

予習資料

北海道大学 全学教育科目・分野別科目

『科学・技術の世界』はじめての生命科学

2020 年度版

講義テーマ：生命を模倣する

「バイオミミクリーとバイオデザイン」

<https://life.sci.hokudai.ac.jp/mf/course-counseling-and-explanation-session>

担当 出村誠

理学部生物科学科（高分子機能学） /

大学院生命科学院ソフトマター専攻

demura@sci.hokudai.ac.jp

図表：ここでは低解像度を使っています。授業で詳細・出典を紹介します。

授業の疑問・質問はミニレポートに記入してください。

授業終了後回答を用意します。

反転学習（予習）のポイント

予習資料を参考にし、「10 年後の夢の生物模倣」について自分の発想でいくつか描いてみよう。

プロローグ 生命とは何か?

生命誕生 38 億年の旅

太陽系に地球ができて 46 億年。原始生命体が誕生して 38 億年。生物界は進化を繰り返し、今では動物だけでも 100 万種以上地球に繁栄している。生物は世代を超え、とてつもなく長い時間をかけて、地球環境変動に適応しながら多種多様な生物界の共存(多様性)を持続してきた。そして新人類が誕生したのは 20 万年前。地球誕生から現在を 1 年にたとえると、新人類はたった 23 分前に誕生したことになる。そしてほんの 2 秒前から始まった産業革命は現代文明の大きな進歩をもたらした。1 秒前に始まった 20 世紀は終わり、私たちは 21 世紀を生きている。ほんの“数秒前”から

始まった人口急増は、人類史上経験のない地球環境変動に向き合うことになるのはまちがいない。

私たちは後世のためによりよい未来社会を創れるだろうか。「今できることから未来を考える」という過去の知識の積み重ねの発想だけでよいだろうか。21 世紀の未来を見据えて「どのように変わっていくべきなのか解決すべき課題を先に考え、そのビジョンやアイデアを生み出す」逆転発想でイノベーションを生み出すことも求められている。「生命とは何か」という命題は「私たちの地球生命社会をどのように築くのか」という未来志向の広がりをもつ。

生命の研究は遺伝子・タンパク質から AI まで広がってきた

生命体の最小単位は細胞である。動物や植物は多数の細胞が集合して個体をつくる。また 1 つの細胞で生命体を作る微生物もいる。大腸菌の分裂増殖時間(一生)は 20 分程度であるがヒトの寿命は 80 年以上。寿命の長さや種類にかかわらず、分子の大きさで細胞を観察すると、地球上のどの生き物にも遺伝子からタンパク質をつくるという普遍性(セントラルドグマ)がある。遺伝子は DNA 分子でできており、生き物が進化の過程で獲得してきたタンパク分子の設計図が刻まれている。生き物はそれぞれ独自の遺伝子をもっており、その設計図どおりに必要なタンパク質をつくることで個体の形質(特徴)を作り出せる。

一方、親から子へ遺伝子は受け継がれるが、一生の間に使われない設計図もある。それでも次世代の遺伝子へは、すべての設計図がきちんと受け継がれる。セントラルドグマという生命体の分子レベルの普遍性が生き物の無数の多様性と個性を引き出しているのだ。ヒトは 60 兆個の細胞集団が連絡をとりあい、協調し

て生命・健康の恒常性を支えている(37 兆個説もある, Ann.Hum.Biol., 2013;40(6):463-471)。ヒト 1 個体のすべての細胞は、1 つ 1 つ同じ遺伝子(ヒトの基本設計図は 2 万種以上)をもっている。受精、卵割、臓器、骨、神経、血管の形成など、細胞の集団は、分化・成長にあわせて必要なタンパク質を作り分ける。細胞集団が必要なタンパク分子をつくれなくなったり、異常な合成を繰り返すと健康状態が悪くなる。最近では遺伝子の基本設計図がどのようににはたらき、どのように組み合わせれば細胞機能を変えられるかという生命科学の基礎研究がずいぶん進歩してきた。もっとも進んだ研究の 1 つが iPS 細胞の研究だ。

生命(生命科学)という概念は今も変化し広がり続けている。人類の生命科学の知識の積み重ねによる新発見だけでなく、人工物質や人工知能(AI)など物質科学・情報科学の分野からも生命機能に着想した逆転の発想・発明に広がってきている。

未来につながる生命科学：生命を知る・支える・模倣するイノベーション

自然科学は物質科学と生命科学(ライフサイエンス)から成り立っている。21 世紀は生命科学の時代といわれるほど世界的に研究開発が進み、関連分野の学問や技術開発も盛んである。医療・健康だけが生命科学の対象ではない。高機能材料開発、環境問題、社会・経

済活動など幅広い。国連では、2030 年までに持続可能な開発目標(SDGs)を掲げ、17 の目標に向かって全ての人間が優れた知恵を出し合い、より良い未来社会を創る活動が盛んになってきた。その時代の基礎科学を総動員し、新しい科学技術を使って、生命のしくみ

やそれを支える物質のはたらきを少しずつ解き明かしてきた。人間の経験や知識を社会の歴史や自然科学の学問として後世へ受け継ぐことで、人類は世代を越えた新しい発見と課題の解決を続けていくことができる。

ライフサイエンスのイノベーションは境界・融合領域にある。「生命とは何か」。それは未来につながる生命科学：生命を知る・支える・模倣するイノベーションを創造することでもある。

高校理科の基礎知識を広い視野でとらえ、新しい融合科学領域の課題解決につなげよう

高校では大学受験科目としてそれぞれの理科を科目別に基礎知識を順序立てて学ぶが、自然科学として理科はつながっている。高校理科の科目に、生き物のしくみや生命科学研究のつながりや関連事例を当てはめると（下表）、生物の科目の中だけでは解決できない課題が多い。大学では文系・理系の学部学科別のさまざまな「基礎知識・専門分野」をもつ学生が集まり、学部や分野を越えた課題解決型学習(PBL)・協同学習などアクティブラーニングによるプログラムがある。大学では社会生活につながる基礎知識・生涯学習として

理科を改めて広い視野でとらえ直すことも必要である。

産業や国民生活にかかわる「日本の学術分野」として、生命科学は、人文・社会科学、理学・工学とともに、中心的な学術分野として位置づけられている。大学の専攻や企業の研究所でも生命科学という分野がよく使われている。また、人文・社会科学や理学・工学分野の中にも生命科学と交わる融合領域がある。学術分野は一定ではなく時代とともに新しい学問分野が誕生してきた。生命科学は新しい融合科学分野の1つで、今でもダイナミックな拡張・発展を続けている。

高校理科（物理基礎・化学基礎・生物基礎）と生命科学とのつながり

科目	大分類	生き物のしくみや生命科学研究手法との関連事例
物理基礎	物体の運動とエネルギー	顕微鏡の開発、細胞運動、骨の強さの表し方、鳥の飛行、二足歩行、微生物の鞭毛運動、心臓の鼓動計測・診断、DNA損傷
	様々な物理現象とエネルギーの利用	蛍光、X線、分光、バイオコンピュータの開発、食物のカロリー、聴力、視力、神経電位、生体エネルギーと細胞膜電位
化学基礎	化学と人間生活	化学と人間生活とのかわり、高分子化合物、ソフトマター。自然界の薬効成分を化学合成
	物質の構成	生体物質の構成粒子、生体物質と化学結合、栄養、生命体を作る核酸、タンパク質、糖質、無機物、ゲル
	物質の変化	DNAやタンパク質を合成・構造解析、酵素機能や薬品の分析、食物の加熱変化・料理、
生物基礎	生物と遺伝子	遺伝子解析とコンピュータ利用、DNA合成・編集の利用、顕微鏡の利用、宇宙線と生命維持の関係、人工知能
	生物の体内環境の維持	免疫、癌、代謝反応の分析、タンパク質分子構造解析、生物の光反応
	生物の多様性と生態系	数理物理・統計学、生命倫理など 数学で昆虫擬態を解明

高等学校学習指導要領（平成24年度～）

日本の学術分野（日本学術会議・分野別委員会）

人文・社会科学	生命科学	理学・工学
言語・文学 哲学 心理学・教育学 社会学 史学 地域研究 法学 政治学 経済学 経営学	基礎生物学 統合生物学 農学 食料科学 基礎医学 臨床医学 健康・生活科学 歯学 薬学 環境学	数理科学 物理学 地球惑星科学 情報学 化学 総合工学 機械工学 電気電子工学 土木工学・建築学 材料工学

日本では、科学が文化国家の基礎であると確信し、30の学術分野の様々な問題（科学に関する重要事項を審議し、行政、産業及び国民生活にその実現を図ること、科学に関する研究の連絡を図り、その能率を向上させること）を日本学術会議・分野別委員会（国の特別の機関）で審議します（<http://www.scj.go.jp/ja/scj/index.html>）

『科学技術の世界』はじめての生命科学：生命を模倣する バイオミミクリーとバイオデザイン

図表：ここでは低解像度です。授業で詳細を紹介予定。
授業ミニレポート質問は、授業最終回「テーマディスカッション」までに回答予定。

概要 再生医療、食料生産、宇宙開発など科学技術はめざましく進歩した一方で、環境・エネルギー問題、**感染症対策**など人類は新たな課題を乗り越えなければならない。特定の科学や研究分野からのアプローチだけでは解決できない問題が数多くある。生物の「かたち」や「はたらき」をよく調べると、私たちの暮らしや産業に役立つ新しい発想が生まれる。この講義では複数の科学や学問を融合する目を養うことの大切さについて学ぶ。

キーワード：デザイン 生体高分子 バイオミミクリー

- 1 物質（無生物）と生物の境界をこえるイノベーション（学問の壁を越える）
 - 2 バイオミミクリーの背景
 - 3 バイオミミクリーの発想とデザイン思考
 - 4 いろいろな生体を模倣する
 - 5 シルクのバイオデザインとイノベーション
- おわりに：

1 物質（無生物）と生物の境界をこえるイノベーション（学問の壁を越える）

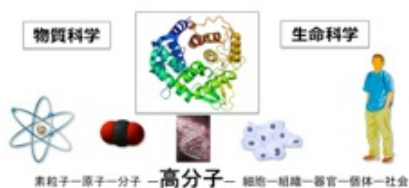
幼い頃、虫や自然が大好きで、「これ、なあに？」「どうしてうごくの？」と好奇心の旺盛な問いかけをしたそんな記憶があるのではないだろうか。自然科学を理解する学問として、学校では物理、化学、生物など理科の基礎知識を順序立てて学ぶ。小中高そして大学と進学するにつれ、子供の頃のような好奇心を発揮する機会が遠のいていないだろうか。自然に根ざした理科は「生涯学習にも通じるなぜ・なに」に応える知恵袋であり、未来社会に貢献するイノベーションをつくる原動力・ヒントにもなるはずだが、受験科目として文系理系と仕分けされたところから、理科は単なる受験科目の知識として受け止められがちである。柔軟な発想ができる若者が理科の知恵を出し合い、観察した

自然現象からいろいろな想像を膨らませ、革新的な発想へと結びつけて新たな課題の発見や解決法を導ける主体的な学習も期待できるはずである。

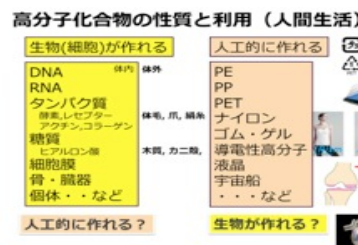
普遍的な理科の基礎知識はさらに、たくさんの専門分野ごとの重要な先端研究につながっている。では、今までに学んだ専門知識や技術を生かして社会のいろいろな課題を科学的に解決するにどうすればよいだろうか。その第1歩は、学問の壁を越えて広く捉える練習をすることである。自然界の出来事は理科の科目で仕切られてはいない。1つの自然現象や物事でも「複数の観察眼」で見直すことができる。新しい学問領域、複数の専門分野を合わせて解決できる新しい分野を学際分野、融合分野と呼んでいる。



物質と生物の境界について



細胞には無数の DNA やタンパク質が備わっている。これらの素材が秩序正しく連携することで細胞分裂や臓器、個体作り上げられ「生命」として振る舞う。一方、DNA やタンパク質は「生命の素材」であり生体由来の天然高分子化合物。「高分子化合物」は高校理科・化学の1つの単位でもある。高分子化合物は人工的に作ることもでき、プラスチック、繊維、電子材料、車、宇宙船などあらゆる材料や部品として私たちの生活には欠かせない物質となっている。人工高分子でありながら、体内に埋め込む代替骨や人工心臓、介護ロボットの素材として生命維持に直接役立つソフトマターもある。高分子化合物は生物と物資の境界にあるもので、生命を生み出すには欠かせない素材なのである。



「高分子化合物を作れるか」という観点で眺めると、細胞や生体に備わっている高分子化合物は生物（細胞）が作れるものである。体毛、爪、絹糸昆虫の絹糸、甲殻類の外骨格、植物のセルロースなど細胞から分泌されて体外で生物個体の保護などに利用されるものは天然高分子と呼ばれる。これらの素材の一部は人工的に合成することができる。一方、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、ポリエチレンテレフタレート(PET)、ナイロン、ゴム、ゲルなどは合成高分子。およそ 90 年前のナイロンの化学合成に始まり、現在では多種多様なプラスチック、繊維、高性能電子部品、代替医療材料へと発展し、私たちの生活には欠かせない材料・物質となっている。

生物と物質の共存の科学

環境と人間 生物と物質

資源とエネルギー

“生物に学ぶ科学の力”

18 世紀の欧州産業革命以来、石炭を利用した蒸気機関が動力源として利用されていた。その後、油田発掘と原油精製技術の発達で、石油化学産業が黎明期を迎え、自動車ガソリンや合成高分子を始め様々な化学成品の原材料として加工・生産されてきた。

20 世紀前半までは、産業界の二酸化炭素排出量が地球規模の気象変動に影響することは想定外であった。しかし、同時に指数的に人口増加となり、地球環境の

異変にいち早く気づいた研究者らは、オゾン層破壊や極地の氷河の減少、森林の砂漠化などの観測から、地球規模の気象変動は人類が消費・生産している資源エネルギーから排出される二酸化炭素や化学冷却ガスなどが原因という見解を示している。人類の未来社会は、地球規模で捉えることが必要である。そのためには「生物と物質の共存の科学」という俯瞰的・学際的な発想がますます重要になっている。

2 バイオミミクリーの背景

生物が作る有用物質を効果的に生産・利用する技術としてバイオテクノロジーがある。発酵や醸造は農業分野で古くから用いられてきた生物利用生産技術で、伝統的なバイオテクノロジーと言える。一方、1970 年代以降遺伝学は分子遺伝学、分子生物学分野へと発展し、現代型のバイオテクノロジーと言えば遺伝子組み換え技術として認識されるようになってきた。遺伝子操作は生命倫理にかかわる科学技術であるので、遺伝子組み換え研究を行う研究機関は、国の定めた安全指針に従って実験を行っている。

遺伝子の発現は生命の基本原則となるセントラルドグマとして知られている。細胞や個体の有用な性質を

大量に作り出す技術としてほ乳類の体細胞クローン技術が 1990 年代に初めて成功した。そして、日本では iPS 細胞でよく知られている細胞の発生・分化をコントロールできる原理が 2006 年に山中伸弥博士によって発見され、2012 年にはノーベル生理学・医学賞を受賞した。医療のための臓器再生技術として期待されている。

バイオテクノロジーとよく似た用語にナノテクノロジーが知られている。先端分析・微細加工技術がナノメートルサイズで可能となり、高性能な電子材料や今後の省エネルギー技術への応用が期待されている。

バイオテクノロジー

発酵
醸造遺伝子組換え技術
クローン技術
iPS細胞

ナノテクノロジー

ナノ加工
微細構造・解析
分子・材料合成

バイオテクノロジーやナノテクノロジーは生命科学や物質科学を先導する大切な技術であり、現在もそれぞれの分野で向上をめざして先端研究が行われている。一方、1997年にこれらに変わる全く新しいテクノロジーを表す用語として「バイオミクリー」が発表された。サイエンスライターであるジャンン・ベニウスが提唱した言葉である。自然の中には私たちがもっと学ぶべき技術がたくさんある。それは生き物にもヒトにも地球環境にも優しい技術であるという発想である。これをデザインすることで環境負荷の低減や持続可能性の高いイノベーションにつながると期待されている。ミミクリーは造語で、英語のまねる、擬態として使われる mimic、mimetics に由来する。

類似の用語に「バイオミメティクス」がある。1950年代から使われ始めた。日本語ではどちらも生物模倣・生物模倣技術・生体模倣技術と使われることがあり、厳密な使い分けはない。分野ごとに機械系（マクロ）の模倣、ナノ、分子レベル（ミクロ）の模倣のよ

うな考え方もある。現在、バイオミメティクスの成果を世界的な技術へ普及していく標準化が進められ、日本の研究者らは ISO（国際標準化機構）へバイオミメティクスの世界標準化を働きかけている。国内ではバイオミメティクスの学術研究から産業技術移転の NPO 協議会が設立され、基礎研究から実用化研究の加速を目指している。

「バイオミメティクス」は成果にフォーカスするのに対して、「バイオミクリー」は、成果に至るプロセスやそのデザイン思考への取り組みも含めたコンセプトである。2010 年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)では、環境省の公開資料でも「バイオミクリー」のコンセプトが取り上げられ、生物多様性の観点からバイオミクリーに学ぶ地球環境保全への発想のつながりの大切さが紹介された。企業も自社活動のなかで生物多様性保全の取り組みを盛んに行うようになってきている。

世界は全く新しいテクノロジーを
作りあげるべき段階に来ている。

Bio-mimicry 生物模倣技術

Biomimic
Biomimeticsmimic, mimetic, mimicry
まねる、擬態、模倣

Biomimicry 生物模倣技術

生き物にもヒトにも地球環境にも優しい技術
があり、自然の中にも学ぶべき技術がある。
環境負荷の低減につながる技術革新

生物を学ぶ・謎を解明 → バイオサイエンス

生物を利用する技術 → バイオテクノロジー

生物から学んだ技術 → バイオ・ナノテクノロジー/バイオミメティクス

生物から学ぶべき技術革新 → バイオミクリー

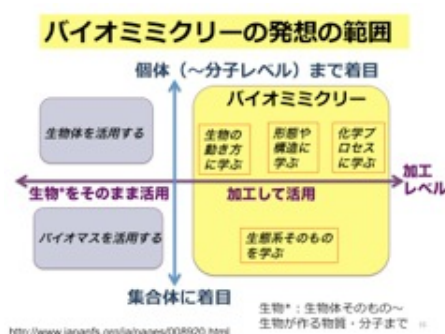
「環境への負荷」とは、人の活動により環境に加えられる影響であって、
環境の保全上の支障の原因となるおそれのあるもの（環境基本法）

生物：生物体そのもの～生物が作る物質・分子まで

3 バイオミミクリーの発想とデザイン思考

生物を模倣する技術の発想にはいろいろな方向性があるので、まずは2つの方向性を考えてみよう。1つは生き物の個体の数である。1個体の着目から個体の集団まで幅広くとらえる範囲がある。また観察の範囲を生き物の個体からさらに細胞内部の分子レベルまで拡張することもできる。2つめは、生き物をそのまま活用するか、あるいは加工して活用する軸である。有用物質を作り出す微生物発酵や醸造、生物資源（森林

木材など）は、生き物の個体から集団までをそのまま活用する場合なので、バイオテクノロジーの範囲と考えてよい。一方、加工して活用する場合を、バイオミミクリーの範囲ととらえる。今までに知られているバイオミミクリーを整理すると、(1)生き物の動き方に学ぶ、(2)形態や構造に学ぶ、(3)化学プロセスに学ぶ、(4)生態系そのものを学ぶことの4通りに大別でき、それぞれの視点で加工されたものが使われている。



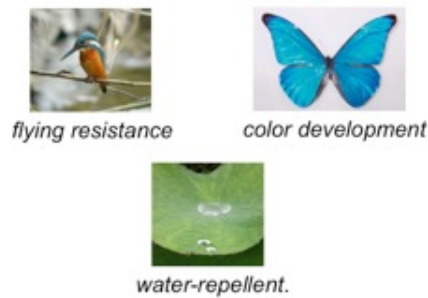
ある生き物を観察して「バイオミミクリーのひらめき」に結びつけるにはどうしたらよいだろうか。このような課題を解決するテクニックとしてデザイン思考 (design-thinking) がよく用いられる。まずはよく観察して生き物の特徴を理解する。そして(1)～(4)のどの分類に当てはまるか定義づけする作業から始める。さらに用途に合わせてその定義を概念化する。その際、同じ生き物でもその特徴を分子～個体～集団のどのサイズで捉えるか（観察するか）で定義づけや概念化も変わる。概念化されたものからいろいろなプロトタイプを試作しテスト（評価）してみる。この一連の発想は「デザイン思考」と言われ、満足のいく成果にたどり着くまで、何回も思考のサイクルを繰り返すことが必要となっている。

デザイン思考で満足のいくイノベーションを創り出すには1人プレーでは限界がある。社会の中でいろいろな視点から課題を見つけ解決するにはチームプレーが大切である。このようなプロセスは何も特別なことではなく、企業での商品開発や企画会議でのワークショップや実験・研究活動の中でよく用いられる手法になっている。

イノベーションの概念も進化している。今できるこ

とから未来を考えるのがフォアキャスティング。これは20世紀型イノベーションで、科学技術を基にして資本を中心に置いたスケールアップモデルである。一方、どのように将来の社会が変わっていくべきなのか目標を先に考え、そのビジョンや理念のシェアによって広がる共感の輪が、新しいムーブメントやマーケットそのものを創り出す。先に理想となる新しい習慣や価値観・行動が思い描かれ、その後にアイデアが生み出されるのがバックキャスティング（リバースイノベーションともいう）の次世代型プロセスである。

大学ではアクティブ・ラーニングとして実践的なPBL型授業でデザイン思考などを学ぶプログラムが増えてきた。観察→理解→定義づけ→概念化の思考サイクルは少人数でブレインストーミングし、何回も回すことで概念化へ到達する。またそれをもとに実際にプロトタイプ作成し、テストを繰り返す（失敗も含める）ことで洗練されたバイオデザインへと向かう。デザイン思考のサイクルは自分の調査範囲を越えて課題発見・課題解決へと導く発想法であり、過去の実施例（失敗例）を調べることも重要になる。授業の成果を実際に企業の研究者に説明する実践的な取り組みもある。



4 いろいろな生体を模倣する

生物・生体を模倣する報告はこれまでも多数ある。バイオミミクリーの発想の範囲について過去の模倣・開発例をデザイン思考から分類してみた。(補足説明予定)

観察サイズ	模倣への概念化 観察・理解と定義づけ	生体・生物・生産物例	模倣・開発研究例（環境負荷低減になっているか考えてみよう）
分子サイズ	形態や構造	ペニシリン カイコの絹糸 カイコの絹糸 モルフォ蝶 ハスの葉 蚊の針 軟骨再生	よく効く薬のデザイン ナイロンの発明（1940年代） 合成高分子シルクライク繊維（2010～） 構造色 撥水性 いたくない注射針 ソフトマター（ゲル）
	化学プロセス	植物光合成 赤血球膜の水濾過タンパク質	新型太陽電池 小型浄水器
個体	動き方・形態や構造	カワセミのくちばし	新幹線の圧力波低減
	形態や構造	サメの皮膚の形状	微生物付着低減
	形態や構造	砂漠の昆虫	大気から結露水の捕集
個体集団	化学プロセス	珊瑚	二酸化炭素の定着ブロック
	生態系	昆虫集団	省エネルギーグリッド
	生態系	鳥の集団飛行	群知能

大学1年生の協同学習（アクティブラーニング）で提案された例

課題：10年後の社会貢献につながるような「おもしろい／夢の」生物模倣の機能や内容を提案してください

ハチドリ+コウモリ+トンボ ゴキ○リの足の先端構造 ハエの眼 ハチトリのホバリング 魚型ラジコン クマムシのクリプトビオシス状態の応用 カラダの再生 昆虫の複眼で情報処理、昆虫脳 いもりの再生機能を活かす 超音波をつかって交通事故減らす セルロース分解を人間導入	葉緑体で太陽電池、塗る電池を義務化！ 人工ミミズ、土壌浄化、耕す 超音波で交通監視、 木の枝のように生えるビル、 ねずみとダイエット アリの力を介護へ、植物にエネルギーが介護へ えら呼吸装置 くも 人工DNA DNAコンピュータ
---	---

5 シルクのバイオデザインとイノベーション

シルク産業の背景

中国では紀元前からカイコを飼育し、繭糸を生産する養蚕業が栄えていた。繭糸からつくられる絹織物はヨーロッパへの重要な貿易輸出品となり、交易路としてのシルクロードが有名である。日本にも古くから養蚕や絹織物技術が伝来し、明治5(1872)年にはフランス式の近代的な製糸工場が開設した。1930 年には日

本の繭生産量は世界一となり、日本産業の近代化を支えた。絹産業の国際的技術交流・技術革新などにも大きく貢献した。2014 年に世界文化遺産に登録された富岡製糸場と絹産業遺産群は、その足跡を示すものである。

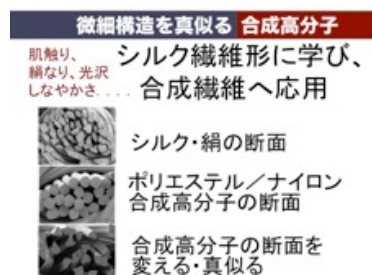


合成高分子でシルクを模倣する

カイコの品種改良や繭糸の生産量を増やす技術は、紀元前から続くバイオテクノロジーと言える。この間にはその時代の技術革新の観察対象として重要視されてきた。もっとも代表的な成果はナイロン発明へのモチベーションである。1930 年代、高分子化合物を人工的に合成する研究が始まっていた。デュポン社のカロザース博士は、1938 年、「石炭と水と空気」からつくられた完全な人工の繊維として「ナイロン」を世界に紹介した。当時、人々のあこがれの繊維は絹で、とても高価なものであったが、絹よりも細く、丈夫で、しかも安くつくれるナイロンは世界に衝撃を与えた。

この発明がきっかけとなって、世界中で人工的に高分子化合物をつくるさまざまな研究が行われるようになった。

絹糸はタンパク質からできており、ナイロンの部分構造にもタンパク質がもっている化学構造が応用されている。吸湿性、光沢、絹なり、着心地など完全な性能の再現はできていない。ナイロン発明以後、今でもシルクライク繊維の研究開発は続けられている。最近のヒット商品はシルキードライ (エアリズム)。シルクの模倣の概念化が斬新で、ナイロンとは異なる合成繊維を組み合わせ着心地などの性能を実用化している。



バイオ3Dプリンター：カイコの行動パターンを操るイノベーション

カイコは孵化後、幼虫期はおおよそ 30 日。4 回の脱皮を繰り返し、5 齢期後半に繭をつくる。5 齢期には大量の餌を食べ続け、体内の絹糸腺に絹タンパク質の素を水溶液としてため込む。絹糸腺は繭糸を吐く専用の口（吐糸口）につながっており、吐糸口の直前で絹

タンパク質にずり応力をかけて高強度の繊維化をすませてから繭糸として連続的に吐き出す。繭をつくる期間は2日間。繭糸の長さはなんと1500m以上にもなる。吐糸行動中は餌となる桑は一切食べない。



自然界で繭糸をつくるカイコ幼虫の行動をまとめてみよう。カイコはとてもおとなしい昆虫である。蛹になって変態する場所は、悪天候や外敵から逃れられる安全な場所がよい。5 齢期最後の繭を作るカイコを観察すると、次の 4 パターンが特徴となる。(1)葉っぱの間など暗くて安定な場所を探す行動をする、(2)できるだけ地表から遠い上層部を好む(慎重派!)、(3)力

イコ幼虫が体をくねらせ繭糸を葉っぱや幹に接着しながら縦横無尽に足場の繭糸を張りめぐらせ、ちょうど良い大きさの繭がつくれる空間を用意する(几帳面！)。(4)本格的に最終段階の吐糸行動で繭形成を始めて閉じこもる前に排泄をすませる(清潔好き！)。養蚕業では(1)~(4)を考慮した最適な繭形空間を実現する足場(マブシ)が使われている。



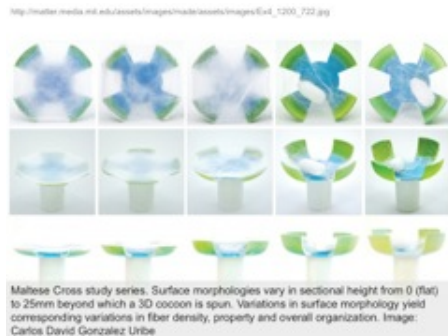
アメリカ・マサチューセッツ工科大学(MIT)メディアラボのネリー・オックスマン教授らは、カイコの個体としての繭形成の吐糸行動パターンをコンピュータで分析し、6500匹の個体集団による巨大な絹パビリオンの作品をつくり上げた。カイコの行動パターンを操ることで、バイオ3Dプリンターによるアートを実現したというのだ。彼女らの手法は斬新であった。カイコの吐糸行動は頭の動きで決まる。このパターンをコンピュータに取込むために、カイコの頭に小さな磁石の帽子を置き、三次元コイルの部屋で頭の動きを捉



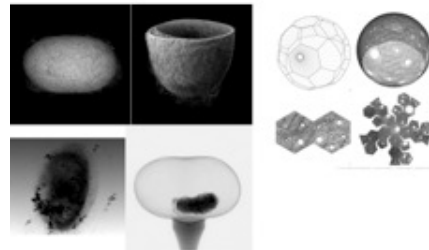
えた。また、「ちょうど良い大きさの繭がつくれる空間」はカイコが身をもって測り、足場補助用繭糸を張り巡らせる行動をとった後に、本格的な「閉じた繭」づくりを始める。ところが彼女らの発想は、個体の吐糸行動パターンを 6500 匹の共同作業に置き換え、大型の絹パビリオンの作品に仕上げることであった。その目標のために、「閉じた繭」と「閉じられない繭」の空間分析をやったのである。すなわち、普通は 1 個体が繭糸を吐き続け、1 個体が身を守れる閉じた 3D 繭をつくる。足場を変えると 1 個体は 2D 繭（平面繭）をつ

くり、6500 匹の 2D 繭の連続体で大型の絹パビリオンに到達させようとするのである。1 個体に 2D 繭をつくらせるには、最適な繭形空間を実現する足場（マブシ）ではなく、どのようなデザインがよいか思考し、さらに複数の個体が吐糸行動パターンを交わるような格子パターンや多面体もデザインした。彼女らの研究グループには伝統的な絹産業者はいない。メンバーの専門は多様で、カイコや繭糸の基礎知識がある者、コ

ンピュータや数理科学者、そしてこれらをまとめるマネージメント力がある者など個性派ぞろいであった。それぞれの専門家だけではなし得ない協働作業の成果である。（実は、カイコが 2D 繭を作ることは「繭糸うちわ」として日本では伝統的に知られていた。しかし建築物サイズのデザイン思考の発想の転換（再発見）と大掛かりな作品づくりには圧倒される。）



カイコの繭形成行動に学ぶ
2D-3Dプリンティング



再発見というイノベーション

シルクはカイコやクモがつくるタンパク質の繊維。最先端の分析法やテクノロジーは時代とともに進歩する。繊維としての機能にこだわらず、タンパク分子としてのはたらきを新しい時代の技術で観察しなおすと、分子レベルの新発見がおこる。25 年ほど前、日本ではシルクタンパク質の非衣料分野への応用研究が行われていた。1 つはタンパク質食品素材として、もう 1 つはバイオ材料としてのシルクフィルム・ゲル・パウダーの開発である。現在、再び海外でシルク応用の再発

見の研究が進められている（オメネットの TED）。国内では、カイコとクモのシルク繊維をモデルにこれらの特性を持たせたい遺伝子組み換えタンパク質を微生物でつくる事業化もすすんでいる。さらに医療用の人工血管をシルクでつくる動物実験も行われている。人類が何千年も利用してきたシルクであっても、その時代の先端研究の観察法が進歩すると新しい概念が生まれてくるという例でもある。生き物の模倣技術は新しい時代の再発見の扉を開いてくれる。

シルクタンパク質分子機能の応用展開



おわりに：

ヒトは「五感」をはたらかせて環境を捉え、行動・成長する生き物である。ヒトはまた生物界の中で最高の知能を持ち、高度な文化・知識・技術は、人間社会の中で蓄積され世代を越えて継承・共有されてきた。印刷技術が発明された当時、本や新聞で学問や技術・思想や社会の動きが伝えられていた。その後電話、ラジオ、テレビ等アナログ通信技術が進歩してきた。今やデジタル技術の発達によりインターネットで世界中のビッグデータにだれでも素早くアクセスできる。まさに、第6の感覚ともいえる人工知能バイオミミクリーがヒトの感覚に備わってきたとも言える。

しかし一方で、ヒトは五感をフルにはたらかせ、知恵を出し合ってクリエイティブにデザイン・創造する経験が減ってきてはいないだろうか。第6の感覚にはグローバル情報を素早く検索・可視化できる便利さが

あり、この新感覚にヒトはすっかりハマっている。ただネットでは検索できない有用な情報・場所・物・時があるので、これからは「五感」をフル活動させるヒト本来の知能を見直す必要もある。その上で第6の新感覚をコントロールできれば、イノベーションのヒントをうまく呼び起こせるかもしれない。

「バイオミメティクス」はヒトが創り出す成果や技術（結果）にフォーカスするのに対して、「バイオミミクリー」は、成果に至るプロセス（デザイン思考）をも重視する。「ヒト本来の感覚と考動を研ぎすませなさい。そして人間社会の一員としてヒトのもつ本来の能力を見つめ直しなさい」ということを予感させる言葉、それがバイオミミクリーなのかもしれない。

（余録：ヒトを自分と置き換えて読んでみよう）

参考書・関連ウェブサイト

1. 自然と生体に学ぶバイオミミクリー（ジャンン ベニユス 著）オーム社, 2006
2. 自然をまねる、世界が変わる: バイオミミクリーが起こすイノベーション（ジェイ ハーマン 著）化学同人, 2014
3. 講義担当 HP <http://altair.sci.hokudai.ac.jp/infana/lecture.html>
4. 動画（ジャンン・ベニユス）http://www.ted.com/talks/janine_benyus_biomimicry_in_action
5. 動画 SILK PAVILLION (MIT) <https://www.youtube.com/watch?v=eCG0M6T5sMU>
6. 動画 シルク人工血管 <https://www.youtube.com/watch?v=63d0TiqS3ao>
7. 動画（オメネット）
http://www.ted.com/talks/fiorenzo_omenetto_silk_the_ancient_material_of_the_future
8. 動画（ネリ・オックスマン）
https://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology

* SILK PAVILLION の資料使用は MIT メディアラボの研究グループから教育使用の許可を得ています。

予習のポイント

予習資料を参考にし、「10年後の夢の生物模倣」について自分の発想でいくつか描いてみよう。

問合せ先 担当 出村 誠 (Demura Makoto)
理学部生物科学科（高分子機能学） / 大学院生命科学院
demura@sci.hokudai.ac.jp
<http://altair.sci.hokudai.ac.jp/infana/>