

バイオミメティックスの学理に基づくモノづくりの 動向調査

(一社) 未踏科学技術協会 特別研究員 河本 邦仁

1. 調査概要

バイオミメティックスの学理に基づいたモノづくりに関する動向調査を、バイオミメティックス材料特有の合成プロセス－構造－機能の相関関係に着目して行うとともに、実用化状況等の社会経済的な側面についても検討した。

2. 調査目的

本調査では、我が国においてもパンタグラフ応用等を製品化しており、世界をリードしうる位置にある我が国のバイオミメティックスにおける地位を確たるものにすべく、バイオミメティックスの学理に基づくモノづくりの動向調査を、主に物質・材料に関わる事項に焦点を当てて行い、バイオミメティックス分野における我が国の優位性を構築する際の課題を抽出することを目的とした。

3. 調査実施方法

バイオミメティックス活用検討委員会（以下委員会、図1参照）を組織し、①バイオミメティックスの基礎学理を追及する、②学理をものづくりへ応用するためのプロセス、③生物の機能と構造を模倣した材料の研究について、科学技術政策に資するべく、委員会において技術的課題を抽出し、検討した結果をまとめるとともに、実用化への展開も併せて調査し、報告書としてまとめた。

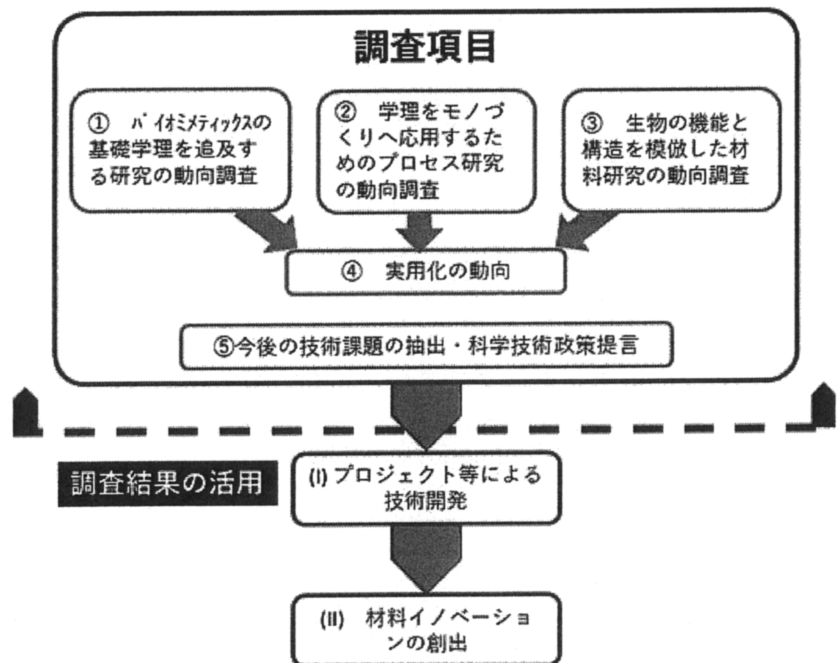


図1. 調査研究内容と成果の活用

4. バイオミメティックス技術の必要性と進展

バイオミメティックス (biomimetics) とは、生物に由来する構造や機能の発現原理を明らかにし、新たな技術に昇華させようとするもので、類似の術語としてバイオミミックリー (biomimicry) やバイオインスパイアード (bioinspired) という言葉があるが、ここでは若干の差異はあるものの同義のものとする。

自然界には、小さなエネルギーで完璧な循環系を達成しているメカニズムやシステムが多く存在する。換言すれば、環境負荷をかけない持続可能な社会を実現する科学技術を創成する可能性があるということである。一般的には、このような観点からバイオミメティックスに基づく技術が衆目を集めている理由となっている。

一方、経済的な効果の点をみれば、ジェイ・ハーマンによれば、多くの製品やビジネスは、既にバイオミメティックスによって創造されると指摘し、2025年にはバイオミメティックスは1兆ドルの効果をもたらすと考えている。他にも、ファーマニアン経営経済研究所 (FBIE) は、化学薬品製造、廃棄物管理、治療矯正サービスなどの分野では、15%はバイオミメティックス関連の技術の賜物であると報告している。

かような状況下において、欧米、とりわけヨーロッパでは盛んにバイオミメティックスに基づく研究開発がなされている。ドイツでは、ロボット関連の技術との融合を特徴としており、フランスの創薬などバイオ中心に展開している状況とは異なった展開をなしている。わが国における産業界や国の動向は、個々の製品にそれを特徴としたものがあるものの、全体的には産業界をイノベーションするまでの潮流とはなっていないのが現状である。単に一般大衆の一時的な興味を引くにととまっている理由の一つには、この分野の体系化が遅れていることにある。従って、本調査では、そもそも原理的な面からバイオミメティックス分野を見直し、体系化を目指して再構成しようとするものである。その結果を政策提言としてまとめることで、我が国の分野における活性化を促すことで、物質・材料におけるイノベーションを導出することまでも視野に入れた。

5. バイオミメティックスの学理の方向性

地球温暖化直面し、技術開発に対する考え方が大きく変化していることは周知の事である。例えば、インフラプロジェクトにしても、これまでの費用便益分析に基づいたものから人的資本 (教育、健康) や自然資本 (鉱物資源、農地、森林、生態系サービス) を積極的に取り入れた新国富指標 (Inclusive Wealth Index) により評価する方向に移行しつつある。すなわち、対象とする技術が持続可能か否かにより評価する方向となっている。一方、AIの進展に呼応し昨今頻出しているシンギュラリティ以降に対応すべく、我が国では超スマート社会 (Society 5.0)、ドイツのインダストリー4.0に資す施策が進行中である。以上の質的な転換に対応して、学理や技術開発手法も方向性が根本的に変化してきている。この変化を論ずるため、20世紀型と21世紀型と科学・技術・文化の潮流という観点から整理してみたい。

大略的には、20世紀型と21世紀型では、一般の人々のものの考え方に図2に示したような差異があると考えている。ある意味では、20世紀は”対立・淘汰”の歴史であった。21世紀は、

共存・共生”が是とされている。一方、サイエンスでは“科学”という言葉に自体に象徴的に表れているように、20世紀、とりわけ前半では還元主義を主体として展開されてきていたといえよう。最近では、“非還元主義的な手法”という言葉が、情報科学を中心によく使われるようになってきた。“還元論” ↔ “非還元論(創発)”の観点は、生命現象でおなじみのものであり、バイオメティックスとも密接な関係がある。プロセス・システムのいえば、自然を支配するといった”制御”の観点から、“自己組織化”による創成に比重が移ってきたといえよう。すなわち、プロセスも自然から学ぶという、Benyusの考え方に沿ったものとなっている。誤解を恐れずに言えば、西洋的な考え方からホリスティックな面を重要視する東洋的な考え方に移行してきているともいえる。

プロセス・システムの観点で言えば、自己組織化がキーワードとなってくる。生体においては、DNAの二重らせんがヌクレチオド・クロマチンを形成し、自己組織的に折りたたまれ遺伝子を形作る。その遺伝子により、必要な糖やタンパク分子が形成され細胞となる。細胞は必要な分化を繰り返すことで、臓器を形成、延いては生物個体となる。ただし、実際の発生は、ボトムアップ的創成ではなく、環境との密接な対話によってホリスティックに生ずるものであり、DNAに全ての設計図が用意されているわけではない。個体は、そのみに因って成り立っているものではなく、常に環境との対話(共生)がなされており、その結果として多様な姿を示す。

以上の様に、自然あるいは生物においては自己組織的な階層化が極めて重要であり、バイオメティックスの学理においても主要な部分を形成するもの、といえよう。生物個体をBenyusのいうシステムとして見た場合、自己組織化というプロセスを通して成り立っていると言い換えることができる。自己組織化(Self-organization)の定義はI.Prigogineによってなされ、秩序が起こる非平衡開放系を散逸系と位置づけ、平衡系で起きる静的な自己集合(Self-assemble)と区別している。Prigogineらは、この考え方を、振動反応の典型であるBelousov-Zhabotinsky反応(BZ反応)の簡略化した数理モデルとして、Brusselatorと呼ばれる非線形の常微分方程式を提案した。かような研究を包含した成果が認められ、I.Prigogineに1977年にノーベル化学賞が与えられている。基本式となる反応拡散方程式は、生物の形態形成に関心のあったTuringが、形態形成の仮説として提唱したものである。彼の論文においては、二つの拡散係数の差が大きな系では、自発的にパターンを形成することが証明されている。拡散と反応の相互作用の結果、濃度の揺らぎが増幅し、パターンが生ずると考えられる。

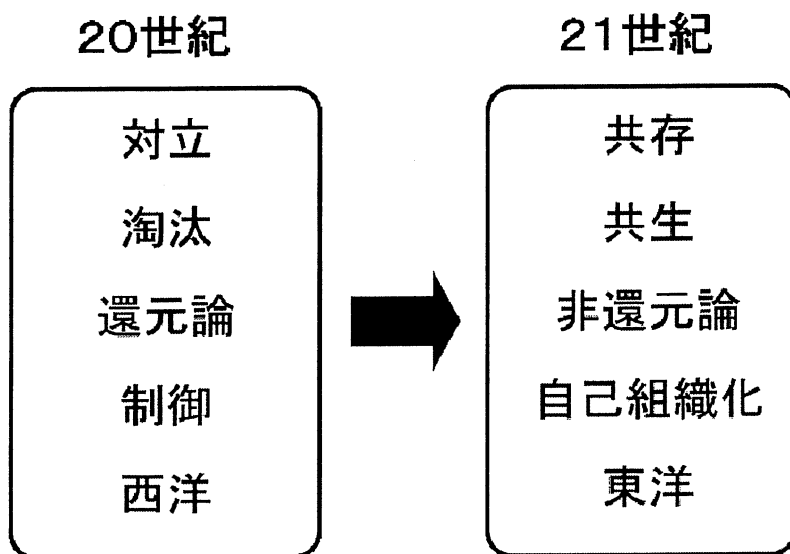


図2. 21世紀における技術開発の潮流

Prigogineらは、この考え方を、振動反応の典型であるBelousov-Zhabotinsky反応(BZ反応)の簡略化した数理モデルとして、Brusselatorと呼ばれる非線形の常微分方程式を提案した。かような研究を包含した成果が認められ、I.Prigogineに1977年にノーベル化学賞が与えられている。基本式となる反応拡散方程式は、生物の形態形成に関心のあったTuringが、形態形成の仮説として提唱したものである。彼の論文においては、二つの拡散係数の差が大きな系では、自発的にパターンを形成することが証明されている。拡散と反応の相互作用の結果、濃度の揺らぎが増幅し、パターンが生ずると考えられる。

G.Ertl は、この考え方を表面科学に展開し、BZ 反応に酷似したパターンが時間とともに変化していることを示した。また、タテジマキンチャクダイは、体表面に美しい模様があることが知られているが、これも自己組織化の考え方で再現できることが、近藤らによって示されている。自己組織化の考え方は、これらの分野だけにはとどまらない。P.Krugman は、経済学を複雑系や自己組織化の立場から論じている。彼の著書の中では、議論の端緒として都市の発展について述べられており、経済を越えて、都市工学の分野への発展も示唆している。

以上の調査結果から分かるように、バイオミメティクスは単に材料の分野に留まらず、都市工学、あるいは社会工学分野とも密接な関係がある重要なコンセプトである。

6. Society 5.0 に対応したバイオミメティクスの今後の課題と提言

本調査を整理することで、Society5.0 の具現化を視野に入れた場合、バイオミメティクス分野に関する課題のいくつかが明確になってきた。それらを以下に列挙する。

- ① バイオミメティクスの定義自体が定まったものとなっておらず、そのため分野全体の体系化の進展が十分ではない。
- ② 諸外国に比して、研究・開発分野、とりわけ産業界におけるバイオミメティクスに関する意識が低い。
- ③ バイオミメティクスの学理の中心となる自己組織化等の理論的な進展は著しいものがあるが、これが必ずしもものづくり現場に結び付いていない。
- ④ バイオミメティクスが関連する分野が広範に渡っているため、それぞれの分野で個別に議論されている嫌いがあり、かならずしも産業界のイノベーションに結び付いているものとはなっていない。
- ⑤ SDGs の目標を達成するにあたって、バイオミメティクスは一つの方向性を示すものとなっているが、社会全体で体系的な議論が為されているとは言えない。

以上の問題点は、バイオミメティクス分野が極めて学際的であり、かつ必ずしも産業界が抱えている喫緊の問題解決に直接はつながらず、長期的な視点から考えるべきものだとすることに因っていると思量される。

一方、現在、バイオミメティクスの成果と認定しうる製品や技術面においては我が国がリードしているところであるが、さらに将来の技術的イノベーションを目指すには、シンギュラリティー以降の社会を見据えて、バックキャストिंगするような研究開発課題を設定することが不可欠である。従って、この方向性の研究・開発を促進する国レベルの仕組みを目指した施策が望まれる。

※平成 30 年 4 月 17 日に第五次環境基本計画が閣議決定され、この中に、バイオミメティクスはキーワードとして取り入れられている。 <https://www.env.go.jp/press/files/jp/108982.pdf>

以上