

特集 バイオミメティクスエンジニアリング

長い年月をかけて進化した生物は、生息環境に適応した優れた機能を備えている。その優れた機能を活用することで、さまざまな材料、工業製品、システムが開発されてきた。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る新しい潮流が起きつつある。化学工学の分野においても今後バイオミメティクスをベースとした革新的な技術の創生が期待されている。本特集では材料、測定、プロセス、システム、情報など幅広い分野から最近のバイオミメティクス研究のトピックスを紹介する。

(編集担当：松本泰正・川端鋭憲)†

バイオミメティクスがもたらす技術革新と国際動向，そして日本の課題

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、サンディエゴ動物園が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」という経済予測をおこなったことを報じた。さらにサンディエゴ動物園は、2012年8月にZurichにおいて、チューリッヒ動物園、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。そして、次のサミットは本年9月に予定されている。

Financial Timesをして“産業革命に匹敵する”と言わしめたBiomimicry (バイオミクリー)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への応用」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、バイオミメティクスの命名は1950年代後半に遡る。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」を発明した神経生理学者であり発明家である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がバイオミメティクス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



Paradigm Shift based on Biodiversity to Sustainable Innovation
Masatsugu SHIMOMURA
1980年 九州大学大学院工学研究科合成化学専攻修士課程修了
現在 千歳科学技術大学 教授
連絡先: 〒066-8655 千歳市美々 758-65
E-mail m-shimom@photon.chitose.ac.jp

2014年3月17日受理

† Matsumoto, H. 平成25, 26年度化工誌編集委員(6号特集主査)
花王(株)研究開発部門戦略企画部
Kawabata, E. 同上 生命科学技術普及センター

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証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「ものつくりの方法」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、高压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”、“バイオミクリー”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、“バイオミクリー”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」を提唱したい(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つくり」によって、「持続可能性」に資するものである。

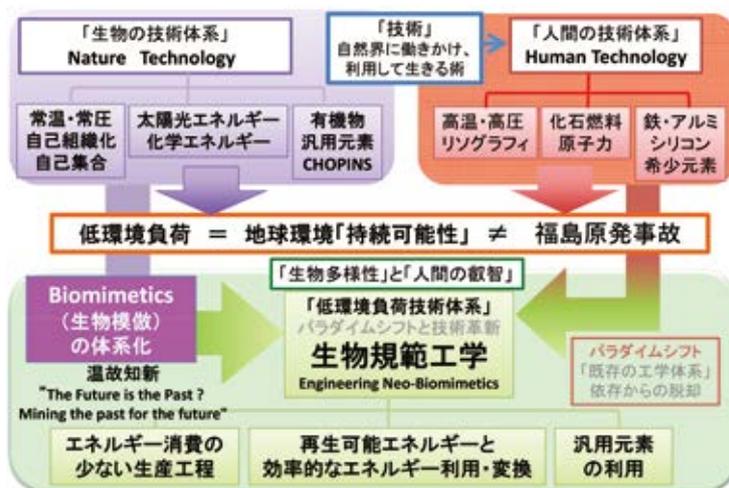


図1 人間と生物の“技術”の比較と、「生物規範工学」の提唱

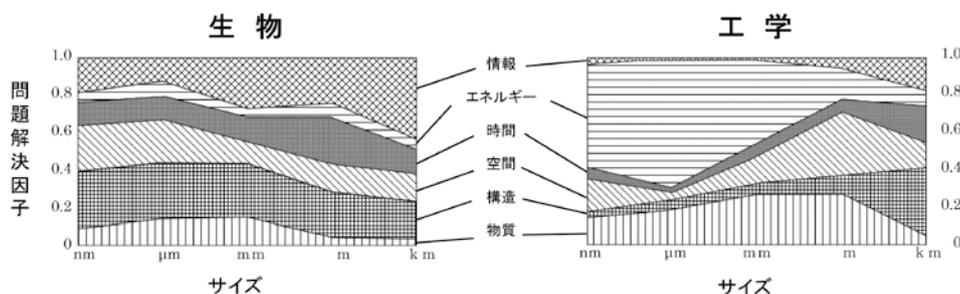


図2 Vincent教授による生物と人間の技術の比較³⁾

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おこなった(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) 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压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おもとになる過程は、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おこなわれる。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。

3. 国際標準化と我が国の課題

2011年5月、ドイツ規格協会(DIN)は、ジュネーブの国際標準化機構(ISO)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(TC)設立の提案をおこなった。DINの提案は、ISOの第266番目の技術委員会“ISO/TC266 Biomimetics”として承認され、2012年10月にベルリンで一回目の国際委員会が開催された。DINの提案は、ドイツに於けるバイオミメティクスのコンソーシアムであるBIOKONとドイツ技術者協会(VDI)が周到に準備してきた国内のガイドライン(VDI6220~VDI6226)である(表1)。

この表を見るだけでも、ドイツ国内では多様な業界においてバイオミメティクスに関する研究開発がなされており、さらには国内認証につながる動きもあると考えておいて良いであろう。そして、それ以上に重要なことは、ドイツが国際標準化を提案した背景には、「健全で責任あるバイオミメティクスの研究開発と産業化のための有益な指標」がこの分野の健全な発展と、さらには持続可能性社会の実現に向けた技術革新にとって不可欠である、という確固たるポリシーを読み取ることができる。

ベルリンで開催された第一回国際委員会において、ドイツ提案の三つの作業委員会WGと、事務局をサポートするタスク委員会が設置された。タスク委員会には、産業技術総合研究所の関谷瑞木さんが入っている。さらに、ベルリンにおける日本からの提案は、パリで開催された第二回国際委員会における北海道大学の長谷山美紀教授のプレゼンテーションが功を奏し満場一致で承認され、WG4の設置が認められた(表2)。

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

表1 VDIのバイオミメティクス・ガイドライン

VDI 6220 : Biomimetics - Conception And Strategy - Differences Between Biomimetic And Conventional Methods/Products
VDI 6221 : Biomimetics - Functional Bionic Surfaces
VDI 6222 : Biomimetics - Bionic Robots
VDI 6223 : Biomimetics- Biomimetic materials, structures and components
VDI 6224 - Biomimetics - Part1 Biomimetic optimization - Application of evolutionary algorithms
VDI 6224 - Biomimetics - Part2 Biomimetic optimization - Application of biological growth laws for the structure- mechanical optimization of technical components
VDI 6225 : Biomimetics - Bionic Information Processing
VDI 6226 : Biomimetics in architecture

表2 ISO TC266 Biomimeticsの作業委員会

<p>WG1 "Terminology and methodology"</p> <p>バイオミメティクスが従来の技術やプロセス、製品とどのように差別できるのか、バイオミメティクスに関する用語の定義および古典的な手法との差異を定義する。コンビナーと呼ばれる幹事長はドイツのMrs. Heike Beismann, エキスパートと呼ばれる日本の担当幹事は大阪大学の斉藤彰教授。</p>
<p>WG2 "Structure and materials"</p> <p>バイオミメティクスに関連する材料の認識や開発方法。バイオミメティックな構造、バイオミメティックな材料、さらにはバイオミメティックな手法と、どのような新しい機能が導き出されるのか。コンビナーは、ベルギーのMr. Stephan Hoornaert, プロジェクトリーダーで日本の担当幹事は、物質材料研究機構の細田奈麻絵グループリーダー。</p>
<p>WG3 "Biomimetic optimization"</p> <p>順応的成長、デザイン、最適化アルゴリズムなど、生物が進化の過程で獲得した順応的成長のアルゴリズムに基づく構造の最適化。コンビナーはドイツのMr. Iwiza Tesari, 日本の担当幹事は産業技術総合研究所の阿多誠文主任研究員。</p>
<p>WG4 "Biomimetics ?The knowledge infrastructure for biomimetics"</p> <p>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創造のプラットフォームが重要な役割を果たす。生物系と工学系の知識(データベース)を結びつけるための標準化を提案する。具体的には、生物系と工学系の知識を結ぶ用語の定義(シソーラス化)である。WG1~3で定義やプロセスについては提案・議論されているので、WG4は他のワーキングの結果を反映させるために、Preliminary Statusの段階から議論を始めることとなった。コンビナーは科学技術振興機構の恒松直幸氏、日本の担当幹事は富士通総研の長谷川誠氏。</p>

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。

参考文献

- 1) 文部科学省科学技術政策研究所: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,科学技術動向,2010年5月号(2010)
- 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) Vincent, J. F. V., O. A. Bogatyreva, N. R. Bogatyrev, A. Bowyer and A. K. Pahl : *J. R. Soc. Interface.*, 3(9), 471-482(2006)