人新世におけるバイオミメティクス ～人と生物の界面がもたらす循環型経済～

Biomimetics in Anthropocene; Towards Circular Economy based on Human and Nonhuman Interfaces

下村 政嗣

公立千歳科学技術大学

〒066-8655

北海道千歳市美々 758-65

Masatsugu SHIMOMURA

Department of Applied Chemistry and
Bioscience, Chitose Institute of Science and
Technology

758-65, Bibi, Chitose-city, Hokkaido 066-8655

論文要旨:「持続可能な開発目標 (SDGs)」策定の背景となる「人新世」や「プラネタリー・バウンダリー」に象徴される人間活動が地球環境に大きな影響を及ぼしつつある時代において、持続可能性を回復する循環型経済システムへ移行しようとする動向がある。今世紀になり、ナノテクノロジーの世界的な展開と相俟って新しい展開を迎えたバイオミメティクスは、分子レベルの材料設計からロボティクスの分野を超えた、建築、都市設計、に至る“生態系バイオミメティクス”と称すべき幅広い分野に広がっている。バイオミメティクスの手本である生態系は、再生可能な太陽光エネルギーを駆動力とした生産、食物連鎖による消費、代謝による分解によって、「ゆりかごからゆりかごへ」の完全なる物質循環系を植物・動物・微生物からなる生物多様性が可能としている。生物多様性からの技術移転をもたらすバイオミメティクス・インフォマティクスと、人と生物の界面がもたらす循環型経済の観点から、バイオミメティクスを巡る世界動向を紹介する。

Abstract: Biomimetics is the innovative paradigm shift based on biodiversity for sustainability. Biodiversity is not only the result of evolutionary adaptation but also the optimized solution of “an epic combinatorial chemistry” for sustainability, because the diversity has been acquired by “biological processes and technology” including “production processes”, “operating principles”, and “control systems”, all of which differ from the “human technology”. Biomimetics is an emergent interdisciplinary field of natural history, biology, ecology, mathematics, physics, chemistry, nanotechnology, materials science, mechanical engineering, architecture, economics, and sociology. “Biomimetic Informatics” based on biological database and information science is an important tool for the technology transfer from biology to engineering. The comprehensive translational research combining various fields of science and technology is indispensable to open the new paradigm based on biological diversity and human wisdom. Recently the Council of the EU adopted reduction of marine plastic litter from single-use plastic products towards safeguarding natural environment and transition to Circular Economy for promoting sustainable production and consumption. Biomimetics is an ecosystem service based on biodiversity, that brings about paradigm shift for technological innovation in sustainable manufacturing under the restricted environmental condition in the new geological age, “Anthropocene”.

Key words: anthropocene, circular economy, biological diversity, ecosystem services, biomimetic informatics

1 人新世と循環型経済

地質学においては、今、地質時代が大きく変わろうとしている。オゾンホールの研究でノーベル化学賞を受賞したマインツ大学のパウル・クルツェン教授によると、新生代第四紀の完新世（Holocene）はすでに終了し、コンクリートやプラスチック、核実験による放射性降下物などが地層に残る時代が始まっているらしい。気候変動、温暖化、海洋プラスチック汚染、生物多様性の劣化など、経済活動（Economy）に伴う様々な営為が地球の生態系（Ecology）に大きく影響し、人間活動の痕跡が新たな地層を形成する時代「人新世（Anthropocene）」が始まっているという提唱である¹⁾。その原因は、「グレートアクセラレーション（Great Acceleration）」と呼ばれる、世界人口、エネルギー消費量、地表温度、海洋酸性化、漁獲量、熱帯林の消失、など様々な事象に見られる指数関数的な増大化現象にあるようだ。ストックホルム・レジリエンス・センターのヨハン・ロックストローム所長らが提唱した、気候変動、生物圏の保全、海洋酸性化などの9項目について地球環境の許容限界を定量化する指標である『プラネタリー・バウンダリー（Planetary Boundaries）』によると、大気中の二酸化炭素濃度、生物多様性の劣化、窒素・リンによる富栄養化、などは指数関数的に増大しており、これらは地球環境収容の限界値を超えてすでに危険域に至っているようである²⁾。「グレートアクセラレーション」による不可逆的かつ急激な環境変化の危険性を指摘した「人新世」と「プラネタリー・バウンダリー」は、2015年の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」の中核であり人類喫緊の課題である「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals；SDGs）」策定の背景となっていることは否めない。

欧州連合（EU）は2018年1月、EU市場に流通するすべてのプラスチック製の容器包装材を2030年までに再生利用可能なものにし、使い捨てのプラスチック類の削減とマイクロプラスチックの故意的使用を制限する「プラスチック戦略」を宣言した³⁾。その背景には、ウミガメの鼻孔に詰まったプラスチック製ストローを抜き出すショッキングな動画が象徴するプラスチックによる深刻な海洋汚染、とりわけマイクロプラスチックと呼ばれる微小な粒子状プラスチックが及ぼす生態系、環境への影響がある。プラネタリー・バウンダリーの指標には、プラスチックや内分泌攪乱物質などの新規化学物質（novel entities）による汚染の指標があるものの、現状では十分な定量化ができていないようで危険域かどうかの判定には至っていない。しかし、2017年12月に中国

が廃プラスチックなどの資源ごみの輸入を禁止したこともあって「プラスチック戦略」は発令された。ちなみに、中国におけるプラスチック生産量は2015年時点で7800万tであり、アメリカ（2017年5100万t）、ヨーロッパ（2016年約6000万t）、日本（2016年1450万t）を超えている⁴⁾。さらに、世界のプラスチック生産量は、1950年の200万tから2015年には3億8000万tへと、まさしく「グレートアクセラレーション」的に増大している⁵⁾。

そしてEUは、「プラスチック戦略」が「循環型経済（Circular Economy）」への移行の取り組みの一環であるとしている。すでに廃棄プラスチックの再利用としては、プラスチック原料としてのマテリアルリサイクル、化学原料化するケミカルリサイクル、エネルギー源として用いるサーマルリサイクルがある。そもそも、「循環型経済」への移行とは、従前のリサイクル技術となりがちがうであろう。化石燃料だけに依存しながら廃棄物を回収し再利用や再資源化をすることでリサイクルのループを回し続けることが不可能であることは、熱力学的にも明白である。「循環型経済」とは、単に工業製品におけるリサイクル技術を意味するものではないことは、欧州環境機関（European Environment Agency：EEA）のリポート『The circular economy and the bioeconomy-Partners in sustainability』に詳しい⁶⁾。

2019年、「循環型経済」の国際標準化を図るISO/TC 323 Circular Economyが発足した。化石燃料などの“枯渇性資源（finite resources）”である地下資源にのみ依存した線形型経済（自然→資源化→生産→廃棄）から脱却し、“再生可能資源（renewable resources）”の利用を組み込んだ循環型経済（資源化→生産→使用→再資源化→生産→使用→…）への移行を早めることになった。EUは、“Integrating circular economy and bioeconomy would improve sustainability in Europe.”であるとして、すでに注視されている、農林水産業に代表される再生可能資源系経済である「バイオエコノミー（Bioeconomy）」と、枯渇性資源系経済を循環化した工業を両輪とする「タンデム方式の循環型経済システム」への移行を提唱している。「循環型経済」では、現存のリサイクル技術からさらにもう一步踏み込んで、枯渇性資源系に依存した経済システム（二次産業）と生態系サービスである再生可能資源系に依拠する経済システム（一次産業）との連携・調和によって完全な物質循環を可能とする、まさに「ゆりかごからゆりかごへ（Cradle to Cradle；C2C）」⁷⁾の経済システムを構築しようとするものである。

2 循環型経済とバイオミメティクス

このような状況において、昨年7月にブリュッセルでは

“The next industrial revolution will come from nature.”と題したEUのワークショップが開催され、“自然界において用いられている物質や構造そして生産プロセスを持続可能な未来に向けた製造業においてどのようにして使うか?”という視点に基づく議論を行い、製造業の循環型経済化にとってBio-inspire, Bio-integration, Bio-intelligenceを発展段階とするBiological Transformationに基づく生産戦略の重要性が提唱された⁸⁾。そもそも生物に学ぶという考え方は古くからあり、バイオニクス(bionics)、バイオミメティクス(biomimetic)、バイオミミクリー(biomimicry)、バイオインスパイアード(bioinspired)、などと称される生物模倣技術として知られており、海綿動物を模倣した洗浄用スポンジ、絹糸を真似た合成繊維、麦わらを真似たプラスチック製ストロー、植物の種子をヒントにした面状ファスナー、イルカを真似た潜水艦のソナー、カワセミの嘴に似せた新幹線の形状など、すでに我々の身の回りには多くの工業製品がある。さらに2011年にはバイオミメティクスの国際標準化を図るISO/TC 266 Biomimeticsが発足し、すでに3つの国際標準が発効している。にもかかわらず、Biological Transformation⁹⁾やBiologicalisation¹⁰⁾なる新造語を掲げざるを得ないほど、欧州産業界においては持続可能性への危機感が高まりつつあるようだ。“Circular economy emulates nature.”¹¹⁾と記されるほど、人類の持続可能な経済活動が自然界の仕組みに学ばねばならない理由とは何なのであろう。

3 バイオミメティクスと界面： 材料系バイオミメティクス

そのためには、生物模倣技術(以下、本稿では国際標準化に準じてバイオミメティクスという用語を使う)に関する研究開発潮流の大きな変化を見ておく必要がある。今世紀になってバイオミメティクスに対する世界的な関心が高まっていることは、多様な分野におけるバイオミメティクス関連の論文や特許が2000年を境に増加していることに如実に見てとることができる^{12, 13)}。20世紀末からのナノテクノロジーの著しい発展に伴い、走査型電子顕微鏡が広く普及したことで分類学や形態学を専門とする生物学者によって、これまでニッチであった生物表面の微細構造とその優れた機能が明らかにされた。また、ナノテクノロジーによる製造技術の進展は、材料科学と生物学との緊密な学際融合に基づいた材料系バイオミメティクスとも称すべき潮流を生み出すことになる。表面の凸凹に基づく蓮の葉の撥水性(Lotus Effect[®])を模倣した自己洗浄材料、カタツムリの殻の濡れ性を模倣した自己洗浄住宅建材、蛾の複眼表面の周期

的ニップル構造を模倣した無反射フィルム、ヤモリや昆虫の脚先の微細毛に働くvan der Waals力の集積による吸着を模倣したヤモリテープと呼ばれる接着テープ、モルフォ蝶の翅の構造色による発色を模倣した繊維やフォトニクス材料、サメ肌の流体抵抗低減化を模倣した競泳用水着や航空機用塗装、などが開発され実用化に至っている。ここには、動物や植物の体表面に形成される界面ナノ・マイクロ構造がもたらす機能を再現するとともに、低環境負荷や省エネルギーを通じて持続可能性へ寄与しようとする動向を見てとることができる(Fig. 1)。

これらの背景の一つには、2007年に発行されたドイツ政府の生物多様性条約戦略『National Strategy on Biological Diversity, 2007』¹⁴⁾において、“Biological diversity and its innovation potential”と題した項が設けられ、生物に学ぶことによる新たな技術革新の可能性が紹介されたことがある。さらにドイツ政府は、2008年にボンで開催された生物多様性条約締約国会議(CBD-COP9)を契機に、生物多様性が原材料の調達や生産工程などの企業活動に大きな影響を及ぼすことから、民間企業による生物多様性保全活動を目的とした「Biodiversity in Good Company」(ビジネスと生物多様性イニシアティブ)と銘打った組織を発足させており^{15, 16)}、設立当初のホームページの冒頭には、“ハスの花、サメ、ペンギン、ヤモリなどの動物を想像してみてください。これらの動植物がヒントになって、表面の自己洗浄、飛行機に用いるコーティング剤、低空気抵抗・高性能エンジンを備えた自動車、再利用可能な接着剤などの新技術が開発されました。このように、動植物が高性能技術の開発のきっかけになると同時に、すべての動物、植物、菌類、微生物は、大気や水を浄化し、肥沃土や快適な気候を作り出しているのです。私たちは、生物の多様性からの恩恵を受けることで、健康を維持し、食糧を確保できるのです。”と記載されていた。

さらに、バイオミメティクスのコンソーシアムであるBIOKON(Bionic Competence Network)とドイツ技術者協会(VDI)の発議を受けて、ドイツ規格協会(DIN)は2011年に国際標準化機構(ISO)に対して技術委員会の設置を提案し、翌2012年にISO TC 266 Biomimeticsが発足した。すでに発効したISO 18458:2015 “Biomimetics-Terminology, concepts and methodology”において、バイオミメティクスとは生物から工学への技術移転を前提とするとともに持続可能性に資するべき新しい技術体系であり、生物そのものを用いるバイオテクノロジーとは異なるものと定義されている。

生物模倣技術がもたらす経済効果に関しては、2010年にサンディエゴ動物園が『Global Biomimicry Ef-

Fig. 1 Biomimetics Emerged from Collaborative Biology-Nanotechnology Researches on Nano- and Microstructures of Biological Surfaces and Interfaces.

forts: An Economic Game Changer』と題するレポートを出し¹⁷⁾，“バイオミクリー (biomimicry) の分野が、米国において 2025 年に年間 3000 億ドルの国内総生産と 160 万人の雇用をもたらす”という経済予測をした。最近では、2030 年には、アメリカで 4250 億ドル、世界的には 1.6 兆ドルの GDP が期待されるという試算もある¹⁸⁾。ちなみに、バイオミクリーという言葉は、生態学者ジャンニ・ベニウス博士が 1997 年の著作『Biomimicry: Innovation Inspired by Nature』¹⁹⁾に使ったもので、環境問題への視点が明確に反映されており、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』において、“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を取り上げている²⁰⁾。

4 バイオミメティクスと界面： 生態系バイオミメティクス

ナノテクノロジーと分類学の協働によって台頭した材料系バイオミメティクスの潮流に引き続き、生態系バイオミメティクスと称すべき新たなトレンドが動き始めている。そもそも、生物は個体として生存している訳ではなく、群れにおいては、個体と個体の相互作用があり、そして社会が生まれる。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って生態系システムが構築され、環境を成すことになる。材料系バイオミメ

ティクスの特徴が個々の生物が持つ“界面”の構造と機能に着目したのに対し、生態系バイオミメティクスの特徴は、生物間相互作用や環境・生態系を含むシステムとの“界面”を視野に入れている点にある。

生態系バイオミメティクス台頭のきっかけの一つには、Industrie 4.0 に始まる第 4 次産業革命の動向がある。その象徴的な展開は、サイバネティクスの流れを汲むバイオニクス分野から始まった。1990 年代からバイオニクスの研究開発に着手し、社内に Bionic Learning Network という産学官の異分野連携プロジェクトを立ち上げてバイオミメティクスによる技術革新を図ってきた FESTO 社²¹⁾は、Industrie 4.0 一色であった 2015 年のハノーバー・メッセにおいて、自律分散制御によって協働作業もできるアリ型ロボット BionicANTs や、ぶつかることなく群舞する蝶型ロボット eMotion Butterflies の動態展示を行った。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・ロボットの代表は、魚のヒレ (fin ray: 鰭条) の運動性にヒントを得た Fin Ray Effect[®] と呼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 年にはルフトハンザの機内誌で “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である四枚翅飛翔ロボット BionicOpter、2014 年には省エネ型ジャンピングロボット BionicKangaroo など、個々の生物の機能を模倣したものであった。ドイツの国家戦略である Indust-

Fig. 2 Biomimetics Informatics as Interdisciplinary Information Interface System of Biological Transformation between Biodiversity and Human Engineering.

rie 4.0 は自律分散型の生産システムを目指しており、モノのインターネット (Internet of Things, IoT) と 3D printing, そして標準化が重要だと言われている。BionicANTS は、社会性昆虫であるアリの個体と個体の相互作用に着目したものであり、協働作業を行う自律分散制御型ロボットが IoT を意識していることは明らかである。eMotionButterflies は、群れ行動のアルゴリズムを模倣したものであり、遠隔モニタリング、輸送効率化、渋滞回避、事故低減、による安心安全や国土強靱化への寄与も期待される。

もう一つの潮流は、“biomimetic design”である。フレームワークに規則的構造の無い飛行機や自動車のデザイン、幾何学構造を用いない建築デザイン、矩形ではない都市設計デザインなど、デザイン分野におけるトレンドが欧米においてスピード感を持って広がっている。砂漠の蟻塚は換気性能が高く塚内温度が適切に調節されていること (パッシブクーリング) に模倣したジンバブエの首都ハラレにある複合商業施設の設計、偕老同穴の骨格が有する応力分散性を真似たビルの構造設計などが、biomimetic architecture として有名である。日本建築学会は、『生命に学ぶ建築』²²⁾ において、Biofied Architecture を提唱している。さらには、住宅街全体の居住性、流通性などを生態系に学んだ都市設計も始まっている。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。筑波大学の谷口守教授は、人口減で縮小化するまちの再生に対し、バイオミメティク

スの適用を提唱している²³⁾。これらの動向もまた、“生態系バイオミメティクス”と称すべきトレンドとして捉えるべきであり、個々の生物の形態やそれに伴う機能のみならず、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となり得るのである²⁴⁾。

5 バイオミメティクスと界面：バイオミメティクス・インフォマティクス

Industrie 4.0 においては、IoT や AI など情報学的な分野 (サイバー空間) と 3D プリンティングに象徴されるモノ作り (フィジカル空間) の連携が重要であるとされている。バイオミメティクスにおいては、二つのフィジカル空間である生物から工学への“技術移転”が求められており、メガデータとも称すべき生物多様性の情報を持続可能な“人間の技術体系”へ移転する界面 (Interface) であるサイバー空間の役割は重要である。具体的には、“バイオミメティクス・インフォマティクス”とも言うべき、博物館や学術機関が有するデータベースの統合化とテキストや画像を対象とした多様な情報検索システムの構築が求められる。昨年 9 月にエジンバラで開催された ISO/TC 266 Biomimetics 国際委員会では、日本から提案した作業グループである WG4: Knowledge Infrastructure of Biomimetics において、“Ontology Enhanced Thesaurus (OET) for Biomimetics (生物学と

工学の用語に意味論的に関連性をもたせた類義語)”, “Image Search Engine” として “Integrating Problem and Function-oriented Approaches Applying TRIZ (発明的問題解決理論を意味するロシア語 Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch の頭文字)” が議論された (Fig. 2)。

6 バイオミメティクス：

人間と人間ならざるものとの界面

自然や生物に学ぶという考え方の手本である生態系や生物多様性は、様々な地球環境のもとで長い時間をかけた進化適応の結果である。“壮大なるコンピナトリアルケミストリー”とでも称すべき進化適応のプロセスによって、多様な時間と実験条件のもとにおいて物理・化学の法則・原理の組み合わせが最適化され、生存のための生産プロセスや機能発現のパラダイムが決定されたのである。つまり自然界には、生物が生きる仕組みとしての“技術”と生態系を維持する“経済”が、何億年にもわたる試作と評価を終えた結果として使われ続けてきたのである。そして、再生可能な太陽光エネルギーを駆動力とした光合成（植物による生産）、食物連鎖（動物による消費）、代謝・分解（微生物による分解）、による「ゆりかごからゆりかごへ」の完全なる物質循環システムが可能となったのである。

“Without biological diversity, no economic diversity” というキャッチコピーを掲げた「Biodiversity in Good Company」の背景には、生物多様性と水や土壌などを含めた生態系を“自然資本”と捉え、それらがもたらす恩恵を“生態系サービス”とする考え方がある。生物多

様性と生態系サービスの価値を認識しその保全と持続可能な経済活動を目指す「生態系と生物多様性の経済学 (TEEB: The Economics of Ecosystem and Biodiversity)」という提案もまた、2008年にボンで開催されたCBD-COP9において提唱された。TEEBにおいては、生物多様性がもたらす生態系サービスを「供給サービス」、「調整サービス」、「文化的サービス」、「生息・生育地サービス」の4つに分類している。産業構造の観点からすると、食料の供給は農林水産に関わる一次産業へのサービスであり、木材や遺伝子資源の供給は製紙、建築、エネルギーや創薬等に関わる生物資源を直接的原材料とする二次産業へのサービスであり、エコツーリズムなどの観光資源としての三次産業へのサービス、と捉えることができる。

一方、産業革命以降の二次産業を支える技術体系の軸は、化石資源などの“枯渇性資源”を前提として展開しており、持続可能性においては重大な課題を抱えている。バイオミメティクスを二次産業の技術革新をもたらす新たな生態系サービスと捉えること、つまり、生物多様性の背景にある“生物の技術体系”が持つパラダイムを工学に技術移転することで、“枯渇性資源”系に基づいて展開してきた“人間の技術体系”を“再生可能資源”系に基づく“持続可能な高炭素世界の完全リサイクル型技術”に変換することが期待されるのである (Fig. 3)。

さて、TEEBが成立する背景には、“再生可能資源”としての生態系サービスが不可欠あり、その維持と保全が持続可能性を維持することになる。「タンデム方式の循環型経済システム」において、二次産業のカウンターパートであり Bioeconomy の旗手たる農業に課題はない

Fig. 3 Biomimetics as Innovative Paradigm Shift for Sustainable Circular Economy in Anthropocene.

のであろうか？再生可能資源系経済であるべき農業における生産性向上は、一方において人工肥料による土壌劣化や農薬による生物多様性の劣化をもたらすジレンマを抱えていることは、「プラネタリー・バウンダリー」の指摘からも明らかである。近年, Agriculture4.0 やスマート農業にみられるような、ドローンを使った鳥瞰的な圃場管理や環境モニタリング, IoT やロボットによる省力化, 閉鎖系エコシステムとしての植物工場などの先進的農業のトレンドはあるものの、はたして“生産性向上と環境破壊のジレンマ”を解消し, SDGs が掲げる“持続可能な消費と生産”の課題を解決し得るのであろうか？そして、バイオミメティクスによる解決は可能であろうか。

ヤコブ・フォン・ユクスキュルは『生物から見た世界』²⁵⁾において、生物はそれぞれに特有の知覚に基づく世界認識としての“環世界 (Umwelt)”を持っておりその世界観によって行動する、と記述されている。そして、“環境 (Umgebung)”とは多様な“環世界”が共存する集合体、つまり、“人間”と“人間ならざるもの=昆虫・動物・菌類・植物…”の共存体としての普遍的な時空間である。これまでのバイオミメティクスでは、感覚生理学などの生物学の知見に基づいて、ナノテクノロジーや材料科学による工学的なアプローチによって、個々の生物の特定の構造や機能を模倣することでセンサーや材料を設計することが主であった。しかし、ある生物が他の生物や環境との相互作用や適応性を判断しその行動を支配すると考えられる知覚の統合化、すなわち、“環世界”の理解までには至っていなかった。農業においては、“人間ならざるもの”は害虫であり、病原菌、雑草であるが、彼らは、昆虫であり、菌類やウイルスであり、植物であり、各々の Umwelt に従って圃場である Umgebung に関わる。一方、圃場の管理者である人間は、圃場である Umgebung の保全と生産性を第一義とするが故に、農薬 (pesticides) を使用してしまう。昆虫の Umwelt が分かれば、その習性を逆手に取った行動制御によって無益な pesticides の使用は抑制されるであろう。

京都大学農学研究科の森直樹教授を代表として、農学・生物学 (自然史学)・工学の連携による「持続可能な農業を創生する蟲瞰学」に関する学術変革プロジェクトが企画されている。狙うところは、Biomimetic Optimization for Symbiotic Sustainable Agriculture inNOVation (BOSSANOVA: ボサノヴァは、ポルトガル語で新感覚を意味する) である。今まで想像すらしなかった虫瞰とも呼ぶべき“虫の世界観”に視座を置くことによって、スマート農業や植物工場などをも含む既存の農業が有するジレンマを見直すことこそが、自然との共存と完全な

る循環システムを可能とする Bioeconomy としての農業エコシステムを構築するイノベーションたり得るのではないだろうか。彼らと共存するためには、“人ならざるもの”の環世界、つまり、彼らには何が見えており、何が聞こえており、何を感じているのか、を知ることが不可欠である。それを前提にすることで、彼らとどう付き合うのかという答えが出てくるのだ。邪魔だから排除すればいい (彼らを亡き者にするのか、あるいは、我々が閉じ込めるのか) というパラダイムから脱するためには、彼らの認知を徹底的に調べつくす必要がある。

人間と人間ならざるものとの界面の理解には、“自然の人間化”²⁶⁾ (クロード・レヴィ=ストロース) が求められる。

文 献

- 1) Crutzen, P. J. Geology of mankind. *Nature* **415** (6867), 23 (2002).
- 2) Rockström, J. 他著, 武内和彦他訳. 小さな地球の大きな世界 プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発. 丸 善 出版 (2018). (Rockström, J. Big World Small Planet, Yale University Press (2015))
- 3) https://europa.eu/rapid/press-release_IP-19-2631_en.htm
- 4) <https://www.statista.com/statistics/307635/china-plastic-production-volume/>
- 5) Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* **3** (7), e170078219 (2017).
- 6) <https://www.eea.europa.eu/highlights/integrating-circular-economy-and-bioeconomy#tab-related-publications>
- 7) McDonough, W. 他著, 吉村英子他訳. サステイナブルなものづくり—ゆりかごからゆりかごへ. 人間と歴史社 (2009). (McDonough, W.; Braungart, M. Cradle to Cradle: Remaking the way we make things. North Point Press, New York (2002))
- 8) <http://www.manufuture.org/the-future-of-sustainable-value-creation-systems-workshop-hosted-by-the-european-technology-platform-manufuture-and-fraunhofer-in-brussels/>
- 9) <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/Publications/Brochures/whitepaper-biological-transformation-and-bioeconomy.pdf>
- 10) Byrne, G.; Dimitrov, D.; Monostori, L.; Teti, R.; Houten, F.; Wertheim, R. “Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **21**, 1 (2018).
- 11) Rashmi Anoop Patil, Sudiptal Seal, Seeram Ramakrishna, “Circular Economy, Sustainability and Business Opportunities”, *The European Business Review*, January 22 (2020)
- 12) 下村政嗣. 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, 9-28,

- 2010年5月号(文部科学省科学技術・学術政策研究所)(2010). (Shimomura, M. Science & Technology Trends 2010-5, 9-28 (2010))
- 13) Emilie Snell-Rood, "Interdisciplinarity: Bring biologists into biomimetics", *Nature* **529**, 277-278 (2016).
- 14) https://www.bfn.de/fileadmin/ABS/documents/Biodiversitaetsstrategie_englisch.pdf
- 15) <https://www.business-and-biodiversity.de>
- 16) B&B Japan. 生物多様性へのビジネスアプローチ. 経済法令研究会(2011). (B&B Japan. Biodiversity in Good Company. Economic Legal Research Institute (2011)).
- 17) <https://www.sandiegozoo.org/images/uploads/BiomimicryEconomicImpactStudy.pdf>
- 18) SHIFT Zurich 2018-the Leadership Summit for Bioinspired Innovation and Finance, <http://www.shiftswitzerland.ch>
- 19) Benyus, J. M. 著, 山本良一他監訳. 自然と生体に学ぶバイオミミクリー. オーム社(2006). (Benyus, J.M. Biomimicry : Innovation Inspired by Nature. William Morrow Paperbacks (2002))
- 20) www.keidanren.or.jp/japanese/.../koudoushishin.pdf
- 21) <https://www.festo.com/group/en/cms/10156.htm>
- 22) 日本建築学会編. 生命に学ぶ建築 (Biofied architecture). 建築資料研究社(2018). (Architectural Institution of Japan. Biofied Architecture. Kenchiku Shiryo Kenkyusha Co., Ltd. (2018)).
- 23) 谷口守. 生き物から学ぶまちづくり. コロナ社(2018). (Taniguchi, M. Urban and Regional Planning Inspired by Creatures -To Overcome Regional Lifestyle-diseases Based on the Wisdom of Biomimetics-Corona Publishing Co., Ltd. (2018))
- 24) 下村政嗣編著, 高分子学会 バイオミメティクス研究会編. トコトンやさしいバイオミメティクスの本. 日刊工業新聞(2016). (Shimomura, M. Biomimetics. The Nikkan Kogyo Shimibun Ltd. (2016))
- 25) ヤコブ・フォン・ユクスキュル他著, 日高敏隆他訳. 生物から見た世界. 新思索社(1995). (Uexküll, Jakob von. Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen - Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten. Ernst Rowohlt Verlag, Hamburg (1956))
- 26) クロード・レヴィ=ストロース著, 大橋保夫訳. 野生の思考. みすず書房(1976). (Claude Levi-Strauss, La Pensee sauvage, Adler's Foreign Books Inc. (1962)).

下村 政嗣

公立千歳科学技術大学理工学部 特任教授

特定非営利活動法人バイオミメティクス推進協議会
理事長

国際標準化 ISO TC266 Biomimetics 国内審議委員会
委員長

北海道大学名誉教授, 東北大学名誉教授