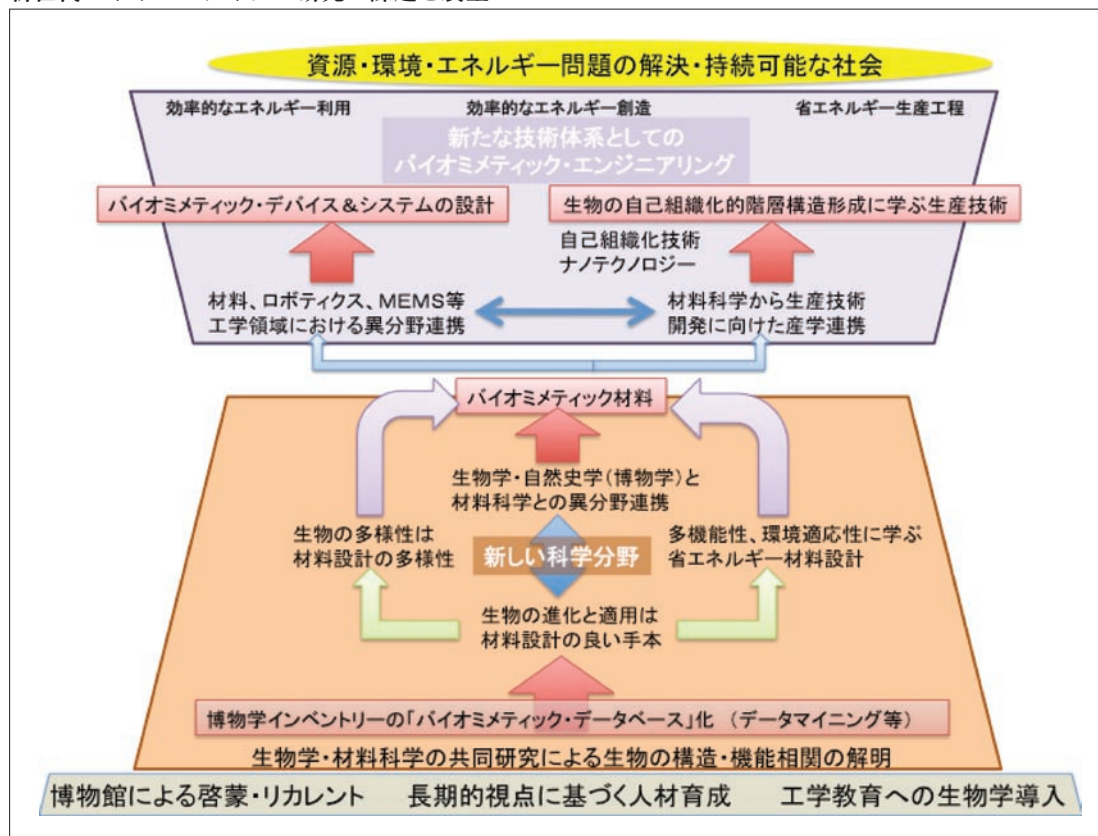
## 生物の多様性に学ぶ 新世代バイオミメティック材料技術の新潮流

欧米では今世紀に入り、バイオミメティクス (biomimetics) と呼ばれる「自然に学ぶものづくり」に関する研究開発がクローズアップされ始めている。蓮の葉の超撥水性を真似たセルフクリーニング・コーティング用塗料、蛾の目を模倣した無反射フィルムなど、昆虫や植物の表面が持つ特異なナノ・マイクロ構造と、それらが持つ様々な機能を模倣した「新世代バイオミメティック材料」とも呼ばれる新しい機能材料が注目を集めている。現代社会が抱えているエネルギー、環境、資源などの諸問題に対応できる「生産技術の革新」を萌芽する新しい科学技術体系をもたらす潮流として世界的に期待されている。

特に欧州における新世代バイオミメティクス研究開発は、生物学からの問題提起をナノテクノロジーなどとの連携で強く推進されている。人材育成とネットワーク形成を推し進め、博物館や産業界を巻き込んで進んでいる。

一方、我が国のバイオミメティクス研究は「縦割りの」であり、異分野連携が積極的に推進されているとは言えない状況にあり、欧米の研究開発例をキャッチアップしフォローするだけであった。我が国に新世代バイオミメティクス研究の新しい科学技術体系を構築するためには、工学と生物学の強力な異分野連携、包括的な研究連携体の組織化、産学連携のプロジェクトが不可欠である。また異分野連携のバリアを低くするための人材育成・教育の仕組み作りが急務である。

### 新世代バイオミメティクス研究の課題と展望



科学技術動向研究センターにて作成

# 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

下村 政嗣  
客員研究官

## 1 はじめに

### 1-1

#### 自然に学ぶものづくり

科学技術の各分野において、「自然に学ぶ」ことの重要性は常識である。欧米では今世紀に入り、バイオミメティクス(biomimetics)と呼ばれる「自然に学ぶものづくり」に関する研究開発がクローズアップされ始めている。例えば、NATIONAL GEOGRAPHIC 誌の2008年4月号は「自然に学ぶデザイン」という特集を組み、「自然の形に学ぶ設計思想 バイオミメティクス」のもとで、流体力学的に燃料効率のよい車のデザインや、雨が降ると汚れが落ちる塗料の開発などが進行していることを紹介している。さらにNATIONAL GEOGRAPHIC 誌に紹介されている内容のいくつかは、2005年に出版されたPeter Forbesの著作“THE GECKO'S FOOT: Bio-inspiration-Engineering new materials from Nature”（「ヤモリの指 生きもののすごい能力から生まれたテクノロジー」吉田三知世訳、早川書房(2007)）に詳細に物語られている。さらに最近では、エネルギーや環境問題の観点からも「自然に学

ぶ」ことの重要性が指摘されている。例えば、“Biomimicry: Innovation Inspired by Nature”（「自然と生体に学ぶバイオミミクリー」山本良一、吉美耶子訳、オーム社(2006)）の著者であるJanine Benyusが主催するNPO法人Biomimicry Instituteは、2008年に“Biomimicry's Climate-Change Solutions: How Would Nature Do It?”という会議を開催した。2008年にドイツのボンで開催された「生物多様性条約第9回締約国会議」(COP9)や2009年の国連環境計画(UNEP)<sup>注1)</sup>においても、彼らが提唱している“Nature's100Best”と銘打った「生物模倣による技術革新」が紹介され注目を集めている。“Nature's 100Best”の詳細はZERI<sup>注2)</sup> FOUNDATION（ゼロ・エミッション構想）が運営するホームページで紹介されている。

ちなみに“biomimicry”や“bioinspiration”、“bioinspired”という用語は“biomimetic”からの派生語で

あり、また、後述するように“bioinspired”にはbiomimeticの後継的な意味合いを意識して使用される場合もあるが、本稿ではそもそもの語源でありかつ包括的な用語である“biomimetic”を使うことにする。

### 1-2

#### バイオミメティクスへの 関心の高まり

「自然に学ぶものづくり」に対し関心が高まりつつある背景には、前世紀末から今世紀にかけて急速にそして新たに展開を遂げようとしているバイオミメティクス研究の“潮流の変化”がある。ISI Web of Knowledgeによると“Biomimetics”に関する世界の論文の数は今世紀に入り急激に増加している(図表1)。

2006年には専門誌「Bioinspiration & Biomimetics」が発刊され、PNAS<sup>注3)</sup>やMRS<sup>注4)</sup>などの主要な

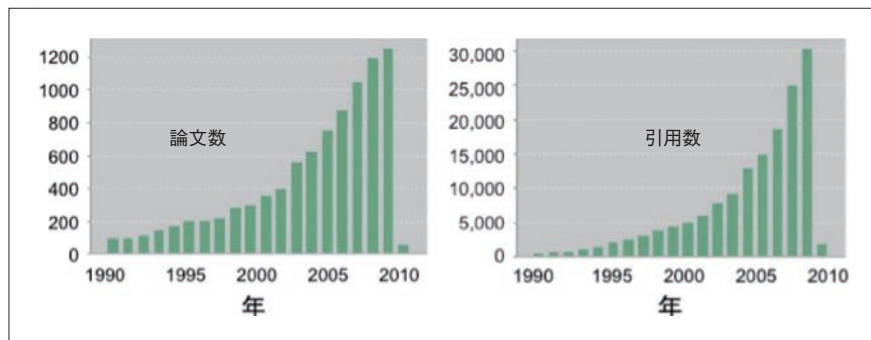
注1: UNEP: United Nations Environment Programme

注2: ZERI: Zero Emission Research and Initiative

注3: PNAS: Proceedings of the National Academy of Sciences

注4: MRS: Materials Research Society

図表1 バイオミメティクス関連論文数の推移



科学技術動向研究センターにて作成

学術誌が「バイオミメティクス」に関する特集を組んでおり、またここ数年、「バイオミメティクス」に関わる国際会議の開催数も増加す

る傾向にある。全米アカデミーズは2008年に“INSPIRED BY BIOLOGY FROM MOLECULES TO MATERIALS TO MACHINES”と

題する科学技術政策の提言書を出版し、そのなかで“Next-Generation Bioinspired Materials”として、蓮の葉を真似た超撥水表面材料やヤマモリの指を模倣した接着材、モルフォ蝶に真似たフォトンクス材料などを紹介し、「バイオミメティクス」を推進すべき課題のひとつとして取り上げている。さらに2011年3月にはドイツ政府の主催のもとで、産学連携および産業化を目指した本格的な国際コンベンション「International Industrial Convention on Biomimetics」の開催がベルリンで予定されている。

## 2 バイオミメティクス研究の歴史

長い歴史をもつバイオミメティクス研究が、今世紀に入って新しい潮流として再び注目されはじめたのは何故だろうか？ 図表2は、バイオミメティクス研究の歴史を研究対象のサイズと研究分野の観点から俯瞰したものである。

ツアイ)も生物模倣技術であるといわれている。

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 として登場した。このころ、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

### 2-2

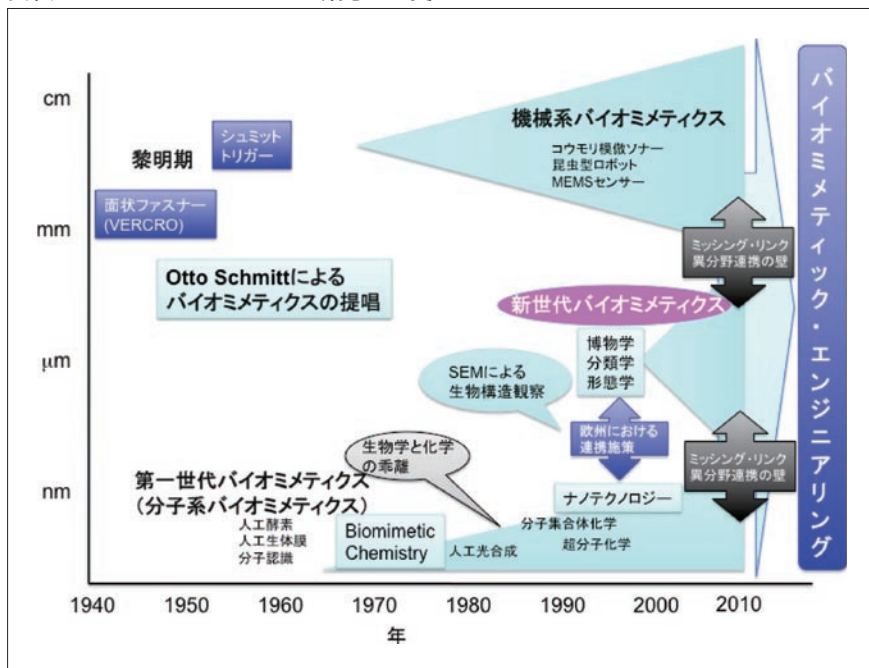
#### 第一世代バイオミメティクス研究としての Biomimetic Chemistry の登場と衰退

### 2-1

#### バイオミメティクス研究の黎明

我が国では「生物模倣」と訳されている biomimetics という言葉は、1950年代後半にドイツ系米国人の神経生理学者である Otto Schmitt によって提唱された<sup>1)</sup>。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。材料としての生物模倣はさらに古く、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®) が実用化の初期の例と考えられる。また、道路の中央線などに埋め込まれた光の反射板(道路銀: キャッ

図表2 バイオミメティクス研究の歴史



科学技術動向研究センターにて作成

ようになった。生物学的事象を化学的に解明し工学的な応用を図る上で、生物学と化学の連携は不可欠であった。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となり、ゲルを用いた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。

しかしその後、分子生物学の展開によって、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った。「分子系バイオミメティクス」とも言うべき Biomimetic Chemistry 研究の主流は、1980年代後半頃からの「分子エレクトロニクス」研究の台頭とも相俟って、生物学とは距離を置くようになり、分子集合体の化学や超分子化学といった方向に向かった。さらに90年代になると、化学や材料の分野において「生物に学ぶ」という考え方はすでに常識化したと思われていたが、実際には生物学との連携の機会はほとんどなくなっていった。そして、分子ナノテクノロジーやナノバイオロジーがクローズアップされることで Biomimetic Chemistry という学術領域名はほとんど用いられなくなった。「生物にヒントを得、生物を超える」バイオインスパイアード (bioinspired) という考え方が主流になり、ここにおいて第一世代バイオミメティクスともいうべき Biomimetic Chemistry は衰退した。

## 2-3

### 機械系バイオミメティクスの発展

一方、1970年代には機械工学や

流体力学の分野でもバイオミメティクス研究が発展し、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ダーなどが開発された。機械系バイオミメティクスの研究は衰退することなく現在まで継続し、主に軍事産業、鉄道や船舶、航空機産業などの産業分野において展開され、マイクロマシンや MEMS<sup>注5)</sup>などの先端技術分野にも影響をあたえている。現在、我が国においては、「バイオミメティクス」はロボット研究の代名詞という認識が強いように思われる。

## 2-4

### 材料系バイオミメティクスの台頭

前述のように2008年、全米アカデミーズがその提言のなかで“Next-Generation Bioinspired Materials”として紹介したように、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ている。すでにその実用化の動きも始まりつつある。

生物の表面は多くの場合、nm から  $\mu\text{m}$  にいたる領域において階層的な構造を有している。この大きさはナノテクノロジーの対象領域である。ナノテクノロジーが旧来の科学技術と際だって異なる特徴のひとつは、その対象物の大きさが電子顕微鏡による観察や解析

が必要不可欠なサイズであり、それゆえに、共通の観察・解析手法を通して生物学と材料科学の新たな連携が生まれる可能性を内包する。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。ここ十年のナノテクノロジーの進展によって、形態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、マテリアル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つつある。このような研究が欧州、とりわけドイツと英国から生み出された。

前述の「第一世代バイオミメティクス」である“Biomimetic Chemistry”が、X線構造解析を契機に分子レベルでの生物模倣を目指した「生物学と有機化学の連携」から生まれたのに対し、「新世代バイオミメティクス」である材料系研究は、電子顕微鏡観察と微細加工技術を基盤とする「博物学・生物学と材料ナノテクノロジーの連携」から生み出されたと言える。また、欧州のナノテクノロジーの特徴は、“Nano meets Bio”というキャッチフレーズに象徴される。すなわち、異分野の融合や連携を目指している。たとえば、ドイツの大学のこの領域の研究においては、異分野連携が研究費獲得の前提になっている<sup>2)</sup>。新世代バイオミメティック材料研究が欧州において胎動したことは、融合を重んじる文化的風土と積極的に融合を図ろうとする欧州の科学技術政策によるものである。

注5：MEMS：Micro Electro Mechanical Systems

## 3 新世代バイオミメティック材料の研究動向

この章では、バイオミメティック材料研究の成功例である、実用

化を視野に入れた研究課題を、特に、いかにして生物学と材料ナノ

テクノロジーの連携がなされたのかを中心に紹介する。

# 3-1

## 蓮の葉に学んだ超撥水材料とその発展である研究

固体表面の液体に対する濡れ性は、物質が持つ固有の親水性や疎水性の強さ(表面自由エネルギー)と表面形状によって決まる。一般に、シリコンやワックス、フッ素化合物などは表面自由エネルギーが低く、水との親和性が小さいので疎水的な性質をしめす。疎水性でなおかつ凸凹形状の粗い表面では、実表面積が増え(Wenzel 状態)、凸凹構造によって形成される細かな空隙には水が入り込みにくい(Cassie-Baxter 状態)。このため、表面はいつでも水に濡れにくくなる<sup>3)</sup>。

ボン大学附属植物園の植物学者である Wilhelm Barthlott 教授は、蓮の葉の表面がその微細構造と分

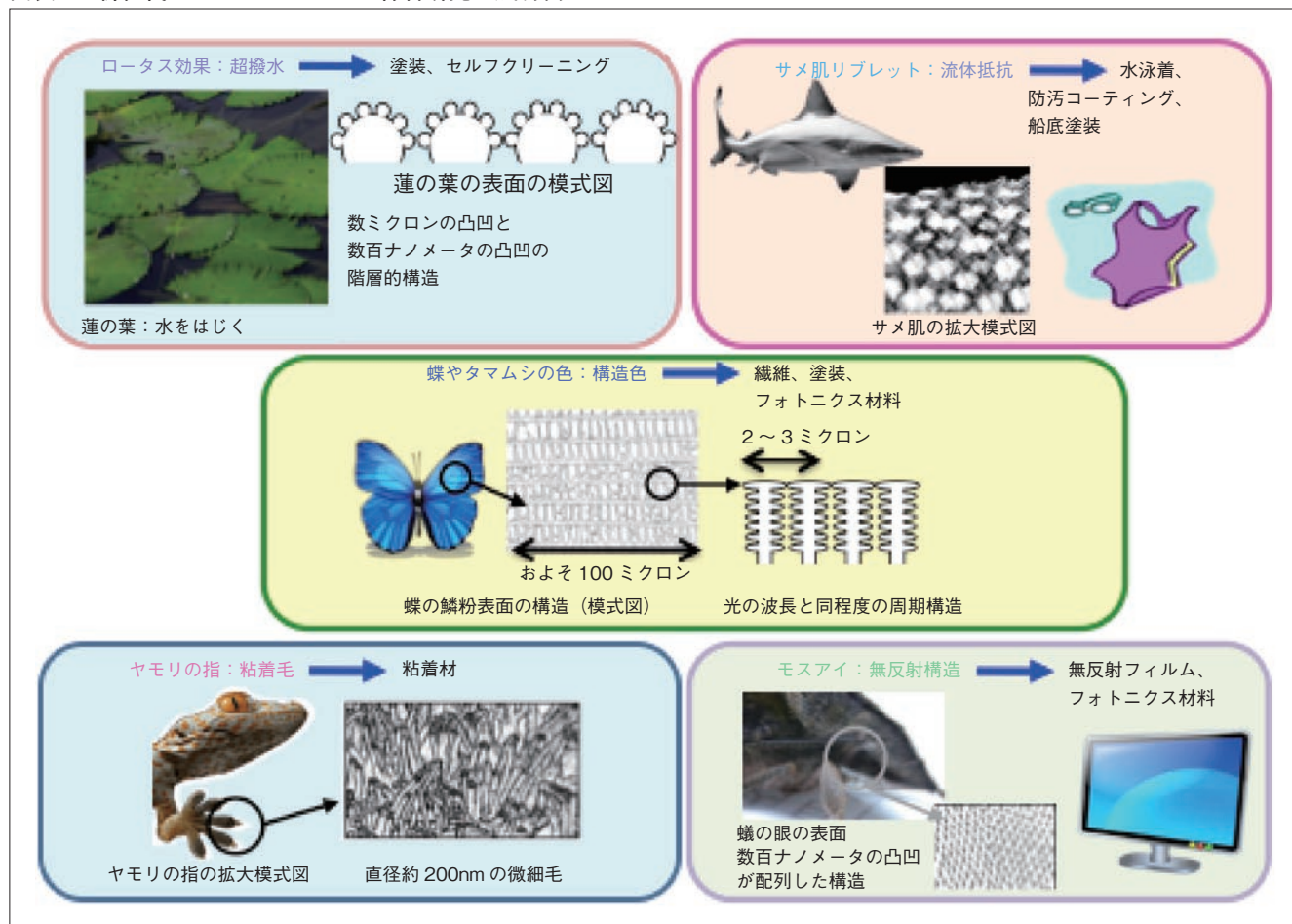
泌されるワックス状化合物の相乗効果によって超撥水性とセルフ・クリーニング効果を示すことを見出した<sup>4)</sup>。蓮の葉の表面は数 $\mu\text{m}$ のコブが配列した構造であり、さらに個々のコブには葉から分泌されたワックスの微結晶が突起状に並んでいる。このような階層性を持つフラクタル的な凸凹構造が、蓮の葉表面の超撥水性をもたらしている。

表面の微細構造に起因する撥水性による清浄効果は、ロータス効果(Lotus-Effect<sup>®</sup> はボン大学の商標)と呼ばれている。ボン大学は企業との共同研究によって、疎水性シリカなどのナノ微粒子をバインダーに分散した Lotusan という塗料を開発し、Evonik 社(旧 Degussa 社)など複数の企業が商品化した。ロータス効果の発見は、新世代バイオミメティクス研究における生物学と材料科学、産業界との共同

研究の最も有名な成功例のひとつと言える。これに触発されて、繊維用スプレー(BASF 社の Mincor<sup>®</sup> TX TT)、コーティング剤(日華化学)、撥水性樹脂(GE の Lexan)、プラズマ CVD 法による凸凹形成(名古屋大学)、高耐水性化粧品(カネボウ)など、ボン大学の技術と類似の効果をもたらす技術開発も行われている。

ロータス効果の発見は、水に関わる生物表面構造に関する研究も誘発した。バラやクンシラン、ヒマワリなどの花卉は、超撥水性であるにもかかわらず花卉を逆さにしても水滴が落ちないほど強い吸着力を持っている。バラ花卉(Rose petal)の表面も蓮の葉と同様に階層的な構造を有しているが、10~20 $\mu\text{m}$ のコブの表面は突起ではなく数百 nm の周期をもつ襞で覆われている。この襞が強い吸着性をもたらしていると考えられ<sup>5)</sup>、微

図表3 新世代バイオミメティック材料研究の成功例



科学技術動向研究センターにて作成

細構造表面の van der Waals (ファンデアワールス)力が吸着性の起源だとされている。撥水性と吸着性を併せた効果は Rose petal effect と呼ばれ、この効果を示す材料として中空構造を有するポリスチレンナノファイバーが開発されている<sup>6)</sup>。

一方、撥水性と親水性の相異なる表面を併せもつ材料も、生物学者と材料研究者の共同研究によって開発された。ロンドン自然史博物館の動物学者 Andrew Parker 教授は、ナミブ砂漠に生息する甲虫(ゴミムシダマシ、*Stenocara gracilipes*)が朝霧に含まれる微小水滴を捕集し飲用する機構を明らかにした。海に近い砂漠に生息するこの甲虫は、朝と夕方に逆立ちのような姿勢で砂丘に佇む。甲虫の体表は、 $\mu\text{m}$ スケールの親水性の微小なコブとその1/10程度のスケールの凹凸構造をもつ疎水面とがパッチワーク状になっている。親水面に吸着した露の水滴は成長すると自重で撥水面をころがり落ち、逆立ちした昆虫の体表を伝わってその口に集められる<sup>7)</sup>。マサチューセッツ工科大学の M. Rubner 教授と R. Cohen 教授は、このような甲虫の表皮を模倣した集水材料を開発した。彼らは、Layer by Layer 法と呼ばれる薄膜作製技術によって、高分子をバインダーとして固体基板上に親水性のコブに相当するシリカ微粒子を配列させ、その周囲をフッ素系化合物で撥水性にした。親水性吸着点であるシリカ粒子表面に付着し成長した水滴は、

周囲を囲む撥水性の平滑面を流路として捕集され、1カ所に集めることができた<sup>8)</sup>。彼らは、このような表面を大面積化することができれば、乾燥地帯や河川のない地域における霧収集装置など水資源確保の材料への応用が可能であると考えている。

4-6節で後述するが、バイオミメティック材料では作製法も重要な研究課題であり、その中でも自己組織化技術は注目されている。自己組織化現象と簡単な無電解メッキによって、撥水性表面に積極的に吸着点を導入して超撥水かつ強吸着表面の材料を作製する試みもなされている。湿式製膜過程における結露現象を利用して形成したハニカム様多孔質高分子フィルムの細孔に部分メッキを施し、物理的な剥離操作を施して作製した高分子スパイク・金属マイクロドーム複合体が作製された。この材料は、高分子スパイクの超撥水性と強い親水性を併せもつために、大きな接触角をもち、接した水滴が強く吸着される<sup>9)</sup>。つまり、この材料は、バイオミメティックな材料設計と自己組織化による新しい作製技術の組み合わせによって創られ、さらに金属を導入することで新たな機能が追加されたハイブリッド材料になっている。

近年のバイオミメティック超撥水材料の研究開発では、中国の成果が目覚ましい。魚の鱗の発油性、蜘蛛の糸を模倣した集水材料、蚊の眼、蝶の翅やアメンボウの脚の撥水性など、様々な生物表面の構

造と機能の相関を見いだそうとしている<sup>10)</sup>。

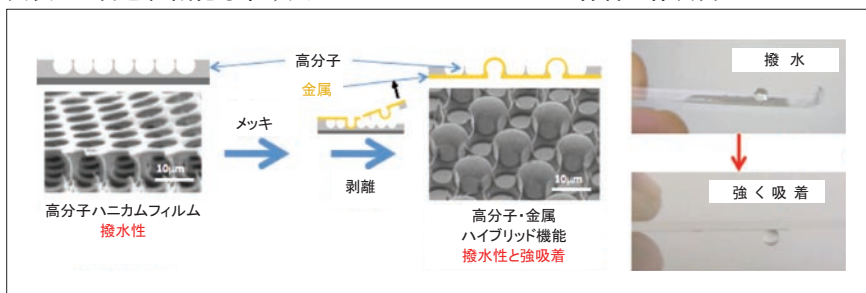
## 3-2

### 鮫肌リブレットに学んだ材料の発展

2008年の北京オリンピックを目前にした競泳界の「水着騒動」は一部では High-tech doping という非難もなされたが、材料開発という視点から見れば Speedo 社のバイオミメティクス戦略がすぐれていた。Speedo 社の LZR Racer<sup>®</sup> とそのプロトタイプである FASTSKIN FSII<sup>®</sup> は、中空繊維を用い、さらに超撥水加工による軽量化で高速化を達成している。撥水性表面が層流に対して抵抗軽減効果があることはすでに実証されており、乱流においても効果があることは理論的に予測されていた。しかし、Speedo 社の競泳着が特に注目されたのは、その表面に鮫肌リブレットと呼ばれる構造が付与されていたことにある。リブレット構造とは、数十  $\mu\text{m}$  からサブ mm 間隔の周期的な溝構造であり、リブレット構造を導入することで流体の抵抗摩擦が低減されることは古くより知られていた。3M 社が開発したリブレット・フィルムがアメリカズカップ (America's Cup) などのレース用ヨットの船体やエアバス社の航空機の機体に貼られ、数パーセントの速度向上や燃費節減効果が報告されている。

最近では、防汚効果(anti-fouling effect)の観点からもリブレット構造に注目が集まっている。従来、船底や発電所の冷却水用導管への海洋生物(フジツボや藻類など)の付着を防止するために用いられてきた TBT (トリブチルすず)は、「環境ホルモン」と呼ばれる内分泌攪乱物質であることから、国際海事機構が 2008 年までにその全面使用禁

図表 4 自己組織化も取り入れたバイオミメティック材料の作製例



科学技術動向研究センターにて作成

止を決定した。そこで表面構造を利用したTBTフリーの防汚対策が検討されている。25~30mN/mの表面張力を有する固体の表面が、物理的に生物付着抑制する効果があることが知られている。ブレーメン(Hochschule Bremen)の研究グループは、76 $\mu$ m周期のソフトシリコン製リブレット構造を持つ表面(表面張力25mN/m)へのフジツボの付着が、平滑面に対して7割近く抑えられると報告している。

また、欧州では2010年1月から、欧州フレームワークプログラム(FP7)の中でSurface Engineering for Antifouling - Coordinated Advanced Training (SEACOAT)をスタートさせている。この一環として、ナノ・マイクロ構造がもたらす防汚効果を示す材料の開発において、英国、ドイツ、スイスなど17の組織からなる研究チームによる産学連携研究が始まった<sup>11)</sup>。

また最近、リブレット構造は、海洋防汚以外の用途でも注目がされている。フロリダ大学のAnthony Brennan教授らは、リブレット構造がもたらす抗菌特性に着目した。医用フィルムSharklet™を開発し、医療機関の壁材やカテーテルなどの医療デバイス用の材料を目指している。

英国のThe National Museum Directors' Conferenceのホームページには、2008年オリンピックに向けた博物館との共同研究の成果として、鮫肌リブレットが開発され、流体抵抗が3%減少したと述べられている。また、Speedo社の“Biomimetician”でありFASTSKIN®の開発者であるFiona Fairhurstは、European Inventor of the Year Award in 2009に推薦された。彼女は、Oliver Crimmenをはじめとするロンドン自然史博物館のメンバーの協力に対して謝意を表している。これらは、新世代バイオミメティクスの研究開発で「博物学とナノテクの連携」が不可欠であること

を象徴的に表していると思われる。

### 3-3

#### 蝶やタマムシに学んだ 構造色材料とデータベース化

タマムシやモルフォ蝶の翅が示す金属光沢を持つ色彩を構造色(Structural Color)と呼ぶ。構造色は、光の波長あるいはそれ以下の微細構造による発色現象であり、色素や顔料の光吸収に基づく発色ではないことから退色や劣化の問題がない。構造色発色の機構としては、薄膜干渉、多層膜干渉、微細な溝・突起などによる干渉、微粒子配列などによる散乱や回折、などが知られている。生物の構造色の発現を利用した材料開発は盛んになされており、例えば英国ではExeter大学物理学科のPete Vukusic博士が、また我が国では大阪大学の木下修一教授が主催する構造色研究会が定期的に情報を発信している。構造色は生物表面以外では、オパールなどの鉱物、コロイド結晶などでも発現する。その応用は、塗装、化粧品、宝石、繊維、フォトニック結晶などとして多岐の産業にわたる。とりわけ、日産自動車(株)、帝人ファイバー(株)、田中貴金属工業(株)の3社によって開発された「モルフォテックス」という発色繊維は世界的にも有名である。さらに最近の研究では、高い屈折率を示す有機材料の可能性も指摘されている<sup>12)</sup>。

ロンドン自然史博物館のA. Parker教授らは、英国王立協会誌に「John Huxleyの成果も含む、蝶のフォトニック構造の多様性と進化に関する総説」という論文を発表した<sup>13)</sup>。彼らは、蝶の翅のフォトニック構造の解剖学的かつ網羅的な記述が、バイオミメティクスの潜在的アプリケーションに大きく寄与すると考え、ロンドン自然史

博物館で故John Huxley博士によって撮影された未発表の電子顕微鏡写真を多様性と進化のデータベースとしてこの総説をまとめた。博物館が収蔵する膨大なインベントリー(ある地域に生息する生物の総種数の目録、あるいは目録を製作するための調査)を解剖学的な知見と機能に関するデータベースとして整理し公表することは、新世代バイオミメティクス研究においてはたいへん有意義である。

### 3-4

#### ヤモリの足に学んだ接着材料

ヤモリの指のバイオミメティクスは、ロータス効果とともに生物学と材料の連携におけるもうひとつの成功例である。2003年6月のBBCニュース(on line版)は、“Gecko inspires sticky tape”と題して、Manchester大学のAndre Geim教授のグループがヤモリの指の微細構造を真似た粘着材フリーの接着テープの開発に成功したことを報じた。ヤモリが垂直な壁を登り天井を這うことは、その指先から粘着性の物質を分泌していないことを考えると不思議である。ヤモリの指先にはラメラと呼ばれるひび割れ構造があり、その内部には数十万本の剛毛(seta)が密生している。さらに長さ100 $\mu$ m直径5 $\mu$ m程度の剛毛の先端は数百の枝毛に分裂し、個々の枝毛の先端はスパチュラ(spatula)と呼ばれる“皿状”の構造になっている。スパチュラの直径は200nm程度である。Kellar Autumnらの生物学的な仮説<sup>14)</sup>によれば、ヤモリの指の接着力は、その指先に密集した階層構造を持つ微細な剛毛表面と壁に働くファンデアワールス力に起因するとされている。UC BerkeleyのRonald Fearing<sup>15)</sup> や Andre Geimら<sup>16)</sup>のグループは、それぞれ、

AFM (原子間力顕微鏡)チップを用いた微細加工技術や、陽極酸化アルミナのナノ細孔を鋳型として、剛毛が密集した表面を人工的に再現した。彼らはヤモリの指の吸着機構を明らかにするとともに、“Gecko Tape” (ゲッコテープ)と呼ばれる粘着材フリーの吸着材料の開発に成功した。その後、カーボンナノチューブを密集した剛毛とする構造を有する固体表面が、強い吸着力を有することも報告された<sup>17)</sup>。また、リサイクル可能な建築材料用の吸着剤など、実用化のための研究開発も始まっている。また、ゲッコテープを用いて垂直な壁面を移動することができるヤモリ型ロボットが開発され、軍事や災害救助などの民生面での応用が期待されている<sup>18)</sup>。現在では、特に米国でその実用化に力が入れられている。

## 3-5

### 無反射性を持つ モスアイ構造材料

1960年代に Karolinska Institute 生理学科の C. G. Bernhard らは、蛾の複眼の表面に約 100nm の大きさの突起構造が配列していることを報告した<sup>19)</sup>。さらに 80 年代初めには英国 National Physical Laboratory の光学部門の S. J. Wilson と M. C. Hutley らが、周期的に配列した凸凹構造(モスアイ構造)によって表面厚み方向の屈折率を徐々に変化させることで無反射性が発現することを明らかにした<sup>20)</sup>。入射する光に対して明確な反射面(屈折率の変化)が存在しないことになり、反射が起らないのである。このような複眼により、蛾は夜でも空を飛ぶことができ、大きな眼からの反射が抑えられることで鳥などの外敵から発見されにくくなると言われている。

モスアイ構造の反射防止膜は、光学材料の研究開発で早くから注目された。ドイツの Holotools 社は、干渉リソグラフィー (Interference lithography) によって 100nm ~ 100 $\mu$ m のパターンを固体基板上に形成する技術を用いて、表面にモスアイ構造を有する透明な高分子フィルムを作製し、ディスプレイ等の大面積の無反射フィルムとして供給している。最近では、三菱レイヨン(株)が 2008 年、ナノスケールの細孔が規則的にかつ自己組織化的に形成される陽極酸化アルミナを型として、透明な高分子フィルムの表面にモスアイ構造(開発品の反射率は 0.1% 以下、全光線透過率は 99.6%)を作製することに成功した。また王子製紙(株)は 2009 年に、直径 25 ~ 1000nm の粒子を精度よく単層に配列した状態で物体の表面にコーティングする技術を確立し、ドット型周期微細構造の作製に成功した。

モスアイ構造は太陽電池の高効率化の観点からも注目を集めている<sup>21)</sup>。オランダの Institute for Atomic and Molecular Physics (AMOLF) の J.G.Rivas らは、GaP 基板表面上にモスアイ構造のロッドを作製することで可視から近赤外における幅広い波長域で反射を著しく低減できることを見いだしている。我が国でも、三菱電機(株)はレーザーパターンニングと湿式エッチングの技術を用いて、多結晶シリコン太陽電池セル表面に、ハニカム状の凸凹構造を導入して表面反射率を低減することで、18.6%の光電気変換効率を達成し 2010 年度の実用化を目指している。

## 3-6

### サンドフィッシュに学んだ 低摩擦材料

北アフリカや南西アジアの砂漠

に生息する有鱗目スキング科のトカゲ(*Scincus scincus*)は、砂の中に潜り泳ぐように移動することからサンドフィッシュ (Sandfish)と呼ばれている。15cm ほどの大きさのサンドフィッシュは、“砂の海”を深さ数 cm まで潜り毎秒 10 ~ 30cm の速度で“泳ぐ”ことができる<sup>22)</sup>。ベルリン工科大学の Ingo Rechenberg 教授は、鱗で覆われたサンドフィッシュの皮膚が、磨かれたスチールや平滑なガラス、テフロンや高密度ナイロンなどの表面よりも低い摩擦係数を示し、砂でこすられてもほとんど摩擦しないことを見いだした。サンドフィッシュの鱗には珪酸塩などの無機物は存在せず、硫黄含量の多いグルコシル化ケラチンから形成されている。ケラチンを主成分とする鱗の表面にはミクロな微細構造があり、この構造が特異なトライボロジーを発現している。W. Baumgartner 教授らは、鱗から抽出したケラチンでコートした高分子フィルムの表面が鱗と同様の性質を示すことを見いだした。また彼らは原子間力顕微鏡計測において、鱗の表面とシリコンチップの間に引力がほとんど生じないことを示した。Rechenberg らは、サンドフィッシュの皮膚に対する砂粒の転落角が、ガラス、ナイロンやテフロン、さらには鋼の表面よりも低いこと、つまり摩擦抵抗が極めて低いことを実証した。一方、サンドフィッシュの皮膚は、鋼やガラス表面よりも高い耐摩擦性を持っている。サンドフィッシュの鱗には、数 $\mu$ m の間隔で並んだサブマイクロメータの高さの長い尾根状の“敷居”(nanothresholds)がある。Rechenberg らは、この“敷居”と砂粒間の摩擦帯電で発生した静電気が、鱗と砂粒の間の斥力を生み出すことによって摩擦が低減される可能性を示唆している。ちなみに、サンドフィッシュの捕食者である蛇の表皮も低摩擦表面であり、バイオ



ミメティクスの研究対象になって  
いる<sup>23)</sup>。

ドイツのBIONIC Graduate<sup>24)</sup>とい  
う博士課程の研究・教育プログラ  
ムにおける、アーヘン工科大学の  
W. Baumgartner 教授が指導する  
“Abrasion resistant surface coating  
mimicking the sandfish’s epidermis”  
というプロジェクトでは、サンド  
フィッシュ表皮の化学的および物  
理的な分析と、サンドフィッシュ  
の表皮成分を用いた金属、ガラス、  
およびポリマーの表面コーティ  
ングプロセスの研究開発を行って  
いる。彼らの最終目的は、サンド  
フィッシュの表皮構造が持つトラ  
イボロジー特性に学んだ低コスト  
耐摩耗性表面コーティング技術を  
開発することである。傷のつか  
ないフロントガラスや潤滑剤フリー  
の低摩擦ボールベアリングなどが  
期待される。

最近、流動的な“砂の海”の中  
でサンドフィッシュが四肢を使わず  
に蛇のように体を波状にくねらせて  
“泳ぐ”様子がX線により映像化さ  
れた。固体の微粒子からなる“流動  
的媒体”の中で泳ぐサンドフィッ  
シュの流体力学(Fluid Dynamics)  
的挙動に、鱗表面の微細構造によ  
って特徴づけられるトライボロジ  
ーがどのような影響を及ぼすかが明  
らかになりつつある。サンドフィッ  
シュの“遊泳”の研究は、材料系バ  
イオミメティクスと機械系バイオ  
ミメティクスの新たな融合をもた

らすかもしれない。

### 3-7

#### 昆虫と植物の攻防に学ぶ トライボロジーの研究

Kiel 大学動物学科のStanislav  
Gorb 教授らは昆虫や植物の表面ト  
ライボロジーについて系統的な研  
究を展開している。たとえば、キ  
リギリス(*Tettigonia viridissima*)の  
足先には4~5 $\mu$ mの六角形の  
パターンがタイル状に配列している  
(図表5)。マイクロ加工技術でシ  
リコンゴム表面に類似の微細パ  
ターンを作製し摩擦特性を測定し  
たところ、表面が乾いた状態にあ  
るときにはスティック・スリッ  
プ運動を完全に排除したスムーズな  
運動ができ、ぬれた状態にあると  
きは横滑り(hydroplaning)を防  
ぎ、結果として安定な運動性が保  
証されていることが示唆された<sup>25)</sup>。  
一方、植物も、昆虫とともに進化  
適応してきた結果として、興味深  
い表面微細構造を有するものがある。  
植物学者であるElena Gorb 博  
士は、食虫植物であるウツボカズ  
ラの外部ならびに内部表面には  
様々なマイクロ構造があり<sup>26)</sup>、昆  
虫にとってはツルツルとすべりや  
すい表面を作っていることを明ら  
かにした。とりわけスリッピーズ  
ンと呼ばれる昆虫を捕捉する内部

表面には、サイジング剤(紙の表面  
改質剤)であるアルキルケテンダイ  
マー結晶の表面に形成される超撥  
水性のフラクタル構造<sup>27)</sup>に類似し  
た構造が観察されており、材料科  
学的な視点から見ても興味深い。

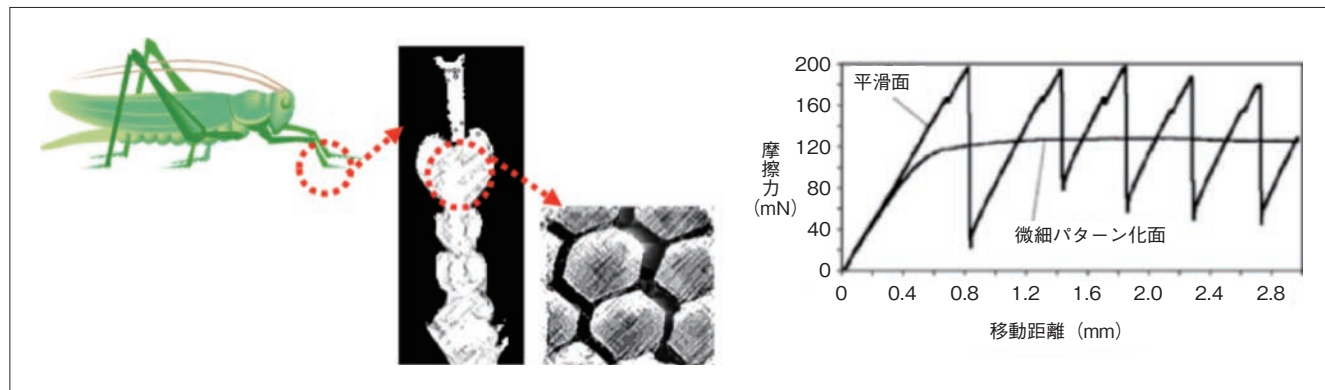
進化の攻防は昆虫の脚に多様な  
機能を与えている。*Pameridea ror  
idulae* という甲虫は、粘着性の樹  
脂を表面に分泌する植物 *Roridula  
gorgonias* の表面に捕捉されたミバ  
エを、自らは粘着物に捕捉される  
ことなく捕食することができる。  
甲虫の脚からは、“sloughing-off”  
layer として作用する断片的に剥離  
するグリース状のクチクラ表皮が  
あり、これによって植物が出す粘  
着物からののがれることができると  
考えられている<sup>28)</sup>。この研究はド  
イツ政府のプライオリティー研究  
プログラムである“Biomimetic  
Materials Research : Functionality  
by Hierarchical Structuring of  
Materials (SPP 1420 priority pro  
gram)”で推進されている。

### 3-8

#### 昆虫のセンシングに学んだ センサー材料

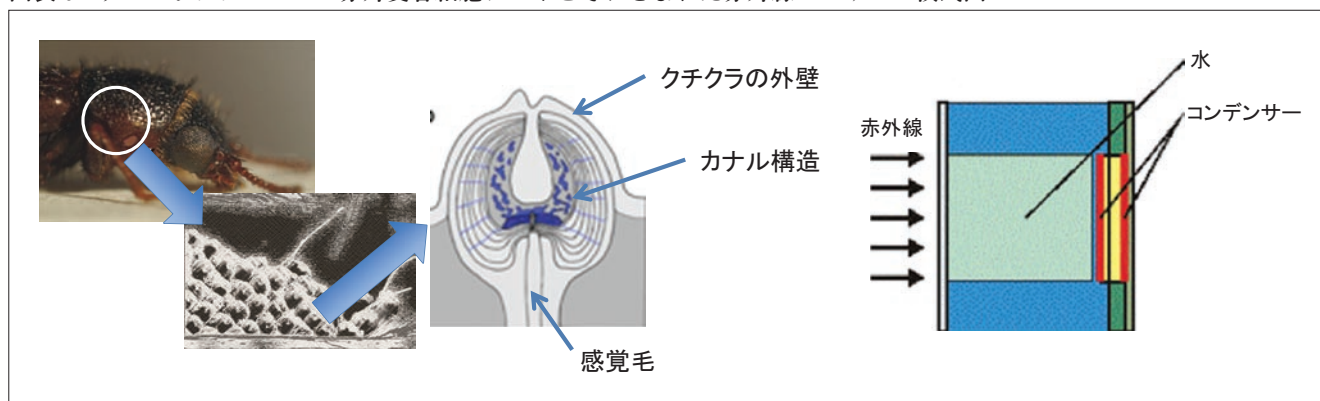
最近、欧州では生物学者を中心  
に、新たなバイオミメティック材  
料を用いたセンサーの研究が進め  
られている。ナガヒラタタマムシ

図表5 昆虫の足に見られるトライボロジー



科学技術動向研究センターにて作成

図表6 ナガヒラタタママシの赤外受容細胞アレイとそれをまねた赤外線センサーの模式図



科学技術動向研究センターにて作成

(*Melanophila*)は、山火事の跡地に産卵することが知られている。これは、火事の跡地には捕食者がいないためと考えられている。ナガヒラタタママシは数十キロ先の山火事を感知できる高感度赤外線センサーを有しており、ボン大学動物学科の H. Schmitz 博士らはこれらが一種のメカノセンサーであることを明らかにした<sup>29)</sup>。Sensillum と呼ばれる球状の感覚細胞が複眼の後方に複数配列しており、個々の細胞では神経細胞につながった感覚毛が硬いクチクラの外壁で覆われている(図表6)。細胞の内部は細いカナル構造になっておりカナルは液体で満たされている。波長  $3\mu\text{m}$  の赤外線の照射によりカナル内部の液体は効率よく熱膨張し、その結果、感覚毛が圧迫され力学的な刺激に変換されて神経に伝達する。

この結果をもとに、ボン大学で

は MPI<sup>注6)</sup> の CAESAR<sup>注7)</sup> との共同研究によって安価でかつ堅固な冷却不要赤外線センサーのプロトタイプを開発している。センサーの作動原理は簡単で、狭い空間に閉じ込められた液体(水)の熱膨張をコンデンサーで検出する。

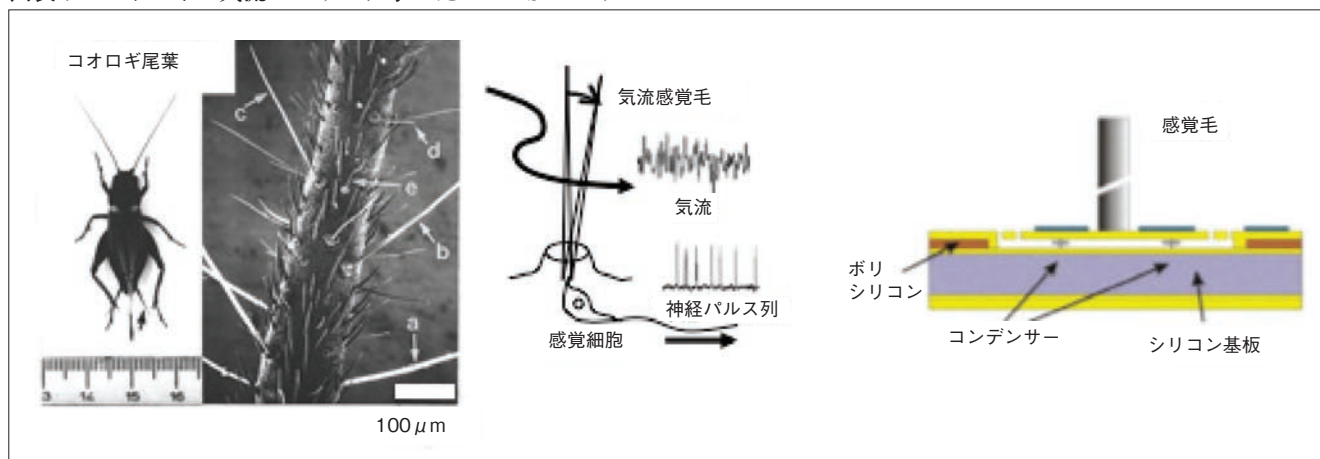
また、コオロギは気流変化によって捕食者の存在を感知することが知られている。尾部にある気流感覚毛は、広い周波数範囲をカバーするため大きさの異なる感覚毛を並べた感覚子アレイを構成しており<sup>30)</sup>、雑音のなかから有効に信号を取り出すことができる(図表7)。コオロギの気流感覚細胞のエネルギー閾値は、ブラウン運動エネルギー

程度であり感覚器としての究極の効率をもつと言われている<sup>31)</sup>。コオロギの感覚毛を真似た MEMS センサーが、Tours 大学昆虫学教室の J. Casas 教授グループと Twente 大学の Transducers Science and Technology Group (“MicMec”) の G. Krijnen 教授グループの共同研究によって開発されている<sup>32)</sup>。

これらの成果は“CILIA”<sup>注8)</sup>と呼ばれる欧州・コンソーシアムによって2009年にドレスデンで開催された第一回“Natural and Biomimetic Mechanosensing”に関する国際会議で報告された。国際会議では、コオロギの鼓膜に学んだ高分子センサーフィルムなども紹介された<sup>33)</sup>。

注6：MPI：Max Planck Institute  
 注7：CAESAR：Center of Advanced European Studies And Research  
 注8：CILIA：Customized Intelligent Life-Inspired Arrays

図表7 コオロギの気流センサーに学んだ MEMS センサー



科学技術動向研究センターにて作成

## 4 新世代バイオミメティック研究のポイント

この章では欧州などの成功例から、新世代バイオミメティック研究のポイントをまとめる。

### 4-1

#### 意味その1： 生物の進化と適応は材料設計 の良い手本であり、生物の 多様性は材料設計の多様性を もたらす

「バイオ・トライロジー」<sup>34)</sup>のリーダーの一人であり博物学者である Kiel 大学の S. Gorb 教授は、その著書“Attachment devices of insect cuticle”において、進化的分類にしたがって昆虫の足の接着機構を系統的かつ網羅的に著している。その結果、ヤモリと同様に粘着物質を分泌しないもの(ファンデアワールス型)、粘着物質を分泌するもの、爪のような鉤状の構造体をもつもの、などに分類できること、さらには、昆虫がどの接着機構を採用するかは、進化の系統による分類とは相関が無くむしろ環境適応によって選択されることを明らかにした。これは、長い進化と適応の過程で、昆虫の接着機構に多様性がもたらされたことを意味している。この考え方にしたがって、材料に要求される機能発現機構と構造の相関を系統的に分類することができれば、適材適所的な材料設計が可能になると考えられる。前節でも紹介した植物と昆虫の進化の攻防を学ぶことによって、多様な材料設計が期待される。

### 4-2

#### 意味その2： 生物資源インベントリーの データベース化が鍵になる

分類学(Taxonomy)的な観点から生物の構造・機能相関のデータベースを作成することによって、様々な応用に対応できるバイオミメティック材料の設計指針が得られる。生物インベントリーの多様性を有効に利用することが、材料研究に多様性をもたらすと言ってもよい。前述のロンドン自然史博物館の A.Parker 教授らによる「フォトニクス材料の設計指針作成におけるデータベース化」の試みに見られるように、博物学における系統的な構造・機能相関の集積とその公表が重要である。S. Gorb 教授もその著作“Attachment devices of insect cuticle”の序論において、「走査型電子顕微鏡 SEM による生物の表面構造観察がポピュラーになったことが、この分野の飛躍的な展開をもたらしている」と述べている。系統的かつ網羅的に生物表面の顕微鏡観察を行う研究機関の存在は、今後のバイオミメティクス研究において、極めて重要なポイントになるに違いない。米国でも“Nature's100Best”や“Biomimicry Taxonomy”などのデータベース化が図られようとしている。

### 4-3

#### 意味その3： 生物学・自然史学と材料科学 との win-win 連携が不可欠である

生物が有するナノ・マイクロ構

造とそれらがもたらす機能発現との相関に関する知見を収集することは、生物学とくに形態学や発生学における大きな研究課題のひとつである。さらに、生物学の発見を材料学が原理を確認し再現し、さらにそれだけではなく再度生物学にフィードバックすることが重要で、欧州におけるバイオミメティクス研究の成功例に見て取ることができる。基礎科学と応用科学との橋渡しと異分野連携により、自然史(博物学)的な資源である生物標本に工学的な価値をもたらすことができるとともに、生物学的な機能発現の機構解明に工学的な知見をフィードバックすることができる。このような win-win の関係に基づく異分野連携においては、数理科学的手法に抵抗感を持たない生物学者の素養と、生物学に対する材料科学者の旺盛な好奇心が、その成否のキーポイントになると考えられる。

### 4-4

#### 意味その4： 省エネルギー型材料の設計は、 生物の多機能性や 環境適応性に学べ

新世代バイオミメティック材料の特徴は、nm から  $\mu\text{m}$  ケールにおける階層的な構造とそれらが発現する機能を生物に模倣したところにある。例えば、nm から  $\mu\text{m}$  に至る階層的な構造は、ある側面では撥水性を示し、ある側面では無反射性を示すことにある。Barthlott 教授らは、このような生物が持つ階層的な表面の多機能性について言及している<sup>35)</sup>。

たとえば、モスアイ構造は蛾だ

けではなく多くの昆虫に見られており、蚊のように小さな昆虫では複眼が示す撥水性によって「雨に濡れて溺れる危険」から身を守っていると考えられている。また、モルフオ蝶の翅の表面(鱗粉)はその特徴的な構造色を生み出す階層構造を有しており、その構造は同時に撥水性も付与している。中国科学院のLei Jiang 教授らは、翅の中心から外側に向かう方向には水滴が撥水されるのに対し、内側に向かう方向には吸着性があることを見出した。翅に付着した水滴が撥水される方向は、“羽ばたき”によって形成される空気の流れる方向と平行であり、付着した水滴が羽ばたきとともに移動して翅の汚れを除去する、セルフ・クリーニング(self-cleaning)機能を持つのかも知れない。

表面ナノ・マイクロ構造がもたらす撥水性は、セミの翅にも見られるが、セミの翅は透明である。透明であることは目立たないことを意味する。また、アサギマダラと呼ばれる長距離飛行をする蝶は部分的には透明な翅を持っている。一方、長距離飛行をしないウスバシロチョウも透明な翅を持っている。両者の翅の微細構造を比較したところ、アサギマダラの透明部分には、低密度ではあるものの鱗粉は整列しており、その結果高い撥水性を示す。それに対し、ウスバシロチョウでは整列した鱗粉はなく撥水性が弱い。このように、撥水性と光学特性の発現に見られ

る多様性は進化と適応の結果であると考えられる<sup>36)</sup>。

最近、バイオミメティック表面構造が有する多機能性(撥水性、セルフ・クリーニング性、無反射性、透明性など)を利用した太陽電池の提案も報告されている。生物表面の多機能性の背景には、1つの構造が2つ以上の機能を果たすという「省エネ設計」とも思える設計思想が隠れているかも知れない。新規材料の設計においては、環境適応や省エネルギーの観点から、生物の構造や機能や行動を見直す必要がある。

## 4-5

### 意味その5： 材料系と機械系の連携も 望まれる

材料系バイオミメティクスと機械系バイオミメティクスのコラボレーションも重要である。現状では、これらが分かれてしまっていることに問題がある。鮫肌リブレットの研究は、防汚材料の観点から微生物学者との連携が不可欠であった。また、摩擦低減の観点では流体力学との連携が要求された。

撥水材料を使った水滴のマニピュレーションも、MEMSやコンビナトリアル化学など様々な分野で利用可能な研究課題である。とりわけ、lab-on-a-chip の分野ではデジタル・マイクロ・フルイ

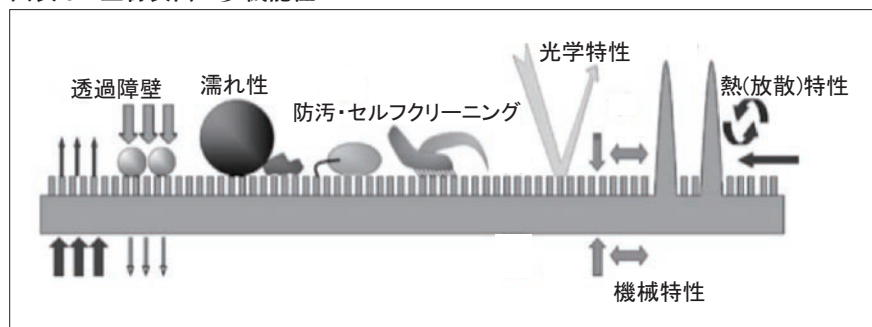
デクスと呼ばれる新興領域において液滴の操作とそれを可能とするデバイスが求められている。液滴の操作は、主として電気湿潤electrowetting-on-dielectric (EWD) と呼ばれる現象を使って行われている。これは、疎水性基板上の水滴の接触角が電場をかけることによって小さくなることを利用している。液滴を安定に操作する方法を蟻と共生するアリマキが心得ていることも、バイオミメティクス・デバイス設計のヒントになりそうである。アリマキは液体分泌物を安定な液滴(liquid marble と呼ばれる)とすることで、巣に満ちた液体で自らが溺れないようにしている<sup>37)</sup>。一方、非 EWD 駆動の液滴操作の研究も始まっている。ヒレアシギが、水の表面張力とくちばしの開閉運動を利用して重力に反して水を口まで登るように移動させることが明らかになり、パイプ内で液体輸送の抗力減少などに応用できる可能性が指摘されている<sup>38)</sup>。新しい作動原理による流路を持つMEMSチップの開発が期待される。また、ナミブ砂漠の甲虫がミスト状の水滴を捕集しているのに対し、砂漠に住むゴキブリの仲間は、飽和蒸気よりも低い湿度条件下からさえもその口の周りに水滴を吸着させることができるといわれており<sup>39)</sup>、エネルギーを使うことなく結露や蒸発などの水滴操作を可能とするデバイス設計のヒントが隠されているかもしれない。

## 4-6

### 意味その6： 生物の自己組織化的階層構造 形成は生産技術革新の ヒントになる

新世代バイオミメティクス研究は、生産技術にも革新をもたらす可能性がある。英国におけるバイ

図表8 生物表面の多機能性



科学技術動向研究センターにて作成

オミメティクス研究のリーダーであるバース大学のJ. Vincent 教授(生物学者)は、TRIZ と呼ばれる問題解決策を用いて、生物学的に形成されるものと人間が工業的に作るものが、それぞれどのような要因から成るのかを解析した。彼は、生物はその構造を形成するために「情報」「空間」「構造」を有効に利用しているのに対し、現行の工業技術による構造形成は「エネルギー」「物質」に多くを依存していると結論した<sup>40)</sup>。生物はありきたりの元素である炭素、酸素、窒素を使ってDNA やタンパクのように情報を持つ分子を作り、それらは膜やオルガネラなどの構造を形成し、さらに階層的に構造化して細胞、組織、機関を作り上げている。一方、工業製品、たとえば高速電子回路などは、ガリウムやヒ素などの希少な元素をも使って、リソグラフィーなどの手法によって多量のエネルギーを使って原材料を切り刻んで形成している。

生物の構造形成は、その基に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によるものであり、さらには分子の自己集合や分子集合体の自己組織化などを有効に利用している。生物は、リソグラフィーも石油も使わずに、その特

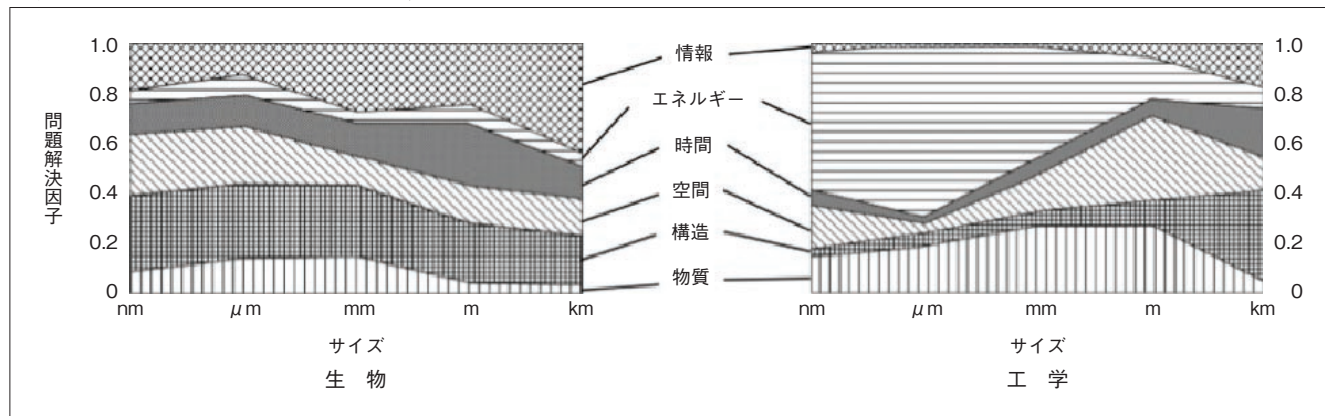
異な構造を生みだし、多様な機能を発現しているのである。Vincent 教授の解析は、エネルギーや物質に多くを依存しない新しい生産技術の可能性を示唆しているのである。

新世代バイオミメティック材料の開発は多くの場合、まず、電子線描画やリソグラフィーなど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。次に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。ナノ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、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必要がある<sup>41)</sup>。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ろう。

以上をまとめると、バイオミメ

ティクスは産業技術にパラダイムシフトをもたらす可能性を持つものと結論つけることができる。超撥水表面を得るために、工業的にはフッ素コートをすることが多い。一方、蓮の葉は、有機物であるワックス状分泌物と表面のマイクロ・ナノ構造を利用して超撥水表面を実現している。高感度赤外線センサーのために人間は化合物半導体を用いるが、タマムシは液体の体積膨張を利用して遠方の火事を察知する。人間が作ったものとは全く違う機構を用いながら、生物は同じあるいはそれ以上の機能を発現している。また Vincent 教授も示唆するように、リソグラフィーを使わなくても生物はナノ・マイクロ構造を創っている。生物は、産業革命以来人間が培ってきた産業技術とは全く異なる生産技術とシステムデザインの体系を有していることは明確である。バイオミメティクス研究の新潮流は、マテリアルやシステムのデザインと生産技術におけるパラダイムシフトを内包し、そして欧米ではすでに、環境やエネルギー、資源問題を解決し持続可能な社会の実現に向けた政策課題として位置付けられているように思われる。

図表9 「生物」と「工学」のモノ作り比較。BioTRIZ による解析



科学技術動向研究センターにて作成

## 5 海外の取り組み

### 5-1

#### 英国の認識と英国内の取り組み

2007年1月に当時の英国貿易産業省(DTI)は“Biomimetics: strategies for product design inspired by nature. A mission to the Netherlands and Germany”と題する報告書を作成した。これは、DTI Global Watch Missionによるものであり、英国の産業界におよぼすバイオミメティクスの潜在的な寄与が述べられている。この報告によれば、バイオミメティクス研究は、英国・ドイツ・オランダおよび米国においてさかんになされており、中でもドイツは基礎研究と産業応用を統合的にとりまとめることで一歩先んじている。一方、オランダはいくつかの先導的な研究機関と企業がバイオミメティクスの概念を製品開発と設計に展開しているものの、個々の研究・開発グループの間には連携がないとされている。

英国では2002年に、英国の企業および大学を中心メンバーとするBIONIS<sup>注9)</sup>というネットワークが設立された。ニュースレターの発行によって、バイオミメティクスに関するトピックスや会議開催などを国際的に発信している。しかし、英国では基礎研究とプロトタイプ製の製造との間にはよい連携があるにもかかわらず、実用化にむけての展開は必ずしも進んではいないのが現状のようである。ちなみに、2006年にDTIのMaterial Innovation & Growth Teamが行った“Multifunctional Materials”に関する報告においては、英国においては複合材料やコーティング材、ナノ構造材料などとともにバイオミメティクス材料が、将来的に重

要であるとされている。

### 5-2

#### ドイツの取り組み

英国からネットワーク形成が充実していると評価されたドイツにおいては、新世代バイオミメティクス研究における生物学の役割が明らかに大きい。ドイツ政府の生物多様性条約戦略(National Strategy on Biological Diversity, 2007)においては、“Biological diversity and its innovation potential”と題した項が設けられ、ロータス効果やゲッコテープ、タマムシの赤外線センサーなどが技術革新をもたらすものとして紹介されている。また、2008年にボンで開催された生物多様性条約第9回締約国会議(COP9)においてドイツ政府は、生物多様性が原材料の調達や生産工程などの企業活動に大きな影響を及ぼすことから、「ビジネスと生物多様性イニシアティブ」を発足し民間企業に生物多様性条約への関与を求めている。

ドイツでは、BIOKON<sup>注10)</sup>が市場開拓、組織化および知識転移で大きな実績を持っている。BIOKONは、28の研究組織の産官学連携からなる連邦政府によって資金援助されたネットワークであり、2001年に設立された。BIOKONの特徴は、バイオミメティクスの重要な意義である「3つの連携」、すなわち「生物学と工学の連携」、「工学に

おける異分野連携」、「産学連携」を可能とする組織化が意図されている点にある。さらに2009年からはドイツ政府教育研究省から30億ユーロ以上の資金援助を受けてBIOKON Internationalとなり、今後は国際ネットワーク化を図っていく。8人のボードメンバーのうち半数をフランス、スウェーデン、オランダ、英国から迎えている。2012年からは政府から独立した活動を目指しており、本稿の冒頭でも紹介したように2011年には、世界でも初めての「International Industrial Convention on Biomimetics」を主催する。このようにドイツ政府は省庁を超えたバイオミメティクス振興を図っており、ドイツ経済産業省はその白書<sup>42)</sup>においても大きく取り上げている。

### 5-3

#### そのほかの欧州諸国の取り組み

欧州連合は、FP7において、防汚効果<sup>11)</sup>のほかにも情報通信、エネルギー、メディカルなど多くの分野でバイオミメティクス関連のプログラムを進めている<sup>43)</sup>。GENNESYS<sup>注11)</sup> Initiative (Grand European Initiative on Nanoscience and Nanotechnology using Neutron and Synchrotron Radiation Sources)の白書の三章でもBiomimetic nanomaterialsについて大きく採り上げている。

オーストリアのFederal Ministry for Transport, Innovation and

注9: BIONIS: The Biomimetics Network for Industrial Sustainability

注10: BIOKON: Bionics Competence Network

注11: GENNESYS:

Grand European Initiative on Nanoscience and Nanotechnology using Neutron and Synchrotron Radiation Sources

Technology は、機械・材料・生物学など多様な分野における大学・企業のネットワーク形成に力を入れている<sup>44)</sup>。また、スウェーデンには Swedish Biomimetics 3000<sup>®</sup> というバイオミメティクスの実用化への橋渡しを目的とした融資会社が設立されている<sup>45)</sup>。

## 5-4

### 米国の取り組み

冒頭で紹介した全米アカデミーズの白書では、“Next-Generation Bioinspired Materials”に関する提言のひとつとして、「先端材料の新しい設計へのインスピレーションをもたらす生物学的多機能システムを幅広く選択」することが科学的理解への挑戦であると述べられて

いる。Biomimicry の主唱者である J.Benyus は、Biomimicry Institute という NPO 法人と Biomimicry Guild というコンサルティング会社を設立し、フリーアクセスできる AskNature というサイトに Biomimicry Taxonomy というデータベースを開設して生物の多様性を様々な科学技術分野に応用するヒントをリストアップしている。また、“Biomimicry and Design Workshop”を定期的に主催し情報発信をしている。

## 6 我が国の取り組み—課題と提言

### 6-1

#### 我が国の取り組み

図表 10 に示すように、今世紀になってから「ネーチャー・テクノロジー」や「バイオミメティクス」に関する著作や論文誌が我が国でも出版され、経済産業省を中心にバイオミメティクスに関する政策的な調査が行われている。また文部科学省は 21 世紀 COE において、生

物模倣型モノづくり(工学分野)や生物資源の新しい利用(農学分野)に関する大学院教育プログラムを採択している。また、我が国の研究者が主催する国際会議も開催されている。また、撥水材料や塗料、構造色繊維、モスアイ構造をもつ光学フィルムなどは、我が国においてもすでに実用化されており、新しい材料デザインや生産技術の革新などの観点からも生物模倣技術への企業の関心はますます高まっている。

### 6-2

#### 新世代バイオミメティクス研究・開発における日欧比較

バイオミメティクスの新潮流は、現代社会が抱えているエネルギー、環境、資源などの諸問題に対応できる「生産技術の革新」を萌芽する新しい科学技術体系をもたらすものとして世界的にも期待されている。そしてその実現には、工学と

図表 10 我が国におけるバイオミメティクス関係の調査、研究プロジェクト、著作など

調査	平成17年度東北経済産業局調査 「ネーチャーテクノロジーに係わる産業公害防止技術・事業可能性調査」 平成19年度NEDO「生物機能模倣型もの作り技術に関する調査」 平成21年度NEDO「次世代バイオミメティック材料に関わる調査」
研究プロジェクト	平成14年度 名古屋大学21世紀COEプログラム「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」 平成16年度 京都大学21世紀COEプログラム「昆虫科学が拓く未来型食料環境学の創生」
企業の関心	積水化学 「自然に学ぶものづくりフォーラム」「自然に学ぶものづくり研究助成」などの助成事業 日経産業新聞 2010年2月9日、10日「2030年への挑戦 次世代産業技術」生物模倣 (上)(下) 日本経済新聞 2010年1月23日「技術ウオッチ」生物の機能活かし、環境配慮、 日本経済新聞 2010年5月4日、5日、7日「生物多様性 経営に生かす」(上)(中)(下) エコノミスト臨時増刊号「図説 日本経済2010」驚異的なエネルギー効率の生物に学ぶモノづくり
国際会議	2001年～2009年「バイオミメティック材料プロセッシング」に関する国際会議 2009年「エンジニアリング・ネオバイオミメティクスに関する国際シンポジウム」
学術書	2000年「バイオミメティックハンドブック」、2002年「バイオミメティクスの新展開」、2006年「“ファイバー”スーパーバイオミメティクス」、2006年「プラントミメティクス」、2008年「昆虫に学ぶ新世代ナノマテリアル」 2008年「昆虫ミメティクス」、2009年「昆虫科学が拓く未来」
啓蒙書	2004年「カタツムリが、おしえてくれる!—自然のすごさに学ぶ、究極のモノづくり」、2005年「自然に学ぶものづくり」、2006年「昆虫力」、2009年「自然に学ぶ粋なテクノロジー」、2010年「地球が教える奇跡の技術」

科学技術動向研究センターにて作成

生物学の強力な異分野連携が不可欠であることが、本報告で紹介した欧米の成功例からも読み取ることができる。バイオミメティクス研究・開発における欧米の高いアクティビティーとオリジナリティーの背景には、科学技術を縦割りに分割しない文化的な要因があるように思われる。ドイツでは、異分野連携をさらに推進するために、異分野連携研究にしか予算を配分しない行政的な指導を行っている。新世代バイオミメティクス材料研究における我が国の課題を抽出する上でも、欧州との比較を行うことは意味があるだろう。

図表 11 に、異分野連携・産学連携・教育プログラム・予算配分・政策的な調査などにおける日欧比較をまとめた。欧州では、生物学からの問題提起をナノテクノロジーなどとの異分野連携で強く推進してきた結果として、人材育成とネットワーク形成を政策的にも推し進め、さらには博物館や産業界を巻き込んで進んできた様子が見て取れる。一方、欧州とは対照的に、我が国では縦割りの取り組みに限られ、残念ながら異分野

連携が積極的に推進されているとはいえない状況にある。新規な異分野連携・融合領域形成を苦手とする我が国にとっては、バイオミメティクスの成功例である欧米における研究開発例を1つの分野がキャッチアップしフォローするだけでは、科学的にも技術的にも遅れをとることは明白である。

## 6-3

### 我が国の問題点とその背景にあるもの

生物学とナノテクノロジーの異分野連携の成果ともいえる新世代バイオミメティクス研究が、何故、我が国では台頭しにくいのであろう。我が国でも、分子系バイオミメティクスとも言うべき Biomimetic Chemistry の伝統と成果があり、その一部はバイオマテリアル研究の潮流を生みだし、そして現在では、医療応用の領域において材料科学と医学の連携を成功裏にもたらしえてきた。我が国における医工連携成功の背景には、バイオマテリア

ル研究者が医学に対する知識と医療現場の課題と問題点を十分に理解していたことがあり、学会組織や教育体制の充実がそれらを可能としたものと考えられる。一方で、分子系バイオミメティクス研究の後継領域でもある超分子科学は、原子や分子、分子集合体を対象とするボトムアップ・ナノテクノロジーの中心的研究領域となるものの、異分野連携の相手は同じ大きさを対象とする研究領域に限られた。nm から  $\mu\text{m}$ 、さらには mm にいたるより大きな構造を対象とした研究領域、すなわち、欧州において次世代バイオミメティクス台頭の契機となった分類学や形態学が対象とする大きさは、我が国の超分子科学のテリトリーではなく、結果として昆虫学や動物学、植物学との異分野連携はほとんどなされなかった。その結果、我が国における材料系バイオミメティクス研究は、新規材料のバイオミメティック・デザインを欧州の論文から輸入するところから始まることになる。その段階であれば、生物学者の知識も連携も必要としないのである。材料科学側の問

図表 11 新世代バイオミメティクス研究における日欧比較 (○良好、△改善点あり、×不十分)

	欧州	我が国
材料科学と生物学・自然史学(博物学)との連携	○ 生物学主導の連携が多くみられるナノテクノロジーが重要不可欠 予算配分上、連携は不可欠	× 分子レベルを研究対象とする生物分野と材料科学の連携に限られる
工学領域内での材料系と機械系との連携	○ 異分野連携プロジェクトに予算の集中配分	× 材料系と機械・ロボット系との連携はほぼ皆無
産学連携	△ ドイツでは政府が積極支援ベンチャー化が早道 英国では大手企業はやや様子見	△ 欧米成果のキャッチアップを企業だけで展開する傾向が強い
教育プログラム	○ ドイツでは複数大学の博士課程が連携。分野も多様	△ 21COEなど。ただし、学内分野内で閉じたプログラム
博物館の関与	○ インベントリー(所蔵物)のデータベース化	× 材料科学分野や機械など工学との接点がない
産学連携・異分野連携ネットワークの形成	○ 英国、ドイツを中心に活発化 ドイツでは政府が積極支援 欧州コンソーシアムなど	× 皆無
予算	○ 各国予算ならびにEUのFP6,FP7に重点課題を設定	× 一般的な外部資金
政策的な取り組み	○ 各国で行政が独自の調査様々な学術分野での白書化と積極的な政策提言	△ METI, NEDOが中心に調査産業化に向けた調査に限られる生物学者の寄与がほとんどない

科学技術動向研究センターにて作成



題は、生物の有する構造や機能から新規材料設計のヒントを自らが生物学者との連携の中で探し出すことに価値を見いださなかったことであり、欧米のキャッチアップに甘んじた点にある。これは、我が国の材料科学者が、生物学に対する知識を持たず人材交流をしなかったことに起因する。バイオマテリアル研究者が知識を医学に求め、学会を組織して人材を育成し医工連携に成功したことは対照的である。

一方、生物学側では、極端に縦割りともいえる学問体系と学術組織のありかたを問題点として挙げることができるであろう。まず、学問領域の細分化が工学系に比べて著しく、例えば同じ昆虫を研究対象としていても、分類学、農学(害虫としての研究対象)、生理学、発生生物学など、多くの視点からのアプローチがあり、必ずしも研究者間での交流がなされている訳ではない。バイオミメティクスの領域においては、生物が有するナノ・マイクロ構造とそれらが有する生物学的機能を解明することが生物学の主たる役割である。欧州においては分類学者、形態学者が次世代バイオミメティクス研究の先導的役割を果たしているのに対し、我が国においては、分類学や形態学、さらには発生学の分野におけるバイオミメティクス関連の研究は皆無であった。一方、農業における昆虫学は、蚕と害虫を研究対象とした経緯もあり、応用昆虫学として展開してきた。図表 10 に掲載した京都大学農学部の 21 世紀 COE では、「昆虫から学ぶ科学」としての「エントモミメティクス(エントモロジー=昆虫学)」を提唱しており、昆虫型ロボットの開発などでは機械系バイオミメティクスとの連携も試みられている。代表者である藤崎憲治教授が、ドイツにおける次世代バイオミメティクス研究のリーダーである Kiel 大学

の S.Gorb 教授と交流を始めたことで、応用昆虫学においても材料系バイオミメティクスへの関心がもたらされた。

2008 年に出版された「昆虫ミメティクス」は、動物生理学者を中心に編集された我が国では最初の本格的なハンドブックであり、この中では J.Vincent 教授をはじめとする欧州の昆虫学者、動物学者の研究が数多く紹介されている。編集代表の下澤楯夫北大名誉教授は、電子工学のバックグラウンドを持つ生理学者であり、昆虫の感覚毛の研究に工学的な手法を取り入れた研究は欧米でも高く評価されており、その研究成果は 3-8 節で紹介した J.Casas 教授らのプロジェクトのきっかけにもなっている。欧米に遅れはとったものの生物模倣の発想は、工学や農学といった応用の視点を持った生物学者の中では萌芽していると言える。しかし、農学系で提唱されている「エントモミメティクス」と生理学系の「昆虫ミメティクス」とは、共通の課題や問題意識を持ち、さらには材料科学や機械工学との接点を持ちながらも、縦割りとも思える我が国の学問体系と学術組織のなかでそれぞれに独立して展開している。その結果、次世代バイオミメティクス研究を生物学主導で展開する素地と可能性を孕んではいたものの、欧州にみられる新潮流への展開にはいたらなかったと考えられる。

## 6-4

### 課題と提言

「生物機能に学ぶ材料・システムの設計」と「生物プロセスに学ぶ生産技術」を特徴とする「バイオミメティック・エンジニアリング」とも言うべき新しい技術体系を我が国に構築するためには、①材料科学・

機械工学などの工学と生物学・自然史学(博物学)の連携、②生物学や工学のそれぞれの領域内部での異分野連携、③産学連携、を早急に行うことにあり、そのためには④異分野連携のバリアを低くするための人材育成・教育の仕組み作りが急務である。早急に異分野連携を推進するためには、例えば「バイオミメティック・イニシアティブ」として機能すべき「府省連携型バイオミメティック・センター(仮称)」というような機関を設置し、(独)物質・材料研究機構、(独)産業技術総合研究所、(独)農学生物資源研究所、(独)理化学研究所、(独)国立環境研究所、(独)国立科学博物館、地方自治体が運営する自然史系博物館、大学など省庁をまたがる包括的な研究連携体を組織するとともに、産学連携プロジェクトや学術連携融合研究プログラムなどを政策課題として設定することが有効である。さらに、異なる学術領域の複数の学会が連携した人材育成プログラムや、科学博物館と大学、学会の連携による理科教育プログラムや科学技術啓蒙活動、科学技術者のリカレントなどを同時に推進するべきであろう。

### 6-4-1 博物館の役割

膨大な生物資源情報とも言える生物標本を保存している博物館の役割は特に不可欠である。データマイニングや「知の構造化」などのデータベース化法を利用して、博物館の所蔵物であるインベントリーを整理・集約化することでバイオミメティック・データベースを網羅的に作成することが急務である。また、分類学、形態学にとっても、これまでに収集した標本に工学的な価値を見いだされることは学術的にも意味のあることであり、事実、欧州の博物館では、電子顕微鏡写真なども含むデータベースを基に材料やデバイスの研究者との連携、産学連携を積極的

に行っている。生物資源インベントリーを工学的な視点からデータベースにする作業は、工学者と生物学者がお互いを知る場を提供することであり、さらには、「標本」を「宝物」に換えることであり、そしてそこから共同研究の課題を見いだすことでもある。生物多様性は、生物を模倣し着想を得て新たに設計される材料の多様性に反映される。

#### 6-4-2 異分野連携による新学術研究領域の創成

生物は、ナノからマイクロ、そしてマクロにいたる階層的な構造を自発的に形成している。新世代バイオミメティクス研究は、ナノからマイクロにいたる領域で形成される構造とそれらがもつ機能、ならびに機能発現の機構解明を対象とする。これは、分子生物学的手法とは異なるアプローチであり、またナノテクノロジーの発展によっても行われなかった。バイオミメティクス研究は、ナノとマイクロの狭間を埋めることであり、分子ナノテクノロジーと生物のマイクロ構造を結びつけることは、生命科学と工学の融合をもたらす。さらにその成果は、発生生物学や形態学にフィードバックされる。これこそが、新世代バイオミメティクス研究が新しい学術領域たる本質である。

#### 6-4-3 実用研究に向けた産学連携のプロジェクト化

ロータス効果の発見は、ドイツにおけるバイオミメティクス研究開発の象徴的な成功例であり、ドイツ政府は産学連携ネットワーク形成(BIKON)を政策的な課題とし

て援助を行っている。欧州においても、この分野における産学連携の推進には政府の支援が必要であることを意味している。このようなネットワーク形成の形で政策的なサポートがあれば、周回遅れの状況にある我が国においても起死回生の機会は十分にあると考えられる。

生物学と工学分野におけるアカデミアの連携を図るとともに、エネルギーや環境、資源問題に対応できる企業連携体との共同研究コンソーシアムとしての産学連携体を政策的に組織し、産学連携課題の設定とプロジェクト化を行う。例えば、太陽光発電へのモスアイ構造の導入は効率的なエネルギーの創造を可能とし、昆虫の脚に学ぶ低摩擦材料を自動車に導入することで効率的なエネルギーの利用を達成し、自己組織化や自己集合に基づくボトムアップ・ナノテクノロジーの開発と生産技術化は、大量のエネルギーを使わない生産工程を実現する。これらの課題は、持続可能な社会実現にむけたより大きな政策的な課題でもある。

#### 6-4-4 教育・人材育成

生物学に対する興味と理解を持つ工学の研究者を育成することは、バイオミメティクス研究の将来展開にとって不可欠である。3-6節でも紹介したように、ドイツでは昆虫の感覚毛模倣のコンソーシアムと連携したBIONIC Graduateという大学院博士課程のCOEプログラムがあり、複数の大学の専門分野のことになる教員が大学院学生の指導(Cross-Border Training)を行っている。生物の有する構造や機能に工学的な価値を見いだすために

は、工学教育に生物学を取り入れることが不可欠である。また、バイオミメティクス研究を通じて、博物館が持つ啓蒙機能を利用した初等中等教育における理科教育や、企業研究者のリカレント教育なども積極的に考えるべきであろう。

日本が、新世代バイオミメティクスの潮流に乗り遅れたのには、「物理や数学が苦手な生物学者」や「暗記物が嫌いな工学者」、さらには「高校で生物学を履修しないままに医学部に進学する学生」を生み出したこの国の教育と文化的な背景があるように思われる。大学の学部構成には、明治維新から続いている縦割りの教育制度を未だに引きずった感があり、初等中等教育、とりわけ理科教育のありかたにも影響している。さらに、均一性の高い学会などの組織のあり方も異分野連携に消極的な文化の一因かもしれない。我が国が欧米のキャッチアップから脱却し、科学技術先進国として脱近代化するためには、大学・大学院における「課題をつくりだす問題設定能力」を持つ人材の育成が重要になる<sup>46)</sup>。特にこれからは、「物理が解る分類学者」、「昆虫に詳しいエンジニア」が求められる。

#### 謝辞

本稿の執筆にあたり、(独)国立科学博物館・友国雅章動物部長、京都大学農学部・藤崎憲治教授、下澤楯夫北海道大学名誉教授、道立北海道開拓記念館・堀繁久課長、浜松医科大学・針山孝彦教授、九州大学先端物質化学研究所・高原淳教授に貴重なご意見を頂きました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) <http://www.otto-schmitt.org/>
- 2) ドイツ政府の Clusters of Excellence は異分野連携を前提にした大型プロジェクトの例である。  
[http://www.dfg.de/en/research\\_funding/programmes/excellence\\_initiative/clusters\\_excellence/index.html](http://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/excellence_initiative/clusters_excellence/index.html)
- 3) 例えば、辻井薫「超撥水と超親水 その仕組みと応用」、米田出版 (2009)
- 4) W. Barthlott, "Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants.", Scanning Electron Microscopy in Taxonomy and Functional Morphology (Systematics Association Special Volume No. 41), ed. D. Claugher. Clarendon Press, Oxford, 69-94, Clarendon Press, Oxford, (1990), W. Barthlott, C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces" *Planta*, 202(1), 1-8(1997)
- 5) L. Feng, Y. Zhang, J. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia, L. Jiang, "Petal Effect : A Superhydrophobic State with High Adhesive Force", *Langmuir*, 24(8), 4114-4119(2008)
- 6) M. H. Jin, X. J. Feng, L. Feng, T. L. Sun, J. Zhai, T. J. Li, L. Jiang, "Superhydrophobic Aligned Polystyrene Nanotube Films with High Adhesive Force", *Adv. Mater.* 17(16), 1977-1981(2005)
- 7) A. R. Parker, C. R. Lawrence, "Water capture by a desert beetle", *Nature* 414(6859), 33-34(2001)
- 8) L. Zhai, M.C. Berg, F.C. Cebeci, Y. Kim, J.M. Milwid, M.F. Rubner, R.E. Cohen, "Patterned Superhydrophobic Surfaces : Toward a Synthetic Mimic of the Namib Desert Beetle", *Nano Lett.*6(6), 1213-1217(2006)
- 9) D. Ishii, H. Yabu, M. Shimomura, "Novel Biomimetic Surface Based on a Self-Organized Metal - Polymer Hybrid Structure", *Chem. Mater.*, 21(9), 1799-1801(2009)
- 10) F. Xia, L. Jiang, "Bio-Inspired, Smart, Multiscale Interfacial Materials", *Adv. Mater.*, 20(15), 2842-2858(2008)
- 11) <http://www.biosciences.bham.ac.uk/SEACOAT/index.htm>
- 12) T. Hariyama, "Structural Colors in Fish", *Structural Colors in Biological Systems -Principles and Applications-*(edited by S. Kinoshita and S. Yoshioka), Chapt.5, Osaka University Press, (2005)
- 13) A. L. Ingram and A. R Parker, "A review of the diversity and evolution of photonic structures in butterflies, incorporating the work of John Huxley (The Natural History Museum, London from 1961 to 1990)", *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 363(1502), 2465-2480(2008)
- 14) K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. Peattie, W. Hansen, S. Sponberg, T. Kenny, R. Fearing, J. Israelachvili, and R. J. Full, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae" *PNAS*, 99(19), 12252-12256(2002), W. Kenny, Ronald Fearing and Robert J. Full, "Adhesive force of a single gecko foot-hair", *Nature*, 405(6787), 681-685(2000)
- 15) M Sitti, RS Fearing, "Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives", *J. Adhesion Sci. Technol.*, 17(8), 1055-1073(2003)
- 16) A.K. Geim, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, K.S. Novoselov, A.A. Zhukov, SYU. Shapoval, "Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair", *Nature Materials*, 2(7), 461-463(2003)
- 17) J. Lee, B. Bush, R. Maboudian and R. S. Fearing, "Gecko-Inspired Combined Lamellar and Nanofibrillar Array for Adhesion on Nonplanar Surface", *Langmuir*, 25(21), 12449-12453(2009)
- 18) <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBot> 英国の軍事産業である BAE Systems においても開発された。  
<http://www.bae-systemsmarine.com/fias2006/news/news197.htm>
- 19) C. G. Bernhard, William H. Miller, "A corneal nipple pattern in insect compound eyes", *Acta Physiol Scand.*, 56(3-4), 385-386(1962), W. H. Miller, G. D. Bernard, and J. L. Allen, "The Optics of Insect Compound Eyes", *Science*, 162(3855), 760-767(1968)
- 20) S. J. Wilson, M. C. Hutley, "The Optical Properties of 'Moth Eye' Antireflection Surfaces", *J. Mod. Opt.*, 29(7), 993-1009 (17) (1982)
- 21) J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, "19.8% Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46(10), 1978-1983(1999)
- 22) W. Baumgartner, F. Fidler, A. Weth, M. Habbecke, P. Jakob, C. Butenweg, W. Böhme, "Investigating the Locomotion of the Sandfish in Desert Sand Using NMR-Imaging", *PLoS One.*, 3(10), e3309(2008)
- 23) R. A. Berthé, G. Westhoff, H. Bleckmann, S. N. Gorb, "Surface structure and frictional properties of the skin of the

- Amazon tree boa *Corallus hortulanus* (Squamata, Boidae)", *Journal of Comparative Physiology A*, 195(3), 311–318 (2009)
- 24) <http://www.bionikgraduate.uni-bonn.de/index.php>
- 25) M. Varenberg, S. N. Gorb, "Hexagonal Surface Micropattern for Dry and Wet Friction", *Adv. Mater.*, 21(4), 483–486 (2009)
- 26) E. Gorb, and S. Gorb "Functional surfaces in the pitcher of the carnivorous plant *Nepenthes alata* : A cryo-SEM approach.", *Functional Surfaces in Biology : Adhesion Related Phenomena. Volume 2.* (Gorb, S., ed.), Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York., 205–238 (2009)
- 27) T. Onda, S. Shibuichi, N. Satoh and K. Tsujii, "Super-Water-Repellent Fractal Surfaces", *Langmuir*, 12(9), 2125–2127 (1996)
- 28) D. Voigt and S. Gorb, "An insect trap as habitat : cohesion-failure mechanism prevents adhesion of Pameridea roridulae bugs to the sticky surface of the plant *Roridula gorgonias*", *J. Exp. Biol.*, 211(16), 2647–2657 (2008)
- 29) H. Schmitz, M. Mürtz and H. Bleckmann "Infrared detection in a beetle", *Nature*, 386(6627), 773–774 (1997)
- 30) T. Shimozawa and M. Kanou, "Varieties of filiform hairs : range fractionation by sensory afferents and cercal interneurons of a cricket", *J.Comp.Physiol.*, 155(4), 485–493 (1984), T. Shimozawa and M. Kanou, "The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the cercal filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*". *J.Comp. Physiol.*, 155(4), 495–505 (1984)
- 31) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai : F. G. Barth, J. A. C. Humphrey and T. W. Secomb (eds.), *Sensors and Sensing in Biology and Engineering*, 145–157, Springer-Verlag (2003)
- 32) G. J. M. Krijnen, T. S. J. Lammerink, R. J. Wiegerink, J. Casas "Cricket inspired flow-sensor arrays", *IEEE Sensors*, 28–31 : 539–546 (2007)
- 33) N. Mhatre, F. Z. Montealegre, R. Balakrishnan, D. Robert "Mechanical response of the tympanal membranes of the tree cricket *Oecanthus henryi* (Orthoptera : Gryllidae : Oecanthinae)", *Journal of Comparative Physiology A*, 195 : 453–462 (2009)
- 34) S. Gorb, "Functional Surfaces in Biology, Vol. 1 Little Structures With Big Effects, Volume 2 Adhesion Related Phenomena", Springer (2009)
- 35) K. Koch, B. Bhushan, W. Barthlott, "Multifunctional Surface Structures of Plants and their Occurrence in Various Environments : An Inspiration for Biomimetics.", *Materials Science*, 54 : 137–178 (2009)
- 36) P. P. Goodwyn, Y. Maezono, N. Hosoda and K. Fujisaki "Waterproof and translucent wings at the same time : Problems and solutions in butterflies." *Naturwissenschaften*, 96(7) : 781–787 (2009)
- 37) N. Pike1, D. Richard, W. Foster, L. Mahadevan "How aphids lose their marbles", *Proc. R. Soc. Lond. B*, 269(1497) : 1211–1215 (2002)
- 38) M. Prakash, D. Quéré, J.W.M. Bush, "Surface Tension Transport of Prey by Feeding Shorebirds : The Capillary Ratchet", *Science*, 320 : 931–934 (2008)
- 39) M. J. O'Donnell, "Site of water vapor absorption in the desert cockroach, *Arenivaga investigata*" *PNAS*, 74(4), 1757–1760, (1977)
- 40) J. F.V Vincent, O. A Bogatyreva, N. R Bogatyrev, A. Bowyer, and A. K. Pahl, "Biomimetics : its practice and theory", *J. R. Soc. Interface.*, 3(9) : 471–482 (2006), <http://www.biotriz.com/main.shtml>  
TRIZ とは、Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch の頭字語 (英語では Theory of solving inventive problems) である
- 41) S J Abbott, P H Gaskell "Mass production of bio-inspired structured surfaces *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*", Part C : *Journal of Mechanical Engineering Science*, 221(10) : 1181–1191 (2007)
- 42) [www.photonicnet.de/download/jahresbericht\\_kompetenznetze-de.pdf](http://www.photonicnet.de/download/jahresbericht_kompetenznetze-de.pdf)
- 43) [http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fet-proactive/bioict\\_en.html#what](http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fet-proactive/bioict_en.html#what),  
[http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7\\_PROJ\\_EN&ACTION=D&RCN=85749](http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&RCN=85749), <http://nanoma.zenon.gr/>,  
[http://cordis.europa.eu/fp7/ict/micro-nanosystems/projects\\_en.html#Micro-Nano-Bio%20Convergence](http://cordis.europa.eu/fp7/ict/micro-nanosystems/projects_en.html#Micro-Nano-Bio%20Convergence)
- 44) 2008 年のオーストリア政府出版物 "Bionik und Verkehrstechnologie" ([http://www.bmvit.gv.at/innovation/aktuell/downloadsaktuell/bionik\\_handout.pdf](http://www.bmvit.gv.at/innovation/aktuell/downloadsaktuell/bionik_handout.pdf)) に引き続き 2010 年には "BIONIK Innovation & Qualifikation" も出版された。
- 45) <http://www.swedishbiomimetics.com/index.htm>

46) 松井彰彦：「西洋化」の終わりとは日本経済 日経新聞 2010年3月28日 経済論壇から

---

## 執筆者プロフィール

---



### 下村 政嗣

科学技術動向研究センター 客員研究官  
東北大学原子分子材料科学高等研究機構・多元物質科学研究所 教授  
<http://poly.tagen.tohoku.ac.jp/Site/Top.html>

九州大学工学部をかかわりに、東京農工大学、北海道大学電子科学研究所、理化学研究所(兼任)、そして東北大学へと転々とし、日本の大学・研究所を体験的に比較し、異分野連携、産学連携のありかたを模索している。専門は、高分子科学、ナノテクノロジー。