

古くて新しい、バイオミメティクス

千歳科学技術大学 応用化学生物学科教授 下村政嗣

1. バイオミメティクスって、何？ —分子から生態系まで

バイオミメティクス(biomimetics)は生物模倣と訳される。生物に学ぶという考え方は古く、レオナルド・ダ・ビンチにさかのぼる。バイオミメティクスという言葉は、1950年代後半に神経生理学者のオットー・シュミットによって提唱された。彼は、神経システムの信号処理がノイズの影響を受けにくいことをヒントに、入力信号からノイズを除去し矩形波に変換するシュミット・トリガーとよばれる電気回路を発明した。40年代には、植物の種が動物の毛に付着することをまねた面状ファスナー(VELCRO®や、マジックテープのこと)が製品化されている。1935年にデュボン社のカロザースが発明したナイロンは絹糸を模倣した合成繊維として有名である。

70年代になり、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣するバイオミメティック・ケミストリーが世界的な潮流となる。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、有機化学や物理化学の手法を用いて生体反応を分子レベルで解明できたからである。人工光合成の研究は色素増感太陽電池の基礎となり、人工筋肉を意識したゲルアクチュエーターの研究はソフトマテリアルの基盤になった。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、分子系バイオミメティクスの潮流は、80年代後半における分子エレクトロニクスの台頭と相まって分子組織化学や超分子化学を生みだし、インテリジェント材料やスマート材料などを支える分子ナノテクノロジーへと展開する。

機械工学や流体力学の分野でもバイオミメティクスの研究開発が活発である。潜水艦のソナーはコウモリの反響定位のバイオミメティクスであり、昆虫の感覚毛を模倣した気流センサーなどが開発されている。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、

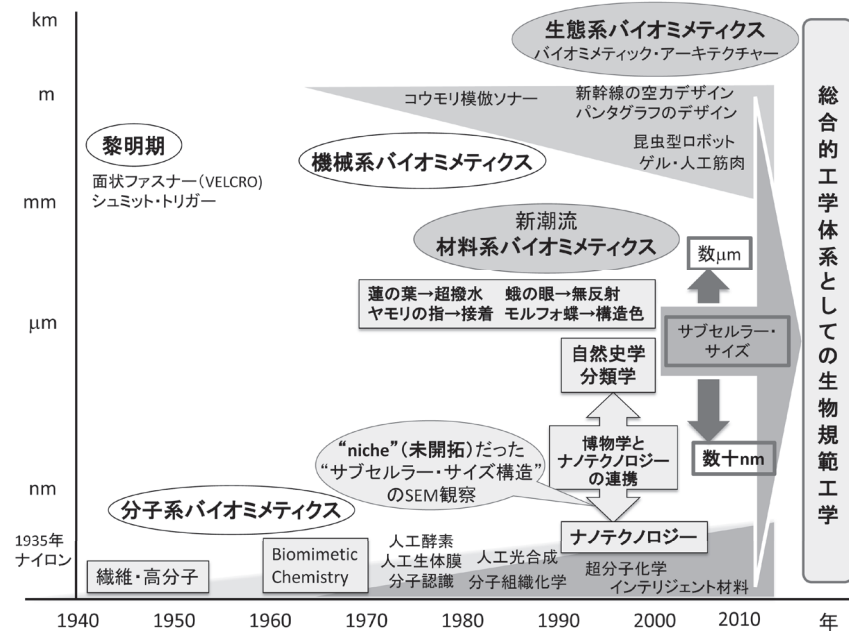


図1 バイオミメティクス研究開発の潮流

バ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よく知られている。機械系バイオミメティクスの研究は、軍事産業、鉄道や船舶、航空機、自動車産業、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。昆虫の飛翔や魚の泳ぎをまねたロボット開発も盛んである。第4次産業革命と称される Industrie 4.0で盛り上がっている今年のアノバー・メッセでは、ドイツの機械メーカー FESTO 社が、共同作業を行うアリ型ロボット(BionicANTs)や、ぶつかることなく群舞する蝶型ロボット(eMotionButterflies)のデモンストレーションを行っている。

今世紀に入り欧米を中心に、材料系バイオミメティクスとよぶべき新たな潮流がおこった。蓮の葉の超撥水性、ヤモリや昆虫の足の接着性、サメ肌による防汚性や低流体抵抗、蛾の眼の無反射性、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が明らかにされ、これらを模倣して、テフロンを使わない撥水材料、接着剤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、航空機の燃費向上塗装、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。前世紀末からのナノテクノロジーの世界的な発展によって、走査型電子顕微鏡(SEM)の性能が著しく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”でもあるナノ・マイクロ構造が明らかにされたのである。生物学者や博物学者が明らかにした生物のも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だされた。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できあがった。

2. バイオミミクリーって、何？

—持続可能性へのパラダイムシフト

2010年にサンディエゴ動物園は「Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer」と題する経済レポートにおいて、“バイオミミクリーが、15年後に年間3000億ドルの国内総

生産と160万人の雇用をもたらす”という予測を行った。2010年に名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議(COP10)に先駆けて日本経団連が行った「経団連生物多様性宣言」では、“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”としてバイオミミクリーを取り上げ、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への応用”などを紹介している。バイオミミクリーはバイオミメティクスなのである。バイオミミクリーの命名者は、「Biomimicry: Innovation Inspired by Nature」の著者のジャン・ベニユスである。エコロジストでもある彼女は、“Biomimicry’s Climate-Change Solutions: How Would Nature Do It?”と主張する。“バイオミミクリー”には、エネルギーや資源、環境など、科学技術と経済活動が直面する喫緊の課題が反映されているのである。

産業革命以来の“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、シリコンなどを原料として、高温、高压プロセスでモノを作り、情報や価値を生みだしてきた。一方生物は、太陽光や化学エネルギーを源に、炭素を中心とする有機物(CHOPINS)を用いた常温、常圧プロセスによって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もっている。“生物の技術体系”のパラダイムは“人間の技術体系”と異なる。

蓮の葉の表面には細胞よりも小さな凸凹があり、ナノ・マイクロスケールの凸凹構造が撥水性を高めることはよく知られた現象である。凸凹構造を使えばテフロンコーティングは不要である。蓮の葉の撥水機構は、持続可能性に寄与する“汎用元素を利用したセルフクリーニング材料技術”のパラダイムを示している。ヤモリは壁や天井をはい回ることができる。その指先には、分岐した微細毛が密集しており、微細構造による面積化でファンデルワールス力という弱いエネルギーの集積化によって大きな力を得ている。接着剤フリー、溶剤フリーの接着技術であり、建材、エレクトロニクス実装のリサイクル可能な省エネプロセスが可能となる。アワビの殻は

常温常圧でのバイオミネラリゼーションで作られた有機無機複合構造であり、焼結で作製する強靱なセラミクスに匹敵する材料強度を示す。“生物の技術体系”は持続可能であり、その生き残り戦略と進化適応の結果が生物多様性である。進化適応を“壮大なるコンビナトリアル・ケミストリー”ととらえることで、“生物の技術体系”のパラダイムを読みとることができる。バイオミメティクスは、持続可能性に向けた生物に学ぶパラダイムシフトである(図2)。

さらに、生物は個体として生存しているわけではない。群れにおいては、個体と個体の相互作用があり、社会が生まれる。さらには、多様性と相互作用、非生物学的な自然現象との複雑な相互作用により生態系システムが構築され環境をなす。FESTO社のロボットや、魚群の衝突回避を模倣して日産が開発した集団走行ロボットカー EPOROなどは、群れのバイオミメティクスであり、輸送の効率化や渋滞の回避、事故低減による安心安全への寄与は大きい。また、蟻塚の空調を模倣したパッシブ・クーリング(受動的冷房)を備えたイーストゲートセンタービル(ジンバブエの首都ハラレにある複合商業施設)は省

エネであり、ナイジェリアでは“biomimetic smart city”と評される環境都市設計構想もある。これらの動向は、生態系バイオミメティクスと称すべきトレンドとしてとらえるべきであり、個々の生物の形態やそれともなう機能のみならず、生態系システムや環境との相互作用までも視野に入れることで、生物模倣技術は持続可能性に向けた技術革新をもたらす総合的な工学体系=生物規範工学となる。

3. バイオミメティクスの展開 —情報科学が繋ぐ生物と工学

バイオミメティクスでは生物学から工学への技術移転が不可欠である。膨大な生物学データベースから工学的発想を導き出すのである。バイオミメティクスの普及においては、生物学的情報と工学的情報を結びつける知識インフラの整備が不可欠である。博物館や大学などが所蔵する収蔵物=インベントリーを工学的に利用できるデータベースにする必要がある。しかし、工学者にとって生物学データベースは“宝の山”ではあるものの、異分野のデータベースに闇雲に入ることはできない。生物学と工学を繋ぐのは、情報科学である。

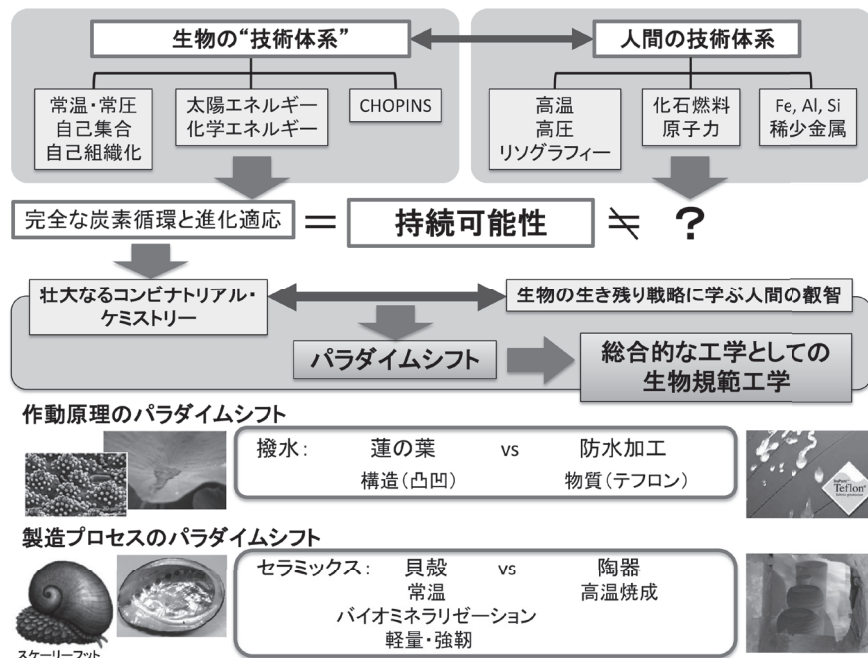


図2 バイオミメティクスはパラダイムシフト

ドイツ規格協会は、2011年にジュネーブの国際標準化機構に対してバイオミメティクスに関する新しい技術委員会の提案を行い、ISO TC266 Biomimetics がスタートした。2012年にベルリンで開催された1回目の国際委員会では、“Terminology and methodology”, “Structure and materials”, “Biomimetic optimization”の3つの作業委員会が設置された。さらに、パリで開催された第2回国際委員会において、日本から提案した“Knowledge infrastructure of biomimetics”に関する作業委員会が承認された。この提案は、生物学と工学の概念の相関性を整理記述するオントロジーの手法を使い、異分野間で相互に使える類語辞書(シソーラス)を構築する手順の標準化である。異分野間でのテキスト情報検索によるデータマイニングが可能となる。

一方、画像は、直截的にインスピレーションを誘発する情報である。とりわけ電子顕微鏡の画像は、生物の構造と機能を解明する上で重要であるとともに材料設計を支援する。北海道大学の長谷山美紀教授が開発した類似画像検索システムは、“画像による画像の検索”によって、知識が少ない異分野のデータ検索を可能とした。これは、膨大な量の画像情報から、生物学者の“経験や勘に基づく知識で、言葉などで表現が難しいもの”である“暗黙知”を、工学的発想を誘発する“形式知”に変換する技術移転のツールでもある。思いつきや偶然の発見に頼るのではなく、システムティックな発想誘起が可能となる。

4. おわりに

ドイツ政府の国家戦略である第4次産業革命とも言われている Industrie 4.0は、自立分散型の生産システムを目指しており、物のインターネット(Internet of Things, IoT)と3D printing,そして標準化が重要だと言われている。今年のハノーバー・メッセは Industrie 4.0 一色であった。これまで FESTO 社がハノーバー・メッセで展示したバイオミメティック・ロボットは、個々の生物が有する性質や機能にヒントを得たものが主であった。魚のヒレ(fin ray: 鰭条)の運動性にヒントを得た Fin Ray Effect[®] とよばれる柔軟構造を使ったグリップや、Fin Ray グリップを先端に装着した象の鼻を模したロボットアーム、2013年のルフトハンザ機内誌で

“No large aircraft is yet able to fly like a dragonfly”として紹介されたトンボ型ドローン(Dragonfly Drone)である四枚翅飛翔ロボット BionicOpter などが有名である。今般開発された BionicANTs や eMotionButterflies は、個体と個体の相互作用に着目したものであり、Industrie 4.0の中核的な基盤である“モノのインターネット”(IoT: Internet of Things)を意識しているとともに、バイオミメティクスの新しいトレンドである生態系バイオミメティクス、つまり、システムの考え方が反映されているように思われる。

バイオミメティクスがもたらすパラダイムシフトと、バイオミクリーが問う持続可能性への寄与を統合し、情報科学によって生物学と工学を融合した総合的技術体系を確立する必要がある。文部科学省は平成24年度から科学研究費新学術領域「生物規範工学」をスタートし、環境省は第四次環境基本計画に基づき、平成25年～26年に「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進」に関する検討を行った。進化と適応の結果である生物の多様性が、制約された環境の下で持続可能な“モノ作り”や“まちづくり”を可能とする技術革新のヒントを与えてくれるに違いない。

参考文献

- 1) 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
- 2) 特集 工学と生物学の融合により次世代型のモノづくりを実現するバイオミメティクス—生物多様性に学ぶ技術革新、OHM、第102巻第1号、オーム社、2015
- 3) ジャニン・ベニユス、「自然と生体に学ぶバイオミクリー」、山本 良一、吉野 美耶子(訳)、オーム社、2006
- 4) バイオミクリーは世界を救う、月刊事業構想、2013年4月号
- 5) 長谷山美紀、「ものづくりの発想を支援する—バイオミメティクス・画像検索基盤—」、現代化学、31-34、2015