EAJ 報告書　2026-04

「循環型社会とエコシステムを工学する」

令和8年（2026年）11月

公益社団法人日本工学アカデミー
「循環型社会とエコシステムを工学する」プロジェクト
（リーダー　：　小山珠美）

2026 年 11 月 19 日

公益社団法人日本工学アカデミー

日本工学アカデミーは、工学・科学技術全般の発展に寄与する目的で設立された産学官の指導的技術者を会員とする団体です。会員の豊かな経験や知識、幅広いネットワークを活用したプロジェクトチームを中心に、広く会員外からの協力も得て、調査提言活動を進めています。その成果をまとめ、社会が目指すべき方向性に関して、官公庁、立法府、産業界、学会、研究機関等に先導的、創造的な施策を提言し、社会実装を目指します。

「循環型社会とエコシステムを工学する」プロジェクト は、地球環境や資源をめぐる課題が顕在化し、循環経済への移行が世界的に進められる中で、地球環境の保全と経済活動の両立という、ともすれば二項対立として捉えられがちな課題に取り組むに際し、資源循環の枠にとどまらず、地球生態系というより広い視点に立って、持続可能な社会・経済のあり方について新たな示唆を得ることを目的として発足しました。産業もまた地球生態系の一部であるという原点に立ち返り、「共生」「循環」「進化」を手がかりに、工学にとどまらない幅広い視点から、そのあり方を考究しました。

今般、本報告書の原案がまとめられ、政策提言委員会での査読を受け、理事会での審査を経て、最終版を確定しましたので、日本工学アカデミーとしての発出を理事会で決めました。広くご活用いただくことを期待します。

本報告は、公益社団法人日本工学アカデミー「循環型社会とエコシステムを工学する」プロジェクトにおける検討の成果を公表するものである。

公益社団法人日本工学アカデミー
「循環型社会とエコシステムを工学する」プロジェクト
― プロジェクト体制 ―
（所属・役職等は 2026 年 3 月現在）

リーダー

小山珠美	日本工学アカデミー正会員 NEDO イノベーション戦略センター　フェロー 東北大学　特任教授（客員）

アドバイザー

中村道治	日本工学アカデミー正会員 JST 名誉理事長
川合眞紀	日本工学アカデミー正会員　副会長
城石芳博	日本工学アカデミー正会員　専務理事

執筆者（掲載順）

香坂 玲	東京大学大学院 農学生命科学研究科　森林科学専攻 森林風致計画学研究室　教授
中川 善典	上智大学大学院 地球環境学研究科　教授
藤平 祥孝	室蘭工業大学大学院 工学研究科 もの創造系領域 助教授
内山 愉太	神戸大学大学院 人間発達環境学研究科　准教授
内田 正紀	東京大学大学院 農学生命科学研究科　特任研究員
東 善朗	岐阜大学 工学部　客員准教授
太田 和彦	南山大学大学院 社会科学研究科 准教授
梅田 靖	東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻　教授
長谷川 眞理子	日本工学アカデミー正会員 総合研究大学院大学名誉教授 日本芸術文化振興会理事長
針山 孝彦	浜松医科大学 名誉教授　光医学総合研究所　特命研究教授
森 直樹	京都大学大学院 農学研究科 応用生命科学専攻 教授
下村 政嗣	公立千歳科学技術大学　名誉教授 北海道大学 名誉教授 東北大学　名誉教授
小山珠美	日本工学アカデミー正会員 NEDO イノベーション戦略センター　フェロー 東北大学 特任教授（客員）
平坂 雅男	特定非営利活動法人バイオミメティクス推進協議会　事務局長
杉山 正和	日本工学アカデミー　正会員 東京大学先端科学技術研究センター所長／教授

目次

はじめに ..... **小山 珠美 1**

巻頭言 ..... **山極 壽一 3**

●「産業生態系」概念の成立と事例分析から

1. バイオミミクリー4.0 から考える産業生態系・循環経済 ..... **香坂 玲、中川善典、藤平祥孝、内山愉太、内田正紀、東 善朗、太田和彦 5**

1.1 なぜ今、バイオミミクリー4.0 か 5

1.2 背景と目的:自然の設計原理を社会システムへ 5

1.3 自然のプロセスから見た社会・産業の設計原則への示唆 9

1.4 ELSI／RRI フレーム:再生と適応を担保する倫理・ガバナンス 10

1.5 デジタルツインと AI:循環・再生を検証する適応設計基盤 12

1.6 産業生態系／循環経済設計:実装ロードマップ 13

1.7 期待される効果:地域の固有性を活かした産業・地域のレジリエンス向上 14

1.8 結語 14

1.9 付録 19

2. 循環経済を実現するためのエコシステムの必要性 ..... **梅田 靖 17**

2.1 はじめに 17

2.2 循環経済において求められること 17

2.3 価値共創エコシステム 21

2.4 おわりに 27

●人類進化と「共生」の原理に学ぶ視点

3. 地球における生物の進化と人間社会 ..... **長谷川 眞理子 28**

3.1 はじめに 28

3.2 地球における生物の進化 28

3.3 人類の進化 28

3.4 ホモ・サピエンスの進化とその舞台 29

3.5 定住生活以後 30

3.6 産業革命と自前のエネルギー源の獲得 31

3.7 生態学の基礎と現代の成長主義の異常 32

4. 人間(*Homo coimaginans*)は自然界の中に存在し、そして"あわい"を介して自然界を識る ..... **針山 孝彦 35**

4.1 単細胞生物と多細胞生物―循環の中で生きている生物 35

4.2 「食う・食われる」を支える情報世界 38

4.3 ヒトから人が誕生する 41

4.4 ヒトと人 42

4.5 *Homo sapiens* の特徴は *Homo coimaginans* 45

4.6 日本人の文化に見られる特徴、"日本のあわい(間)"とはなにか 45

4.7 自然界とヒト界、そして人間界 50

4.8 八百万神に包まれた人間の“ふるまい” 51
4.9 *Homo coimaginans* と循環の滞留―“網”の脆弱性 51
4.10 提言としてのまとめ 53
5.「ノンヒューマンセントリックな科学の創生に向けて－短い時間軸の人間知性を超えろ！－」..... 森 直樹 54
5.1 はじめに 54
5.2 歴史的な視点から見た農業の成り立ち 54
5.3 近未来に危惧される農業における幾つかの問題点 57
5.4 思いがけない様々な生物間相互作用の具体的な事例 58
5.5 人間が持つべき視点 60

●循環経済を「生態系」に準えて捉え直す視点から
6. 地球生態系から循環型社会を工学する方法論 ..... 下村 政嗣、小山 珠美 62
6.1 はじめに 62
6.2 生物模倣技術の歴史的展開 63
6.3 自然に学ぶとは何か―政策的混乱と「人間中心主義」の反省 65
6.4 エコミメティクスという設計思想 68
6.5 おわりに 72
付記 本稿における主要概念の整理 75

●欧州と日本における制度設計思想の比較検討から
7. 欧州と日本における制度設計思想の比較検討から ..... 平坂 雅男 77
7.1 はじめに 77
7.2 EU における制度設計思想――製品・市場・情報基盤を束ねる包括設計 77
7.3 日本における制度設計思想 79
7.4 EU と日本の比較 80
7.5 自然に学ぶ循環設計の視点 82
7.6 日本の循環経済政策に向けた提言 85
7.7 おわりに 91

●循環経済への移行における初期アプローチについて
8. 循環経済への移行をいかに促すか ..... 杉山 正和 92
8.1 ケース 1:循環を五感で感じさせる有機農法 92
8.2 ケース 2:カーボンリサイクル 95
8.3 ケース 3:大学キャンパスにおける CO_2 排出ネットゼロへの挑戦 98
8.4 循環経済への移行を促す方策 100
8.5 補足:エネルギーは循環できない 102

おわりに ..... 小山 珠美 103

はじめに

プロジェクトリーダー　小山珠美

世界では今、持続可能な社会の実現に向けて、「循環経済」「循環型社会」「エコシステム」といった言葉が、政策や産業、学術などさまざまな分野で用いられている。しかし、これらの用語の定義や、それらが表す概念、さらにはそこに託される目標は、国や地域、専門分野、使われる文脈によって必ずしも同じではない。資源利用や廃棄物管理を中心に据えるもの、経済成長と資源消費の分離を目指すもの、産業や社会を構成する多様な主体の相互依存関係に着目するものなど、その捉え方は多岐にわたる。

こうした概念や定義の多様性を踏まえつつも、本プロジェクトでは、いったんそれらの既存の枠組みから離れ、持続可能な社会とはそもそも何なのか、その本質を問い直してみたい。人間もまた生物種の一つであり、人間社会も産業も、地球生態系の外に存在することはできない。ならば、地球生態系の中で何が生物種の存続を可能にしてきたのか。その根本に立ち返り、そこから人間の産業活動や社会のあり方を考えてみようというのである。

1972 年に発表された『成長の限界』は、有限な地球における人口や経済活動の際限のない成長に警鐘を鳴らし、その後の持続可能性をめぐる議論にも大きな影響を与えた。EU では、循環経済への移行に向けて「産業生態系（industrial ecosystems）」の概念が導入され、資源・エネルギー・情報が多層的かつ動的に関係する産業構造が重視されている。また、生物多様性の分野においても、生態系を複雑で動的なシステムとして捉え、全体性やレジリエンスを重視する考え方が国際的に広がってきた。

一方、日本では、廃棄物処理やリサイクルの重要性を強調する中で、「動脈産業／静脈産業」という二分法的なメタファーが広く用いられている。これはリニアエコノミーからの脱却を意図し、一定の啓発的効果を果たしてきたが、現在求められているのは、より統合的で複雑なフレームワークによる現実把握である。動的な循環を内包する社会・経済の再設計には、線形モデルだけでは対応できない。

欧州では、循環経済への移行に向けた制度整備が進み、その影響は EU 域外の企業や市場にも及びつつある。しかし、欧州と日本では、社会の成り立ちや制度設計の背景が異なる。欧州で形成された制度や枠組みに学び、対応することは必要であるとしても、それをそのまま日本の目指すべき姿とすることが、果たして最も本質的な道なのだろうか。地球生態系の中で何が生物種の存続を可能にしてきたのか。その根本に立ち返り、そこから人間の産業活動や社会のあり方を考えることは、各国・地域で形成された制度を後から追うよりも、むしろ循環型社会を構想するための本質に近い道ではないだろうか。

本プロジェクトでは、こうした問題意識のもと、人間社会を地球生態系の一部として捉え直し、自然界に見られる「共生」「循環」「進化」などを手がかりに、これからの社会における産業構造や制度設計のあり方を考えることとした。検討にあたっては、一つの専門分野や一つの答えに収斂させることを意図せず、異なる専門性を持つ執筆者に、それぞれの視点から論考を寄せていただいた。したがって、各論考の視点や問題の捉え方は必ずしも同じではない。

本報告書は、五つの視点から構成されている。第一に「産業生態系」概念の成立と事例分析、第二に人類進化と「共生」の原理、第三に循環型社会を「生態系」に準えて捉え直す視点、第四に欧州と日本における制度設計思想の比較、そして第五に循環経済への移行に向けた初期アプローチである。これらを通じて、地球生態系の中で人間社会と産業はいかにあり得るのかという問いに、多様な専門分野から考察を加えることを試みた。

巻頭言は、山極壽一先生に本報告書の完成原稿をお読みいただいたうえで、ご寄稿をお願いし、快くお引き受けいただいたものである。先生には、私たちの基本的な問題意識を深く汲み取っていただくとともに、自然科学の概念を人間社会に適用する際の本質的な問題から、AI の進展がもたらす産業や社会の変容、さらには人間の生き方や哲学の重要性に至るまで、広い視野から深い示唆をいただいた。こうした課題に向き合ううえでも、本企画で試みた根本的な問い直しが、その礎となることを願っている。貴重なご寄稿に、深く感謝申し上げたい。

本プロジェクトの執筆者のお一人である下村政嗣先生は、その趣旨に深く賛同され、原稿の執筆と意見交換を重ねてくださったが、本報告書の完成を見ることなく逝去された。第 6 章は、下村先生のご意向を受け、先生の原稿を礎に小山が考察を加え、共著として完成させたものである。ここに、下村先生の本プロジェクトへのご尽力に深く感謝するとともに、心より哀悼の意を表したい。

巻頭言

自然の生態系から学ぶべきこと

山極壽一
総合地球環境学研究所　所長

自然科学の用語を社会科学に当てはめたとき、さまざまな誤解が生じる。たとえば、共生（Symbiosis）という概念は、もともと敵対関係にあった異種の生物がしだいに共存関係を構築するようになったことを示し、双方が利益を生むだけでなく、片方だけが利益を得る場合も含まれる。ところが、社会学用語では同じ人間社会で共に助け合って生きることを指す。「とも生き」と言った方がいいかもしれない。

生態系（Ecosystem）も自然界では異種の生物が織り成す相互関係のネットワークだが、人間社会に当てはめると同じような志向性を持つ企業がともに利益を享受できるような安定したシステムを作ることを指す。だから、「循環型社会とエコシステム」と言ったときに、そういった誤解が含まれないように気を付けなければいけないと思う。

自然の生態系はエネルギーと物質の循環によって成り立っている。太陽から植物はエネルギーを得て、土中の養分を水の力で吸い上げて植物体（セルロース）を作り、それを動物たちが食べて胃や腸に共生するバクテリアによって分解して栄養にする。食う・食われる関係は動物間に生じ、動植物の死骸や排泄物はミミズや菌類などの分解者によって土になり、それが水に溶けて養分となる。エネルギーの利用率は食物段階によって約1割減少し、エネルギーは生物の活動によって大部分が失われる。物質は生態系の中を循環するが、一度熱に代わったエネルギーは放出されて循環しない。

こうした生態系の流れを模倣して「循環型社会」と呼ぶわけだが、またしても生物では異種間に生じる流れを、人間の社会では同種の社会に起きる資源の流れに当てはめている。大量生産・大量消費・大量廃棄という現状を、資源を循環させて再利用し、エネルギーを回収して地球環境への負荷拡大を防ごうという狙いである。これは日本では大量のごみ廃棄問題の解決から始まり、3R（リデュース、リユース、リサイクル）の促進につながり、一定の成果を上げていると思う。

しかし、そもそも大量生産・大量消費・大量廃棄がなぜ起こったのかを考えてみる必要がある。それは生産力と効率を上げるために、コストのかからない不可欠な戦略だったからである。同じものを大量に作って売れば生産コストはかからないし、それを個人の所有にして使い捨てにすれば、購買意識が高まる。その結果、消費者はみんなと同じ物を購入し、少しでも流行に遅れまいという意識を植え付けられてきた。企業の宣伝やマスメディアの役割がとても大きい時代を私たちは経験してきたのである。

それがAIの登場によって変わりつつある。生産過程にAIが参入することによって、個人が好む最適なものを大量生産と同じコストで個別に生産できるようになる。AIロボットが登場して、人が労働する必要がなくなる。ロボットは疲労しないから24時間ぶっ通しで働き続けることができる。ただし、電力がこれまでの数十倍、場合によっては数百倍必要になる。それをどこから持ってくるのか。

自然の生態系からは呼吸や運動や排せつによってエネルギーが放出され、もどってこない。これから始まるAI主導の機械化によるエコシステムでは、できるだけエネルギーの放出を防ぎ、それを再利用する工学的な試みが不可欠となるだろう。それはこれまで以上に環境に負荷をかけるものであってはならない。2009年に提唱されたプラネタリー・バウンダリー（惑星限界）を表す9つの指標のうち、2023年には6つが限界値を超え

た。後の 3 つも限界値に近づいている。もはやこの地球は人間が住める惑星ではなくなりつつあるのだ。新たなエネルギーの獲得に当たっては地球環境に配慮することが何より必要となる。

未来の選択肢として、汚染され、人間が住めなくなった地球を捨てて、火星をはじめとする地球外惑星に移住しようとする計画が富裕層などで進んでいる。しかし、それは決して選んではいけない方向性だと思う。あくまでわれわれ人類は地球で生まれ、地球で進化してきた生物なのである。この地球に住み続けるためには、これまで繁栄を遂げてきた自然の生態系をしっかり見習い、そのメカニズムを誤って解釈することなく、人間にも自然界にも合ったモデルを構築することが必要だ。本企画のねらいはそこにある。そのために、工学的な視野として私はエネルギーと AI の開発に加え、環境保全という課題を三位一体の政策目標として提案したい。さらに、これから人間による労働が消失していく時代が来るとすれば、労働とは違う生きがいで人々は社会を作っていかねばならなくなる。自然科学に加えて人文学、特に哲学が重要になる。これまで以上に文理融合の議論の舞台をぜひ積極的に作っていただきたいと思う。本書がその出発点になれば幸いである。

「産業生態系」概念の成立と事例分析から

1. バイオミミクリー4.0 から考える産業生態系・循環経済 ―自然のつながり・変化・再生・適応の視点を社会に活かす

香坂 玲、中川善典、藤平祥孝、内山愉太、内田正紀、東 善朗、太田和彦

1.1 なぜ今、バイオミミクリー4.0 か

今日、自然に学ぶ技術や設計をめぐる議論は、理念紹介の段階から、政策・産業・地域における実装の段階へ移りつつある。昆明・モントリオール生物多様性枠組は、2030 年までに生物多様性の損失を止め、反転させることを国際的なミッションとして掲げ、日本でも「生物多様性国家戦略 2023-2030」において 2030 年のネイチャーポジティブの実現が位置づけられた。また後述するように、第六次環境基本計画は、ネット・ゼロ、循環経済、ネイチャーポジティブを統合的に進める方向を示している。自然をめぐる政策は、経済、地域づくり、産業構造、企業価値の形成とますます不可分のものとなっている。

この変化は、産業界にとっても重要である。2024 年に策定された「ネイチャーポジティブ経済移行戦略」は、自然への配慮を単なるコストではなく、自然資本に根ざした新たな成長機会として位置づけた。また、2025 年の「ネイチャーポジティブ経済移行戦略ロードマップ（2025-2030 年）」は、企業、金融機関、投資家、消費者、地方公共団体等を含む主体が、2030 年に向けてどのような行動をとるべきかを整理している。つまり、自然に学ぶ技術や設計は、もはや個別技術の発想法にとどまらず、企業活動、地域循環共生圏、循環経済、ネイチャーポジティブ経営を接続する実装課題として捉える必要がある。

一方で、自然参照型技術、いわゆるネイチャーテクノロジーに対する見方も更新する必要がある。産業界には長らく、ネイチャーテクノロジーは発想としては魅力的だが、実現可能性が低く、製品化しても事業として広がりにくいという印象が残ってきたように見受けられる。しかし、ロータス効果を応用した建築外装材、サメ肌の微細構造に学んだ航空機用リブレットフィルム、カワセミの嘴形状に学んだ高速鉄道の空力設計など、自然参照型技術は、すでに複数の分野で性能向上、省エネルギー、環境負荷低減、長期運用の可能性を示している。少なくとも一群の技術については、「自然に学ぶ技術は本当に使えるのか」という段階を越え、「自然に学ぶ技術を、既存の産業プロセスや制度設計にどのように組み込むか」が問われる段階に入っているといえる。

自然界の機能や構造を技術へ翻訳し、市場や社会実装へ接続するには、学際的知見の統合、設計プロセスの明確化、便益の評価、事業化段階での意思決定、社会的受容性の確保、そして学ぶ対象となる自然の保全が不可欠である。そこで本提言では、自然参照型技術をどのような倫理的・法的・社会的条件の下で、どのように産業生態系や循環経済の設計へ組み込むかを示すために、「バイオミミクリー4.0」を提起する。

本稿の目的は、地域循環共生圏を実装単位としたネイチャーポジティブの実現に向けて、バイオミミクリー4.0 を、循環型社会において求められる産業生態系の設計・試行・評価を支える枠組みとして提示することにある。

1.2 背景と目的：自然の設計原理を社会システムへ

自然に学ぶ技術や設計には、さまざまな呼称がある。我々は今回の検討で、どの言葉を取り上げて議論を進めていくかをあらかじめ定めておきたい。そこで本稿では、ネイチャーテクノロジー(Nature Technology)、バイオミメティクス(Biomimetics)、バイオミミクリー(Biomimicry)の 3 つを対象に、その位置づけを整理する。

日本ではネイチャーテクノロジーという語が、書籍やテレビ番組などを通して比較的広く用いられており、「自然に学ぶものづくり」や「生物の特性を応用する技術」などとして紹介されてきた[1–2]。他方、研究論文における出現数(Web of Science、2025 年 5 月時点)を比較すると、「Nature Technology」を基準 1 とした場合、Biomimetics は約 70、Biomimicry は約 12 となり、国際的な学術文脈では Biomimetics および Biomimicry が主に用いられていることがわかる。この点から、「ネイチャーテクノロジー」は国内では一定の認知を得ているものの、国際的な可読性という点では限定的である。

そのうえで、Biomimetics と Biomimicry の違いを確認しておきたい。両者の違いを図 1.1 に示す。Biomimetics は、生物の形態や機能を模倣し、それを材料や構造、機械システムとして実装することを主眼とする工学的概念である。一方、Biomimicry は、個別の機能模倣にとどまらず、生態系の仕組みや持続可能性の原理を参照しながら、設計や社会システムそのものを構想する枠組みである。言い換えれば、Biomimetics が「どのように再現するか」という技術的課題に重心を置くのに対し、Biomimicry は「何を目指すべきか」という設計思想や価値基準までを含む概念といえる。本稿の検討対象は、単なる技術開発にとどまらず、持続可能性や人間と自然の関係の再構築を視野に入れた設計・実装のあり方である。このような問題設定に照らせば、個別技術の最適化を主軸とする Biomimetics よりも、より包括的な設計思想を提供する Biomimicry の方が適合的である。

以上より、本稿では以後、主として「バイオミミクリー(Biomimicry)」の用語を用いることとする。

バイオミメティクス（Biomimetics）

定義：生物の持つ機能や構造を観察・分析し、それを技術開発に応用する手法
提唱：1950 年代にアメリカの神経生理学者オットー・シュミットが提唱した概念であり、生物学に基づく発想を工学に転用することに端を発する
近況：電子顕微鏡などの観察技術の進歩により、生物の微細な構造や目に見えない機能（超音波、赤外線など）を模倣した技術が多く開発
要件：国際標準化機構（ISO）では、バイオミメティクスに関して次の 3 つの要件を示している
1. 生物の機能が解析されている
2. その機能が抽象化・モデル化されている
3. 生物そのものを利用せずに技術が展開
（バイオテクノロジーとは区別される）
総括：バイオミメティクスは「生物を模倣する技術」であるとともに、科学的な再現性と工学的応用を重視する「技術開発の手法」である。

バイオミミクリー（Biomimicry）

定義：環境問題への対応を目的として、自然界のしくみやプロセスを模倣しようとするアプローチ
提唱：1980 年代以降、大気汚染、水質汚濁、オゾン層破壊などの問題が顕在化する中で、自然界で培われてきたデザインや生産プロセスを見習いさまざまな問題を解決しようとする探求をジャニン・ベニュスが 1997 年の著書で提唱
近況：自然の中にすでに存在する秩序やルールを模倣することで、環境負荷をかけずに課題を解決する技術開発が期待されている。
アリゾナ州立大に「The Biomimicry Center」が設立され（2014）専門人材の育成が進む
総括：バイオミミクリーは、組織運営や社会システムの構築といった、より広い分野に応用されており、技術開発に焦点を当てるバイオミメティクスと大きく異なる。「環境と共生する社会づくりのための思想的アプローチ」といえる。

図 1.1 バイオミメティクスとバイオミミクリーの違い

[1] Emile H Ishida, Ryuzo Furukawa (2014) "Nature Technology: Creating a Fresh Approach to Technology and Lifestyle"

[2] 石田秀輝, 下村政嗣(2011)「自然にまなぶ!ネイチャー・テクノロジー ： 暮らしをかえる新素材・新技術 ： 115 Nature Tech」, 学研パブリッシング

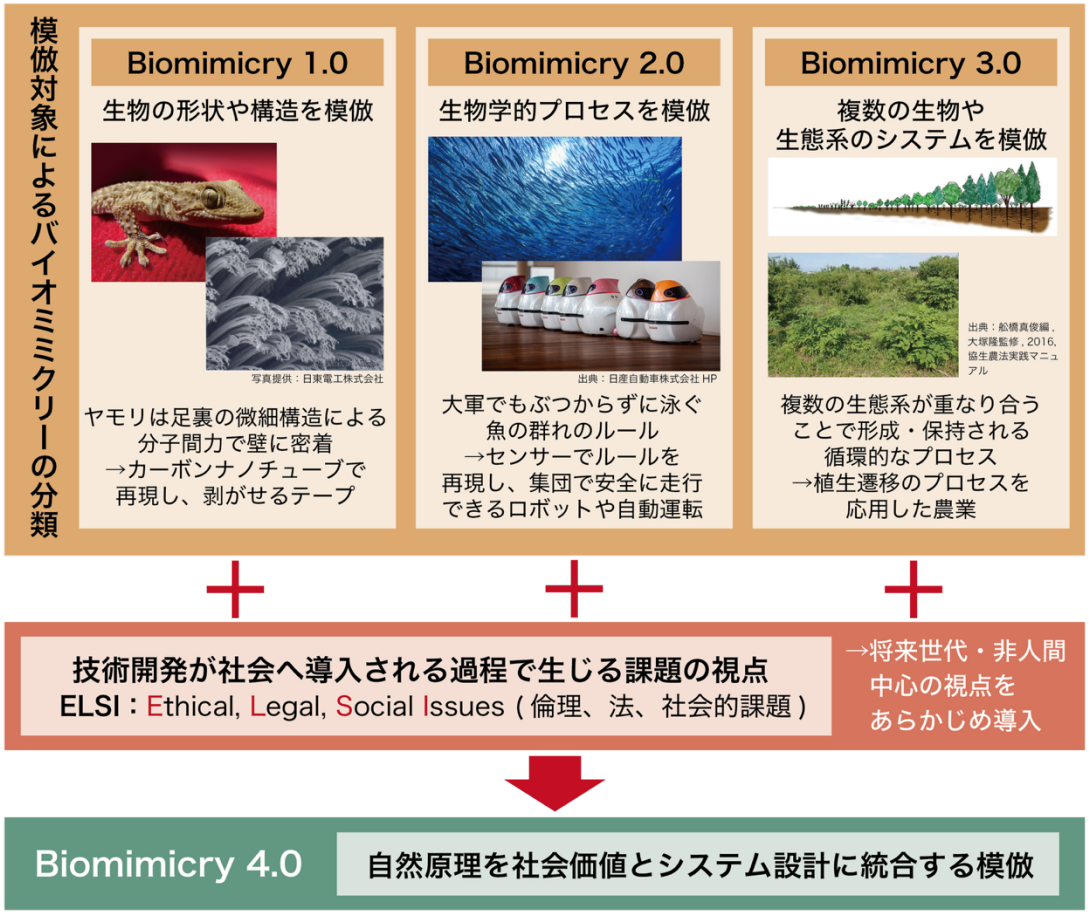


図 1.2　模倣対象によるバイオミミクリーの進化と社会・倫理統合型 4.0

（1.0〜3.0 は Hayes, 2020, Benyus, 2011 を参考に分類）

今日、バイオミミクリーの応用範囲は、単なる技術革新にとどまらず、建築、農業、都市デザイン、さらには社会構造の再設計にまで広がっている。本稿では、模倣対象の性質に応じて、バイオミミクリーの実践を次の三段階に整理する。すなわち、1.0 は生物の「形状」や「構造」の模倣、2.0 は生物の「プロセス」の模倣、3.0 は複数の生物や生態系の「システム」の模倣である（図 1.2）。もっとも、自然から学ぶ際の課題は必ずしも段階的に整理されるものではないため、技術が発展することで 1.0 から 2.0 へと分類が変化するという関係ではない。

これに対して、本稿が提唱するバイオミミクリー4.0 は、1.0〜3.0 のように模倣対象そのものを拡大する概念ではない。むしろ、どの段階のバイオミミクリーにも共通して求められる社会実装上の条件を明示するための枠組みである。近年では、材料や構造物といった旧来の開発対象に加え、自然の設計原理を社会システムに活かすことも期待されている。しかし、自然の仕組みを参照すること自体が、そのまま望ましい社会実装を保証するわけではない。ネイチャーポジティブやウェルビーイングを掲げる場合であっても、新しい技術の導入においては未経験のリスクや副作用を伴うこともある。そのため、法制度や倫理的観点についての検討が不可欠である。その検討の基盤となる枠組みが「ELSI（Ethical, Legal and Social Issues）」、すなわち倫理的・法的・社会的課題への配慮である。ELSI の設計・検証プロセスへの統合は、すべてのバイオミミクリーにおいて重視されるべき共通要件であり、4.0 とは、その要件を明示的に扱う段階である。

(1) バイオミミクリー4.0 が環境行政に果たす役割

現状、バイオミミクリーの活用事例は技術論に偏っており、社会システム全体の革新や政策的な取り組みへの活用は限定的といえる。本提言の目的は、バイオミミクリー4.0 を、環境行政におけるネイチャーポジティブ関連施策や地域循環共生圏の実践を設計・審査・対話する際の補助線として位置づけることにある。

現在の社会情勢を踏まえると、従来の技術開発の考え方や評価指標だけでは自然と共生した持続可能な社会を将来へつなぐことは容易ではなくなっている。例えば、AI の急速な進展は利便性を高める一方で、デジタル空間の巨大化・複雑化を招き、その結果として現実空間でのデータセンター建設や電力確保が新たな課題となっている。加えて、少子高齢化に伴う社会システムの維持も喫緊の課題だ。

こうした社会情勢を踏まえ、自然と社会の共生・共栄を目指す多様な視点からの技術開発や地域づくりの取り組みと、それを支える人材の育成が益々重要であり、バイオミミクリー4.0 はその道筋を示すために位置付けられる。

とくに、「第六次環境基本計画」が掲げるウェルビーイング、「ネイチャーポジティブ経済移行戦略ロードマップ(2025-2030)」が示す地域自然資本を活かした地域づくり、「令和 7 年版環境白書」が強調する「地域循環共生圏」の実践・実装、そして「地域生物多様性増進法」に基づく連携型の実施計画に対して、初期段階から倫理・法・社会的条件を織り込むための実務的な視点を提供することが、本提言の役割である。

(2) 提言の多層的な適用領域

バイオミミクリーの適用対象は、材料・製品、建築・空間、都市・地域、制度・対話といった複数の水準にまたがる。具体的には、これまで主に工学・製品の分野で用いられていたバイオミミクリーの方法論を、フューチャー・デザイン(将来世代の立場に立って今の社会の意思決定を行うための思考法、1.9 付録参照)や ELSI／RRI (Responsible Research and Innovation)、Bio-TRIZ (TRIZ: Теория решения изобретательских задач(発明的な問題を解決するための理論) の考えを発展させて生物機能を取り入れた創造的問題解決法)の運用といった手法により、拡張していく必要がある。こうした試みは、環境研究総合推進費「ネイチャーテクノロジーを活かした「負から正への転換」のための社会科学技術論と自然の模倣を通じた発想転換型イノベーションのための政策研究」(研究課題番号 1MF-2403)において実施した。

バイオミミクリー4.0 が追求するのは、個別技術の成功を、制度・地域・ガバナンスを含むより広い設計へ接続し、持続可能性と社会的妥当性の観点から再構成することである。バイオミミクリー1.0 および 2.0 に分類される技術は、すでに低エネルギーで効果的な技術基盤として多くの事例に支えられている。4.0 の目的は、そうした既存成果を否定することではなく、それらを活かしつつ、産業生態系をはじめとするより広い適用水準へ接続し、全体として整合的な実装へ導くことにある。表 1.1 は、自然参照型設計の適用水準を、製品から制度までの四層に整理し、それぞれが産業生態系の設計にどのような示唆を与えるかを示したものである。

表 1.1 自然参照型設計の主な適用水準と、産業生態系への拡張

適用水準	特徴	産業生態系への示唆
製品・材料	自然の形状や機能の参照 (カワセミの嘴→新幹線)	資源効率、省エネ、長寿命化製品デザインの効率化
建築・空間	自然の制御機能の参照 (魚群の動き→自動運転)	気候適応、運用負荷低減システムの最適化

都市・地域	生態系の循環・分散・多様性の参照 （循環・分業）	レジリエンス向上、資源循環 産業ネットワーク設計
制度・対話	自然との関係性をふまえた 合意形成・制度設計	協働、利益共有、説明責任 政策・ガバナンス統合

注 バイオミミクリー4.0 は、各適用水準に共通して、ELSI／RRI、再生寄与度、地域性、将来世代への配慮を確認するための横断的観点として位置づけられる。

1.3 自然のプロセスから見た社会・産業の設計原則への示唆

本節では、自然の「循環・再生・関係性・適応・多様性」から、社会・産業・技術の設計を問い直すための示唆を整理する（図 1.3）。尚、本節の内容は、自然からの模倣を主張するものではなく、可能性の一例であることに留意いただきたい。実装にあたっては、制度条件、費用負担、利益配分、説明責任、将来世代配慮といった実装条件とあわせて検討する必要がある。



図 1.3 自然のプロセスを模倣する設計原則とその応用先

(1) 循環（物質・エネルギー）の産業応用：カスケード型の設計

生態系の循環構造からは、資源の多段階利用や回収・再資源化を基調とするカスケード型の設計が示唆される。例えば森林や土壌は、物質を多段階で循環させ、ボトムアップの再生プロセスを駆動する。これを産業設計に引き寄せるなら、一次資源依存を減らし、回収・再資源化・再利用を多層で組み合わせた「カスケード循環」に反映することができるだろう。この発想は、資源循環率の向上と一次資源依存の低減という、経済的レジリエンスの強化にもつながる。

(2) 多様性の産業応用：分業・ネットワークによるレジリエンス強化

生態系の多様性は、単一最適化よりも、冗長性や代替ルートを備えた供給網や産業連携の重要性を示唆する。生態系は、多様な種の分業と相互依存により安定性と回復力（レジリエンス）を高めている。例えばサプライチェーンでは、中小企業、地域資源、市民協同体を結ぶネットワークの形成によって、余剰性と代替経路を備えた供給体制を設計することが課題となる。

(3) 他種間の共生、適応の産業応用:産業間の接続・自己修復の動的システムへの適用

他種間の共生は、主体間の協調や利益共有、地域内の資源循環、産業間の接続を考える手がかりとなる。さらに、菌糸体やサンゴにみられる環境応答的な自己修復・自己増殖のあり方は、需要や環境負荷の変化に応じて調整可能な動的システム設計を示唆する。この発想は、例えば産業システムにおいては、リアルタイムデータを用いながら、需要や環境負荷に応じた動的最適化を行い、Safe-to-Fail の発想を組み込んだアジャイルな設計を進めることが考えられる。

(4) 複数の空間・時間スケールの産業応用:共進化の観点

生態系を理解するには、ミクロな相互作用から広域景観まで(蟲瞰から鳥観まで)、また短期的変化から長期的変化まで(数日から数万年まで)、複数のスケールを往復して見る必要がある。この視点は、地域レベルの試行と制度レベルの改革を切り離さずに設計するうえで有益である。局所の試みだけでも、大域的な制度設計だけでも、持続的な移行・転換は実現しにくい。異なるスケールの相互作用を意識することが、共進化的な制度設計の前提となる。

以上の四点は、自然の循環・多様性・共生・スケールの原理から、産業生態系の設計への示唆を整理したものである。次に、これらの原理を実際の社会実装や政策、技術ツールへと落とし込むための方法論として、ELSI／RRI、デジタルツイン、AI／Bio-TRIZ 連携による発想支援の構想を示す。

1.4 ELSI／RRI フレーム:再生と適応を担保する倫理・ガバナンス

バイオミミクリーの社会実装では、デュアルユース、知財・利益配分、都市ジェントリフィケーション等の倫理課題が生じ得る。我々の研究では、設計段階から ELSI／RRI を内在化し、探索を支える「失敗の許容(Safe-to-Fail)」を統合するフレームを提示する。

(1) ELSI／RRI フレームとチェックリスト

このフレームは、事後的な点検のためだけのものではない。研究開発、試作、製品化、社会実装の各段階において、確認すべき項目と視座を揃えるための枠組みである。それぞれの段階において共通しているのは、生態系との共生、包摂的正義、将来世代配慮、Safe-to-Fail、説明責任、利益配分である。

倫理的課題を具体的に把握するためのチェックリスト(表 1.2)を以下に示す。実際には、このチェックリストのアジャイル型運用が想定される。

表 1.2 チェックリスト(共通、類型別)

【共通】

ID	項目	チェック項目
1	学際体制・責任分担	生態学・倫理学・社会学等の知見が初期段階から入っているか。誰が判断し、誰が説明責任を担うかが明確か。
2	ベースライン、中間目標、第三者確認	ベースラインと中間目標となる指標が設定され、第三者確認やレビューが可能な形になっているか。
3	Safe-to-Fail	失敗時の影響を最小化する計画があるか。停止条件、修正条件、撤退条件が明示されているか。
4	多様な参加・利益配分	多様なステークホルダーが参加できているか。便益と負担の分配が、過度に一部に偏らないか。

5	将来世代・寿命後対応	将来世代への影響、寿命後の回収・再利用・再資源化、維持管理責任が設計に含まれているか。
6	情報公開・継続監視	評価結果や前提条件が公開され、実装後も見直し・監視・異議申立てが可能か。

〔類型 A:生物資源・実証管理型〕

主に想定する案件:模倣元生物の採取、野外観察、伝統知・地域知の参照、試作品の野外実証

ID	項目	チェック項目
A1	持続可能な採取・生息域保全	採取量・方法・季節・場所は、個体群の再生力と生息域の連結性を損なわないか。
A2	伝統知・遺伝資源の権利	伝統知や遺伝資源を用いる場合、FPIC／ABS 等の同意・履行が確認されているか。
A3	封じ込め・回収	試作品や実証物が意図せず拡散しないよう、封じ込め・回収・停止措置が準備されているか。

〔類型 B:製品・材料・循環型〕

主に想定する案件:製品設計、材料開発、量産、供給網、循環経済設計

ID	項目	チェック項目
B1	LCA と循環設計	原材料調達から廃棄までの LCA と回収・再資源化設計で、環境負荷の転嫁を避けられているか。
B2	供給網の公正配分	一次生産者・労働者への利益配分が適正で、監査・是正・救済の仕組みがあるか。
B3	回収・再利用・再資源化	製品寿命終了後のリユース／リサイクル経路が確立し、責任主体が明確か。
B4	生態系回復への還元	収益と連動した自然回復への投資が、追加性・透明性・長期性を伴って設計されているか。

〔類型 C:都市・地域実装型〕

主に想定する案件:都市空間、地域インフラ、地域循環共生圏、地域政策、まちづくり

ID	項目	チェック項目
C1	都市緑地アクセス・環境格差	観察・学習・参加の場となる緑地や自然へのアクセスが、一部の層に過度に偏っていないか。
C2	住民排除・ジェントリフィケーション回避	導入により家賃高騰や住民排除が生じないか。便益が特定層に独占されないか。
C3	気候レジリエンス・可逆性	複数の気候シナリオの下でも機能を維持できるか。修正・縮小・撤退が可能な設計か。

注　本表は、案件ごとに「共通」のリストを確認した上で、必要な「類型」別モジュールを追加することを想定している。本表は固定的な完成版ではなく、アジャイル型の運用を前提とする。

(2) 社会受容性の課題と対話の強化

全国の主要 8 都市を対象とした市民アンケート調査の結果、バイオミミクリーの認知度は約 2 割にとどまり、倫理的配慮の必要性についても、他の技術（AI やゲノム編集）に比べて認識が低いことが示された。これは、広報不足というより、社会実装に必要な説明・対話・体験の回路が未整備であることを意味する。したがって、政策提言と並行して、一般向けの説明資材、都市緑地や博物館等を活用した体験機会、リビングラボ型の参加、オンラインでの可視化・対話の仕組みを整備することが求められる。

1.5 デジタルツインと AI：循環・再生を検証する適応設計基盤

バイオミミクリー4.0 は広域かつ複雑な対象を扱うため、初期段階で対象と範囲を限定し、デジタルツイン上で代替案を試行することが有効である。これにより、技術・制度の影響範囲を可視化し、ELSI／RRI の検討に具体性を与える。AI／Bio-TRIZ 連携による「発想支援 DX プラットフォーム」は、非専門家を含む多様な主体による発想支援の基盤となりうる。

(1) デジタルツインによる複雑な社会システム検証

デジタルツインは、広域・複雑な案件において、技術的・制度的影響を事前に比較し、関係者間で論点を共有するための有力な参照点となりうる。バイオミミクリーが地域循環共生圏やウェルビーイングといったビジョンにどのように寄与するか、また技術的・制度的な影響の範囲がどれくらいかを事前に可視化することで、初めて ELSI／RRI の検討に具体性を与えることができる。また、多人数が参加して議論するための共通の参照点となり、フューチャー・デザインで将来世代の視点を想像する手がかりにもなる。ただし、その有効性は、対象範囲、データ出所と更新頻度、不確実性の度合いなどに依存することには留意されたい。

(2) AI／Bio-TRIZ 連携による発想支援 DX プラットフォームの構想

AI／Bio-TRIZ 連携は、自然言語入力を通じて技術的矛盾の整理や生物機能候補の探索を支援する発想支援ツールとして導入が期待されている。従来の Bio-TRIZ システムは TRIZ の特性の理解が必要なため、非専門家には利用が困難だった。そこで、自然言語処理に適した LLM を用いて、問題を自然言語で入力し、技術的矛盾の特定と生物機能候補の探索を可能にするアーキテクチャが提案されている。この LLM の利用拡大により、Bio-TRIZ の活用がバイオミミクリーの活用へと広がり、ネイチャーポジティブの実現に向けた環境負荷軽減に寄与する可能性がある（図 1.4）。また、開発中の発想支援 DX プラットフォームは、技術的矛盾の特定と生物機能候補の探索を支援するだけでなく、回答の出力時に ELSI／RRI の観点を含めることで、研究開発の初期段階から倫理的側面を考慮することを促進する。これをフューチャー・デザインの知見と連携させることで、ユーザーにとって望ましい ELSI／RRI 的観点を反映させたプロトタイプ選択を支援できる可能性がある。本システムは LLM や RAG の技術を用いて発想を提案するものであり、その精度は用意したデータと入力された文章の質に左右されることに注意する必要がある。あくまで「発想支援」システムであり、最終的な判断は使用する人間がするものである。

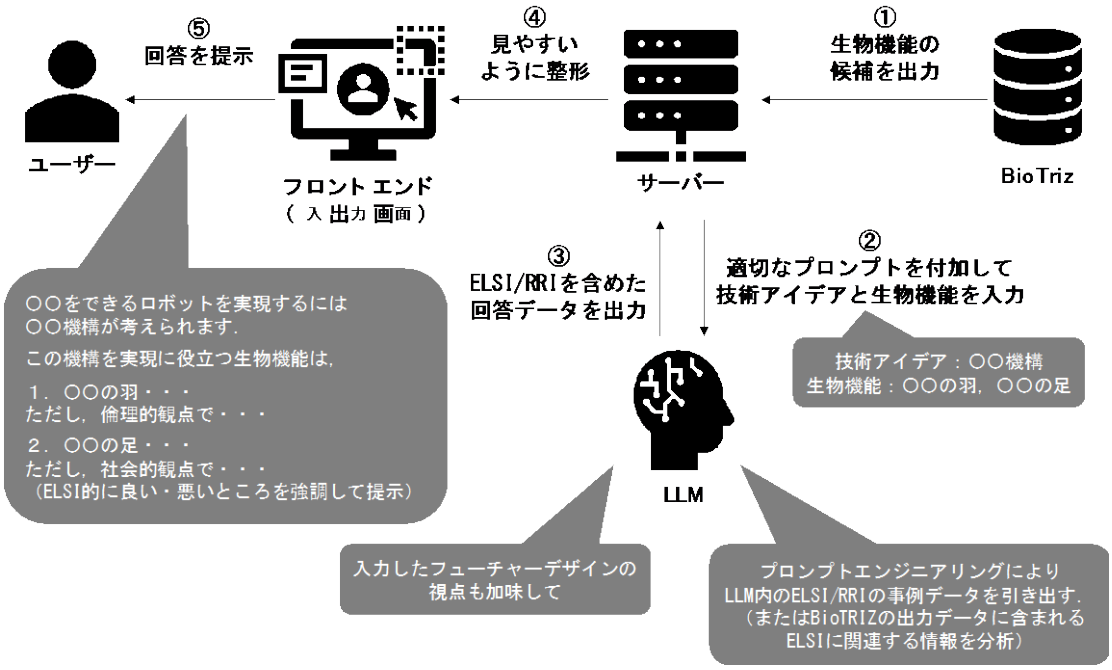


図 1.4　提案する発想支援 DX プラットフォームの構成と処理の流れ（回答の出力時）

1.6 産業生態系／循環経済設計：実装ロードマップ

提言の実装には、設計前の段階から実装後の評価まで、段階的プロセスを踏む必要がある。

(1) 段階的実装計画（設計前、設計中、実装後）の詳細

段階 A[設計前]：対象案件の範囲を設定し、地域資源、生態系、利害関係者の基礎データを取得する（蟲瞰＋景観スケール）。必要に応じてフューチャー・デザイン等を用い、将来像と評価軸の初期設定を行う。

段階 B[設計中]：必要に応じてデジタルツイン等を用いて複数案を比較（循環率・ネイチャーポジティブ効果・社会包摂 KPI）し、Safe-to-Fail の考え方に基づき、小規模で可逆的な試行を行う。

段階 C[実装後]：ネイチャーポジティブ指標で効果を検証し、利益配分、説明責任、修正・撤退条件を含めてレビューする。生態系・包摂・学習・循環性の各観点からモニタリングを継続・公開する。

(2) 実装を支える制度と政策への反映

本提言は、第一に、「第六次環境基本計画」および「ネイチャーポジティブ経済移行戦略ロードマップ」に沿った実証・支援事業の審査項目に、ELSI／RRI と Safe-to-Fail の観点を組み込むこと、第二に、地域循環共生圏の実践・実装や地域生物多様性増進法に基づく連携型実施計画を担う自治体向けに、チェックリスト、対話プロセス、モニタリング項目を含む実務マニュアルを整備すること、第三に、市民向けの説明資料とリビングラボの支援を通じて、初期段階の対話と小規模試行を制度的に支えることを念頭に置く。

とりわけ、市民参加を伴う実装を支える観点からは、都市緑地や再生古民家等での教育・体験の場の拡充や、市民参加の小規模実装を束ねる制度が求められる。市民科学の知見やイヴァン・イリイチの「コンヴィヴィアル・テクノロジー」が示唆するように、市民が修理・改良に主体的に関与できる仕組みは、ボトムアップ型の試行錯誤を促すうえで重要である。

これらの提言の実現にあたっては、環境省に加え、農林水産省、外務省、国土交通省、総務省、内閣官房を含めた関連省庁と連携し、第七次環境基本計画等の政府戦略への反映も視野に入れていく必要がある。

1.7 期待される効果：地域の固有性を活かした産業・地域のレジリエンス向上

本提言に基づくバイオミミクリー4.0 の設計・実装、つまり ELSI／RRI の内在化、フューチャー・デザインとデジタルツインの併用が機能した場合、短期的には、自然を参照したさまざまな取り組みにあたっての論点の見落としの減少、意思決定過程の透明性向上、対話の初期化、評価軸の共有が期待される。

中長期的には、地域実装における利益配分や住民排除リスクの早期把握、試行錯誤の可逆性確保、地域資源と事業の整合性向上が期待される。これらは具体的には、資源循環率の向上と一次資源依存の低減（カスケード循環）、ネットワーク分業と冗長化による故障耐性・回復力の強化（レジリエンスの向上）として現れうる。また、需要・環境負荷に応じた動的最適化（適応）と失敗許容設計の普及として現れうる。すなわち、バイオミミクリー4.0 は、地域の固有性を活かしながら、産業と地域の双方のレジリエンスを高める枠組みとなりうる。

1.8 結語

本提言では、自然から見出される循環、再生、分業、適応の原理を、産業生態系や循環経済の設計に活かすための実装枠組みとして、バイオミミクリー4.0 を提示した。本提言の現時点での意義は、自然参照型の技術・制度・地域実装を進める際に、どの段階で、何を確認し、誰を参加主体として位置づけるべきかを整理した点にある。

循環型社会における産業生態系とは、廃棄物を減らす仕組みや、個別企業の省資源化を積み上げた供給網にとどまるものではない。自然の循環・分業・多様性・適応の原理を手がかりに、資源を多段階に利用し、担い手の多様性と冗長性を確保し、局所的な失調を全体に波及させず、地域ごとの固有性と再生能力を高めるような、生産・流通・消費・回収をささえる技術や制度、そして対話の編成として構想されるべきものである。

バイオミミクリー4.0 の意義は、自然の原理に学びつつ、技術、政策、倫理、ガバナンスを統合し、循環型社会にふさわしい産業生態系への移行を具体化する道筋を示せる点にある。今後は、ケースごとの適用検証、技術類型別モジュールの精緻化、評価指標の具体化、市民向け説明資材の整備を通じて、実装可能性を高めていく必要がある。国際的な発信についても、まずは関連規格や政策対話の場との接続可能性を整理し、そのうえで標準化や国際的ルール形成への寄与のあり方を段階的に検討していくことが求められるだろう。

1.9 付録

フューチャー・デザインの産業生態系／循環経済設計への応用

我々のプロジェクトでは、仮想将来人の視点を用いたフューチャーデザイン・ワークショップを通じ、2055 年を見据えた社会移行プロセスを可視化し、産業生態系にも応用可能なコンセプトを抽出している。付録として、フューチャー・デザインの概要を紹介し、産業生態系への応用について示す。

(1) フューチャー・デザインの概要

この手法は、議論や検討に将来世代の視点や世代間倫理を取り入れるものである。フューチャー・デザインで用いるのは、自然や社会の持続可能性を脅かす様々な問題について、なぜ解決が難しいのかを考えることから発案された「未来人」の視点であり[3]、16 世紀後半の北米大陸でイロコイ族が重要な決定を下す際に 7 世代先まで考慮したことに由来する[4]。例えば、今日のマイクロプラスチックによる海洋汚染の一因となっているナイロンは、約 100 年前に開発され、人々はその恩恵を受けてきた。開発された時代の視点では、材料市場に必要とされる製品を提供することで産業振興に貢献しており、ネガティブな影響が認識されたのは相当時間を経過した未来の出来事だ。人や社会の振る舞いを規定する様々なマーケットは、現代人たちが財を交換する仕組みである。同様に民主主義も、現代人たちが自分の意思を表明する仕組みである。つまり、現代社会を規定する主要な仕組みに、将来人が参加できていないことが課題となっており、トピックに応じて未来人の視点を取り入れるフューチャー・デザインを用いる意義は大きいと考えられる。

手順の概要としては、現代人である参加者がワークショップ形式で以下の段階を経ることにより、「仮想将来人」になりきり、検討しようとする生物模倣の活用をデザインする。図 1.5 に示すように、1)事前情報を踏まえ、2)パスト・デザイン会議を行い、3)フューチャー・デザイン討議を実施する。また、オンライン会議システムでの実施も可能である。

(2) 産業生態系／循環経済設計への応用

フューチャー・デザインの参加者にインタビューを実施した研究[5–6]では、未来からの視点を用いることにより、持続可能な自然環境と持続可能な社会を未来の世代に遺す技術開発の検討が期待できることが明らかになっている。また、フューチャー・デザインで議論された内容の一例(図 1.6)では、参加者は現在の「当たり前」が 30 年後にどうなっているか、企業、生活者、地方、行政とったステークホルダーごとに考えており、産業生態系や循環経済設計に必要な議論が行われたと換言できる。様々な業種や分野から産業生態系／循環経**済設**計にアプローチするにあたり、できることから積み上げていくのではなく、どのような未来を描くかをあらかじめ議論しておくことが重要である。

---

[3] Saijo T (2020) Future design: Bequeathing sustainable natural environments and sustainable societies to future generations, Sustainability 12 (16), 6467

[4] Graham LM (2008) "Reparations, Self-Determination and the Seventh Generation", Harvard Human Rights Journal. 21: 47, https://journals.law.harvard.edu/hrj/wp-content/uploads/sites/83/2020/06/21.1HHRJ47-Graham.pdf (アクセス:2025/7/29)

[5] Nakagawa Y, Hara K, Saijo T (2017) Becoming Sympathetic to the Needs of Future Generations: A Phenomenological Study of Participation in Future Design Workshops, SDES-2017-4, Kochi University of Technology

[6] Nishimura N, Inoue N, Masuhara H, Musha T (2020) Impact of future design on workshop participants' time preferences. Sustainability, 12(18), 7796

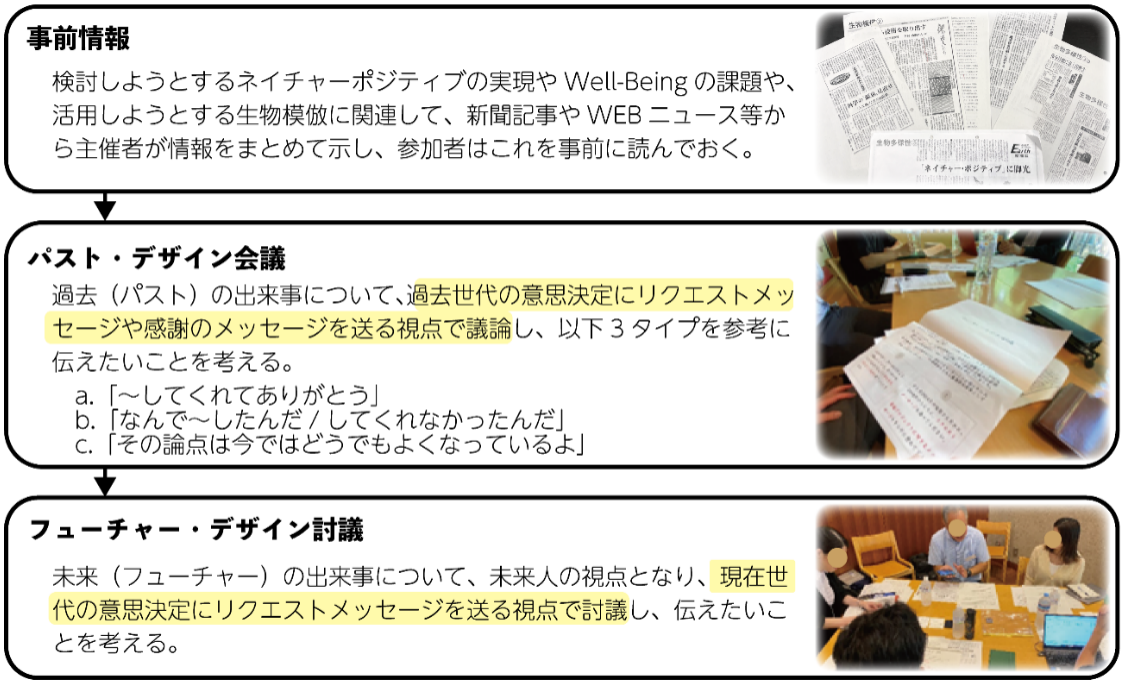


図 1.5　フューチャー・デザインの手順

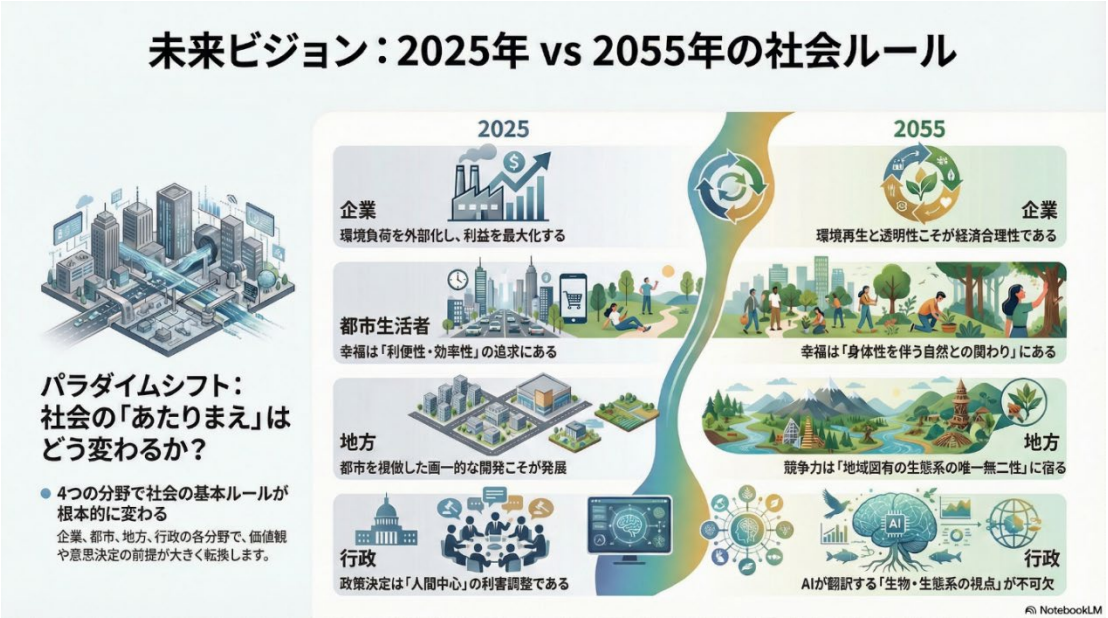


図 1.6　フューチャー・デザインに参加したある班の分析アウトプット例

2. 循環経済を実現するためのエコシステムの必要性

梅田 靖

2.1 はじめに

近年、循環経済が国内外で注目を集めている。2010 年代初頭にエレンマッカーサー財団が提唱し、2015 年に EU が循環経済政策パッケージを発表して以来、循環経済の考え方は急速に広まってきた。その考え方は一言でいうと、できるだけ地球に負荷をかけないように、資源を循環させつつ活用し、その循環に経済性を持たせること。すなわち、循環が当たり前に成り立つ経済、社会を作ることであると考えている。わが国においても、2023 年に経産省が「成長志向型の資源自律経済戦略」[7]を発表して以来、2024 年に第五次循環型社会形成推進基本計画[8]が公表され、2025 年に資源有効利用促進法が改正[9]され、さらに、2026 年 4 月に「循環経済行動計画」[10]が公表された。この間、我が国においても循環経済政策が徐々に具体化するとともに、時節柄、資源供給不安に対応する経済安全保障政策の側面が強まってきている。

長期的に見ても、持続可能社会を実現するために循環経済への移行は不可欠であり、そのためには、製造業が価値共創エコシステムに移行することが、特に、我が国において循環経済を実現するためには必要不可欠であると考えている。

本章では、循環経済実現のために求められていることを整理するとともに、その実現手段として価値共創エコシステムが必須であることを論じる。さらに、価値共創エコシステムの片鱗を表す事例を示すと共に、価値共創エコシステムを設計するためのヒントを議論する。

2.2 循環経済において求められること

(1) 循環経済の概要

循環経済は、エレンマッカーサー財団によると「素材が決してゴミにならず、自然が再生されるシステム」と定義されている[11]。ISO では 59004:2024 において「持続可能な発展に貢献しつつ、資源の価値を回復、維持、向上させることによって、資源の循環的な流れを維持するための全般的なアプローチを用いる経済システム」(筆者訳)と定義されている[12]。循環経済は、材料のリサイクルだけが推奨されているわけではなく、自然資本の「Regenerate」、資源投入を減らす「Narrow」、循環速度を遅くする「Slow」、循環を閉じる「Close」の 4 つがよく標語として用いられることが示すように、総合的なアプローチである。ただし本章では、自然資本関係の議論は扱わず、自動車、家電製品、パソコンなどの工業製品の製造、使用、メンテナンス、循環について議論する。

循環経済は、資源枯渇、資源採掘に伴う環境負荷、廃棄物処理、廃棄物の越境移動問題、海洋プラスチック問題など多岐にわたる課題と関係しているが、本質的には、経済成長を、資源消費や環境負荷の増大から切り

---

[7] 経済産業省: 成長志向型の資源自律経済戦略, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shigen_jiritsu/pdf/20230331_1.pdf.

[8] 環境省: 第五次循環型社会形成推進基本計画, https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html.

[9] 経済産業省: 改正資源有効利用促進法, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/pdf/013_03_00.pdf.

[10] 内閣官房: 循環経済行動計画, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/economiccirculation/index.html.

[11] https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview?utm_source=chatgpt.com

[12] ISO59004:2024 “Circular economy － Vocabulary, principles and guidance for implementation,” ISO, 2024.

離す「デカップリング」[13]を追求し、環境負荷をプラネタリーバウンダリ[14]の範囲に収めることを目標としている。その手段として循環経済は二つの柱から構成されると整理できる。第一の柱は、「リサイクルからリソーシング」である。すなわち、廃棄物を埋立処分することを回避するために再資源化するリサイクルよりも、製品製造の際に再生材の利用を前提とする考え方である。喜多川はこれを「再生なくして製造なし」と呼んでいる[15]。後述するようにこの考え方は、EU では電池規則、ELV 規則などで実装されつつある。これは、製造業、リサイクル業にとって大きな変化を促すものである。

第 2 の柱は、従来型の大量生産・大量販売・大量廃棄を前提とした社会からの転換である。これは、既存の資本主義経済の枠組みの中で循環を成立させようとする 1990 年代からわが国が志向してきた「循環型社会」の発想に留まるものではなく、経済システムそのものの変革を目指す点に特徴がある。すなわち、環境問題への対処を個別的・付加的な施策として扱うのではなく、市場競争の座標軸そのものを変更し、価値創造および価値提供のあり方を再構築することが求められる。このような変革の方向性として、近年ではシェアリング、サブスクリプション、PaaS（Product as a Service）などの新たなビジネスモデルが注目されている。これらは製品の所有ではなく利用価値の提供を重視するものであり、資源利用効率の向上に寄与する可能性がある。また、製品の長寿命化や長期使用を前提とした設計・運用も重要な要素である。具体的には、メンテナンス、アップグレード、リマニュファクチャリングなどを通じて、製品や部品の価値を可能な限り長期間維持することが重視される。これは Slow に通じる。これらを通じて、循環経済は「循環」が当たり前に成り立つ経済、社会を作ろうとしている。

循環経済の実現に向けて EU は、金融、企業情報開示、情報システム、重要鉱物など多方面で総合的な政策手段を取っているが、ここでは特にエコデザインに触れておきたい。従来の一般的な意味でのエコデザインとは、製品にリサイクル性、修理容易性、長寿命、リユース性など種々の環境に良い性質を付け加えるように製品設計を変更することを意味する。2024 年に成立した「エコデザイン規則」(ESPR)[16]においては、このような製品設計に対する要求（性能要求と呼ばれる）ももちろん規定されているがそれに加えて、ここでは 2 つの点に注目する。1 つは、製品の材料、環境情報、リサイクル性、修理情報などをデジタルで追跡・共有する仕組みである「デジタル製品パスポート」を義務づけた点である。もう 1 つは、製品のライフサイクルマネジメントが求められている点である。従来は、リサイクル性設計をしたものの、それがリサイクルを実施する段階で実効性を持たないということが多々あり、エコデザインがメーカーのアリバイづくりに使われる側面があったが、これを防止し、エコデザインに実効性を持たせることが求められている。以上のエコデザイン規則は、製品の設計に加えて、製品の循環システムの構築も求められている点に注目すべきである。

(2) 循環型社会と循環経済の違い

わが国では、1990 年後半から循環型社会の構築を進めてきた。資源循環を目指すという意味では、循環型社会と循環経済は似ているとも言える。循環型社会が議論されていた当時のわが国では、最も注目されていた課題は埋立処分場の枯渇問題であった。このため、埋立処分場に運んでいた廃棄物をリサイクルして、埋立処分量を減らすことが大きなミッションであった。従って廃棄物行政の中の話であるし、ゴミをリサイクルすればコ

---

[13] UNEP International Resource Panel: Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth, 2011.

[14] Rockström et al.: A safe operating space for humanity, Nature, 461, 472-475, 2009.

[15] 喜多川和典；サーキュラーエコノミーの動向について，第 4 回　成長志向型の資源自律経済デザイン研究会, 2022, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shigen_jiritsu/pdf/004_03_00.pdf.

[16] EU: Regulation (EU) 2024/1781 Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), 2024.

ストがかかる、その公平な負担が政策上の大きな課題であった。コンセプトとして 3R、すなわち、リデュース、リユース、リサイクルという考え方はあったものの、主として実施されたのは、ゴミをリサイクル処理するということであり、これが大量生産＋大量リサイクル社会に帰着していったと考えている。この過程で、動脈産業、静脈産業という整理が定着したのではないか。

循環経済は、循環型社会を発展させ、かつそこから脱却するものである。廃棄物政策に限定されず、より、総合的な政策、特に、経済政策の側面が強い点に特徴がある。両者を簡単に比較すると、循環型社会が廃棄物処理、廃棄物処理場枯渇対策を目的として、環境対策の一環で実施され、廃棄物の「社会的責任」、廃棄物処理の社会的公平性を追求していた。循環経済は、廃棄物処理に加えて資源枯渇、資源供給不安対策の側面も持ち、経済成長・Well-being の向上と資源消費のデカップリングを目的としている。また、環境対策に留まらず、サステナビリティ、すなわち、環境、社会、経済の 3 目的の達成、特に、循環が経済的に成立する、企業競争力が向上し、雇用が拡大することを狙っている。その意味で循環経済はまさに「経済」なのである。従って、循環経済は製造側の変革も促し、ビジネスの仕組みを変えて、PaaS (Product as a Service)やシェアリングなど価値提供手段の脱大量販売も推進する。

最後に、わが国と EU の循環経済政策の違いを簡単に述べる。EU の循環経済政策は上述のようにまさに総合的な政策であり、特に、エコデザインを重視している点に特徴がある。わが国の政策は、この総合性とエコデザインの活用が弱く、資源のリサイクルにばかり目を向けている傾向がある。この辺は循環型社会を引きずっているといって良いであろう。

(3) リソーシング:リサイクル材争奪戦

2.2(1) において、循環経済の 2 本柱をリソーシングと脱大量生産と整理したが、目下急速に具現化が進んでいるのはリソーシングの方である。これは規制が主なドライビングフォースとなっている。例えば、EU の電池規則[17]では、電池を製造する際に、材料のコバルト、ニッケル、リチウムについて最低限使用しなければならないリサイクル材料の割合が規定されている。自動車に関する ELV 規則案[18]においても、新車製造のためのプラスチックに一定割合以上のリサイクル材を使用しなければならず、そのうち、20%は廃自動車から発生したものでなければならない。包装・包装廃棄物規則(PPWR)[19]においても、包装材のリサイクル材最低含有率が規定されている。わが国では数値的な規制は導入されていないものの、改正資源有効利用促進法において、プラスチックを利用する製品（当面、自動車、家電 4 品目、容器包装）を製造するメーカーにリサイクル材の使用計画と実績報告を義務づけている。また、2026 年 4 月に発表された「循環経済行動計画」においては「取組が進んでいる製品については、令和 10 年度までに段階的に一定の再生プラスチック利用率の義務化を行うことを検討」と踏み込んだ。

以上のように、リソーシングは、製品製造において循環された資源を実際に使用することを義務づける点において、循環型社会の 3R とは随分様相が異なる。例えば、家電リサイクル法では廃家電品からどれだけの割合

---

[17] EU: Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1542&utm_source=chatgpt.com.

[18] EU: Regulation (EU) 2026/1738 on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32026R1738&utm_source=chatgpt.com.

[19] EU: Regulation (EU) 2025/40 on packaging and packaging waste, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32025R0040&utm_source=chatgpt.com.

がリサイクルルートに回ったかを示すリサイクル率(正確には再商品化率)の最低値が規定されているが、製品への使用義務はなかった。

従って、リソーシングがメーカーに与える影響は大きく異なる。リソーシングを実現するためには、製造に必要な循環資源の質と量を継続的に確保することが必要不可欠である。これは、産業構造に大きな変化をもたらす。例えば、自動車工業会は、ELV 規則に適合した割合で再生プラスチックを使用して自動車の国内製造する際の必要量を試算している[20]が、それによると 2045 年には約 20 万トンの再生プラスチックが不足することになる。現状で自動車製造に利用可能な再生プラスチックは年間約 2〜3 万トンかと思われるので、これは相当大きな構造変革が求められている。

(4) 動脈産業・静脈産業

2.2(3) で述べたリソーシングを達成、すなわち、循環資源の量と質の継続的な確保を達成するために、「動静脈連携」というキーワードがよく用いられる。動静脈連携を動脈産業と静脈産業のそれぞれの業態を維持したまま、循環資源をやり取りするだけの意味であるとすれば、筆者はこれではリソーシングの達成は不可能であると考えている。

動静脈連携の課題として 2 つ挙げられる。1 つは、資源の循環を実現するためには、動脈工程、静脈工程に加えて、使用段階(使用後の回収段階を含む)の役割が極めて重要である。しかしながら、動静脈連携の概念にはこの使用段階に関わるステークホルダー、例えば使用者、の連携が考慮されておらず、安定的な循環が成立しない危険性が高い。もう 1 つは、動脈産業と静脈産業の間の生産に関する考え方の違いである。ものづくりにおいてはいわゆる Q(品質)、C(コスト)、D(納期)が重要であると言われる。動脈側の製造業は、まず生産すべき製品の設計図があり、生産計画がある、製品 pull 型の生産である。すなわち、品質は設計で決まっており、コストは大量に作れば安くなる、サプライチェーンにはコストに合う材料や部品が供給される。納期に関しても生産計画が厳守される。一方で、静脈側のリサイクル業や廃棄物処理業においては、処理対象である廃棄物の種類や量が日々変わり、予見不可能である。そのため、入って来た廃棄物 push 型の生産となる。品質、コスト、納期どれをとっても、入って来た廃棄物次第で大きく変動する。すなわち、動脈工程は要求する質と量の材料や部品が常に供給されることを前提とした生産システムであり、静脈工程は、入荷する廃棄物によって QCD が大きく変動する仕組みになっている。従って、これらのメンタリティの壁を崩し、生産側はある程度の変動を許容するような生産システムを、リサイクル側は生産する財の品質を向上させ、量質共に安定的に供給する仕組みを導入し、さらには両者の間での、さらには、使用段階のステークホルダーも加えた密な情報交換が必要となる。このようないわば融合的な繋がりができない限り、生産に直結するような資源循環は実現できない。解体ロボットなどを使いながら自動車リサイクルの高度化を目指す BlueRebirth プロジェクト[21]では、「動静脈融合」という考え方を提唱している(使用段階のステークホルダーの巻き込みまでは言及されていないが)。実際、2.2(3)に挙げたリソーシングに関する法規制を受けて、この間、わが国でも生産側とリサイクル側の意思疎通はかなり進捗した。

以上のように、製品ライフサイクルの異なった段階の異なったステークホルダーが共通の目的と異なる役割を担って共創することが、循環経済を駆動する循環システムを構築する必要条件になっていると考えられる。

---

[20] 自動車工業会: 再生材活用促進に向けた自工会の取組みについて, 2025, https://www.jama.or.jp/operation/ecology/recycle/pdf/promote_use_of_recycled_materials.pdf.

[21] BlueRebirth, https://www.bluerebirth.jp.

2.3 価値共創エコシステム

筆者らは 2.2 で述べた循環経済を実現するためには、動脈産業と静脈産業の垣根を崩した共創関係の構築が必要であることを 2.2(4)で述べたが、この発展形として、メーカー、情報プラットフォーマー、ロジスティクス業者、メンテナンス業者、ユーザ企業、生活者など様々なステークホルダーがネットワークを構成し、全体として価値を創出する「価値共創エコシステム」を構築する必要があると考えている。

(1) 価値共創エコシステムの必要性

2.2 で述べた循環経済の実現を考えた時、リソーシングを実現するにしても、資源循環に関わる多種多様な段階があり、一社ではとても対応することができない。また、2.2(1)で議論したように循環経済の目標はあくまでデカップリングであり、脱大量生産・大量消費・大量廃棄である。であるとすると、ユーザが受け取る価値の源泉をハードウェアとしての製品から、製品が提供する経験価値に転換する必要がある。そのためには、ハードウェアの付加価値を最大化するように多様な付加サービスを提供したり、製品販売以外の価値提供形態である製品サービスシステム(PSS)、例えば、PaaS、シェアリング、レンタル、サブスクなどを普及させる必要がある。また、循環経済は一義的には製品の長寿命化、長期使用を志向している。改正資源有効利用促進法では、これらをCE(Circular Economy)コマースと呼び、普及促進を図っている。いずれにせよ、このような価値観の脱物質化を実現することも一社では実現不可能であり、多様な業種が連携する必要がある。以上 2 つの理由から、様々なステークホルダーが連携した産業エコシステムが必要条件となる。当然、このステークホルダーの中には生活者も含まれるべきである。

もう一つ重要なことは「共創」が必要だと考えている。すなわち、エコシステムに参画するステークホルダー間で目標を共有し、それぞれが異なる役割を果たすことでエコシステム全体の価値を最大化することがデカップリングのためには必要であると考える。特に、循環経済の場合、コストと利益の不整合が起こることが多い。例えば、修理性設計を行って、コストをかけて修理し易い製品をメーカーが設計したとしても、そのメリットを享受するのは修理業者であり、メーカーが修理ビジネスを実施しなかった場合はそのメリットを享受できない。循環経済の場合、このような事象は資源循環の様々な段階で生じる。従って、エコシステムの中に何らかの利益の調整メカニズムが必要である。昔の言葉で言う「三方よし」のような概念が求められる。

(2) 価値共創エコシステムの考え方

図 2.1 に本章の価値共創エコシステムのイメージを示す。この図が示すように、価値共創エコシステムは様々なステークホルダーのネットワークであり、全体として価値を創出し、デカップリングを推進する。形態としては、インダストリアル・エコロジー[22]の一種と言って良いかもしれない。ただし、1990 年代に生まれたインダストリアル・エコロジーは、廃棄物のゼロ・エミッションを当初の目的としており、地域内で、ある事業所の廃棄物や副産物を別の事業所が使うという関係のネットワークがそもそもの概念であると理解している。価値共創エコシステムは、もちろん、地域内で距離的に近いステークホルダーが連携してこのようなエコシステムを構成する場合もあるが、それに加えて、サプライチェーン、バリューチェーンに代表される空間的には制約されない価値の需給関係の場合も想定している。この意味では、EU の「循環経済行動計画(2020)」[23]で示される industrial ecosystems、すなわち、「単一企業の枠を超え、バリューチェーン全体や異業種間で連携し、資源やエネルギ

[22] R. Clift and A. Druckman (eds.): Taking Stock of Industrial Ecology, Springer, DOI 10.1007/978-3-319-20571-7, 2016.

[23] EU: A new Circular Economy Action Plan - For a cleaner and more competitive Europe, 2020, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098&utm_source=chatgpt.com.

ーの無駄を極限まで減らす仕組み」に近い考え方である。近年は、「バリューネットワーク」という用語も使われる[6]が、これも類似する概念である。

インダストリアル・エコロジーとの違いで言えば、インダストリアル・エコロジーではノード(事業者)間でのやり取りは基本的にはものであるが、価値共創エコシステムにおいては、もの、情報、お金など様々な実体をやり取りすることにより、2.2(4)で議論したようなステークホルダー同志が共通の目的と異なる役割を担って共創関係を構築する点が異なる。さらに、2.3(1)で述べたように、「共創」がキーワードである。これは、過度に競争的にならず、例えば、利益の調整メカニズムを保有することを想定している。生物界における生態系、エコシステムでは、参加者同士は完全に自律分散的であり、共通の目的は持たない点が、この価値共創エコシステムとの違いである。

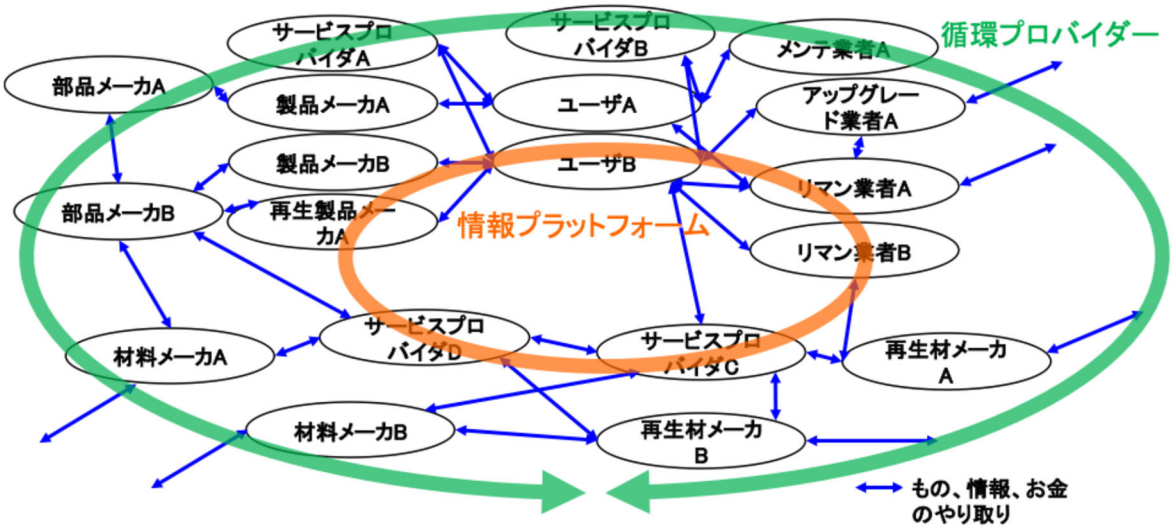


図 2.1　価値共創エコシステムのイメージ

以上のように、価値共創エコシステムにおいては、参加する多様なステークホルダーが、平等な立場で共通の目的を持ち、かつ、異なる役割を果たすことにより、全体としての価値向上とデカップリングを推進することを期待している。このような価値共創エコシステムを構築するためには、情報プラットフォームをインフラストラクチャとして用意し、ステークホルダー間の密な情報交換を促進すると共に、次項(3)で述べる「循環プロバイダー」が重要な役割を担うと考えている。

(3) 価値共創エコシステムを設計するために

本項では、(2)で述べた価値共創エコシステムをどのように設計できるかを考えたい。

① Vision-Meso-Seeds (VMS)モデル

そもそも論として、持続可能社会の実現を考えたとき、我が国では技術開発志向が強く、先端技術開発がイノベーションを起こし、その結果として社会変革が起きるという古典的なリニアモデルの認識が強いのではないか。図 2.2 は、Seeds レベルにあるキラーテクノロジーによって社会ビジョンが達成されるリニアモデルのイメージを示している。しかし、持続可能性の問題に関しては、このような構造で問題を解決することはできないのではないか。そう考える理由は、図 2.3 に示すように、Seeds レベルと Vision の間には、社会そのものを表す中間層があるからである。これを Meso レベルと呼び、図 2.3 全体を Vision-Meso-Seeds (VMS)モデルと呼んでい

る。Seeds レベル、具体的には実験室内でいかに優れた技術が開発されようと、それが Meso レベルで社会に普及するか否かは、その技術の優劣とは直接関係ない要因、例えば、経済性、社会制度などで決まる。たとえその技術が Meso レベルで普及したとしても、想定されない副査用(リバウンド効果、バックファイヤー)が起きたり、その技術の普及によって社会から退場した旧来技術の方が実は Vision 実現に貢献していたといったことは容易に起こりうる。実際、実験室内で優れた性能を発揮するリサイクル技術が、実社会に適用されると、経済性が合わない、リサイクル対象の資源が集まらない、集まったとしても不純物が多すぎて本来の性能が発揮できないなどの理由で Meso レベルで活用されない例は多い。このことは、従来の技術開発だけでなく、Meso レベルの設計が重要であることを示している。実際、欧州では、サーキュラー・エコノミー社会はどのような姿になるのか、サーキュラー・エコノミー社会にどのように移行するかという議論が盛んであるが、これらは Meso レベルの設計について議論していると位置づけられる。さらには、本章で議論している価値共創エコシステムは、この Meso レベルにおいて循環経済を成立させるための一形態の提案と位置づけることができる。

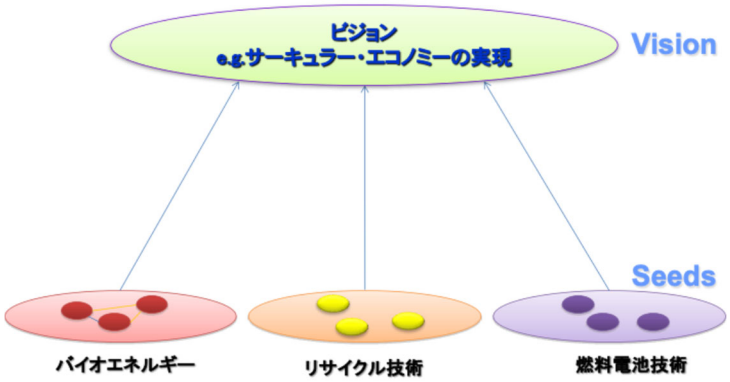


図 2.2　Seeds が Vision を実現するリニアモデル

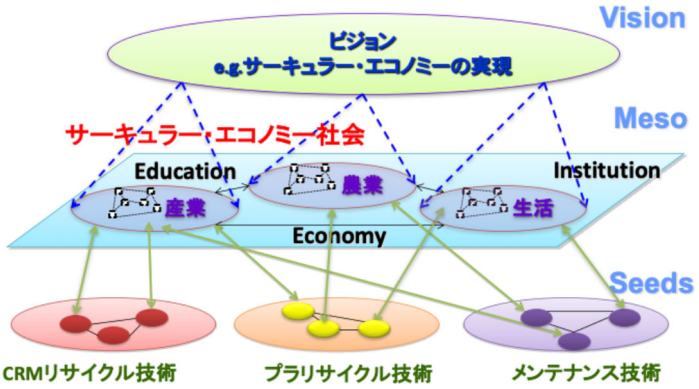


図 2.3　Vision-Meso-Seeds (VMS) モデル

従って本章の最大の課題は、この価値共創エコシステムをどうしたら設計できるかということになり、図 2.3 が示していることは、Vision を明確に設定し、様々な Seeds を開発、もしくは、取捨選択しながら、この Vision-Meso-Seeds の関係性の中で価値共創エコシステムを構築すべきということである。少なくとも単に Seeds レベルだけで頑張れば良いという話ではないことだけは明かである。

この設計方法論は未だ明らかにできていないが、少なくとも、製品ライフサイクル設計、ビジネスモデル、それと(2)で触れた循環プロバイダー、情報プラットフォームの 4 つを適切に組み合わせれば実現可能であると考えている。

② 循環プロバイダー

価値共創エコシステムを実現するためには、もの、情報、お金などが適切に循環する仕組みを構築することによって、大量生産・大量消費・大量廃棄から脱却した価値づくりビジネスを実現することが必要である。循環経済の牽引役としてどうしてもメーカーを想定してしまうが、メーカーはものづくりは得意なものの、このような仕組み作りは必ずしも得意ではないのではないか。だとすると、ものづくり、リサイクルなどのものを扱う人と、仕組みを作る人を分けて、役割分担することが重要なのではないか。そこで後者の仕組みを作る人の存在を仮定し、「循環」を提供する人という意味で「循環プロバイダー」と呼んでいる。循環プロバイダーは、様々な専門性を持つステークホルダーやユーザーを巻き込みながら、循環に直接的、間接的に関わる価値共創を企画し、ビジネス化し、運営のオーケストレーションをする役割だと考えている。技術的には、「適切な」循環は、あらかじめ設計し、適切にマネジメントしないと実現できないと考えているので、そのための資源循環の見える化、設計、分析、マネジメントの統合的な実施が価値共創エコシステム実現のためには必要であろう。

③ 情報プラットフォーム

価値共創エコシステムにおいて、各ステークホルダーのオープン・クローズ戦略は尊重した上で、情報共有の高度化は各ステークホルダーの価値向上、循環の高度化に直結する。その意味で、情報プラットフォームが価値共創エコシステムの重要な構成要素である。EU のエコデザイン規則(ESPR)[10] で規定されているデジタル製品パスポートはそのプラットフォームで実装されるべき機能の典型例である。カーシェアリングや Uber Eats のようなフードデリバリーサービスもスマートフォンで簡単に利用できるから普及したのであって、インフラストラクチャとしての情報プラットフォームは脱大量生産・大量消費・大量廃棄に重要な役割を担っている。リソーシングが進展すれば、リサイクル材がバージン材と同様にあらゆる製品の生産に使われるようになるが、その場合の品質管理のためには、禁止物質の非含有保証、その材料の由来確認のために、トレーサビリティ管理など、ものと情報を組み合わせることが不可欠であり、それが価値になる。そのような物情一体となった情報プラットフォームが、価値共創エコシステムには求められる。

④ 価値共創エコシステムの事例

価値共創エコシステムの事例を考えると、大規模かつビジネスとしても成功している事例は寡聞にして知らない。経団連、環境省、経産省が実施している J4CE (循環経済パートナーシップ)[24]では、定期的に取り組み事例集を発行している。2024 年度版では、企業間連携による資源循環の事例を集めている。この事例集には、比較的リサイクルの事例が集められているので、ここではそれ以外のものを中心に例を挙げてみよう。

(2)で議論したように、価値共創エコシステムは、地域を基軸とするものとバリューチェーンを基軸とするものがあると考えられる。地域を基軸とするものの典型例として、蒲郡市 [25](図 2.4)、MEGURU Station[26](図 2.5)が挙げられる。愛知県蒲郡市はサーキュラーシティを標榜しており、循環経済による地域振興を積極的に推進している。図 2.4 はこの取り組みの中で出てきた地域共創エコシステムの事例であり、竹本油脂亀岩工場から排出される CO2 を回収し、日本特殊陶業の持つ回収技術で、流通用ドラム缶に回収し、中部共栄運輸が愛知県農

[24] https://j4ce.env.go.jp
[25] 新東通信, https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000058.000103090.html.
[26] アミタ, https://www.amita-net.co.jp/region/megurustation/.

業総合試験場に輸送する。輸送された CO2 はハウスみかんの成長促進用のガスとして実証実験に利用される。この例では、新東通信は自らを循環プロバイダーと呼んでいる。

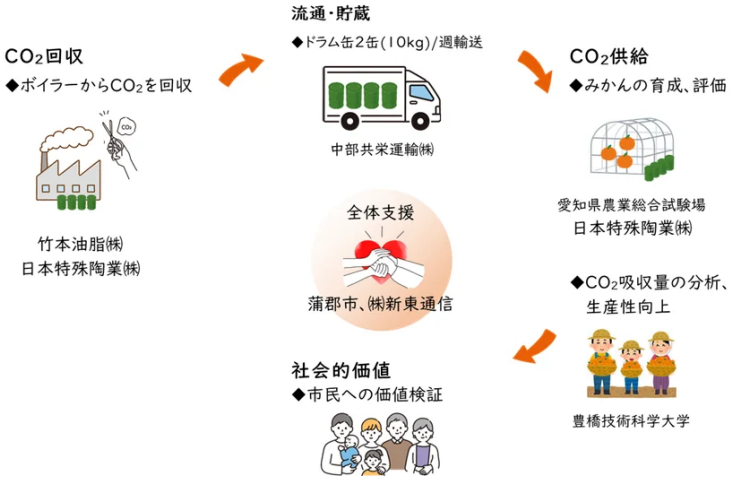


図 2.4　蒲郡市サーキュラーシティの例

（出典）新東通信, https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000058.000103090.html

図 2.5 の MEGURU STATION は、「互助共助を生むコミュニティ拠点」と「資源回収ステーション」の2つの機能を融合させた仕組みであり、兵庫県神戸市など全国 6 カ所で実施されている。これは地域に MEGURU STATION を複数設置し、そこに資源回収機能、リユース拠点、リペア・リメークサービス、交流スペースなど多重の機能をもたせることによって、地域を活性化させる活動である。



図 2.5　MEGURU STATION

（出典） Circular Economy Hub, https://cehub.jp/interview/amita-meguru/

一方で、バリューチェンを基軸とする価値共創エコシステムの例として、図 2.6 に、パナソニックと三菱マテリアルによる「Product-Material-Product (PMP)ループ」[27]を示す。従来、家電リサイクル法で規定されている家電 4 品目(テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫)は、家電リサイクル工場で中間処理されたのち、廃基板はリサイクル業者に販売され、再商品化率に計上されていた。一方で、図 2.6 に示す PMP ループでは、家電リサイクル工場で回収した廃基板を販売せずに、パナソニック自身が中間処理会社に処理を委託し、さらに、三菱マテリアルに精錬を委託し、精錬された金、銀、銅を受け取る。金は一般市場で販売されるが、銀と銅は、パナソニックの

[27] パナソニック, https://news.panasonic.com/jp/press/jn250117-4.

製品製造に活用される。この場合の主たるステークホルダーは 2 社だけだが、このように企業間で連携しながら、回収した使用済み製品を資源として再活用し、資源を外に出さずに、自分達のネットワークの中で循環させている。このような動きは、今後ますます盛んになると想定される。

図 2.7 は BlueRebirth[15] というプロジェクトで開発中の自動車の精緻解体工場のイメージを示している。このプロジェクトでは、ロボットやフィジカル AI などを活用しながら、極力自動化させつつ、精緻に分解し、部品や素材毎に分類する自動車解体工程を開発している。これにより、人手不足に対応しつつ、精緻に分類することによって、リユースやリサイクルの高度化を実現し、事業性を高める計画である。このプロジェクトでは、自動車部品メーカーのデンソー、自動車リサイクル業のリバー、マテックを中心に、自動車メーカー、素材メーカー、再生原料メーカーなど多様な業種が連携して、技術開発を行っており、今後は事業展開を狙っている。具体的にものが流れるエコシステムの形態は取っていないが、これも一種の価値共創エコシステムである。

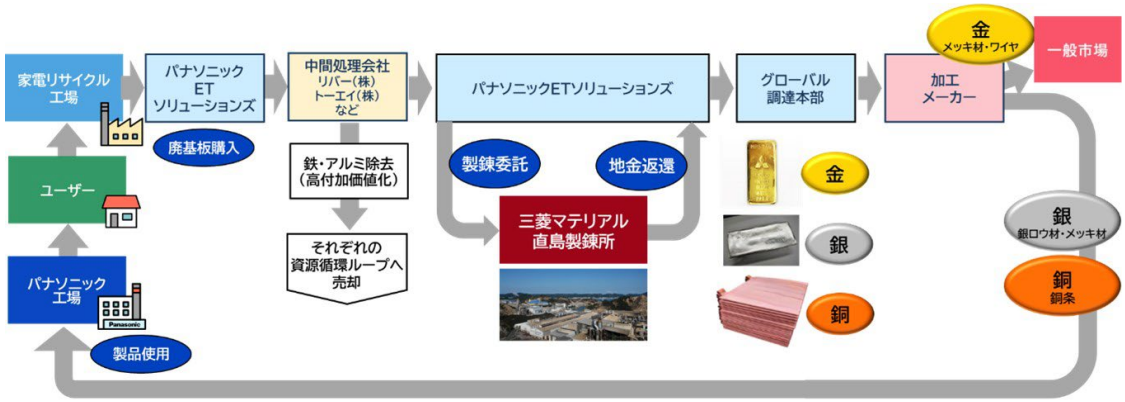


図 2.6　パナソニック・三菱マテリアル　Product-Material-Product ループ

（出典）パナソニック, https://news.panasonic.com/jp/press/jn250117-4

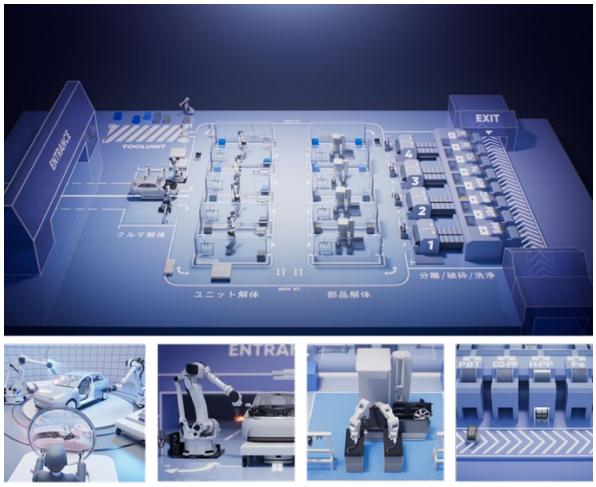


図 2.7　Blue Rebirth　自動車自動精緻解体工程のモデル

（出典）BlueRebirth, https://www.bluerebirth.jp

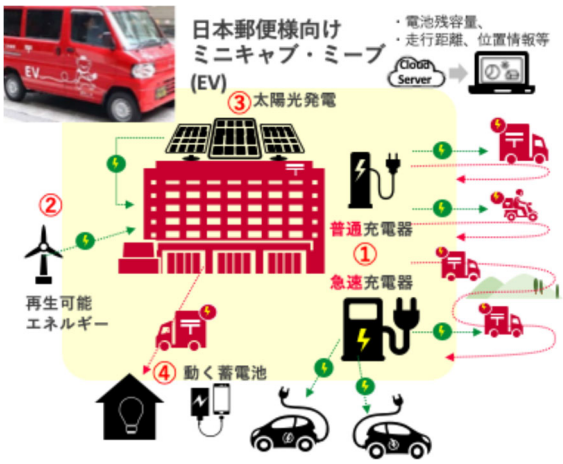


図 2.8　三菱自動車・日本郵政・日本郵便・東京電力　郵便集配システム

（出典）三菱自動車　https://www.mitsubishi-motors.com/jp/newsroom/newsrelease/2021/20211118_1.html
東京電力　https://www.tepco.co.jp/press/release/2021/1653525_8711.html

最後に、必ずしも循環経済の例ではないが、三菱自動車、日本郵政、日本郵便、東京電力が連携して EV 自動車、EV バイクを活用した郵便集配システム(図 2.8)を示す。これは、再生可能エネルギーをエネルギー源として電動化することによりゼロエミッションの集配システムの実証試験をおこなっているものである。これはまさに異なるステークホルダーが協業した価値共創エコシステムである。

2.4 おわりに

循環経済は、できるだけ地球に負荷をかけないように、資源を循環させつつ活用し、その循環に経済性を持たせることである。この考え方は国内外共に近年急速に広まってきた。本章では、循環経済実現のための課題を整理した。その実現手段として価値共創エコシステムが必須であることを述べた。このような価値共創エコシステムの完成したものが存在する訳ではないが、価値共創エコシステムの片鱗を表す事例を示し、価値共創エコシステムを設計するためのヒントを議論した。今後は、価値共創エコシステム構築に向けた実践と方法論の検討がさらに進展することが望まれる。

人類進化と「共生」の原理に学ぶ視点

3. 地球における生物の進化と人間社会

長谷川 眞理子

3.1 はじめに

本書は、現代社会における産業構造と経済活動の根本を見直し、持続可能な将来に向けてこれらを転換するための提案をしようとするものだ。私は、生物学者・進化人類学者として、さまざまなところで、現代社会の異様さについて述べてきたので、本書においても、この目的に沿って話していきたい。本書の構想を最初にお聞きしたとき、「人間もまた生態系の一部である」という視点を導入し、産業と自然の関係性を再定義する思想的基盤を提供する、という話を聞いた。

私たち生物学者にとって、「人間もまた生態系の一部である」ということは、当然のことであるので、それを今更新しい視点として導入せねばならないとは、私にとっては驚きであった。現代は、何もかもが分断され、タコ壺化が進んでいるが、私たち自然科学者にとって「常識」であることが、「常識」ではない世界があることに、改めて驚愕した次第である。

そうは言っても、「人間もまた生態系の一部である」ことを常識として知っているのは、生物学者の中でも、マクロなレベルの生物学、つまり、個体や生態系などを研究している生物学者だけなのかもしれない。遺伝子の分子生物学やホルモンなどの生理学的な現象、つまりミクロなレベルの生物学をやっている研究者たちにとっては、それほど常識ではないのかもしれない。そして、日本の生物学者の 90 パーセント以上は、ミクロなレベルの生物学者なのである。

というわけで、本稿では、生物学、生態学、進化人類学の「常識」から見て、現代社会の異様さを改めて指摘し、この社会がなるべく長く存続できるようにするにはどうしたらよいか、今後の社会のあり方について考えてみたいと思う。

3.2 地球における生物の進化

地球の年齢はおよそ 46 億年であり、地球上の生命は、およそ 38 億年前に生まれたのだろうと推測されている。では、生命とは何だろう？　生命や生物とは何かの定義は難しいが、1)膜で包まれた境界のある存在であるが、2)その膜を通して栄養やエネルギーがやり取りされる半閉鎖系であり、3)この存在は、それを自己維持して時間とともに成長し、4)やがて自分と同じものを複製する、ということをしている物体である、と言えるのではないか。

この 38 億年の生命進化史を、ここでたどることはできない。この長い年月の間に、多くの生物が進化し、また絶滅してきた。現在、学術的な記載がなされている種の数は 200 万ほどあるらしいが、まだ記載されていない種もたくさんあるので、この地球上に本当に何種がいるのかは、誰も知らない。つまり、私たちは、地球の生物種の全貌については、何も知らないも同然なのである。

3.3 人類の進化

本稿では、人類について考えたいので、話を人類に限ろう。38 億年にわたる地球上での生物進化史の中で、人類が出現したのは、ごく最近のことだ。現在のヒトに一番近い現生の生物はチンパンジーである。人類の系統が、チンパンジーの系統と分岐して進化したのは、およそ 600 万から 700 万年前である。

「人類」とは、常習的に直立二足歩行する類人猿の仲間である。霊長類（サルの仲間）には 250 種以上がいるが、それらの中で、尾がなくてからだの大きい生物を大型類人猿と呼ぶ。そこには、オランウータン、ゴリラ、チンパンジーが含まれるのだが、人類にもっとも近縁なのはチンパンジーである。次に近いのがゴリラ、もっとも遠いのがオランウータンである。

人類が進化した舞台はアフリカだった。アフリカの熱帯森林の中で、なぜか人類は直立二足歩行するようになった。しかし、常習的に直立二足歩行するようになったとはいえ、森林の中で果実を採って食べる生活に変わりはなく、長い間、人類は第 3 のチンパンジーにすぎなかった。そのころの人類化石としては、いくつかのものが知られているが、アルディピテクスやアウストラロピテクスなど、属名がホモではない。彼らは、森林とサバンナの両方に適応し、木登りもできた。そして、アフリカを出ることはなかった。

それが、およそ 250 万年前に、新たな分類群であるホモ属が進化した。これは、今の私たちと同じようなからだの構造を持ち、木登りはやめ、森林を出てサバンナをてくてく歩くようになった人類である。脳容量も、およそ 1000cc と、以前の 400cc よりは大きくなったが、現在と比べるとまだ小さかった。体毛をなくし、大量の汗をかくことで体温調節すること、死肉も含めて手に入るものは何でも食べる食性になったこと、集団で身を守るようになったことなどは、ホモ属に特有の進化だと言えよう。

そして、ホモ属はアフリカを出てユーラシア大陸に進出した。それは、アフリカ以外の土地で人類化石が発見されるのでわかることだ。アフリカで最初のホモ属が進化したのはおよそ 250 万年前だが、180 万年前には、アフリカ以外のユーラシア大陸でも、人類化石が見つかっている。ホモ属は、アフリカで出現してからかなり早くに、出アフリカを果たしたようだ。

アフリカを出てユーラシア大陸で発見されるホモ属のほとんどは、ホモ・エレクトスである。有名な北京原人やジャワ原人は、エレクトスだ。しかし、ユーラシア大陸は広く、200 万年以上という年月は長い。そこで、インドネシアのフローレス諸島にだけ存在していたらしい、小型のホモ・フロレスエンシスや、フィリピンのルソン島だけにいたらしいルソン人、小指その他の骨の断片だけで存在が知られているデニソワ人など、さまざまな人類集団が存在していたらしい。デニソワ人の DNA 解析から、東南アジアの現生人類の中には、デニソワの遺伝子がかなり混じっていることがわかっている。

ヨーロッパからシベリア西部に生息していたネアンデルタール人も、そんな人類の一種であった。しかし、彼らはホモ・エレクトスとは分類されておらず、私たちサピエンスにより近い存在であったと考えられている。

しかし、アフリカを出たこれらの人類はすべて、出先で絶滅してしまったようだ。彼らはみな、多かれ少なかれ私たちホモ・サピエンスと混血したが、固有の集団としては残らなかったのである。

3.4 ホモ・サピエンスの進化とその舞台

私たち人間は、ホモ・サピエンスという学名である。サピエンスが進化したのは、およそ 30 万年前のアフリカであった。そして、それから 20 数万年の間、サピエンスはアフリカだけにとどまっていた。それがおよそ7万年前、再び出アフリカを果たし、今度は、ユーラシア大陸のみならず、全世界に広がった。行った先では、それ以前からその地に住んでいた、さまざまな人類集団に出会った。サピエンスはそれらの集団と混血したが、今では、サピエンス以外の集団は存在しない。しかし、サピエンスが彼らをことさらに暴力で絶滅させた痕跡はない。現在の地球の人口は 80 億人にもなるが、この全員がすべて、アフリカから出てきた小集団の末裔なのである。

現在の私たちサピエンスの脳容量は、1200 から 1400cc である。エレクトスの脳容量がおよそ 1000cc だったことから見ると、短期間でさらに大きくなったことがわかる。

サピエンスは、サバンナで狩猟採集をし、離合集散しながら移動して暮らしていた。そして世界中に拡散したため、サピエンスの生息地は、熱帯降雨林の中から北極の雪原まで、低地からヒマラヤの山中まで、実に多岐にわたる。そして、それぞれの環境に適応して暮らしているため、サピエンスの生態学的地位として、一つの気候や生態環境を特定することはできない。そこで、現在も狩猟採集を続けている集団が、どんな暮らしをしているかを網羅し、それらに共通する要素を抽出したのが、ヒトの進化適応環境（Environment for Evolutionary Adaptation: EEA）と呼ばれるものである。

ヒトの進化適応環境は、以下のようにまとめられる。1）生業形態は狩猟採集であり、どこであれその地で手に入れられる動植物を取って食べる生活である。かなりの肉食とかなりのデンプン食が含まれる。2）定住はせず、食料を求めて遊動する生活である。およそ 150 人を限度として密接なつきあいをするが、さまざまな事情に応じて離合集散する。3）一人の男性と一人の女性の間に、強い性的な絆が存在する。それは、一生続くかもしれないし、数年で終わるかもしれないが、ある一定の期間、強い排他的な性的絆を持ち、嫉妬という感情がある。4）脳容量が大きく、生きていくために大量の知識を必要とする。ヒトは全地球上に分布しており、たまたま個人が生まれてくることになった環境に適した暮らしをせねばならない。それらの知識を学ぶための学習機能が発達している。5）脳容量の大きな子どもの成長速度は遅く、学ぶべきすべてを教えて成人させるには、母親だけでも両親だけでも不可能である。ヒトは、多くのおとなが子どもの養育にかかわる共同保育の動物である。6）自分と言葉や出自、社会習慣を同じくする「内集団」と、それらを同じくしない「外集団」との区別がはっきり存在する。内集団の内部にも、外集団との関係においても、競争と協力の複雑な関係がある。

狩猟採集生活とはこんなものだが、一つ重要なのは、この生活では、誰もが何でもできるマルチ人間だということだ。たとえば、狩猟は男性、採集は女性ということで、「分業」が行われていると言われる。しかし、食料が十分にあることは稀なので、男性も、植物食などを見つければ採集するし、女性も、小型の動物であれば狩猟もする。生きていくための仕事は食料の獲得以外にもある。火をたいて維持するのも大事な仕事だ。しかし、火を見ていると食料の獲得はできない。キャンプを設営し、掘っ立て小屋を維持せねばならない。赤ん坊の世話も重要だが、赤ん坊の世話と火の維持と食料獲得を同時に一人の人間がまっとうすることはできない。

そこで、何でもできるマルチ人間どうしが集まって、時と場合に応じて何を担当するかを分担しながら共同生活をしているのがサピエンスの暮らしなのだ。病院も警察も学校も何もない暮らしである。暮らしに必要なことはすべて、キャンプで一緒に暮らす人々の間でまかなう。だからこんなに脳が大きくなったのだろう。私たち人間は、自分の暮らしに必要な一切のことは、何でもできるように進化したのである。

ホモ・サピエンスは、進化した 30 万年前からの 29 万年にわたって、このような暮らしをしていた。現在の私たちのからだと心の基本構造は、このような環境（EEA）で進化したのである。それが、およそ1万年前に定住と農耕・牧畜を始め、ヒトという存在の根本が変化することになった。

3.5 定住生活以後

ヒトは、およそ1万年前から、離合集散して移動する生活をやめ、一ヶ所に定住するようになった。そのころ、メソポタミアその他の地で農耕と牧畜が始まったが、定住と食料生産との関係や、どちらがどのような原因で始まったのかについては、いまだに議論が多い。およそ1万年前に最終氷期が終わり、気候が安定して温暖化したことが、定住と食料生産に有利に働いたことは確かだが、それらの詳細については、まだ意見の一致はない。

農耕・牧畜のメリットは、食料の安定した供給の確保である。大量の食料が収穫できるめどがあれば、その日暮らしであった狩猟採集生活に比べて、暮らしは安定する。しかし、農耕による収穫は数ヶ月先のことであり、

確実な収穫が保証されるわけではない。狩猟採集生活もその日暮らしであり、食料が取れないときには、全員が飢える。農耕・牧畜生活では、以前の食料の蓄積を用いて今日を暮らすのだが、それが継続されるためには、今年も必ず収穫がなければならない。が、気候その他の条件により、確実には保証されない。それでも、農耕・牧畜によって自ら食料を生産する方が、狩猟採集によるその日暮らしよりも安定していたのだろう。だから、最終的に人類の大半は、農耕・牧畜による食料の生産を選んだのではないか。

一方、定住生活にはコストがかかる。第一に、死体や汚物から逃れられない。たまっていく一方のそれらのものをどう処理するか？　そこで、墓地や便所などが整備されていく。また、定住では、社会関係がこじれても嫌な相手からすぐに逃れることができない。離合集散する移動生活であったときには、そんな気まずい関係は、すぐに離れ、当分顔を合わさないことで解決できたのに。

また、食料を生産して定住すると、農業であれ牧畜であれ、将来のための食料を貯蔵することになる。そうすると、自らはそんな生産の努力をせず、そんな努力をした他者の備蓄を奪って暮らしを立てる、という方策が出てくる。定住社会は、そのような略奪から自分たちを守るために、必然的に要塞化した。

こうして、食料生産と定住生活が始まったが、それによってヒトの暮らしは様変わりした。まず、食料が大量に確保できるようになると人口が増えた。それはエネルギー獲得量が増えたからなのだが、栄養バランスという意味では、一人一人の栄養状態はかなり悪化した。

―多くの人々が集まって一緒に定住して暮らすようになると、分業が始まった。それは、これまでのようなマルチ人間どうしが、時と場合に応じて作業を分担する形態とは異なり、ある一つのことしかできない専門家の出現である。農家は農業だけ、鋳物屋は鋳物造りだけに専門化し、それぞれのサービスを提供しあうことになった。では、異なるサービスをどのようにして提供しあうか？　まずは、お互い様の無償のやりとりで互恵的に動くことになる。しかし、それも長くは続かない。そこで貨幣経済が一般化することになる。貨幣という存在そのものはずっと古くに発明されて存在したのだろうが、誰でも貨幣を使って他のサービスを手に入れるようになるのは、近年のことである。

3.6 産業革命と自前のエネルギー源の獲得

そして、およそ 250 年前に産業革命が起こった。産業革命は、英国の紡績業に端を発して社会を変えたと記述されるが、生態学的にもっとも重要なのは、人類が生物の進化史上初めて、自前のエネルギー源を得たことである。地球上のすべての生物は、太陽光からのエネルギーしか使えない。しかし、地中深くに埋もれて燃やされることなど一切なかった石炭や石油を掘ってそれを燃やすことにより、人類は、太陽光以外の自前のエネルギー源を得た。今では、そんな自前のエネルギーがあることが当然と思われているが、これは、たった 250 年前に起こった「奇跡」とも言える大転換なのである。

15, 16 世紀に活躍したレオナルド・ダ・ヴィンチという人がいる。彼は、天才的な想像力で、戦車、風車、水の汲み上げ機、飛行機、ヘリコプターのような技術を想像した。しかし当時、それらを動かすためのエネルギーは、人力か家畜の力しかなかったので、それらのすべては実用化しなかった。それが産業革命以後の自前の動力の発展により、すべてが実現した。それほど、エネルギーの供給は重要なのである。

逆に言えば、この地球上の生物にとって、太陽光によるエネルギーしか使えないことは、存在の大きな制限要因である。その制限要因を取り払ったことが、ヒトの文明が大きく進展した理由であるのは間違いない。そこでしばらくは大きな発展が続いた。しかし、究極的には、それによって地球全体の生態系のバランスを破壊することになり、その限界が現れているのが現代なのだろう。

3.7 生態学の基礎と現代の成長主義の異常

ここまで述べてきたように、現代社会は、ヒトという生物が進化・適応してきた環境とはかけ離れている。しかも、このような変化が起こったのが、定住後で1万年、産業革命後で 250 年と、進化史的に見ればほんの一瞬のことである。それでも、こんな変化を起こし、一応それに適応しているのは、ヒトの脳の柔軟性の現れだろう。しかし、こんなことが無限に続くわけではない。ここで、生態学の基礎の中からいくつか述べてみたい。

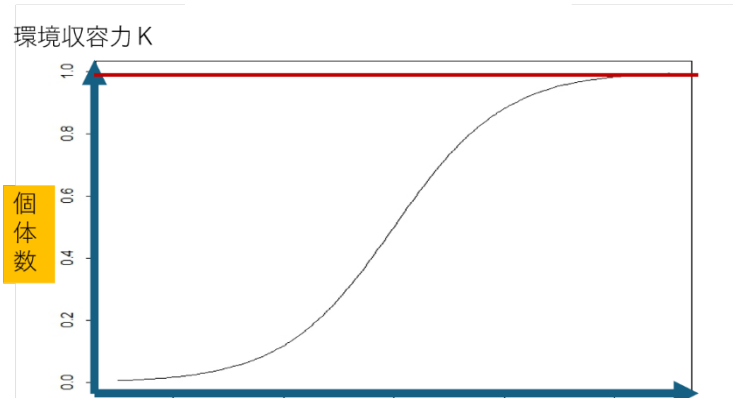


図 3.1 ロジスティック曲線

(出典:平成 7 年版環境白書 https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h07/9586.html)

まず、個体群生態学である。生物種の個体数とその生息環境との関係は、生態学の重要な課題であり、それは、ロジスティック曲線として表されてきた(3.1)。すなわち、ある生物がある環境に侵入すると、どんどん個体数を増していくが、やがて増加の速度は止まり、定常状態に達する。それが、その環境における環境収容力(K)である。生物は、環境収容力を越えて個体数を増やすことはできず、増えてしまったら必ず死滅が起こる。そこには、太陽光からのエネルギーしか使えないという制限要因が重要な役割を果たしている。

ヒトという生物も、長らくその人口は定常的であった(図 3.2)。哺乳類がその生息地でどれほどの個体数を維持できるのかは、その哺乳類の体重に依存する。体重が大きいほど、生息できる個体数は少ない。

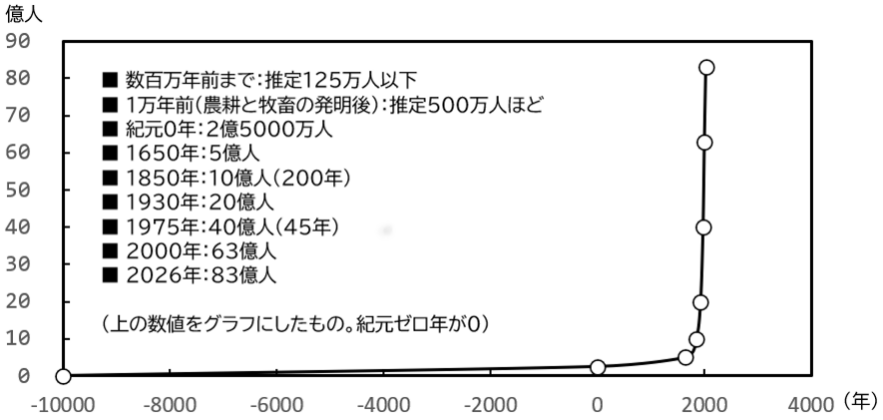


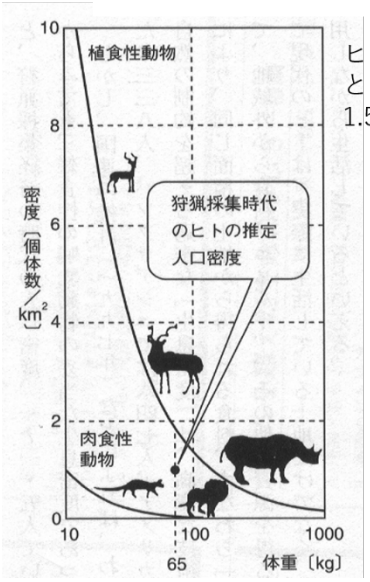
図 3.2 地球上の人口増加の軌跡

(出典:Population Reference Bureau, "How Many People Have Ever Lived on Earth?" ほかを参照。https://www.prb.org/news/how-many-people-have-ever-lived-on-earth/)

また、草食獣と肉食獣では、ある環境で生息できる個体数が異なる。草食獣は、植物の量によって個体数が制限されるが、肉食獣は、その草食獣の個体数によって制限される。ヒトの平均体重を 65 キロとし、ヒトは雑食なので、草食獣と肉食獣の間だと仮定する。そうして、狩猟採集民の生活で維持できる個体数を計算したところ、1 平方キロに 1.5 人という数字が出てきた(図 3.3)。現代の狩猟採集民の生息密度はもっと少ないが、それは、彼らが文明のすみに追いやられている、さまざまな悪影響があるからだろう。

私たちも生物なので、環境収容力を越えて人口を増やすことはできないに違いない。しかし、およそ 250 年前に自らのエネルギー源を持ったことにより、私たちサピエンスは、地球上に住める環境収容力そのものを自分たちで上方修正してきた。病原菌に対する予防措置や治療薬、ワクチンの発明は、ヒトの死亡率を大幅に下げ、人口を増やした。増えた人口を食べさせられるだけの食料生産も確保された。それは、化学肥料や殺虫剤の発明のおかげである。

次に取り上げたいのが、物質の循環の問題だ。まずは、炭素(C)の循環について考えよう。これは、地球の温暖化を引き起こしている最大の原因だ。



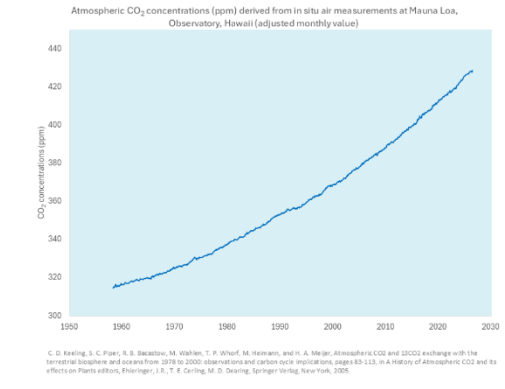
ヒトを雑食とし、平均体重を65キロとしたときの、生息密度の推定：
1.5人/平方キロ

出典
鷲谷いづみ著:『生態系を蘇らせる』(2001)NHK出版より

図 3.3 野生哺乳類の体重と生息密度

炭素(C)は、生物のからだを作る重要な元素である。炭素がどこにあるかと言えば、生物のからだの中と、大気中や水中である。植物は大気中の CO_2 を取り込んでからだを作り、呼吸によって CO_2 を吐き出す。大気中の CO_2 の一部は、海水その他の水域に溶け込む。生物が死ぬと、そのからだが分解されて炭素が大気中に出ていくこともあれば、地中に埋まってそのまま外には出ないこともある。そんな炭素の一部は、石炭や石油となって地中に埋蔵されていた。こうして炭素は、生物のからだ、大気、水圏を循環し、地中に埋蔵され、どこでも定常状態になっていたと考えられる。

しかし、産業革命以後、人間はこの炭素源を地面から掘り出して燃やすようになったため、それ以前にはなかった炭素が、二酸化炭素(CO_2)として大気中に出ていくことになった。これが、温暖化を引き起こすのである。大気中の CO_2 濃度は、1950 年代からハワイのマウナ・ロア観測所で記録されているが、その値はどんどん上昇し続け、2024 年には 423.9ppm となった(図 3.4)。世界が工業化する以前の 1750 年には、世界の平均が 278ppm だったと推定されている。この事態の重要性と緊急性については、ここで繰り返す必要はないだろう。



ハワイのマウナロア観測所で
大気中の二酸化炭素濃度の測定が
始まったのは1958年。
以後の毎年の平均値を示す。
2026年5月には432ppmを超えた。

出典
https://www.jircas.go.jp/ja/program/proc/blog/20260615

図 3.4 ハワイ観測所の CO_2 記録

これと同じことは、窒素(N)や硫黄(S)についても言える。工業化以前の社会では、窒素も硫黄も、地球全体の中で循環し、それが平衡状態になっていた。しかし、以後、肥料や殺虫剤などを始めとするさまざまな化学物

質を作り出し、それらを使用することで環境中にばらまくことにより、この循環の平衡状態は崩れた。NOx 問題などはその現れである。

産業革命以後、とくに第二次大戦後は、工業化によりヒトの暮らしは必ずよくなるものだと思われるようになった。そして、この大規模な文明世界は、貨幣経済、自由主義経済によって営まれることになる。この経済は、必ずや成長し、財を増加させ、消費によって循環させねばならないようにできている。これまでは、それでうまくいった。しかし、その活動で出てきた廃棄物はどうなるのか、ますます必要とされるエネルギー源はどうやって確保するのか、それが問題である。結局のところ、ヒトも生態系の一部であることに変わりはないので、これまでは一時的に問題を先送りできてきたのだが、究極的には問題は解決していない。

このような成長主義がいつまでも続くことはない。それは、たかだかこの数百年のことだ。それをどこかで転換せねばならないのだが、それはどうやって実現できるのだろう？ その方策は、私にはわからない。これからの人々が長い時間をかけて転換していくべきなのだろうが、果たして破滅に至る前にそれが実現できるのか、私には、時間との競争のように思えるのである。

しかし、ともかくも変革しようとする努力は続けていかねばならない。一つには、これまでのような数の増加を目標にすることから、質の向上に転換せねばならない。貨幣経済で「儲ける」ことがやめられないのなら、それを質の向上によって実現する方策を見つけることだ。

そして、生産から廃棄までの全行程を考慮し、コストの全容を明らかにしていくべきだろう。20 世紀型の成長経済は、大気やきれいな水などの自然資源は「ただ」で手に入り、自然が廃棄物を浄化していく過程も「ただ」だと考え、人間による生産と消費だけの経済を構想してきた。しかし、今や生態系サービスは「ただ」ではないことがわかったのであるから、そのように転換せねばならないだろう。それが、昨今行われているライフサイクル・アセスメント（LCA）である。私たち一人一人が、その意味で「賢い消費者」になるべきなのだろう。しかし、それができるためには、そもそも、これからの社会で育つ子どもたちが、そんな感覚を身に付けられる社会になっていなければならない。この入れ子構造にどこから手をつけたらよいのか、私にはわからないのである。

4. 人間（*Homo coimaginans*）は自然界の中に存在し、そして“あわい”を介して自然界を識る

― 人間中心のジレンマを超えてエネルギーと情報世界からの脱却への提言

針山　孝彦

Homo sapiens は、二命名法を発案し分類学の父と呼ばれるカール・フォン・リンネが、生物の種としての我々ヒトに対して命名した学名である。二命名法は、日本において個人の名前を氏と姓の二つで表すのに似ており、*Homo* が氏で比較的広いグループを示し、*sapiens* は姓にあたり、*Homo sapiens* という学名は生物のグループが特定されたものである。それぞれ、氏にあたるグループを属、姓にあたるグループを種小名（または種名）と呼ぶ。

日本語における *Homo sapiens* に対する記載は非常に曖昧で、高校生物の教科書中で「二命名法ではラテン語で記載すること」と明記した側から横書きの本なのにアルファベット表記ではなく“ホモ・サピエンス”とカタカナ表記し、和名では“ヒト”と表記することと記載されているのに“人間”と記載したりしていることもある。それぞれの用語には言霊があることを考えると、ヒト、人、人間、ホモ・サピエンスなどと表記の揺らぎがあるのは、*Homo sapiens* を日本語で考える時に、それぞれの用語がもつ細かなニュアンスの違いを日本人は気にかけているためだろうと考えられないこともない。しかし、表記のばらつきによって議論が曖昧になる可能性も高いので、本論考では特別な文脈を除き *Homo sapiens* と学名で記載することはせず、「ヒト」と「人」を用いて、それらの違いを明確にして *Homo sapiens* の特殊性について論じていきたいと思う。

二命名法のラテン語表記では、属名が名詞で種小名がその属名を修飾する形容詞である。*Homo sapiens* は、賢い（*sapiens*）ヒト（*Homo*）という意味である。リンネの時代に生きていたわれわれの先祖は、「人新世」を招いてしまった現世の我らとは異なり、本当に賢かったのかもしれないが、私は、その尊大すぎるように読み取れる *Homo sapiens* という名称をつけたリンネは、「人間中心」的で図々しい人だったのではないかとも想像してしまうのである。「賢い人」という言霊によって、*Homo sapiens* をただの生物の一つだとは言いたくなくなる気持ちはよくわかる。しかし、分類学的には、*Homo sapiens* は地球上に存在している多様な種の中の、ある一つの生物の種名に過ぎない。つまり、*Homo sapiens* の和名としてのカタカナ表記の「ヒト」は、地球上に 180 万種以上存在しているといわれている多様な生物の種の中の一つの種を表す用語として本稿では用いる。

和名の「ヒト」からは「賢い（*sapiens*）」がないことに注意してほしい。だが、その一方で、リンネが *Homo sapiens* と形容したくなったヒトの特徴も我々の状態を理解するために捨てがたい。ヒトは生物界の中でも特に変わった特徴をもつ動物であることに注意が必要だからである。本稿の後半で詳しく述べるが、ヒトが集団として生み出している特徴も含めたものとして「人」という漢字にも注目したい。強いて論述する前に纏めてしまうと、“人とは決して賢いわけではないが、集団として集まる中で仲間の中で自分たちが「賢いかも？」と勘違いしてしまう特徴がある生物である”と考えられるのだ。「人間」（*Homo coimaginans*）という新造語は、「ヒト」と「人」を合わせたような“あわい（間）”を含んだ曖昧な表記としていると理解して欲しい。「ヒト」と「人」を区別して読み進み、“あわい（間）”の中で「人」が形成されることを読み取って欲しい。

4.1 単細胞生物と多細胞生物―循環の中で生きている生物

太陽系は、46 億年ほど前に誕生し、それからおよそ 10 億年を経た 38～36 億年ほど前に生命が誕生した。原始の生命は、原核細胞の形状をしていたことが、地層に含まれる化石からの推察されている。原核細胞の代

表は、現生の“バイキン”とも呼ばれるバクテリア（細菌、Bacteria）と言っていいだろう。通常長さ 1～10μm ほどの生物で、核や細胞小器官をもたない。脂質二重膜からなる細胞膜（膜）で内と外が仕切られており、細胞分裂を繰り返して増殖する。細菌にとって、膜の周辺の内側が生命体であり、外側にある栄養素を摂取することで生命が維持され、分裂によって複製し世代が続いている。原核細胞は、その生命を維持し増殖するために栄養素を摂取しているともいえる。およそ 20 億年前にシアノバクテリアが誕生した。この原核生物は太陽光を利用して光合成をする生命体で、光合成の産物として酸素分子を放出するようになった。この原核生物によって地球環境に酸素が含まれるようになり、栄養素の利用の仕方も大きく変えられたのである。

生命の先祖である原核生物 38 億年程前に誕生し、シアノバクテリアが地球環境を劇的に変え、10 億年以上経てからより大きく複雑な真核生物が誕生した。生命体の先祖が数 μm であるのに比べ、真核細胞は 10μm ほどの長さを持つので、真核細胞の体積は原核生物に比べて 1,000 倍の大きさになる。原核細胞は細胞の中に裸状態の DNA とタンパク合成の場であるリボゾームを持つが、真核生物では、細胞の中にリボゾームに加えて細胞小器官と呼ばれる構造体をもち、細胞の中で機能的な役割分担をしている。その生命維持に外界から栄養素を摂取しなければならないのは、原核細胞と同じである。原核細胞も真核細胞も、その形態や機能を維持するために栄養素を摂取しているともいえる。生物は、エントロピー増大則に常に逆らい続けなければ生命維持できない。

単細胞生物としての真核細胞が集まり、多細胞生物の形態をとるようになったのは先カンブリア時代の終わりの頃である。「カンブリア紀の爆発」とも呼ばれるカンブリア紀になると多様な形態の多細胞生物が誕生した。およそ 5.4 億年前のできごとである。多細胞生物も、その生命を維持するために栄養素を常に取り入れなくてはならない。そのために、多細胞生物同士の間で“食う・食われる”の関係が成立した。

(1) 食物連鎖（食物網）

食物連鎖（food chain）とは、生物が「食う・食われる」という関係でつながり、栄養やエネルギーが循環する仕組みであり、エコシステム（ecosystem、生態系）を考える上で重要な視点である。このつながりは、光合成で太陽エネルギーを化学エネルギーに変換して生体が利用しやすい有機物を作り出す植物を起点として、草食動物、肉食動物へと続いていく。植物は有機物を作り出すので生産者とも呼ばれ、草食動物や肉食動物は生産者である植物の有機物を得て生きるので消費者とされ、生産者や消費者を食べて生物の形から有機物の形に変える生物を分解者とする。これら 3 つの役割を持つ生物によって生態系が構成されているとも考えられる。これらの栄養段階の流れを俯瞰し関係を表した「生態ピラミッド」という考え方もあり、生態系では消費者の段階に応じて、消費者を一次消費者、二次消費者、三次消費者などと区別して、各栄養段階をエネルギー量、生物量、個体数などで考えることもできる。

エネルギーの流れに注目して考える食物連鎖は分かりやすい概念だが、ある限られた特定の領域に存在する生物同士がお互いを必要とし、依存しながら生態系が維持されている複雑な状態をより表すために食物網（Food web）ということもある。生態系を食物網の概念で考えると、網の任意の位置に変化を加えると全体構造へ影響が波及することがわかる。すなわち、食物だけに限って“網”のような関係として考えると、過剰な漁獲や過度の保護措置といった極端な資源管理による介入は、生態系内バイオマス（biomass；特定時点における空間内に存在する生物量を物質量として捉えたもの）の均衡崩壊を誘発する主要因となり得ることが想像できるだろう。

(2) 物質循環

① 炭素の循環

エコシステムにおける栄養素およびエネルギーの循環は、光合成による太陽エネルギーの化学エネルギーへの変換を起点とする。地球表面の約 70%を占める海洋に広範囲に分布する藻類は、陸上植物の 80%程度に相当する炭素固定量を有し、グローバルな炭素循環の均衡維持に寄与している。人為的な二酸化炭素排出の増加を含む各種地球環境問題が、海洋生態系と密接に関連していることは忘れるべきではない。 有機物は最終的に分解されて二酸化炭素として放出されるが、光合成過程により水と二酸化炭素から再度有機物と酸素が生成され、循環が継続される。その視点からこの炭素循環はエネルギーの流れである食物網の基礎ともいえる。この際、発生する反応エネルギーは生命活動を通じて熱として消費されている。

ちなみに、有機物の生産が分解より大きければ、土壌中の腐植質などのかたちで有機物が蓄積される。生産が分解を顕著に凌駕した地質時代においては、大量の有機物が堆積し、それが現在確認されている石油や石炭などの化石燃料の起源となっている。

② 窒素の循環

大気中の窒素ガスを直接利用できる生物は、窒素固定を行う窒素固定細菌やある種の藍藻などである。また、雷による放電現象では、プラズマ状態において大気中窒素と酸素が反応し、生成物が土壌中に供給される。さらに、化学工業によって合成された化学肥料は農業生産目的で土壌に施用されており、その供給量は自然界の窒素固定量の約 40～50%に相当すると報告されている。

硝化反応によって生成した硝酸イオン(NO_3^-)は、生産者である植物に吸収され、アンモニウムイオン(NH_4^+)へと還元される。その後、植物体内において他の元素や化合物と反応し、有機窒素化合物(アミノ酸、タンパク質等)へと合成される。これらの有機窒素化合物は、栄養段階上位の消費者による摂食と消化・吸収過程を経て、タンパク質や核酸などの窒素含有有機化合物として利用される。生物の遺体や排泄物中の有機態窒素は分解者によってアンモニウムイオンへと変換され、そのアンモニウムイオンは硝化細菌の作用により再び硝酸イオンとなる。さらに、脱窒素細菌による還元反応によって硝酸イオンは窒素分子(N_2)へと変化し、大気中へと放出される(脱窒)。窒素は、空気中に体積で約78%含まれる。

③ 水の循環

生物にとって不可欠な分子の水の循環は地球における継続的な移動であり、太陽エネルギーを主因として引き起こされる。水は、固相・液相・気相間で相互に状態を変化させながら、蒸発・降水・地表水・土壌への浸透などを経て、地球上を絶えず循環している。

水は生体のおよそ 70%を占めていて、生命維持に欠かせない分子である。外界に存在している水は細胞内に一定量取り込まれておりその比率は維持される。生物は、ホメオスタシス(homeostasis 恒常性)と呼ばれる生体の内部や外部の環境因子の変化に関わらず生体の状態が一定に保たれるという生命維持の仕組みの中で生きているが、生物における水のバランスの維持は生命の存続に直接的に関わる。ヒトでいえば、昨今の日本の夏で経験する高温環境下の飲水不足による脱水による熱中症の多発のニュースで理解しやすいだろう。ホメオスタシスは健康を定義する重要な要素でもあり、地球上の水の循環が、個体の生命維持に直接影響する。

④ “循環網”という考え方 ― 物質・エネルギーはほぼ閉じた網の中にある

このように、ヒトや他の生物に関係する物質は、生物地球化学的循環(Biogeochemical cycle)と呼ばれて、「循環」という仕組みの中にあることを知っている。地球というほぼ閉じた系の中にすべての物質が存在していて、太古の時代からその循環が存在しているからである。生物地球化学的循環という用語は、単一の経路による大

規模な循環を示すものではなく、地球上の各物質が多様な経路を通じて循環・再利用される現象を包括的に表すものである。その過程において、物質は全体として再利用されるが、循環の途中で長期間蓄積される場合もある。炭素循環の一つである化石燃料の石油や石炭などがその長期間蓄積されている代表的な例である。

循環は、心臓を中心に動脈と静脈で構成される循環系をイメージしやすく、食物連鎖のように一方通行の流れのように考えがちであるが、栄養素の流れである食物連鎖が食物網と呼ばれるようになったように、地球全体で眺めた物質やエネルギーの流れも「循環網」と呼ぶべき「網」である。繰り返しになるが、動脈と静脈から構成されている動物の循環系のように見えるが、この循環に見える地球内の系は「循環網」とも呼ぶべき構造をしており、食物網と同様に、“循環網”の任意の位置に変化を加えると、全体の構造維持に影響が及ぶ。生物を含む地球内における物質・エネルギーは“網”の関係の中で繋がっていて、一部にほころびが生じると生態系全体が障害を受ける可能性が高いことを肝に銘じなければならない。

その「網」の途中に位置する生物の生命維持の為には、炭素も窒素も水も不可欠であり、そこに人為的に生成した物質が加わることで、ある生物の個体としてのバランス、つまりそれぞれの生物種がもつホメオスタシスに影響がでる可能性があることは想像に難くないだろう。ヒトも同様である。食物網・循環網に狂いが生じれば、地球上に棲むそれぞれの生物の個体の生命維持に障害が生じ、ヒトの生存に影響する。

生態系を“複雑で動的なシステム”ととらえることができるのは、これらの食物網と循環網の“網“のバランスを維持することができる”自然の力”が地球に影響を与える人為的な影響力を上回っていて、人がいかに地球に働きかけても”自然の力”によって生態系が修復可能であった時代においてである。「母なる大地、母なる地球」が機能していた時代の考え方である。残念ながら、人が「母なる大地、母なる地球」に傷跡を落とすようになった「人新世」という用語が誕生した現代においては、人の活動が地球のホメオスタシスを破壊しバランスを維持できなくなっている。地球温暖化は代表的なケースとして挙げられる。物質およびエネルギーは基本的に閉じたシステム内に存在するが、熱に関しては地球と宇宙の間で開放系となっている。太陽からのエネルギー入力と、生物活動による発生熱を含む地球から宇宙への反射・放射の収支は長期間安定していた。しかし近年、大気中の温室効果ガス濃度の上昇によって熱エネルギーの地球内部への蓄積が進行しつつあることが気象現象として観察される。このようなシステムバランスの逸脱は、極地域の氷床消失や日本国内での野生動物（例：クマやシカ）の出没頻度増加などとも関連している可能性が示唆される。「循環網」の脆弱性に起因する影響は、その規模の大小を問わず、各所に速やかに顕在化する可能性が高い。

4.2 「食う・食われる」を支える情報世界 ― 進化の中で形成された環世界

細胞は、その生命を維持するために栄養を常に取り入れなければならないことは前述した。細胞は生命の単位であり、その規則性のある複雑な構造を維持するために外部からエネルギーとして利用できる物質を取り入れている。栄養は、物質（有機物）でありエネルギーであるので、「食物網」や「循環網」といった生態系の“網の構造”を考えることで、生命体と栄養の関係を考えることは比較的たやすい。

栄養を摂取できた個体は子孫を残す。この過程を「生殖」という。生殖は、無性生殖と有性生殖に分けられ、無性生殖では、ある生物が他の生物の関与なしに生殖することを可能とする。一方、有性生殖は 2 つの特殊な生殖細胞の相互作用を必要とし、その過程で遺伝子が混ざり、この 2 つの両親となる生物の遺伝的特徴（形質）を持った子孫生物が生まれる。生物個体群の形質が、世代を経るにつれて変化する現象を進化とよぶ。

生命体は、生存のために栄養摂取を行い、生殖によって子孫を残してきた。生物間における捕食と被捕食の関係からなる食物網が成立する環境下で、進化によって多様な形質が生じたと考えられる。「形質」とは生物個体の性質や特徴を指し、これらは遺伝子によって次世代に伝達されるため、「遺伝形質」ということもある。例え

ば、体毛の色や体型は遺伝形質の典型例として理解されやすい。一方、個体が環境情報を処理し選択する行動様式も遺伝的に継承されるものがあるが、目に見える外見の形質に比べて注意が向かない。ここでは、進化によって形成された行動様式、すなわち行動形質に焦点を当てて生物の情報世界について考察する。

(1) 情報世界　感覚受容　刺激応答(反応)

原核生物も、好適な環境周辺に集まり棲息していることが見られる。原核生物よりも強い運動性を示すようになった真核生物も、細胞の外側からの刺激を信号として受容して好適な環境に移動する。多細胞生物を形成した生物の「個体」は、外界の光や音などの刺激を感覚受容に特化した感覚器官で受容し、そこからの信号が介在ニューロンである神経系を通じて伝達・整理(処理)された後、筋肉や器官へ信号が送られて適切な反応(応答)が起こる。この処理は、その生物がもつ感覚受容能を介して、外界からの刺激を受容し、周囲の環境の状態を把握し生命維持するために適した反応をすることに繋がる。感覚器から介在ニューロンを経て筋肉などの効果器へと情報が処理されることで多細胞生物は生存している。感覚器も、神経系も、筋肉も、その形はそれぞれ大きく異なるが、細胞という単位からできている。細胞の「網」によって、情報処理されて多細胞生物の個体の生命維持がなされている。

(2) 環世界(Umwelt)

前述のように、生物が生命維持のために適切に反応する行動のほとんどは、遺伝形質の一つである。 摂食や捕食、繁殖のための異性間コミュニケーションといった行動様式は、生存および繁殖成功に直接的な影響を及ぼす。つまり、このような行動を制御する情報処理系も形質であり、個体の適応度に寄与する要因となる。そのため、特定の遺伝子を有する個体にみられる行動特性が、種ごとに異なる様相を呈することは考えやすいだろう。

ヤーコブ・フォン・ユクスキュル(1864 年、エストニア生)は、ドイツ系の動物学者である。彼は、各動物が知覚し、個体として働きかける世界の集合体が当該動物にとっての環境全体となるというUmwelt(環世界)説を提唱した[28]。この概念は、前述したように進化過程において種ごとの行動特性が発展するため、一つの種内で完結する情報処理体系が存在するということになる。動物は自然環境の実存は不可欠だが、自然環境のすべてを識るわけではなく、その感覚器官および情報処理能力の範囲内でのみ、情報として自然を認識し、またその認識範囲に基づいて自然へ影響を及ぼしていることになる。すなわち、アリはアリの環世界、カエルはカエルの環世界、ヒトはヒトの環世界の中に生きており、同種間では相互理解が容易である一方、異種間での相互理解は極めて困難であるという考え方となる。

(3) 反射・走性、本能、学習、知能といわれる行動様式

1903 年にオーストリアで生まれたコンラート・ローレンツは、1973 年にニコ・ティンバーゲンおよびカール・フォン・フリッシュと共に動物行動学の発展に寄与し、ノーベル医学生理学賞を受賞した。ローレンツは、生得的行動様式(本能行動)を説明するため、「鍵刺激」という概念を体系化した。彼は、本能行動の誘発が特定の鍵刺激によって開始され、その後、一連の行動が渓谷を流れる水のように連続して出現することを論証した。さらに、本能行動は種固有の遺伝形質であり、動物の行動も色や体型などと同様に進化や自然選択という枠組み

[28] 生物から見た世界　ユクスキュル著　日高敏隆・野田保之訳　新思索社

で解析可能であることを示した。動物の行動が、それぞれの生物がもつ色や体型などの形質と同じように、進化や自然選択の文脈で扱えることを我々に納得させたのである。

動物の行動形質は、反射や走性行動、本能的行動、学習行動、知能行動と、階層に分けて考えることがある(図4.1)[29]。反射と走性は、刺激に対して比較的単純な行動で、反射は刺激に対する身体の一部の局所的な反応であり、走性は光、化学物質、重力などの刺激源に対して体全体が近づく(正の走性)か、遠ざかる(負の走性)といった個体が外界の中で方向性を持つ定位運動である。

これらの行動様式はすべて生物の形質であり、その特定の行動が種内で共有されるという考えが「環世界」の概念である。反射行動や本能行動は遺伝的に継承されるのみならず、学習行動および知能行動を担う脳の基礎的構造もまた遺伝的要因によって規定される。特定の「鍵刺激」が定型的な生得的行動を引き起こすという彼らの研究は、ユクスキュルの提唱した「環世界」論を実証的に裏付ける研究でもあったと評価できる。

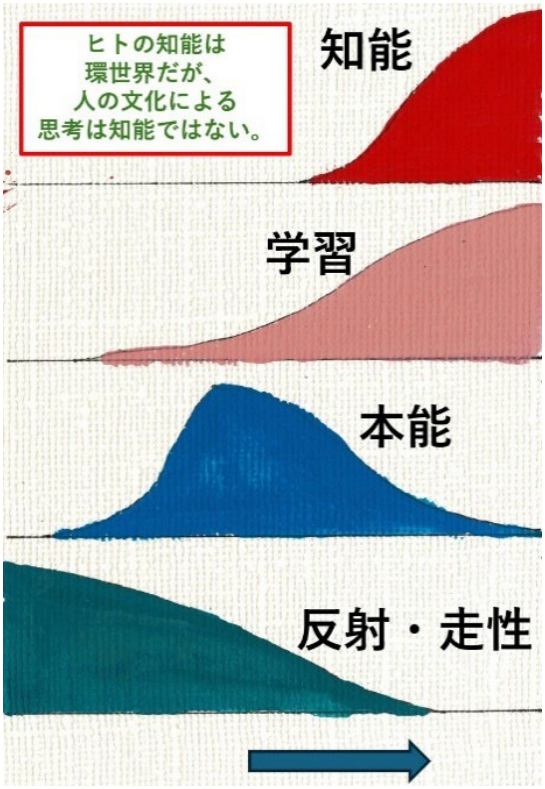


図 4.1　行動の複雑さによって分類した概念図

矢印で示した横軸は進化年代を表す

(4) ヒトの環世界

ヒトの行動が他の動物種と比較して極めて複雑であるとしても、我々の行動基盤が依然として遺伝的形質に由来する。ヒトの行動が遺伝的に決定されている例として、反射を考えてみよう。ヒトの反射行動の具体例としては、膝蓋腱反射(膝蓋骨下の膝蓋靭帯を叩いた際に大腿四頭筋の収縮によって膝関節が伸展する現象)や、熱いものに触れたときの脊髄反射(高温物体に触れた際に発生する即時的な撤退運動)などが想像しやすいだろう。これらの行動は、熱いという熱感覚の認知が生起後に形成されることからも示唆されるように、熱いものから手を遠ざける行動は意識的制御下にはない。

反射よりも複雑な行動として、ヒト間のコミュニケーションを考えてみよう。万国共通の笑顔による相互作用、普遍的な叫声、さらにそれぞれの地域固有の身振り手振り等、音声としての言葉を用いない多様な表現行動が観察される。これらの表現行動は地域差こそ存在するものの、ヒトとしての種に環世界が存在する例となるだろう。動物行動の大部分は、一見すると環境への適応的かつ柔軟な反応であるように見受けられるが、実際にはその行動の根幹は遺伝的形質によって規定されているのだ。進化の過程を経たヒトも他の生物と同様に遺伝的形質を有しており、「ヒトの環世界」の存在は理論的に明確である。進化という後戻りすることのない時間経過の中で、食餌に成功した同種内でのコミュニケーションに成功し子孫を残すことができることで系譜が続くという生物のルールは、ヒトの進化でも例外とはならずヒトにも環世界は備わっている。しかし、その具体的な行動様式についての詳細な研究が十分になされているとはいえない。「ヒトの環世界」は、種としてのヒトの基礎的な現象であり、遺伝的行動形質として体系的に研究する必要がある対象である。

ピラミッド型の食物連鎖を考えた時、ヒトが頂点に位置すると欧米が発祥とする生態学では考えられてきた。図1の反射・走性、本能、学習、知能といわれる行動様式を考えるとき、ヒトの行動様式に知能が占める部分が

[29] 本能の研究　ニコラス・ティンバーゲン著　永野為武訳　三共出版

多いので、ヒトは生物界の頂点であると考えがちである。欧米の宗教として信者の多い一神教の頂点は神であるが、神が地球の支配者として選んだのは人であったとされている。この「人が万物の頂点である」という考え方をしてしまう傾向がヒトにはあるようだ。なぜ「人が万物の頂点である」と考えてしまうのだろうか。ひょっとしてこの傾向はヒトの環世界の一つなのだろうか？あるいは後に述べるように文化的な行動なのだろうか？

4.3 ヒトから人が誕生する

人が共通の時間の中で生物として進化してきた生物の種としてのヒトの中に、共通のものを見出すことは難しい。そのために、ヒトの環世界を、「物理的な実体そのものではなく、その対象が自分にとってどのような「意味（作用）」を持つかによって構成される」などと定義づける者がいるが、環世界は種の中で共通であるという前提から逸脱する。また、ヒトは「道具」や「技術」を用いることで、本来の生物的スペックでは捉えられない情報を環世界に組み入れることができる生物であるというような定義をする者もあるが、やはりこれもユクスキュルが定義した範囲から離れる。「人間」という用語は、ヒトと人という二つの異なるものを包含しているのかもしれない。改めてヒトと人は何が違うのかを考えるために、まず進化論の誕生について考えてみたい。

(1) 進化論の誕生と普及

38～36 億年ほど前に生命が誕生した原始の生命は原核生物であり、20 億年ほど前に光合成をする原核生物のシアノバクテリアが地球環境に酸素を大量に放出するようになった。その後、多細胞生物が先カンブリア紀の終わりごろに誕生し、5.4 億年前のカンブリア紀に現在棲息している多様な生物の先祖が誕生したと考えられている。多様な生物は、絶滅と誕生を繰り返し、地質年代としてごく最近の 30～20 万年ぐらい前にアフリカの東部に人類の先祖が誕生したと考えられている。進化とは、生物集団の遺伝子頻度が世代を通じて変化し、新しい種が特徴ある形質をもっていく長期的な変化の過程である。

進化論が、チャールズ・ダーウィン[30]ら複数の博物学者が生物の分類学的な洞察から導きだした科学的仮説として始まったことを知る方は多いだろう。我々が生きる現代の自然科学においては、形態学、遺伝学、比較発生学、分子生物学など多岐にわたる分野で進化論を支持する研究成果が蓄積されている。その結果、生物学者や科学者の間では「進化はほぼ確実に生じてきた事実である」と広く認知されており、日本国内でもこの理論の受容率は高い傾向がある。社会実情データ図録（2000 年）によれば、日本人の約 75%以上が進化論を「正しい真実である」と肯定している。しかし、2019 年にアメリカの調査会社の Gallup が行った報告によると、アメリカ人の約 40%が「神が人間を現在の姿のまま、過去 1 万年以内のどこかの時点で創造した」という、厳格な創造論（Creationism）を信奉していることが示されている[31,32]。日本人は進化論を受け入れやすく、科学先進国の一つでもあるアメリカでは進化論を何故受け入れにくいのだろうか[33,34]。世界を席巻するヒトは生物学的には一種であり、おそらく同じヒトの環世界を持っているはずなのに、国ごとに考え方がなぜ大きく異なるのだろうか。

(2) 進化論の発展例としての“ミーム”という考え方の矛盾

リチャード・ドーキンスの進化生物学に関する著作『利己的な遺伝子』[35]において、「ミーム」は、模倣を介して人々の間で伝達される情報単位として位置付けられている。この概念は比喩ではなく、自己複製性を有する脳

---

[30] 種の起源　C・ダーウィン著　堀伸夫訳　槇書店
[31] https://news.gallup.com/poll/261680/americans-believe-creationism.aspx
[32] みんなの進化論　ディヴィッド・スローン・ウィルソン著　中尾ゆかり訳　NHK 出版
[33] はずれ値だらけの日本人　本川裕著　星海社新書
[34] https://honkawa2.sakura.ne.jp/9492.html
[35] 利己的遺伝子　リチャード・ドーキンス著　日高 敏隆ら訳　紀伊國屋書店

内構造として明確に定義されている。ドーキンスによると、ミームは神経回路の特定パターンが他者の脳に再構成されることで伝播し、社会集団内で文化的自己複製子として自然淘汰や進化のプロセスを経る点で、遺伝子と同様に実体的存在として捉えられる[36]。ただし、エピジェネティック因子の影響を考慮した場合でも、獲得形質や高度な行動様式が遺伝的に子孫へ継承されるわけではないことに留意すべきであり、ミーム概念を生物進化の枠組みに安易に適用することには慎重な検討が求められる。

4.4 ヒトと人 ― 肉体で囲まれた個人と、個人を取り巻く外部にある情報世界 ― ヒトが進化の中で獲得した「ヒトの環世界」と、ヒトが人として形成している「人の哲環世界（文化的情報世界）」

(1) Homo domesticus による環境収容力の改変

生物は時間の経過とともに個体数が増え、ある空間（地域）で特定の種を維持できる最高のレベルに達すれば、その数は頭打ちになる。これは、ある環境において食料・水・生息域・衛生環境などの条件のもとで、持続的に維持できる生物（または人間）の個体数の上限である「環境収容力」(carrying capacity)を超えることができないことにより、生物の無限の増殖はストップされ、生態系のバランスが保たれることを意味する。ところが人間は、1～2 万年前に始めた農耕牧畜業の開始、つまり農業革命によって文化を成長させる中で農業技術などを養い、環境に改変を加え続け、ゆっくりした人口増加が続いていた。しかし、産業革命以後からは指数関数的と言っても過言ではない人口爆発を遂げるようになった。その結果、ヒトは人間の手の入っていない自然の中で生きられなくなり、自然の危険から守られた環境を築き、その中で生活することで自分自身をどんどん「家畜化」していった。自虐的に賢いヒトという意味の *Homo sapiens* を意識しながら、私は *Homo domesticus* という学名を思いついた。このラテン語は「家畜化したことがヒトの特徴」という意味である。馬や牛、犬や猫のようにヒトの手によって家畜化された動物はいくつか挙げられるが、自分自身を家畜化した動物はヒト以外にはいない。*Homo domesticus* は、自分自身である人間の保護なしで自然の中では生きられなくなったので、地球を改変し続けることで家畜動物としての人間が住める場所を増やし続けるという「環境収容力」の法則を乗り越えている。その為、産業革命以来ずっと大量のエネルギーを使用しながら生活の拡大を選んでいるのが現実である。この近代の人間の営みの結果としての現在の地球環境は、自然の摂理を無視し、人間が自分自身の手で築いてきたものがほとんどとなった。ヒトが地球を改変しつつ、ヒト自身もヒトが生きる集団自身や環境に大きな変化をし続けてきている。

(2) 増加したヒトは人となる ― ヒトがあつまり“マント”を纏うようになった

ヒトは「ヒトの環世界」という情報処理を用いて、外界と相互作用する。この情報処理系は、ヒト自身が築き上げた環境から影響を受けて、その環境の色や形などの特徴を情報処理の中に取り入れる。一時的に自分の身体を装う “マント”のようにその色や形という情報を受け入れるのである(図 4.2)。そして、 身につけた“マント”は自身の脳などの情報処理系を改変する。つまり、そのマントの色や形によって情報処理系は改変され、自身の内部の情報処理系が醸成される。醸成された情報処理系によって処理された情報は、再び個体の外側のマントの色や形を変える。その結果、地域の色や形を修飾し、地域文化の創成となる。つまり、個体を包む“マント”の外側には、人間同士のコミュニケーションによって出来上がる“あわい（間）”ともいえる文化が創成されるのである。TV 番組の『ケンミン SHOW』で話題になるように、地域ごとの特徴ある文化が創成されていることが、人間が“あわい（間）”と相互作用している証拠といえよう。“マント”の中には“知“がたくさん詰まっていて、そのマント

[36] ダーウィン文化論-科学としてのミーム ロバート・アンジュ編 産業図書

を纏ってヒトから人へ変化した者は、”知“を利用して生存価が上がるので、各個人の中で”知“は変化し続けると同時に地域の”知“も変化するので地域の文化が成長する。“マント”はある個人が産み出した目に見えないものだが、個人の成長に伴って変化が続き、その個人が死んだとしても地域文化の中の人々が共有来る風土として残る。風土は地域文化であり、風土は少しずつ改変され続けていく。

(3) “マント”は、生物としてのヒト（人）が獲得した行動を決定する要素

個人にとっての”知“の変化や成長は、日々生活する中で得たものなので、獲得形質のようなもので、人間が死ねば、人間が経験した”知“の変化・成長も共に消失する。ところが、生物の獲得形質は次世代に伝えることができないが、”知の獲得形質“はその人のマントの外側に出すことができるので、生物の一般則である”獲得形質は遺伝しない”という法則から外れる。マントの“外側の物”とは、個人を囲む個体群が共有している「風土」や「地域文化」の中にある“知的空間”や“伝統”などとなる。ここでいう「風土」とは和辻哲郎の概念[37,38]に似ている。人は、人の外側にいる同じような“マント”を纏った人と相互作用をし、他者のマントを見ることで、そのマントを見た別の人のマントが広がる。マントの“外側の物”とは、たとえば書物であり情報機器などである。

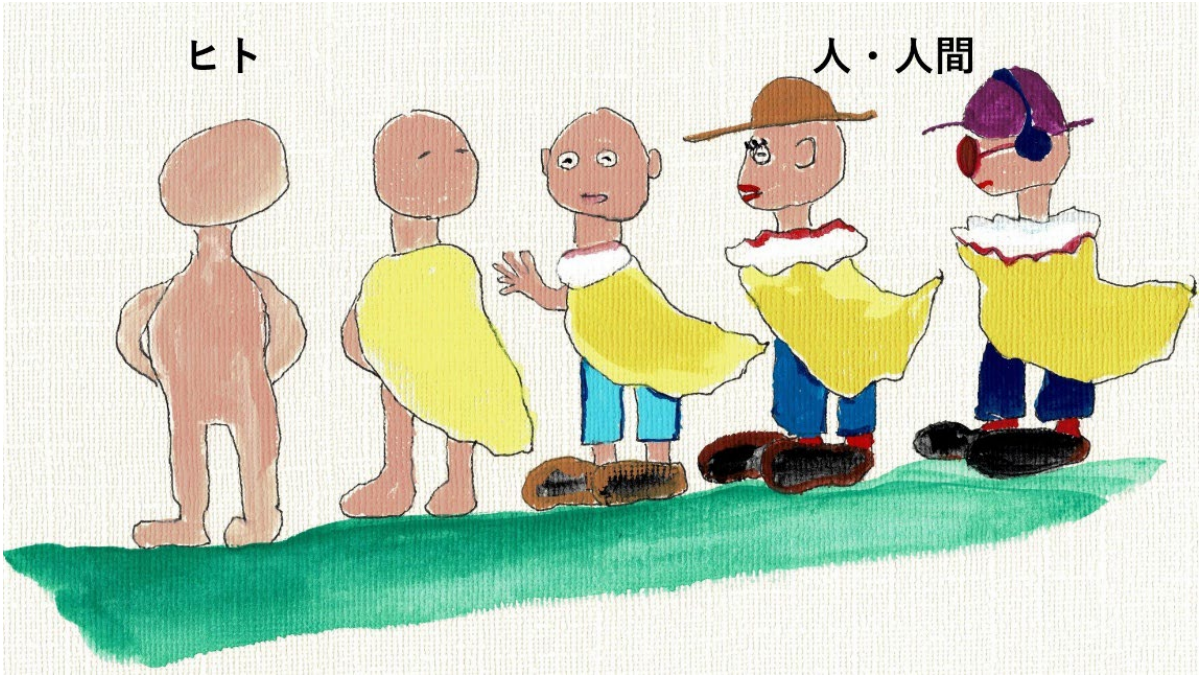


図 4.2 ヒト

カタカナで表記しているヒトは、進化の中で生存した結果として獲得した行動様式の部分だけに注目した「ヒトの環世界」だけで生きる種としての集団を意味する。そのヒトの周りの集団と相互関係をもって情報処理に色や形の特徴をもったマントを纏うことにより、ヒトは人に変化する。そのマントは種々に改変され、帽子やサングラスなどまで纏うようになり人としての特徴が極まっていく。

---

[37] 風土: 人間学的考察　和辻哲郎著　岩波文庫
[38] 風土学はなぜ何のために　オギュスタン・ベルク著　木村伸夫訳　関西大学出版部



図 4.3 “マント“

地域集団を形成する人は周辺部の方々と影響し合うので、実効的に閉じた地域の風土や地域文化を形成する。この図で、同じようなマントを纏う集団の外側にあるものが「地域文化」を表しており、その人々の“あわい”こそが文化であり、文化は多様でなければならない。生物多様性が地球の安定を保つことができることと、文化の多様性が人間の安定を保つことができることと似ている。すべての文化をお互いが尊重しなければ、人間の存続はない。

ここである地域集団がもつ“知”あるいは“地域文化”にとって大きな危険が生じる。地域集団のマントの色が何らかの理由で色づけされると、その集団はその色を信じるようになるのである(図 4.3)。近年ジェイムス・ポケット氏が著した「科学文明の起源」[39]が出版された。この本の中心の話題は、「これまで、近代科学は欧米で開発されたものをそれ以外の地域の人たちが学んで世界は発展してきたと信じられてきたが、実は国際的なつながりが時代を超えて科学の発展を支えてきた」というものである。また日本国内でも科学を遂行するためには一神教の国の方法を学ぶべきであるという信仰のようなことをいう科学者もいる。明治維新コンプレックスとか敗戦国コンプレックスというべきなのか、それとも単純に先行している集団に騙されているだけというべきなのか不明だが、ある色を提示されると、その色が正しい色であると思い込んでしまい、それが真理であると信じ、共に幻想の世界の中で一定期間過ごしてしまう傾向が、著者である私も含めて、すべてのヒト(あるいは人)にあるように思える。

[39] 科学文明の起源　ジェイムズ・ポスケット著　水谷淳訳　東洋経済新報社

4.5 *Homo sapiens* の特徴は *Homo coimaginans*

－ “あわい(間)”を介して自己と仲間が共鳴しながら新たな“人と人、自然と人、現実と虚構などとの文化”を形成し、幻想(＝真理)という空間(＝世界)を築き続ける人間

(1) 生物としての「ヒト」の学名、

ヒトの進化は、人々の興味を惹きやすいテーマであり、数多くの先進的な研究報告もなされている。日本人にとっては興味深い日本人の起源・進化に関する書も数多くある。

Homo sapiens と同時期に存在したとされるネアンデルタール人およびデニソワ人に先立ち、*Homo erectus* や *Homo habilis* などの複数の *Homo* 属種が確認されている。なお、リンネによる命名の際、*sapiens* は *Homo* を修飾する語として用いられており、この修飾語を変更することでヒトの多様な特性を示す試みが行われている。前述した *Homo domesticus* もその一例であり、さらに *Homo ludens*(遊戯的活動を重視する)、*Homo faber*(製作・工作能力を持つ)、*Homo economicus*(経済的合理性に基づく)、*Homo religiosus*(宗教的活動に従事する)など、多様な名称が提案されている。これらの試みは、*Homo sapiens* という生物の定義が多くの研究者によって議論されており、その定義自体が価値を有することを示している。一方で、私は、生物の一種としてのヒトの進化と、人、人間の進化は別々に考えなくてはならないのかもしれないと考えるのである。

(2) Homo coimaginans

これまで述べてきた重要な要点は以下のとおりである。第一に、人類は進化的過程を経て生存した結果として存在しており、生物一般が有する遺伝的形質としての環世界を人類も保持している。第二に、人類は「ヒト固有の環世界」だけでなく、個体を取り巻く外部環境からの影響を受けて自身の情報処理系を修正し得る(いわゆるマントを纏う)、そしてこの修正された情報処理系が外部環境の特徴(色彩や形状など)に変化を及ぼすこともある。第三に、外部環境の特徴は、個体が生物学的に消滅した後も持続する。この三点にまとめられる。

このまとめを踏まえ、*Homo sapiens* の特徴について再考したい。進化の過程で獲得され遺伝的に保持されている情報処理機構が基盤となり、個人の情報処理系(脳など)に外部情報を取り入れるには、その情報に対して価値認知が必要となる。この価値認知は、周囲の *Homo sapiens* の思想に対する共感性によって担われ、さらに、この共感性に基づき他者の思考様式への没入傾向が重要な役割を果たしていると考えられる。この人類の特徴を踏まえた学名として、*Homo symbionticus*、*Homo simbiens*、*Homo consonans, Homo concretio, Homo communicans, Homo cultivans* などと、協奏、共鳴、共感、共創などのイメージを考えたが、最も特徴的な価値認知と仕組みとは「幻想の世界を共に想像する」ことができ、その上で「幻想を、真理として集団内で考える」ことができることではないだろうか。そのことを示す学名として、*Homo coimaginans* としよう。「幻想の世界(真理)を共に想像する人間(幻想を共にする人間)」という意味である。*Homo coimaginans* の和訳としては「人間」が最適なのかもしれない。人と人との間に“思考のあわい”があるということも示している。人間とは、“あわい(間)”があることで幻想(＝真理)を共有できるという特徴をもつ生物であるといえる。

進化論が、アメリカで認められてはいないが、日本では認められているというのは、教育レベルの違いだけでなく、人と人とが織りなす“あわい(間)”がアメリカと日本で異なっていることを示しているといえるだろう。

4.6 日本人の文化に見られる特徴、“日本のあわい(間)”とはなにか

(1) 道・型・作法という言語

日本において、「道」「型」「作法」は単なる技術の習得や形式の模倣を超え、自己の精神を磨き高めるための不可欠な修行体系として位置づけられている。これらは剣道・柔道などの武道や、茶道・華道などの芸道

に共通してみられ、根幹を成しているといえる。これらの「道」は、試合での勝敗や目に見える所作の美しさだけではなく、日々の鍛錬を通じて、己の慢心を排し、礼節を尊び、揺るぎない精神性を養うという「人間形成」のプロセスそのものに重きが置かれているといってもよいだろう。特筆すべきは、その教えの多くが「不立文字」や「以心伝心」の精神に基づいている点である。極意や精神的な悟りは、言葉による説明で理解するものではなく、あえて言語化を避けた厳しい「型」の反復を通じて、心身で直接体得するものと暗黙の了解がある。このように、言葉で語り継ぐ部分を最小限に留めることで、かえって体験を通じた深い精神的な継承がなされてきともいえるだろう。その意味で、各国に固有の継承が存在し、日本の場合、道・型・作法は、言語の一部であるといっても過言ではないだろう。

(2) 武士道

新渡戸稲造による著作『武士道』(Bushido: The Soul of Japan)[40] は、1899 年(明治 32 年)に米国にて刊行され、日本人の精神性および倫理観念を国際社会へ紹介する役割を果たした。本書執筆の契機は、「宗教教育が存在しない日本では、どのようにして道徳教育が行われているのか」という問いに対する応答であったといわれている。 新渡戸は、第 2 章「武士道の源流」において、武士道の倫理的起源が仏教・神道・儒教の三つの思想体系に由来することを論じている。特に神道については、教義自体は簡明であるものの、忠君愛国の理念を武士道へ付与した重要な要素として位置づけている。 また「体系的、哲学的、あるいは合理的な神学的装いを持たない“日本人の国民的本能”や“民族的感情”に基づいた信仰である」ことを指摘している。以下に述べる八百万神と深く関係していると思う。ただし、生物学的には「本能」は遺伝子に深く刻まれているものであり、“日本人の国民的本能”などという遺伝子に刻まれた“本能”は存在しえないことを明記しておきたい。“国民的本能”という用語は、文学的な表記としては許されるが、科学的・論理的な文脈では許されるべきではない。

(3) 八百万の神を考えるとされる日本人の宗教

日本における八百万神信仰は、万物に霊魂が内在するというアニミズム的観念や、自然そのものを崇拝対象とする自然崇拝の考え方と密接に関連していると指摘されている。しかし、この信仰体系を単純にアニミズムとして括ることが妥当かどうかについては、慎重に検討する必要があると考える。新渡戸稲造が武士道の著作を思い立ったのが、「日本には宗教教育がないのに、どのように子供に道徳を教えているのか？」と問われたことがきっかけであったといわれている。新渡戸は自身がキリスト教徒であり、著作活動においてもキリスト教世界に対して日本の宗教観の妥当性を主張する立場を取っていた。このため、彼による武士道の解釈にはキリスト教的要素が色濃く反映されていると考える方がよいだろう。

[40] 武士道 BUSHIDO 新渡戸稲造著 佐藤全弘訳 教文館

宗教の教義は言語で表されることがほとんどである。一神教の世界に住む人々の宗教は、神への礼拝に対して作法があるものの、狭義は言語で伝えられている。一方、欧米人がアニミズムと呼ぶ日本人の八百万神信仰では言語化された狭義はほとんど無い。一方、日本にはほとんどの日本人が身につけている「道・型・作法」があり、この動作法は言語を上回るほどの意味があるようにみえる。新渡戸が武士道として語る必要のない動作法が日本語に内包されている可能性を考えるべきだろう。*Homo coimaginans* が共通の幻想の世界を、動作法を通して日本という地方に、“日本のあわい(間)”を形成しているとしたら、欧米の言語による視点を超えた教育方法の見直しを含めて、考え直す必要がある。人間の本質が *Homo coimaginans* かもしれないという視点をもって、日本独自の文化を見直すことで、“日本文化”を再認しなければならない。単純に神を信仰するのではなく、自然の中に八百万の神の存在を認めるという「自然と共に生きる知恵」を文化として兼ね備えている日本では、「道・型・作法」という所作が言葉と共に精神性を伴った特徴ある文化を形成している(図 4.4)。

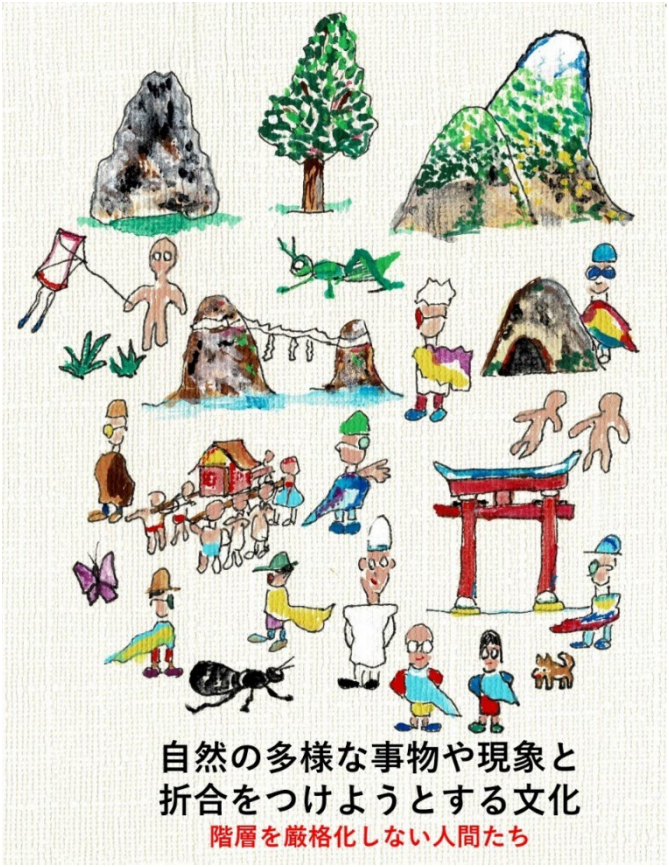


図 4.4 自然の多様な事物や現象と折り合いをつけようとする文化

八百万の神として理解されている日本人の「こころのよりどころ」は、一神教の宗教とは大きく異なる体系をもっている。自然物および人間が造り上げた外国の宗教も導入し、すべての「折合」をバランス良く形成し、心の安寧を優先するという独特の風土がある。神道や仏教を前面に出すと理解しやすいので、日本人の儀式はいくつかの宗教の作法を利用するが、自然との調和、多様な生物の共存、生命のはかなさへの折合いなどが根底にある。ヨーロッパ中心主義の科学的思考だけではない視点を養う必要がある。

クロード・レヴィ・ストロースが日本に見出したのは、「古き伝統」と「最先端の近代化」が矛盾なく共存している姿だろう。 彼は、自身の提唱した「野生の思考」[41]が、工業化された現代日本社会の中でも、洗練された形で息づいている稀有な例として日本を高く評価していた。西欧が自然を支配・征服の対象としたのに対し、日本は自然の中に八百万の神に代表される性を見出し、自然と一体化する文化を持ち続けていることや、近代化を遂げながらも、神話や伝統的な美意識を切り捨てずに保持している「生きた博物館」のような側面なども彼の高い評価を受けていた。構造主義の創始者とされる人類学者レヴィ・ストロースは、西欧人でありながら東洋文化への理解を示したと考えられる。個人は周辺環境の文化的影響を受ける一方、周囲の文化にも影響を及ぼし、その地域固有の思考体系が形成されるという認識が彼にはあったと推察される。*Homo coimaginans* という用語は使われていなかったが、人類学の考え方の基礎として、文化が地域によって醸成される事実を認めていらしたの

[41] 野生の思考　クロード・レヴィ・ストロース著　大橋保夫訳　みすず書房

だろう。「人類が未来へ向かうための、もう一つの可能性」としてレヴィ・ストロースが着目した日本文化の特質について、改めて検証を行うことが重要である。

(4) 「人間中心(anthropocentrism)」とヨーロッパ中心主義(Eurocentrism)に支配されている現代 ― 現代に生きるわれわれが直面する問題

人間中心主義は、自然界において *Homo sapiens* を最上位の存在と位置づけ、それ以外の生物や自然環境を資源として捉える思想体系である。この価値観は、古代ギリシャ思想やキリスト教的伝統にその起源を見出すことができるだろう。さらに、ヨーロッパ中心主義は、15 世紀以降の植民地支配を背景に、欧州由来の価値観および科学的知識を唯一絶対の正解とする世界観を形成した。これら二つの思想が統合されることで、「白人成人男性」を標準的主体とする社会的枠組みが確立され、有色人種・女性・動植物・自然などは管理・支配の対象とされるという構造である「ヨーロッパ的理性」が優位という概念が成立した。その影響は今日に至るまで差別意識の根底に残存している。*Homo coimaginans* は他者の思想の影響を受けるので、遠く離れた日本という土地に住みながら、欧州(あるいは欧米)の影響を色濃く受けているのである。

日本の近代史における大きな出来事は、開国であった。そして明治維新の前後には、海外視察・留学を果たしたものが日本の政治や教育などを担ったのである。当時、文化の違い、特に技術力や経済力の格差を感じた先達たちが、欧州コンプレックスをもったことは想像に難くない。また、敗戦の経験を通してアメリカの支配を受けたことも「ヨーロッパ中心主義」の台頭を受け入れる要因になっているようにみえる。

現在発生している戦争の状況も示すように、アメリカを中心として「ヨーロッパ的理性」がもたらす意識状態は、日本だけでなく国際社会全体に広く浸透している傾向が認められる。

前述したが、ようやく近年になって、この「ヨーロッパ中心主義」は、幻想であることを示す著作が発表された。欧州の一国であるイギリスの歴史学者のジェイムズ・ポスケット氏が著した「科学文明の起源」[37] に関して、もう一度言及しよう。この本の中では、「科学の発展は孤立した天才のひらめきではなく、シルクロードなどの交易、奴隷貿易、植民地拡大といった人・物・情報のダイナミックな交流の結果であり、つまり『ネットワーク』による共同制作である」と説いている。つまり、欧州の科学者は、これら欧州帝国のインフラを利用して世界中の情報を集め、それを「科学」として体系化したに過ぎないというのである。自己批判としては、イギリス人の著作を褒め称えたいと思うが、体系化も実は日本国内をはじめ各国で実施していたのではないかと私は考えるのである。なぜなら、体系化をしないと科学の発展は難しく、それぞれの国での科学の発展の歴史があったからである。文化(科学)は“地域集団のあわい(間)”の中でのみ作られる。*Homo coimaginans* としての幻想(=科学)が各国でどのように発展してきたのか「ヨーロッパ中心主義」から乖離して、研究を進める時代が到来した。

(5) 人新世に生きるわれわれが直面している諸問題の数例 ― 八百万の神が解決するか

オゾンホールの研究でノーベル化学賞を受賞したパウル・クルッツェンらが 2000 年に提唱した「人新世(Anthropocene)」は、人間が地質や生態系に与えた影響に注目して提案されている地質時代における区分とされる。人新世の開始年代については諸説あり、農耕革命の発生時点を起源とするものから、産業革命以降をその始まりとする説まで幅広い見解が存在する。また、「人新世」を正式な地質時代区分とするか検討されていたが、2024 年 3 月の国際地質科学連合の会議において採択されなかった。しかしながら、人間の活動が地球環境へ及ぼす顕著な影響を示す概念として「人新世」は広範な学問領域や社会的議論において重要な役割を果たしている。

⑤ 環境危機

「人新世」の顕著な環境変化は、人間が引き起こしたものがほとんどである。化石燃料の使用による温室効果ガスの増加、生物多様性の喪失、プラスチック汚染、窒素・リンなどの循環の乱れ、放射性物質の拡散など、枚挙にいとまがない。これらは、それぞれ単独の問題ではなく、互いに影響しあって“環境問題の網“ともいえる。地球の限界（Planetary boundary）と呼ばれる人間が地球上で持続的に生存していくために、守るべき境界線は、複雑な環境問題の”網“であることを認識しなくてはならない。

「人間は自然を支配できる」という過度な人間中心主義が、気候変動や生物多様性の喪失を招いたといえる。日本の高校生物学の教科書の生態学の章に書かれている「生態系サービス」とは、自然が人間にサービスするという概念で、生徒たちも人間は自然からの恩恵を受ける側であるという教育を暗に受けることになっている。ヨーロッパ中心主義がその「自然を支配できる」という概念に拍車をかけ、自然を単なる「材料」と見なす態度となっている。国連を中心としたSDGsの発想も同様で、「14 海の豊かさを守ろう、15 陸の豊かさも守ろう」と“自然を守る”ことが示されている。残念ながら、「13 気候変動に具体的な対策を」に関してもほぼ空論状態であり、結果として「自然を支配することで地球環境の危機を回避する」というアプローチには限界が認められる。すでに文化の中に自然と共に生きる *Homo coimaginans* としての日本文化保有者たちが「ヨーロッパ中心主義」の呪縛から解き放たれて、階層性のない生態系の理解を進める方策を日本発で世界に広める責務がある。

⑥ AIとテクノロジーの偏り

AIの出現によって、これまで個人が形成するマントとしての“あわい”および個人を含む地域集団が作る“あわい”の中で育まれていた文化が、一気に「一個人」対「グローバルな情報群」とのやりとりとなる。ところが、「一個人」マントの色や形には地域性があるので、「グローバルな情報群」を理解するのは「一個人」がつけるサングラスで色づいたものだけがみえる。つまり、海外経験もない一個人は、いかに海外からの大量の情報の入力があったとしてもグローバルな情報を理解することはできないのである。一方で、マント設計思想や倫理観が西洋的な「合理性」に偏ると、結果としてAIによって一個人のマントが改変されることになり、地域の文化は消失する。多様な文化圏の哲学が反映されにくく、データの偏りが差別を再生産する危険が生じる。

また、AIが世界中で利用されることで、AIの回答に偏りが生じ、倫理観・価値観の画一化が起こり、たとえば西洋的な人間中心主義や二元論（善か悪か、正解か不正解か）に基づく「合理性」が人間の情報処理の根底に形成される危険性もある。多層的な倫理観が切り捨てや、グローバルな標準が知らぬ間に固定化されるリスクも考えられる。*Homo sapiens* がAI色に染まる（AIのアルゴリズムと一緒になる）日も近いかもしれない。*Homo coimaginans* は、周りの影響を直接受けるように進化してきた生物であり、決して人間は *sapiens*（生まれながらにして賢い）として進化したものではない。始まってしまったAIと共存し、地域の文化を守る技術を開発する必要がある。

⑦ 「豊かさ」の画一化

経済成長（GDP）を最優先する発展モデルは、ヨーロッパ中心主義的近代化の枠組みに依拠している。このアプローチによって、伝統的な生活様式や、定量化困難な「心の豊かさ」が排除されるという問題が既に顕在化している。一元的な発展志向は、地域固有の伝統や幸福の本質、たとえば地方文化の象徴としてのマントの色・形にも影響を及ぼし、多様性の喪失につながる。同じ観念（真理や正解などの幻想）を共有しやすいという人間_*Homo coimaginans*_の特性に注目しつつ、地域社会では人同士の間にある“あわい”を醸成して独自の文化的多様性を維持・発展させる必要がある。その地方の文化の維持の上で、各地域社会相互間の連携（コミュニケーション）強化も求められる。

「豊かさ」の画一化が進行する中で、直面する課題として環境保全および農業の持続可能性、コメの生産と流通に関する問題、野生動物（特に熊）の人里への出没による対策、児童の外国語教育が母語能力に及ぼす影響、AI 技術の早期導入による自国文化理解の希薄化など、多様な複合的問題が顕在化している。

⑧「落しどころ」をみつける

折合を付ける日本文化は、八百万神を認める日本の特徴だといえるだろう。「正解」や「真理」を唱えるのではなく「折合をつけて、落しどころを見つける」ところに、八百万神に象徴される文化の神髄があるといえよう。

4.7 自然界とヒト界、そして人間界 ― ミーム再考ーインターネットの普及と AI との共存

自然界とは、ヒトと、周辺の文化から影響を受けた人を含む人間と、天地万物が存在する範囲を指す。また、人間社会を取り巻く天体、山川草木、動物などの世界を指すといってもいいだろう。ただし、ここで大きな注意点があり、自然界を見て自然だと判断しているのは人間であることである。地域社会の人同士の間にある“あわい”で色づけされたマントを通して人が見ているのが自然であるので、自然の理解は人の数だけ多様であるし、またその地方の文化によって色づけされて自然は理解されているのである。このようなことから、自然界とは、人の認識の対象となるすべての外界のことであり、人によって理解の仕方も異なる。

現代の人間は、天地万物が存在する範囲を決めるだけでなく、その順位付けまでしてしまう傾向が生じている。日本国内においても、ヨーロッパ中心主義に従って自然の階層性まで考え、その階層に従って自然保護活動を開始することが善であるとされるようになってきた。

南方熊楠の「神社合祀反対運動」では、数百年守られてきた「鎮守の森」が伐採され、貴重な動植物の生息地が失われるという自然破壊への危惧だけでなく、地域住民の信仰やコミュニティが崩壊することも指摘していた。この危惧の表明の背景にあるのは神仏への尊敬の念だけでなく「森」という自然にある事物（＝八百万神の一つ）が消失することによる人心の中にある“あわい”の消失・崩壊だったのではないだろうか。地域社会における信仰やコミュニティの崩壊は、当該地域の文化的特徴である「あわい」の喪失を招く可能性がある。日本における八百万神思想の下、「森」は人々の精神性を象徴する存在であり、自然との関係性を調整する対象として重要な役割を果たしてきた。しかしながら、近年では地権者が個別の利益追求のために森林や渓谷を利用する事例が増加している。一方で、自然環境は日本人の精神文化の基盤であり不可分の資産であることから、これを忘れない政策の策定と実施が必要である。鎮守の森の破壊が日本人の精神的喪失につながることは多くの識者によって指摘されており、先人の行動理念に学ぶべきである。また、自然利用の方針については欧米中心主義に安易に倣うべきではなく、日本独自の視点に立脚した戦略構築とその国際的発信が求められる。

インターネットが定着した近年では、特定の画像やフレーズが瞬く間に拡散し、新たな価値が付加されながら世界中に浸透していく現象を「ミーム」と呼ぶようにもなっている。こうしたミームは、共通の話題や文脈を瞬時に共有する手段としてネットユーザーに広く使われている。リチャード・ドーキンスによる進化生物学の著作『利己的な遺伝子』において、「ミーム」は人から人へ模倣によって伝えられる情報の単位とされていたが、インターネットの普及により様変わりといってもよいほどの変化がある。インターネットによる「新たな価値が付加されたミーム」は、八百万神という自然の恵みからは乖離する危険があるだけでなく、人の間の“あわい”が生み出す文化的思考からも乖離する可能性がある。インターネットが含む AI のアルゴリズムと人との“あわい”の誕生である。定型化された AI のアルゴリズムによって人間がコントロールされる。

近年、インターネットの普及に伴い、特定の画像やフレーズが急速に拡散し、新たな価値が付与されながら世界中に浸透する現象と「ミーム」と呼ぶようになった。ミームはネットユーザー間で共通の話題や文脈を迅速

に共有する手段として広く活用されている。リチャード・ドーキンスの「ミーム」は模倣によって伝達される情報単位として位置付けられていたが、インターネットの登場によって、その概念には大きな変容が見られる。「インターネット上で新たな価値が付加されたミーム」は、従来の自然との調和や人間同士の文化的思考から逸脱する可能性を孕んでいる。また、AI アルゴリズムと人間との関係性においても、定型化されたアルゴリズムによる人間行動の制御が進行する懸念がある。しかし AI の開発はすでに普及してしまっており、AI の利便性を知ってしまった世界中の方々の動きを止めることはできない。次世代の創出と AI との共生を考察する際、日本文化に根付く八百万の神々への精神性は、社会的責任の観点から極めて重要な要素となる可能性が高い。

4.8 八百万神に包まれた人間の“ふるまい”

人類の進化は、人の興味を惹きやすいテーマであり、数多くの先進的な研究報告もなされている。しかし、その視点は“ヨーロッパ中心主義により醸成された科学”を基礎としている。日本がヨーロッパおよびアメリカから取り入れた科学的思考体系は、しばしば一神教的世界観の影響を受けた思想体系の一端として位置付けることができる。 我々日本の科学者の多くは、その思考方法を習得し、日常的に活用している。人類の進化の延長上に人新世と呼ばれる時代になった。新たに生み出されたプラスチックも人間が生み出した系の中に存在し一見「循環」しているように見えるが、実はマイクロプラスチックとなって地球環境に蓄積されている。福島第一原発の処理についても、多くの課題が山積しており、政府や東京電力が掲げる目標の廃炉の達成も危ぶまれている。さらに多様な課題が存在しており、現代社会では人間自らが創出したシステムや技術の管理が困難となっている現状を認めせざるを得ない。

天地万物が存在する範囲を自然界と定義するのであるが、その定義をしているのは人間であり、人である。前述のように、「あわい」は集団ごとに異なる特性ーたとえば色彩や形状ーを持つが、明治以降、日本にはヨーロッパ中心主義に基づく科学体系が導入され、その教育が主流となっている。このような状況下で、日本独自の科学体系の構築や展開が求められるべきだ。日本固有の科学的視点や方法論の確立と発展が求められる。固有の“マント”をしっかりと纏った人造りと、その人材の利用が急務である。

この論考の中で、一神教の世界を引き合いに挙げたが、一神教と八百万神の間に優劣を付けるものではない。それぞれの地方の文化がもつ“あわい”の違いと、その違いの大切さに注目するために宗教を例にしたのである。“あわい”によって、自然との関わり方や、経済の運営の仕方が変わり、多様な“あわい”があることで世界が安定しやすくなる。人間 *Homo coimaginans* の特性に注目して地域社会において人間の“あわい”を醸成しなくてはならない。

4.9 *Homo coimaginans* と循環の滞留—“網”の脆弱性

人間の“あわい”を構成する外部因子としては、文化および文化・文明が築いた経済活動、さらに個人および社会を支えるインフラストラクチャ等の人工物などが挙げられる。人間の“あわい”は地球上に現実に存在しており、自然との調和のもとでその持続性が担保される。本稿で触れた循環の概念において、食物（有機物）や物質の流通が「サプライチェーン」あるいは「資源循環」のような一方向的供給として認識されがちである点について指摘した。しかしながら、生態系のみならず、人間の“あわい”内部においては、「全ての物質・エネルギーが相互依存的につながるネットワーク型のインフラストラクチャや経済システム」つまり“網“として理解する必要がある。このような“網“は、構造転換の過程で特に留意すべき特徴を有する。すなわち、「局所的な脆弱性がシステム全体へ波及するリスク」と、「システム内部での循環的動態と外部環境とのエネルギー交換による柔軟性」の双方を両立させる構造体として理解し、対応が設計される必要がある。人体の例を挙げれば、身体を形

成する個々の細胞が各器官の機能維持のためには、血管系や神経系などのネットワークが恒常的なバランス（ホメオスタシス）を保っていることが不可欠なのである。

“網”構造における結節点（ノード）は、エネルギーや資源の循環における重要な交差点として機能する。これらの部位で滞留または閉塞が発生した場合、システム全体に連鎖的な崩壊が引き起こされる可能性がある。この現象は、ヒトの生体内における血栓形成による循環障害に類似し、社会的ネットワークや経済、生態系などにおいても同様の現象がおこる。具体的には、経済システムの場合には資金の流動性、生態系では栄養素の供給が停止することで、末端組織（例：中小企業や地域コミュニティ、特定の種の個体群など）が不可逆的な機能不全（壊死）に陥る。また、一見循環が維持されているように見えても、富や情報などが特定の結節点へ過剰に集積すると、システム全体への分配効率が著しく損なわれ、結果として代謝機能の低下および全体維持の困難化を招く。これは生体における脂肪過剰蓄積や、経済格差の固定化と比較し得る事象ともいえる。システムの循環障害は新規要素の受容性（外呼吸など外部からの変化に対応する能力）を低下させ、環境変動に対する応答性・適応能力の喪失につながる。したがって、特定の結節点への依存を排し、多様な形態・属性を有する結節点を配置する「多極分散型」および「多様性の許容と構築」を指向した社会システムの設計が不可欠である。

さらに、ヒトを含む動物個体の恒常性維持には、感覚器および神経系が中核的役割を果たしている点にも留意する必要がある。「滞留」を未然に防ぐための情報・センサ技術の確立が重要だろう。具体的には、ネットワークなどの結節点等において「現在、何が、どこで停滞しているか」や「流通状況が許容範囲内か否か」をリアルタイムで把握し、全体の流れを安定化させるシステムの構築が必要である。不自然な停滞を検知可能なセンサ配置および関連技術の開発、並びにその運用組織の整備も不可欠と考えられる。また、中央集権的な判断を待たず、各結節点が自律的に「局所的に詰まりのリスクがある」と認識し、適切にルートを迂回させる分散型制御系の導入も求められる。これは、インフラストラクチャなどの人工物の安定にも必要である。

この「滞留」を防ぐ情報・センサの配置に伴って、“網”全体の流れを仮想空間に再現し、「もしここで滞留が起きたら」というシミュレーションを常時行うことで、「血栓」のように詰まったり不調に陥ったりする前に、供給調整を自動発動させ、予防的に流動性を確保できる神経系のような情報管理ができる仕組みを組織化する必要がある。また、人為的要因による滞留の技術的抑制は、地球に存在する“網”や人為的に形成している“網”の中で思考世界“幻想”を共にしようとする形質をもった人間 *Homo coimaginans* にとって、極めて緊急かつ重要な研究課題と位置付けられる。

(1) 結節点などでの滞留を防ぐ「多様性と動的資源循環」

効率性の最大化に特化した一極集中型構造から、複数のノードが互いに機能する分散型ネットワーク形態への移行が求められる。ヒトなどの脊椎動物の場合は頭部と体部の神経系が分極的構造を示すが、節足動物では分散型神経系を有しており、一部の損傷時でも全体の生存機能が維持される。このような例に倣い、特定のサプライチェーンやエネルギー供給ノードが停止した際も、システム全体が致命的障害に至らないバックアップ機能を産業設計や都市計画などの初期段階で組み込むことが重要だろう。

(2) リアルタイム監視と「自律的な相互作用」と「補償回路による安定化」

これまでの定期的な監査・監視制度から、センサを活用した「リアルタイムの可視化」のシステムを開発し、そのセンサをネットワークシステムに組み込む。システムが危機に繋がりそうな滞留を予見した場合、自動的に警告や流れのルート変更が行われるような、自律性を持つ監視インフラを整備することで、社会的“幻想”の安定

度を増す。また“網”全体を自律的に機能するシステム開発は不可欠だが、自律的だけでなく補償回路による安定化も重視する。

4.10 提言としてのまとめ

人新世(Anthropocene)において顕著な環境変化は、そのほとんどが人間活動に起因している。温室効果ガスの増加、生物多様性の喪失、プラスチック汚染、物質循環の攪乱、放射性物質の拡散など、諸問題は単独で存在するのではなく、相互に連動する「環境問題の網」を形成している。我々は、地球の限界(Planetary boundary)を統合的な危機として認識し、対処しなければならない。地球の限界を招いた根幹には、自然を支配・搾取の対象(材料)と見なす過度な人間中心主義、すなわちヨーロッパ中心主義的な価値観が存在する。日本に住む我々には、自然と共生する八百万の神に象徴される文化があり、ヨーロッパ中心主義の呪縛から解き放たれた新しいアプローチを世界に広める責務がある。それは、人間を頂点とする階層的な生態系観を捨て、自然と対等な「共生」の視座へ転換することである。自然や人間社会を“網”と理解し、「管理対象」から「共に生きる共同体」へと捉え直す新しい方策を、日本から世界へ発信し、真の持続可能性を追求することを提言する。

各論として、1.「食物網・循環網」の視点に基づく地球環境政策への転換をすることで、特定の物質や産業活動の影響を点として捉えるのではなく、“網”全体に及ぼす波及効果をシミュレーションする統合的な評価体系を構築すること。2. “網”の結節点など、一部が破綻すれば修復が困難であることを前提に、予防的原則に基づいたあらゆる人為的化学物質の管理と排出規制を強化すること。3. 経済や物質などの循環の滞留を防ぐためには、センサー技術や分散制御の導入が重要であり、リアルタイムで状況を把握して自動的に対応できるシステムの設計をすること。4. 自然の修復力は人間が破壊してしまったことを認め、人為的な負荷を地球の許容範囲内(地球ホメオスタシス)まで抑制する抜本的な行動計画を策定すること。5. 進化の結果として、人間は“賢く”なったのではなく、周囲との共感・共創を通じて生き残ってきた存在である。人間は生物としての一つの集団にすぎないが、“幻想”を共にする特殊な行動特性をもつ。喫緊の問題として、特殊な行動特性をもつがゆえに、AI のアルゴリズムと共感してしまいそのアルゴリズムの結果を“正解＝真理”としてしまい、地域の文化の創出が AI の範囲を超えなくなる。現状のまま進むと、これまで我々東洋人などが“ヨーロッパ中心主義“に毒されたように、”AI 中心主義“の罠に人間が自ら飛び込むことになるだろう。地域文化の”方言としてのアルゴリズム“まで研究し、地域文化の保存・継承に特化した AI モデルの構築を達成しなくてはならない。6. グローバル標準による画一化を抑制し、地域のアイデンティティを保護する技術的障壁を創出すると共に、ヨーロッパ中心主義の幻想からの脱却のための体制造りを急ぐこと。などが挙げられる。

本論考では、人間が共通の幻想を信じやすい行動傾向を持つという観点から 造語として *Homo coimaginans*(共想するヒト)を導入した。このことはコミュニケーション密度の差異が地域固有の文化の違いへと繋がり、地域文化の影響下でヒトが社会的存在としての人になる過程があることを示唆する。ヒトという種に対してのこの気付きは、コミュニケーションの密度の濃さの違いによって地域文化を生み出し、その地域文化の影響を受けるとヒトは人になる。人の哲環世界が形成されるのだ。我々が“あわい(間)”と呼ぶ空間内に文化が形成され、その“あわい”が人間の生涯に多様性と豊かさをもたらす。さらに、“あわい”の内部で経済活動や学術体系が構築され、それらは「網」として捉えられる。地球環境が「あわい」を育成する仕組みを理解する主体もまた人間であるため、認識上のジレンマが生じる。しかし、その前提に立った上で、我々は意識的に「多様な文化圏の哲学や非言語的文脈を反映した多様な豊かさ」を再定義しなければならない。

5.「ノンヒューマンセントリックな科学の創生に向けて
ー短い時間軸の人間知性を超えろ！ー」

森　直樹

5.1 はじめに

「産業を地球生態系の一部として捉え直し、「共生」「循環」「進化」といった自然の原理を手がかりに、新たな産業構造や制度設計の方向性を探る試みを目指す」との指針で、筆者の専門性から何らかの提言を求められた。筆者は農学研究科で農芸化学を専攻し、特に有機化学的な視点から生物間相互作用の研究を進めている。研究で意識しているのは、地球上に生息する様々な生物の独自の世界観（環世界）を化学的な側面から理解すること、そして 40 億年にわたる生物の進化が築き上げてきた精緻な生物間相互作用（それぞれの生物が知覚・解釈する「環世界」が多元的に影響しあって起きる現象）の成り立ちの一端を学ぶ（垣間見る）ことにある。そして得られた知見・アイディアを、一次産業である農業、特に作物保護のための新しい技術として活用することにより、持続可能な食糧生産に貢献することを目指している。

現代は、人間と人間ならざるもの（動物、植物、昆虫、菌…を自然界の一部として捉え、本稿では「蟲」と呼称する）との共存の平衡状態が壊れた状況にあり、人間だけが我が世の春を謳歌している。この状況が持続可能であるはずがない。危機感を持った一部の人間から、「人間と自然の共存」が主張されるようになって久しい。しかしながら、様々な学問的、社会的取り組みをもってしても、「人間と自然の共存」を実践する手法は依然として明らかでない。現代農業においても、食料増産と環境保全という相矛盾する重大な問題に直面している。この問題の解決を目指して、遺伝子組み換え作物の創出やセンサー・ロボット・AI を活用するスマート農業といった先進的な開発がなされ、生産量の増加への貢献が期待される。しかし、生産量の増加に重きをおくこれらの先進的技術開発だけでは、生態系の中で「蟲」との共存という視点が十分ではなく、環境保全とは相容れないことは否定できない。

本稿では、以上の観点から、①歴史的な視点から見た農業の成り立ち（5.2）、②近未来に危惧される農業における問題点（5.3）を整理した上で、③著者らが明らかにした様々な生物間相互作用の具体的な事例（5.4）を踏まえながら、⑤第一次産業である農業と自然の関係性を再定義するための人間の待つべき「視点」（5.5）を提案する。その「視点」とは、(i) 短い時間軸から逃れられない人間知性の限界を知ること、(ii) ノンヒューマンセントリックな科学の構築 だと著者は考える。

5.2 歴史的な視点から見た農業の成り立ち

(1) 農薬の視点

およそ 12000 年前に人類は農耕を始めたと考えられている。それは最終氷期が終わって、地球の気候が温暖化した上で安定化し、環境が現在の地球に近くなった頃である。農耕が始まった場所は、現在のペルシア湾からチグリス川・ユーフラテス川をさかのぼり、シリアを経てパレスチナ、エジプトへと到る半円形の地域（肥沃な三日月地帯）とされている。農業が始まると、栽培される植物も徐々にその姿（形質）を変えてきた。すなわち、栽培化とともに栽培しやすい個体、味の良い個体が栽培者によって、意識的・無意識的に選抜されて、集団の中で増えていった。その結果、栽培種は原種の野生種とは大きく異なる表現型を持つ集団へと変貌していった。長期間にわたり人間の手によって選択や交雑が行われてきたために，現在では栽培種はもはや自然状態においては生存できない植物になっているものが多い。また、農業生態系は単一植物のみが栽培されている特殊な環境であるのに対し、自然生態系とは多様な生物が共存する環境であり、両者は全く異なる世界を構成

している。したがって、食料生産を目的とする農業生態系はそもそもが不自然で、病害虫や雑草の被害を受けやすいことを知らねばならない。

このような構造的な宿命から、農業が成立して以来、食料生産を巡って人類は絶えず病害虫や雑草と戦ってきた。紀元前 2000 年のアッシリア（現在のイラク）の様子を伝えるアッシリア神と飛蝗祈祷者が彫られた陶板、15 世紀の教会が害虫のコフキコガネに破門宣告する動物裁判の絵等が、その様子を伝えている。日本でも江戸時代中期には、夜に大勢の人々が集まり、たいまつを灯しながら、鐘や太鼓を鳴らし、田の畔を行進する虫送りの行事が行われていた。これらは、害虫防除は神頼みであった時代の象徴である。

1670 年（江戸時代）、我が国で実用的な病害虫防除法が初めて登場した。鯨油や菜種油をイネの害虫であるウンカの防除に使用したのである。油を水田に注いで水面に油膜を作り、そこにウンカを払い落として、油で気門を塞ぎウンカを窒息死させていた。同じ頃にヨーロッパでは、タバコが害虫駆除に用いられた。ニュートンが「プリンキピア（自然哲学の数学的諸原理）」（1687 年）を発刊した頃である。害虫防除が、神頼みから脱却し始めた時代であった。

明治・大正時代になると、西洋から新しい科学技術が日本に導入され、天然物である除虫菊、デリス根の成分、簡単な無機化合物であるボルドー液（硫酸銅と石灰の混合物）が植物保護に用いられた。ボルドー液は独特の色をしており、ブドウの盗難防止のためにブドウに散布したところ、ブドウに病気が発生しなくなったことから始まった。ボルドー液が農薬として使われるようになった有名な話しで、今も殺菌剤として使われている。

1938 年スイスのガイギー社の研究者ミューラーが DDT（ジクロロジフェニルトリクロロエタン）に強力な殺虫活性を発見した。ここから、近代的化学合成農薬の歴史は始まる。1941 年にはフランスで BHC（ベンゼンヒキサクロライド）が、1944 年ごろにはドイツでパラチオンが発明された。いずれも優れた殺虫効果があり、またたく間に世界へ広がっていった。1946 年には、英国で開発された 2,4-D（2,4-ジクロロフェノキシ酢酸）が小麦やトウモロコシ用の除草剤として販売された。2,4-D は植物ホルモンであるオーキシン様の作用を持つ除草剤である。このような化学合成農薬が、食料増産や農業の省力化に大きく貢献した。

しかしながら、初期の化学合成農薬は薬効に重点が置かれていたこともあり、時を経て幾つかの問題点が顕在化していった。人畜に対する毒性の高さ、環境における難分解性、薬剤抵抗性害虫の出現、リサージェンス（害虫防除のために農薬を散布すると、散布前よりも、かえって害虫が増える現象）の問題である。1962 年にはアメリカのレーチェル・カーソンの「サイレントスプリング」が出版され、農薬の残留性や生物濃縮がもたらす生態系への影響について大きな示唆を与えた。これを受けて、1971 年には農薬を登録する際に各種毒性試験や自然界への残留試験などを義務づけた法律改正が行われ、DDT、BHC、パラチオン等、初期の化学合成農薬の使用が禁止されていった。一方、イタリアでは、DDT を壁面に付着させておくことでマラリア媒介昆虫のハマダラカが激減した。その結果、マラリアがイタリアで根絶したという事実も付記されるべきであろう。

この法律改正を契機に、現代の合成化学農薬は最新の科学技術を導入して、①目的の効果があり、少量で効くこと、②高等動物に毒性が低いこと、③適度な残効性、残留性であり、環境にやさしいこと、④抵抗性が発達しにくいこと、⑤安価であることを目指してデザインされている。実際、①から④の高い機能を持つ化合物を⑤安価に求めることは容易なことではない。農薬 1 剤を開発するためには、10 年以上の時間、100 億から 250 億程度の開発費（合成・生物検定等の開発費や安全性試験に要する費用）が必要で、最終的に農薬になる化合物の確率は 1/50000 以下と言われている。現代の合成化学農薬の開発には、実に多くの資源・エネルギー・技術が投入されており、新剤を開発できるのは日本、アメリカ、ドイツ、スイスなど少数の国に限られていた。しかし、2017 年に中国化工集団がスイスの農薬・種子大手のシンジェンタを買収したことで、現代の農業研究動向が大きな転換点を迎えている。かつて世界の農業市場（種子・農薬）は「ビッグ 6」の有力企業が占めていた

が、上記の買収に加えてダウとデュポンの統合、バイエルによるモンサント買収を経て、巨大な「ビッグ 3」へと再編された。この激流の中、日本の農薬メーカーは独自の技術力を磨き、非常に健闘している。日本の農薬メーカーの奮闘は、もっと日本人が知るべき事実である。

(2) 化学肥料の視点

森林や草地に火を放ち、焼け跡を畑として利用し、農作物を育てる農業形態を焼畑農業という。焼いた後には灰が残り、その中には焼き払った森林や草地が持っていた無機養分が残されている。すなわち、焼畑とは立派な施肥行為なのである。焼畑農業では 1 年から数年間耕作を行ってから、その場所での耕作を中止する。自然の遷移によって地力を回復させた後、再度利用する形態をとる。

時代の経過とともに、地力を維持するために積極的な手段が用いられるようになった。輪作である。耕作地の広いヨーロッパでは、同一耕地に穀物，野菜および牧草などを一定の順序に従って，一定の年限ごとに循環して作付けする輪作農業が発達した。1730 年代イギリスでは、小麦→クローバー→大麦→かぶが輪作され、この輪作技術によりイギリスの農業は急激に発展した。日本では輪作農業は発達しなかったが、その理由は水田農業が連作を可能にした特殊な事情があったからである。

社会の分業化が進むにつれて、農業は自給自足から、商業化の段階に移行した。例えば、江戸時代の日本では、幕藩体制が確立して社会が安定化するとともに、商業的農業が発達した。大阪などの城下町の発展を支えるために、周辺の農村では大量な食料を生産する必要が生じたが、それを可能にしたのは大都市で発生した大量の人糞尿、すなわち有機肥料であった。江戸時代の日本では、食料生産と人糞尿を介したリサイクルシステムが構築されていたのである。同時代のヨーロッパには類似のシステムはなく、そのため糞尿は道端に放置されていた。そのような状況から、ヨーロッパで下水道が発達した。

1806 年南米探検から帰国したフンボルトは、チリ硝石（$NaNO_3$）とグアノ（海鳥やコウモリ糞由来の有機質肥料資源で、リン酸が濃縮されたものが燐酸質グアノである。これはリン鉱石が発見されるまで、最も主要なリン資源であった。）が優れた肥料であることを報告した。1856 年にはドイツでカリ鉱床が発見された。これらの知見により植物が無機物を栄養とすることが明らかになりつつあったところへ、1840 年に、ドイツのリービッヒが「農業と生理学への化学の応用」を著し、「無機栄養説」が確立された。また、ドイツ人シュプレンゲルは土中で最も少ない必須元素の量によって植物の生長速度が決定されるという「最小律」を提唱した。このようなプロセスを経て植物栄養の本質が明らかにされ、肥料の三大栄養素として窒素、リン酸、カリウムが鉱物から供給されるようになって、作物の収量は大きく増加した。

以下、特に窒素について記述する。1906 年ドイツのハーバーとボッシュは、高温高圧下で触媒を用い、空気中の窒素に水素を結合させて、アンモニアを合成することに成功した（ハーバー・ボッシュ法）。生産されたアンモニアは窒素肥料だけでなく、工業原料としても広い需要を持つため、アンモニア合成工業は化学工業発展の原動力になった。合成された大量のアンモニアは窒素肥料として耕地に施用され、作物増産に大きく貢献した。しかしながら、施肥された化学肥料窒素の植物による吸収利用率は 50%以下であり、かなりの量の窒素が硝酸イオンとなって地下水、河川水、海水に蓄積している。勿論、微生物による脱窒（硝酸イオンを経由する窒素ガスへの還元）は行われてはいるものの、化学工業によって増え続ける窒素ガスからアンモニアへの供給量には対応できない。その結果、現在の生物圏には化合態窒素（アンモニウムイオン、硝酸イオン等）や有機態窒素が増え続けている。これは環境の富栄養化を引き起こし、将来的には生物相の変化や生物多様性の減少を引き起こすと深く危惧されている。

5.3 近未来に危惧される農業における幾つかの問題点

2050 年には世界の人口は 98 億人を超えると予想されている。単に人口が増えるだけではない。新興国の人々の生活が豊かになり牛肉食が増えると、その生産には今まで以上の穀物量が必要となってくる。実は、鶏肉 1 kg を生産するのに必要な穀物量(トウモロコシ換算)は 4 kg だが、豚肉 1 kg では 7 kg、牛肉 1 kg では 11 kg が必要である。この理由から、2050 年までに世界の食料生産を現在と比べて 2 倍に増やす必要があると考えられている。だからといって、森林の伐採や原野の耕地化による農地の拡大は、現実的ではない。すでに、家畜を飼育するための牧草地面積はアフリカ大陸、作物栽培面積は北アメリカ大陸並みの面積を占めていること、熱帯林や泥炭地の耕地化は CO_2 排出量の増加による地球環境の劣化を促進することから、農業の実践可能な土地をこれ以上増やすことは難しいのである。さらに、バイオ燃料を作るエネルギー作物の生産量の増加によって食料の生産量が減少し、世界的に穀物の争奪戦が起きているほどである。このような事情から世界の食料生産を 2 倍に増やす(食料増産)には、今ある農地の生産性を高めるしかなく、農業技術をさらに発展させることで単位面積当たりの農作物の収量を増すことが求められる。

環境に与える負荷を低減しながら農作物の収量の増加を目指すことは、容易ではないが、幾つかの研究が展開された。代表的な研究例の一つとして挙げられるのは、遺伝子組み換え作物の作出と利用であろう。以下にその事例を概説する。

1901 年に石渡繁胤博士は、カイコの卒倒病の原因菌として *Bacillus thuringiensis* Berliner(Bt 菌)を発見し、ドイツのベルリナーが命名した。この Bt 菌が生合成する結晶性タンパク質が殺虫活性を示す。このタンパク質はチョウ目、コウチュウ目などのアルカリ性の消化管内で活性化され、特定の受容体と結合することで消化管を破壊し、対象となる昆虫を致死させる。ヒトなどのセキツイ動物やミツバチなどの益虫には、この受容体がないため無害である。この高い選択毒性から、1940 年ごろから Bt 菌そのものを利用した微生物農薬として使用されている。

1981 年にワシントン大学の研究者が Bt 菌から殺虫性タンパク質の生合成遺伝子を同定し、クローニングに成功した。1987 年には、ベルギーのバイオテクノロジー企業 PGS 社(Plant Genetic Systems)や米国のモンサント社が Bt トキシンの生合成遺伝子を導入したタバコやトマトの開発に成功した。1990 年代にはチョウ目アワノメイガに対する耐性を持つ Bt トウモロコシやチョウ目オオタバコガに耐性を持つ Bt ワタが栽培され始めた。実際に Bt トウモロコシは、化学農薬の散布回数を減らすことに貢献している。世界全体での遺伝子組み換え作物の栽培面積は拡大を続けており、2024 年時点では約 2.1 億ヘクタールに達しているとの報告もある。アメリカ、ブラジル、アルゼンチンが主要な栽培国である。

前述したように、Bt トキシンは特定の害虫(チョウ目など)に対して高い選択的な毒性を示す。実際に遺伝子が導入された植物を食害しなければ、その毒素を摂食することはないからである。しかし、その特徴こそが意外な結果をもたらす原因となった。すなわち、農業生態系の中で競争者となるチョウ目昆虫によってそれまで勢力の拡大を抑えられていた別の虫(二次害虫)が Bt トキシンにより競争者が駆逐されたことで勢力を伸ばし、新たに主要な害虫種となる現象が見出された。Bt ワタ栽培地で、本来チョウ目害虫との競争に負けてマイナーな存在であったカスミカメムシが大発生し、結局別の農薬が散布されるというケースが生じたのである。この場合のカスミカメムシは invisible species と位置付けされている。この invisible species が観察された現象は、生態系が複雑に絡み合ったネットワーク、すなわち生物間相互作用の複雑な関係性の上に成り立っていることを示している。

現在、情報科学技術の発展によりヒトは全世界を把握する術を獲得し、知識を積み上げさえすれば、全ての因子を理解でき、それらの因子を制御できるかのように振舞って見える。しかし、人間に見えている環世界は、全ての環境のごく一部である可能性もあるといえよう。

上述の invisible species 程のインパクトはないが、以下に筆者が関わった事例を中心に、思いがけない様々な生物間相互作用の事例を挙げる。

5.4 思いがけない様々な生物間相互作用の具体的な事例

(1) 昆虫の触角を用いた地雷検出器の創出の顛末

1990 年ごろから植物の間接的な防御反応が盛んに研究された。植物の間接防御反応とは、植食者に加害された植物が花の香りのような香気成分を放出し、植食者の天敵がこの香気成分を学習し、効率的に植食者を発見・捕食・寄生することで、植物の被害が軽減される防御反応である。植物の防御反応に天敵が介在する、非常に興味深い生物現象である。天敵を生物農薬として利用する作物保護は環境に対する負荷の低減、食の安全への意識の向上そして IPM(総合的有害生物管理)の観点から、植物の間接防御反応は世界的にも注目された。この植食者−植物−天敵を巡る生物間相互作用において鍵となるのは、植物から放出される花の香りのような香気成分を学習する天敵の能力である。米国農務省の Center for Medical, Agricultural, and Veterinary Entomology の James H. Tumlinson 博士と Crop Management and Research Laboratory の Joe W. Lewis 博士ら(2008 年にこの二人はウルフ賞(農業部門)を受賞。著者は 1998 年から 2000 年まで、Tumlinson 博士の研究室にポスドクとして在籍した。)はここで驚くべき発想の飛躍を行った。すなわち、チョウ目害虫の天敵である寄生バチが高い学習能力を持つならば、寄生バチに例えば爆薬中の副生成物 2,4−dinitrotoluene の匂いを学習させれば、地雷探知の高感度センサとしてハチが利用出来るのではないかと考えたのである。国際空港で活躍する麻薬犬ならぬ、地雷バチとでも言えよう。彼らが用いた寄生バチは *Microplitis croceipes* である。食餌や産卵可能なイモムシの提供といったハチへの報酬と関連させれば、本種のハチはチョコレートやバニラの匂いを学習し、匂い源へ飛んで来る。

それでは、学習できる化学物質の幅はどれほど広いのだろうか？Tumlinson 博士と Lewis 博士は疑問に思った。実際に、自然界には存在しない 2,4−dinitrotoluene の匂いをハチは学習し、その匂いを選好することは出来るのかを調べた。答えは、YES であった。産卵する雌のハチは見事に学習し、80 cm の風洞実験で匂い源に飛来した。*M. croceipes* は非常に広い範囲の化学物質を柔軟に学習できる潜在能力を有しており、ハチの生活史とはかけ離れた化学物質も検出できるのである。さらに両博士は研究をもう一段階発展させ、寄生バチの触角を用いたバイオハイブリッド・センサの開発に挑戦した。昆虫の触角は、わずかな匂い分子でも敏感に検出することができる、自然界でも屈指の高性能センサである。先ず、昆虫の触角を切り取り、両端を電極に接続する。そしてごく短時間(例えば 0.5 秒〜1 秒間など)だけ匂い物質を含んだ空気を触角に送り込む。触角が特定の匂い分子を検出すると、電位変化が測定され、触角がその匂いに反応したかを確認できる。彼らは、学習させた寄生バチの触角を用いて、バイオハイブリッド・センサの開発に取り組んだのである。

結論から述べると、彼らは寄生バチの触角を用いたセンサ開発には失敗した。上手く電位変化が測定できなかったのである。しかし、メンバーの一人 Kye−Chung Park 博士は諦めなかった。Park 博士は昆虫の多様性を信じたのである。地球上で記述されている生物種のうち、動物界で最も種類が多いのが昆虫類であり、100 万種以上が知られている。地上、水中、土壌、植物内など、あらゆる環境に適応して生存しており、地球上の昆虫の総重量は、人間すべてを合わせた総重量よりもはるかに重く、人間を凌駕するバイオマスを誇っている。Park 博士は「昆虫の多様性は人間の理解を超えている。2,4−dinitrotoluene の匂いを検出できる昆虫はきっといるの

ではないか」と楽観的に考え、取り敢えずは触角が大きく、捕まえるのが簡単なガ類から手始めに調べてみた。Park 博士によると、「結果はあっけないほど簡単に出た」そうである。日本にも生息するイラクサギンウワバの触角が、2,4-dinitrotoluene に明確に反応したのである。彼らはイラクサギンウワバの触角を切り取り、開発したポータブルなアンプの先端に取り付け。そのセンサは正面(一定の方角)から吹き付ける気流に含まれる 2,4-dinitrotoluene にのみ反応した。これにより、彼らは昆虫の触角を用いたバイオハイブリッド・センサの開発に成功したのである。

この事実は、我々に幾つかの事実を教えてくれる。一つは、昆虫の多様な化学情報の検出能力である。先ず、天然には存在しない人工物を昆虫の触角が検出できることに著者も大変驚いた。自然生態系には多くの化学物質が存在し、昆虫はそれらの化学情報に晒されている。この化学物質から生存に有利な情報を取捨選択するために、昆虫の触角上のレセプターは種々な化学物質に対応出来るように調整されているのかもしれない。もう一つは、人工的な化学物質が昆虫に予想外の行動を引き起こす場合、その昆虫が関わっている生物の相互作用にどのような影響を与えるか、予測することは難しいということである。前述したように、2,4-dinitrotoluene はイラクサギンウワバの触角に高感度で検出されるが、この物質がイラクサギンウワバの環世界にどのように作用し、その行動にどのように影響するのかは全く研究されていない。なぜなら、人間の環世界の外側の話しだからである。人間が自分たちの都合で合成した化合物が、昆虫の環世界に影響を与え、昆虫の行動に何らかの形で作用する可能性は否定できない。さらに、この行動の変化が生物ごとの環世界が重なり合って成り立っている生物間相互作用にどのように影響するかを予測することは、一層難しいかもしれない。

(2) ヤマカガシの毒の蓄積の変遷から学ぶ自然の叡智　―センス・オブ・ワンダー―

ヤマカガシは有鱗目ナミヘビ科ヤマカガシ属に分類され、成長すると体長は 60-120 cm ほどになる。本州、四国、九州の山林や水田域に生息し、アオダイショウやシマヘビとともに日本でよく見られるヘビである。主にトノサマガエルやアマガエルといった無毒のカエルやドジョウを含む淡水魚が主食であり、時々ヒキガエルも捕食する。ヤマカガシの天敵はイヌワシやサシバなどの猛禽類であり、野外で哺乳類に捕食された報告はほとんどない。

ヤマカガシを注意深く観察すると、頭部後方の背中に隆起が見られる。この部分の皮膚をはがして、皮膚の裏側を見ると、きれいに2列に並んだ器官が張り付いている。これが「頸腺」と呼ばれる毒器官である。ヤマカガシが哺乳類に襲われ、頸部を咬まれると、頸腺の細胞が破れ毒液が飛び散る仕掛けになっている。飛び散った毒液が目に入ると、人間でも一時的な失明状態になるほど、強い毒性を示す。

ヤマカガシの頸腺に含まれる毒の本体は、ヒキガエル由来の毒性ステロイドのブファジエノライドである。すなわち、ヤマカガシはヒキガエルを捕食することで、ヒキガエルの毒成分であるブファジエノライド型のステロイドを得て、3 位の側鎖を加水分解した形で頸腺に蓄積している。ヒキガエル由来のブファジエノライドの構造上の特徴は、全て A/B 環が *cis* 結合にある。これらのブファジエノライド類は古くから医薬や矢毒として用いられており、中国では古くからシナヒキガエルの分泌物を製剤化したものをセンソと称して、強心、鎮痛などに用いられてきた。実際に、ブファジエノライド類は心筋に特異的に作用して、うっ血性心不全に顕著な効果(強心作用)を示す。細胞膜に存在する Na+/K+ATPase を阻害することで心筋細胞内のカルシウムイオン濃度を増加させ、心筋の収縮力を増大させるのである。

現在、ヤマカガシと同じ様な頸腺を持つヘビは世界中にヤマカガシ属 17 種で知られており、インド、スリランカなどの南アジアから、中国や日本、東南アジアにかけてのアジア地域にのみ分布する。そのうちの一種イツウロコヤマカガシは中国南西部に分布するヘビで、その主食はカエルなどの両生類ではなく、ミミズである。

興味深いことに、ミトコンドリアおよび核 DNA による系統樹から、ヤマカガシ類のヘビでは、主食がカエルからミミズへ変遷したと推測されている。著者らは、このイツウロコヤマカガシの頸腺の毒成分を分析した。その結果、イツウロコヤマカガシの頸腺からブファジエノライド類 4 種を検出し、NMR 解析で構造を詳細に調べた結果、4 種全てが A/B 環が *trans* 結合であり、そのうち 1 つはキシロース配糖体であった。これらの事実は、イツウロコヤマカガシのブファジエノライドの起源がヒキガエル由来ではないことを明確に語っている。前述のように、ヒキガエル由来のブファジエノライド類では全て A/B 環が *cis* 結合であり、*trans* 結合は全く報告されておらず、糖と結合した配糖体も知られていないのである。無論、餌であるミミズにはブファジエノライド類は検出されない。

論文を精査したところ、ヒキガエルだけでなくマドボタル亜科に属するホタルからもブファジエノライド類が同定されており、その A/B 環については *cis* 結合だけでなく、*trans* 結合の報告もあった。さらに、マドボタル亜科に属する *Lucidota atra* からは 3 位にキシロースが結合したブファジエノライドも報告されていた。この化学的な知見を得た後、飼育下においてイツウロコヤマカガシがマドボタル亜科の 1 種を捕食することを確認した。さらに、野外で採集した個体の胃の内容物を吐き出させ、食べていたものを調べるとマドボタル亜科のホタルが確認できた。ヘビがホタルを食べるという発見は、今回の報告が初めてである。

以上のことから、ヤマカガシ属ヘビ類内でのイツウロコヤマカガシの進化の過程で何らかの理由によってカエル食からミミズ食への食性変化が起こり、それまでブファジエノライド源として利用していたヒキガエルから新たにマドボタル亜科のホタルを毒源として利用するようになったという予想もしなかった事実が発見された。現在まで、ブファジエノライドを生合成する動物として知られているのは、ヒキガエル類とマドボタル類だけである。

5.5 人間が持つべき視点

—短い時間軸から逃れられない人間知性の限界の自覚とノンヒューマンセントリックな科学の構築—

本原稿を執筆するにあたって、AI に「工学とは何か？」と質問したところ、下記の返事を得た。

設計や計算の段階では「すべてが制御された理想的な系」を前提に数学や物理を駆使する。しかし、工学の本質は、その先の「制御しきれない現実世界」との格闘にある。工学が理学と一線を画すのは、以下の 3 つのような「不確定要素」をシステムの中にどう組み込むかを考える点である。3 つとは、①「誤差」と「ゆらぎ」の許容、②「人間」という不確定要素、③「現実的な落としどころ（最適解）」を見つけ出すのが工学の腕の見せ所である。つまり、「制御された理論」を武器に「制御しきれない現実」をいかに制御するかというのが、工学の非常に泥臭くともクリエイティブな挑戦と言える。

以上が、筆者が AI から得た返信である。個人的には、『「人間」という不確定要素も考慮に入れている』との表現が非常に印象に残った。

この観点に立てば、自然生態系や農業生態系を視野に入れる場合、人間だけでなく、その場に生息する生物（すなわち「蟲」）がすべて不確定要素になりうる。不確定要素を考慮する難しさは、5.3 で述べた invisible species の事例からも明らかである。そのうえ、その不確定要素になりうる生物は、地球上で一様ではなく、地域ごとに異なることになろう。自然生態系は勿論、農業生態系に不確定要素の全てを考慮に入れるのは、筆者には非常に困難に思えるが、不確定要素への挑戦を明確に打ち出している工学的なスタンスには刺激を受けた。そのようなスタンスを農学研究へ導入することは可能だろうか？今後の農学研究のブレークスルーには、不確定要素の挑戦は必要なのかもしれない。

5.4 で述べたように、約 40 億年の長い歴史をかけて、生物は巧妙なシステム（自然環境への適応や様々な生物間相互作用の構築）を形作ってきた。この時間軸に対して、人間の知性は（40 億年とは言わないが）どのくら

いの時間軸で物事を適切に判断できるのだろうか？具体的には、50 年後、100 年後、200 年後、1000 年後の子孫に対する適切な判断である。筆者は非常に悲観的である。象徴的な事例がある。原子力発電所で発生する高レベル放射性廃棄物が、天然のウラン鉱石と同じレベルの放射能まで下がるには 10 万年かかるらしい。この方針の下、我が国の電力行政は進んでいるようだ。しかしながら、この判断は 10 万年後の子孫に対して適切なものと言えるのだろうか？この問題を具体的に考察するため、10 万年前の世界を振り返ってみよう。今から 10 万年前とは、我々すなわち *Homo sapiens* が、*Homo neanderthalensis* や *Homo erectus* と地球上に共存していた時代である。そして、（ご存じのように）*Homo neanderthalensis* や *Homo erectus* は既に絶滅したヒト（*Homo* 属）である。10 万年前の世界を考えると、10 万年を要するこの解決策は無責任なものに見える。良心的な親なら子供の将来のことは考えるであろう。しかし、人間の寿命が 100 年ほどであるが故に、孫やその先の世代について、人間が責任をもって具体的に考えることはかなり困難なことのように思える。この時間軸の短さに、人間の知性の限界を見る。この限界を超えるために、「蟲」の生存戦略（すなわち環世界）の理解が役立つかもしれない。「蟲」の環世界を理解することで初めて見えてくる世界もあるのだ。

以上、著者が本稿で主張するのは、下記の 2 点である。①約 40 億年をかけて生物が構築してきたシステム（自然環境や生物間相互作用）の貴重さを知り、それを守ることだけが、（短い時間軸の知性しか持たない）人間が持続可能な存在となる術である。そして、②そのシステムや人間には見えない環世界を理解するためにも、「蟲」の環世界を認識し、その環世界を科学の言葉で理解することに努める（下村政嗣先生や針山孝彦先生が主張するノンヒューマンセントリックな科学の構築である）。これによりはじめて人間は人間の見えない世界を知り、人間と「蟲」が共存するための知見・技術・哲学が具体化できると考える。ライフサイエンスとは、生物の科学である。決して、人間だけを研究する学問ではない。地球上で共存するために、「蟲」の生きる知恵も我々は学ばねばならない。

循環経済を「生態系」に準えて捉え直す視点から

6. 地球生態系から循環型社会を工学する方法論 ―蟲瞰学とエコミメティクス

下村 政嗣、小山 珠美

下村政嗣先生は、日本工学アカデミーの企画「循環型社会とエコシステムを工学する」に深く共感し、その実現に最後まで情熱を注いでくださいました。本稿もまた、先生の原稿を礎に、議論を重ねながら、最終的には先生のご意向を受け、共著として仕上げることとなりましたが、その完成を見ることなく、先生は逝去されました。 遺された原稿を読み返し、生前に交わした議論をあらためて辿ると、そこには、自然と人間、工学と社会のあり方をめぐって先生が長く問い続けてきた思想が通底しています。本稿では、その思想と問題提起を受け継ぎながら、私自身の考察を加え、一つの論考として構成しました。

完成した本稿を先生にお届けすることは叶いませんでしたが、心からの感謝と敬意を込め、下村政嗣先生に捧げます。

（小山珠美）

6.1 はじめに

本稿では、バイオミメティクスを起点として発展してきた自然に学ぶ工学の歩みを振り返りながら、その視点を更に生態系へと広げていくエコミメティクスの可能性について考察する。さらに、そこから「循環型社会とエコシステムを工学する」とは何を意味するのか、その方法論と設計思想を探究する。

約四〇億年に及ぶ進化の歴史の中で、地球には多様な生命が育まれ、生物は環境に適応した多様な構造と機能を獲得してきた。我々人類が、生物に学んできた工学の歴史も古い。レオナルド・ダ・ヴィンチが鳥の飛翔を観察して飛行機械を構想したことはよく知られているが、その後も工学は、魚類の流線形や植物の構造、昆虫の翅など、生物が長い進化の過程で獲得した優れた構造や機能から着想を得ながら発展してきた。近年では、ハスの葉の超撥水構造、ヤモリの足裏の微細構造、サメ肌の流体抵抗低減機構などが材料工学や機械工学へ応用され、生物模倣工学、すなわちバイオミメティクスは世界的な研究分野として大きく発展し、省資源・省エネルギー化にも少なからず貢献してきたところである。

一九九〇年代には、ナノテクノロジー研究の進展とともに、自己組織化現象を利用した有機薄膜の形成という、新たな薄膜製造プロセスの可能性も、自然に学ぶ工学の新たな展開として注目されるようになった。

当時、精密な加工装置を用いなければ実現できないと考えられていた微細構造が、適切な条件さえ整えば、自律的に形成される。しかも、一旦形成が始まると、その秩序形成は多少の外乱では容易に失われることなく着実に進行していく。その様子は、自己組織化現象が決して繊細で曖昧な現象ではなく、自ら秩序を形成し、それを維持する力強いシステムであることを示していた。著者らもこの研究に携わる中で、自然の機能や構造を単に模倣するのではなく、その背後には人間があらかじめ設計し尽くすことのできない構造形成の原理があることを、強く予感したものである。

その一方で、生物模倣から派生した技術は、マイクロプラスチック問題や自律システムの軍事利用など、当初は想定し得なかった新たな社会的課題とも向き合うことになった。また、国際標準化、生物多様性情報の整備、情報科学との融合による設計支援など研究基盤は着実に発展したものの、それらが生態系の保全や生物多様性の回復へ直結したとは言い難い。こうした経緯は、やはり、生物を「構造や機能を模倣する対象」とするだけでは、持続可能な社会の構築には十分ではないことを示唆している。

バイオミメティクスが持続可能な社会の構築へと広げようとするとき、その視点は必然的に、生物の機能や構造から、多様な生物の相互作用、物質循環、自己組織性によって成り立つ生態系全体へと向かう。バイオミミク

リーは、生物の構造や機能の工学的応用にとどまらず、自然の仕組みやその設計原理に学び、そこに根ざすことによって、工学を持続可能性へ接続しようとする考え方である。

こうした自然に学ぶ工学の展開をさらに進め、生物のみならず、それを取り巻く環境や生物同士の相互作用を含む生態系そのものから学ぼうとする試みも現れている。そのようなアプローチの一つとして、エコミメティクスという考え方が提起されてきた。本稿では、これまでのバイオミメティクス、バイオミミクリーの展開を踏まえつつ、エコミメティクスという視点を手がかりに、自然に学ぶ工学をさらにどこまで広げることができるのかを考えてみたい。

人新世と呼ばれる今日、工学が向き合うべき課題は、個々の技術性能の向上だけでは捉えきれないものとなり、社会と自然との関係をどのように考えるのかが改めて問われる時代となっている。

折しも、日本工学アカデミーにおいて「循環型社会とエコシステムを工学する」という企画が立ち上げられた。下村は、この企画を知った際、「なぜ、このような企画がこれまで工学の場で正面から論じられてこなかったのだろうか」と率直な驚きを覚えた。工学は、近代社会の発展を支える一方で、今日の環境問題をもたらした社会の物質的・技術的構造の形成にも深く関与してきた。そうであるならば、その構造を持続可能なものへと転換することもまた、工学が正面から引き受けるべき課題のように思えたからだ。

本稿では、これまでのバイオミメティクス研究を振り返り、その成果と反省を踏まえながらエコミメティクスの思想を再整理し、自然に学ぶ工学のあり方を改めて問い直すことを通じて、「循環型社会とエコシステムを工学する」ための新たな方法論と設計思想について、一つの提言を試みたい。

6.2 生物模倣技術の歴史的展開

(1) 生物模倣技術の誕生

生物模倣を意味する「バイオミメティクス(Biomimetics)」という用語は、1950 年代に神経生理学者 Otto H. Schmitt によって提唱されたものである。また、1958 年には Jack E. Steele により、生物(biology)とエレクトロニクス(electronics)を組み合わせた「バイオニクス(Bionics)」という言葉も提唱され、機械工学やエレクトロニクスの分野を中心に広く用いられるようになった。当時は Norbert Wiener が提唱したサイバネティクス(Cybernetics)の影響も大きく、生物と機械に共通する情報伝達や制御の仕組みに学ぼうとする研究が盛んに進められていた。

もっとも、生物に学ぶ技術は、これらの用語が生まれる以前から様々な分野で実践されていた。例えば、絹糸を手本として開発されたナイロン、植物種子の付着機構を応用した面状ファスナー(Velcro®)、イルカやコウモリの反響定位を参考にしたソナーなどは、その代表例である。また、建築や構造設計の分野においても、Antoni Gaudí や Frei Otto らは自然界の形態や構造から着想を得た設計を行い、日本でも黒川紀章らが提唱した「メタボリズム」に代表されるように、生物の成長や新陳代謝に学ぶ都市・建築の思想が生まれている。

このように、生物模倣という考え方は、化学、機械、建築など個々の工学分野の中で、それぞれ独立に発展してきた。そのため、バイオミメティクス、バイオニクスなど名称は異なるものの、本質的には「自然に学び、その優れた仕組みを工学へ活かす」という共通した思想のもとに展開してきたと理解することができる。

(2) 分子系バイオミメティクス

こうした生物模倣の考え方は、1970 年代に入ると化学分野において一つの学術体系として整理され始めた。とりわけ、生体内で生じる分子レベルの反応や機能を人工的に再現しようとする研究が活発化し、1972 年に Ronald Breslow が用いた“Biomimetic Chemistry”という名称は、その後の研究潮流を象徴するものとなった。有機化学、無機化学、物理化学、高分子化学などの分野では、生物の分子機能を工学的に活用しようとす

る研究が進められ、新たな材料や反応系の開発へと展開していった。

ここで対象となるのは、生物の形態や構造そのものではなく、生体分子が示す反応機構や分子認識などの機能を理解し、それを人工材料や化学プロセスへ応用する考え方である。人工酵素や人工光合成などの研究はその代表例であり、生物が長い進化の過程で獲得してきた高度な分子機能を工学へ移転する試みとして発展してきた。

さらに 1980 年代後半には、分子エレクトロニクスや超分子化学の発展とともに、生体分子が分子間相互作用によって秩序ある構造を形成する自己組織化現象への関心が高まった。冒頭でも触れたように、ナノテクノロジーの進展は微細加工技術に飛躍をもたらしたが、生物が分子間相互作用のみを利用して秩序ある構造を形成する巧妙な仕組みは、従来のトップダウン型加工とは異なるボトムアップ型ものづくりの可能性を示した。この考え方は、その後のバイオミメティクス研究の発展にも大きな影響を与えることとなった。

(3) 材料系バイオミメティクス　生物の構造に学ぶ

電子顕微鏡やナノテクノロジーの発展により、生物表面の微細構造を詳細に観察・解析できるようになると、生物模倣技術は新たな展開を迎えた。生物が長い進化の過程で獲得した微細構造を工学的に再現し、その構造が生み出す機能を製品や材料へ応用しようとする「材料系バイオミメティクス」が大きく発展したのである。

代表的な例として、ハスの葉が示す高い撥水性を応用した表面材料、ヤモリの足裏構造を模倣した高機能接着材料、モルフォチョウの構造色を応用した発色材料、サメ肌の微細構造を利用した流体抵抗低減技術などが挙げられる。これらはいずれも、生物の形態をそのまま模倣するのではなく、ナノ・マイクロスケールの微細構造が発現する機能に着目したものであり、生物模倣技術を大きく発展させる契機となった。

この分野の発展は、生物学と工学との連携を一層深めることにもつながった。工学は生物が有する優れた構造や機能から新たな設計原理を学び、一方、生物学は工学的な解析や可視化技術によって、生物機能に対する理解を深めることができるようになった。両分野が相互に刺激し合いながら発展する、新たな学際領域が形成されていったのである。

こうした研究成果の蓄積は、国際的な協力や共通ルールの整備を必要とする段階へとバイオミメティクスを押し上げた。その象徴の一つが、ISO（国際標準化機構）に設置された“ISO/TC 266 Biomimetics”である。ここでは、用語や研究プロセス、生物学的知見の活用方法などについて国際標準化が進められ、異なる分野や国・地域の研究者が共通の枠組みのもとで研究を進めるための環境整備が図られた。

このような国際標準化の進展は、分野横断的な知識共有を促進するとともに、“Biomimetics Informatics”という新たな研究領域への関心を高めた。生物多様性の中には、長い進化の過程で獲得された膨大な構造・機能・適応戦略が蓄積されている。しかし、それらを工学的に活用するためには、生物学的知見を体系的に整理し、必要な情報へ効率的にアクセスできる仕組みが求められる。そのため、自然史博物館等が蓄積してきた標本情報や生物学的知見を工学分野から活用しやすくするための取組が進められた。

このように、材料系バイオミメティクスは、生物個体が有する優れた構造や機能を対象とする研究として発展するとともに、生物多様性そのものを知識資源として活用しようとする視点も生まれた。さらに、生物模倣技術の対象そのものも、個々の生物の構造や機能から、生物同士の相互作用やシステムへと広がり始めた。

(4) 生物個体から相互作用・システムへ

材料系バイオミメティクスの発展は、生物個体が有する優れた構造や機能への理解を大きく前進させた。しかし、生物は個体としてのみ存在しているわけではない。自然界では、多様な生物が互いに影響を及ぼし合いながら群れや社会を形成し、さらに非生物的環境とも複雑に関わり合うことで生態系を構築している。こうした認

識の広がりとともに、生物模倣技術の対象も、生物個体から、生物同士の相互作用やシステム全体へと広がり始めた。

その象徴的な例として、自律分散制御に基づくロボットシステムが挙げられる。例えば、Festo 社が開発したアリ型ロボット「BionicANTs」は、社会性昆虫であるアリの協調行動を模倣し、複数のロボットが互いに情報を共有しながら作業を進める仕組みを実現している。また、「eMotionButterflies」は、蝶の群れ行動を参考として飛行制御を行うロボットシステムであり、群れ全体として秩序ある行動を実現するアルゴリズムが注目された。我が国でも、日産自動車が発表したロボットカー「EPORO」は、魚群の遊泳行動を模倣することで複数車両の協調走行を実現し、自動運転技術への応用が期待されている。

このような研究では、生物個体の構造や機能を模倣することが目的ではない。生物が相互作用によって秩序を形成し、環境変化へ適応しながらシステム全体として機能する仕組みを工学へ取り入れようとしているのである。さらに建築や都市設計の分野においても、シロアリ塚の自然換気機構を応用した建築、生態系のネットワーク構造を参考とした都市計画など、生物個体ではなくシステム全体から学ぶ試みが進められている。

こうした研究の広がりの中に、「生態系バイオミメティクス」とも呼べる新たなトレンドが見え始めた。そこでは、個々の生物が有する優れた機能だけではなく、多様な生物が相互作用しながら全体として機能する生態系そのものが工学的な着想の源となる。自然は静止した存在ではなく、多様な構成要素が相互に関係しながら動的なバランスを維持するシステムである。

このように、生物模倣技術は、生物個体の構造や機能から、生物同士の相互作用やシステムへと、その対象を広げてきた。それは、自然の何を模倣するのかという問いから、自然から何を学ぶのかという問いへの広がりでもあった。

6.3 自然に学ぶとは何か―政策的混乱と「人間中心主義」の反省

(1) 政策におけるバイオミメティクス／バイオミミクリーの混乱

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）では、「愛知目標」が採択され、生物多様性の保全と持続可能な利用に向けた国際目標が示された。2011 年から 2020 年までの「国連生物多様性の 10 年」は、その達成に向けた取組を国際社会全体で推進するとともに、その成果を検証する期間として位置付けられた。

こうした国際的な動向を受け、日本経済団体連合会（経団連）は『生物多様性宣言』において、企業活動を通じた生物多様性保全への取組を推進し、その行動指針の一つとして「バイオミミクリー等の技術開発」を掲げた。経団連はさらに、行動指針と愛知目標との対応表において、「バイオミミクリー等の技術開発」を「目標 14」に対応づけている。しかし、ここでバイオミミクリーが「技術開発」として位置付けられたことにより、自然の仕組みや設計原理に学び、持続可能な社会の実現につなげようとする biomimicry の思想が、生物の構造や機能を工学的に応用する biomimetics とは目指すところが異なることが、十分には表現されなかったように思われる。

進化適応の結果として長い時間をかけて育まれてきた生物多様性は、「壮大なるコンビナトリアル・ケミストリー」とも捉えることのできる膨大な情報資源であり、バイオミメティクスを支える基盤となるデータベースでもある。すなわち、生物多様性そのものが、工学にとって価値ある「自然の恵み」である。しかしながら、バイオミメティクスは、低環境負荷を目指した技術開発を進める一方で、生物多様性を知識や技術の源泉として利用することに重点が置かれ、生物多様性そのものの回復や保全に向けた具体的な指針を示すには至らなかった。

その後、愛知目標の最終評価をまとめた『地球規模生物多様性概況第 5 版（GBO5：Global Biodiversity Outlook 5）』では、目標 14 は未達成と評価された。さらに、経団連が『生物多様性宣言』を改訂した際には、

「バイオミミクリー」の文言が行動指針から削除された。もちろん、これらをもってバイオミミクリーそのものの失敗とみなすことはできない。しかし、少なくとも政策や産業界において、バイオミメティクスとバイオミミクリーが十分に区別されないまま扱われてきたことは、その後の評価にも少なからず影響を与えた可能性があるだろう。

愛知目標を引き継ぐ「ポスト 2020 生物多様性枠組」は、2022 年にモントリオールで開催された COP15 において採択され、2030 年までに陸域・海域の 30%以上を保全する「30by30」とともに、生物多様性保全と気候変動対策、防災・減災、地域社会の持続的発展を統合的に実現する考え方として、「自然に根ざした解決策（Nature-based Solutions：NbS）」が重視されるようになった。また、世界経済フォーラムが提唱する Nature Positive Economy や、2021 年 G7 サミットの「Nature Compact」においても、NbS は持続可能な社会への移行を支える重要な概念として位置付けられている。

しかし、国際自然保護連合（IUCN）が公表した『自然に根ざした解決策に関する IUCN 世界標準』のガイダンスでは、「biomimicry」は「自然から着想を得た解決策（Nature-inspired solutions）」として整理される一方で、NbS には位置付けられていない。すなわち、自然を模倣することと、機能する生態系そのものを基盤として社会課題を解決することとは、異なる概念として整理されているのである。

すなわち、biomimicry は、同世界標準において Nature-inspired の例として挙げられる一方、“They are not based on functioning ecosystems.” と記されている。しかし、本来のバイオミミクリーは、生物個体の優れた構造や機能の模倣にとどまらず、自然の仕組みや設計原理に学び、持続可能な社会の実現へつなげようとする思想として発展してきた。それにもかかわらず、このような位置付けがなされている背景には、生物個体の構造や機能を対象として大きく発展してきたバイオミメティクスの実績が、バイオミミクリーの理解にも重ね合わされてきたという事情があるのではないだろうか。

ここで問題となるのは、どちらの概念が優れているかということではない。「自然に学ぶ」という言葉のもとで、何を対象とし、何を目的とするのかが曖昧なままでは、研究や技術の成果だけでなく、その社会的・政策的な意味まで異なって理解されかねないということである。こうした混乱を考えるためにも、改めて「生態系」という概念そのものに立ち返ってみたい。

(2) Ecology と Economy——共通する起源とその乖離

「生態系（ecosystem）」を対象とする学問は Ecology（生態学）である。Ecology は、ドイツの生物学者・哲学者 Ernst Haeckel が命名した言葉であり、その語源はギリシャ語で「家」を意味する Oikos と、「学問・理」を意味する logos に由来する。一方、Economy は、Oikos と「秩序・法」を意味する nomos に由来する。すなわち、Ecology と Economy は、ともに Oikos に遡る言葉である。

ところが、同じ Oikos に起源を持ちながら、近代以降、Ecology と Economy が示す世界は次第に異なる方向へ進んでいった。Economy も、さらにいえば、日本語の「経済」も、本来は人々の生活や共同体を維持するという広い意味を含んでいた。しかし、近代化の過程で、経済を捉える枠組みは、効率や生産性、成長を重視する方向へと狭義化していった。

一方、生態系は、多様な生物と環境との相互作用によって成り立つ複雑なシステムである。人間の経済活動も本来その内部に存在し、地球生態系から独立して成立することはできない。

しかし、産業革命以降、人口の増加と産業活動の飛躍的な拡大により、生産・消費・廃棄を前提とする線形経済は、生態系が受け止め得る規模と速度を超えて拡大した。その結果、人間活動に伴う環境負荷は地球規模へと広がり、生態系を構成する複雑な関係性そのものに影響を及ぼすようになった。同じ Oikos に起源を持つ Ecology と Economy の隔たりは、ここに至って地球規模の問題として顕在化したのである。

(3) 隔たりを埋める試みと「人間中心主義」

一度大きく隔たってしまった Ecology と Economy を再び結び付けることは容易ではない。しかし、その隔たりを埋めようとする試みがないわけではない。その代表的なものの一つが、「生態系と生物多様性の経済学(TEEB)」である。

TEEB は、生態系サービスという考え方を用いて、生態系や生物多様性が社会にもたらす価値を経済活動や政策の意思決定へ組み込むことを目指した。企業活動が経済合理性を重視する以上、自然の価値を経済の言葉へ翻訳し、その価値を意思決定へ反映させることは、持続可能な社会への転換を促す重要な契機となった。この考え方は産業界にも広がり、2008 年の生物多様性条約第 9 回締約国会議(COP9)では、ドイツ政府が「Biodiversity in Good Company」を立ち上げ、生物多様性をイノベーションの源泉として企業活動へ取り込む取組を推進した。

しかし、生態系サービスという概念は、生態系を経済へ翻訳する有効な手段である一方で、自然を「人間に利益をもたらす存在」として捉える視点から完全に自由ではない。本来、「自然の恵み」とも表現できる概念を、あえて「サービス」という言葉で表現する背景には、どのような自然観が存在するのであろうか。筑波大学の宗教学者である木村武史教授は「もしバイオミミクリーが自然に学ぼうと言いながら、人類の幸福だけを目的とするならば、同じ轍を踏むことになるのではないだろうか」と指摘している。この問いは、TEEB が果たした「経済への翻訳」という役割を否定するものではない。むしろ、その翻訳の先に、私たちはどのような自然観を持つべきかを問い掛けるものである。

人間活動によって自然へ転嫁された外部不経済は、地球生態系という巨大な複雑系ネットワークの中では決して「人間社会の外部」に留まることはない。時間と経路を変えながら、やがて人間社会へと戻ってくる。この指摘は、「自然から何を学ぶのか」という問いをさらに一歩進め、循環型社会とは、何を、どこに、どのように循環させる社会なのかという本質的な問いへと私たちを導いている。

(4) 循環型社会をエコミメティクスから捉え直す

では、こうした人間中心的な循環の理解を超えて、社会そのものを我々はどのように再構成しうるのだろうか。

人間社会の持続可能性にかかわる循環型社会を考える上で問うべきなのは、単に資源を効率よく循環させることではなく、人間の生産と消費のあり方そのものを、生態系との関係の中でどのように捉え直すかということであろう。

生態系においては、「廃棄物」という概念そのものが存在しないと言ってよいかもしれない。あるものの終わりは、別のものの始まりであり、無数の生命と非生命のあいだで、物質は循環し、エネルギーは絶え間なく流れている。その背後にあるのは、単なる効率ではなく、多様性と相互作用が織りなす複雑な関係性である。ここに目を向けない限り、いかに精緻な制度を設計しようとも、それは「循環型社会」の名を借りた線形経済の延命に過ぎない。

「エコミメティクス」は、この点において決定的に異なる立場をとる。それは、生態系の循環を「資源の流れ」としてではなく、「関係の網」として捉え、そこから学ぼうとする考え方である。すなわち、物質・エネルギー・情報の流れだけでなく、生物と生物、生物と環境、さらには時間の中で変化し続ける関係そのものを設計対象とするのである。

たとえば、地域における資源循環、分散型エネルギー、農と都市と産業の連関などは、生態系における共生や循環の一面を人間社会に映したものに過ぎない。それらを真に生かすためには、個別の技術や制度を磨き

上げるだけでは足りない。異なる主体がどのように関わり合い、どのように影響し合いながら存続していくのか、その関係の在り方そのものを問い直す必要がある。

こうした観点から見れば、日本において、循環型社会を説明する際にしばしば用いられる「動脈産業と静脈産業の接続」という生体系を準えた比喩にも限界がある。動脈産業と静脈産業の流れを単純に接続するだけでは、生態系を構成する多様な主体の相互作用や、そこから生じる自己組織的な秩序までを捉えることはできないからである。

また、自然に基づく解決策（NbS）が、生態系の機能を活用する実践であるとすれば、エコミメティクスは、その背後にある構造と論理を理解し、人間社会において再び立ち上げる試みである。両者は対立するものではなく、むしろ相補的であり、その往還のなかにこそ新たな社会設計の可能性がある。

同じ Oikos を起源としながら遠く隔たってしまった Ecology と Economy を、いかにして再び結び付けるのか。循環型社会を工学するという課題は、いままさに、そのための新たな方法論と設計思想を求める段階にある。エコミメティクスは、その両者を再びつなぐための一つの視座となり得る。

6.4 エコミメティクスという設計思想

(1) 循環型社会を支える自然観の転換

前章まで、バイオミメティクスの発展とその限界、さらにバイオミミクリーが持続可能な社会の構築へと対象を広げながらも、なおバイオミメティクスの延長として理解されがちであることを見てきた。そこで本稿では、両者の境界をさらに細分化するのではなく、生態系そのものと正面から向き合い、そこから社会と工学のあり方を捉え直す視座として、エコミメティクスを位置付けた。

ここで問いたいのは、生態系の仕組みをそのまま人間社会へ写し取ることではなく、生態系が長い時間をかけて存続してきた背景には、どのような関係性や秩序形成の原理があるのかということである。そこから、人間社会が持続するために学ぶべきものを、本稿では「自然の規範」として捉えてみたい。

既述の通り、近年、Nature-based Solutions（NbS）が国際的な潮流の一つとなり、自然の機能を活用した社会課題への取り組みが注目されている。しかし、自然を「利用可能な機能」として捉えるだけでは、人間中心主義の枠組みを完全には超えられないということも、IUCN の論をまたないところである。循環型社会を真に持続可能なものとするためには、自然から何を得るかではなく、人間自身を生態系の一構成員として位置付け直すにはどうするべきかという自然の規範を理解することが不可欠であると考えたい。

(2) 環世界からエコミメティクスへ

この自然観の転換を考える上で重要な示唆を与えるのが、ヤーコプ・フォン・ユクスキュルが提唱した「環世界（Umwelt）」の概念である。

ユクスキュルは、『生物から見た世界』において、生物はそれぞれ特有の知覚に基づく世界認識（環世界）に基づいた行動様式をもち、それぞれ異なる世界を生きていると述べている。人間が認識している世界は、生物にとって唯一絶対の世界ではなく、多様な環世界の一つにすぎない。一方で、「環境（Umgebung）」は、“人間と人間ならざるもの”それぞれの「環世界」が共存する集合体としての普遍的な時空間であるとして区別される。この区別は、人間中心的な自然理解を相対化する重要な視点を与えている。

人類は科学技術の発展とともに、自然を分析し、制御し、利用する対象として理解してきた。その結果、バイオミメティクスは、生物の形態や機能を工学へ応用することで大きな成果を挙げてきた。しかし、そこで模倣されてきたものは、生物の特定の構造や機能であることが多く、生物が生態系の中でどのような関係性を築いているかという視点は十分ではなかった。すなわち「環世界」の理解までには至っていなかった。

リン・ホワイトは、『機械と神―生態学的危機の歴史的根源』の中で、西洋における自然観の形成において、キリスト教的人間中心主義が、人間と自然との二元論を樹立しただけではなく、自然支配を正当化してきたことを指摘した。西洋における環境保全を意識したエコロジーの潮流も、いくつかに分けて捉えることができる。環境保護活動に主眼を置いた取組としての「シャロー・エコロジー」、その不足を補い、さらに深めた「ディープ・エコロジー」、解決策としての「環境プラグマティズム」などである。また、『自然なきエコロジー』を執筆したティモシー・モートンは、ディープ・エコロジーに軸足を置きつつも、人間と自然を対立的に捉える近代的二元論そのものを問い直し、人間もまた巨大な生態系ネットワーク――彼のいう「メッシュ」――の内部に存在することを論じ、さらに「ダーク・エコロジー」を提唱している。Morton は、バイオフィリアに基づいて人間中心的に自然を語るネイチャーライティングとしての「エコミメーシス」を痛烈に批判し、自然は「人間」と「人間ならざるもの」から構成されるがゆえに、互いのつながりを客観的に認識することが重要であると述べている。加えて、「自然は優しく私を包んでくれる幻想ではなく、恐るべき暗く汚いものである」とも論じている。さらに、彼が言及しているハイパーオブジェクトの視点や不確実性の問題などは、寺田寅彦が説く「環海の島嶼に特有の天然の無常さ」によって醸された『日本人の自然観』に似た非人間中心主義的自然観や、「八百万の神」を信じ畏れる日本人の宗教観、自然観にも通じるように思われる。

ここまで自然観をめぐる議論を辿ってくると、エコミメティクスが向き合うべき「自然」の姿も、少し違って見えてくる。そこにあるのは、人間の外側にあって観察され、利用され、模倣される自然ではない。人間もまたその網の目の一つとして組み込まれ、他の生物や環境との関係の中で生きている自然である。だとすれば、工学もまた、自然を外から眺めるだけでは済まない。生態系の内側に身を置き、そこに生きるもの同士の関係から学ぶことが、エコミメティクスの出発点となる。

そのような工学の実践の場として、まず思い浮かぶのは、農業・林業・水産業などの一次産業である。田畑を耕し、森を育て、海から恵みを得る。そこでは人間は、自然を一方的に利用してきただけではない。季節や気候、生物の営みを読み、その変化に応じて自らの活動を調整しながら、生態系との関係を築いてきた。

日本の里山は、その象徴的な風景であろう。人の手が入ることで維持されてきた里山では、人間と自然を明瞭に二分することは難しい。人間は自然の外部に立つ管理者ではなく、その内部で、他の生物や環境との関係を絶えず調整しながら暮らしてきた。そこには、全体を見渡す誰かがあらかじめ設計したわけではないにもかかわらず、長い時間をかけて人と自然との関係が編み上げられてきた姿がある。

日本における、こうした自然との向き合い方は、社会の仕組みにもどこか通じているように思われる。欧州では、広域的な制度設計やルール形成によって循環経済への転換が進められてきた。一方、日本では、個別のリサイクル制度や地域ごとの取組を積み重ねながら、循環の仕組みをつくってきた。もちろん、両者を単純に優劣で論じることはできない。しかし、生態系の内部からそのあり方を眺めれば、それぞれの場で環境に応じた取り組みが生まれ、それらが互いに関係しながら全体を形づくっていくという姿にも目を向けることができる。

(3) エコミメティクスがもたらす設計思想の転換

工学の本質の一つは、設計にある。1978 年にノーベル経済学賞を受賞したハーバート・A・サイモンは、著書『The Sciences of the Artificial』において、設計を、現状を望ましい状態へ変えていくための行為として捉えた。目的を定め、必要な機能を考え、要素を組み合わせることによって、望ましい状態をつくり出す。近代工学は、まさにその力によって多様な人工物を生み出し、人間社会を大きく変えてきた。[42]

---

[42] Herbert A. Simon, The Sciences of the Artificial, 3rd ed., MIT Press, 1996, p.111.

ところが、生態系に目を転じると、あることに気づく。そこには、全体を統括する設計者がいない。誰かが全体像を描き、生物を配置し、その関係を定めたわけではない。それぞれの生物がそれぞれの環世界を生き、周囲との関係を築き、環境の変化に適応する。その相互作用の中で物質は循環し、エネルギーは流れ、長い進化の歴史を経て現在の生態系が形成されてきた。自然に学ぼうにも、そこには人間が通常想定するような「設計図」は存在しないのである。

さらに、設計の対象を人工物から社会へと広げたとき、問題は一層複雑になる。カリフォルニア大学バークレー校の設計科学教授ホルスト・リッテルと都市計画学教授メルヴィン・ウェバーは、1973 年の論文『Dilemmas in a General Theory of Planning』において、社会政策が直面する問題を「Wicked Problems」と呼んだ。そこでは問題そのものを決定的に定式化することができず、対応策を単純に正しいか誤りかで判定することもできないと論じた。[43]

これは、循環型社会を工学しようとするときにも無関係ではない。何をもって「望ましい状態」とするのか。その答えが一つに定まらないまま、複雑な生態系と人間社会との関係を、あらかじめ描いた完成形へ向けて設計することが果たして可能なのだろうか。

『成長の限界』の主要著者の一人として知られ、1994 年には MacArthur Fellowship を受けたシステム研究者ドネラ・メドウズは、複雑系への介入を論じた『Leverage Points: Places to Intervene in a System』において、システムへの有効な介入点を階層的に整理し、その中でも、自ら構造を変え、進化し、自己組織化する力を高いレバレッジをもつものとして位置付け、自己組織化する能力は「システムのレジリエンスの最も強い形」であると述べている。さらに彼女は、自然界に見られる驚くほど複雑なパターンも、比較的単純な自己組織化の規則から生み出され得ることを指摘している。[44]

この指摘は、これからの工学のあり方にも重要な示唆を含んでいる。複雑な系を扱うとき、その完成形のすべてを人間があらかじめ設計することは、そもそも不可能であろう。むしろ、多様な主体が自律的に関係を築き、環境の変化に応じて自らを変化させ得るような規則や条件を考えることも、設計の重要な役割となり得る。ただし、それは人間が生態系を意図した方向へ巧みに制御するという意味ではない。メドウズ自身、同論考の最後で、複雑なシステムと向き合う際に求められるものを“the humility of Not Knowing”と表現しているように、人間には系のすべてを知ることはできない。その認識から出発することもまた、複雑な生態系と向き合う工学に求められる態度であろう。

そして、この問題意識は、生態系を対象とする議論だけにとどまるものではない。2019 年にオンライン公開され、2021 年に『Cognition, Technology & Work』第 23 巻に掲載された、オーストラリア国防科学技術グループの Neelam Naikar と Ben Elix による論文がある。タイトルは、『Designing for self-organisation in sociotechnical systems』というもので、ここで彼らが対象としたのは、軍事、医療、危機管理など、人間、技術、組織が相互作用しながら任務を遂行する社会技術システムである。すなわち、生態系そのものではなく、明確に人工的なシステムの設計に関するものであるが、彼らの論文では、こうした人工的なシステム設計においてさえ、環境の不安定性、不確実性、予測不能性に対応するためには、個々の行動だけでなく組織構造そのものが自発的に変

---

[43] H. W. J. Rittel and M. M. Webber, “Dilemmas in a General Theory of Planning”, *Policy Sciences*, 4, pp.155–169, 1973. DOI: 10.1007/BF01405730.

[44] Donella H. Meadows, “Leverage Points: Places to Intervene in a System”, Sustainability Institute, 1999.

化し得ることが重要であり、システムに内在する自己組織化能力を維持できるよう意図的に設計する必要があると論じられている。[45]

ここで重要なのは、「自己組織化するシステムを設計する」のではなく、「自己組織化のために設計する（designing for self-organisation）」という発想である。生態系と社会技術システムを完全に同一視することはできないだろうが、人間が目的をもって構築する社会技術システムにおいてさえ、複雑性や不確実性の増大に対して、全体をあらかじめ規定するのではなく、構成主体が自ら関係や構造を変化させ得る余地を設計に組み込むことが求められている。このことは、はるかに長い時間をかけて自己組織化し、変化し続けてきた生態系に工学が向き合う際、完成形を人間があらかじめ描き、それを実現することを「設計」とする従来の発想そのものを問い直す必要があることを示唆している。

さらに、こうした設計思想の変化は、より狭義の工学システムを対象とする研究にも現れている。2020 年、Giuliano Punzo らは『IEEE Systems Journal』に発表した『Engineering Resilient Complex Systems: The Necessary Shift Toward Complexity Science』において、複雑な工学システムのレジリエンスを理解するためには、従来の工学的手法だけではなく、複雑系科学の視点を取り込む必要があると論じている。[46]

これらが対象とする「システム」は同じものではない。生態系、社会システム、人間と技術からなる社会技術システム、そして工学的に構築されたシステムでは、その構成要素も成立過程も異なる。しかし興味深いことに、対象が異なっていても、複雑性、不確実性、予測不能性が増すにつれて、全体をあらかじめ規定し、完成形へ向けて制御するという設計だけでは十分に対応できないという問題が、それぞれの分野から現れている。自己組織化、適応、学習、レジリエンスといった概念が、分野を越えて重要性を増していることは偶然ではないだろう。

こうした議論を見ると、「設計すること」を要諦としてきた工学は、いま、その力を放棄するのではなく、設計という行為そのものを拡張する局面にあるように思われる。完成形をあらかじめ描き、それを実現することだけが設計なのではなく、多様な主体が関係を築き、環境の変化に適応し、自らを変化させ続ける力を損なわないように働きかけることもまた、設計となり得る。ただし、その前提には、人間には全体を見通すことができないという自覚がなければならない。

この視点に立つとき、物質を循環させること自体が循環型社会の目的ではないだろう、ということがいよいよ現実味を帯びてくる。資源循環はそのための重要な手段の一つではあるが、目指すべきは、人間活動を含む地球生態系が持続し得る社会であり、工学にもまた、生態系の内部から変化を観察し、学び、働きかけを修正し続ける姿勢が求められるはずである。

エコミメティクスとは、生態系を新たな模倣対象として加える技術論ではなく、生態系には全体を統括する設計者が存在しないという事実に向き合い、それでもなお人間が生態系の一員として何をなし得るのかを考える方法論である。その問いは、「何を設計するか」だけではなく、「どこまでを人間が設計しようとしてよいのか」という、工学そのものへの問いへとつながっていくはずである。

---

[45] Neelam Naikar and Ben Elix, "Designing for self-organisation in sociotechnical systems: resilience engineering, cognitive work analysis, and the diagram of work organisation possibilities", *Cognition, Technology & Work*, 23, pp.23–37, 2021. DOI:10.1007/s10111-019-00595-y

[46] Giuliano Punzo et al., "Engineering Resilient Complex Systems: The Necessary Shift Toward Complexity Science", *IEEE Systems Journal*, 14(3), pp.3865–3874, 2020. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2958829

6.5 おわりに

近代以降、人類は科学技術の発展によって大きな豊かさと利便性を獲得してきた。とりわけ戦後の日本では、工学技術が復興と高度経済成長、産業競争力の向上を支える大きな原動力となった。一方で、その発展の延長線上で、気候変動、生物多様性の損失、資源・エネルギー制約など、科学技術だけでは解決することのできない課題も顕在化してきた。本稿では、このような中で、バイオミメティクスからバイオミミクリー、さらにエコミメティクスへと自然から学ぶ工学がその対象とする領域を広げてきた過程を辿り、生態系と向き合うときに現れる工学的設計の限界と、自己組織化という特性が設計思想に示唆するものについて考察してきたが、最後に、こうした議論を踏まえ、人間がすべてを知り得ない生態系に対して、それでもなお工学はいかに判断し、働きかけることができるのかを考え、本稿を閉じることとしたい。

生態系には、全体を統括し、その完成形をあらかじめ描く主体は存在せず、それぞれの生物がそれぞれの環世界を生き、環境との相互作用の中で適応し、その結果として複雑な関係性が形成されている。前章で見たように、ドネラ・メドウズは、自己組織化する能力を「システムのレジリエンスの最も強い形」と表現し、複雑な自己組織化でさえ、比較的単純な組織化の規則から生じ得ることを指摘している。一方で、複雑なシステムに向き合う人間に求められる態度を、彼女は

“the humility of Not Knowing”と表現した。すなわち、生態系を工学する上で問われるのは、すべてを知り、すべてを制御するための方法ではなく、知り得ないものが存在することを前提として、なおいかに働きかけるかという態度である。

この問題をさらに明確に捉えるために重要になるのが、トランスサイエンスという概念である。原子炉開発の第一線に立ち、オークリッジ国立研究所所長を長く務めた Alvin M. Weinberg は、1972 年の論文“Science and Trans-Science”において、トランスサイエンスを「科学に問うことはできるが、科学によって答えることのできない問い」[47]と表現したが、ここでいう問いは、単に人特有の価値判断を含むために科学では答えられないというものではない。低線量放射線の影響や極めて稀な原子炉事故の発生確率のように、科学の言葉で問いを立てることはできても、必要な実験や観測を現実には十分に行うことができず、科学によって一義的な答えを確定することが困難な問いも含まれる。

しかし、このような問題に人間が直面したのは、科学がトランスサイエンスという概念を生み出してからではない。人間は古くから、自然を観察し、経験を積み重ねる中でその振る舞いを読み取る知恵を培い、自然の脅威に対処しながら生きてきたのだから。

人間と自然との関係、文明のあり方、科学技術の進むべき方向についても、多くの思想家、哲学者、科学者が時代を超えて問い続け、また、それぞれの地域や文化には、自然との関わりの中で形成された自然観や文明観が蓄積されている。これらは近代科学とは異なる方法と文脈の中で形成されてきたものであるが、生態系の内部に存在する人間が、限られた認識のもとで自然とどのような関係を築くのかを考える上で、工学的視点から改めて検討すべきものを含んでいる。

その一つの視座を与えるのが、「蟲瞰学」である。言語学者の金谷武洋は、主語を明確にする西欧語を「神の視点」、時として主語を必要としない日本語を「虫の視点」と表現した。この「虫の視点」は、既述したユクスキュルの「環世界」にも通じる。人間を自然の外部に置き、神のごとく全体を俯瞰するのではなく、人間自身も生態系の内部に位置する一つの存在として世界を捉える視座である。既述の通り、ティモシー・モートンが人間の立場から自然を描写する「エコミメーシス」を批判したことも、この問題と軌を一にする。蟲瞰学は、人間中心主義

[47] Alvin M. Weinberg, “Science and Trans-Science,” *Minerva*, Vol. 10, No. 2, pp. 209–222, 1972.

的な世界観を相対化し、人間と人間ならざるものとの関係を、生態系の内部から捉えようとする知的態度といえる。

日本には、このような視座と接続し得る思想的蓄積が古くから存在してきた。仏教と神道が習合してきた日本の宗教観には、自然を畏れ敬い、人間以外の生命や山川草木にも価値を認める自然観が見られる。「山川草木悉皆成仏」という言葉に象徴される思想や、梅原猛らが文明と環境との関係を問い直してきた試みも、その一つである。これらは直ちに工学の設計原理となるものではない。しかし、人間を自然の外部に置かず、人間以外の存在をも含めて世界を捉えようとする自然観は、エコミメティクスの視点から検討する意味を持つ。

石田秀輝が提唱した「ネイチャー・テクノロジー」は、厳しい地球環境制約のもとで、人間の豊かさを自然との関係性の中から再構築し、それを技術へと接続しようとした試みである。自然の仕組みを技術に応用するだけではなく、環境制約の中でどのような暮らしや豊かさを選択するのかという問いを技術と結び付けた点に、その特徴がある。こうした自然から学ぶ取り組みを、思想にとどめず研究や社会の実践へと結び付けるためには、そのための「場」や仕組みも重要となる。

その一例として、博物館を挙げたい。欧米では、自然史博物館をはじめとする博物館が大学や研究機関と連携し、収蔵標本を基盤とした研究や教育に積極的に関与してきており、そこでは博物館は、過去の知識や標本を保存・展示するだけの施設ではなく、生物や地質、生命の歴史と多様性に直接触れ、そこから新たな研究課題や技術的着想を得るための知的基盤としても機能している。下村自身もこうした海外の事例に注目し、博物館を自然と研究、さらに社会を結ぶ場として捉え、その可能性を探ってきた。このような場は、科学によって得られた知識を伝えるだけでなく、自然との直接的な接触を通じて新たな問いを生み出すという意味で、科学だけでは答えの定まらない問題に向き合うための一つの契機ともなり得る。

一方、日本では、自らの営みをより広い関係性の中に位置付ける考え方が、経済活動の規範にも見いだされる。近江商人の経営哲学を表すものとして広く知られる「三方よし――売り手よし、買い手よし、世間よし」は、経済活動を売り手自身の利益のみに還元せず、取引相手や社会との関係を含めて捉える考え方である。自らの経済活動をより広い関係性の中に位置付けるこの考え方は、経済活動を社会や自然環境から切り離して捉えるのではなく、より大きな系の一部として位置付けるという点で、本稿の問題意識にも通じる。

ここで注目すべきは、現代の複雑系科学やレジリエンス工学が明らかにしてきた、複雑な系のすべてを予測し制御することの限界と、人間が自然との長い関わりの中で培いながら、近代化の過程で次第に意識されにくくなってきた、取り尽くさない、余地を残す、自然の応答を読むといった実践との間に、重なりが見いだされることである。これらを過去の知恵として懐古的、あるいは情緒的に称揚するだけでは、工学にはつながらない。そこに含まれる経験的な原理を現代の科学的知見に照らして検討し、工学の言葉へと翻訳することによって、不確実性の高い生態系に働きかけるための設計原理として再構成することが必要である。

例えば、自然に対する「畏敬」という一見情緒的な概念も、その内実を工学的に読み解けば、生態系の全体を人間が把握できるとは考えない「認識の限界の自覚」、一度失われれば回復困難なものへの介入を慎重にする「不可逆性への配慮」、資源を限界まで利用せず系の自己組織化や回復能力を損なわない「余地を残す設計」、事前予測だけに依存せず介入後の変化から学ぶ「観察と修正」、さらには人間の短期的便益だけでなく、他の生物や将来世代をも考慮に入れること、といった原則に読み替えることができる。このように、自然観や生活の中に経験的に蓄積されてきたものを工学的な概念へと翻訳し、その妥当性を現代科学によって検討することは、エコミメティクスを、生物の形態や機能の模倣を超えて、生態系との関係を扱う工学へと展開する一つの方法となり得る。

循環型社会を考える上で、こうした視点を見失えば、持続可能な社会を目指したはずの取り組みが、かえって人類自身の持続可能性を損なう動きに拍車をかけることにもなるだろう。資源を効率的に循環させることを目的に、技術や制度によって社会を精緻に設計したとしても、それだけでは、生態系の一部として人間が存続し得る社会にはならないだろう。人間自身もまた生態系の内部に存在し、その全体を完全に知ることはできない。だからこそ、科学によって知り得ることを最大限に活用しつつ、働きかけに対する生態系の応答を観察し、そこから学び、設計そのものを絶えず問い直していくことが求められる。

これは、過去の自然観への回帰を意味するものでもない。近年、日本においても循環経済やネイチャーポジティブをめぐる議論が進み、欧州をはじめとする海外の制度や政策から学ぶべきことは多い。一方、既に私たちの足元にありながら意識されにくくなったものにも目を向け、現代の課題のもとでその意味を問い直す必要があるということだ。寺田寅彦が「われわれの足元に埋もれている宝」と表現したものを掘り起こすことは、過去を復活させることではなく、そこから未来に生かし得る原理を見いだすことである。

最後に、本稿の趣旨を象徴する二つの言葉を掲げたい。

「累積してゆく不可逆な技術進歩が、政治における古く変わることのないものと結びつくと、そこにはとんでもない暴発の危険性が生じる。」

（レジス・ドブレの議論を踏まえた著者による要約）

「西洋の学者の掘り散らした跡へはるばる遅ればせに鉱石の欠けらを捜しに行くもいいが、われわれの足元に埋もれている宝をも忘れてはならないと思う。しかしそれを掘り出すには人から笑われ狂人扱いにされる事を覚悟するだけの勇気が入用である。」[48]

（寺田寅彦）

本稿が、人間と自然との関係を改めて問い直し、循環型社会とエコシステムの在り方を現実的に結び付ける工学的視点として、蟲瞰学に立脚したエコミメティクスへの理解と実践を深める契機となることを期待したい。

[48] 寺田寅彦「線香花火」（初出 1925 年）。 『科学と科学者のはなし―寺田寅彦エッセイ集』池内了編、岩波書店、2000 年所収。

付記　本稿における主要概念の整理

本稿で扱う主要な用語には、研究分野や実務領域によって、その意味や用いられ方に幅があるものも少なくない。そこで、既存の用法を踏まえつつ、本稿では以下のような概念関係として整理する。なお、本文では、国内外の議論や制度等における用語の用いられ方も参考にしながら、読者の理解を容易にするため、日本語表記、カタカナ表記、英語表記を適宜使い分けている。以下では、本文中で英語表記を用いる概念について、対応する英語を併記した。

- **バイオミメティクス（Biomimetics）**

  生物の構造、機能、プロセスなどを分析し、そこから得られた原理や知見を技術へ移転することによって、課題解決や新たな技術・製品・システムの創出につなげる学術・技術領域。本稿では、主としてこの工学的な意味で用いる。

- **バイオミミクリー（Biomimicry）**

  生物や生態系にみられる形態、構造、機能、プロセス、システムなどから学び、その原理を人間の課題解決や持続可能な社会の実現に生かそうとする考え方。バイオミメティクスと重なる領域は大きく、両者の概念的な境界は必ずしも明確ではないが、バイオミミクリーでは持続可能性をより明示的に重視する傾向がある。本稿では、この思想的・社会的側面を含む場合に主として用いる。

- **生態系バイオミメティクス**

  生態系を学びの対象とし、その構造、機能、プロセス、相互作用などから得られる原理やパターンを、人工物や人工システムの設計へ応用するアプローチ。類似する概念として ecosystem biomimicry などの用語も用いられており、その範囲や呼称は必ずしも統一されていない。本稿では、生態系を観察し、そこから得られた知見を工学的設計へ移転するアプローチを指して用いる。

- **生態系（Ecosystem）**

  生物群集と、それを取り巻く非生物的環境とが相互に作用し、物質やエネルギーの流れを伴いながら形成される動的なシステム。本稿では、人間および人間社会も生態系の外部ではなく、その一構成要素であることを一貫した前提とする。また、多数の構成要素の相互作用を通じて秩序や構造を形成・再編し、変化に適応する自己組織化のレジリエントな性質に着目している。なお、日本では「エコシステム」の語が、産業や事業等における多様な主体の相互関係からなる「産業生態系」を指して用いられることも多い。本稿では両者を概念上区別しつつ、産業生態系を含む人間社会もまた、生態系の内部に存在するものとして捉える。

- **環世界（Umwelt）**

  生物学者ヤーコプ・フォン・ユクスキュルが提示した概念。生物を取り巻く客観的な環境（Umgebung）そのものではなく、それぞれの生物が固有の感覚・知覚と行動を通して関わり、意味をもつ世界を指す。同じ環境に存在していても、生物種や個体によってその環世界は異なる。本稿では、人間が認識する世界もまた人間固有の環世界であり、生態系の全体そのものではないという認識を、蟲瞰学およびエコミメティクスを考える上での重要な視座としている。

- **蟲瞰学**

  人間以外の生物がそれぞれに有する感覚や知覚、その環世界（Umwelt）を科学的に理解することを通じて、生物それぞれの世界観から自然や生態系を捉えようとする学問的アプローチ。人間の尺度や世界観に偏った自然理解を相対化し、非―人間中心（Non-Humancentric）の自然観・世界観を探究する。

- **エコミメーシス（Ecomimesis）**

  ティモシー・モートンが『Ecology without Nature』において批判的に論じた、自然や環境をあたかも直接そこに存在するかのように提示する表現・修辞のあり方。モートンは、こうした表現が「自然」を人間から独立した対象として措定しながら、同時に人間がそれを描写し、媒介し得るという構図を生み出すことを問題とした。本稿では、人間が自然を外部から捉え、その全体を理解し代弁できるとする視点を問い直す議論として参照する。

- **エコミメティクス**

  生態系から学び、その知見を人工システム等へ生かす考え方として、生態系バイオミメティクスと近接する領域で論じられてきた。本稿では、下村が論じてきたエコミメティクスをさらに考察し、蟲瞰学の視座から、人間および人間社会も生態系内部の一構成要素であることを工学や社会の設計における前提とする。したがって、生態系を外部から俯瞰し制御するという設計者の位置を問い直し、人間の認識や予測の限界を踏まえながら、生態系とどのような関係を築き、働きかけるべきかまでを問いの対象とする。

欧州と日本における制度設計思想の比較検討から

7. 欧州と日本における制度設計思想の比較検討から

平坂 雅男

7.1 はじめに

循環経済をめぐる議論は、近年、廃棄物の削減やリサイクルの推進といった従来型の環境政策を超え、産業や社会の構造そのものをいかに循環型に再設計するかという段階に入っている。このような状況において、欧州（EU）と日本における制度設計思想の違いを比較することは、単なる政策比較にとどまらず、今後の社会像や産業像を考えるうえで重要な意味をもつ。

循環経済は、しばしば資源循環や環境負荷低減の観点から論じられるが、現実の制度は、各国の政策形成過程、産業構造、さらには自然観や環境文化の違いを強く反映して形成されている。とりわけ EU では、循環経済は製品設計、市場形成、情報基盤、標準化を含む包括的な制度構想として展開されているのに対し、日本では、3R や循環型社会形成を基盤として、分別、回収、再資源化、適正処分の実務的蓄積の上に制度が形成されてきた。両者の違いは、個別政策の差というよりも、循環をどのような制度思想のもとで社会に組み込もうとしているかという点にある。ここで問うべきなのは、EU と日本の制度の優劣そのものではなく、循環経済および産業生態系をどのような視点で構想し、どのような制度的前提のもとで形成しているのかという点である。

以上の問題意識のもと、本稿では、欧州と日本における循環経済および産業生態系の制度設計思想を比較し、その背景にある環境文化や自然観の違いも踏まえつつ、自然に学ぶ設計思想としてのバイオミメティクスの観点から補足的な示唆を加え、日本の制度設計が今後どの方向を目指すべきかを考察する。

7.2 EU における制度設計思想——製品・市場・情報基盤を束ねる包括設計

EU における循環経済の制度設計思想の特徴は、循環性を廃棄物処理の末端での課題としてではなく、製品設計、市場形成、情報流通などを通じて産業システム全体に埋め込むべき原理として捉えている点にある。2020 年に採択された第2次循環経済行動計画（Circular Economy Action Plan: CEAP）は、製品のライフサイクル全体を対象に、製品がどのように設計され、どのように使用され、廃棄物発生を抑制しつつ経済の中に長く留まるかを扱う枠組みとして位置づけられている。欧州委員会は、CEAP を欧州グリーンディールの主要構成要素の一つとし、EU レベルで立法・非立法措置を組み合わせて推進する方針を示している。

この制度思想の背景には、製品の環境負荷の相当部分が設計段階で左右されるという認識がある。欧州委員会は、製品の環境影響の最大 80％が設計段階で決まるとしており、循環性の向上は回収や再資源化の段階だけでなく、まず製品設計そのものを変えることから始まるという考え方をとっている。したがって EU の循環経済政策は、従来の廃棄物管理政策を強化するだけでなく、耐久性、修理可能性、再使用可能性、再生材利用、資源効率、情報開示といった要求を通じて、製品が市場に出る以前の段階から循環性を組み込もうとするものである。

その中核に位置づけられるのが、2024 年7月に発効した持続可能な製品のためのエコデザイン規則（Ecodesign for Sustainable Products Regulation: ESPR）である。欧州委員会は、ESPR を、より持続可能で循環的な製品に向けた枠組みとして位置づけている。ESPR は、エネルギー関連製品に限られていた従来のエコデザインの考え方を拡張し、幅広い製品群に対して循環性や環境持続可能性に関する要求を設定できる法的基盤

を整えた。これにより、循環経済は個別製品の自主的改善にとどまらず、EU 市場における製品要件の共通枠組みとして制度化されつつある。

ここで注目すべきは、EU が循環経済を単なる環境政策ではなく、市場の機能確保と密接に結びついた制度課題として扱っていることである。ESPR の立法文書でも、持続可能な製品のために十分に機能する域内市場の確保が重視されている。つまり、EU における循環性とは、環境配慮に関する任意の付加価値ではなく、市場における競争条件の一部として組み込まれつつある。ここに、EU の制度設計が、環境負荷低減と市場統合、さらに産業競争力の再編を同時に志向している特徴がみえる。

また、EU の制度設計思想は、法規制のみで完結するのではなく、法規制、情報基盤、監視指標、必要に応じた標準化を相互につなげて、循環性を支える制度的インフラを形成している点に特色がある。CEAP の実施の下で、EU は循環経済モニタリング枠組みを改訂し、政策の実効性を測定する指標体系を整備している。さらに、EU エコラベル、グリーン公共調達、環境フットプリント手法など、多様な政策ツールが循環経済の推進基盤として配置されている。これは、単一の法制度だけで循環経済を実現するのではなく、市場行動を方向づける複数の制度装置を組み合わせて運用するという EU 型の特徴を示している。

とりわけ近年重要性を増しているのが、デジタル製品パスポート（Digital Product Passport: DPP）である。欧州委員会は、DPP を ESPR の重要な構成要素と位置づけ、製品の持続可能性、耐久性、リサイクル性、環境影響などに関する情報を電子的に保存・共有する仕組みとして整備を進めている。DPP は、消費者、企業、当局がより適切な判断を行うための基盤となるだけでなく、市場監視やサプライチェーン管理を支える仕組みとしても期待されている。つまり EU は、循環経済を「ものの循環」だけでなく、それを支える「情報の整備と共有」の問題としても捉えている。

さらに、EU では個別の重点分野についても、循環性を上流から下流まで一体的に扱う制度が導入されている。たとえば、新電池規則（Regulation (EU) 2023/1542）は、電池を原材料調達から回収、再利用、リサイクル、再資源化に至るまで、ライフサイクル全体で持続可能かつ循環的なものにすることを目的としている。この規則は、環境負荷低減のみならず、競争力ある持続可能な電池産業の育成や、EU の戦略的自律性の強化とも結びつけられている。ここでも、循環経済が環境対策であると同時に、産業政策としても位置づけられていることがわかる。

同様に、2024 年に成立した修理促進指令（Directive (EU) 2024/1799）も、循環経済の制度思想をよく示している。この指令は、技術的に修理可能な製品について、消費者が交換ではなく修理を選択できる条件を整え、修理サービスへのアクセス向上を図ることを目的としている。ここで重視されているのは、廃棄物が発生した後の処理ではなく、使用段階で製品寿命を延ばし、製品価値をできるだけ長く維持することである。すなわち EU では、循環性は「回収して再資源化する能力」だけではなく、「製品を長く使い続けられる市場やサービスをいかに設計するか」という視点で制度化されている。

包装分野でも同様であり、2025 年2月に発効した包装・包装廃棄物規則（PPWR）は、加盟国ごとに異なっていた措置をさらに調和させ、二次原材料、製造、リサイクル、再使用に関して域内市場を強化する方向で設計されている。ここでも循環経済は、各国が独自にリサイクル制度を整える問題ではなく、市場全体で再生材や再使用システムが機能する条件を統一的に整備する問題として扱われている。

さらに、EU では 2025 年8月、欧州委員会が循環経済法（Circular Economy Act: CEA）に向けたパブリックコメントの募集を開始し、2026 年の採択に向けて動いている。二次原材料の単一市場の形成、高品質な再生材供給の拡大、需要喚起を通じて、経済安全保障、レジリエンス、競争力、脱炭素化を加速することを目的としている。あわせて、EU 競争力コンパス（Competitiveness Compass）やクリーン産業ディール（Clean Industrial Deal）

と整合しつつ、2030 年までに EU を循環経済の世界的リーダーとし、EU の循環率を倍増させる目標への貢献も掲げられている。これは、CEAP や ESPR に続いて、循環経済を単なる廃棄物管理政策ではなく、資源、産業、競争力を一体で再編する制度として位置づける EU の方向性が、さらに明確化していることを示している。

以上を踏まえると、EU の制度設計思想は、第一に、循環性を製品ライフサイクル全体に組み込むこと、第二に、それを市場の競争条件の一部として位置づけること、第三に、法規制・情報基盤・監視指標を組み合わせて産業エコシステム全体を方向づけることに特徴があるといえる。そして近年は、CEA 構想にみられるように、こうした方向性が二次原材料市場、経済安全保障、競争力政策まで含む、より包括的な産業政策へと拡張されつつある。

7.3 日本における制度設計思想
―循環型社会・3R・実務的積み上げを基盤とした展開

日本における循環経済の制度設計思想は、EU のように製品設計や市場形成を中心に据えた制度構想として展開してきたというよりも、まず廃棄物管理、適正処理、再資源化の高度化を基盤に、段階的に循環型社会を構築してきた実務的な制度形成として理解することができる。循環型社会形成推進基本法は、「廃棄物等の発生抑制、循環資源の循環的な利用及び適正な処分」によって、天然資源の消費を抑制し、環境負荷をできる限り低減する社会を「循環型社会」と定義している。また同法は、発生抑制、再使用、再生利用、熱回収、適正処分という優先順位を法定化し、日本の循環政策の基本的骨格を与えた。

この枠組みの特徴は、発生抑制を基本原則として掲げつつも、制度運用としては廃棄物等の分別、回収、リサイクル、適正処分の高度化に強みを持つ点にある。すなわち、日本の制度は、資源制約や最終処分場の確保、生活環境保全といった現実的課題に対応するなかで、分別、回収、再資源化、適正処分の仕組みを整備し、個別法を積み上げることで実効性を高めてきた。この意味で日本の制度設計は、全体構想を先に描いてそこから各制度を配置するというよりも、社会に存在する具体的な課題に対応しながら制度を実装していく性格が強い。こうした段階的な制度形成は、現場への定着や運用面での強さを持つ一方、製品設計、市場、情報基盤を横断する全体構想としては見えにくい面もある。

このような日本の制度設計を理解するうえで広く用いられてきたのが、いわゆる「動脈／静脈モデル」である。すなわち、原材料調達から製造、流通、消費へ向かう「動脈」側と、使用後製品や廃棄物の回収・再資源化・処理を担う「静脈」側を区別し、その連携によって循環を成立させるという発想である。この見方は、資源循環の役割分担を理解しやすく、制度実務上も有効であった。しかしその一方で、製品設計段階における長寿命化や修理可能性、情報共有、再使用市場の形成、サービス化、サプライチェーン横断のトレーサビリティといった論点を十分に取り込みにくいという限界もある。循環経済が、単なる「静脈機能の強化」ではなく、産業全体の構造転換として理解されるようになった現在、この二つの流れだけでは、複雑化した産業生態系を十分に捉えきれない。

日本の循環政策は、長年にわたって現場での分別から適正処分までの仕組みを整え、自治体、事業者、消費者が役割分担をしながら制度を運用する強固な基盤を形成してきた。このような制度思想は、実装可能性と運用可能性を重視する文化の上に循環政策を築いてきたものといえる。その意味で、日本の制度設計思想を単純に「下流偏重」と評価するのは適切ではない。

近年、日本の制度設計思想には明確な変化もみられる。経済産業省の「循環経済ビジョン 2020」は、大量生産・大量消費・大量廃棄型の線形経済モデルから転換し、資源投入量や消費量を抑えつつ、ストックを有効活用し、サービス化などを通じて付加価値の最大化を図る「循環型の経済社会活動」への移行を掲げている。そ

こでは循環経済は、3R 政策の単なる延長ではなく、「環境と成長の好循環」を実現する新たな経済モデルとして捉えられている。さらに同文書は、循環性の高いビジネスモデルへの転換を、中長期的な競争力の確保にもつながるものと位置づけている。

この点は、日本の制度思想が従来の枠組みから拡張しつつあることを示している。すなわち、主として廃棄物・リサイクル分野の課題として扱われてきた循環は、近年では産業政策、競争力強化、経済安全保障、デジタル化と結びつきつつある。環境省の第五次循環型社会形成推進基本計画も、循環経済への移行を国家戦略として位置づけ、気候変動、生物多様性保全、環境汚染防止といった環境課題に加え、地方創生、質の高い暮らし、産業競争力、経済安全保障への貢献を掲げている。また、重要な方向性として、事業者間連携によるライフサイクル全体での資源循環や、多様な地域循環システムの構築も示されている。

このように、日本の制度設計は、依然として循環型社会形成推進基本法と3R の蓄積を基盤に持ちながらも、近年ではそれを超えて、より広い意味での循環経済へと視野を広げつつある。ただし、その広がりは EU のように製品政策や市場統合を起点とするものではなく、既存の実務基盤を土台にしながら、徐々に経済政策や産業政策と結びつく形をとっている。ここに、日本の制度設計思想の独自性がある。すなわち、日本はまず社会に定着した資源循環システムをつくり、それを経済合理性や産業競争力の向上にも結びつけようとしている。

7.4 EU と日本の比較
―制度の差ではなく、制度観の差

EU と日本はいずれも循環経済の推進を掲げているが、その制度形成のあり方は同じではない。両者の違いは、個別制度の有無や規制の強弱といった制度上の違いだけで説明できるものではなく、循環経済を何のための制度として構想しているのか、また自然と産業の関係をどのように理解しているのかという制度観の差として捉える必要がある。EU では循環経済は、製品、情報、市場、競争条件を一体的に再編する産業政策・市場政策として位置づけられているのに対し、日本では、廃棄物管理、資源有効利用、現場改善の積み重ねを基礎として形成されてきた。したがって、両者の差異は単なる政策群の違いではなく、制度を構築する際の視点そのものに由来している。

第一の違いは、制度の起点である。EU では、循環性は製品のライフサイクル全体にかかわる要件として捉えられ、制度の出発点はしばしば製品設計や市場流通に置かれる。CEAP や ESPR が象徴するように、EU は製品が市場に出る前の段階から、耐久性、修理可能性、再使用可能性、資源効率、情報開示といった条件を制度化しようとしている。つまり循環経済は、廃棄物が発生した後の処理体系ではなく、市場に投入される製品の性格そのものに働きかける制度として設計されている。これに対し日本では、循環型社会形成推進基本法にみられるように、制度の起点は「廃棄物等の発生抑制、循環資源の循環的利用及び適正処分」にあり、制度運用上は分別、回収、再資源化、適正処分の高度化に重心が置かれてきた。ここでは、上流の製品設計よりも、下流の実効性が制度の中心に置かれてきたといえる。

第二の違いは、制度が想定する対象範囲である。EU は循環経済を、設計、調達、製造、流通、使用、修理、再使用、再資源化までを連結するライフサイクル全体の制度として扱う傾向が強い。DPP や修理促進指令は、その典型例であり、製品が市場に流通した後も、情報、保守、修理、再流通を含む関係のなかで価値を維持することを制度的に支えようとしている。さらに、2026 年提案予定の CEA 構想では、二次原材料の単一市場の形成、高品質な再生材の供給拡大、需要喚起が掲げられており、循環経済の射程が製品単体を超えて二次資源市場全体へ拡張されつつある。一方、日本の制度は、発生抑制を含みつつも、実際には分別、回収、再資源化、適正処分を中核に発展してきたため、制度の重心は比較的中下流に置かれてきた。近年は循環経済ビジ

ョン 2020 や第五次循環型社会形成推進基本計画により、ストック活用、サービス化、ライフサイクル全体、事業者間連携といった視点が導入されつつあるが、制度体系全体としてみれば、なお EU ほど一体的な上流設計には至っていない。

第三の違いは、政策手段の組み合わせ方にある。EU では、法規制、情報要件、モニタリング指標、デジタル基盤を相互に連結しながら、循環経済を支える制度インフラを形成している。ESPR は製品要件を定める法的枠組みであると同時に、デジタル製品パスポートや市場監視の仕組みとも結びつく。また、包装規則や電池規則も、域内市場を横断的に再編する制度装置として機能している。さらに CEA 構想でも、既存制度を補完しつつ、二次原材料市場をめぐる供給・品質・需要を統合的に扱おうとしている。これに対し、日本では、基本法、個別リサイクル法、自治体の実務、事業者の自主的取り組み、官民連携といった複数の手段が組み合わされているものの、それらは必ずしも単一の上位構想のもとで市場横断的に統合されているわけではない。このため、日本の制度は柔軟な運用や現場対応力には優れる一方、全体を一つの「産業生態系の設計」としてみせる力は相対的に弱い。

第四の違いは、循環経済を支える背景思想である。EU では、循環経済は環境政策であると同時に、競争力政策であり、域内市場を再構成するルール形成とも密接に結びついている。欧州委員会は CEAP の中で、循環性を資源依存の低減や欧州グリーンディールの実現に結びつけてきたが、近年はさらに、EU 競争力コンパスやクリーン産業ディールと整合する形で、循環経済をレジリエンス、経済安全保障、脱炭素化を加速する中核政策の一つとして位置づけている。さらに、CEA も従来の環境政策の延長ではなく、競争力強化策として位置づけられている。つまり EU では、循環経済は環境対策にとどまらず、市場のルールそのものに組み込まれ、企業の競争条件を変える制度としての性格を強めている。これに対し日本では、循環型社会形成推進基本法が示すように、循環性は主として天然資源消費の抑制と環境負荷低減のための社会的秩序として位置づけられてきた。近年はそこに競争力や経済安全保障の視点が付加されつつあるが、制度の歴史的基盤は依然として、適正処理、資源有効利用、現場における運用改善にある。すなわち、日本では、循環経済はまず「社会をどう持続可能に運営するか」という実務的課題として出発し、後から産業政策的意義が重ねられてきたのである。

このような差異の背後には、環境に対する文化的態度の違いも一因として考えられる。EU では、自然環境は公共的価値として制度的に守るべき対象であり、その保全は市場ルールや企業行動の規律化を通じて達成されるべきものと考えることができる。したがって制度は、全体秩序を設計し、行為主体に共通条件を課す方向で展開しやすい。これに対し日本では、自然は人間活動と切り離された外部対象というより、生活や地域の実践の中で折り合いをつける対象として理解されてきた側面がある。そのため制度も、現場の改善、社会的合意、段階的な運用を重ねる形で発展しやすい。この対比を単純化しすぎることは避けるべきであるが、制度観の違いの背景に、自然観や社会観の差がある程度反映している可能性は否定できない。

もっとも、この比較は、EU 型が優れており日本型が遅れているという単純な結論に導くものではない。EU 型制度設計は、全体性と規範力に優れる一方で、制度の複雑化や企業負担の増大を伴いやすい。また、高度な情報基盤や標準化能力を前提とするため、制度への適応能力が企業間・国間で大きく異なる可能性もある。CEA 構想が進めば、二次原材料市場における品質、認証、トレーサビリティ、リサイクル含有量などをめぐる要求がさらに高まる可能性があり、対応能力の差が競争条件そのものに影響しうる。これに対し日本型制度設計は、現場への定着や運用可能性に優れ、社会実装の面で粘り強さを持つ。しかし、循環経済が設計、データ、トレーサビリティ、再使用市場、経済安全保障と結びつく段階に入った現在、局所改善の積み重ねだけでは制度全体の方向性を示しにくいという限界が顕在化しつつある。

したがって、ここで重要なのは、EU と日本の違いを単に「制度の差」として比較することではなく、どのような制度観がこれからの循環経済に必要かを考えることである。循環経済は静脈機能の強化やリサイクル率の向上にとどまるものではなく、設計、使用、修理、再使用、回収、再資源化、情報流通を結ぶ関係性の制度化として捉える必要がある。その意味で、日本はこれまで培ってきた3R や資源循環の実務基盤を土台としつつ、それをより上流の設計、情報基盤、制度連携へと結びつけ、循環を産業生態系全体の設計問題として再定義していく必要がある。

7.5 自然に学ぶ循環設計の視点
―バイオミメティクスからの示唆

これまで述べてきたように、EU と日本の循環経済政策の違いは、個別制度の差というよりも、どのような制度思想のもとで循環を考えているかという点にある。EU では、循環性は製品設計、市場形成、情報基盤、ルール形成を通じて産業システム全体に埋め込むべき原理として位置づけられる傾向が強い。他方、日本では、3R や循環型社会形成を基盤として、分別、回収、再資源化、適正処分の実務的蓄積の上に制度が形成されてきた。こうした比較を踏まえると、今後の日本に必要なのは、個別制度を追加することだけではなく、循環経済をより根本的な設計思想の問題として捉え直す視点である。

その際に重要な示唆を与えるのが、バイオミメティクスである。バイオミメティクスは一般には生物模倣技術として理解されることが多いが、その本質は、生物の形態や機能の単なる模倣ではなく、限られた資源条件のもとで環境変動に応答し、複数の要素が相互依存しながら系全体を維持している自然界の成立原理を、設計思想へ翻訳する点にある。もっとも、バイオミメティクスにおいて自然界を参照することは、自然をそのまま理想化することを意味しない。 自然界の仕組みは、進化的制約、時間スケール、トレードオフ、かく乱への限界のなかで成立しており、そこから学ぶべきなのは、完成された理想像ではなく、条件と制約を含んだ動的な設計原理である[49]。

この観点からみると、循環経済の本質は、使用後製品をいかに効率よく回収し再資源化するかという末端での問題だけではない。むしろ、最初の設計段階で循環性をどう織り込み、流通・使用・補修・再使用・再資源化までを支える情報基盤をどう整え、さらにそれを社会が理解し実装できるようにするかという問題と考えることができる。自然界も、単純な意味で「廃棄物が存在しない完全循環系」ではない。それでもなお示唆的なのは、個々の要素を孤立した処理対象としてではなく、より大きな関係のなかで成立させている点にある[49]。

以下では、このような理解に立って、バイオミメティクスから得られる循環経済への示唆を三つの論点に沿って整理する。第一に、循環は回収ではなく設計から始まるという点である。第二に、循環を支えるのは物質だけではなく情報であるという点である。第三に、循環経済の核心は効率化そのものではなく、関係性の設計にあるという点である。

(1)自然界にみるエコデザインの原理

第一の示唆は、循環性は使用後の回収段階で付加されるものではなく、製品やシステムの設計段階から組み込まれるべきものであるという点である。自然界では、ある生物の構造や素材は、その生存期間中の機能だけでなく、劣化、分解、他の生物による取り込みまでを含む広い時間軸のなかで成立している。ここで重要なのは、自然界を「最初から無駄のない完全循環系」とみなすことではない。近年の生物学的検討が示すように、自

[49] Lecointre, Guillaume, et al. ″Revisiting nature's "Unifying Patterns": a biological appraisal.″ Biomimetics 8.4 (2023): 362.

然界の「リサイクル」はしばしば非常に長い時間を要し、しかも常に完全に機能するわけではない。それでもなお示唆があるのは、自然界が処理工程を後付けするのではなく、構造・機能・分解可能性・相互利用可能性を切り離さずに成立させている点にある。

このことは、人間社会の循環経済においても、回収や再資源化の効率化だけでは不十分であり、最初の製品設計の段階で寿命、補修、分解、再利用、素材循環までを見通す必要があることを示している。この方向性は、近年の欧州におけるエコデザイン政策とも親和的である。EU の ESPR は、市場に置かれる製品について、耐久性、修理可能性、リサイクル可能性、再生材利用、資源効率などを含む要求事項を段階的に設定するための枠組みであり、製品の循環性を市場投入以前の設計要件として位置づけている。

加えて欧州では、バイオミメティクスを単なる着想法ではなく、環境性能を含めた設計方法へと展開する試みも進んでいる。たとえば、フランスの Biomim'Index は、既存技術の改善や新たな持続可能技術の開発に向けて、バイオミメティクスを実務的に取り込むための方法として提示されている [50]。建築・都市分野でも、欧州では生物の形態や表面構造の模倣にとどまらず、生態系レベルの関係性や環境応答を設計へ取り込もうとする方向が広がっている [51,52,53]。こうした事例は、自然模倣が単一性能の向上ではなく、長期的な環境適応性や維持管理負担の低減を含む設計思想へ結びつくことを示している。

ここから得られる示唆は明確である。日本の循環経済政策も、従来の回収・再資源化の延長としてだけでなく、製品設計そのものに循環性を埋め込む方向へと重心を移す必要がある。これは単に環境配慮設計を推進するという一般論ではなく、製品寿命、補修可能性、部材交換可能性、単一素材化、分解容易性、再生材利用可能性などを、制度・設計指針・評価方法の中に位置づけていくことを意味する。その際、自然界に学ぶべきなのは、「自然は完全に循環している」という単純化された構図ではない。むしろ、限られた資源条件のもとで、豊富で地域的に入手可能な資源を中心に用い、長い時間軸のなかで分解可能性や再利用可能性を確保しつつ、全体として機能を維持するような設計原理である。

(2)生態系にみる情報循環の示唆

第二の示唆は、循環を成立させる基盤は物質の流れだけではなく、情報の流れであるという点である。循環経済の議論では、原材料の回収率、再資源化率、再生材利用率など、物質フローに着目した議論が中心になりやすい。しかし実際には、補修可能性、再使用可能性、分解可能性、素材選択、用途転換の可否は、製品や部材に関する情報が適切に保持され、流通し、利用されることによって初めて実現する。循環性は、単なる「モノの循環」ではなく、「モノと情報の循環」が重なり合って成立するのである。

自然界においても、個体や生態系の維持は、物質循環だけで成立しているわけではない。生物は、光、温度、湿度、化学物質、接触、振動など、多様なシグナルを感知し、それに応答することで環境との関係を維持している。さらに、生態系レベルでみれば、この情報的側面はいっそう明確になる。たとえば、生物はフェロモン

---

[50] Letard, Anneline, et al. "Biomim'Index—A New Method Supporting Eco-Design of Cosmetic Products Through Biomimicry." Sustainability 17.13 (2025): 6124.

[51] Uchiyama, Yuta, Eduardo Blanco, and Ryo Kohsaka. "Application of biomimetics to architectural and urban design: A review across scales." Sustainability 12.23 (2020): 9813.

[52] Blanco, Eduardo, et al. "Urban ecosystem-level biomimicry and regenerative design: Linking ecosystem functioning and urban built environments." Sustainability 13.1 (2021): 404.

[53] Cruz, E., K. Raskin, and F. Aujard. "Biological strategies for adaptive building envelopes." *Proceedings of the FACADE 2018 Final Conference of COST TU1403 Adaptive Facades Network, Lucerne, Switzerland*. 2018.

や匂い物質によって行動を調整し、花と花粉を運ぶ昆虫などは、色や形や匂いによって相互作用している。植物群落や土壌微生物系も、化学シグナルを介して関係を形成している。捕食、共生、寄生、競合といった生態系内の相互作用も、単なる物質移動ではなく、行動選択や位置選択、繁殖タイミングなどへの応答を通じて維持されている。すなわち、生態系における循環は、物質の流れと同時に、関係を成立させる情報の流れによって支えられているのである。

このことは、循環経済におけるデジタル製品パスポートの意義を考えるうえでも重要である。EU では、ESPR の実施の重要な柱として DPP が位置づけられており、製品の主要特性、材料構成、環境性能、耐久性、修理可能性、使用後処理に関わる情報を、製品ライフサイクル全体で利用可能にする方向が示されている。製品の素材構成、修理可能性、分解性、再使用適性に関する情報が共有されなければ、循環性は設計に組み込まれていても実効性を持たないといえる。

ここで自然界から得られる示唆は、情報は単に管理のために後から付加するものではなく、そもそも系が環境に応答し続けるための条件だという点にある。循環経済においても、製品情報や資源情報は、廃棄物管理のための付随情報ではなく、補修、部品交換、再利用、再製造、素材循環を可能にする設計要素そのものである。したがって、日本の循環経済政策においても、今後は回収スキームや再資源化施設の整備だけでなく、製品ライフサイクル全体にわたる情報整備を制度の中核に据えていく必要がある。

さらに重要なのは、自然界の情報循環が、単一の管理主体によって一元的に制御されているわけではないという点である。生態系では、多数の主体が局所的な応答を行いながら、結果として全体の秩序が形成される。これは、循環経済においても、行政のみが全体を統制するという発想ではなく、設計者、素材メーカー、組立事業者、流通、修理事業者、リユース事業者、再資源化事業者、消費者が、それぞれ必要な情報にアクセスできる仕組みを設計する必要があることを示している。循環経済は、情報の集中管理だけで成立するのではなく、多くの主体が関係しながら運用される情報生態系として構想されるべきである。

(3)自然界に学ぶ制度思想の転換

第三の示唆は、循環経済の核心は、単に資源利用効率を高めることではなく、関係性をどう設計するかにあるという点である。従来の循環経済論では、資源投入量の削減、リサイクル率の向上、エネルギー効率の改善など、効率性の指標が重視されてきた。もちろん、それらは重要であるが、効率性だけでは循環は維持されない。実際には、どの主体がどの役割を担い、どの時点でどの情報にアクセスし、どの費用と責任を負担し、どのような再利用・補修・回収の選択肢が制度的に開かれているかといった、主体間の関係設計こそが循環経済の成否を左右する。

自然界もまた、単一の機能を最大化するシステムとして理解すべきではない。生物や生態系は「最適化」されているというより、複数の制約のなかで、その時々の条件下で機能しうる状態を維持している。そこでは相利共生だけでなく、捕食、寄生、競合といった非対称で緊張を含む関係も系の構成要素となっている。つまり、自然界の持続性は、調和的な関係だけで成り立っているのではなく、多様でしばしば摩擦を含む相互作用を組み込みながら、全体として破綻しにくい構造をつくっている点に特徴がある。

このように、生態系が多様な主体の相互作用によって成り立っていることを踏まえれば、循環経済もまた、単にリサイクル率を上げる技術体系ではなく、異なる利害や役割を持つ主体のあいだに、循環を可能にする関係を制度的に設計する試みと理解すべきである。製造者にとっては耐久設計や修理対応がコスト増になる場合があり、流通事業者にとってはトレーサビリティが負担となり、消費者にとっては長寿命製品が高価格になる可能性がある。再資源化事業者にとっては、分解しやすい製品のほうが望ましい一方で、製造現場では複合化

や接着による高性能化が求められることもある。循環経済は、このような相反する要求を単純に解消するものではなく、それらのあいだに調整可能な関係をどのように構築するかという制度設計の課題なのである。

この点で EU の循環経済政策は、個別技術の導入支援にとどまらず、製品設計、情報開示、市場規律、事業者責任、消費者への情報提供を組み合わせることで、主体間の関係を再設計しようとしている。ESPR、デジタル製品パスポート、耐久性や修理可能性に関する要件整備は、それぞれ別個の制度のようにみえて、実際には「市場に流通する製品をどのような関係のもとで循環させるか」という制度思想に支えられている。

他方、日本では、循環型社会形成推進基本法以来、適正処理、分別回収、再資源化の実務が蓄積されてきたことに大きな意義があるが、その強みは主として使用後段階にある。今後、循環経済をより本格的に設計思想として展開するためには、使用後処理の高度化に加え、設計段階・流通段階・使用段階を含めた主体間関係の再構築へと政策の重心を移す必要がある。製造者責任の再設計、修理・再使用を担う中間事業者の位置づけ、製品情報の共有、長寿命化と価格形成の関係、消費者の選択行動を支える表示や保証の仕組みなど、循環を可能にする制度的関係をどう構築するかが問われている。

ここでバイオミメティクスから得られる最も重要な示唆は、持続性とは、単に一つの機能を高めることではなく、多様な主体の関係を長く保てる仕組みをつくることにある。自然界の仕組みをそのまま制度に移すことはできない。しかし少なくとも、循環経済を「より多く回収し、より多く再資源化すること」とだけ捉えるのではなく、設計、情報、責任、利用、再利用を結びつける仕組みとして捉え直す視点は、日本の制度設計にとって重要である。

以上の三点を踏まえると、循環経済に必要なのは、個別制度の追加や処理工程の改善だけではない。第一に、循環性を設計段階から織り込むこと、第二に、物質循環を支える情報循環を制度の中核に位置づけること、第三に、多様な主体の関係性を再設計することが必要である。自然界は完全な模範ではないが、制約のなかで持続性を成立させているという意味で、循環経済を制度思想として再構成するための重要な参照枠を与える。日本の循環経済政策も、これまでの回収・再資源化中心の実務的蓄積を土台としつつ、今後は設計、情報、関係性を組み込んだより動的な制度設計へと進むことが求められるのである。

7.6 日本の循環経済政策に向けた提言

循環経済の成否は、個別のリサイクル制度や回収システムの整備だけでは決まらず、製品設計、情報基盤、人材育成、技術開発を含む全体構造をいかに組み立てるかにかかっている。そして、日本に求められるのは、従来の3R や資源循環政策を否定することではなく、その実務基盤の上に、より上流の設計要件、より広い情報基盤、それを担う教育体系、そしてそれらを具体的機能として社会に実装する技術開発を重ねていくことである。以下では、そのための提言として、第一に製品設計段階から循環性を制度に組み込むこと、第二に循環を支える情報基盤を制度的に整備すること、第三に循環経済を支える教育基盤を整備すること、第四に制度提言を支える重点技術開発課題を明確にする。

（1）製品設計段階から循環性を制度に組み込むこと

第一の提言は、製品設計段階から循環性を制度的に組み込む取り組みを、個別分野の実務や先行施策にとどめず、より横断的で評価可能な制度基盤へ発展させることである。日本の循環政策は長く、排出後の分別、回収、再資源化、適正処分の高度化を通じて成果を上げてきたが、設計段階からの循環性向上が全く手つかずであったわけではない。資源有効利用促進法の枠組みでは、再利用配慮設計や分別回収を容易にする表示などが位置づけられており、製品の省資源化・長寿命化、部品の再使用といった考え方も早くから盛り込まれてきた。

ただし、こうした取り組みは、個別分野や個別施策の中で進められてきた側面が強く、製品群を横断して共通に適用できる評価軸や政策手段として十分に体系化されているとは言いにくい。したがって必要なのは、「設計段階から循環性を考える」という発想を新たに提示することではなく、すでに存在する個別の取り組みを、個別製品・個別業界ごとの実務にとどめず、共通の評価軸と政策手段を備えた制度的枠組みへと再編することである。

この点で参考になるのが EU のエコデザイン政策である。ESPR は、従来のエネルギー効率中心の発想を超え、製品がより長く使え、修理しやすく、リサイクルしやすく、再生材をより多く含み、資源効率が高い方向へ要求を設定できる共通枠組みを整えた。これは、循環性を市場参入後の自主的努力目標ではなく、製品群ごとに具体化される市場要件の枠組みへと移しつつあることを意味する。

これに対し日本では、設計配慮の考え方自体は存在するものの、耐久性、修理可能性、部材交換性、解体容易性、再生材利用などを、幅広い製品群に共通する横断的な市場条件として整理しているとはまだ言いにくい。業界ごとの先進的取り組みはあるが、それを共通指標、調達基準、認証、情報開示、支援策へと結びつける制度基盤はなお発展途上にあるといえる。したがって今後の課題は、日本企業が持つ実装力や現場改善力を、個別企業の競争力にとどめず、制度的な優位へと転換することである。

その際に重要なのは、設計要求を抽象的な理念にとどめず、評価可能な形に翻訳することである。たとえば、耐久性、修理可能性、部材交換可能性、解体容易性、再生材利用比率などについて、共通の評価項目や指標を整備し、それを公共調達、認証制度、情報開示、税制・補助金などの支援策に結びつける必要がある。ここでの標準化は、規格への適合を求めるためだけのものではなく、何をもって循環性の高い設計とみなすかを社会的に共有するための基盤ともいえる。すなわち標準化は、受け身の適合手段ではなく、設計思想を産業と市場に実装する制度形成手段として位置づけ直されるべきである。

（2）循環を支える情報基盤を、国際性を踏まえ整備すること

第二の提言は、循環経済を支える情報基盤を、個別企業の自主的取り組みや部分的なデジタル化に委ねるのではなく、国際整合を前提とした社会的インフラとして整備することである。循環経済は、資源や材料の流れを管理すれば自動的に成立するものではなく、ライフサイクル全体を通じて情報が主体間で共有されて初めて、現実の社会システムとして機能する。したがって、デジタル製品情報、トレーサビリティ、相互運用性は、単なる補助的ツールではなく、循環経済の成立条件そのものとして位置づける必要がある。EU が ESPR の重要な柱として DPP を位置づけているのも、そのためである。

ここで重要なのは、日本が独自の閉じた仕様を構築することではない。むしろ必要なのは、EU の DPP を含む国際的な制度動向と接続可能な情報基盤を整えることである。EU 側では、DPP は永続的な製品識別子と結びつき、オープン標準に基づき、技術的・意味的・組織的な相互運用性を備えるべきものと整理されている。CIRPASS 標準化ロードマップでも、DPP は他の製品パスポートと相互運用可能であることが中核要件とされている。したがって日本が今後整備すべきなのは、「日本版」の独自仕様ではなく、日本の産業が国際市場においても情報を受け渡し、参照し、活用できる条件を備えた制度基盤である。そうでなければ、国内では機能しても、国際市場との接続においてはガラパゴス化するおそれがある。

その出発点として必要なのは、第一に、製品・部材・材料に関する循環性データの共通項目である。少なくとも、素材構成、再生材使用比率、有害物質情報、修理可能性、部材交換可能性、想定寿命、分解方法、再使用・再資源化方法などについて、業種横断で共有可能な基本項目を定める必要がある。現在は、各企業や業界ごとに保有する情報の形式や記述の細かさが異なるため、サプライチェーン全体で循環性を評価・活用しに

くい。したがって、まず何を記述し、何を共有するのかという共通語彙と最低限のデータセットを制度的に整備することが不可欠である。EU の DPP 議論でも、どの製品属性をどの程度詳しく記述するかが制度設計の中心論点となっている。

第二に必要なのは、製品・部材・材料を追跡するための共通識別子である。トレーサビリティを本当に機能させるためには、製品 ID、部材 ID、材料 ID、ロット情報などを一定のルールのもとで管理し、修理、交換、回収、再使用、再資源化の各段階で参照可能にする必要がある。製品の来歴が追えなければ、再使用の適否も、再資源化の効率化も、責任の所在の明確化も難しい。履歴の保持とは、単に記録を残すことではなく、次の利用や判断に接続可能な形で履歴を引き渡す仕組みを整えることである。EU の標準化要請案でも、DPP は製品を一意に識別できる共通の ID を基盤とすることが求められている。日本においても、製品や部材を追跡できるようにするためには、識別子の共通化が欠かせない。

第三に必要なのは、重点製品群から導入するデジタル製品情報基盤である。日本が直ちに全製品を対象とする必要はないが、少なくとも自動車、家電、蓄電池、建材、プラスチック製品など、循環性と国際競争力の双方で重要性の高い分野から、DPP に相当する仕組みを段階的に整備すべきである。EU では、製品の持続可能性、耐久性、修理可能性、再使用可能性、リサイクル性などに関する情報をライフサイクル全体で利用可能にする方向で制度化が進んでいる。したがって日本でも、重点分野ごとに情報基盤を整備しなければ、国内資源循環の高度化だけでなく、国際市場との整合性確保においても後れを取る可能性がある。

第四に必要なのは、企業・業種・制度間で情報を接続するデータ交換の仕様である。相互運用性とは、単に複数のデータが存在することではなく、それらが実際に連結し、異なるシステム間で受け渡し可能であることを意味する。そのためには、データフォーマット、用語定義、API や交換仕様、更新頻度、アクセス権限、機密情報との両立といったルールを整備しなければならない。ここが整わなければ、企業ごとに情報を保有していても、循環経済全体としては情報が断片化した状態にとどまる。欧州委員会や CIRPASS も、情報を技術的に接続できるだけでなく、同じ意味で理解し、運用ルールの面でも連携できることの重要性を繰り返し強調している。

第五に必要なのは、情報基盤を運用する制度とガバナンスである。データ項目の設定、更新、アクセス、認証、費用負担のルールが定まらなければ、情報基盤は機能しない。特に、中小企業への対応、第三者認証、行政と業界団体の役割分担、国際標準との整合が重要である。

また、標準化は既存規格への適合にとどまるものではなく、何を記述し、どのように情報を接続するかを共有するための共通言語づくりである。したがって、日本も EU の DPP と同様に、国内最適化ではなく国際接続性を前提とした標準化を進める必要がある。

以上を踏まえると、日本が整備すべきなのは、国内で閉じた「日本版」製品パスポートではなく、EU を含む国際的な制度動向と整合しうる循環情報インフラである。その中核をなすのは、共通データ項目、共通識別子、重点分野から始めるデジタル製品情報基盤、相互運用可能な交換仕様、そしてそれを支えるガバナンスである。循環経済における情報基盤の整備とは、単なるデジタル化ではなく、日本の製品・材料・部材に関する情報を国際市場においても活用可能な形で流通させる条件を整えることであり、その意味で、循環経済政策の周辺的課題ではなく、競争力と制度接続性を左右する根幹的課題として位置づけられるべきである。

(3)循環経済を支える教育基盤を整備すること

① 循環経済教育が必要な理由

第三の提言は、循環経済を支える教育基盤を体系的に整備することである。これまで日本では、3R や分別、リサイクルに関する教育や啓発は一定の蓄積を持ってきたが、循環経済を、設計、利用、回収、地域連携まで

を含む全体構造として学ぶ教育は、十分に体系化されているとはいえない。今後必要なのは、循環経済を単なる廃棄物対策としてではなく、資源の選択から設計、使用、修理、再使用、再資源化に至るまでをつなぐ社会・産業システムとして理解し、それを設計や事業に翻訳できる人材を育成することである。

この点で参考になるのが、フランスにおける循環経済の整理である。フランスでは循環経済を、「供給」「需要・消費者行動」「廃棄物管理」という3つの行動領域の下で、持続可能な調達、エコデザイン、産業・地域共生、機能経済、責任ある消費、利用期間の延長、リサイクルの7つの柱によって捉えている。これは、循環経済を単なるリサイクル政策ではなく、調達、設計、事業、消費、回収までを一体で考える枠組みとして整理する点で有効である。

もっとも、日本で教育に活用するには、この枠組みをそのまま導入するよりも、日本の自然観、生活感覚、ものづくり文化に即して再構成する方が有効である。日本では、自然との関係は「支配」よりも「折り合い」「手入れ」「使い切る」「次へ渡す」といった感覚と結びついている。また、産業面でも、品質管理、長寿命化設計、修理、現場改善、資源回収といった分野で実務的な蓄積がある。したがって、日本版の循環経済教育は、フランス型の制度的整理を参照しつつ、より行動に引きつけた形に翻訳する必要がある。

② 日本版「4つの行動領域」と「9つの柱」

その際に重要なのは、行動領域や柱を感覚的に並べるのではなく、資源・製品のライフサイクルに沿って、各段階で循環を成立させるために必要な機能を抽出することである。すなわち、循環経済の教育内容は、「どの段階で、何をしなければ循環が成り立たないのか」という観点から構成されるべきである。この考え方に立てば、日本版の循環経済教育は、「えらぶ・つくる・つかう・もどす」の4つの行動領域として整理することができる。そして、それぞれの領域の下に、循環を成立させるために不可欠な機能を柱として配置することで、教育内容の論理を明確にすることができる。

第一の行動領域は、「えらぶ」である。これは、循環しやすい入口条件を整える領域であり、何を資源として選び、どのような材料を使うかに関わる。ここでは2つの柱が必要となる。第一は、「循環配慮型調達」である。再生材、再生可能資源、地域資源、低環境負荷材料などを選ぶことによって、入口段階から循環性を高める機能である。第二は、「循環可能な素材選択」である。混合しすぎない、分離しやすい、再使用・再資源化しやすい素材を選ぶことによって、後工程の循環を可能にする機能である。前者が「何を取り入れるか」に関する機能であるのに対し、後者は「それを将来どう戻せる形にしておくか」に関する機能であり、役割が異なるため独立した柱として位置づけられる。

第二の行動領域は、「つくる」である。これは、循環性を製品や事業の中に実装する領域であり、設計、製造、価値提供のあり方を含む。ここでは3つの柱が必要となる。第一は、「長寿命・修理可能設計」である。これは、耐久性、修理可能性、部材交換性、分解性などを製品設計に組み込み、長く使い続けられる物理的条件を整える機能である。第二は、「維持管理しやすいものづくり」である。手入れ、保守、更新、状態確認をしやすくし、長く使える条件を製造段階で整える機能である。第三は、「循環型価値提供」である。製品を売り切るのではなく、サービス、保守、共有、利用価値の提供へと事業モデルを転換する機能である。ここでは、物理的な設計、維持管理の運用性、事業モデルという異なる層の機能が必要となるため、三つの柱に分けて整理することが妥当である。

第三の行動領域は、「つかう」である。これは、価値をできるだけ長く維持する領域であり、利用者の行動と、それを支える社会的仕組みの両方を含む。ここでは2つの柱が必要となる。第一は、「責任ある利用と選択」である。長く使えるもの、修理しやすいもの、循環しやすいものを選び、使い方を工夫する機能である。第二は、「価値を延ばす仕組み」である。これは、修理、再販売、再使用、共有、アップグレードなどを通じて、設計段階

で確保された循環性を実際の利用の中で活かし、製品や機能の価値を長く維持する仕組みである。前者は利用者の判断と行動に関わるのに対し、後者はその行動を支える制度や市場の仕組みに関わるため、別の柱として整理されるべきである。

第四の行動領域は、「もどす」である。これは、役目を終えた製品や材料を次の価値へ接続する領域であり、回収・再資源化だけでなく、主体間連携も含む。ここでは2つの柱が必要となる。第一は、「高品質な回収・再資源化」である。回収、選別、再使用、再製造、再資源化を適切に行い、できるだけ高い価値を保って戻す機能である。第二は、「地域・産業間連携による循環」である。単一企業内で完結せず、地域や産業のあいだで資源や副産物をつなぎ直し、循環を成立させる機能である。前者が直接的な回収・再資源化の機能であるのに対し、後者は複数主体をつなぐネットワーク機能であり、循環経済を広域に成立させるために不可欠である。

以上を整理すると、日本版の4つの行動領域と9つの柱は、循環経済を感覚的に分解したものではなく、ライフサイクルの各段階で循環を成立させるために必要な機能を抽出して整理したものである。すなわち、「えらぶ」は入口条件を整える領域、「つくる」は循環性を製品と事業に実装する領域、「つかう」は価値を長く維持する領域、「もどす」は次の価値へ接続する領域であり、その下に必要な機能を柱として配置している。このように整理することで、循環経済を教育内容に落とし込みやすくなるだけでなく、各主体が自らの役割を把握しやすくなる。

また、これらの枠組みは教育の場面ごとに重点の置き方を変えることができる。工学・デザイン教育では、「えらぶ」と「つくる」を中心に、材料選択、循環設計、長寿命化、循環型価値提供まで学ぶことができる。経営・事業教育では、「つくる」と「つかう」を中心に、サービス化、利用期間延長、責任ある利用を扱うことができる。社会教育や消費者教育では、「つかう」と「もどす」を中心に、選び方、使い継ぎ方、分けて戻す行動を学ぶことができる。重要なのは、循環経済を一部の専門家だけの課題ではなく、立場ごとに異なる役割を持つ行動体系として教えることである。

そして、これらの枠組みは、日本人の「もったいない」「手入れする」「使い切る」「次に渡す」という自然観や生活感覚を、循環経済の設計・事業・教育へ翻訳するための基盤となりうる。教育基盤の整備は、循環経済政策の周辺的課題ではなく、設計要件と情報基盤を現実に機能させるための基盤的課題として位置づけられるべきである。

（4）制度提言を支える新たな重点技術開発課題を明確にすること

第四の提言は、循環経済の制度設計を実効あるものとするために、それを支える重点技術開発課題を明確に位置づけることである。先に述べた三つの提言はいずれも重要であるが、それらが現実の産業や社会資本の中で機能するためには、具体的にどのような技術を開発し、どのような機能を社会に実装していくかが示されなければならない。循環経済は制度だけで成立するものではなく、制度が求める性能や条件を支える技術群を伴って初めて社会実装に至る。

その際、日本において特に重視すべきなのは、循環経済を単なる資源循環や再資源化の問題としてではなく、国土強靭化、生態系再生、地域産業の持続性を同時に支える技術体系として位置づけることである。近年の欧州でも、循環経済は競争力政策や資源安全保障政策と結びつくだけでなく、バイオエコノミーや自然再生の文脈と接続されつつある。欧州委員会の新しいバイオエコノミー戦略は、競争力や雇用創出に加え、自然を損なわずに生物資源を活用し、食料、材料、産業、生態系サービスを一体で支えることを掲げている。Horizon Europe 2026-2027 でも、生態系の回復や自然に基づく解決策が、気候変動対応や災害リスク低減、社会のレジリエンス向上に資する研究開発課題として位置づけられている。

このことは、循環経済を支える技術開発の発想自体を拡張すべきことを示している。従来の循環技術開発は、再資源化効率の向上や廃棄物処理技術の高度化に重点が置かれがちであった。しかし今後求められるのは、自然の機能を人工的に単純代替する技術ではなく、自然の機能が持続的に発揮される条件を支え、人間社会のシステムと生態系の機能を両立させる技術である。これは、バイオミメティクスを「生物の形態や機能の模倣」にとどめず、「生態系が持つ再生力・緩衝力・支援機能を工学的に支える技術」へと拡張する考え方でもある。

第一に重点化すべきは、維持管理負担を低減する低メンテナンス・自己維持機能をもつ材料・表面技術である。具体的には、防汚、防氷、耐食、耐摩耗、付着抑制、自己修復などの機能をもつ材料・表面技術が挙げられる。これらは、単に材料性能を向上させる技術ではなく、平時の点検・補修頻度を減らし、災害時にも機能低下を起こしにくくすることで、インフラや設備のレジリエンスを高める技術である。欧州でも、自己修復コンクリート、自己修復舗装、自己洗浄表面、先端建設材料などを通じて、耐久性向上と維持管理負担低減を両立させる方向が進められている。日本でも、国土強靭化の文脈と接続しつつ、完全な「メンテナンスフリー」ではなく、必要な維持管理を最小限にしつつ長期にわたり性能を維持できる低メンテナンス化を重点課題として位置づけるべきである。

第二に重点化すべきは、循環設計を加速する接合・診断・再使用判定技術である。循環経済において、分解・交換・再使用を前提とした設計の重要性はすでに広く認識されている。したがって、今後重点化すべきなのは、その方向を一般論として繰り返すことではなく、循環設計を実際に成立しやすくする加速手段を技術として整えることである。具体的には、部材を傷めずに分離できる可逆接合技術、交換時期を適切に判断するための状態診断・寿命予測技術、再使用可能性を判定する評価技術、異なる製品間での部材利用を可能にするモジュール互換化技術などが重要となる。これらは、循環設計を理念にとどめず、実際の製品・構造物の更新、再使用、再資源化へ結びつけるための加速技術群として位置づけられるべきである。

第三に重点化すべきは、生態系の機能を代替するのではなく、支援・回復する技術である。ここで重要なのは、人工物によって自然を置き換える発想から、自然が本来持つ機能を維持しやすくする条件を整える発想への転換である。たとえば、農業や都市緑地の分野では、送粉機能を人工的に代替する技術だけでなく、送粉者が活動できる生息環境、営巣条件、餌資源、景観構造を整える技術が重要となる。欧州では、2025 年に採択された花粉媒介生物回復取組を支援するモニタリング（EU Pollinator Monitoring Scheme）[54]のもとで花粉媒介者の回復に向けた共通監視基盤の整備が進められており、RestPoll[55]でも野生送粉者の生息地回復を支える具体的手法の開発が進められている。日本においても、水循環、土壌機能、湿地浄化、沿岸生態系、送粉系など、生態系の働きを支援・回復する技術を、循環経済と国土強靭化をつなぐ重点分野として位置づけるべきである。

第四に重点化すべきは、地域資源と生態系サービスを活かすバイオエコノミー技術である。日本は、建設副産物、農林水産系副産物、未利用バイオマス、使用済み製品由来材料など、多様な循環資源を保有しているが、それらを高付加価値に活用し、地域経済と生態系保全を両立させる技術基盤はなお十分ではない。今後は、再生材やバイオ由来材料の性能安定化、地域資源の高付加価値利用、分散型バイオマス利用、生態系サービスと結びついた資源活用などを可能にする技術を重点化すべきである。欧州委員会の新バイオエコノミー戦略でも、バイオエコノミーは単なるバイオマス利用ではなく、食料、材料、産業、生態系サービスを統合する

---

[54] European Commission, https://environment.ec.europa.eu/news/better-monitoring-support-restoration-eu-pollinators-2025-11-26_en.

[55] RestPoll, https://restpoll.eu/.

枠組みとして提示されている。日本においても、地域循環と資源循環に資する再生利用技術を、より広く生態系を基盤とするバイオエコノミー技術として再定義することが有効である。

以上の四つの技術群は、相互に独立したものではない。低メンテナンス・自己維持機能をもつ材料・表面技術は、循環設計技術や状態把握技術と結びつくことで、はじめて実効性を持つ。循環設計を加速する接合・診断・再使用判定技術は、情報基盤やトレーサビリティと連動して、再使用や再資源化の判断を支える。生態系の機能を支援・回復する技術は、地域資源を活かすバイオエコノミー技術と結びつくことで、地域循環と自然再生の両立を可能にする。したがって、これらは個別の研究課題としてではなく、循環経済の制度基盤を支える重点技術群として一体的に育成される必要がある。

このように、今後重点化すべき技術開発は、自然の機能を人工的に置き換える技術ではなく、自然の機能が持続的に維持され、活かされる条件を支え、循環経済、国土強靭化、生態系再生を同時に進める技術群として捉える必要がある。

7.7 おわりに

これまで、EU と日本の制度設計思想を比較し、EU では循環性が製品設計、市場形成、情報基盤、ルール形成を通じて産業システム全体に埋め込まれる方向が強いのに対し、日本では3R や循環型社会形成を基盤として、分別、回収、再資源化、適正処分の実務的蓄積の上に制度が形成されてきたことを示した。あわせて、これを補う視点としてバイオミメティクスを取り上げ、循環は回収ではなく設計から始まること、循環を支えるのは物質循環だけでなく情報循環でもあること、さらにそれらを社会に根づかせるには教育と実装の原理への翻訳が必要であることを論じた。

これらに基づく四つの提言は、互いに独立したものではない。製品設計段階から循環性を組み込むことは、情報基盤なしには実効性を持たず、情報基盤もまた、それを理解し運用する人材がいなければ機能しにくい。さらに、それらを社会や産業に根づかせるためには、具体的な技術開発課題が明確でなければならない。日本の循環経済政策に求められるのは、従来の3R や資源循環の成果の上に、設計、情報、教育、技術という四つの層を重ねることである。

この転換において、標準化はなお重要である。ただし、その役割は、規格適合を求める受動的手段としてではなく、設計要求や情報基盤を共通化し、産業全体の競争条件を形成する能動的手段として再認識されるべきである。日本が今後目指すべきなのは、回収・再資源化に強い国から、循環を前提に設計し、それを支える情報基盤を整え、担い手となる人材を育て、必要な技術を社会に実装できる国への転換である。そのためには、制度の細部にとどまらず、循環経済を支える社会と産業の全体像を描き直すことが不可欠である。

循環経済への移行における初期アプローチについて

8. 循環経済への移行をいかに促すか

杉山 正和

循環経済への移行を促すためには、以下の取り組みが不可欠であると考える。

- ✓ 循環の効果やそれによる地球の持続可能性への貢献を定量的に記述する指標の制定
- ✓ その指標を活用して循環経済への移行を促す法経済制度の整備
- ✓ 循環経済を自分事として感じ、経済原理よりも美的感覚に駆動されて自発的に循環を促す行動を選択する市民の育成

これらは逐次的に取り組むというよりも、互いに行き来しながらそれぞれの取り組みを深化させていくべきものと考えられる。それぞれについて総論を展開する前に、いくつかの例を挙げて、循環経済へのアプローチや、循環経済が社会に浸透するための諸課題について論じたい。

最初に、循環経済を最も身近に感じられる例として有機農法を取り上げる。次に、究極の物質循環を実現させようとするあまり却って環境負荷を増やしかねない、すなわち局所だけでなく全体を俯瞰して技術開発を進める必要が顕著な例としてカーボンリサイクルを取り上げる。最後に、社会全体が循環経済へと移行しない限り、ある一定領域だけで持続可能性の高いシステムを組み上げることが難しい例として、大学キャンパスからの二酸化炭素排出削減の取り組みを紹介する。これらのケースに関する考察を踏まえて、最後に循環経済への移行を促す方策について考えを述べたい。

8.1 ケース1：循環を五感で感じさせる有機農法

循環経済を考えるための第一のケーススタディーとして、すでに社会に浸透しつつある有機農法を取り上げる(図 8.1)。

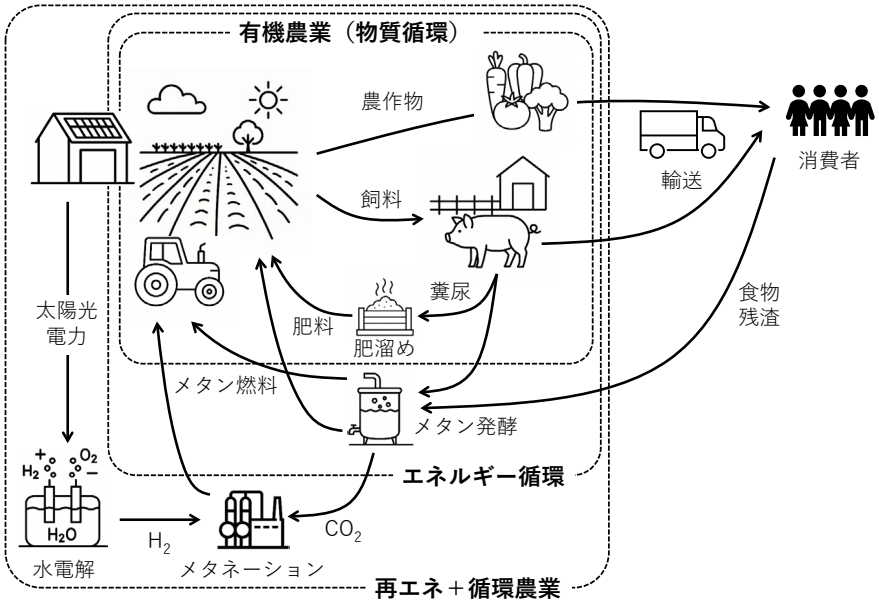


図 8.1 循環経済のモデルとしての有機農法

(1) 可視化と「物語り」構成の容易さが循環経済の好事例をつくる

有機農法はすでに社会に浸透し、消費者は有機野菜やそれを用いた製品・料理に付加価値を認め、通常の産品に比べてより多くの対価を払っている。有機農法は、植物の成長に不可欠な窒素・リンなどの元素に関する物質循環のサイクルが農場においてコンパクトに展開され、可視化が容易な形でまとまったものであると考えられる。もちろん、農場と消費者との間には距離的、時間的な断絶があるので、生産過程を可視化し生産者と消費者をつなぐ仕組みが有機農法に付加価値をもたらすために必須である。そのための工夫としては、農家が消費者に直接産品を販売するとか、デジタル技術による産品生産過程のトレーサビリティ確保などが挙げられる。このような取り組みは必要であるものの、人間にとってもっとも重要な食に循環の価値を乗せやすく、また素材から料理に至る過程で更に価値を付加して五感に訴える価値創造が比較的容易である。したがって、有機農法は循環を既存の経済の仕組みに沿って普及可能であるという点において、最も身近で実現しやすい循環経済の好事例であるといえよう。

(2) 循環の範囲は農場だけにとどまらない

有機農法は循環経済を可視化して普及の先鋒となる好事例であるが、一方で、エネルギーの持続可能性の観点からは、一般的な有機農法は決して理想的とはいえない。後に続く補足で詳しく説明するが、エネルギーの循環利用は熱力学によれば不可能であり、エネルギーに関して循環に準じる持続可能性を求めるならば、太陽光に代表される再生可能エネルギーを利用することになる。農作業に用いるトラクターなどの農業機械は多くの場合に化石燃料を用いているし、その後産品を消費者に届ける過程にある出荷、輸送の際にも、化石燃料や、化石燃料由来の電力が用いられている。農場における物質循環だけでなく、エネルギー利用に伴う地球への負荷、さらには肥料の過剰投与に伴う環境へのリン・窒素の蓄積(地球規模での物質循環の問題)など、農業さらには食糧生産に伴う地球環境への負荷を極限まで低減するには、マルチな空間スケールにおいて循環や環境負荷を考える必要がある。具体的に小さい領域から大きな空間へと例示すれば、農場そのもの、生産者と消費者が含まれる地域、リン・窒素など農業の影響が伝搬する領域(国に近いスケール)、そして化石燃料の利用に伴う CO2 濃度の上昇と温暖化が起こる地球全体と、まさにマルチスケールで複眼的な思考が循環経済の社会実装には不可欠となる。

(3) 循環の境界(バウンダリー)を拡張して共感を得ることの難しさ

一方で、有機農法の価値を消費者に訴求するための「物語づくり」のためには、循環が可視化されやすい、すなわち狭い領域で循環が完結することが望ましい。

「今の私たち」から空間的、時間的に人々の想像力を拡張して、時間的にも空間的にも遠くのことまで勘案した消費行動や価値判断を人々が行えるようになることが、地球の持続可能性を確保するために本質的に重要であると考えられる。しかしながら、現在の貨幣経済のもとで、このような理想的な状態に到達することは非常に難しい。単なる貨幣価値を超えて、豊かな想像力に根差した「美意識」を価値軸にして、未来のことや地球全体のことを考えて消費行動をとる人々をいかに増やしていくか、循環経済の定着にとって本質的に重要な課題であると筆者は考える。

(4) 循環の境界拡張には科学技術のフロンティアが満載

有機農法の技術とフィールドを拡張して、物質循環の促進だけでなく副生物の有効利用を図ることは、科学技術の観点からはワクワクする挑戦が満載のターゲットである。このような挑戦の例を、システムの境界を拡張する形で3つ紹介する。

① 廃棄物からエネルギーを得る:メタン発酵

農場に併設された畜産場から出る糞尿から、メタン発酵により農機具の燃料や発電の燃料となるメタンを生産し、農畜産をエネルギー循環型に近づける試みは少なからず行われている。発酵の結果として残る消化液には、堆肥と同様に植物の成長に不可欠な成分が含まれており、肥料として土壌に撒くことで農業の物質循環サイクルを完結できる。メタン発酵の原料として、畜産で生じる糞尿だけでなく、消費者から回収する食物残渣も含めれば、さらに循環の輪を拡大できる。ドイツではこのような農畜産と組み合わせたメタン発酵が大規模に行われており、生成されるバイオ由来のメタンは、農畜産のエネルギーとして用いられるだけでなく、都市ガスに混ぜられて市民生活のエネルギーの一部として活用されている例もある。

② 製造と消費の量的バランスを担保する:高効率な再生可能エネルギー源の利用

太陽光や水力、風力などの再エネ発電は、物質循環に加えて農畜産に用いるエネルギーの持続可能性を高めるために必須のアイテムである。上述のように、メタン発酵から得られる燃料メタンが農畜産に必要なエネルギーを供給できるから、再エネ発電を導入せずともエネルギーまで含めた循環を確立できるように見えるかもしれない。しかし、メタン発酵の進行は遅いため、農畜産場で必要となるエネルギー需要の全量をメタン発酵から得るためには大量の糞尿が必要となり、その場で得られる糞尿だけでは不足する可能性がある。太陽光発電には多量の面積を必要とするが、それでも植物の光合成に比べると太陽光からエネルギー源(電力)を取り出す効率は植物よりも数桁も高く、持続可能なエネルギーシステムを農畜産場に展開するためには最も効率の高い手段であるといえる。太陽電池を十分な量導入するためには農作業小屋や畜産小屋の屋根だけでは不足するので、農場の通路などに垂直設置型の太陽電池を導入すればよい。しかし、太陽電池には太陽が照る間しか発電できないという致命的な欠点があるため、大規模な蓄電池を導入するか、燃料による火力発電と組み合わせて相補的に電力供給するシステムが必要となる。この相補的な火力発電の燃料として、メタン発酵から得られるメタンを活用できる。また、つねに大きなエネルギー出力を必要とする農機をすべて電動化することは必ずしも容易ではなく、メタンを含めた燃料が農機のエネルギー源として不可欠になる。

③ 一見すると別々なシステムを統合する

ここで、メタン発酵からはメタンだけでなく CO2 が産出されることに注目したい。これは、農作物が光合成の際に大気中から吸収した CO2 由来の炭素が、発酵により再度 CO2 として高濃度で放出されたものである。副産物ではあるが、農場の自然のメカニズムによって大気から回収・濃縮された CO2 であり、炭素原料として有効活用すべきである。メタンと CO2 が混じった気体と水素を触媒反応器に導入すると、メタンはそのままにして、CO2 だけが水素と反応してメタンになり、結果として濃度 100%近いメタンガスが得られるメタネーションプロセスがすでに開発されている。ここで必要となる水素は、太陽電池で発電した電力を用いた水の電気分解により製造することができる。このように、太陽光発電と農畜産という一見別々のシステムが、物質循環を促進し持続可能性を高めるために統合され、より包括的なシステムを構成できる可能性がある。

(5) 複雑で大規模な循環系を可視化し評価する指標の必要性

上述のように拡張されたシステムは、より高度な循環やエネルギーの有効利用を可能にする観点、言い換えれば技術者目線からは理想に近づいたものであるが、理想が実現される度合いをどのように評価するかが難問となる。裏庭でとれた野菜や肉で暮らす局所的自立型システムでは、物質循環を可視化することは比較的容易である。そこから派生して再生可能エネルギー源をシステムに組み入れたり、生産者と消費者が離れ、かつ多数の生産・消費者が複雑に結びつくシステムになったりすると、循環の度合いや環境負荷の低減度合いを直観的に把握するのは至難の業となり、なんらかの定量指標を導入する必要性に迫られる。

循環経済の指標として何が適切なのかについて明確に答えることは難しい。エネルギーの持続可能性や地球温暖化対策の観点では、商品の製造から運搬過程（場合によっては廃棄過程までを含む）において排出されたCO2の総量を定量指標にすることが多い。しかし、地球の持続可能性を高めるためには、大気中のCO2の濃度上昇を抑止するだけでなく、森林の保全などにより生物多様性を担保するなど複数の側面での取り組みが必要であり、それらは互いに競合関係となる場合もある。たとえば、日本国内に太陽光発電を大規模に導入するためには山を裸にして太陽電池で覆うことも貢献するが、その結果として山の保水能力が低下して災害リスクが増えたり、森の生態系が破壊されて動物種が絶滅したりする危険がある。このように、循環経済の上位目標であると考えられる地球の持続可能性向上のためには、複数の尺度による評価を導入し、場合によっては尺度同士のトレードオフ関係にも配慮しながら、様々な取り組みの効果を可視化していく必要がある。一方で、評価尺度が複雑になるほど、取り組みの価値を消費者に訴求するための「物語づくり」は難しくなり、あるべき社会への移行策を実装しにくくなるというジレンマも存在する。

8.2 ケース2：カーボンリサイクル

大気中に放散されたCO2を回収して燃料や化学品の原料となる化学物質に転換するカーボンリサイクルは、究極の炭素循環技術といえる。植物の光合成は自然が持つカーボンリサイクル機構だが、その反応速度は非常に遅いため、地球上に現在存在している植物により人類が現在排出しているCO2を全量リサイクルすることはできない。そこで、科学を駆使した人工的なカーボンリサイクル技術の開発が進められている。

(1) 技術的には高効率なカーボンリサイクルは可能

CO2は炭素が最も酸化された、いわば炭素が化学的にもっともエネルギーを失った状態である。この炭素を化学的に活性な還元状態に変化させるためには、外部からのエネルギー投入が必要である。光合成においては、葉が吸収する太陽光のエネルギーが電子のエネルギーとなり、いくつかの化学物質を経て植物に吸収されたCO2と水に伝達され、還元状態である糖類が生成される。

以上の光合成によるCO2から糖類への反応速度を遅くしているのは、葉の中での高エネルギーの電子生成過程である。言い換えれば、葉の太陽電池としてのエネルギー変換効率が低いためである。この問題を解決するためには、光合成の機能を構成する人工的な要素技術、すなわち、大気からのCO2回収、太陽光発電、電力によるCO2と水からの有用炭化水素化合物製造（現状では、水電解による水素製造と、水素とCO2の触媒反応による炭化水素製造の組み合わせで実現）を組み合わせたカーボンリサイクルシステムを構成すればよい（図8.2）。すでにそれぞれの要素技術は実用に近いレベルに到達しているし（ただし、水素とCO2の触媒反応は未だ技術水準向上の途上にある）、とくに太陽光発電のエネルギー変換効率は葉による発電効率を大きく上回っている。したがって、人工的な要素プロセスの組み合わせにより、光合成の効率を上回るカーボンリサイクルシステムを構築することが現在でも可能である。（ただし、光合成により得られる糖類を人工的なシステムで製造することは困難であるなど、複雑な炭化水素を選択性よく得る点では光合成は圧倒的優位性を誇る。）

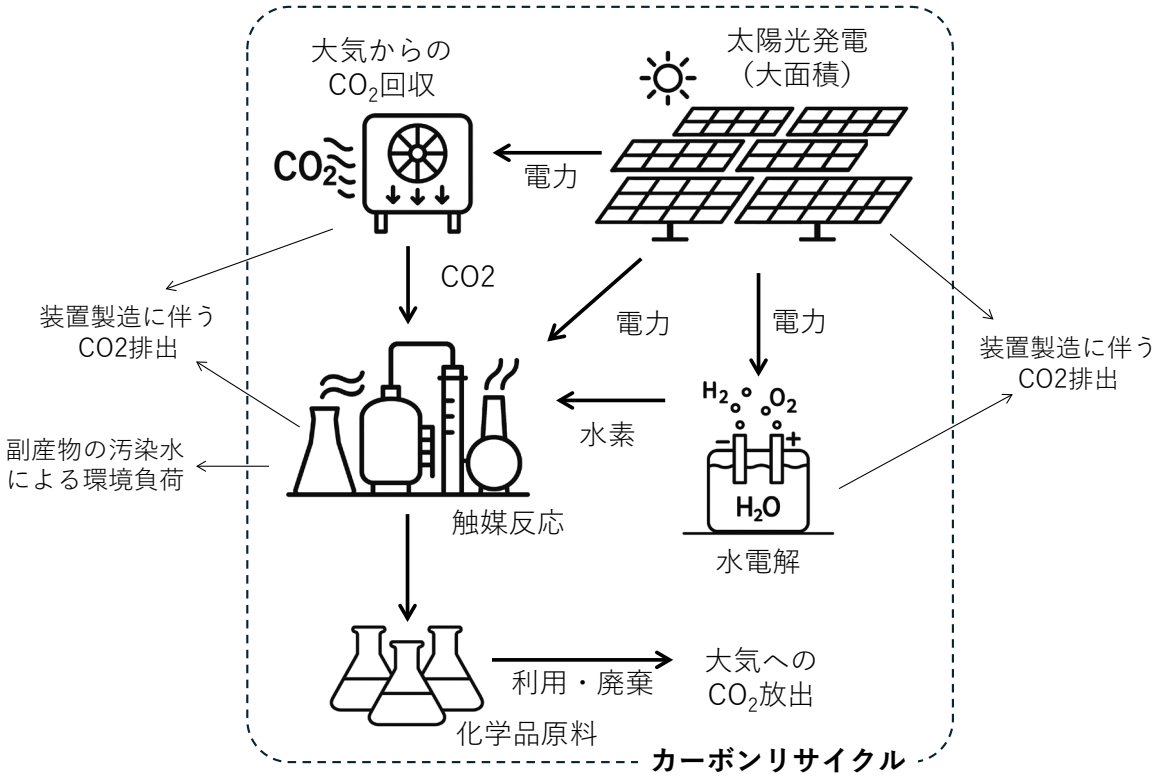


図 8.2 人工的なプロセスを組み合わせたカーボンリサイクルシステム

(2) その実現には膨大なエネルギーが必要

光合成に比べて高効率化された人工的カーボンリサイクルシステムだが、CO2 のリサイクルに要する電力は膨大である。例として、CO2 を水と反応させて化学品の基礎原料であるエチレンを製造するプロセスを考える。図 8.2 に示したシステムでは、この反応を進めるために必要なエネルギーは太陽光発電により得られる。CO2 と水からエチレンを製造する反応について、熱力学から導かれる必要最小限のエネルギー投入量に対して 3 倍のエネルギーが必要だと仮定すると、年間 1 万トンの CO2 をリサイクルしてエチレンを製造するためには、約 100 MW の太陽光発電が必要になる。そのために必要な面積は、少なくとも 100 ha となる。日本から現在排出される CO2 年間約 10 億トンをリサイクルするためには、10 TW（テラワット）の太陽光発電、面積にして 1 千万 ha（日本の陸地面積の約 1/4）以上が必要となる。以上は CO2 の還元反応に必要なエネルギーだが、これに追加して大気中の希薄な CO2 を 100%近い濃度まで濃縮するためのエネルギーも、還元工程ほど大きくないものの無視できない。これら CO2 の還元工程、回収・濃縮工程どちらについても、現状想定される実際のシステムが消費するエネルギーは熱力学的な理論値に比べて 3 倍では済まないほどに大きいため、1 千万 ha よりも相当に多くの面積を太陽光発電に使わない限り、現在日本から排出される量の CO2 を全量カーボンリサイクルすることは不可能となる。

(3) カーボンリサイクルにより大気中の CO2 濃度が増える？

CO2 を大気から回収して、太陽光のエネルギーを投入して化学品原料の炭化水素を製造し、化学品が廃棄される際には焼却処分されて CO2 として大気に帰るという完全な CO2 リサイクルのループを図 8.2 のように構築することができる。しかし、このシステムを構成する機器を製造する際にも CO2 が排出されることを忘れては

ならない。システムの中で機器の体積が圧倒的に大きいのは太陽電池なので、その製造工程の CO2 排出のみに注目する。発電容量 10 kW の多結晶シリコン太陽電池を製造する際の CO2 排出は約 10 トンとされている[56]。年間 1 万トンの CO2 をリサイクルしてエチレンを製造するために必要な 100 MW の太陽電池を製造する際には、約 10 万トンの CO2 が排出される。太陽電池の寿命を 30 年と仮定すると、1 年あたり 0.33 万トンの CO2 が太陽光発電由来で排出される計算となる。太陽電池の製造だけでなく発電プラントの建設等によっても CO2 は発生するので、実際には発電由来の CO2 排出はさらに多くなる。また、他の装置についても同様に製造・建設時などに CO2 が排出される(といっても、体積の関係から設備由来の CO2 排出の大半は太陽光発電由来であると考えられる)。このように、CO2 をリサイクルするためには、追加的な CO2 排出が不可避となる。

CO2 のリサイクルプロセスにおいて最もエネルギーを要する CO2 の還元工程において、熱力学から導かれる必要最小限値に対して 3 倍のエネルギー投入で済めば、リサイクルする CO2 の量に対して半分以下の CO2 排出で済む。それでもリサイクルによって大気中の CO2 濃度が減るわけではないのに、リサイクルされる CO2 の量に匹敵するほどの CO2 がシステムの運転により排出されるというのは、一見すると本末転倒のように感じられる。したがって、カーボンニュートラルを実現するための第一の技術選択肢としてカーボンリサイクルに頼るのは間違っている。化学品原料に関しては、廃棄される製品を新規な化学品の原料として直接リサイクルする方が遥かに好ましい施策である。ただし、化学品原料の 100%をリサイクルで賄うことは不可能であり、新規化学品の原料として炭素をどこからか確保しなければならない際には、化石資源からではなくカーボンリサイクルにより大気中の CO2 から化学品の炭素を得る方が、カーボンニュートラルの実現に近づくことになる。

もう一点、図 8.2 のシステムについてコメントすべきは、CO2 と水を反応させる化学反応から生じる副生物の水である。この水には他の生成物である炭化水素が混入しているので、水環境を汚染しないような廃棄物処理が必須となる。

このように、一見して完璧な循環が成り立つシステムを構築できたとしても、そのシステムを製造・建設して稼働させる際の環境への負荷を包括的に考える必要がある。最悪の場合には、物質循環を成立させる効果よりも、そのシステムを稼働する際の環境への悪影響の方が大きいという本末転倒の事態にもなりかねない。

(4) 新規技術の有用性は未来へと時間軸を投影したライフサイクルアセスメントに基づいて判断されるべき

前節で述べたように、人工的なカーボンリサイクルシステムは、その製造・建設や稼働に伴う CO2 排出が多く、システム全体としての環境負荷を考えると存立意義が問われかねない。このようなシステム全体としての物質循環や環境負荷を定量的に評価するフレームワークとしてライフサイクルアセスメント(LCA)が研究され、実際に様々なシステムの評価に活用されている。

LCA を実施するには、システムを構成する要素プロセスに関する物質およびエネルギーの入出力、装置の構成材料やサイズといったシステムに関する詳細情報が必要であり、LCA を行うためには先ずシステムの詳細設計が完了している必要がある。その他にも、システムの構成要素を製造する際の入出力(原料の量、電力や熱エネルギーの投入量など)、さらにその原料を製造する際に用いられる物質やエネルギー投入に関する膨大なデータが必要であり、包括的なデータベースを整備して信頼性の高い評価を可能にすることに LCA の研究者は尽力してきた。

これらの詳細な情報を得るためには、「現在稼働可能な」システムを扱う必要があり、LCA の対象は過去から現在までのシステムに限定されがちである。一方で、前節で例示したカーボンリサイクルシステムは、現在でも

[56] 環境省　平成 24 年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務 報告書

パイロットプラントは構築できるものの、システムの核となる要素プロセスに関しては、将来に向けてエネルギー利用効率や生成物の収率などの性能をさらに向上させるための研究開発が精力的に続けられている。したがって、システムの設計（とくに CO2 を有用化学品に還元するためのエネルギー投入量）は将来に向けて大きく改良されるべきものとなっている。また、前節においてカーボンリサイクルシステムの稼働に関する CO2 排出の主要因とされた太陽電池の製造に伴う CO2 排出の大半は、主に発電材料であるシリコンを得るために珪砂と炭素を反応させる際の CO2 排出であり、次いで構造材料であるアルミニウムの精錬工程による CO2 排出、さらに製造工程全般のエネルギー投入に化石燃料を用いていることに由来している。珪砂の還元剤と製造工程の高温熱源用燃料は、太陽光と水から製造されるグリーン水素で賄うことが原理的には可能であり、アルミニウムの精錬にも再エネ電力と非炭素陽極を用いた脱炭素技術が開発されている。したがって、将来的には太陽電池の製造に伴う CO2 排出を大幅に減じることが技術的には見通せる。

このように、開発中の技術に関しては、将来に向けて CO2 排出量をはじめとする環境負荷がどう改善されるかという観点で、未来志向の LCA を適用していくことが極めて重要である。そうでないと、将来のカーボンニュートラル実現や地球の持続可能性向上に大きく貢献しうる技術が、開発途上のデータをもって役立たずと評価されてしまう危険がある。このような未来志向の LCA には未確定要素が多いため、評価の誤差範囲が大きいことは受け入れるべきである。それでも、未来に向けて想定しうる仮定のもとで、循環経済や持続可能な社会の主要技術になりうる技術シーズと、科学的に想定できる範囲では循環や持続可能性の向上には寄与しえない提案とを LCA により峻別することは可能であろう。

なお、このような未来志向の LCA は、技術の開発目標を設定する際にも大きく貢献できる。たとえば上述の人工的カーボンリサイクルシステムにおいては、回収・資源化する CO2 の量を十分下回る CO2 排出の範囲でシステムを稼働できるかどうかが、システムの存立意義として重要であろう。そのためには、CO2 回収・濃縮プロセスのエネルギー投入をどこまで減らせば良いのか、CO2 と水素の触媒反応による還元工程のエネルギー投入をどこまで減らし、目的とする生成物の収率をどこまで向上させれば良いのか、さらには CO2 と水を直接電気化学的に反応させる新規技術を開発すべきなのかといった要素プロセスの性能目標を、LCA に基づいて設定することは十分可能である。

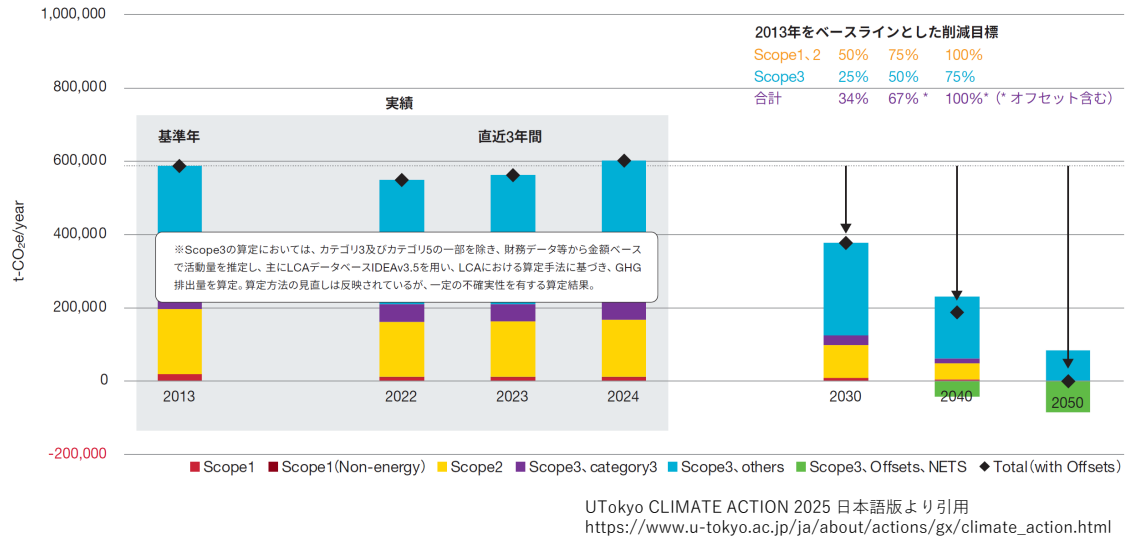
8.3 ケース3：大学キャンパスにおける CO2 排出ネットゼロへの挑戦

筆者が属する東京大学では、2050 年にキャンパスからの CO2 排出ネットゼロを目指し、まずはキャンパスからの CO2 排出を定量化し、次に 2050 年にネットゼロを達成するためのアクションプランを策定しようとしている。東京大学のキャンパスは規模が大きく、教育、研究、医療など様々な活動が展開されており、そこでのネットゼロを目指す取り組みからは社会全体でネットゼロを達成するための課題と展望が見えてくる。さらには循環経済への移行に向けたキーポイントも示唆される。

(1) CO2 排出を定量評価することの難しさ

図 8.3 は、東京大学の LCA 研究者が総力を挙げて取り組み、大学キャンパスからの CO2 排出量を定量化した結果である。大学からの CO2 排出のうち、キャンパスにおける燃料消費（図中の Scope 1）や電力消費（Scope 2）に由来する CO2 排出は約 1/3 以下であり、残りは Scope 3 に分類される排出、すなわちキャンパスにおける活動のために購入した物品の製造・輸送に伴う CO2 排出や、大学構成員の出張に伴う CO2 排出など、大学活動に関連して間接的に排出される CO2 である。Scope 2 の CO2 排出はエネルギー消費量から容易に算出できるが、Scope 3 の CO2 排出を定量化するのは至難の業である。ここで採られた手法は、大学の財務会計システム（そもそもは会計のためのシステムだが、そのためのエビデンスとして大学の各構成員が購入

した物品や行った出張のデータが「ある程度の」精度で記録されている）のデータをもとに、購入物品それぞれについて典型的な CO2 排出量をデータベースを参照して求め、出張についてもある仮定のもとで CO2 排出量を算出したものである。しかしながら、現在の財務会計システムにはすべての購入物品が詳細に記録されているわけではなく、さらに言えば同じ商品でもメーカーや配送経路が異なれば CO2 排出量は変わってくる。出張についてもケースごとに CO2 排出量は異なる。このような集計の困難さは十分承知のうえで、かなりの誤差を認めつつも、キャンパスにおける CO2 排出の 2/3 以上が Scope3 由来であることを定量化した意義は非常に大きい。



UTokyo CLIMATE ACTION 2025 日本語版より引用
https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/actions/gx/climate_action.html

図 8.3 東京大学のキャンパスからの CO2 排出量推計

(2) キャンパスからの CO2 排出削減は他人任せ？

2050 年に向けて CO2 排出ネットゼロを目指すためには何が必要だろうか？まず排出の約 1/3 を占めるキャンパスでのエネルギー消費については、その大半を占める電力の脱炭素化を進めればよい。キャンパス内にオンサイトの電力需要をすべて賄うだけの太陽電池と蓄電池を設置できれば理想的だが、都心にあるキャンパスには面積の余裕がないため自前の太陽光発電でキャンパス内消費電力を脱炭素化することは不可能である。したがって、キャンパス外に専用の太陽光発電を導入したり、電力事業者から再エネ電力を購入したりする（2050 年に向けて、現在の総発電量ベースの取引ではなく、時間ごとの発電・消費バランスを考慮した再エネ電力の取引が導入される前提で）ことで Scope 2 の CO2 排出をゼロにすることを目指す。

一方で対策が非常に難しいのが Scope 3 である。その大半は製品の購入に伴う CO2 排出であり、それを減らすことは大学だけの努力では不可能で、社会全体がカーボンニュートラルに向けて着実に歩み、各製品の Scope 3 CO2 排出がゼロに向かうことを促すほかには対策が考えられない。こう結論してしまうと、東京大学のキャンパスにおける CO2 排出ネットゼロは、社会全体のネットゼロに連動する、すなわち自分たちの努力だけでは CO2 排出ネットゼロは実現できないと宣言しているようなものであり、大学が先頭に立って循環経済への移行を促すべきであると主張する筆者としては甚だ心許ない状況に追い込まれる。

(3) より精緻な CO2 排出カウントの仕組みと、それに根差した行動変容が必要

私たちが購入する製品に関する Scope 3 CO2 排出を減らすには、製品を提供する企業に CO2 排出削減を促すインセンティブを与えることが重要である。たとえば、本学の財務会計システムはまもなく更新予定であり、

新システムにおいては外部のｅコマースサイトと連携して購入時に製品の CO2 フットプリント（製造・輸送等に伴う排出量）が表示される予定である（もちろん、製品の供給者が CO2 フットプリントを算出し、公表していることが前提だが）。これに連動して、大学構成員がｅコマースサイトで購入した製品の CO2 フットプリントは大学全体で自動集計されるシステムへと拡張することが計画されている。東京大学の構成員としては、大切な教育研究予算を有効活用するためにコストパフォーマンスの高い製品を購入したいことはもちろんだが、キャンパスからの CO2 排出ネットゼロという大目標を大学全体で共有していれば、多少高価であっても CO2 フットプリントがより小さい製品を選択するという行動変容が期待される。

このような本学の取り組みが示唆することをまとめると、以下のようになろう。Scope 3 CO2 排出を減らすには社会全体の変容が不可欠であるが、その契機となるのは目的となる指標（ここでは CO2 排出量）とその信頼できる算出法を社会全体で共有することである。その指標を追跡・集計する作業は膨大なものとなるため、デジタル技術を最大限活用したトレーサビリティと集計のシステムを構築することも必須となる。そして、単なる価格だけでなく目的とする指標の方向性に沿って購入の選択をする消費者を増やすことが最終的にもっとも重要であろう。もちろん、税制を含めた各種の経済的インセンティブは必要に応じて導入すべきである。

8.4 循環経済への移行を促す方策

冒頭に述べた、循環経済への移行を促すための取り組みについて、3つのケーススタディーの内容を踏まえて今後の展開を考えてみたい。

(1) 可視化が容易なローカルケースにより循環や持続可能性を可視化し、「物語づくり」により価値創造を進め、既存の貨幣価値を超えた社会のサポートを得る

ケーススタディーとして述べた有機農法は、循環経済を可視化し価値化するファーストムーバーとしての成功事例といえよう。他にも、リサイクル材で生産した装飾品など、原材料費に比べて最終価値が非常に高い商品に、循環や持続可能性を取り込む余地が大きい。循環社会への移行の第一歩は既存の貨幣経済の枠を超える価値創造であり、可視化と「物語づくり」に適したターゲットを見出して先行事例を積み上げるべきである。

(2) 新規技術を取り込みながらローカルケースの境界を拡張し、より包括的な循環や持続可能性を追究する

ローカルな循環の先行事例を複数推進しても、地球全体の持続可能性に対する寄与は非常に小さい。したがって、次のステップとしては、立ち上げに成功したローカルな循環の枠組みを拡張し、空間スケール的にも、対象とする物質やエネルギーの観点でも、循環や持続可能性向上の取り組みを拡張することが求められる。有機農法のケーススタディーにおいて指摘した通り、物質循環の枠組みを拡張したり、再生可能エネルギーを導入して自立型のエネルギーシステムを構築すると、初期のローカルなシステムに比べて非連続的にコストが上昇したり、循環の仕組みが可視化されにくくなったりする問題がある。ローカルケースにおいて創造した価値を、本ステップにおいていかにバージョンアップして消費者や社会に強く訴求するかが大きな課題であろう。一方で、科学技術の進展に期待する立場からは、このような循環の境界拡張のためには新技術が必要とされ、その開発が科学技術発展の駆動力になるというポジティブなインパクトが期待できる。これを価値の拡張といかに結び付けるかも課題であろう。

(3) 複雑化した物質循環や環境負荷低減の効果を定量的に評価する指標を導入する

循環や持続可能なエネルギー利活用の空間スケールが拡張され、対象も増えると、枠組みが複雑化し、可視化が困難になる問題が浮上する。そもそも持続可能性の向上に資する尺度は複数存在し、互いにトレードオフの関係になることも少なくない(分かりやすい例では、太陽光発電の大量導入と、食料供給のための農地の確保や、生物多様性保全のための森林の保護など)。そういった中でも、消費者の行動変容から循環経済への移行を促すために有効と思われる指標をピックアップして、消費者の選択に資するように社会実装する必要がある。たとえば、製品の製造や輸送に伴うCO2排出(フットプリント)をブロックチェーン技術などを用いて追跡・定量化し、価格と同時に消費者に提示する、一方でEコマースで購入した商品のCO2フットプリントを消費者や事業者ごとに自動集計して消費活動における各自のCO2フットプリントを可視化するといったデジタル技術を活用した施策は、消費者に選択の指標を提供して循環経済への移行を促す効果が期待できる。ただし、たとえばCO2フットプリントが循環経済や持続可能性の唯一の尺度ではないことを消費者が正しく認識しないと、社会全体では誤った方向に部分最適化が進んでしまう懸念がある。包括的な定量指標を提示・集計する仕組みは、市民の循環や持続可能性に対するリテラシー向上と両輪で推進される必要がある。

また、大規模な投資や研究開発予算を伴う循環システムの導入に際して、上述のような定量指標を活用してその効果を値踏みする、いわばコストパフォーマンスを評価することも可能である。ライフサイクルアセスメントは、このような目的にも貢献できる。ただし、これから開発が進められる技術の評価を行う際には、現在の開発初期段階における性能指標ではなく、将来当該技術が社会実装される際に達成される見込みの性能指標(および装置構成要素のCO2フットプリント等)に基づいて、未来志向のライフサイクルアセスメントを実施すべきである。さもないと、真に価値がある技術の開発の芽を摘んでしまう懸念が大きい。

(4) 導入された指標を活用して循環経済への移行を後押しする新たな価値軸の創造

CO2フットプリント等の定量指標が導入されると、それに沿って税制や金融上の優遇策などの後押しにより循環経済への移行を促進しようとする動きが出る。これ自体は基本的に好ましい施策となりうるが、そもそも循環経済の進展度合いを評価する単一の定量指標は存在しないことに注意が必要である。すなわち、ある尺度に基づいて施策を組むと、他の尺度が犠牲になる懸念がある。このような課題に対処するため、たとえばEUでは、PEF[57]という製品の循環性や環境負荷低減に関する統合指標を導入する動きがある。しかし、このような統合指標も万能ではなく、それが特定の産業を優遇する措置になったり、自由貿易を妨げ自国経済を保護する仕組みへのすげ替えになったりしないように注意が必要である。

いくら税制や各種の優遇措置により循環経済の指標が良好な商品が選択されるようにインセンティブを与えたとしても、地球環境への負荷低減の取り組みが外部化された現在の経済の枠組みの中では、循環経済への移行を強力に推進することには限界がある。最後に重要となるのは、循環経済を自分事として感じ、経済原理よりも美的感覚に駆動されて自発的に循環を促す行動を選択する市民の育成であろう。そのためには、人間が自然を制御して人間活動を拡大するという人間中心の視座でなく、人間も自然の一部であり地球環境への負荷軽減に努めない限り現在の人間活動を持続させることは不可能であるという自然中心の視座を私たちの価値判断の根本に据えることが不可欠であろう。このような視座の転換には、教育や文化の役割が極めて大きい。

[57] Product Environmental Footprint:製品環境フットプリント

8.5 補足:エネルギーは循環できない

科学的な観点では、エネルギーに循環の概念を持ち込むのは難しい。熱力学第 2 法則によれば、熱から仕事を取り出す際には、熱を運んできたエントロピーをどこかに捨てる必要がある。その捨て場所の温度は、もとの熱が持っていた温度よりも低い必要がある。捨てたエントロピーを回収する(低い温度から高い温度の側に熱を移動させる)ことは追加的に仕事を投入しない限り不可能なため、熱から仕事への流れは一方通行になる。すなわち、エネルギーの循環利用は熱力学の法則から不可能とされている。

地球上の人類が持続可能なかたちでエネルギーを利用するには、高温の太陽から発せられる熱が地球表面に届き、次いで宇宙という低温空間に放散されるという膨大な熱の流れの一部を、人類が必要な仕事に変換するしかない。これが太陽光由来の再生可能エネルギーである。その形態の代表格は太陽光発電であり、次いで太陽からの熱がもたらす大気や水の循環を利用した風力発電、水力発電が有望なエネルギー源となる。

化石燃料は太陽からのエネルギーが植物の光合成および動物を含む食物連鎖の結果、燃料として蓄積されたものであり、広義には化石燃料も太陽光由来のエネルギー源であるといえる。しかし、化石燃料の製造に要する時間の長さと利用する時間の長さはまったく釣り合わないため、化石燃料は持続可能なエネルギー源とはいえない。

おわりに

本プロジェクトの出発点にあったのは、気候変動、資源制約、生物多様性の損失など地球規模の課題が顕在化し、人間社会の持続可能性そのものが問われる時代にあって、人類が地球生態系の中で存続していくために、いかなる持続可能な社会を築くべきか、そして、そのための循環型社会をいかに構想し、設計していくべきかを、もう一度根本から考えてみたいという思いであった。

本報告書では、「循環型社会」を、従来の資源循環や廃棄物対策の枠組みにとどまらず、人間社会が地球生態系の中で持続し得るための社会のあり方として捉えている。そして「循環経済」は、その実現を支える経済のあり方として位置づけている。

世界では、循環経済への移行に向けて、製品設計、資源利用、市場、制度、情報基盤などを含む社会・経済システムの再構築に向けた取組が進んでいる。日本においても、循環経済はもはや廃棄物処理やリサイクルだけの問題ではなく、脱炭素、生物多様性、産業競争力、経済安全保障、地域社会などとも関わる社会全体の課題として論じられるようになった。こうした動きの中で、日本が海外で先行する制度や政策から学ぶべきことも多い。しかし、本プロジェクトが考えようとしたのは、どの国・地域の制度が優れているか、あるいは、どの制度を日本に導入すべきかということではない。欧州で形成された制度や枠組みに学び、それらに対応することは必要であるとしても、それらを追うことと、私たち自身が目指す社会の姿を考えることとは同義ではない。

自然科学の ecosystem から借りられた「エコシステム」という概念は、産業・経済・イノベーション政策の中で、人間側の主体間ネットワークや相互依存関係を表す概念として広く展開してきた。しかし、「エコシステム」という同じ言葉を用いながら、そこで想定されるシステムと本来の自然の生態系との関係は、使われる場面によって大きく異なる。自然との物質的・生態学的な関係を直接扱うものもあれば、企業、技術、資金、人材、制度など、人間社会内部の関係を主として扱うものが大半である。それらはいずれも、現実には地球生態系の内部に存在しているにもかかわらず、である。産業エコシステムがその内部でいかに巧みに資源を循環させたとしても、それが地球生態系とは別の閉じた世界として存続できるわけではない。地球生態系を基盤としてはじめて成立し得る産業や社会のエコシステムを構想するとき、その語の原点である自然の生態系との関係を、もう一度つなぎ直して考える必要があるだろう。

生体や生態の仕組みを社会や産業の設計に援用することは多くの示唆をもたらすが、その科学的な妥当性には慎重な吟味が必要である。様々な意味に拡張されてきた「エコシステム」とは対照的に、日本では、資源循環を血液循環になぞらえた「動脈産業／静脈産業」という具体的な比喩が長く用いられてきた。資源循環の役割分担を分かりやすく示した意義は大きいものの、実際の生体では動脈と静脈のいずれも栄養分や老廃物を運んでおり、製造と再資源化のように機能が二分されているわけではない。この比喩は産業間の資源循環を描くには便利でも、生体の機能に忠実なモデルとはいえず、生物と環境との関係を含む生態系の理解へと発展させるには限界がある。人間社会の内部に循環をつくることが、地球生態系の中で持続し得る社会を構想することに、そのままつながるわけではないだろう。

そこで本プロジェクトでは、地球生態系の中で何が生物種の存続を可能にしてきたのかという問いに立ち返り、自然界に見られる「共生」「循環」「進化」などを手がかりとして、人間の産業活動や循環型社会のあり方を考えること、すなわち「エコシステムを工学する」ことを試みた。そのため、循環経済や産業政策を直接の専門とする方々だけではなく、生物の進化、生物と環境との関係、生物間相互作用、生体から生態へと学びの対象を広

げてきた研究、産業生態系、制度設計、循環経済への社会実装など、それぞれ異なる立場からこの問題を考えてこられた方々に論考をお願いした。もとより、一つの答えに収斂させることを意図したものではない。

結果として寄せられた論考は、企画時の想定をはるかに超えて多岐にわたり、しかも、その多くが産業界や政策の現場に引き寄せて考えることのできる示唆に富むものであった。

進化史という時間軸、環境収容力、環世界と「あわい」、生物間相互作用と「網」、人間知性の限界、ノンヒューマンセントリックな科学、自然から学ぶ技術とその社会実装、価値共創エコシステム、循環プロバイダー、情報生態系、関係性を組み込む制度設計、循環を支える価値観や文化――。異なる専門から提示されたこれらの視点は、循環型社会を考えるという一つの問いが、実に多くの方向へ開かれていることを示している。

循環型社会の実現に向けて、制度や技術の果たす役割は大きい。しかし、人間が捉え得る世界を全体像とみなし、複雑な関係の中で成り立つ社会の未来を、一つの構想や設計図によって描き尽くそうとすることが、かえって本来目指していた循環型社会の実現を遠ざけかねないという危うさも、複数の論考から浮かび上がった。異なる知見に触れ、一人ひとりが自らのものの見方や判断を問い直していくことが、循環型社会を築くうえで欠かせない原動力になると考える。

以下は、各論考の要約でも、そこで示された提言の整理でもない。筆者自身が八つの論考から受け取ったものを、いくつかの問いや気づきとして記したものである。

(1) バイオミミクリー4.0 は、産業界で培われた事業・システムの設計手法を自然環境や社会へと拡張する試みとして興味深い。特に、設計の在り方そのものを大きく左右する Safe-to-Fail において、Fail の判断基準や判断速度などについても、自然から学ぶことは多いだろう。

(2) 循環経済の実現を支える価値共創エコシステムの構築は、産業や生活者の関係を捉え直す可能性を拓く。ここで、地球生態系の循環との整合をいかに図るのか。異なるシステムの結節点における「接続」のあり方に注目したい。

(3) 貨幣経済で「儲ける」ことがやめられないなら、質の向上によって実現する方策を見つけることだ。生態系サービスも「ただ」ではないことが分かった。変革は間に合わないかもしれないが、膨大なエネルギー源を手に入れ、地球の環境収容力を大きく超えた稀有な生物種として、私たちは今、地球から突き付けられた問いに自らの存続をかけて答えるときを迎えている。私たちは自らを形づくってきた社会の限界に気づき、その社会を自らの手で変えることができるのだろうか。

(4) 「幻想を共にする *Homo coimaginans*」から、「自らの幻想を自覚し、異なる環世界と折り合いをつける *Homo coimaginans*」へ。

(5) 人間が自然に働きかけた結果、予想もしなかった生物間相互作用が姿を現す。私たちは、そのたびに科学技術を駆使して対処を重ねてきた。そして、人間は、自らが認識できる世界の内側で問題を定義し、その解決を成功と呼んでいる。見えていない多様な環世界を含む地球生態系の中で、その「成功」は何を意味するのだろうか。

(6) 設計者のいない生態系から、私たちは何を設計の手本として学ぼうとしているのだろうか。そこには全体を統括する設計主体が存在しない。それでも多様な生命は関係を結び、変化しながら存続してきた。エコミメティクスが工学に問いかけるのは、望ましい未来をいかに設計するかではなく、未来をあらかじめ設計し尽くさずに、社会が存続し得る条件をいかに整えるか、ということではないだろうか。

(7) EUと日本では、循環経済をめぐる制度形成の歴史も、その根底にある設計思想も異なる。循環経済を支える制度にも、日本固有の歴史や社会のあり方に根ざした道筋があってよいはずである。しかし、EUでは循環性を産業システム全体に組み込む制度整備が進み、日本もまた、長年培ってきた技術体系や設計思想の転換を迫られている。その転換が真に目指すべき未来につながるのか、私たちは何を拠り所に見定めればよいのだろうか。

(8)物質循環を追求することが、かえってエネルギー消費や新たな環境負荷の増大を招く場合もあり、必ずしも地球の持続可能性につながるとは限らない。科学技術による評価にも限界があるなかで、経済合理性を超えた「美意識」や「美的感覚」という視点が示唆的である。そこに、環世界という概念との思いがけない接点を感じる。

もとより、いずれの論考も、ここに記した短い言葉に収まるものではない。複雑な議論をあえて一つの問いに凝縮したものもあり、取り上げることのできなかった重要な論点も多い。それぞれの論考が持つ奥行きと広がりは、ぜひ原稿そのものから読み取っていただきたい。

私たちは社会や産業の将来を考えるとき、全体を見渡し、将来を予測し、そこから戦略を立てようとする。「俯瞰」することは、そのための重要なステップである。しかし、複雑で動的な地球生態系には、その全体を見渡して行方を決める主体が存在しない。そこに生きるものは、それぞれが認識できる環境の中で他者や外界との関係を結び、その変化に応答しながら存続している。俯瞰によって得られる全体像もまた、一つの観察点から構成されたものであり、世界のすべてを捉えたものではないことを忘れてはならない。

自分たちが世界をどのように見るかだけではなく、他者から自分たちはどのように見えているのか、さらに観察点を人間ではないところに置いてみたとき、世界はどのように見えるのか。視点を移すことによってはじめて見えてくる関係性がある。そして、その視点に立とうとしても、なお人間には見ることのできない世界が歴然と存在する。そうした異なる世界が重なり、関わり合うことで生態系が成り立っているという認識は、「エコシステムを工学する」ことの前提となるのではないか。本報告書に収めた一つの論考の表現を借りるならば、それは、自然を理解し尽くし、制御し得る対象とみなすのではなく、人間にはなお知り得ないものが存在するという認識と、古くから日本人の自然観の底流にあった畏れを、工学の側に取り戻すことかもしれない。

人間の社会を、人間ならざる視点から工学する。

本報告書に収めた八つの論考を手がかりに、それぞれの足元から、これからの循環型社会のあり方をあらためて考えていただければ幸いである。

プロジェクトリーダー　小山珠美

本資料の内容の転載を希望される場合は、(公社)日本工学アカデミー事務局まで
ご相談ください。

編集発行
(公社)日本工学アカデミー
〒101-0064
東京都千代田区神田猿楽町二丁目 7 番 3 号 HK パークビルⅡ 2F
Tel:03-6811-0586 Fax:03-6811-0587
E-mail: desk@eaj.or.jp
URL: https://www.eaj.or.jp/