

自然に学ぶものづくり

棚橋 一郎

大阪工業大学 工学部 応用化学科
連絡先 ichiro.tanahashi@oit.ac.jp

1. はじめに

新規な工業製品の開発、あるいは研究を新しく始めるとき、自然界に存在する生物の構造や機能を調べ、そこからヒントを得ると高性能な製品や独創的な研究成果に結びつくことがある。今世紀に入り欧米各国で、このような「自然に学ぶものづくり」、「自然に学ぶデザイン」あるいは「自然の形に学ぶ設計思想」等と呼ばれる手法の研究開発が盛んに行われるようになってきた。

自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス：biomimetics）による研究開発は、人間と自然とを一体化して捉える東洋的な思想をもつ我々には違和感なく受け入れられると思われる。一方、人間が自然を支配しコントロールするという西洋的な思想をもつ人々には斬新な手法に映るのかも知れない。

ここでは、自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス）の研究対象や応用分野などの概要について述べ、バイオミメティクスにより開発されてきた工業製品の中から興味深い事例について紹介する。

2. 自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス）の概要

自然に学ぶものづくり（以下バイオミメティクスと記載）に明確な定義はないが、バイオミメティクスとは、前述したように生物の構造や機能から何らかのヒントを得て人工物や製品に応用する技術のことである。¹⁾ 一方、バイオテクノロジーも定義が曖昧であるが、古くは発酵、醸造に始まり、近年では遺伝子組み換えや細胞融合等の生物をそのままあるいはその一部を利用した技術である。²⁾ バイオテクノロジーは、主に、医薬品や食糧品あるいは環境の浄化等の分野に応用されている。

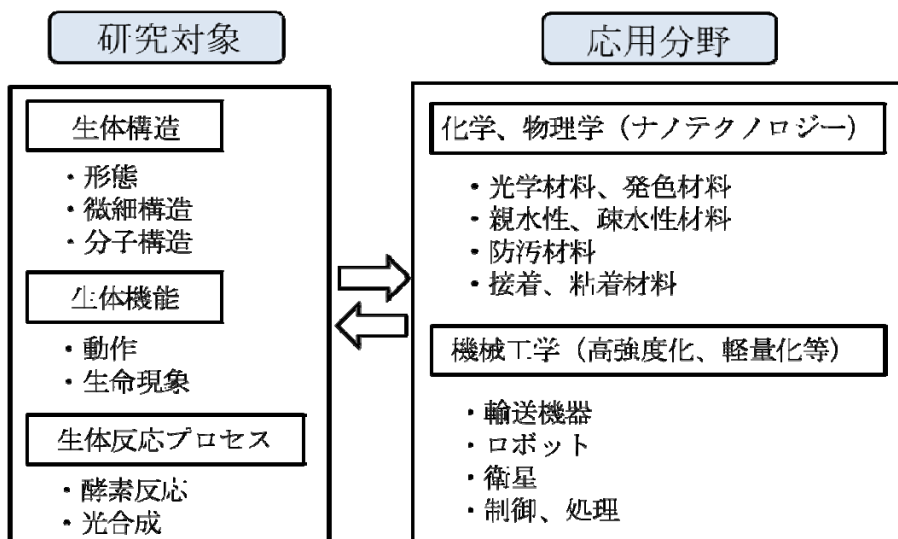


図1 自然に学ぶものづくり(バイオミメティクス)の概要

図1に、自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス）の概要を示す。研究対象は、①生物（生体）の構造、②機能あるいは③反応プロセスに大きく分類され、構造に関する製品や応用例が最も多いと考えられる。反応プロセスには、バイ

オミネラリゼーション（生物が真珠、貝殻、歯などの無機鉱物を作る作用）などが含まれる。バイオミメティクスの応用分野は、ナノテクノロジーと密接に関連した材料および電車や飛行機等の輸送機器あるいはロボットの形状やメカニズム等幅広い。

3. 自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス）の応用事例

3-1. 昆虫の翅の折り畳み方に学んだ人工衛星のパネル

バイオミメティクスにおいて、研究対象を昆虫に限定した分野をインセクトテクノロジー（昆虫技術）と言う。昆虫は、地球上で極めて繁栄している生物であり、100万種以上存在している。今日でも多くの新種が発見され、未知の種を加えると種数は、200万～300万種と言われている。ちなみに人類を含む哺乳類の種数は昆虫と比べると桁違いに少なく約6000種であり、絶滅に瀕している種も多く存在している。

昆虫の中で、カブトムシやクワガタムシのような硬い翅をもつ仲間は甲虫目（鞘翅目）に分類されている。カブトムシの前翅（鞘翅）はキチン質で硬く、その下にある小さく巧みに折り畳まれた後翅と腹部を外敵や環境から守っている。甲虫が飛ぶとき、前翅は開くだけかあるいは閉じたままでほとんど動かさず、後翅を大きく広げてはばたく。このような甲虫の巧みな後翅の折り畳み方が、人工衛星のアンテナや太陽電池パネルに応用されている。人工衛星のパネルは、打ち上げ時にできるだけコンパクトな状態で、そして宇宙空間ではできるだけ大きく展開するように工夫されている。³⁾

このような翅の折り畳み方が一般に「ミウラ折り」と言われるもので、甲虫の翅と同じメカニズムで人工衛星のパネルが開閉されている。最近では、NASAがミウラ折りを始めとする「折り紙」に注目し、宇宙空間での建造物への応用を目指し精力的に研究を行っている。ミウラ折りの特長は、コンパクトに折り畳めるだけでなく、展開した状態で機械的な強度に優れていることである。

ここでミウラ折りとは、1970年に東京大学宇宙航空研究所の三浦公亮氏が考案した紙等の折り畳み方のことであり、身近な例では地図の畳み方に使われている。³⁾ 紙の対角線部分を押したり引いたりするだけで簡単に展開や収納ができる構造になっている。なお、このような折り畳み方を折り紙の学会である **British Origami Society** がミウラ折り（miura-ori）と名付けたそうである。

甲虫の翅の折り畳み構造はさらに奥深く、2014年に新しい発見があった。甲虫の中で前翅が非常に小さく、後翅は前翅の下に極めて小さく巧みに折り畳まれており、腹部の大半がむき出し状態の少しグロテスクな体長1mm～数cmほどの「ハネカクシ」という仲間がいる。ハネカクシには、一見すると翅が無いように見えるが、実際には機能的な後翅で飛ぶことができる。2014年11月に、東京大学と九州大学が共同で、これまで謎であったハネカクシの後翅の折り畳みのメカニズムが明らかにされた。⁴⁾

両大学の共同研究には、ハネカクシの中でも良く飛ぶオオアバタウミベハネカクシ(体長6mm)を用い、翅の折り畳みと展開を1秒あたり500コマのハイスピードカメラで撮影し解析した。その結果、カブトムシ等の甲虫では、左右の翅をそれぞれ折り畳んでから重ねるが、ハネカクシは、左右の翅を最初に重ねたのち2枚同時に折り畳み、腹部をくねらして前翅の下に後翅を折り込み収納することが分かった。折り畳みは、左右どちらからでもできるそうである。ハネカクシは、複雑な折り畳み機構を持つにもかかわらず後翅を一瞬で展開し、毎秒20～100回もの羽ばたきに耐える強度がある。このようなハネカクシの翅の畳み込み方の研究は、宇宙空間での太陽電池パネルをはじめ雨傘や扇子等の日用品に至るまで幅広い分野での応用が期待されている。⁴⁾

3-2. 昆虫の目の構造と翅の構造色に学んだ反射防止フィルムと発色材料

蝶や蛾は、体表が鱗粉や毛で覆われることから鱗翅目に分類される昆虫である。（スカシバのように鱗

粉がない、あるいはオオミノガの雌のように翅や足のない例外的な種もいる。) 分類学的には、蝶と蛾の区別はなく、蛾の種類数が蝶の 20~30 倍も多いので蛾の一部の仲間が蝶であるとも言える。一般的に、蝶は昼行性で、蛾は夜行性の種が多い。蛾は、暗い夜間に飛行する複眼からなる眼を独自に発達させている。蛾の複眼は、蝶と同様に六角形の小さな個眼が多数集まり構成されているが、両者にはその表面構造に違いがある。蛾の複眼の表面には、300 ナノメートル程度の、ナノピラーが並んでいる凹凸構造をもち、この構造は「モスアイ構造」と呼ばれている。⁵⁾ このようなナノピラーは基部に近づくにつれて少しずつ太くなっているため、空気と複眼との屈折率変化の境界が不鮮明になり、取り込んだ光の反射率を小さくできる。蛾の複眼は、光を反射させないことで外敵に見つかり難く、光を効率よく取り込むことで夜のわずかな光を感じ飛ぶことができる。

蛾の複眼のモスアイ構造を模倣して、三菱レイヨン株式会社と財団法人神奈川科学技術アカデミーが、映り込みの少ない「反射防止フィルム」を開発し、液晶テレビや携帯電話のディスプレイ等に応用されている。⁶⁾

モルフォチョウの翅の鱗粉とタマムシの翅の外皮の表面には、それぞれナノメートルオーダーの棚状の構造や極めて薄い層が重なった構造がある。このような構造に基づく発色を「構造色」という。以前に NCF 研究会において、大阪大学の木下修一氏からモルフォチョウの青い輝きのメカニズムが鱗粉の構造にあることを講演して頂いた。⁷⁾ モルフォチョウの翅は、翅に含まれる色素と構造色が組み合わされて発色し、複雑な模様を描き出している。構造色は、見る角度により色に変化して輝く翅をもつ昆虫、クジャクの羽あるいは CD の虹色の輝きなど身近な様々なところで見られ、構造が崩れない限り、いつまでも色あせることのない優れた発色材料である。

昆虫の構造色の発色機構を応用して、独特の色彩をもつモルフォテックスという繊維が帝人から、⁸⁾ また、着色したステンレスのスプーンが東京農業大学で開発されている。⁹⁾

3-3. ヤモリの足の構造に学んだ接着テープ

垂直な壁や天井を逆さまに自由に動けるヤモリの足の仕組みが解明されている。ヤモリの足の指先には、細かな毛が 1 平方メートル当たり 10 万~100 万本の密度で密生し、さらにその先端が 100~1000 本に分岐していることから、先端部の毛の密度は 10 億本にもなることが分かった。この細かな毛の 1 本 1 本が、対象物に極めて近い距離まで接近できるため、従来の接着原理とは異なるファンデルワールス力によって壁や天井に接着できる。¹⁰⁾

ヤモリの指先にある構造を応用し、日東電工株式会社が開発した「ヤモリテープ」は、直径数ナノ~数十ナノメートルのカーボンナノチューブを 1 平方センチメートル当たり 100 億本の密度で並べたものである。¹¹⁾ このテープは、およそ 1 平方センチメートルの面積で 500 グラムを保持でき、実用的な接着テープと遜色なく、めくれば簡単に剥離できる。従来の粘着テープのように粘着剤が残ることもなく、何度も繰り返し使用できる画期的な商品になっている。現在、高価なカーボンナノチューブを材料に用いているため、利用分野は分析試料の固定用テープに限られている。今後、量産技術が進み、低コスト化を図り一般販売を目指している。

3-4. カタツムリやアワビの殻の構造に学んだセラミックス

カタツムリは、デンデンムシとも呼ばれ、乾燥に弱い種が多いため湿度の高いところに生息している。また、貝殻の材料となるカルシウムが必要なため、石灰岩地を好んで生活している。じめじめした場所を好み、カビやコケが生えやすい環境にいるにもかかわらず、カタツムリの殻は綺麗に保たれている。このよ

うな疑問を解き明かすことにより、新機能を持った商品が開発されている。カタツムリの石灰質でできた殻の表面は、キチン質からなる殻皮と呼ばれる薄膜で覆われている。殻皮は貝類の多くの種にあり、石灰質の殻を腐食から保護している。カタツムリでは、保護の役割に加え防汚や彩色による保護色の役目を持っていると言われている。¹²⁾

殻皮の表面には、数百ナノメートル単位の細かな溝が存在し、溝には常に水が貯まり、接触面積を小さくするとともに油等を弾き、付着したゴミや汚れ等を雨で洗い落とす効果があるためカタツムリの殻はいつも清潔に保たれている。この技術は、常に清潔なトイレ、シンクあるいは外壁タイルのセラミック素材の防汚技術に応用され、株式会社 INAX (LIXIL) の商品として販売されている。¹³⁾

カタツムリと同じ貝類であるアワビの殻にも特別な構造と機能が備わっている。アワビの貝殻は、軽くて硬く、金槌で叩いてもなかなか割れない。これは貝殻の内側にある真珠色の構造色（干渉色）を示す部分の構造に起因している。殻の内側は、厚さ1マイクロメートル以下の薄いセラミックス（炭酸カルシウムの結晶）の板を軟らかく伸び易い接着剤（コンキオリンと総称されるタンパク質を主とする細胞間基質）で貼り合わせた積層構造からなる。貝殻1ミリメートルの厚みの中に1000枚以上のセラミックス板が積層されている。外部から強い衝撃が加わり、貝殻表面にクラックが入っても軟らかく伸び易い間基質でクラックが止まり、セラミックス薄板が1枚1枚少しずつ壊れるので全体はなかなか壊れなくなっている。

¹⁴⁾

アワビのセラミックス薄膜とタンパク質間基質の積層構造を模倣して軽くて丈夫でしかも錆びない材料の発が進められている。このような材料が実現すれば、自動車やロケットから人工骨等の医療分野にまで広く応用できる。また、アワビのように室温でセラミックスの合成ができるバイオミネラリゼーションにより、無焼結でのセラミックス合成に関する研究も進められている。

3-5. フクロウの羽、カワセミのくちばし、トンボの翅に学んだ構造物

フクロウは、鳥類の中では珍しく夜行性で、大きな羽音を立てずに獲物をハンティングできる。獲物に静かに近づくことができるのは、羽根の先端の構造にある。フクロウの風切羽には他の鳥にはないセレーションと呼ばれるギザギザの構造があり、この構造が空気を効率よく逃がして空気抵抗を少なくしている。

このようなフクロウの羽の構造を JR 西日本の新幹線開発チームが時速 300 km を超える新幹線の開発中にパンタグラフから出る大きな騒音の解消に役立てた。パンタグラフの側面に突起を形成したところ小さな渦が生じ、空気抵抗の減少に成功し、それまでの騒音を 30% もカットすることができた。¹⁵⁾

また、カワセミが、高速で水中に飛び込み魚を獲るとき、非常に大きな抵抗があるにもかかわらず、水しぶきが極めて少ない。このようなカワセミのクチバシの鋭い形により水の抵抗を少なくできることから、新幹線の走行時の空気抵抗を減らす研究が始まった。500系新幹線の先頭車両には、カワセミのくちばしの形状が応用されている。新幹線が高速でトンネルに入ると、空気の圧縮波が生じて出口付近で一部放出されるトンネル微気圧波により非常に大きな音が発生する。新幹線の先頭車両の形状をカワセミのクチバシの形状にすると、空気抵抗を減らせることがスーパーコンピューターによる解析と実験により確かめられた。500系新幹線車体は断面を円形にしたこともあり、走行時の抵抗が30%減り、トンネル出口での騒音を小さくでき、消費電力も15%減らせるという大きな成果を得た。¹⁵⁾

最後に、トンボの翅の形状に学んだ小型風力発電機の開発について紹介する。風力発電は、再生可能エネルギーのひとつとして期待が高まっている。しかし、強風では風車が耐えられず破損したり、微風では回らず発電できなかつたりするという問題がある。そこで着目されたのは、強風でも無風状態でも飛べるトンボの飛翔であり、その秘密は翅の構造にあった。トンボの翅は、一見すると平坦に見えるが、その断

面は曲がった凹凸形状で、そこに小さな渦ができることにより揚力が発生している。この構造を風車に応用したところ、強風でも風速 20 cm/秒という微風でも回る風車ができる。今後、小型で安全、軽量で安価な小型風力発電機である「トンボ風車」が各家庭の軒先で回る日も遠くないかも知れない。¹⁵⁾

4. まとめ

自然に学ぶものづくり（バイオミメティクス：biomimetics）の概要とバイオミメティクスにより開発された工業製品について紹介した。生物（生体）の基本原理が発見、解明されるとバイオミメティクスにより比較的短時間で工学的に応用する研究が進むようである。何億年もの進化の結果、現在も繁栄し続けている生物の構造や機能を模範にして材料や装置を開発することは意義深く、今後、生物学（博物学）と工学の融合が益々重要になる。バイオミメティクスによる環境に優しいものづくりが発展することを期待したい。

5. 参考文献

- 1) 下村政嗣, *Science & Technology Trends*, 9-28, 2010.
- 2) 相田 浩編著, *バイオテクノロジー概論*, 建帛社, 1995.
- 3) K. Miura, *ISAS report*, **34**, 9, 141-163 1969.
- 4) K. Saito, S. Yamamoto, M. Maruyama and Y. Okabe, *米国科学アカデミー紀要*, 電子版 (2014 年 11 月 3 日).
- 5) P. B. Clapham and M. C. Hutley, *Nature*, **244**, 281-282, 1973.
- 6) 三菱レイヨン株式会社ホームページ, <https://www.mrc.co.jp/rd/research/result.html>.
- 7) S. Kinoshita, S. Yoshioka *et al*, *Structural Colors in Biological Systems -Principles and Applications-*, Osaka University Press, 2005.
- 8) 帝人株式会社技術資料, www.teijin.co.jp/recruit/career/rd/pdf/teijin_lab03.pdf.
- 9) 東京農業大学, *新・実学ジャーナル*, **115**, 11, 2014.
- 10) J. Lee, B. Bush, R. Maboudian and R. S. Fearing, *Langmuir*, **25**, 21, 12449-12453, 2009.
- 11) 前野洋平, *日東電工技報*, **47**, 48-51, 2009.
- 12) 石田秀輝, *自然に学ぶ粋なテクノロジー*, DOJIN 選書, 2009.
- 13) 株式会社 LIXIL ホームページ, <http://inax.lixil.co.jp/inax/story/technology/nano.html>.
- 14) C. M. Zaremba, *et al*, *Chem. Mater.*, **8**, 679, 1996.
- 15) 日本自然保護協会 (NACS-J), *しぜんもん*, 2014, http://nacsj.net/magazine/post_138.html.