

バイオミメティクスの活用が製造業にもたらす新たな変革

2019年6月

経営イノベーション本部

事業戦略グループ 舟橋 龍之介

1. バイオミメティクスの概況

人類は古来より、生物が有する形態や構造、それによって発現される機能を模倣してものづくりを行ってきた。ルネサンス期に、イタリアのレオナルド・ダ・ヴィンチが鳥の飛翔の精緻な観察を通じて飛行機械を設計した話は特に有名である。18世紀初頭には、フランス人技師のブルネルが造船所で働いている時、フナクイムシが口から出した分泌液で後方の壁を固めながら木に穴を掘り進んでいる様子から着想を得て、シールド工法が開発された。また、1940年代には、アメリカの木材伐採者であるジョセフ・コックスにより、カミキリムシの幼虫が顎を交互に動かしながら固い木材をかみ砕いている様子から、刃が左右交互に配置されたソーチェーンが開発された。このように、生物の観察や分析から得た着想をものづくりに活かす科学技術を「バイオミメティクス(生物模倣)」と呼ぶ。

他方で、現代においては顧客ニーズの変化や技術革新のスピードが向上しており、製品の陳腐化が早まることで、製品ライフサイクルは短命化の一途をたどっている。経済産業省の調査では、主力事業の主力製品が売れている期間を製品ライフサイクルと定義した場合、電気機械や輸送用機械の事業者の約半数が「製品ライフサイクルは5年以内である」と回答している。また、化学工業においても、事業者の約3割が「10年前よりも製品ライフサイクルは短くなっている」と回答している。こうした中、長い進化と自然淘汰の歴史の中で獲得・検証された生物

の機能や効果を製品開発に活かすことで、開発期間の短縮を図る企業が現れている。

実際にシャープでは、バイオミメティクスの活用により製品の試作回数を減らすことで、開発期間の短縮を実現している。同社はバイオミメティクスを活用した最初の製品を2008年に開発して以降、2018年1月末までに28製品を世に送り出した。平均すると約3カ月に1製品という開発ペースである。特にエアコン室外機の省エネ化に関しては、従来の研究開発手法では3年間で1%の改善さえ達成できなかったところ、アホウドリの翼の形状をプロペラファンに適用することで、20%もの消費電力の削減を1回の試作で実現している。

本コラムでは、生物が38億年かけて蓄積した知見を活かしてイノベーションを起こす「バイオミメティクス」を活用する際のポイントを紹介する。

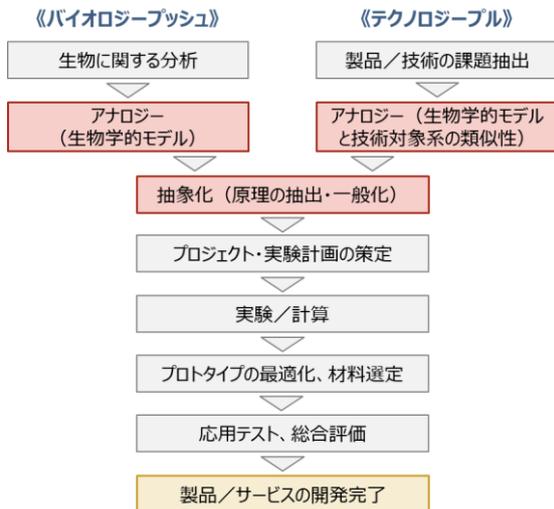
2. バイオミメティクスの活用方法

2.1 バイオミメティクスの活用プロセス

バイオミメティクス製品／サービスの開発プロセスは、①生物学的な発見を新技術に結びつける「バイオロジープッシュ」、②既存技術／製品が抱える課題に対する解決策のヒントを生物から得ようとする「テクノロジープル」の二つがある。これら二つのプロセスに共通し、バイオミメティクスの活用には欠かせない過程が「アナロジー」と「抽象化」である(図1)。

技術レポート

図1 バイオミメティクス製品／サービスの開発プロセス



出所: 参考文献3と4を基に三菱総合研究所作成

「アナロジー」とは、類似点に基づいて他の物事を推し量ることである。バイオミメティクスの場合、「バイオロジープッシュ」では生物の類似性から生物学的モデルを検討、「テクノロジープル」では生物学的モデルと技術対象系の類似性を検討する。「抽象化」では、アナロジーでの検討結果から原理を抽出し、

一般化する。こうした「アナロジー」と「抽象化」の過程を経た後は、実験や計算によりプロトタイプの最適化や材料選択を進めながら製品やサービス開発を進めることとなる。

2.2 バイオミメティクスの活用事例

バイオミメティクスを活用する際に礎となる生物の観察や分析に関しては、生体内での化学反応としての生化学分野、生物が有する階層構造と発現される機能の関係としての材料分野に加え、生物の個体行動や群行動からも知見を獲得する事例が出ている。こうした知見は、ISO18457:2016において八つのカテゴリーに分類されている(表1)。また、得られた知見の適用先は①消費者向け製品、②企業向け製品、③システムの三つの領域に及んでいる。従来から適用が進んでいるのは①消費者向け製品の領域であるが、最近では②企業向け製品や③システムに適用するケースも見られるようになった(表2)。

消費者向け製品に対する有名な事例としては、ハスの葉表面を模倣した「超撥水性のヨーグルトの

表1 生物の観察や分析で得られる知見のキーワード

カテゴリー	得られる知見のキーワード
材料	反射防止、構造色、フォトニクス、ルミネッセンス、軽量構造、濡れ、力学特性、双安定ダイナミクス、ねじれ座屈、接着、流体力学、電気特性／絶縁体、発電、衝撃吸収、バイオテンプレート、管構造、表面張力、一方向性
プロセス	バイオミナラル、光合成、有機合成、加工、代謝、マイクロミスト、剥離、飛散
セルフX	自己組織化、自己治癒／修復、自己集合、自己洗浄、自生発刃
センサ	視覚／可視光、赤外光、特定波長、臭覚、触覚、メカレセプター、味覚、聴覚／超音波、低周波、磁気センサ、力学センサ
流体力学	浮力、揚力、推進力、流体抵抗
省エネルギー、省資源	摩擦制御、温度制御、湿度制御、循環性 (サステナビリティ) /リサイクル性、分解性
環境適応性	乾燥耐性、低温耐性、酸・アルカリ耐性、高温耐性、高温利用、耐紫外線
行動・生態	擬態／色、形、化学擬態、マニピュレーション、省エネルギー、衝突回避、花粉媒介者、社会性、天敵、集団で大きく見せることで防衛

出所: 参考文献3を基に三菱総合研究所作成

技術レポート

フタ(森永乳業)や、イルカの尾びれ・表皮を模倣した「効率的な洗浄を実現する洗濯機パルセータ(回転羽根)」「シャープ」などが挙げられる。洗濯機のパルセータでは、イルカの尾びれの形状(三日月翼形)をパルセータ裏面の羽根に適用した。また、右回転と左回転を交互に繰り返す回転リズムをイルカが尾びれを上下に蹴りだすリズム(ドルフィンキック)に合わせることで、回転方向のみならず上下方向にも水流が加わり、もみ洗いの効果を実現した。さらに、水の摩擦抵抗を低減するイルカ表皮のしわ模様をパルセータ表面に適用し、水流強化で増大するモータ負荷を中和させている。結果として、同じ洗浄力で比較した場合、消費電力を18%、水量を15%、洗剤量を50%削減することができた。

企業向け製品の事例としては、「タコの足を模倣した高吸着アームロボット」(関西大学)や、鮫肌を模倣した「圧縮効率のよい遠心圧縮機のディフューザ」(日立製作所)などが挙げられる。遠心圧縮機のディフューザでは、「リブレット」という溝構造のある鱗

をもつ鮫肌の形状をディフューザ静止翼の先端部表面に適用した。ディフューザ静止翼の先端部では流れの損失が大きいことが分かっていたが、流体の摩擦抵抗を低減させる鮫肌の形状を模倣することで、遠心圧縮機の圧縮効率を1.7%向上させた。

システムの事例としては、魚群の動きを模倣した「効率的な運送を実現する自動群走行技術」(日産自動車)や、アリ塚を模倣した「低コストで駆動するパッシブ型空調システム」(建築家Mick Pearce)などが挙げられる。パッシブ型空調システムとして、ジンバブエの複合商業施設「Eastgate Centre」ではアリ塚の放熱システムが適用されている。商業施設には熱容量の大きい建築資材が用いられており、蓄熱しても建物内部の温度が上がりにくい。また、建物内部には煙突構造があり、建物内部の温度が上昇した場合でも、密度の低い暖かな空気が自然に建物上部から排気されるようになっている。夕方になると、ファンを用いて建物下部から涼しい空気を送ることで、建物が蓄えた熱を放出させている。

表2 バイオミメティクスの活用事例

適用カテゴリ	製品/システム例	観察対象	対象生物が有する機能	製品/システムの機能・効果
消費者向け製品	ヨーグルトのフタ (森永乳業)	ハスの葉	ハスの葉表面には高さ5~15μmの突起物が20~30μm間隔で存在し、突起物表面はnmスケールのプラントワックス(低表面エネルギー物質)の微結晶で覆われている。こうしたnm~μmの階層性を有する凹凸構造(物理的効果)と分泌されるプラントワックス(化学的効果)の相乗効果により、超撥水性を示す	ヨーグルトがフタにつきにくい
	洗濯機のパルセータ (シャープ)	イルカの尾びれ・表皮	イルカは最大50km/hで遊泳するが、その速度を実現するために必要な筋力量の1/7しか保持していない。水流の垂直方向に入った表皮のしわが乱渦流を区切り、水の摩擦抵抗を低減させ、また三日月翼形の尾びれが一定のリズムで上下に運動(ドルフィンキック)することで、イルカは高速遠泳を実現している	同じ洗浄力で、消費電力を18%、水量を15%、洗剤量を50%削減した
企業向け製品	ロボットアーム (関西大学)	タコの足	タコの吸盤機構は外側の漏斗部と内側中心部の吸盤で構成されている。タコは漏斗部の筋肉を用いて対象物に張り付き、対象物と吸盤の間に密閉空間ができたところで、吸盤の筋肉を用いて吸盤内部の空間を広げ、負圧を発生させる。こうして外部との高い差圧を発生させ、高い吸着力を実現している	あらゆる形状の物体を把持する
	石油化学分野の遠心圧縮機のディフューザ (日立製作所)	鮫肌	鮫肌には「リブレット」という数10~100μm間隔の溝構造を持つ鱗がついている。鮫肌のリブレットは空間を区切る役目を果たしており、乱流中の乱れた領域や渦構造が互いにぶつからないようにすることで、水から受ける抵抗を抑えている	従来のディフューザと比べて圧縮効率が1.7%向上した(開発目標は1%)
システム	自動群走行技術 (日産自動車)	魚群の動き	魚は、体の側面にある「側線」から感知する水圧・水流の変化の感覚情報と、視覚から得られる広い視野情報を併せることで、群として密集した状態でもぶつかることなく泳ぐことができる	隣接個体とはぶつからないように、並走個体とは距離を保つように、遠くの個体とは離れすぎないように接近する
	パッシブ型空調システム (建築家 Mick Pearce)	アリ塚	シロアリが作るアリ塚は微細な土粒で構築されており、隙間があるため通気性に優れる。そよ風が吹くと、内部に風を取り込むことができる。また、アリ塚の土壁は熱容量が大きく、昼間は蓄熱するが内部の気温は上昇しにくい。さらに、塚は煙突構造を有しているため、内部の温度が上昇すると熱が外部に排出されるようになっている	ジンバブエにある複合商業施設では、同規模の建物が必要とする冷房コストの10%で済む

出所:参考文献5~12を基に三菱総合研究所作成

技術レポート

3. バイオミメティクスを活用する際に注意すべきこと

バイオミメティクスの歴史は古い。1940年代には、植物の種が動物の毛に付着することを模倣した面状ファスナー（マジックテープ）が製品化されている。こうしたバイオミメティクスを活用した製品開発は、走査型電子顕微鏡の普及により一気に進展した。走査型電子顕微鏡により、生物体の表面に形成されたサブセルラー・サイズ構造（細胞内部や表面に形成される数百nm～数 μ mの構造）の観察が可能となったのである。こうした観察を通じて、生物固有の機能を発現させる特徴的な表面構造が発見され、新製品や新材料を開発するヒントを得ることができるようになった。一方で、一般的な走査型電子顕微鏡では対象物を「静的」にしか観察できない点は留意すべきだ。

例えば、ハスの葉を模倣した超撥水表面は、低湿条件下（60%RH以下）では優れた難着氷性を示す。しかし、高湿条件下では凹凸構造に氷や霜が生じやすくなるため、難着氷性が損なわれるにとどまらず、着氷力が著しく増加する。さらに、摩耗などにより微細構造が崩壊し、また表面を被覆している低表

面エネルギー物質の剥離が生じた場合でも機能は失われ、自動的に機能が回復することはない。

温度、湿度、光、生物量などの周辺環境が変わらない密閉空間や人の手が触れない特殊環境下で使用される製品であれば、生物を静的に捉えても特段の問題はない。しかし通常は、周辺環境が変化し、そして人の手が触れる中で製品は使用される。実際の製品開発では、多様な環境下で機能を発現させるための工夫が求められるのである。

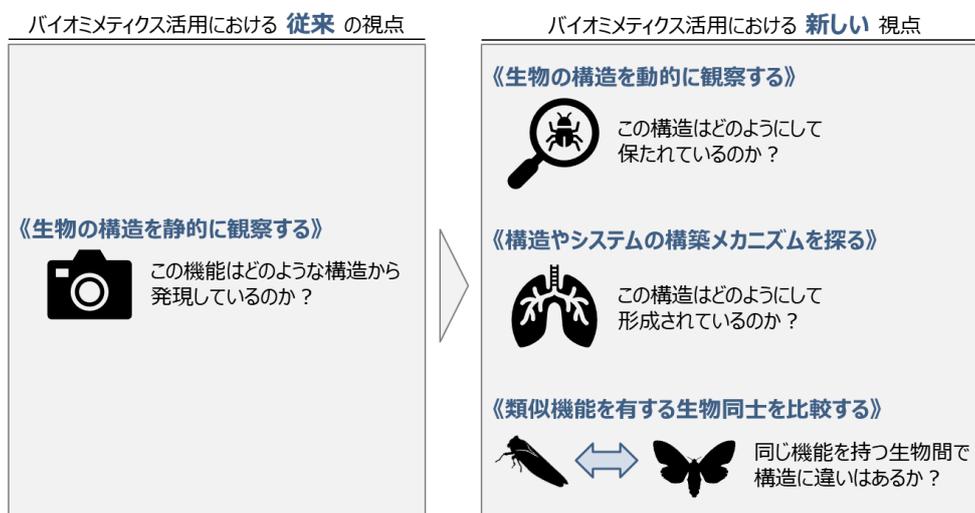
4. バイオミメティクスを最大限に活用するための三つのポイント

バイオミメティクスを活用する際に最大限の知見を得るためには、生物を「動的」に観察することに加え、その機能を備える構造やシステムがどのように構築されているかを探り、さらには類似機能を有する複数の生物を比較することがポイントとなる（図2）。

4.1 生物を「動的に」観察する

時間の流れに沿って生物を動的に観察することが肝要である。工業製品は自動的に修復されることはないため、人間が定期的に検査する必要がある。しかし、生物は損傷を受けると自己修復する仕組み

図2 バイオミメティクス活用における従来の視点と新しい視点



技術レポート

を持っている。ハスの葉の場合は、新陳代謝により常にプラントワックスを分泌することで損傷を自己修復し、超撥水性を回復・持続させている。

生物が有する「ロバスト性(頑健性)を発現する仕組み」は製品開発に役立つはずだ。実用化には至っていないが、一つの事例として、ヤドグガエル表皮の毒放出メカニズムから着想を得た難着氷性表面がある。この難着氷性材料は表皮の2層構造、すなわちヤドグガエル外皮組織を模倣した超撥水性の表面層と、同じく真皮組織を模倣した不凍液を含む超親水性液溜め層で構成されている。この2層構造により、高温条件下で凹凸構造に氷などが付着すると、液溜め層から不凍液が染み出し、付着した氷を融解できる。また、染み出した不凍液は液溜め層に再吸収される。

4.2 構造やシステムの構築メカニズムを探る

構造やシステムの構築メカニズムを解き明かすことも有効なアプローチである。例えば、東京大学の界面輸送工学研究室では、生体内の血管内皮細胞の振る舞いを数理モデル化し、設計アルゴリズムを構築することにより、さまざまな熱流体デバイスの形状最適化を試みている。生体内で血管網を形成する際の第一段階では、組織内に血液を行き渡らせるために血管網がランダムに形成される。その後、血管を構成する血管内皮細胞が重要な血管と重要でない血管を識別し、重要な場合は太く安定化、不要な場合は退縮・消滅することで、階層的・秩序的な血管網パターンが構築される。血管内皮細胞が血管の重要性を見分ける仕組みを解明できれば、流動抵抗を抑えつつ、高い熱・物質輸送特性を示す血管網パターンを模倣して、最適な熱流体デバイスを構築することができる可能性がある。

4.3 類似機能を有する生物同士を比較する

特定の生物に着目するのではなく、複数の生物を比較することで得られる知見もある。蛾の眼の表面には数100nmの微細な突起物(ナノパイル)の集合体が存在し、この構造はモスアイ構造と呼ばれている。個々のナノパイルは釣り鐘状の形状をしているため、ナノパイルの断面積は上から下に向かって緩やかに連続して増加する。断面積が大きくなると、屈折率が高くなる。光は屈折率の変化が大きい界面で反射するが、モスアイ構造では屈折率が連続的に変化するため、全ての光が反射されずに眼の中に入っていく。この特性を活用した製品が反射防止フィルムである。

こうしたナノパイル構造は蛾の眼のみならず、蟬の羽でも観察される。いずれの生物でもナノパイル構造の一部で配列に乱れが生じているが、一例を以下に示す。オオタバコガの眼とクマゼミの翅のナノパイル構造を比較すると、クマゼミの翅の方が配列に乱れが多いことで知られている。しかし、クマゼミの翅(はね)の光散乱強度を測定すると、オオタバコガの眼と比して遜色がないほど小さい。事実、クマゼミの翅は透明に見える。すなわち、ナノパイル構造の配列に乱れがあっても反射防止機能を示すのである。こうした知見は、反射防止フィルムの製造ロスを低減させるために大いに役立つだろう。

5. 工学から生物学への橋渡しに向けて

ここまで紹介してきたのは、「生物から着想を得た工学プロセスによるものづくり」の文脈に沿ったバイオミメティクスの活用方法や活用事例であった。今日ではこのアプローチを一段階発展させ、「生物によるものづくり」の高効率化に向けて工学の知見を生物学に導入する試みも見られるようになった。

例えば、東京大学の先端科学技術研究センターと森林化学研究室では、交通分野で培ったシミュレ

技術レポート

ーション技術をバイオエタノールの製造に活用している。バイオエタノールの製造方法は、セルロースをセルラーゼ(セルロース分解酵素)で分解する方法が主流となっているが、分解効率性の低さが課題であった。高速原子間力顕微鏡観察を用いた従来の研究では、セルラーゼがセルロース表面で渋滞を起こすためにセルロースの分解速度が低下することが分かっていた。そこで、交通シミュレーション技術を用いてセルラーゼが起こす渋滞現象を再現したところ、セルラーゼのセルロース結合性ドメインを大きくするとセルロースの分解速度が向上することが明らかになった。バイオエタノールの高効率製造に向けた大きな一歩である。

6. バイオミメティクス起点での炭素循環型社会の実現に向けて

本コラム・レポートで紹介した方法は、製品／サービスに求める機能が明確であり、その機能を具体的な構造などに落とし込む場合に大きな効力を発揮する。シャープでは、バイオミメティクスの活用により製品の試作が1回で済むなど、開発期間の短縮が報告されている。また、従来のバイオミメティクスでは生物の構造を「静的に」観察するケースが多かったが、①生物の構造を「動的に」観察する、②構造やシステムの構築メカニズムを探る、③類似機能をもつ生物同士を比較するという三つのアプローチを加えることで、さらに活用の幅が広がるだろう。

バイオミメティクスが与える影響は「生物から着想を得た工学プロセスによるものづくり」の範囲にとどまらない。バイオエタノールの事例では、工学で得られた知見を生物学に導入することで、生物を用いた環境に優しいものづくりの高効率化を前進させた。バイオミメティクスの活用によって生物学の知見が工学で活かされ、さらには工学で培われた知見が生物学に導入されるサイクルが構築できれば、持続

可能な炭素循環型社会の実現に向けて大きな一歩を踏み出せるのではないだろうか。

7. 参考文献

- 1) 株式会社東レ経営研究所「バイオミメティクスの新展開」(閲覧日:2019.6.3)
[https://cs2.toray.co.jp/news/tbr/newsrrs01.nsf/0/07CE51B66F0C37AD492583530014F162/\\$FILE/sen_177_01.pdf](https://cs2.toray.co.jp/news/tbr/newsrrs01.nsf/0/07CE51B66F0C37AD492583530014F162/$FILE/sen_177_01.pdf)
- 2) 経済産業省「我が国ものづくり産業が直面する課題と展望」(閲覧日:2019.6.3)
https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2016/honbun_pdf/pdf/honbun01_03_02.pdf
- 3) ISO 18457:2016 “Biomimetics -- Biomimetic materials, structures and components”
- 4) 公益財団法人精密工学会「バイオミメティクス製品の開発プロセス」(閲覧日:2019.6.3)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/81/5/81_389/_pdf
- 5) 萩原良道監修『生物の優れた機能から着想を得た新しいものづくり』シーエムシー出版(2018年11月)
- 6) 『バイオミメティクスの技術展望と産業動向』シーエムシー出版(2016年6月)
- 7) 森永乳業株式会社「4ポット史上初!ヨーグルトが付着しにくいフタ」(閲覧日:2019.6.3)
<http://bifidus.jp/products/cover.html>
- 8) シャープ株式会社「タテ型洗濯乾燥機」(閲覧日:2019.6.3)
<https://jp.sharp/nature/tec/tate-sen/>
- 9) 環境省「環境ビジネス企業の取組」(閲覧日:2019.6.3)
https://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/B_i ndustry/frontrunner/reports/h29engine_chapter4-1.pdf

技術レポート

- 10) 関西大学 ロボット・マイクロシステム研究室
「汎用性の高いロボットハンド」(閲覧日:
2019.6.3)
http://www2.ipcku.kansai-u.ac.jp/~t100051/r_gripper_j.html
- 11) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術
開発機構 「平成27年度成果報告書 革新的
新構造材料等研究開発 電子・材料・ナノテク
ノロジー部実施事業の周辺技術・関連課題に
おける小規模研究開発の実施 バイオミメティ
クスによる流体制御に関する研究開発」
- 12) BIOMIMICRY INSTITUTE “Eastgate Centre”
(閲覧日:2019.6.3)
<https://asknature.org/idea/eastgate-centre/#.XKMe8pj7SUK>
- 13) K. Igarashi *et al.* “Traffic Jams Reduce
Hydrolytic Efficiency of Cellulase on Cellulose
Surface”(閲覧日:2019.6.3)
<http://science.sciencemag.org/content/333/6047/1279>
- 14) 東京大学 「分子を大きくして渋滞解消: 3億個
の分子を動かしてセルロースの酵素分解メカ
ニズムを解明」(閲覧日:2019.6.3)
https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20190307-1.html