

平成 25 年度自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討業務  
自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討成果報告書

平成 26 年 3 月 31 日

株式会社富士通総研



## エグゼクティブ・サマリー

- (1) 欧米ではバイオミメティクスや自然模倣技術に対する関心が今世紀から高まっており、国家プロジェクトや国際標準化の動きがある。その背景には、持続可能な社会を求める技術革新への強い要求があり、日本としてはこれを無視できない。
- (2) 生物の多様性は、生態系を含む、進化適応の結果として持続可能性を実現してきたことの証拠である。欧米における動向の背景には、生物学からの提案と、それに応える工学側の技術革新への強い意思がある。
- (3) 一方、自然に学ぶという発想は、日本的であるにも関わらず、日本においては企業での取り組みも十分ではなく、消費者にも浸透していないのが現状である。
- (4) 何故ならば、日本では、バイオミメティクスや自然模倣が、持続可能性に直接的に寄与するもの、という認識が十分ではなく、さらには、バイオミメティクス研究を支える生物学と工学の連携が必ずしもできていない。
- (5) 異分野連携、産学連携、地域連携による活動を通して、バイオミメティクスや自然模倣が、環境、エネルギー、資源等、現代のテクノロジーが内包する課題に対するパラダイムシフトと技術革新をもたらし、持続可能性に大きく寄与することを、具体的に示す必要がある。
- (6) 我が国が世界に向けて「環境・生命文明社会」を提案するには、人類がどのようなライフスタイルをめざし、その実現のために、生物の生き残り戦略と人類の叡智の組み合わせであるバイオミメティクスや自然模倣が、どのように持続可能性に寄与するかを、具体的な例示をもって示して行かねばならない。
- (7) そのためには、2014年度から先行的なトライアルとして、先進的な地域活動や生態系に学ぶ都市デザイン、パラダイム変換に基づく先進的企業・研究機関での生産技術革新、生物学・工学の先進的異分野共同研究、博物館を利用した啓蒙活動等への国家予算投入と、生物学、工学、企業、ならびに地域が、メガデータでもある生物多様性情報を共有化できる情報技術を背景とするプラットフォームとヒューマンネットワークを早急に構築すべく、情宣活動を積極的に展開する必要がある。



## 目次

1. 本検討の概要.....	1
1.1. 背景と目的.....	1
1.2. 実施概要.....	2
1.3. 検討会の設置・運営.....	3
2. 既存の自然模倣技術・システムの事例収集.....	6
2.1. 既存事例の収集.....	6
2.2. 諸外国の政策動向.....	8
3. 自然模倣技術・システムの事例の体系化及びデータベース等の作成.....	17
3.1. 事例の体系化.....	17
3.2. データベースの作成.....	23
3.3. 一般的な開発手法の抽出・整理.....	24
4. 新規の自然模倣技術・システムを創出するための手法の検討及び新規事例の創出 ...	27
4.1. 将来社会の課題と生活者ニーズの抽出.....	27
4.2. 技術的制約の抽出.....	35
4.3. 新規事例の創出手法の検討.....	37
4.4. 新規事例の創出.....	41
5. 自然模倣技術・システムを実社会へ応用するための手法の検討.....	47
5.1. 実社会への応用に向けた問題の整理.....	47
5.2. 実社会への応用についてのヒアリング調査.....	48
5.3. 実社会への応用についてのまとめ.....	70
6. まとめと提言.....	72
6.1. まとめ.....	72
6.2. 提言.....	73



# 1. 本検討の概要

## 1.1. 背景と目的

産業革命以降、世界の人口と経済は拡大の一途を辿ってきた。世界の人口はすでに 70 億人を突破、2050 年には 90 億人を超えることが予測されている。また、産業革命を契機とした資本主義経済の発展は、大量生産・大量消費の構造と物質的な豊かさの追求という価値観をもたらし、現在の経済社会の基盤となっている。一方で、こうした人間活動の急激な拡大は、地球温暖化や大気汚染・水質汚染、生物資源の破壊等の環境問題を引き起こしてきている。先進国において公害から顕在化した環境問題は、近年では、新興国の急速な人口増大と経済成長により、資源、エネルギー、食料、水の需要が増加し、地球規模で解決すべき深刻な問題になっている。国連は 2012 年の報告書で、地球はすでに限界点に達していることを明示し、その記者会見で、国連環境計画（UNEP）アヒム・シュタイナー事務局長は今回の報告書を「告発」として受け止めるべきだとコメントしている。人類はもう「生き方を変える」より他に選択肢がない段階に来たのだと警鐘を鳴らしたのである。

また、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災と福島第一原子力発電所事故は、我々の社会に大きな問題を突き付けた。原発の安全神話が崩れ去り、多くの国民が、自然の持つ圧倒的な力の前では人間は無力であることを再認識した。電力不足の中で、これまでのエネルギーの使い方を見直す等、社会のあり方を再考せざるを得なくなったことは言うまでもない。また、震災後の意識調査において、「東日本大震災を境に重視するようになったこと」として、「防犯・防災などによる安全・安心」、「子供や孫など将来世代の未来」、「幸せを実感できる生活」、「良好に保全された自然環境や生活環境」などが高い値を示す等、国民の意識や価値観も震災を契機に変わりつつある。

こうした中で、2013 年 4 月、環境省では、今後の環境政策の基本概念として「環境・生命文明社会」を掲げ、物質的な豊かさよりも質的な豊かさに重点を置き、「地域の活性化と世界への発信」、「技術イノベーションとライフスタイルデザイン」を軸に政策を展開していくことを発表している。2012 年 4 月に閣議決定された第四次環境基本計画で、目指すべき持続可能な社会を、人の健康や生態系に対するリスクが十分に低減され、「安全」が確保されることを前提に、「低炭素」・「循環」・「自然共生」の各分野が、各主体の参加の下で、統合的に達成され、健全で恵み豊かな環境が地球規模から身近な地域にわたって保全される社会、としてきていたが、「環境・生命文明社会」は、「低炭素」、「循環」、「自然共生」を包括する、その先のコンセプトとして掲げられたものである。

既に持続可能な社会づくりに向けた取り組みは各所で行われているところであり、従来の社会・経済の構造やライフスタイルを見直し、地球環境に負荷をかけない持続可能で真に豊かな社会を築かないといけないということは多くの人が感じているところであるが、その実現の道筋が明らかになっていないという課題も抱えている。この課題に対し、38 億年の歴史を持つ生命に学ぶアプローチはその突破口になり得るのではないだろうか。自然

界に溢れる多種多様な生物が示す構造や生命現象は、人間の技術による限界を突破するためのヒントの宝庫である。さらに、個別技術の応用に留まらず、多種多様な生物が連関することで統合的な循環を達成している生態系等に学びながら、技術の複合化による価値形成を図ることで、人間の社会システムを真に持続可能なものへと変革していく。自然模倣技術・システムの「システム」という言葉にはそうした意図が込められている。また、我々自身が生命であるから、生命に学ぶ技術は親しみを感じさせるものであり、それは新たな豊かさの創出やライフスタイルの転換にもつながるであろう。自然模倣技術・システムは「環境・生命文明社会」を実現する上でなくてはならないものであり、その社会応用に向けた取り組みに早急に着手することが必要なのである。

以上の背景の下、自然模倣技術・システムの実社会への応用に向けて、初年度である本年度は、既存事例の収集と体系化、新規事例の創出の検討、実社会への応用手法の調査検討を行うものである。

## 1.2. 実施概要

### ① 既存の自然模倣技術・システムの事例収集

自然模倣技術・システムの体系化及びデータベース等の作成を行うにあたり、既存の自然模倣技術・システムの事例を、既存の文献、データベース、特許、論文等をもとに収集した。また、今後の施策の検討に活かすため、諸外国（欧州、米国、アジア）のバイオミメティクスに関する政策動向を、文献により調査した。

### ② 自然模倣技術・システムの事例の体系化及びデータベースの作成

自然模倣技術・システムの社会応用の現状を把握するために、既存の自然模倣技術・システムの事例の体系化を行った。また、環境省における今後の自然模倣技術・システムに関する政策立案の参考とするために、前項①で収集した既存事例のデータベースを作成した。併せて、自然模倣技術・システムの一般的な開発手法について、ISO/TC266 における国際標準化の議論を踏まえて、整理した。

### ③ 新規の自然模倣技術・システムを創出するための手法の検討及び新規事例の創出

新規の自然模倣技術・システムを創出するために、新規事例の創出手法及び新規事例の創出の方向性を検討した。具体的には、将来社会の課題と生活者ニーズ、実現にあたっての技術的制約を抽出し、解決策としての自然模倣技術・システムの活用方法の検討、新規事例の創出を行ったうえで、有識者ヒアリングを行った。

### ④ 自然模倣技術・システムを実社会へ応用するための手法の検討

自然模倣技術・システムの社会応用を推進する施策の検討に活かすため、実社会へ応用するための手法について、ヒアリング調査を行い、主に、実用化・事業化にあたっての課

題、産学連携の推進、国際標準化への対応、普及・啓発の観点から検討を行った。

#### ⑤ 検討会の設置

自然模倣技術・システムの創出手法に関する検討会を設置し、前項①～④に関する検討を行った。

### 1.3. 検討会の設置・運営

自然模倣技術・システムの創出手法に関する検討会を設置した。検討会は、自然模倣技術・システムに関する学識経験を有するもの、事業関係者その他の関係者から構成された。

(敬称略、五十音順、○は座長)

#### 【委員】

- |         |  |
|---------|--|
| 赤池 学    | 株式会社ユニバーサルデザイン総合研究所 代表取締役所長  |
| 阿多 誠文   | 独立行政法人産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門<br>ナノテクノロジー戦略室長                         |
| 石田 秀輝   | 東北大学大学院 環境科学研究科 教授   |
| 伊藤 元己   | 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 広域システム科学系 教授                                |
| 渦巻 拓也   | 株式会社富士通研究所 ソーシャルイノベーション研究所 所長代理                                    |
| ○ 下村 政嗣 | 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授   |
| 白山 義久   | 独立行政法人海洋研究開発機構 研究担当理事  |
| 妹尾 堅一郎  | 特定非営利活動法人産学連携推進機構 理事長<br>一橋大学大学院 (MBA) 客員教授                        |
| 中野 充    | 株式会社豊田中央研究所 先端研究センター 先端研究推進室<br>(兼) 材料・プロセス2部 主任研究員                |
| 長谷山 美紀  | 北海道大学大学院 情報科学研究科 メディアネットワーク専攻 教授                                   |
| 平坂 雅男   | 公益社団法人高分子学会 常務理事補佐   |
| 星野 敬子   | 滋賀県立大学 地域共生センター 特定プロジェクト研究員<br>特定非営利活動法人アスクネイチャー・ジャパン 研究員・コーディネーター |
| 山野 博哉   | 独立行政法人国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター<br>生物多様性保全計画研究室 室長                    |

#### 【環境省】

- |       |                         |
|-------|-------------------------|
| 吉川 和身 | 環境省 総合環境政策局 環境研究技術室 室長  |
| 宮下 康彦 | 環境省 総合環境政策局 環境研究技術室 調整係 |
| 嶋田 章  | 環境省 総合環境政策局 環境研究技術室 調整係 |

#### 【事務局】

- 佐々木 一人 株式会社富士通総研 執行役員 第二コンサルティング本部長代理  
兼 環境事業部長
- 大塚 宏子 株式会社富士通総研 第二コンサルティング本部 環境事業部  
シニアマネジングコンサルタント
- 長谷川 誠 株式会社富士通総研 第二コンサルティング本部 環境事業部  
シニアコンサルタント
- 田中 寛樹 株式会社富士通総研 第二コンサルティング本部 環境事業部  
コンサルタント

検討会は、平成 25 年 10 月 7 日を初回として、計 4 回開催した。開催日時と主な検討内容は以下の通りである。

#### 【第 1 回】

日時：平成 25 年 10 月 7 日（月） 10 時 00 分～11 時 30 分

場所：株式会社富士通総研 5 階 セミナールーム

議事：

- 検討会の趣旨及び進め方（案）について
- 既存事例の体系化について

#### 【第 2 回】

日時：平成 25 年 12 月 9 日（月） 10 時 00 分～12 時 00 分

場所：株式会社富士通総研 5 階 大会議室

議事：

- 第 1 回検討会での議論について
- 本検討会における本質的な課題について
- 本検討会の議論において想定する将来社会について
- 今後の作業予定について（既存事例の体系化とデータベース作成、ヒアリング調査、報告書目次案）

#### 【第 3 回】

日時：平成 26 年 1 月 31 日（金） 10 時 00 分～12 時 00 分

場所：株式会社富士通総研 5 階 セミナールーム

議事：

- 第 2 回検討会での議論について
- ディスカッション（1/30）での議論について

- ヒアリング進捗状況報告
- ヒアリング結果中間報告（実社会への応用手法について）
- 新規事例の創出について
- 報告書骨子について

**【第4回】**

日時：平成26年3月13日（木） 13時00分～15時00分

場所：株式会社富士通総研 5階 セミナールーム

議事：

- 第3回検討会での議論について
- ヒアリング結果報告
- 報告書（案）について

## 2. 既存の自然模倣技術・システムの事例収集

### 2.1. 既存事例の収集

#### 2.1.1. 事例収集の概要

##### ① 実施概要

自然模倣技術・システムの体系化及びデータベース等の作成を行うにあたり、既存の自然模倣技術・システムの事例について、既存の文献、データベース、特許、論文等により、以下の情報を収集した。

##### 【対象項目】

- ヒントとしている生物や自然界の構造物
- 応用されている機能
- 応用先
- 応用段階
- 開発手法
- 社会への効果（環境への効果）

##### ② 実施方法

###### (i) 既存文献・データベース等による事例収集

まずは一般的になっている事例を整理するために、以下のような既存の文献や既に作成されているデータベース等をもとに事例を収集した。

##### 【既存のデータベース等】

- 東北大学大学院環境科学研究科ネイチャーテクノロジーデータベース事務局  
「ネイチャーテクノロジーデータベース」(<http://www.naturetech-db.jp/>)
- 積水化学工業株式会社「自然に学ぶ研究事例」  
([http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/bio\\_mimetics/index.html](http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/bio_mimetics/index.html)) 等

###### (ii) 特許による事例収集

続いて、出版物、インターネット等により一般的になっていない事例を収集するために、特許を対象に調査を行った。

特許の出願先は、日本、米国、欧州を対象とした。日本に出願された特許については登録公報/公開公報を、米国に出願された特許については米国特許を、欧州に出願された特許については欧州特許を検索対象とした。また、対象期間は、過去3年（出願日が2010年11月1日から2013年10月31日まで）とした。公報中の、名称、要約、請求項、詳細等を対象に、以下のような自然模倣に関連する検索ワードを設定し、データベースを検索、

検索結果の内容を確認し、自然模倣技術・システムの事例としてあてはまるものを抽出した。

【国内特許の検索ワード】

- 「自然模倣」
- 「生物模倣」、「生体模倣」
- 「バイオミクリー」、「バイオミクリ」
- 「バイオメティクス」、「バイオメティック」

【米国特許、欧州特許の検索ワード】

- “nature inspired”, “nature-inspired”
- “nature inspiration”, “nature-inspiration”
- “bio inspired”, “bio-inspired”
- “bio inspiration”, “bio-inspiration”
- “biomimicry”
- “biomimetics”, “biomimetic”

(iii) 論文による事例収集

特許は出願から公開までに時間がかかり、最新の事例は含まれないため、論文データベースで検索を行った。論文データベースは、日本最大級の科学技術文献データベースである JDreamIII (<http://jdream3.com/>) を使用した。対象期間は、2013年1月1日から2013年10月31日までとした。また、対象文献は、抄録付きの英語原著論文とした。これらの論文のタイトル、キーワード、抄録を対象として、「バイオメティクス（バイオメティック）」を検索ワードとしてデータベースを検索、検索結果の内容を確認し、自然模倣技術・システムの事例としてあてはまるものを抽出した。

## 2.1.2. 収集結果の概要

(i) ~ (iii) の実施方法により収集した事例の件数を、以下に示す。重複を除くと、計 311 件が抽出された。

図表 1 事例の収集結果

実施方法		総件数	
		重複を含む※1	重複を除外※2
(i) 既存文献・データベース等による事例収集	「ネイチャーテクノロジーデータベース」	196	300
	「自然に学ぶ研究事例」	115	
(ii) 特許による事例収集	日本への出願	69(4)	1
	米国への出願	113(9)	6
	欧州への出願	3(1)	1
(iii) 論文による事例収集		94	3

※1：( )内の数字は、検索結果のうち、自然模倣技術・システムの事例としてあてはまるものの数。

※2：(ii)については(i)との重複を除外した件数、(iii)については(i)(ii)との重複を除外した件数を示す。

## 2.2. 諸外国の政策動向

### 2.2.1. 調査の概要

今後の施策の検討に活かすために、諸外国のバイオミメティクスに関する政策動向について、文献による調査を行った。対象地域・国については、①EU、②ドイツ、③英国、④フランス、⑤米国、⑥アジア（韓国、中国）とした。また、調査項目については、バイオミメティクス関連の研究プログラムの概要、各国の政策におけるバイオミメティクスの位置付け、政府によるネットワーク形成への支援、国際標準化への参画状況等、とした。

### 2.2.2. 調査の結果

#### ① EU

独立行政法人科学技術振興機構「新科学技術情報基盤検討のための利用モデル調査（課題解決）」報告書によると、第7期欧州研究開発フレームワークプログラム（FP7）におけるバイオミメティクス関連研究への助成プログラムの件数は、図表2の通りとなっている。

全てのプログラムを合わせると、ナノ科学・ナノテク、材料、生産技術に関する研究が多い。エネルギー分野では、フラクタル構造を持つ太陽集熱器、人工光合成、ペプチドベースの太陽電池セルの研究が行われている。また、環境分野では、海洋生物の酵素プロセスに基づくポリマー合成や廃棄物の少ない酸化方法の開発の研究が行われている。<sup>1</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人科学技術振興機構「新科学技術情報基盤検討のための利用モデル調査（課題解決）」報告書（2013年3月）

図表 2：FP7におけるバイオメティクス関連研究の助成プログラムの抽出件数

分野	プログラム				計
	協力	アイデア	人材	キャパシティ	
健康	1	0	0	0	1
食料、農業、バイオテクノロジー	0	0	0	0	0
ICT	36	0	10	1	47
ナノ科学・ナノテック、材料、生産技術	14	50	51	0	115
エネルギー	3	1	0	0	4
環境	1	1	0	0	2
運輸	0	0	1	0	1
社会経済科学と人間学	0	0	2	0	2
安全保障	0	0	0	0	0
宇宙	0	0	0	0	0
計	55	52	64	1	172

※アイデア、人材、キャパシティについては、協力の10分野に沿って分類されている。<sup>2</sup>

出所：独立行政法人科学技術振興機構「新科学技術情報基盤検討のための利用モデル調査（課題解決）」報告書（2013年3月）

また、FP7の最終年度の公募であるWork Programme 2013では、バイオメティクス関連のプログラムとして以下が挙げられている。

図表 3：Work Programme 2013におけるバイオメティクス関連のプログラム

OCEAN 2013.3 Innovative antifouling materials for maritime applications

- ◆ 分野横断で、戦略的な優先分野として”Oceans of the future”が掲げられている。
- ◆ その中で、毒性がなく、重金属を使用しない、低コストかつ環境にやさしい生物付着防止材料の研究が対象に含まれている。アプローチの一つとしてバイオメティクスが例示されている。

<sup>2</sup> FP7は主に「協力」、「アイデア」、「人材」、「キャパシティ」の4つのプログラムで構成されている。「協力」はEU内の共同プロジェクトおよびEUの枠を超えた国際共同プロジェクトに対して支援を行うもので、図表2に挙げられた10の分野に分かれている。「アイデア」は基礎研究への資金提供を行うもの、「人材」は研究者の育成と訓練に対して支援を行うもの、「キャパシティ」は研究インフラの整備や中小企業の育成に対して支援を行うものである。「アイデア」、「人材」、「キャパシティ」は「協力」のように分野別になっていないため、ここでは「協力」の10分野に沿って分類されている。

NMP.2013.1.1-2 Self-assembly of naturally occurring nanosystems

- ◆ ナノ科学・ナノテク・材料・生産技術分野（NMP）において、自己集合能を持つ植物由来のバイオマスに着目し、新規のナノ材料、刺激応答性のナノ材料を開発するもの。

KBBE.2013.3.6-01: Novel bioinspired materials and processes

- ◆ 食料・農業・漁業・バイオテクノロジー分野（KBBE）において、革新的なバイオインスパイアード材料・デバイス・技術を開発するもの。

ICT-2013.9.6 FET Proactive: Evolving Living Technologies (EVLIT)

- ◆ ICT 分野において、生物の進化の原理（principles of biological evolution）を用いて、“Living technologies”を創出することを目的とする。具体的には、ナノメカトロニクスやバイオハイブリッドシステム等が含まれるとしている。

出所：FP7 Cooperation Work Programme 2013

また、FP7 の後継プログラムである Horizon2020 では、BBI (Bio-Based Industries) の官民パートナーシップである BRIDGE (Bio-based and Renewable Industries for Development and Growth in Europe) が採択され、取り組みが進められている。BRIDGE では、石油由来の製品から生物由来の製品へ置き換えることで、石油に依存しない、持続的な経済成長を実現することを狙いとしている。産業界については、60 以上の組織が参画し、BIC (Bio-based Industries Consortium) と呼ばれるコンソーシアムを形成しており、関連する産業（農業、食料、化学、エネルギー、製薬等）でバリューチェーンを構築し、バイオマスの生産、バイオマスを活用した製品の研究開発、生産等で互いに連携することによって、バリューチェーンを構成する企業群で持続可能な成長と環境負荷低減の両方を実現しようとしている。期間は 7 年間（2014 年～2020 年）、予算規模は 38 億ユーロであり、そのうち、Horizon2020 の予算から 10 億ユーロを支援し、産業界が残りの 28 億ユーロを負担する。<sup>3</sup>

このように、BRIDGE では、産業界の連携により、持続的な成長と環境負荷低減の両立を目指しているのが特徴的である。また、バイオマスの活用に焦点が置かれており、自然や生物から学び、研究開発に活かすということには焦点を置いていないと考えられる。

<sup>3</sup> BRIDGE 公式サイト (<http://bridge2020.eu/about/about-bbi>)

図表 4 : Bio-based economy のコンセプト

Integrated biobased value chains



出所 : BRIDGE 公式サイト (<http://bridge2020.eu/>)

## ② ドイツ

### (i) 政策における位置づけ

ドイツ政府が 2007 年に発表した生物多様性戦略「National Strategy on Biological Diversity」においては、「Biological diversity and its innovation potential」と題した項が設けられ、ロータス効果やゲッコーテープ、タマムシの赤外線センサー等が技術革新をもたらすものとして紹介されている。<sup>4</sup>

### (ii) 政府によるネットワーク形成への支援

2001 年にドイツ政府の資金援助により、28 の研究組織の産学官連携からなるネットワーク BIONIKON (Bionics Competence Network) が設立された。2011 年には世界で初めての「International Industrial Convention on Biomimetics」を開催する等、市場開拓、組織化および知識移転で大きな実績を持っている。ドイツ政府は 2001 年から 2004 年の間に 2.4

<sup>4</sup>下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティクス材料技術の新潮流」科学技術動向 2010 年 5 月号

億ユーロ、2004年から2007年の間に6億ユーロの資金を供与した。2009年にはドイツ政府教育研究省から30億円ユーロ以上の資金援助を受けて、BIOKON Internationalが設立された。<sup>5</sup>

2008年5月に開催されたCOP9（生物多様性条約第9回締約国会議）においてドイツ政府が組織した「ビジネスと生物多様性イニシアティブ 'Biodiversity in Good Company」は、民間企業による生物多様性保全活動を目的として、ドイツ連邦環境・自然保護・原子炉安全省による支援のもとに組織された。現在は、Volkswagen、Faber-Castell、HeidelbergCement、Mars Incorporated、TUI AG、UPM-Kymmene、三井住友信託銀行、富士通、アレフ、サラヤ等、24社の参画のもとで、自立運営を行っている。<sup>6</sup>

### (iii) 国際標準化への参画

BIOKONとドイツ技術者協会（VDI）が共同で作成した国内のガイドラインをもとに、2011年、ドイツ連邦の標準化機関であるドイツ規格協会（DIN）が国際標準化機構（ISO）に対して、バイオミメティクスに関する技術委員会（Technical Committee：TC）設立の提案を行い、TC266 Biomimeticsが設立された。ドイツはTC266の議長国であり、また、4つある作業部会（Working Group:WG）のうちのWG1とWG3のコンビーナ（議長）を輩出している。<sup>7</sup>

## ③ 英国

### (i) 政策における位置づけ

2007年1月に当時の英国貿易産業省（DTI）は、「Biomimetics: strategies for product design inspired by nature. A mission to the Netherlands and Germany」と題する報告書を作成した。これは、DTI Global Watch Missionによるものであり、英国の産業界に及ぼすバイオミメティクスの潜在的な寄与が述べられている。同報告書では、バイオミメティクス研究は、英国、ドイツ、オランダ、および米国において盛んになされており、中でもドイツは基礎研究と産業応用を統合的に取りまとめることで一歩先んじている、としている。<sup>8</sup>

### (ii) 政府によるネットワーク形成への支援

英国において個別に行われていたバイオミメティクスに関する活動を統合するため、

<sup>5</sup>下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティクス材料技術の新潮流」科学技術動向2010年5月号、NEDO「次世代バイオミメティクス材料・技術に係わる調査報告書」（2010年3月）

<sup>6</sup>下村政嗣「バイオミメティクスによる技術革新：その現代的意義」工業材料2013年11月号

<sup>7</sup>阿多誠文「高分子学会/バイオミメティクス研究会を国内審議団体への動き」PENGIN

(<http://pengin.ne.jp/index.php/en/pen-technology-governance-list/2013-07-11-04-44-35/98-iso-tc266-biomimetics.html>)

<sup>8</sup>下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティクス材料技術の新潮流」科学技術動向2010年5月号

2002年に政府の支援により、英国の企業および大学を中心メンバーとするネットワークである BIONIS (The Biomimetics Networks for Industrial Sustainability) が設立された。ニュースレターの発行によって、バイオミメティクスに関するトピックスや会議開催等を国際的に発信していることが先行調査では報告されているが、近年はあまり動きが見られない。

(iii) 国際標準化への参画状況

ISO/TC266 において、当初、ドイツ提案に反対していたが、P メンバー（投票権のある参加国）として参画している。

④ フランス

(i) 政策における位置づけ<sup>9</sup>

エコロジー・持続可能開発・国土整備省 (CGDD) は、2012年10月、「グリーンエコノミクス実現のためのバイオミメティクスの役割に関する調査報告」を発表した。

バイオミメティクスと経済、バイオミメティクス産業の現状と将来、持続可能な農業生態系の開発への利用等に言及しており、バイオミメティクスの技術は環境経済の観点からも有望であるが、研究が進んでいないことから、この分野での研究資金を増加し、研究者交流により研究を加速する必要があると述べている。

また、バイオミメティクスへの関心は高まりつつあるが、米国やドイツのように先導する団体がなく、情報共有の場がないため、学際領域研究の促進、基礎研究の重視、産学連携、ライフサイクル評価、標準化等についての対応が必要であることを指摘している。

バイオミメティクスの応用において、持続可能性を評価することは製造プロセス全体を解析しなければならないことから難しい課題であると述べているものの、研究開発拡大のための公共投資の必要性を指摘し、バイオミメティクスの利用促進のために、研究開発や製造方法の技術革新等のプロジェクトを推進すべきであると結論づけている。

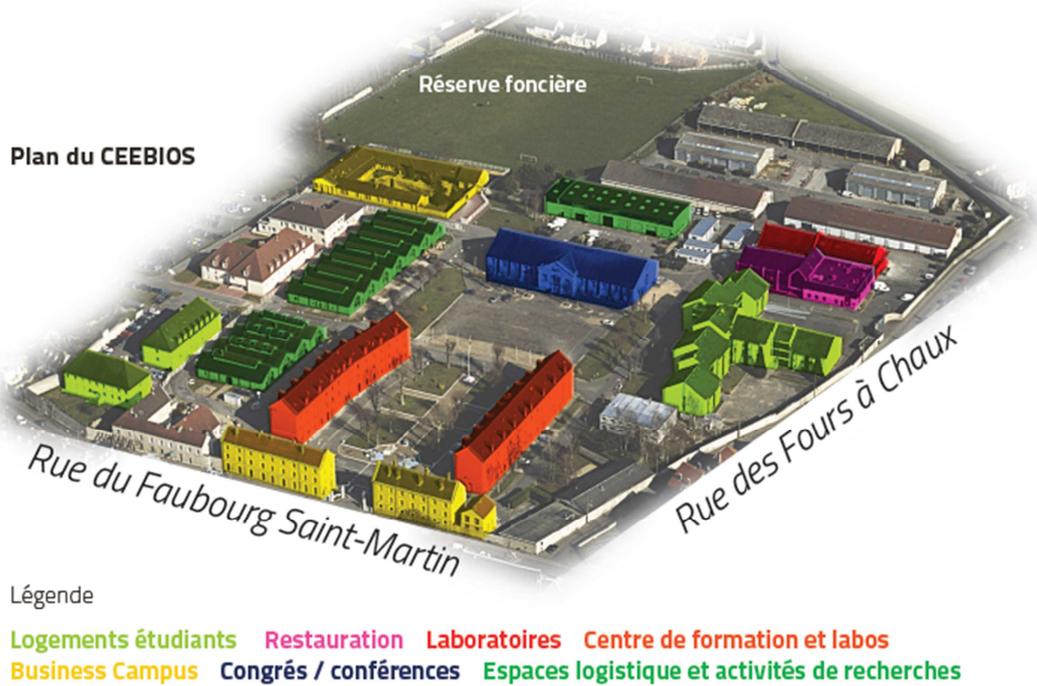
(ii) 研究開発拠点の構築<sup>10</sup>

2012年秋に、パリから 50km 北に位置するサンリス市にバイオミメティクス研究開発拠点「CEEBIOS」(Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis) の構築が発表された。フランス陸軍第 41 通信連隊の駐屯地の跡地に、研究施設、ホール、ビジネスセンター、オープンラボ、住居等の整備が進められており、総額約 12 百万ユーロの経費が必要と報じられている。350 名の雇用が創出され、120~140 名の学生が初期に受け入れられる見込みとされている。

<sup>9</sup>平坂雅男「フランスにおけるバイオミメティクス」PEN 2013 June vol.4 No.3、高分子学会 バイオミメティクス国際標準化ニュースレター Issue 1, Winter 2012

<sup>10</sup>平坂雅男「フランスにおけるバイオミメティクス」PEN 2013 June vol.4 No.3、高分子学会 バイオミメティクス国際標準化ニュースレター Issue 1, Winter 2012

図表 5 : CEEBIOS



出所：CEEBIOS パンフレット

(iii) 国際標準化への参画

2012年10月にベルリンで行われたISO/TC266第1回総会の直前にOメンバー（オブザーバ）からPメンバーとして参加を表明した。2013年5月にパリで行われた第2回総会では、フランスの標準化機関であるフランス規格協会（AFNOR）がホストを務めた。

⑤ 米国

(i) 民間ベースのネットワーク形成

米国では、米国国立科学財団（NSF）や米国国防高等研究計画局（DARPA）により、バイオミメティクス関連の研究開発への助成が行われている。

ネットワーク形成や拠点化は民間主導で進められているようである。ジャンニン・ベニユス氏が設立したBiomimicry3.8は、世界各地の団体と連携し、企業へのコンサルティングサービスの提供（250社以上の実績）や、教育プログラムの開発、イベントやワークショップの開催を通じた普及啓発活動等を行っている。<sup>11</sup>

また、サンディエゴ動物園（SanDiego Zoo Global）は、2009年に、サンディエゴのイノベーション支援機関であるCONNECT、サンディエゴ市、カリフォルニア大学サンディエゴ校（University of California San Diego）、サンディエゴ大学（University of San Diego）、

<sup>11</sup> Biomimicry3.8 公式サイト (<http://biomimicry.net/>)

サンディエゴ州立大学 (San Diego State University)、ポイント・ロマ・ナザレ大学 (Point Loma Nazarene University) の 7 機関から構成されるバイオミメティクスの地域ネットワークである BRIDGE (Business, Research, Innovation, Design, Governance, and Education) を構築した。また、2012 年にはバイオミメティクスの産業化をさらに推進することを目的としたバイオインスピレーションセンター (Center for Bioinspiration) を設立している。<sup>12</sup>

(ii) 国際標準化への参画

ISO/TC266 には、O メンバーとして参画している。総会には出席していない。

⑥ アジア (韓国、中国)

(i) 韓国の動向

国の研究機関である韓国科学技術院 (KAIST) や韓国機械研究院 (KIMM) が中心となって研究が行われている。特に韓国機械研究院の自然模写研究室の Kim WanDoo 博士が自然模写工学 (Nature-inspired engineering) の基盤構築と普及の先頭に立っているとのことである。<sup>13</sup> 欧州で見られるようなネットワーク形成や拠点化までには至っていないようであるが、ドイツとバイオミメティクスに関する共同ワークショップを開催する等、欧州との連携を進めている。

ISO/TC266 には P メンバーとして参画しており、第 2 回総会 (2013 年 5 月) では、バイオミメティクスな表面の濡れ性の計測手法の国際標準化を目指す新しい WG “Characterization of wettability of biomimetic surface” の立ち上げの提案を行った。<sup>14</sup>

(ii) 中国の動向

ISO/TC266 には、P メンバーとして参画しているが、総会には出席していない。

欧州で見られるような政府によるネットワーク形成の支援や拠点化の動きは見られないが、2009 年に吉林大学が英国のノッティンガム大学と UK-China biomimetics research initiative を締結している。<sup>15</sup>

---

<sup>12</sup> サンディエゴ動物園公式サイト (<http://www.sandiegozooglobal.org/>)、CONNECT 公式サイト (<http://connect.org/>)、バイオインスピレーションセンター公式サイト (<http://bioinspiration.sandiegozoo.org/>)

<sup>13</sup> 李仁植「韓国におけるバイオミメティクス」PEN 2011 September Vol. 2 No. 6

<sup>14</sup> 関谷瑞木「速報 国際標準化 ISO/TC266 Biomimetics 第 2 回総会」PEN 2013 June Vol. 4 No. 3

<sup>15</sup> 「Launch for joint UK-China research lab on biomimetics」ノッティンガム大学プレスリリース 2009 年 1 月 22 日

### 2.2.3. 諸外国の政策動向についてのまとめ

海外では、欧州において、政府の戦略やレポートにバイオミメティクスが取り上げられており、政府がネットワーク形成等への支援も積極的に行っている。また、産業界の連携により、持続的な成長と環境負荷低減を両立していくための取り組みを行っている。

日本では、新学術領域研究「生物規範工学」を中心に、ネットワーク形成や国際標準化活動が進められているが、産業界の参画が少ないのが現状である。

欧州ではドイツが最も進んでいるが、最近、フランスが積極的な取り組みを行っている。

ドイツは、生物多様性戦略の中にバイオミメティクスが位置付けられており、また、**BIOKON** の例に見られるように政府が多額の投資を行っている。

英国は、ドイツと同様、2000年代前半からバイオミメティクスに取り組んでいるが、最近はあまり動きが活発でないよううかがえる。

フランスはドイツや米国に追いつこうと、最近、積極的な取り組みを見せており、バイオミメティクスへの研究開発投資を拡大する方向にある。サンリス市のように地域振興を狙いとした地方での拠点化の動きも出てきている。

米国は、研究プロジェクトへの助成は盛んに行われているが、ネットワーク形成や拠点化は民間主導で進められているとみられる。

アジア（韓国・中国）は先行する欧州や米国に追いつこうと、欧州との連携の強化、国際標準化でのポジションの確保を図っている。

### 3. 自然模倣技術・システムの事例の体系化及びデータベース等の作成

#### 3.1. 事例の体系化

##### 3.1.1. 実施目的

既存の自然模倣技術・システムの事例を体系化することにより、自然模倣技術・システムの社会応用の現状を把握すること、また、既存事例のデータベースを作成することにより、環境省における今後の自然模倣技術・システムに関する政策立案の参考とすることを目的とする。

##### 3.1.2. 実施方法

既存の体系化の例を文献調査により、把握し、整理した。それらを参考に、前章 2 で収集した事例を、以下の 2 つの観点で体系化した。

###### 【体系化の観点】

###### ➤ 機能による体系化

自然模倣技術・システムの研究開発を行う研究者・技術者にとっては、「材料や機械の機能や物性から、その機能・物性を持つ生物とその部位・構造を調べたい」というニーズが高いことから、機能による体系化を行った。

###### ➤ 社会への効果（環境への効果）による体系化

調査検討結果を環境政策へと反映していくために、「第四次環境基本計画」で掲げられている「低炭素」、「循環」、「自然との共生」、「安全」による分類を行った。

##### 3.1.3. 体系化にあたって～バイオミメティクスの全体像～

バイオミメティクスは、大きく「分子系バイオミメティクス」、「機械系バイオミメティクス」、「材料系バイオミメティクス」の 3 つに分けられる。

「分子系バイオミメティクス」は、古くはナイロンに遡り、1970 年代に酵素や生体膜等を分子レベルで模倣しようとする生物模倣化学として盛んになった。事例としては、色素増感太陽電池の基礎となった人工光合成の研究や人工筋肉等が挙げられる。

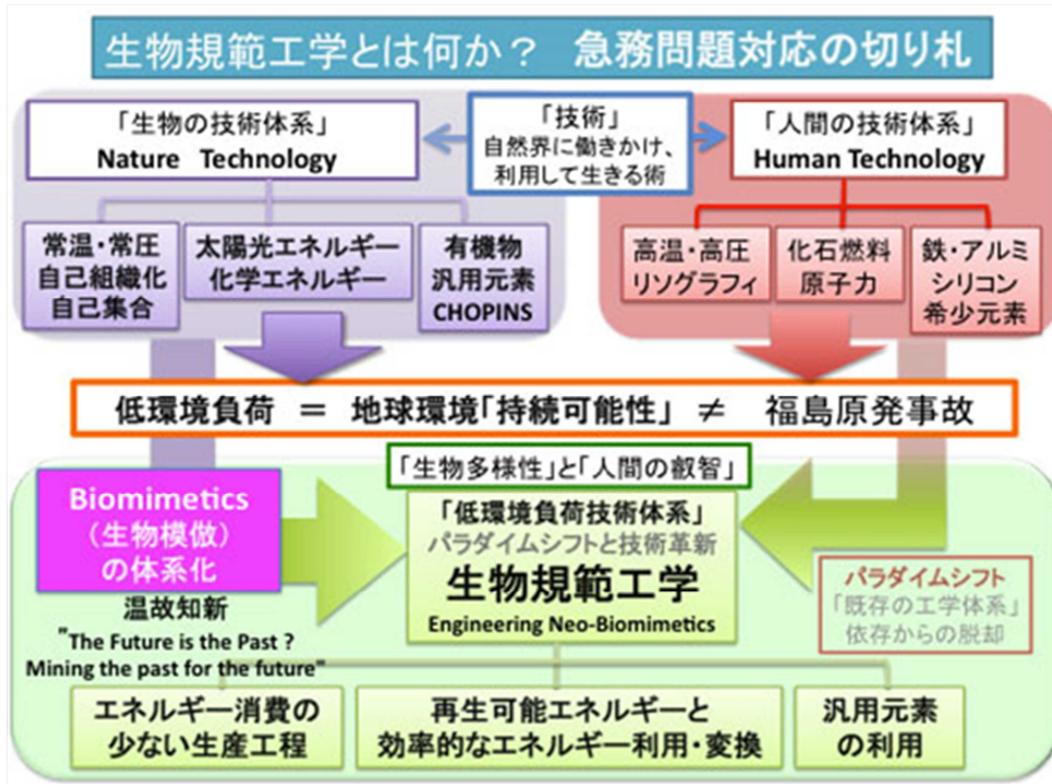
「機械系バイオミメティクス」は、機械工学や流体力学の分野におけるバイオミメティクス研究であり、コウモリの反響定位を模倣したソナーやカワセミのくちばしを模倣して流体抵抗を低減した新幹線の形状等が知られている。

「材料系バイオミメティクス」は蓮の葉の撥水性、ヤモリの足の接着性、モルフォ蝶の翅の構造色等、生物の微細構造が持つ特異な機能を模倣するもので、近年、注目を集めている。

材料系バイオミメティクスを中核に、これまで個別に展開してきた分子系と機械系の研



図表 7: バイオミメティクスから生物規範工学へ



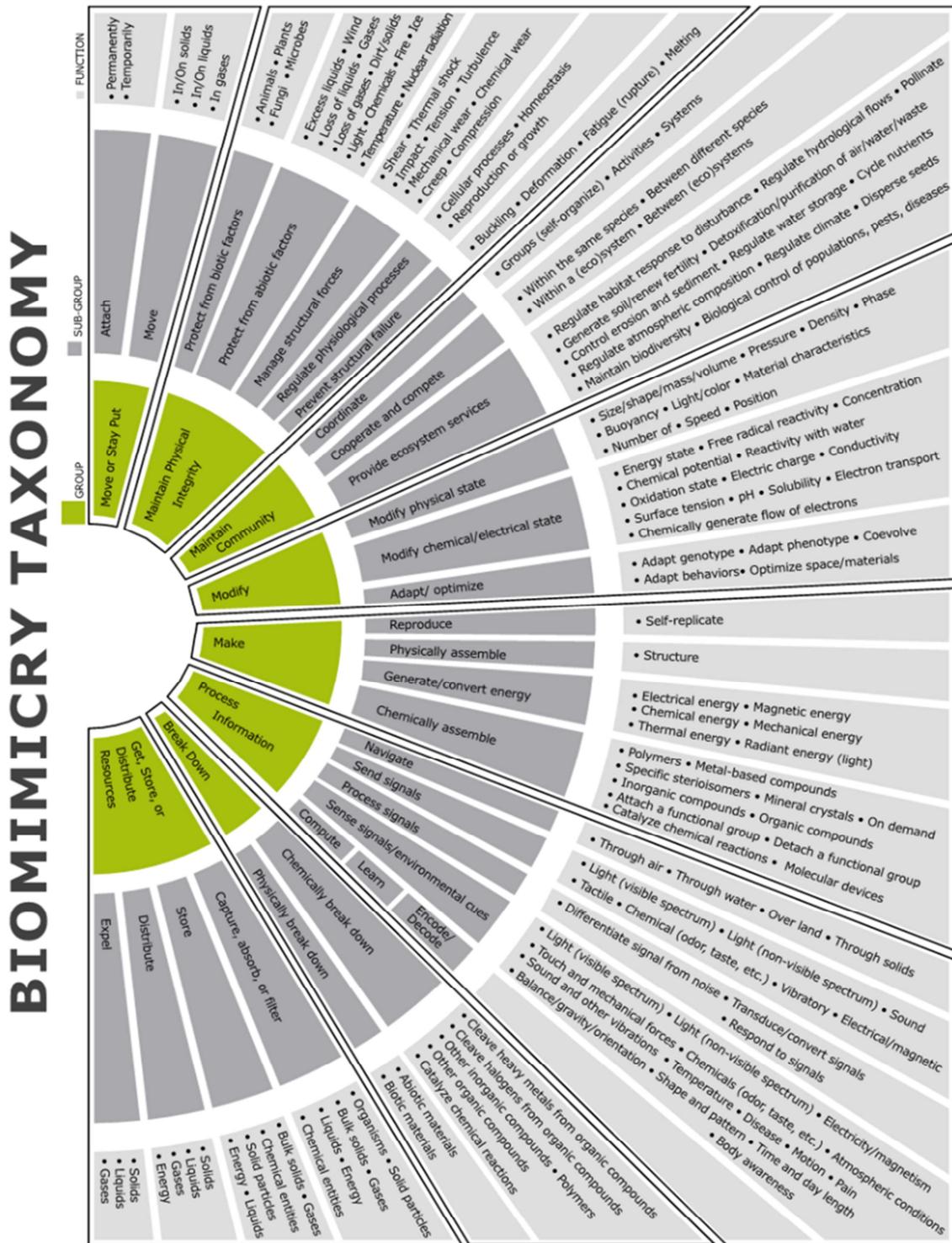
出所：文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究「生物規範工学」 ホームページ  
 (<http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/>)

### 3.1.4. 既存の体系化の事例

#### ① Biomimicry Taxonomy

米国の Biomimicry3.8 Institute が運営するバイオミクリーに関するアイデアのデータベース「AskNature」で用いられている分類体系である。生物から問題解決のヒントを得るためのもので、機能の観点での分類となっている。

図表 8 : Biomimicry Taxonomy における機能分類



Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License  
Version 5.0 © 2012 Biomimicry 3.8 Institute

出所 : Biomimicry 3.8 (<http://biomimicry.net/>)

## ② ネイチャーテクノロジーデータベース

東北大学大学院環境科学研究科ネイチャーテクノロジーデータベース事務局が運営する、ネイチャーテクノロジーの情報を集約・統合した日本最大のネイチャーデータベースである。自然や生き物の持つ低環境負荷かつ高度な機能が、科学技術や産業（商品・サービスの開発）に応用される機会を促進し、持続可能な社会づくりに貢献することを目指している。

図表 9：ネイチャーテクノロジーデータベースにおける機能分類

<b>資源/エネ/情報の収集・貯蔵</b>
› <a href="#">水回収</a> › <a href="#">集光</a> › <a href="#">光エネルギーの利用</a> › <a href="#">蓄力</a> › <a href="#">保温</a> › <a href="#">保冷</a> › <a href="#">保水</a>
› <a href="#">季節察知</a> › <a href="#">場所把握</a> › <a href="#">広視野</a> › <a href="#">酸素補給</a> › <a href="#">消音</a> › <a href="#">データ蓄積</a> › <a href="#">消臭</a>
› <a href="#">受信</a>
<b>資源/エネ/情報の発信・生産</b>
› <a href="#">発光</a> › <a href="#">発電</a> › <a href="#">発熱</a> › <a href="#">放熱</a> › <a href="#">色変化</a> › <a href="#">におい</a> › <a href="#">暗射</a> › <a href="#">鉱物生成</a>
› <a href="#">繊維生成</a> › <a href="#">動力生成</a> › <a href="#">発信</a>
<b>移動・廃棄・循環</b>
› <a href="#">穴掘り</a> › <a href="#">移動</a> › <a href="#">浮遊</a> › <a href="#">逆流防止</a> › <a href="#">空調</a> › <a href="#">再生</a> › <a href="#">再利用</a> › <a href="#">循環</a>
› <a href="#">除去</a> › <a href="#">吸上げ</a> › <a href="#">対流</a> › <a href="#">自己治療</a> › <a href="#">修復</a> › <a href="#">飛翔</a> › <a href="#">分離</a> › <a href="#">ろ過</a>
<b>形状・組織・システム</b>
› <a href="#">開閉</a> › <a href="#">拡大</a> › <a href="#">形変化</a> › <a href="#">機能分散</a> › <a href="#">環境改良</a> › <a href="#">サイズ変化</a> › <a href="#">質変化</a>
› <a href="#">重力利用</a> › <a href="#">分解</a> › <a href="#">自然現象の利用</a>
<b>効率(省エネ、省資源、軽い)</b>
› <a href="#">エネルギーの効率的な使用</a> › <a href="#">軽量化</a> › <a href="#">空気・水抵抗回避</a> › <a href="#">効率的な配置</a> › <a href="#">学習</a>
› <a href="#">高強度</a> › <a href="#">刺す</a> › <a href="#">自己鋭利</a>
<b>防御・安定</b>
› <a href="#">安定</a> › <a href="#">害虫管理</a> › <a href="#">吸着</a> › <a href="#">接着</a> › <a href="#">耐外敵</a> › <a href="#">耐火災</a> › <a href="#">耐風</a> › <a href="#">耐寒</a>
› <a href="#">耐衝撃</a> › <a href="#">耐熱</a> › <a href="#">耐光</a> › <a href="#">耐微生物・細菌</a> › <a href="#">耐引っ張り</a> › <a href="#">長期保存</a> › <a href="#">遮光</a>
› <a href="#">防汚</a> › <a href="#">防腐</a> › <a href="#">調光</a> › <a href="#">温度調節</a> › <a href="#">やすらぎ</a> › <a href="#">調湿</a> › <a href="#">断熱</a> › <a href="#">攻撃</a>
› <a href="#">生体組織制御</a> › <a href="#">撥水</a> › <a href="#">引掛け</a> › <a href="#">被覆</a> › <a href="#">休眠</a> › <a href="#">凝固阻止</a>

出所: ネイチャーテクノロジーデータベース (<http://www.naturetech-db.jp/searches/tags>)

### 3.1.5. 既存事例の体系化

収集した主な既存事例を、環境への効果での分類に沿って分類した例を以下に示す。

機能については、前出のネイチャーテクノロジーデータベースにおいて分類がなされているので、その分類に倣うこととした。

また、事例によっては、環境負荷の低減に直接的には寄与しないものもあると考えられるため、環境への効果の直接性（直接的／間接的）の軸も追加して分類を行った。

さらに、模倣の対象（構造を模倣したもの／現象・仕組みを模倣したもの）の区別についても、併せて記載した。

図表 10：環境への効果を軸とした既存事例の体系化例

	環境への効果が直接的	環境への効果が間接的
<b>低炭素</b> (温室効果ガス削減)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○サメの鱗 →船舶コーティング剤 (低抵抗で省エネ)</li> <li>○シロアリの巣 →住宅設計 (自然冷却で省エネ)</li> <li>■渦巻 →ミキサー、ファン (省エネ)</li> <li>○カワセミの嘴 →流線型構造物 (低抵抗で省エネ)</li> <li>■植物の光合成 →人工光合成 (創エネ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○モスアイ構造 →フィルム、光学材料 (無反射→高効率な太陽光パネル)</li> <li>■粘菌のネットワーク →都市間ネットワーク (頑強性と輸送効率のバランス)</li> <li>■魚群 →ロボット制御 (事故防止、高効率)</li> <li>■ゴキブリの移動 →昆虫ロボット (安定、高効率)</li> </ul>
<b>循環</b> (省資源・再利用)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○落葉の組織構造 →構造物の接合 (解体が容易)</li> <li>○蜂の巣の構造 →飛行機の構造材 (省資源)</li> <li>○生体高分子 →生分解性プラスチック (廃棄物削減)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○モルフォ蝶の翅 →繊維・光学材料 (発色、劣化しない→廃棄物削減)</li> <li>○ヤモリの指 →粘着テープ (接着、繰り返し使用可能→省資源)</li> </ul>
<b>自然との共生</b> (生態系保全)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■寄生バチの産卵習性 →生物農薬 (農薬使用低減)</li> </ul>	
<b>安全</b> (健康・環境リスク低減)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ハスの葉 →撥水材料 (防汚で水質汚濁低減)</li> <li>○カタツムリの殻 →外壁・タイル (防汚で水質汚濁低減)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ナガヒラタタムシの赤外受容細胞 →赤外線センサー (高感度、有害物質不使用)</li> </ul>

○: 構造を模倣したもの  
■: 現象・仕組みを模倣したもの

出所：各種情報より富士通総研作成

ハスの葉、ヤモリの指等、構造を模倣した事例と比べて、粘菌のネットワーク、魚群等の現象・仕組みを模倣した事例は、まだ実用化している事例が少ないように見受けられる。これは、機能が発現するメカニズムの解明が困難なことが関係していると考えられるが、現象・仕組みの模倣により、社会システムへの応用等、従来にはない変革につながる応用事例が生み出される可能性もあるため、今後、新規事例を創出していくことが期待される。

また、既存の事例では、単一技術の応用が多いが、これらを組み合わせることにより、相乗効果を発揮することも期待できるため、そのような組み合わせによる新規事例の創出も有効だと考えられる。

社会への効果の中で、自然との共生（生態系保全）に寄与する事例は、現状ではほとんど見当たらない。自然との共生を実現していくにあたっては、従来のような構造の模倣では限界があり、現象・仕組みの模倣が必要になると考えられる。

事例の中には、社会への効果について、同時に複数の効果をもつものもある。例えば、蜂の巣のハニカム構造を採用した飛行機の翼は、強度の増加により省資源化につながるとともに、軽量化により省エネにもつながると考えられる。したがって、データベースの作成においては、主たる効果、副次効果の整理が必要になる。

また、環境への効果としては直接的には寄与しない事例であっても、魚群ロボットのよう、渋滞の解消が低炭素化に大きく寄与することが考えられるようなものもあるため、環境への効果が間接的なものについては、その効果を分かりやすく示す必要がある。

### 3.2. データベースの作成

各事例について、以下の項目に関する情報を収集し、データベースを作成した。なお、「社会への効果（環境への効果）」については、前節で述べた通り、主たる効果と副次効果を区別して記載した。

#### 【対象項目】

- ヒントとしている生物や自然物・現象
- 応用されている機能
- 応用先
- 応用段階
- 社会への効果（環境への効果）
- 開発手法

図表 11：データベースのイメージ

No	ヒントとしている生物や自然物・現象	応用されている機能	応用先	応用段階	社会への効果		開発手法	事例の詳細
					主たる効果	副次効果		
1	蜂の巣	軽量化、高強度	飛行機の翼や壁、机の板、いすの座面、新幹線の床、人口衛星の壁など	商品化	循環（省資源）	低炭素（省エネ）	生物の構造から着想を得て、人工物に応用。	蜂の巣は、多くの筒が隣どうしくつつきあい、巣を作っている。筒の断面は六角形になっていて隙間無く敷き詰めることができ（ハニカム構造）、少ない材料で（＝軽い）広い面積を作ることができる。また、ハニカム構造は非常に丈夫である。

出所：各種情報をもとに富士通総研作成

以下に、収集した事例（重複を除き、計 311 件）を、環境への効果での分類に沿って分類した結果を以下に示す。なお、「低炭素」、「循環」、「自然との共生」、「安全」のいずれにも該当しないと思われる事例（医療応用、ナノマシン等）については、「その他」に分類した。

分類結果の傾向については、低炭素に寄与するものが最も多く、循環がそれに次ぐ。一方、自然との共生、安全に寄与するものは少ない。

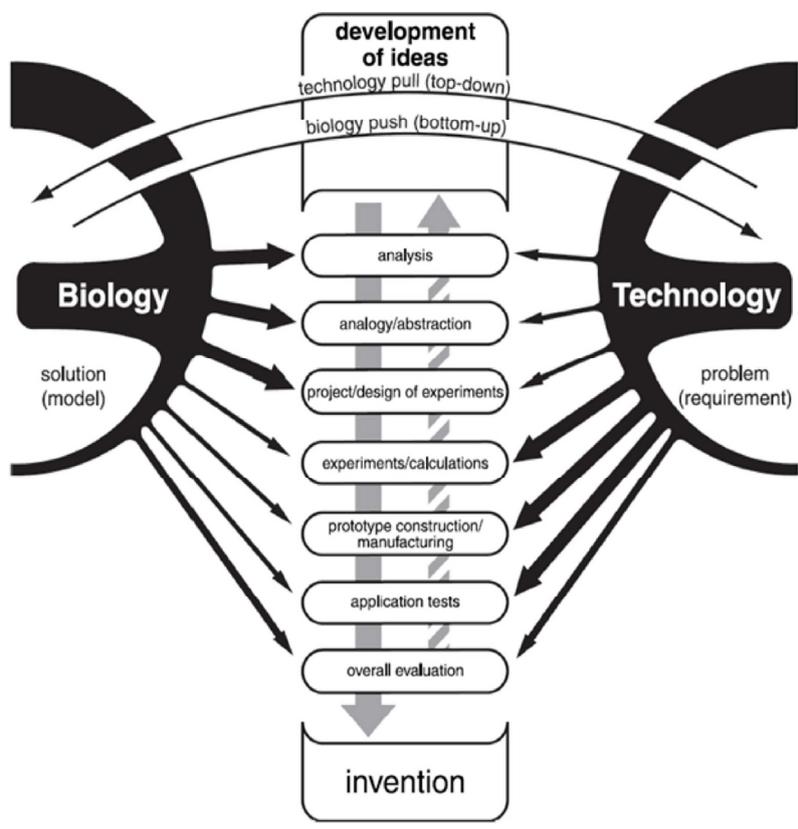
図表 12：環境への効果による分類結果（単位：件）

環境への効果	環境への効果が直接的	環境への効果が間接的	計
低炭素（温室効果ガス削減）	71	43	114
循環（省資源・再利用）	44	35	79
自然との共生（生態系保全）	16	6	22
安全（健康・環境リスク低減）	15	17	32
その他	64		64
計	311		

### 3.3. 一般的な開発手法の抽出・整理

バイオミメティクスの国際標準化を扱う ISO/TC266 において、バイオミメティクスにおける開発プロセスには、Biology push と Technology pull の 2 つのアプローチがあるという議論が行われている。前者は、特徴的な機能や構造を持つ生物にヒントを得て、それを模倣した材料等を開発するというアプローチであり、後者は、技術的な課題から出発し、その課題を解決可能な機能や構造を持つ生物を探索するというアプローチである。自然模倣技術・システムの開発手法も、大きくはこの 2 つに分類できるものと考えられる。

図表 13 : Biology Push と Technology Pull の概念図



出所 : ISO/TC 266/WG 1 Committee Draft

Biology Push と Technology Pull による具体的な開発過程については、以下のようなモデルが提示されている。

図表 14 : Biology Push と Technology Pull の開発過程

【 Biology Pushによる開発の過程】	【 Technology Pullによる開発の過程】
① 生物に関する分析	① 既存技術・製品の問題の抽出
② <u>アナロジー（生物学的モデル）</u>	② <u>アナロジー（生物学的モデルと技術対象系の類似性の検討）</u>
③ 抽象化（原理の抽出・一般化）	③ 抽象化（原理の抽出・一般化）
④ プロジェクト／実験計画	④ プロジェクト／実験計画
⑤ 実験／計算	⑤ 実験／計算
⑥ 最適化された原型構造／製造	⑥ 最適化された原型構造／製造
⑦ 応用テスト	⑦ 応用テスト
⑧ 総合評価	⑧ 総合評価
⑨ 発明	⑨ 発明

※Biology Push と Technology Pull で異なる過程について、下線を記した。

出所：細田奈麻絵「Biomimetic materials, structures and components (WG2)」バイオミメティクス研究会（2013年6月）をもとに富士通総研作成

なお、現在、ISO/TC266 において、バイオメティクス開発の定義について議論が行われているところであり、ISO/TC266 の定義によれば、いずれの開発手法においても、②アナロジー、③抽象化の過程が存在しない場合には、バイオメティクス開発とは認められない可能性がある。

## 4. 新規の自然模倣技術・システムを創出するための手法の検討及び新規事例の創出

### 4.1. 将来社会の課題と生活者ニーズの抽出

自然模倣技術・システムの応用により目指すべき将来社会を設定するために、既存の文献において描かれている将来社会の姿を調査し、整理した。また、生活者のニーズを把握するために、国民生活における価値観の変化の兆しについて、既存の文献をもとに調査した。

#### 4.1.1. 環境研究・環境技術開発の推進戦略

環境省の「環境研究・環境技術開発の推進戦略について」（2010年6月中央環境審議会答申）においては、世界の範となり、世界に貢献する我が国の「持続可能な社会」の将来像について、長期(2050年)及び中期(2020年)に分けて、以下のとおり整理している。

図表 15 : 長期 (2050 年) - 「持続可能な社会」としての我が国のあるべき姿

##### ○全般

- ・ 我が国の先進高度技術が世界の環境問題の改善に大きく貢献
- ・ 環境価値の内部化が進捗し、環境負荷低減努力が利益に結びつく仕組みが完成
- ・ 環境の観点からのまちづくり等により、生活の場が豊かに

##### ○脱温暖化社会

- ・ 世界全体の温室効果ガス排出量が大幅に削減（我が国単独では 80%減）され、将来にわたり悪影響のない水準で濃度が安定化する方向に進んでいる
- ・ 社会のあらゆる分野で、モノやサービスの製造時、使用時、廃棄時ともに低炭素化の考え方が導入されている
- ・ 日本では上記の考え方が、これまでのものづくりの優位性を活かし、更に最先端の技術を組み合わせたシステムとして実現していて、低炭素化で世界をリードする社会になっている
- ・ 大量消費に生活の豊かさを求める社会から脱却し、ライフスタイル・ワークスタイルの変革によって環境に配慮した低炭素で快適な暮らしが実現している
- ・ 地域ごとの特性を活かし、住民・企業・行政が一体となって、地域ぐるみ、まちぐるみで低炭素型の都市や地域が構築され、自然環境の活用等が進められている
- ・ 都市は低炭素型でコンパクトな、歩いて暮らせるまちとなっており、一方で近隣の農山漁村とも有機的に連携することにより、地域全体として環境保全機能が適切に発揮されている
- ・ さらに、我が国の有する環境・省エネシステム技術がアジアをはじめ世界の低炭素技術市場において競争優位にあり、世界レベルでの温室効果ガス排出量の削減に貢献している
- ・ 気候変動リスクの安定維持が相当程度進んでいる

○循環型社会

- 資源生産性・循環利用率が大幅に向上し、より少ない天然資源の投入で効率的経済効果が得られている
- アジア地域等を含め、資源循環システムが構築されている
- 循環資源に応じた適切な地域循環圏が構築されている
- マテリアルフロー総量の低減が図られている

○自然共生型社会

- 人と自然の共生が国土レベル、地域レベルで広く実現している
- 生物多様性が現状以上に豊かになっている
- 生態系サービスの恩恵が持続的に拡大している
- 国土利用、天然資源の利用が持続可能な形で行われている

○安全が確保される社会

- 人の健康や環境に対するリスク（公害、環境汚染等）が予防的に対応され、安心が確保されている

出所：環境省中央環境審議会「環境研究・環境技術開発の推進戦略について（答申）」（2010年6月）

図表 16：中期（2020年）－2050年のあるべき姿を念頭に置いた2020年の姿

○全般

- 50兆円超の環境関連新規市場、140万人の環境分野の新規雇用
- 我が国の環境技術がアジア等の環境問題の改善に貢献
- 持続可能な社会経済システムの研究成果が社会に実装

○脱温暖化社会

- 温室効果ガス排出量1990年比25%削減が実現されている
- 国民が正しい認識を持つと同時に、炭素の価格付け等の政策によって、再生可能エネルギー等低炭素技術が爆発的に普及している
- エネルギー需要側での省エネが大幅に進んでいる
- 低炭素社会に向かうという政策の方向付けが明確になされ、革新的な低炭素技術の開発や低炭素社会インフラの整備、まちづくり等長期間を要する対応策が長期目標の実現に向かって確実に進展している
- 我が国の環境技術の活用により、世界の温室効果ガス排出量が大幅に削減されている
- 気候変動リスクの把握方法及び評価が進展している。

○循環型社会

- 資源生産性・循環利用率が向上し、最終処分量が減少している

- 資源循環性の向上、リサイクルの質的向上がなされている
- 廃棄物からの熱回収が大幅に進展している
- レアメタル等希少資源の回収・リサイクルシステムが社会に実装されている
- ごみ処理量の削減、処分場逼迫の打開、不法投棄対策がなされている

#### ○自然共生型社会

- 生物多様性の状況を科学的知見に基づき分析・把握が行われている
- 都市や二次的自然も含め、地域に固有の動植物や生態系が地域の特性に応じて保全されている
- 生態系ネットワークの形成を通じて国土レベルの生物多様性を維持・回復がなされている
- 遺伝資源に係る国際的合意に向けての基礎的整理がなされている
- 生物多様性を減少させない方法を構築し、国土や自然資源を持続的に利用している
- 生態系サービスの恩恵に対する理解が社会に浸透している
- 生物多様性の保全と持続可能な利用が社会経済活動の中に組み込まれている
- 都市住民が農山村部等の環境保全の取組を支えるなど、多様な主体が新たな活動を実践している

#### ○安全が確保される社会

- 化学物質が人の健康と環境にもたらす著しい悪影響を最小化する方法で使用、生産されるという、「WSSD2020年目標」を達成されるべく以下の項目が実施されている
- 人の健康や生態系に与えるリスクが総体的に把握され、大きなリスクが取り除かれる
- 他の領域に係る環境問題の増大や、それらの解決を目指す新技術の開発・普及等に伴って増大又は発生が危惧されるリスクの低減が図られている

出所：環境省中央環境審議会「環境研究・環境技術開発の推進戦略について（答申）」（2010年6月）

#### 4.1.2. 2050年日本低炭素社会シナリオ

「2050年日本低炭素社会」プロジェクトチーム（国立環境研究所・京都大学・立命館大学・東京工業大学・みずほ情報総研）が2007年2月に発表した、「2050年日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス70%削減可能性検討」では、2050年に考えられる日本社会のシナリオとして、活発で回転の速い経済発展・技術志向のシナリオAと、ゆったりでややスローな地域重視・自然志向のシナリオBを想定している。

図表 17：2050 年の日本：国土・都市のシナリオ

キーワード	シナリオ A	シナリオ B
国内人口移動 人口減少社会の 下あらゆる地域 で人口減少	都市居住選好志向や利便性・効率性の追求から都心部への人口・資本の集中が進展	ゆとりある生活を求めて、都心から地方・農山村への人口流出が進み、人口や資本の分散化が進展
都心部		
中心	土地の高度利用（高層化、地下化）が進む。職住近接が可能になり、郊外から利便性が高い中心部に移り住む人々の比率が増加。	自らのライフスタイルに合った地域に移り住む人が増加し中心部の人口減少。首都など主要都市においては適正な規模と密度が維持されており、過度なインフラ投資は行わない。
郊外	都心部へ人口が流出するが、計画的で効率の良い都市計画により、アミューズメント施設や自然共生地を適切に配置。	地方への人口・資本流出が大幅に進む。この結果、都市部郊外というよりは独立性高い都市としての再生が図られる。
地方都市		
中心	人口が大幅に減少するため、中核都市としての機能を果たせない都市が増加するが、土地や資源を利用したビジネス（大規模農業、発電プラント等）の拠点として再生される都市も現れる。	地方においても十分な医療サービスや教育を受けることが可能になり、人口の減少がある程度抑制される。地域の独自性や文化が前面に出され、活気ある地方都市が数多く現れる。地域社会の意思決定の過程には、NGO や市民が積極的に参加し、理想の地域を自ら作る意欲に満ち溢れている。
農地・山間	農地、山間部においては過疎化が進展し、人口が大幅に減少する。地域の特性に応じた、土地や資源の効率的な利用に向けた取り組みが進められる。農業・林業・漁業などは民間会社などによって大規模経営され、機械化などによって大幅に省力化される中、ヒト・モノ・カネといった資源の効率的な利用が進む。一方で、国立公園に指定される地域も増加する。	農林水産業に対する魅力性が高まり、農村や山村、漁村への人口回帰が進む。低い地価を利用した個人・地域経営のもと、工夫を凝らした「おもしろい」一次産業を営む人も現れる。農業を職業として営む人のみならず、自然が豊かな地域に自宅とオフィスを構え、SOHO によって収入を得ながら、自ら家庭菜園を営み、おいしく、安全な食と健康的な生活を求める家族も現れる。

出所：「2050 日本低炭素社会」プロジェクトチーム 「2050 年日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討」（2007 年 2 月）

#### 4.1.3. 環境未来都市構想

「環境未来都市」構想は、都市をエンジンとして、環境、高齢化対応、経済・社会の活性化という人類共通の普遍的課題について、問題認識の共有、課題設定の普遍化、解決の枠組みを考えることが極めて重要であるとの認識から、2010 年 6 月 18 日に閣議決定された「新成長戦略」の 21 の国家戦略プロジェクトの一つとして位置付けられたものである。特定の都市・地域を環境未来都市として指定し、そこで、環境や超高齢化等の点で優れた

成功事例を創出するとともに、それらを国内外に普及展開することで、需要拡大、雇用創出等を目指している。また、これにより、地域の活性化を実現し、我が国全体を持続可能な経済社会へと変革することも目指している。

「環境未来都市」構想の基本コンセプトは、「環境・超高齢化対応等に向けた、人間中心の新たな価値を創造する都市」を実現すること、すなわち、我が国及び世界が直面する地球温暖化、資源・エネルギー制約、超高齢化対応等の諸課題を、持続可能な社会経済システムを構築しつつ、また社会的連帯感の回復を図りながら解決し、新たな価値を創造し続ける「誰もが暮らしたいまち」「誰もが活力あるまち」を実現し、人々の生活の質を高めること、と掲げられている。持続可能な経済社会を実現するためには、環境、社会、経済という3つの側面が不可欠であるとし、「誰もが暮らしたいまち」「誰もが活力あるまち」は、3つの側面が一定以上の水準で満足されていることを前提として、よりイノベティブにこれら3つの側面から価値が創造される都市と定義されている。

図表 18：「環境未来都市」構想の基本コンセプト



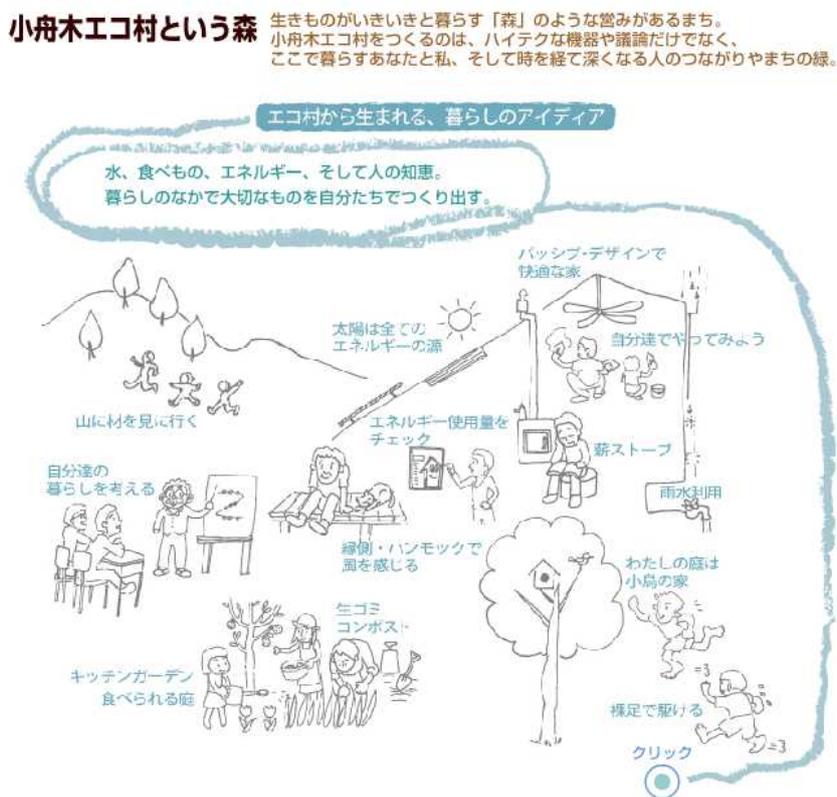
出所：環境未来都市 公式サイト (<http://futurecity.rro.go.jp/>)

#### 4.1.4. 近江八幡市 小舟木エコ村

人と人、人と自然のつながりを大切にする暮らしを育むフィールドであるエコ村は、2000年、滋賀県の団体や大学、企業などが参加した NPO「エコ村ネットワーク」(のちに法人化)の誕生をきっかけに、持続可能な社会のモデルとしてその構想が進められることとなった。2003年には、内閣官房都市再生本部「環境共生まちづくり事業」に、滋賀県近

江八幡市の小舟木町にエコ村を建設する「小舟木エコ村プロジェクト」が採択されている。本事業を推進するにあたり、小舟木エコ村の事業化のため、「株式会社地球の芽」が設立されるとともに、行政や地域の関係者が参画するまちづくりの推進組織「小舟木エコ村推進協議会」が設立された。小舟木エコ村は地球の芽が開発主体となり 2007 年 1 月に着工、2013 年 1 月 1 日現在で 318 世帯が入居している。また、環境省は平成 21 年度補助事業として、ライフサイクル全体で環境負荷低減が可能な住宅設計手法を活用したエコハウスのモデルハウスを全国 20 地域に整備し、これを活用したエコハウス普及活動を実施。滋賀県近江八幡市の提案する「21 世紀環境共生型住宅普及活動事業（湖国エコハウス地域普及事業）」はその対象事業のひとつに選定され、小舟木エコ村推進協議会がその運営に当たっている。

図表 19：小舟木エコ村

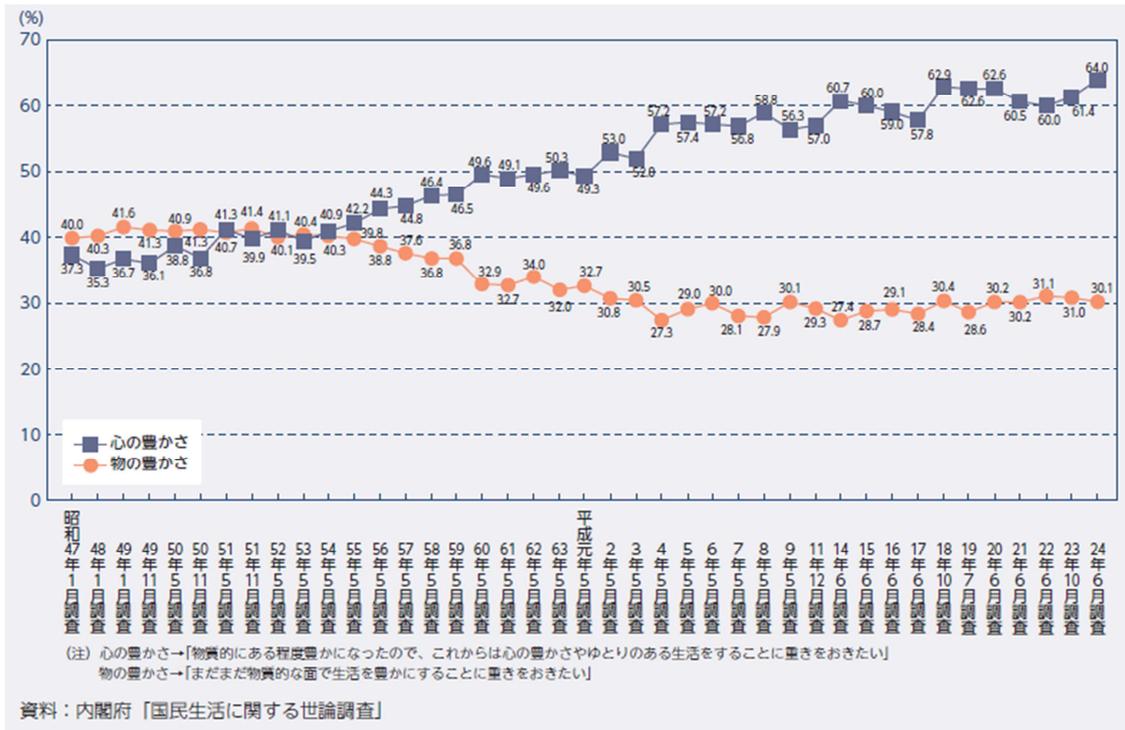


出所：小舟木エコ村公式サイト (<http://kobunaki-ecomura.com/>)

#### 4.1.5. 国民生活における価値観の変化の兆し

内閣府の「国民生活に関する世論調査」では、「今後の生活において心の豊かさと物の豊かさのどちらを重視するのか」を質問しているが、平成 24 年度の調査結果では、「物質的にある程度豊かになったので、心の豊かさやゆとりのある生活に重きをおきたい」とする人の割合が 64.0%と過去最高になり、「まだまだ物質的な面で生活を豊かにすることに重きを置きたい」とする人の割合 (30.1%) を大きく上回った。

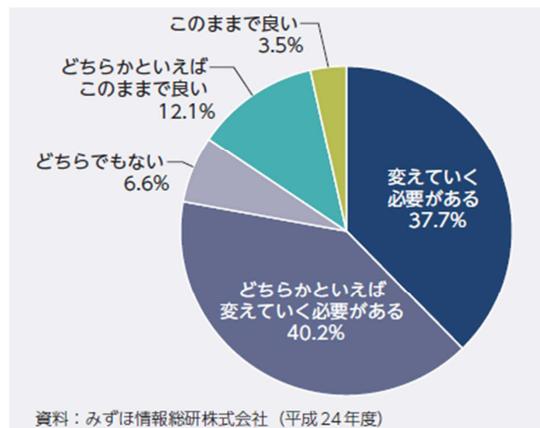
図表 20：今後の生活において重視する豊かさ



出所：平成 25 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書

また、平成 24 年度に環境省が行った調査では、「これまでの大量生産・大量消費型の経済に対する意識」を調べており、「変えていく必要がある」「どちらかと言えば変えていく必要がある」と回答した人の割合が約 80%と高い結果となっている。

図表 21：大量生産・大量消費型の経済に対する意識



出所：平成 25 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書

#### 4.1.6. 将来社会のコンセプト、キーワード

既存の文献等で想定されている将来社会の姿のコンセプト、キーワードを抽出し、整理した。

##### 【エネルギー・資源】

- 地域・家庭でのエネルギーの自給、効率的な利用
- 地域の面的なエネルギー利用
- 自産自消
- クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会
- 時間・場所の制限を越えた、エネルギーの効率的な流通が実現される社会
- エネルギーを賢く消費する社会
- 統合的循環系システム

##### 【インフラ（構造物 等）】

- 想定を超える災害に対して、安全・安心な都市環境
- インフラのトータルライフサイクルコストが最小化されている社会

##### 【交通】

- 歩くことを基本とした都市設計、徒歩や歩行支援ビークルによる移動
- 徒歩圏内で各施設が近接している都市設計、職住近接設計、コンパクトシティ
- すべての生活者に一定の移動手段（個別交通（パーソナルモビリティ）、公共交通）が提供された社会
- 任意の場所に誰もが安全に高速で移動できる社会（自動運転）
- ヒトやモノが安全・快適に移動することのできる社会
- 人口減少に応じた土地利用の再整理

##### 【コミュニティ】

- 高齢者の地域社会への積極的な参加
- 二世帯以上で介護・育児で助け合う家庭
- 地域コミュニティや共通テーマのコミュニティが連携して助け合う社会
- 住民が参加意識を持てる都市経営

##### 【自然との交流】

- 人と自然が共生する社会
- 身近に自然が感じられる都市設計

##### 【ワークスタイル】

- 時間・場所にとられない柔軟な働き方ができる社会

##### 【価値観】

- （大量生産・大量消費ではなく）人々の生活の質や精神的な豊かさの向上を目指す社会

### 【地域資源 等】

- 世界に冠たる高品質な農水産物・食品を生み出す豊かな農村漁村社会
- 観光資源等のポテンシャルを活かし、世界の多くの人々を地域に呼び込む社会
- 地域内での食料の自給

## 4.2. 技術的制約の抽出

2012年に国連が発表した報告書では、気候変動と環境破壊が予想以上に加速しており、地球は既に限界点であるとの警告が発せられた。国連環境計画（UNEP）のアヒム・シュタイナー事務局長は記者会見で、人類はもう「生き方を変える」より他に選択肢がない地点に来た、と述べたと報じられている。

図表 22：国連報告「地球は既に限界点」

<p><b>国連報告「地球は既に限界点」</b></p> <p>UN warns environment is at tipping point 気候変動と環境破壊は予想以上に加速しており、もう後戻りできないかもしれない</p> <p>地球の気候変動が臨界点に近づいていると、国連が最新の報告書で警告した。</p> <p>約 600 人の専門家が携わり 3 年をかけてまとめられた報告書は 525 ページに及ぶ。専門家らは地球の未来について極めて暗い見通しを示した。北極などの氷床の融解、アフリカの砂漠化、熱帯雨林の森林破壊が、私たちが想像しているよりはるかに急速に進行していると指摘した。</p> <p>歴史的に見れば、氷河期など地球に突然大きな気候変動が訪れたことはある。だが専門家らは今回の気候変動は自然要因のものではなく、人為的な要因によるとみている。人間活動に伴う温暖化ガスの排出などが変動を加速し、影響は地球の生態系の破壊にまで及んでいるという。</p> <p>ネイチャー誌に掲載された報告書の要約にはこう書かれている。「人為的要因により、気候変動が限界点に迫っている、または既に限界点を越えてしまった地域がいくつもある。一度限界点を越えると、もう元には戻せない変化が起こり始め、地球上の生命体も影響を受けるだろう。人間の生活や健康にも大きな悪影響を及ぼす可能性がある」</p> <p>「今世紀の終わりまでに、この地球が現在とはまったく異なる環境になっている可能性は極めて高い」と、報告書に携わった専門家の 1 人、アンソニー・バーノスキーは科学ニュースサイト「ライブサイエンス」に語った。</p> <p><b>人間が生き方を変えるしかない</b></p> <p>「窮地に追い詰められた」人間は、環境の変動に適応するために急激な生活の変化を余儀</p>
--

なくされるだろうと、バーノスキーは言う。ただし生活の変化には「相当の困難を伴うため、政治紛争や経済危機、戦争や飢餓が起きやすくなる」

科学者たちは希望を失ったわけではない。国連環境計画（UNEP）のアヒム・シュタイナー事務局長は記者会見で、今回の報告書を「告発」として受け止めるべきだと語った。

「この報告書で指摘されているように私たちは無責任な時代を生きている。（この種の報告書が初めて発表された）1992年にも、将来起こり得る変動が指摘された。それから20年後に発表された今回の報告書では、予測された数々の現象が現実になったことが証明された」

人類はもう「生き方を変える」より他に選択肢がない地点に来たのだと、スタイナーは続けた。「針路を変えることは可能だ。違う方向に向かうことはできるはずだ」

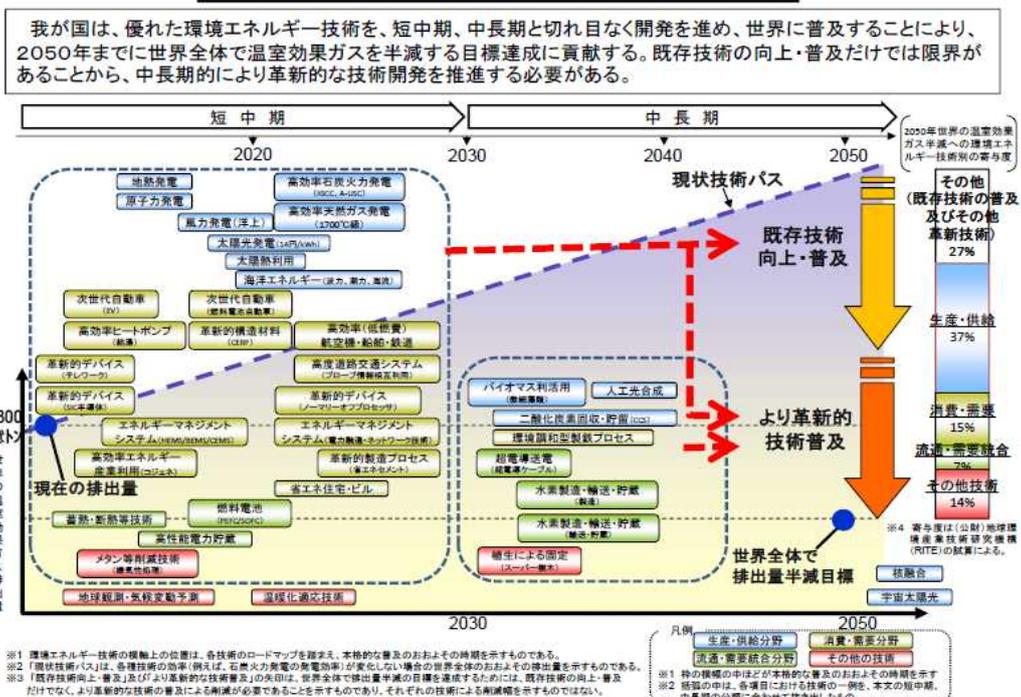
出所：ニューズウィーク日本版 2012年6月8日

(<http://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2012/06/post-2575.php>)

また、2013年8月に総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画に関する懇談会（第4回）において示された「環境エネルギー技術革新計画（改訂案）」では、2050年までに世界全体で温室効果ガスを半減する目標達成に貢献するために、既存技術の向上・普及だけでは限界があるため、中長期的により革新的な技術開発を推進する必要があるとしている。

図表 23：環境エネルギー技術革新計画（改訂案）

我が国の環境エネルギー技術の世界への貢献



出所：総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画（改訂案）」（2013年8月）

### 4.3. 新規事例の創出手法の検討

#### 4.3.1. 検討の方向性

既存事例の収集・体系化の結果を踏まえ、以下の3つの方向性で新規事例の創出手法を検討した。

①既存技術の新規適用領域の探索

- 既存の自然模倣技術・システムの事例で用いられている技術の新規適用領域を見出すことで、新規事例を創出する。

②既存事例の組み合わせ

- 既存事例の多くは単一技術の単一製品への応用であることから、既存事例を組み合わせ、新規事例を創出する。

③生物の原理の応用

- 既存事例の多くはかたち・構造の模倣に留まっていることから、その背景にある生物の原理からインスピレーションを得ることで、新規事例を創出する。

#### 4.3.2. 既存技術の新規適用領域の探索

事例収集で収集した既存事例で用いられている技術の価値を抽出する。次に、目指すべき将来社会から社会システムを抽出、技術の提供先としてその中の要素を抽出する。そして、技術の提供価値がどの要素において有効かを網羅的に洗い出す。

図表 24：既存技術の新規適用領域探索のイメージ

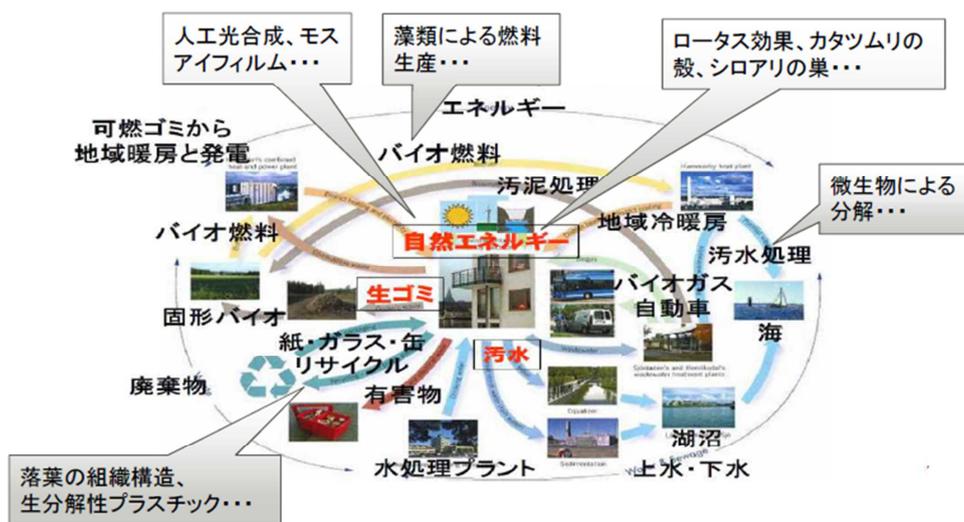


出所：富士通総研作成

### 4.3.3. 既存事例の組み合わせ

対象とする社会システムの各要素に既存事例の技術を当てはめていき、その組み合わせを考える。以下に、統合循環システムを対象とした例を示す。

図表 25 既存事例の組み合わせのイメージ

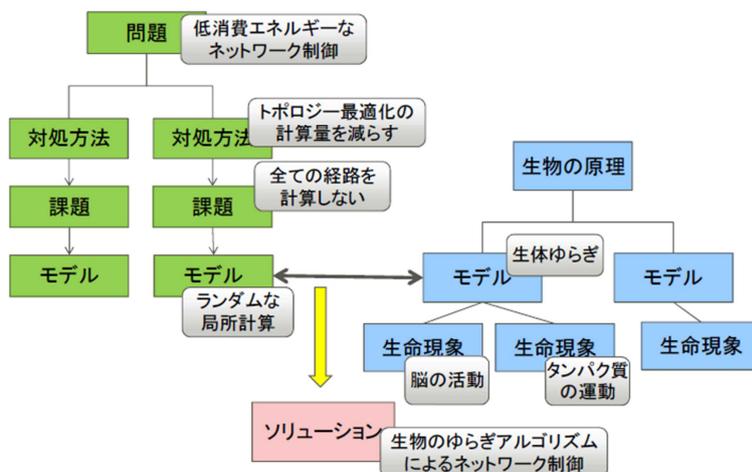


出所：水口哲（博報堂）「世界は環境未来都市へ」環境未来都市評価・調査検討会 第1回資料（2011年8月）に富士通総研加筆

### 4.3.4. 生物の原理の応用

問題を分解、抽象化し、生物現象のモデルとぶつける。以下に、生物のゆらぎアルゴリズムを応用したネットワーク制御の例を示す。

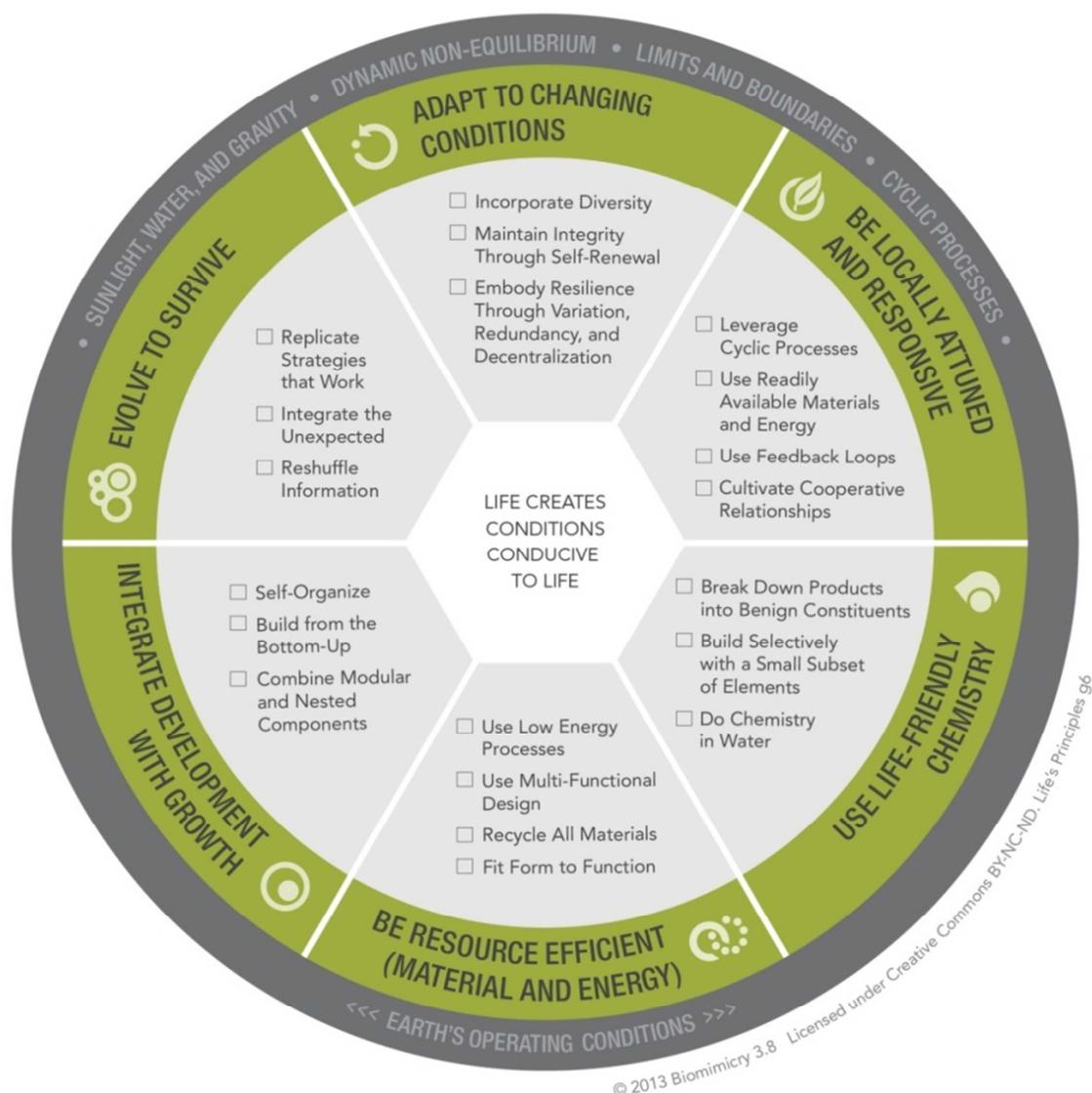
図表 26 生物の原理の応用のイメージ



出所：各種情報をもとに富士通総研作成

発想のもととなる生物の原理を整理したものとしては、米国の Biomimicry3.8 が作成している “Biomimicry Lens” がある。

図表 27 : Biomimicry Lens



出所 : Biomimicry3.8 (<http://biomimicry.net/>)

Biomimetic Lens では、生命の原理 (Life's Principles) を、①Evolve to survive [生き残るために進化する]、②Adapt to changing conditions [変化する状況に適応する]、③Be locally attuned and responsive [ローカルに適応して反応する]、④Integrate development with growth [発展を成長と統合する]、⑤Be resource efficient(material and energy) [資源 (材料とエネルギー) を効率的に使う]、⑥Use life-friendly chemistry [生体にやさしい化学を使う] の 6つのカテゴリーに分けて整理している。

- ①Evolve to survive [生き残るために進化する]
- ・ Replicate strategies that work (うまくいった戦略を繰り返す)
  - ・ Integrate the unexpected (想定外を統合する)
  - ・ Reshuffle information (情報を入れ替える)
- ②Adapt to changing conditions [変化する状況に適応する]
- ・ Incorporate Diversity (多様性を包含する)
  - ・ Maintain Integrity through Self-Renewal (自己再生を通じて完全な状態を維持する)
  - ・ Embody Resilience through Variation, Redundancy, and Decentralization (変異、冗長性、分散化により復元力を具現化する)
- ③Be locally attuned and responsive [ローカルに適応して反応する]
- ・ Leverage Cyclic Processes (サイクリックプロセスを利用する)
  - ・ Use Readily Available Materials and Energy (容易に手に入る材料とエネルギーを使う)
  - ・ Use Feedback Loops (フィードバックループを使う)
  - ・ Cultivate Cooperative Relationships (共生関係を深める)
- ④Integrate development with growth [発展を成長と統合する]
- ・ Self-organize (自己組織化)
  - ・ Build from the Bottom Up (ボトムアップで作る)
  - ・ Combine Modular and Nested Components (モジュラー構造や入れ子になった構成要素を組み合わせる)
- ⑤Be resource efficient(material and energy) [資源(材料とエネルギー)を効率的に使う]
- ・ Use Low Energy Process (低消費エネルギーなプロセスを使う)
  - ・ Use Multi-functional Design (一つのデザインで複数の機能を満たす)
  - ・ Recycle All Materials (全ての材料をリサイクルする)
  - ・ Fit Form to Function (形態を機能に適合させる)
- ⑥Use life-friendly chemistry [生体にやさしい化学を使う]
- ・ Break Down Products into Benign Constituents (無害な物質に分解する)
  - ・ Build Selectively with a Small Subset of Elements (少ない要素で選択的に作り上げる)
  - ・ Do chemistry in water (水で化学反応を行う)

発想のスタートとしてこれらを利用することができるが、具体的な応用に結びつけるためには、生命現象やそれをモデル化したものの整理が必要になると考えられる。

#### 4.4. 新規事例の創出

##### 4.4.1. 新規事例の創出についてのヒアリングの概要

新規事例の創出に向けて、自然模倣技術・システムの注目技術や生物シーズ、生物学の知見の社会システムへの応用についての現状や考え方についてヒアリングを行った。調査実施時期は、2014年1月16日～2014年2月25日、ヒアリング対象者は以下の通りである。

図表 28：ヒアリング対象者

区分	氏名、企業名	所属、業種 等
有識者 (生物学)	松浦 啓一 氏	独立行政法人国立科学博物館 名誉研究員
	長谷川 眞理子 氏	総合研究大学院大学 先導科学研究科長・生命共生体進化化学専攻 教授
有識者 (イノベーション論)	妹尾 堅一郎 氏	特定非営利活動法人産学連携推進機構 理事長 一橋大学大学院 (MBA) 客員教授
企業	A社	自動車メーカー
	B社	情報通信業
	C社	建設業
	D社	電機メーカー
	E社	電機メーカー
	F社	住宅設備メーカー

##### 4.4.2. ヒアリング結果

以下に、ヒアリングで得られた主な意見を整理した。

###### ① 注目技術、生物シーズについて

自然模倣技術・システムには、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションがある。生物を模倣した製品を従来工学的につくると大きなエネルギーを使うので、なぜ生物が省エネで形態形成ができるか（多くは自己組織化）を考え、プロセスイノベーションを目指すべきではないか。（妹尾氏）

生物の構造でなくそれがつくられるプロセスを模倣することについて、現状は、生物の自己組織化によるものづくりを人間の材料のオーダーで模倣するのは時間や大きさなどの制限があるため難しい。メートルサイズになると制御するのにエ

エネルギーがかかる。また、時間のオーダーも異なる。例えば、昆虫は1年程度の寿命だが、我々は80年もたせないといけない。ただし、ものづくりのプロセスを常温で成し遂げる生物に学ぶことは重要である。(住宅設備メーカーF社)

ロータス、ゲッコーの次が出ることを認識してもらおうとよいのではないか。例えば、3D関連技術との融合等を含め、次世代イメージをつくってはどうか。(妹尾氏)

例えば、上海交通大学の先生が、植物の葉脈を模倣したものを3Dプリンタで製作しているというのを聞いた。つまり、葉脈は単位面積当たり最も効率よく水を蒸散させる構造になっているので、葉のコピーをとれば、熱を最も効率よく発散させる冷却水の流路ができるという発想である。(電機メーカーD社)

生物の形態のデータベース化はこれまで難しかったが、可能になってきている。CTスキャン画像の3次元再構成により、非破壊的に構造を調べることもできるようになってきている。(松浦氏)

生物の構造に関する研究は行われているが、表面構造の研究にとどまっており、まだまだ不十分だと考えている。構造は、模倣もしやすいのでスタートポイントとして良いだろう。例えば、植物の内部構造(木の枝、茎等)は、数10mもの高さまで水を輸送できるという点で面白い。

動きに着目した生物模倣も少ない。応用できれば省エネ等につながると思う。感覚系(可視光以外の光を捉える仕組み、昆虫の複眼等)や生物の社会構造(魚類、ミツバチ等)の応用もまだ少ない。例えば、粘菌が栄養を求めて形成するネットワークを効率的な都市間ネットワークに応用する等。(松浦氏)

かたちの模倣もあるが、生物システムの原理を考えるというのもあると思う。例えば、バリエーション、冗長性、トレードオフ等。生物システムでどのレベルでもあると思うのは、トレードオフ。人間がつくる社会システムや工学でもそうだが、負の側面は言及されない。トレードオフを念頭に議論する必要がある。(長谷川氏)

進化は出たところ勝負で、目先の利益しか考えていない。各世代で生存に適した形質が残ってきた。また、生物は「どんぶり勘定」なところがあり、必ずしもうまくいっているわけではない。例えば、ヒトは、二足歩行をするようになったため、腰痛をかかえるようになった。(長谷川氏)

センシングに注目している。昆虫が何を見ているか、鳥がどのように方位を感じているかといった知見は、自動車の制御等に使えるかもしれない。しかし、メカニズムが分からない。(電機メーカーE社)

センサーが課題であるので、バイオミメティクスに基づく手法を研究してほしい。人間の知覚をカメラで置き換えるのは難しく、例えば、人間の眼は周辺の画素は少ないが、周辺視もできるのに対し、カメラは平均的に画素を配分するので、メガピクセルよりオーダーが一つ増える。(自動車メーカーA社)

システムとしての生物模倣が重要。例えば、複眼をセンサーに応用するという例はあるが、運転アシストはセンシングして車を動かすところまでがセットなので、センサーでどのように情報を知覚し、それがどのように行動につながるかという情報のセットがほしい。(自動車メーカーA社)

環境負荷を下げるという点で一番悩んでいるのは、複合材料をいかに簡単にバラバラにして再利用できるようにするか。ものをつくる時にエネルギーをかけることよりも、ライフサイクルの長いものを捨てていることの方が問題。トータルで見るとリユースするのが最もエネルギーが低い。複合材料は分解できなかったり、できたとしても手間ひまがかかるので、可逆性のある生物の接着が応用できるとよい。(住宅設備メーカーF社)

社内の研究会で話題に上がったのは、粘菌のネットワーク。クラウドを研究している人が興味を持っていた。(電機メーカーE社)

「自然模倣技術・システム」の「システム」とは何を指しているのか。自然の生態系、社会の生態系、思考の生態系等いろいろな生態系がある。その関係を整理し、本質的な哲学的背景をしっかりと押さえておく必要がある。(妹尾氏)

機能形態だけでなく、生物の行動に学び、そこから社会やビジネスのあり方へのヒントが得られるとインパクトが大きいだろう。たとえば、事業や産業について、成長 (growth) と発展 (development)、進化 (evolution)、あるいは生態系といったメタファーを使って検討することが有効だ。セコンドサイバネティックス等の議論も、ここに入ってくるだろう。その意味で、自然模倣技術・システムには「生物規範工学」と共に、「生物隠喩実学」というようなメタファーの活用領域もあるのではなかろうか。つまり、自然模倣技術・システムの基礎概念を体系付け、理論化・モデル化する段階に来ているのではなかろうか。(妹尾氏)

生態系にはいろいろな生物がいて、相互作用の中でそれぞれが機能を果たしている。最近、それが冗長である、つまり、同じ機能を持っている種が複数いることで、生態系のレジリエンスが実現されていることが分かってきた。これは、テクノロジーだけでなく、縦のつながりのみで横のつながりがない組織は脆い等、人間の組織のつくり方の教訓にもなるだろう。(長谷川氏)

工学や法学の人と話をすると発想や知識が異なると感じるので、例えば、社会性昆虫の社会をそのまま人間の社会に例えるというのはあやうい。もっと原理的なところにいった方がよいのではないか。例えば、多細胞における分業とコミュニケーション等。見えていることそのままでもなく、生物システムがうまくいっている例を見つけて、そこから原理を抽出して応用すると理解しやすいし、間違わない。(長谷川氏)

突然変異でうまくいくものが出てきたら、自然淘汰でひっかかっていく。それが成り立つためには大量の変異が必要。何でもありのバリエーションを豊富に保っておかないと変化は起こらない。技術開発においても、ある方向で考えようというやり方で画期的な技術が開発されたことはない。バリエーションが許されていることが大事だが、日本はバリエーションを許容する部分が弱い。(長谷川氏)

## ② 社会システムへの応用について

生物学の知見を応用した情報通信機器の制御技術は、センサーネットワークやスマートグリッド、クラウドの資源最適化にも応用できる可能性がある。(情報通信業 B 社)

ICT の分野で生物学の知見を活用した技術はあまり聞かない。そのような研究はまだあまり行われていないのではないか。(情報通信業 B 社)

行動・現象の模倣はあまり議論できていない。交通システム、情報システムへの応用はなかなか難しい。(電機メーカー E 社)

生物が 38 億年もの間、地球上にいられたのは、エネルギーと物質を循環させてきたから。ところが、人間は自分たちのエネルギー源をもってしまった。無尽蔵に掘るのでなく、循環できるモデルをつくり、それを具体化する必要がある。(長谷川氏)

これまでの自然と人工物の共存は工学的な発想で考えられている。従来の環境

工学はいかに人間が快適に過ごせるかしか考えておらず、生物多様性を保つという視点が入っていない。(長谷川氏)

当社は、自然的なメカニズムを活かした都市構想を、複合価値をどうマネジメントするかという視点で提言している。技術は理学的、工学的には単体技術毎に捉える方が簡単だが、人類や地球や都市や人々に対しては、技術は「複合商品」となり、求められる結果は「複合効果」や「複合価値」だと考えている。

CO2削減、省エネ、廃棄物処理、食糧自給、水資源、運輸交通といったグリーンの各要素が相反することもあるので、最終的にグリーンになるように単体技術をつなげることにこだわりを持っている。(建設業C社)

デバイスや機械と同様に、経済や社会も自然的なメカニズムであることがリンクしないといけない。非常にエコなビルを建てても、ハードが素晴らしくても利用の実態が乖離しては意味がない。(建設業C社)

#### 4.4.3. 新規事例の創出についてのまとめ

ヒアリングでは、自然模倣技術・システムの次世代イメージとして、3Dプリンティング、自己組織化が挙げられた。企業からはセンサーへの応用が今後期待する領域として挙げられた。また、工学応用に留まらず、事業や産業と結びつけて、社会やビジネスのあり方へのヒントを得るという活用方法もあり得ることが示唆された。

社会システムへの応用は一部において取り組まれ始めたところである。ヒアリングからは、要素技術の組み合わせによる複合価値の形成の必要性が示唆された。

3Dプリンティングについては、海外においてもバイオミメティクスと親和性のある技術として注目されている。2013年6月にアメリカのボストンで開催されたBiomimicry3.8第1回国際会議においては、マサチューセッツ工科大学(MIT)メディアラボのNeri Oxman助教が研究するMaterial Ecologyが紹介された。これは、自然界で見られるエネルギーが低い生産プロセスや資源循環をモデルにしたプロダクトをつくる試みである。そのツールとして、3Dプリンティングが数種類の材料で多様な機能を生み出せることができる点、出力された製品は容易にアップサイクルできる点等の特徴が生物の生産技術体系と類似していることから、新しい生産手法として大きな関心が寄せられていたことが報告されている。

16

また、自己組織化については、東北大学原子分子材料科学高等研究機構の下村研究室において、リソグラフィー等の従来技術を使わずに、結露現象のみで、ハニカム構造を1工

---

<sup>16</sup> 星野敬子「バイオミメテックリー海外動向とアスクネイチャー・ジャパンの活動」バイオミメテックス研究会要旨集(2013年11月)

程で作成する技術が開発されている。多少有機溶媒を使うものの、基本的には水を中心とした反応系で作成することができ、様々な用途展開が期待できる。

3Dプリンティングや自己組織化は、既存事例において主流である構造の模倣から、その構造をつくるプロセスまで模倣していくという点で、今後の自然模倣技術・システムの技術開発の方向性と言えるだろう。今後は、これらの方向性を深掘りし、具体化なテーマに落としていく必要がある。

## 5. 自然模倣技術・システムを実社会へ応用するための手法の検討

### 5.1. 実社会への応用に向けた問題の整理

第3章「自然模倣技術・システムの事例の体系化及びデータベース等の作成」を踏まえると、社会応用につながるであろう多くの生物シーズが挙げられている一方で、実用化されている事例は少ないように見受けられる。そこで、まず、自然模倣技術・システムを実社会へ応用する上で問題と考えられる点を整理することとした。

下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流」<sup>17</sup>によると、日本においてバイオミメティクスの研究が台頭しにくい理由として、産学連携が進んでいないことや、研究者を支える仕組みとしての博物館の関与やネットワーク形成の取組みが盛んでないことなどが指摘されている。さらに、事業化にあたっては、商品・サービスが利用者に受け入れられることも必要と考えられることから、本節では、「大学」、「企業」、「利用者」、「支える仕組み」のそれぞれについて、基礎研究から事業化までのプロセスで生じると考えられる問題を抽出、整理した。その結果を図表 29 に示す。

大学については、基礎研究のフェイズでは、生物の機能が発現するメカニズムが解明できていない、応用研究のフェイズでは、生物学者と工学者の連携がうまく進まない、自然模倣技術を教える学科やコースがなく、両方の素養をもつ人材が不足していることが挙げられる。

企業については、応用研究のフェイズでは、そもそも自然模倣技術について知らない、知ってはいるもののビジネスにつながるかどうかが見えない、研究に着手したくても社内に生物学の知識を持つ人材がいない、若しくは、バイオミメティクス関連の研究者にどうアクセスしてよいか分からないことが挙げられる。また、実用化のフェイズでは、生物を模倣することにより、必要な性能が満たせない、コストや環境負荷が上がる等の影響が挙げられる。さらに、事業化のフェイズでは、バイオミメティクス製品の認証に関連して、認証制度がないために粗悪品が健全な市場成長を妨げる可能性がある、認証制度があっても自社の商品が認証を得られず不利益を被ることが挙げられる。

利用者については、応用研究のフェイズでは、利用者のニーズが企業側にうまく反映されていない、事業化のフェイズでは、自然模倣技術の認知度が低い、環境配慮や自然模倣の商品の訴求力が弱いことが挙げられる。

支える仕組みについては、基礎研究のフェイズでは、博物館のネットワークが海外に比べて弱い、応用研究のフェイズでは、自然模倣技術の研究へのファンディングが少ない、生物学のデータが工学者の使える形になっていない、事業化のフェイズでは、自然模倣技術の認証制度や優遇策がないことが挙げられる。

---

<sup>17</sup> 下村政嗣「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流」科学技術動向研究 2010 年 5 月号

図表 29：実社会への応用に向けた問題の整理（仮説）

	基礎研究	応用研究	実用化	事業化
大学	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物の構造は分かっているが機能が分かっていない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物学者と工学者の連携がうまく進まない</li> <li>自然模倣技術を教える学科やコースがない</li> </ul>		
企業		<ul style="list-style-type: none"> <li>そもそも自然模倣技術を知らない</li> <li>技術動向や研究者の調べ方が分からない</li> <li>生物学の知識を持つ人材が少ない</li> <li>ビジネスにつながるかどうかが見えない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物を模倣すると生産コストが上がる</li> <li>生物を模倣すると環境負荷が上がる</li> <li>生物を模倣すると必要な性能を満たせない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>粗悪品が健全な市場の成長を妨げる可能性がある</li> <li>自社の商品が認証を得られない</li> </ul>
利用者		<ul style="list-style-type: none"> <li>利用者ニーズが反映されていない</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>自然模倣技術の認知度が低い</li> <li>環境配慮型製品、自然模倣商品の訴求力が弱い</li> </ul>
支える仕組み	<ul style="list-style-type: none"> <li>博物館のネットワークが海外に比べて弱い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然模倣技術の研究へのファンディングが少ない</li> <li>生物学のデータが工学者が使える形になっていない</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>認証制度や優遇策がない</li> </ul>

出所：各種情報をもとに富士通総研作成

## 5.2. 実社会への応用についてのヒアリング調査

### 5.2.1. 調査目的と対象

前節を踏まえると、実用化・事業化にあたっての課題を明らかにする必要があること、応用研究のフェイズにおける産学連携が重要と考えられること、利用者や企業への普及・啓発が必要と考えられることから、実用化・事業化にあたっての課題、産学連携の促進、普及啓発の観点で、有識者や企業の研究者・技術者へヒアリングを行った。また、近年、ISO/TC266にてバイオミメティクスの国際標準化の議論が動き出していること、認証制度のあり方が企業の取り組みに影響を与えうることから、以上の観点と併せて、国際標準化への対応についても観点に加えた。

ヒアリングの対象は、産学連携・国際標準化の専門家、地域で環境共生型まちづくりのプロジェクトを進めているNPO法人の代表、企業において自然模倣技術・システムの研究開発に携わっている研究者・技術者、生物学の研究者等とした。生物学の研究者には、生物学の側からみた生物と工学の連携等についてご意見を頂いた。

図表 30：ヒアリング対象者

区分	氏名、企業名	所属、業種 等
有識者 (生物学)	松浦 啓一 氏	独立行政法人国立科学博物館 名誉研究員
	長谷川 眞理子 氏	総合研究大学院大学 先導科学研究科長・生命共生体進化化学専攻 教授
有識者 (産学連携・国際標準化)	妹尾 堅一郎 氏	特定非営利活動法人産学連携推進機構 理事長 一橋大学大学院 (MBA) 客員教授
	八木 伸行 氏	東京都市大学 メディア情報学部 情報システム学科教授
有識者 (環境共生型まちづくり)	仁連 孝昭 氏 <sup>18</sup>	滋賀県立大学 理事・副学長 特定非営利活動法人エコ村ネットワークング 理事長 特定非営利活動法人アスクネイチャー・ジャパン 理事長
企業	A社	自動車メーカー
	B社	情報通信業
	C社	建設業
	D社	電機メーカー
	E社	電機メーカー
	F社	住宅設備メーカー

### 5.2.2. 調査項目

<ul style="list-style-type: none"> <li>● 企業における自然模倣技術・システムの研究開発について <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 研究開発に着手した経緯、狙い</li> <li>➢ 研究開発の事例</li> <li>➢ 実用化・事業化に向けた課題</li> </ul> </li> </ul>	等
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自然模倣技術・システムの研究開発における産学連携について <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 取り組み状況</li> <li>➢ 成功事例や工夫</li> <li>➢ 生物学と異分野の連携における課題</li> </ul> </li> </ul>	

<sup>18</sup> 滋賀県では、NPO 法人「エコ村ネットワークング」が中心になり、産学官民が協働で、持続可能な社会のモデルとしてのエコ村づくり「小舟木エコ村プロジェクト」という先進的な取り組みを進めている（「4.1.4 近江八幡市 小舟木エコ村」を参照）。

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 産学連携を促進するプラットフォームの必要性、求められる機能</li> </ul>	等
<ul style="list-style-type: none"> <li>● バイオミメティクスの国際標準化の活用について <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 国際標準化の日本企業への影響</li> <li>➤ 日本としての国際標準化の活用方策</li> </ul> </li> </ul>	等
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自然模倣技術・システムの普及啓発について <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 効果的と考える普及啓発策</li> <li>➤ 地域での実証事業の有効性、活用方法</li> </ul> </li> </ul>	等
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 政策に求める支援について <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 人材面</li> <li>➤ 資金面</li> <li>➤ 情報面</li> </ul> </li> </ul>	等
<ul style="list-style-type: none"> <li>● その他、ご意見等</li> </ul>	

### 5.2.3. 実施時期

2014年1月16日～2014年2月25日

### 5.2.4. ヒアリングの結果

#### ① 企業における自然模倣技術・システムの研究開発について

- 研究開発に着手した経緯、狙い

始めからバイオミメティクスというテーマで研究をスタートさせたわけではなく、既に研究していた技術が、バイオミメティクスに役立つことが分かった。(電機メーカーD社)

もともと大学で、生物に着想を得た情報通信機器の制御技術の研究が行われており、以前から別のテーマで共同研究をしていた情報科学の先生を通じて、その研究のことを知り、7、8年ほど前から、このテーマでの共同研究を始めた。(情報通信業B社)

これまでの運転アシスト技術は、操舵を伴わない緊急ブレーキは可能であったが、他車両との協調運転を行うような複雑な行動は難しかった。運転アシストをシステムとして見ると、認知→判断→操作の各ステップを統合するときに、それぞれのステップの性能は落ちてもシステム全体で性能を上げる方法があるのでは

ないか、性能を上げる何か別の方法があるのではないかということで、新たなアプローチとして、38億年もの間、生き残ってきた生物にヒントがあるのではないかと考えた。

ヒトやチンパンジーは大きな脳を持ち自分で考えるが、アリやハチはそこまでやっているわけではなく、必要最低限の情報で判断、行動している。では、それを可能にしているものは何か。それが分かれば、あとは、それを自動車向けに調整していけばよい。

まず事故を減らし、次に渋滞を減らしたい。同時に、ゼロエミッションも可能になると考えている。(自動車メーカーA社)

きっかけは、環境負荷を下げながら商品性能を上げていくために、自然界で淘汰されてきた生物や地球現象の中にヒントがあるかもしれないと考えたことである。(住宅設備メーカーF社)

2～3年前に、社長より、環境負荷低減に貢献するテーマとして取り組まなければならないということで指示があり、取り組みが始まったと聞いている。ただし、その後に立ち上げた研究会では、環境に限らず、利便性の向上や機能性の向上を狙いとしたテーマも取り上げている。(電機メーカーE社)

自然的なメカニズムを活かすという発想は、もともと自然の仕組みなので長続きするのではないかというところから来ている。

着想を自然に学ぶことの手段としての結果が自然であるかどうかは分からない。どのような方法であっても結果が自然であることの方が重要である。(建設業C社)

バイオミメティクスの研究を行うのは、自然を模倣することが目的ではない。産業界の立場からは、商品が売れて初めてという世界なので、環境負荷が下げられるだけではだめである。バイオミメティクスは環境負荷を下げるための手段、商品の機能を向上させるための手段であり、バイオミメティクスを事業にしようとは思っていない。(住宅設備メーカーF社)

バイオミメティクスでやろうとしても、従来の工学的手法の方が、早くてコストが安いこともある。バイオミメティクスは解決手段の一つであって、それにこだわりすぎると失敗する。

形態模倣は、結局、コンピュータシミュレーションを行えば同じ結果になる。ただし、生物に学ぶことで早くアイデアを得て実用化できる。それはバイオミ

メティクスを取り入れるメリットとして社内でもコンセンサスを得られているところである。(電機メーカーE社)

生物学の知見を応用した研究については、企業の中ではそこまで手が回らない。もともと新しい情報通信機器の制御技術の開発がゴールであり、生物学の知見の応用は、あくまで手段の一つとして捉えている。

ICTの分野で、生物学の知見を応用した技術や適用事例については、あまり聞かない。そのような研究は、まだあまり行われていないのではないか。だから、先にやっておくと、先行者メリットがある。(情報通信業B社)

ベーシックな考えが重要なので、生物模倣の研究はこれからも続けていかないといけない。(自動車メーカーA社)

➤ 研究開発の事例 (実用化の段階、環境負荷低減の効果 等)

表面微細加工技術の応用展開を図る中で、微細構造が細胞外マトリックスという概念でとらえることができ、細胞が生体内で過ごしている環境を擬似的に模倣できるような幾何学的現象が存在することを示し、製品になった。

プラスチックを成型する場合、表面微細加工は射出成型方式と比較して、大幅に省エネである。100分の1から1000分の1程度のエネルギーでできるのではないか。薄いものにもパターンニングできるので、環境面では、使用する材料の量が減らせるというメリットがある。ただ、企業としては、薄型のディスプレイ等を作れるというメリットのほうが大きい。(電機メーカーD社)

製品化した住宅材料は、メンテナンスコストを従来製品より約半分に下げられる(推定値)、有機塗料を使わなくて済むというメリットがある。(住宅設備メーカーF社)

想定しないイベントに対して適応的に動くため、大規模な損傷があっても動く。また、大幅に計算量を抑えることができ、計算困難な問題(NP完全問題)を処理することが可能になる。センサーネットワークやスマートグリッドの制御、クラウドの資源最適化にも応用できる可能性がある。現在、実証実験を行っており、2020年頃の実運用を目指している。(情報通信業B社)

プロトタイプは作成済みだが、製品化には至っていない。従来技術に対する優位性は、計算量が抑えられる点。また、従来技術では難しかった、見たことのないシーンや似ているけど少しだけ異なるシーンにも対応できる。環境への効果は、

渋滞の減少により CO2 削減につながる。(自動車メーカーA 社)

➤ 実用化・事業化に向けた課題

企業としては、市場規模、収益性が厳しく問われるので、そこに結びつく必要がある。商品化されているものとして、モスアイフィルムやゲッコーテープがあるが、企業として求められる売上は数十億円と非常に大きいので、それに比べるとどの製品も規模が小さい。(電機メーカーD 社)

微細構造を作る工程にコストがかかるので、値段が高くなってしまいうことが問題である。(住宅設備メーカーF 社)

バイオミネラリゼーションのような化学反応を伴うものは、メカニズムが分かっていないため、真似ようがないのが問題である。2ヶ月に一度、大学の先生を呼んで講演会を行っているが、意外に生物の機能が発現するメカニズムが分かっていない。Web サイトで使えそうな生物を見つけて、生物学の研究者に話を聞きに言っても、今、研究しているところなので、すぐには使えないと言われることが多い。データベースで特殊な機能を持つ生物を検索できてもメカニズムが分からないと真似できない。

企業としては、たまたまできたのではだめで、確実に同じものが何百万個と作れないといけないので、機能発現の理由が分からないと作れないし、品質を保証できない。(電機メーカーE 社)

技術的には製品化は可能だが、社内的に理解が得られにくい。社内からは、なぜ生物を真似る必要があるのかと言われる。現象を数式で表し、物理学で理解するという従来のアプローチで取り組んでいる人に説明してもなかなか理解してもらえない。数式で見える化するわけではないので、どう分かりやすくするかが問題である。(自動車メーカーA 社)

## ② 自然模倣技術・システムの研究開発における産学連携について

➤ 企業における取り組み状況

ナノピラー構造を細胞培養に使う共同研究は、当社の方から生物系の先生に話を持ちかけた。

バイオミメティクスに関わるようになってから、生物学の研究者との集まりなどに参加するようになった。ただし、まだ、新しい研究につなげるという段階ではない。(電機メーカーD 社)

当社では、バイオミメティクスで共同研究をしている事例はまだない。バイオミメティクスで共同研究をする場合は、大学で研究されている生物の機能が使えそうであれば、生物学の研究者のところに直接行くことになると思う。当社の場合、先行者利益を取りたいので、面白そうなネタがあり、基本的なメカニズムが分かっていたら、工学の研究者を介さなくても自社で研究する。

他社との差別化が必要。大学の先生は技術を広く使ってもらえればよいが、企業としては当社でなければできないというようなものでないといけない。

企業内で生物系の研究者を抱えるのは難しい。(電機メーカーE社)

当該技術は、共同研究先の情報科学の先生と、同じ大学の生物系の先生が議論する中で生まれたもので、我々はその生物系の先生との直接の接点はない。

生物学は、企業からは離れた分野だと感じる。当社は研究所として規模は大きい方だが、当該技術のような学際的な研究は企業だけではできない。企業の中で、ICT と生物学の両方の分野の知識を持った人材を抱えるのは、難しい。(情報通信業B社)

動物の行動を模倣したロボットを大学の先生と 5 年くらい共同研究したことがある。共同研究先には、当社のテーマに合った研究をしている先生を調べて、当社から話を持ちかけた。現在は生体模倣に関する大学との共同研究は行っておらず、自社でも行っていない。

社内で生物系の人材を抱えるだけの余裕はない。(自動車メーカーA社)

製品化した住宅材料は、ある大学の先生(材料系)とフリーディスカッションをしていた際に、発想のヒントとなった生物の話が出て、それが事業部の研究所で研究されていたテーマとたまたま結びついた。

製品化した事例について、模倣した生物の材料自身や構造の研究をしている大学の研究者はほとんどいなかった。その生物の研究をしているのは多くが分類学の研究者で、材質はよく調べられておらず、ましてその物理化学的性質は全く調べられていなかった。そこで、自社で研究した。(住宅設備メーカーF社)

プロジェクトは、産学連携が前提である。全てで自然的なメカニズムであることが判断基準となっている。ハードだけがエコでもだめで、ライフスタイルもエコでなければならない。ライフスタイルの検討もしているが、人文社会学の専門家を入れた検討はこれからである。(建設業C社)

➤ 成功事例や工夫

成功要因の一つとして、共同研究先の大学で応用が見えるところまで研究が進められていたことが挙げられる。その大学では、全学的に、生物学の知見を ICT やロボット等に応用するプロジェクトが進められていた。(情報通信業 B 社)

共同研究先の大学での研究はあくまで生物模倣ロボットに留まっていたため、自動車会社で安全に貢献できると言う反応がよかった。生物模倣の研究者と話をする、生物を模倣してつくったものをどのように使うかはあまり考えていないことが多く、適用先はせいぜいおもちゃやロボットのようなものに留まっている。一方で、企業は実社会の問題をどう解決するかを考えている。そこに答えが見えるのではないか。(自動車メーカー A 社)

事業部の市場調査で、当初想定した市場とは別に、確実なマーケットが見つけたことが大きい。(電機メーカー D 社)

➤ 生物学と異分野の連携における課題

工学者との連携は、科研費の「生物規範工学」が初めてであった。工学は我々生物学と全く発想が違う分野ではあるが、表面構造などに限って言えば、我々にも理解できる分野だと感じた。(松浦氏)

企業の研究者が生物学の研究者と共同研究する場合、間を埋める翻訳者がいると効率的と思われる。(電機メーカー D 社)

情報科学の先生が、インタープリタ的な役割を果たしている。(情報通信業 B 社)

生物学の研究者には、多数の種を収集するよりも、代表的な種だけでよいから、機能を徹底的に調べてほしい。(電機メーカー D 社)

生物に面白い機能があることは分かっている、なぜその機能が発現するのかは、研究対象になっていない。例えば「水に浮く」など、特定の機能に絞って研究する研究者がいたら良いと思う。そこから共通の原理が発見され、それが社会応用につながれば素晴らしい。

大学の拠点化が有用かどうかはテーマ次第だが、生物の機能メカニズムの研究であれば、有用だと思う。(電機メーカー E 社)

工学系の研究者が新しくつくりたい機能を絞りきれていないと感じる。そのため、生物系の研究者も、どのような情報を集めたら工学の役に立つのかが分からないので、まず広くデータを集めようという方向で研究を進めている。成果が出るにはデータがある一定量を超えないといけないと思うが、まだそこに達していない。(松浦氏)

以前行った生態学者と経済学者による持続可能性と人間の自然に対するインパクトについての対話はとても面白かったが、経済学者が全てを経済価値に換算しようとする(例えば、自分が住んでいるところの近くにある沼を守ることにに対する支払意思額を算出する等)ので、生態学者に不満が残った。

生物学とロボット工学の共同研究では、ロボットを作ることにより生物学側で新たな知見が見出されるということがなかったわけではないが、生物学から知見を提供することの方が多かった。

異分野連携が進まないのは、異分野の人の話は面白いが、それがどう自分の研究につながるかが分からないからだと思う。異分野連携を進めるには、同じ問題に異分野の研究者が違うアプローチで取り組むプロジェクトを組成するのが有効で、同じ問題を見つけることが重要になる。(長谷川氏)

現在は、自然史や分類学者が中心だが、比較解剖学や機能形態学、生理学、生化学等、様々な生物学の研究者を動員しないとブレイクスルーは難しいのではないかと。また、動物学だけでなく植物学との連携も必要。(松浦氏)

生物学と工学の連携において、生物系の研究者が工学系の研究者にデータを提供するだけになるのは、望ましくない。工学系の研究者との連携をきっかけに、自分たちの研究をこれまでと異なる方向に展開する必要がある。(松浦氏)

バイオミメティクスにおいては、生物学の研究者が生物を材料に応用できるかもしれないと思うことが大事である。バイオミメティクスをきっかけに、学生が生物系から材料系に行くようになるとよい。

生物と工学の連携においては、生物系の研究者から見たときに工学系の研究者が何かよく分からないことをやっていると思われたいよう、生物系の研究者のインセンティブが必要である。(住宅設備メーカーF社)

➤ 産学連携を促進するプラットフォームの必要性、求められる機能

プラットフォームとして、まずは研究会、勉強会に地道に取り組むことが重要。また、応用先はモノだけでなくサービスもある。単なる技術者の勉強会で終わらせないために、ビジネス系や社会科学系の専門家を含めることが重要。機能形態

の用途開発の議論に展開しうるだけでなく、生物の社会システムを産業生態系と照らし合わせたらどんなことができるかといった議論にも展開しうるだろう。(妹尾氏)

フォーラム、コンソーシアムのような場をつくり、そこで議論したものを標準化の場に持ち込み、標準化と並行して製品化を進めるといったようなサイクルを構築する必要がある。今は、まだそれができていない。企業に資金を配分するなどして、産業界のニーズを取り込んでいかないと有益なものにならないし、優位に立てない。(八木氏)

産学連携のためのプラットフォームについては、共同研究のためのコネクションを得られる場になるかもしれないが、各企業がリスクを許容できるかという問題はあある。プラットフォームの仕組みだけでなく、人が集まるような仕掛けが必要。(情報通信業B社)

今後の研究開発の方向性は2つある。1つ目は、生物の知恵を産業や社会に生かしていくこと、2つ目は、生産者と消費者が一緒になって開発を行う、オープンなイノベーションの仕組みをつくることである。この2つをつなぎ合わせる取り組みを進めていかないといけない。

研究開発は、従来の技術中心でなく、技術が社会の中にどのように入っていき、消費者がどう変わるかまでを含めて行うことが必要であり、今まで参加してこなかった主体(消費者)が関われる場作りが重要である。(仁連氏)

産業界が勉強するだけでなく、産業活動にバイオミクリーを取り込んでもらえるように舵を切っていく時期に来ている。そのために、個人ベースのNPOではなく、企業ベースの協議会のようなものをつくる必要がある。

滋賀県には中小企業が多いので、中小企業でも取り組めるような内容にしないといけない。自社だけで取り組むのではなく、ネットワークをつくって、バイオミクリーに取り組む仕組みが必要である。(仁連氏)

### ③ バイオミメティクスの国際標準化の活用について

#### ➤ 国際標準化の日本企業への影響

バイオミメティクスの認証がついている商品は、ないものよりは良いと思う。  
(電機メーカーD社)

最初から狙ったわけではない、こじつけの案件が出てくるだろう。それに、バ

バイオメテックス製品の認証を与えてよいかどうかという問題は出てくると思う。(電機メーカーD社)

例えば、完成品メーカーがバイオメテックス認証を取得した部品でないと仕入れないというように、バイオメテックス商品の認証制度が規制と結びつくと困る。(電機メーカーE社)

欧州には、EU内で販売する電子電気機器における有害物質の使用制限に関するRoHS指令がある。この指令は、ISO規格に直接的に基づくものではないが、環境マネジメントに関するISO規格が関係する。バイオメテックスがISOで定義され認証制度ができたとすると、ISO規定以外のものは安全でないとされ、EU市場で販売できなくなる可能性がゼロとも言えない。

標準化に当たっては、ISOでバイオメテックスが定義された以降のインパクトを考える必要がある。ドイツが、急いでバイオメテックスの国際標準化を進めている狙いは分からないが、ナノテクノロジーに関連するところでは、何が環境に影響を与えるか、形状によって何が起こるかが分かっていないようなので、安全性に関わる標準化であれば、急ぐ大義名分は立つ。(八木氏)

ドイツではエコ住宅の認証制度等があり、認証を使ったビジネスに長けている。なので、ドイツがバイオメテックスの認証ビジネスを狙っているというのはいり得る。ただし、認証制度が消費者にとってメリットがあるかどうかは疑問。あるものかないものを比べたときにある方がよいくらいだと思う。(住宅設備メーカーF社)

➤ 日本としての国際標準化の活用方策

そもそも自然模倣技術・システムが産業上、ビジネス上、どのように位置付けられるか、モノ・サービスとどうつながり、イノベーションにどう寄与するかという論理を組み立てないと、オープン/クローズ領域のビジネスモデルデザインはできない。標準取得を自己目的化してはならない。(妹尾氏)

ドイツはこの分野で先行しているようなので、標準化を急いでいるのではない。ISOでは規格制定が満場一致である必要はないので、WD、CDなどの節目節目の投票にかかる前に、必要なことは規格案に盛り込んでおく必要がある。このためには、1国が反対しているだけでは弱いので、仲間作りが必要である。利害関係が一致するところと、国際的な共闘体制を組む必要がある。

標準化は、研究開発で得られた技術を広く社会で活用するために行うものであ

る。研究のために行うのが主目的ではない。標準化がビジネスにつながっていないと、できても誰も使わない標準になってしまう。成功した標準化は、ビジネスをやりたい人たちが、主体的に参加して出来たものである。バイオミメティクスの標準化を成功させるためには、産業界が積極的に関与する体制をつくる必要がある。(八木氏)

#### ④ 自然模倣技術・システムの普及啓発について

##### ➤ 効果的と考える普及啓発策

バイオミメティクスというと、多くの経営者はまったく認識していない、あるいは昔のバイオミメティクス(例えばロボット)をイメージする。ロータス、ゲッコーの次が出ることを認識してもらおうとよいのではないか。例えば、3D 関連技術との融合等を含め、次世代イメージをつくってはどうか。

特に、工学が「機能形態」を規範とすることに対応させて、環境適応行動や環境生成行動について、生態学的な知恵を社会や産業に活用することを考えることが有効だろう。これは生物多様性と産業との関係付けを行うことにもなるだろう。(妹尾氏)

研究所を中心に、社内で研究会を組成し、2~3 年間、活動した。メンバーは材料系に限定せず、ソフトウェア等、いろいろな分野の研究者を 20 数名集め、他社動向や海外動向、実用化の事例について分担して調査し、自社の研究開発への活用の可能性について議論した。活動は 1 年単位で行い、1 年の終わりには社内の展示会で成果を発表した。研究所以外からも数百名が参加、また、当時の社長も参加するほど関心が高く、現在では「バイオミメティクス」という言葉を研究所内のほとんどの人が知っているまでに普及している。また、研究会の活動の成果として、いくつかの研究テーマが生まれた。(電機メーカーE 社)

2つのU (Universality と Uniqueness) という見方でみると、自然模倣技術・システムというユニバーサルなものがある一方で、自然観というユニークなものがある。西洋的な自然観と東アジア的な自然観は異なる。

長期的に価値観・ライフスタイルを変えていくための方策は、自然観と密接に関わっている。八百万のものに神が宿るといふ我々日本人が持つ自然観や、あるいは日本的思考の古層の上に雑種文化を築いた我々の価値観やライフスタイルを再検討しつつ考える必要がある。例えば、「アンパンマン」には、「自己犠牲・他者貢献」と、バイキンマンを完全にはやっつけないという「生態学的共生」の2つのコンセプトが含まれており、日本人の食と農と自然観を体現している。技術・

システムだけでなく、我々が持っている価値観や思想、文学的・詩的なものまで含め、生物多様性などの議論とも向き合っても良いのではないか。(妹尾氏)

商品を出すときに、バイオミメティクスであることを表に出すかどうかは、認証制度とは別で、その時の社会環境による。省エネは、地球に貢献しているという満足感と節約になるという 2 つの面があるが、多くの人にとっては後者の方が大きい。発展途上国であればその傾向は一層顕著である。「バイオミメティクス」という言葉が消費者にどのようなイメージを与えるのか。自然を模倣しているから今までより何倍も省エネということになれば、消費者は買うと思う。ものすごく効果があるというイメージがつけば、ブランド化できると思う。(電機メーカー E 社)

自然模倣だからといって、どれだけ買ってくれる消費者がいるかは疑問である。好感度アップにはつながると思うが、常識的なレベルの価値やメリットでは難しい。(住宅設備メーカー F 社)

日本人は、多少我慢してもみんなのためならよいという美的感覚を持っているのでまだよいが、世界市場を考えると、ライフスタイルの転換を求めるテクノロジーは使いづらい。日本人の自然観を世界に発信していくのはよいと思うが、そこに我慢するということが入っていると商品として売れないと思う。(電機メーカー E 社)

日本人は自然との距離感が近いので、西洋から見ると、自然と共生する都市のような構想は、驚きの目で見られる。(建設業 C 社)

ライフスタイルは各自が置かれている状況により、多種多様である。まちづくりの構想を見せられて、ライフスタイルを聞くのは大人だけで、子どもの場合は、どのように暮らしたいかというイメージを語り出す。どのように暮らしたいかを描くきっかけになればよく、ライフスタイルを提示すると魅力が薄れてしまうと考えている。(建設業 C 社)

魅力的なテーマを設定して議論の場を設けることで、住民の参画も期待できる。エコ村のときは、現在の延長線上ではなく、全く新しいエコ村のコンセプトをつくるというテーマで議論を行ったが、インフラ企業やバイオテクノロジーの研究者、市民等、様々な人が集まった。

バイオミクシーを普及するのではなく、我々が今抱えている問題をいかに解

決するか、そのために生物の知恵をどう使うかという問いの立て方にした方がよい。(仁連氏)

学会やコミュニティでのアウトリーチが必要である。市民へのアウトリーチについては、研究を紹介するためのデータが集まっていないので、バイオニックカー、マジックテープ等、既によく知られている事例を紹介しているが、新しい事例を紹介できるとよい。また、ドイツ等の海外の事例でなく、日本の事例を紹介できるとよい。(松浦氏)

➤ 地域での実証事業の有効性、活用方法

里山とよく言われているが、地域の資源循環をみたときに、日本で古くから行われていたバランスがどうなっているのかをもっと真剣に考えるべきである。(住宅設備メーカーF社)

地域での実証事業は有効だと思う。日本だけでなく、例えば、インドや中国でもやってみるのもよいのではないか。(電機メーカーE社)

エコ村構想は2000年に始まったが、そのきっかけは、当時、地元の産業団体や経済団体の間で、持続可能な社会はどのような社会か、環境ビジネスをどのように発展させていくかという議論がなされていたことである。それを考えるためには、持続可能な社会のイメージを共有する必要があると考えた。そこで、まずは小規模で、「働く」「生活する」「自然環境と共存する」場としてのエコ村をつくることで、将来の産業や雇用、暮らしがどのようなものになるのかという具体的なイメージがつかめるのではないかと考えた。

滋賀県では、産業界が、環境問題が始まった1980年代から対策に取り組んでおり、環境に対する意識が高いことが大きい。また、構想を立ち上げた当時は、バブルが崩壊して経済停滞が起こった時期で、産業界としては、環境という新たな方向に向かわざるを得ないという意識もあった。しかし、産業界は具体的にどうすればいいかが分からないので、その方向をみんなで模索すればよいと考え、実験のための場をつくることを考えた。

個々の企業が環境ビジネスという未知の領域に進んでいくのは難しいので、企業が集まって実験を行うための場をつくることを計画していた。そこで、企業や大学等の研究機関が連携して、将来の産業や生活、必要なモノ・サービス等を研究するのである。規制でエコ村内につくることは難しかったため、今後、滋賀県内につくろうと考えている。

エコ村ネットワーキングに参加していたのは、地元の中小企業や支社長が意思

決定権をもっている企業、自治体のトップ等である。意思決定ができ、担当業務の枠を越えて発言できるメンバーを集めることが重要である。民間企業である「地球の芽」を事業主体としたのは、この事業を民間ベースでできなければ、将来、社会に実装するためのモデルにならないからである。

エコ村構想の実現にあたっては、行政の壁が大きかった。例えば、農地転用の際に、多用途での土地使用が認められないために研究所が建てられない、村内から出た水を河川に直接流すことが認められず水循環ができない等の問題が発生した。(仁連氏)

## ⑤ 政策に求める支援について

### ➤ 人材面

人材は、大学の先生や産総研などとタイアップすればよく、従来の枠組みで補えるが、高名な先生や知っている先生と組むことが多く、自分が知っている範囲でしか動けないので、人材データベースもあると良いかもしれない。

また、共同研究をする際は、日本の大学の先生だけでなく、世界でトップの先生と組むべきかもしれない。国の資金を投入してよいのか、日本の国益になるのかという問題はあるが、海外の大学との共同研究に国の支援が受けられるとよい。(電機メーカーD社)

科研費のようなプロジェクトは時限的であるので、例えば、バイオミメティクスの学会のような異分野に属する人が集まれる場が必要である。(松浦氏)

科研費の「生物規範工学」のような異分野連携のプロジェクトをきっかけにいろいろな分野の人と話ができてインスパイアされるので、そうした取り組みは直接的な収益には結びつかないが重要である。

また、生物系の研究者が材料分野にも来るように門戸を広げられるとよい。そのための支援をするとよいのではないか。(住宅設備メーカーF社)

### ➤ 資金面

国家プロジェクトに参画する場合は100%補助を前提にしてほしい。2分の1や3分の1の補助だと、企業も資金を用意しないといけないが、バイオミメティクスは新しい技術なので難しい。

また、国家プロジェクトでは、民間企業は出口として製品化を求められるが、バイオミメティクスはまだよく分からない分野なので、引いてしまう。必ずしも製品化しなくてもいいなど、企業がオブリゲーションを負わずに気楽に参画できるようになるとよい。プロジェクトに参画する際、事業部による生産が前提になっ

ている場合があるが、つくるものが決まっていないので、事業部は参画できない。  
(電機メーカーD社)

リスクがあって、企業ではなかなかできないことを国プロでやるので、成果を厳しく問われると、難しい。実用化の目途が立っているなら、企業の方でやる。一方で、税金が投入されているので、成果の説明責任がある。(情報通信業B社)

科研費の細目の中に新たに「バイオミメティクス」を作り、新しい領域として政府が支援することを明確にするというのもあるのではないか。(松浦氏)

バイオミメティクスは、まだ大きな市場になるかどうか不透明な状況なので、企業が研究や標準化に多くのリソースを割けないのではないか。やりたいけど、自前の資金ではリソースが割けない企業や十分な資金がないベンチャーに資金援助をすることで、企業が研究や標準化にリソースを割きやすくなる。企業内にも、実はやりたいのだけど、社内のコンセンサスが得られないという人もいるのではないか。企業がバイオミメティクスのような基礎的な研究にリソースを投入できるように、国の資金援助が必要だろう。標準化に関しても、バイオミメティクスの分野で優れた企業に対して資金を配分するなどして、リソースを投入してもらうのが良いのではないか。

効果を上げるためには、研究開発資金の投入を、省庁で分散して行うのではなく、米国の国立科学財団(NSF)のように一元的に行った方が良い。米国国防高等研究計画局(DARPA)のようにコンペティションをやるやり方もある。(八木氏)

プロジェクトの初期の段階で、呼び水としての財政的な支援があるとよい。自治体は財政が逼迫しているので、自治体からの補助を期待するのは難しい。(仁連氏)

#### ➤ 情報面

生物と環境情報のデータを組合せると、有用だと思う。例えば、水中であれば、水深、水温、氷に覆われるかどうか、干上がるかどうか等が分かると、生物がどのような条件でどのような構造になるかが分かる。特に、生物が極端な環境にどのように対応するかが分かると役に立つのではないか。(松浦氏)

全く違う生物でも、類似の構造をもっているものは、特徴的な機能を発揮していると考えられ、興味深い。類似の構造をもつ生物を抽出できるような情報検索機能は有用である。(松浦氏)

表面構造の画像データベースには非常に期待している。昆虫の SEM 写真も重要だが、そこに機能などの情報をタグとして付けることも重要である。我々企業の研究者は、その構造がもつ特殊な機能が何かを知りたい。(電機メーカーD社)

バイオミメティクス・データベースを公開してほしい。政府の資金的援助により、安価に利用できると助かる。

バイオミメティクス・データベースの機能については、生息環境のタグがあると、求める機能を持つ生物を探しやすくなる。また、詳細な環境データが分かることで、これまで生物学の研究者もそんなところに生物がいると知らなかった極限環境に生物がいることが分かり、研究の対象になるかもしれない。そうして研究が進み、生物の機能が分かるとよい。(電機メーカーE社)

バイオミメティクス・データベースは、表面構造の画像だけでなく、その表面構造がもつ機能や性質まで分からないと、企業の研究者が使うのは難しいと思う。機能や性質等のデータが加わると有料でも利用されるものになると思う。(住宅設備メーカーF社)

昆虫の表面構造の画像を検索できるデータベースは非常に有益だと思う。ただし、行動でそのようなデータベースがあるかというとなかなかないので、例えば、衝突を回避する等のシーンで、生物がどのような仕組みでやっているのかが、データベースから調べられるとよい。(自動車メーカーA社)

#### ➤ 制度面

エコ村のケースでは、既存の規制が障壁となったので、実験的な取り組みを認める特区があるとよい。特区は、各省庁の縦割りではなく、省庁を越えた規制緩和が行われるものにしてほしい。(仁連氏)

### ⑥ その他、ご意見等

生物の機能や仕組みは、他の生物との関係性の中でつくられているものであり、エコシステムの中でそれぞれの役割がある、だから、バイオミクラーは、単体の生物機能ではなく、システムとして真似るべきである。地域の産業システム、生活システムをつくり変えていく必要がある。(仁連氏)

持続可能な社会というのは今までにモデルがない。人類の 20 万年の歴史の中で、ここまで人口と経済活動が拡大したことはなかった。今まではローカルに飽和しても地球上に行くところがあったが、今は宇宙しかない。生物学的には環境容量

に達すると個体数は一定にならないといけませんが、人間のモデルには右肩上がりの人口増大と経済成長しかない。生態学的に言うと、基本はエネルギーの循環。動物や植物は太陽からのエネルギーを利用しているが、人間は、石油・石炭、原子力といった独自のエネルギー源を持ってしまった。基本は自然エネルギーのように循環すること、物質も分解され再利用されるというサイクルで回ること。そうなった時に今の暮らしがどうなるのか。新しい社会の姿を描いてモデルを提示することができていない。

インターネットや SNS の例に見られるように、技術によって生活がどのように変わるのかは予測不可能で、ある状態を目指して開発できるものではない。お互いが、また、全体がどう振舞うかによって個人の心は変わる。お互いが相互作用していることの結果としてそう振舞っているが、それを自分の選択だと思っている。したがって、持続可能な社会をつくるには、経済、社会、テクノロジーが持続可能な社会を目指すことが当たり前という世界にならないといけいない。一人ひとりの心の問題でなく、システムを変えないといけいない。ただし、歴史を見ても、資本主義経済が徐々に浸透していったように、誰かが変えようとしてドラスティックに変わった例はない。違う社会になるには 60 年くらいかかるだろう。(長谷川氏)

生物多様性は 38 億年の進化の遺産で我々はそれを二度とつくることができないということを認識する必要がある。環境問題というと、CO2 削減や温暖化が叫ばれることが多いが、20 世紀に人間がやった最大の環境破壊は生物多様性の破壊である。まだ目に見える大きな変化が起こっていないため、人類は生態系をどんどん破壊しているが、このままではいつかフレームシフトが起こる。(長谷川氏)

持続可能性は、先進国と途上国のトレードオフよりも、現在の世代と将来の世代とのトレードオフである。現在の世代の快とのトレードオフで生じる不快は将来の世代に回される。その時には現代の世代はいないので、当事者ではない。先進国と途上国であれば、少なくとも同じ時代にいるが。(長谷川氏)

何を幸せに感じるかということと持続可能性には、地域性がある。どこに軸を置くかが難しい。(建設業 C 社)

将来的にエネルギー問題が深刻化すると、貴重なエネルギーを自動車や住宅に使うのか、ということになると思う。その時には、住宅の材料は干しレンガのようなものでもよいと思っている。身の回りにある木や土を使えばよい。(住宅設備メーカー F 社)

造る時に CO2 がある程度排出されても、長持ちすれば、CO2 の排出量もそれ以外の環境負荷も下げられるので、長続きすることを重視した方がよい。(建設業 C 社)

太古に戻るわけには行かないので、人間生活のクオリティや経済・産業活動を保ちつつ、従来技術と自然のメカニズムがうまくミックスしていくことが重要ではないか。(建設業 C 社)

### 5.2.5. ヒアリング結果のポイント

ヒアリング結果のポイントについて、「実用化・事業化にあたっての課題」、「産学連携の促進」、「国際標準化への対応」、「自然模倣技術・システムの普及・啓発」の観点で整理したものを、以下に示す。

#### ① 実用化・事業化にあたっての課題

##### ➤ 環境負荷低減効果のみにとどまらない付加価値の創出

企業にとっては、バイオミメティクスは技術課題に対処するための手段の一つであり、特に、従来の手法では難しかった、機能性と環境負荷低減の両立や新機能の実現において、バイオミメティクスの活用が期待されていると考えられることから、これらの課題の達成に寄与するような事例の創出や、普及・啓発等を行っていく必要がある。

##### ➤ 市場性が期待できる成功事例の創出

既存のバイオミメティクス製品は、従来製品にとって代わるほどの大幅な機能性の向上や新たな市場の創出に成功した事例が少ないが、企業としては、事業の売上や収益性を厳しく問われるため、市場性が期待できる成功事例を創出していくことが必要になる。

##### ➤ 生物の機能発現メカニズムの解明

企業が製品開発に役立つような特徴的な機能をもつ生物を見つけても、現状では、機能が発現するメカニズムが解明されていないことが多いために、応用したくても応用できないことから、機能発現メカニズムの解明を進める必要がある。

##### ➤ バイオミメティクスの有用性に対する理解度の向上

生物からヒントを得て製品開発に応用するバイオミメティクスは、従来の手法とは違って、まだ実績が少なく、有用性が見えにくいため、新規に取り組もうとする研究者にとっては、本手法を採用することに対する社内の理解が得られにく

い。したがって、バイオミメティクスの成功事例を生み出し、有用性を示していくことが必要だと考えられる。

## ② 産学連携の促進

### 【産学連携】

#### ➤ 生物学と異分野の共創

製薬企業等のバイオ産業を除く多くの企業にとっては、生物学は従来の研究開発分野と離れていること、企業内に生物学の知識をもつ人材がほとんどおらず、また、そのような人材を企業で抱えることは難しいことから、大学との共同研究を通じて、大学がもつ生物学の知見を企業へ移転していく必要があると考えられる。

共同研究の形は、企業が直接、純粋な生物学者と研究を行うというよりは、生物学者と交流がある工学者と研究を行ったり、生物学者でありながら工学的な素養を身に付けた研究者と研究を行うという形が多いようである。したがって、生物学と工学等の研究者が連携し、生物学の知見の異分野への応用を研究するプロジェクトや拠点化が有効であると考えられる。その際には、生物学の研究者を巻き込むためのインセンティブの設定が必要であり、生物学の研究者にとっても成果につながるテーマ設定等を行っていくことが有効だと考えられる。

#### ➤ 連携する生物学の分野の拡大

バイオミメティクスを、これまでのような生物の形態を模倣した製品にとどまらないものとしていくために、現状では、自然史学、分類学が中心となっている生物学からの参画を、機能形態学、生理学、生化学等、生物学全体にまで広げていく必要がある。

#### ➤ 利用者参加型の研究開発

持続可能な社会を実現するためには、技術開発だけでなく、利用者の価値観やライフスタイルの転換も必要である。新たな技術である自然模倣技術・システムが利用者に受け入れられるものにするためには、研究開発の段階から利用者も巻き込んで実施していくことが必要であると考えられる。利用者が関われる場作りのために、特定のフィールドを設定して、実証実験を行っていくのは一つの方法である。

#### ➤ ビジネス系や社会科学系の専門家の巻き込み

バイオミメティクス製品の応用先を検討するため、さらに、生物の社会システムと産業生態系とを照らし合わせる等、工学応用にとどまらず、生物の知恵を社

会や産業に活用していくために、生物系、工学系等の自然科学の専門家だけでなく、ビジネス系や社会科学系の専門家を含めた研究会を開催することが効果的と考えられる。

#### 【連携を支える仕組み】

##### ➤ データ解析基盤の構築

前述のように、企業にとってバイオミメティクスは、これまでにない機能を実現するための手法の一つであるため、生物学の知見を応用した研究開発を行う際には、通常、求める機能に対して、それを実現する生物を探すというプロセスを経る。しかし、現状では、情報収集のための有効な手段がないことから、そのプロセスを支援するデータ解析基盤が必要になると考えられる。

したがって、データ解析基盤が備えるべき機能として、工学的な機能から、関連する生物のもつ機能や構造等を検索できることが望ましいと考えられる。また、生物のもつ機能と構造との関係を知る手がかりとして、生物の構造データに加え、生息場所の環境情報データを組合せることも有効と考えられる。さらに、工学の研究者が生物学の研究者を探すことを支援するために、応用したい生物を研究している研究者の情報も同時に得られるようにすることが有効と考えられる。

##### ➤ 人的ネットワークの構築

産学での異分野連携を促進するため、また、バイオミメティクスに関する研究を時限的なプロジェクトに留まらない取り組みとするためにも、企業の研究者等の人材や、生物学、工学等を専門とする大学の研究者等、様々な人材が継続的に交流できる場を設けることが有効であると考えられる。また、そのような場への参画を促進するために、参画した人に対し、前述のデータ解析基盤を利用する権利を付与する等の仕掛けをつくることが有効だと考えられる。

##### ➤ 国による資金的な支援

企業にとって自然模倣技術・システムは新しい分野であり、研究開発への投資はリスクが大きいいため、国が資金的な支援を行うことが期待されている。また、資金支援の効果を上げるために、各省庁に分散しない一元的な資金の投入や、コンペティションによる資金供与も有効であると考えられる。

### ③ 国際標準化への対応

#### ➤ 自然模倣技術・システムの位置付け、海外主要国の狙いを踏まえた標準化戦略の検討

標準化を活用するために、前提として、自然模倣技術・システムの産業上の位置

付けやモノ・サービスとの関係性を明確にする必要がある。さらに、ドイツ、フランス、米国等、海外主要国の狙いも踏まえた上で、標準化戦略を検討していく必要がある。

- バイオミメティクス製品認証による輸入規制への対応  
バイオミメティクス製品認証については、今後、認可を得ていない製品の輸入・販売が規制されることが懸念されるため、関連動向を注視するとともに、対応策を検討する必要がある。
- 企業が参画する標準化活動のための場の設置  
標準化する技術が産業界で広く使われるためには、企業のニーズを取り込みながら標準化を進める必要がある。したがって、企業が積極的に参画するフォーラム等の場をつくり、社会応用にリンクした形で標準化活動を推進する体制と仕組みを構築する必要がある。その際、特にバイオミメティクスで先行している企業に資金を拠出し、参画のインセンティブを与えることが有効と考えられる。

#### ④ 自然模倣技術・システムの普及・啓発

- 地域での実証実験の実施  
持続可能な社会の実現のためには、企業と利用者が持続可能な社会のイメージを具体化し、共有するために、モデルをつくる必要があると考えられる。そこで、地域を限定して、自然模倣技術・システムを導入して、利用しながらその活用方法を検討していくといった実証実験を行っていくことが有効であると考えられる。
- バイオミメティクスの次世代イメージの形成と浸透  
バイオミメティクスを知らない経営者や過去にバイオミメティクスの研究開発に取り組んだことのある研究者に新しいバイオミメティクスの可能性を知ってもらうため、ロータス効果を応用した撥水性材料、ゲッコーテープ等、旧来の事例ではなく、3Dプリンティングとの組み合わせ等のインパクトのあるテーマや事例を発信し、バイオミメティクスの次世代イメージを形成、浸透させる必要がある。
- 企業内研究会・発表会の実施  
企業においてバイオミメティクスの可能性を周知していくため、社内で研究会をつくって、バイオミメティクスの実用化事例や他社の研究開発動向、自社ビジネスへの適用の可能性等について調査検討し、その結果を、社内の発表会等で発表していくことが有効であると考えられる。

➤ 日本人の自然観等の取り込み

利用者のライフスタイル・価値観を転換させていくにあたって、技術・システムだけでなく、日本人が元来もっている自然観等の価値観や思想、文学的、詩的なものまで含めて、自然模倣技術・システムというものを考えていく必要がある。

➤ 利用者向けワークショップの実施

利用者に対して自然模倣技術・システムの魅力を伝えるため、また、持続可能な社会の実現に向けた新たなライフスタイル・価値観を形成していくために、利用者向けのワークショップを開催することが有効だと考えられる。その際には、利用者の参画を促すために、バイオミメティクスそのものでなく、バイオミメティクスが関連する利用者にとって関心の高いテーマ（例：エコ村の新たなコンセプトづくり）を設定することも重要だと考えられる。

### 5.3. 実社会への応用についてのまとめ

企業へのヒアリング結果によると、企業にとって、バイオミメティクスは、従来の手法では難しかった、機能性と環境負荷低減効果の両立や新機能の実現等の技術課題を達成するための手法の一つとして位置付けられているが、現状、企業にとっては、市場性が期待しにくい、若しくは、上記の技術課題を達成する手法としての有効性が見えにくいため、参入しにくいものと考えられる。

また、バイオミメティクスの手法を取り入れた研究開発に着手しようとしても、生物の機能が発現するメカニズムに関する研究が十分に進められておらず、企業自身は生物学の知識をもつ人材を抱えて研究を行う余裕もないため、企業だけでは研究を進めにくい。

一方、利用者側からみると、産業技術総合研究所により 2014 年 2 月に実施された、バイオミメティクスに対する市民の意識調査では、バイオミメティクス関連の言葉について聞いたり読んだりしたことがない人は 89%となっており、バイオミメティクスに対する認知・知識は極めて低い。また、バイオミメティクスという言葉から受ける印象について、回答者の 71%は「どちらとも言えない」と答えている。しかし、情報提供すると、「非常に役立つ (40%)」、「どちらかという役立つ (38%)」とポジティブに答えた人は 78.4%に増えたことも指摘されており、バイオミメティクスに対する認知度、理解度を高めるために、利用者に対する普及・啓発に取り組んでいくことも重要であると言えよう。<sup>19</sup>

以上のことから、自然模倣技術・システムを実社会へ応用していくためには、産学連携の体制のもと、機能発現メカニズムの解明を進め、市場性や機能性の面でインパクトのある成功事例を創出するとともに、それを普及・啓発していくことが必要になる。

産学連携においては、生物学と工学等の共創を促すテーマ設定、ビジネス系や社会科学

<sup>19</sup>安順花、関谷瑞木、阿多誠文「バイオミメティクスに対する最初の意識調査」PEN 2014 March vol. 4 No. 12

系等の専門家の巻き込み、さらに、産学だけでなく利用者参加型の研究開発を行っていくことが有効と考えられ、それを支える仕組みとして、データ解析基盤や人的ネットワーク等の構築が必要と考えられる。まずは、自然模倣技術・システムの社会応用に積極的な企業の研究者に対し、国が資金的な援助を行い、バイオミメティクスに関わる大学の研究者と連携して、特に、4章で示された3Dプリンティングとの組み合わせや自己組織化等、従来のような単なる形態模倣とは異なる新たな事例を創出していくことが有効と考えられる。

また、普及・啓発を進めるためには、地域を限定した実証実験によるモデルづくりが有効だと考えられる。企業向けには、バイオミメティクスの次世代イメージの形成と浸透、バイオミメティクスに関する企業内での研究会やその成果の発表会の実施、利用者向けには、日本人の自然観等の取り込みやワークショップの実施が有効だと考えられる。

さらに、現在、欧州を中心に、バイオミメティクスの国際標準化が行われていることから、今後、日本としての自然模倣技術・システムの位置付けや海外主要国の狙いも踏まえて標準化戦略を検討し、標準化活動において企業のニーズを取り込んでいくための場を設ける等して、標準化を社会応用とリンクさせていくことも重要だと考えられる。

## 6. まとめと提言

### 6.1. まとめ

本事業は、「第四次環境基本計画」で掲げられた「低炭素」、「循環」、「自然共生」の各分野を統合的に達成した持続可能な社会を実現するための手段として、自然模倣技術・システムの活用可能性を調査検討し、社会応用の方向性を提示することを目的に取り組んできたものであり、自然模倣技術・システムの創出手法に関する検討会（以下、検討会）を設置し、既存事例の収集・体系化、データベースの作成、新規事例の創出手法および新規事例の創出に関し検討を行うとともに、実社会への応用手法の検討を実施した。

第2章で示した通り、既存事例の収集と諸外国の政策動向の調査では、ドイツでは生物多様性国家戦略を実行する手段の一つとしてバイオミメティクスを位置付けるとともに、産学官のネットワークである BIOKON の設立に政府が多額の支援を行っている点や、フランスのサンリス、米国のサンディエゴにおいてバイオミメティクスを地域振興に活用している点等、我が国の施策を検討する上で参考になるポイントを見出した。

第3章で示した通り、既存事例の体系化とデータベースの作成においては、既存事例では構造を模倣した例や単一技術、単一製品の応用が多いことから、現象・原理の模倣や単一技術を組み合わせた複合的な価値形成による新規事例創出の可能性を提示した。

第4章では、新規事例の創出に向けて、目指すべき将来社会のコンセプトを整理した。また、新規事例の創出手法を検討するとともに、自然模倣技術・システムの次世代イメージを形成する今後の技術開発テーマの方向性として、3D プリンティングや自己組織化を見出した。

第5章においては、実社会へ応用するための手法についての検討結果を提示している。産学連携による生物の機能メカニズムの解明、インパクトのある成功事例の創出と普及・啓発、それらの取り組みを支える基盤の構築の必要性や、自然観を取り込んだ技術として日本から世界に発信していくことが重要であることを提示した。

以上の検討結果等を踏まえ、検討会から、持続可能な社会の実現に向けた自然模倣技術・システムの活用の方向性として以下の5つが示されている。

- ・ **構造からプロセス、システムの模倣へ**：生物の構造・機能の模倣だけでなく、生物の省エネルギー・省資源で、汎用元素を用いた生産プロセスに学び、新たなものづくりの技術を創出する。また、生物個体や生物社会をシステムとして捉え、環境負荷の低い社会システムの実現、さらには社会やビジネスの変革のヒントを得る。
- ・ **生物の多様性と人間の叡智を組み合わせる**：必ずしも全ての場合において自然が優れているわけではないため、生物の生き残り戦略に学ぶだけでなく、人間の叡智を組み合わせる。

- ・ **技術に自然観を取り込む**：自然を支配するのではなく、自然と共に生きるという日本人がもともと持っている自然観を呼び起こし、技術に取り込む。それを世界に発信し、日本から地球環境を改善していく。
- ・ **ライフスタイルを転換する**：環境負荷の低減のみならず、新たな価値の創造（うれしさ、楽しさ等）とライフスタイルの転換により、心豊かな暮らしを実現する。
- ・ **国際的な知的プラットフォームを構築する**：世界中の多様なプレイヤーがコラボレーションするための場を地域が主体となって構築し、国際会議やワークショップを通じて、生命文明を地域から世界に発信、日本から世界を変えていく。

## 6.2. 提言

検討会から、まとめにおいて示した方向性を基に、自然模倣技術・システムの社会応用を推進していくための施策として、以下の提言がなされた。

持続可能な社会を実現するために科学技術には何ができるのだろうか。これまで様々な環境技術の研究開発が行われてきたが、従来技術による省エネは限界に近く、飛躍的な高効率化の実現には新たな技術が求められている。また、技術を導入するだけで、従来の大量生産・大量消費の構造を変えないままでは、環境劣化は止められない。環境制約の中でいかに持続可能な社会づくりのシナリオを描くのか、我々は今、人類の歴史の中で新たな生き方を選択すべき岐路に立っている。

では、持続可能な社会とはどのような社会だろうか。それは、「生命を基軸とする社会」ではないだろうか。2011年3月11日に発生した東日本大震災は、我々に、今後の科学技術と社会はどうあるべきかという問いを突きつけた。我々は、自然を支配しようとすることの限界を改めて認識させられた。自然エネルギーの導入促進やエネルギーの効率的な利用等、社会は変わり始めたように見える。しかし、根本的には何も変わっていない。従来の効率重視の考え方のまま、社会は動いているのではないか。今こそ、生命を基軸とした社会に舵を切るべきときである。それは、産業革命以降、人間が築いてきた機械文明を否定するものではない。これまで築いてきたものを土台に、これまでの延長線上でなく、新たな方向へ転換するということである。自然模倣技術・システムは、これからの科学技術の進むべき道である。いや、その応用先は科学技術に留まるものでなく、産業と社会に広く「生命を基軸とする」というパラダイムシフトをもたらすものとなり得る。生命は工学の論理とは異なる論理で動いている。もちろん、トレードオフやフィードバック、階層性等、工学と共通するものもある。しかし、適応、自律性、自発性、自己組織化、創発、自己創出、循環、学習、知能、心、予測不可能性、いい加減、不正確、あそび、可塑性と堅牢性、普遍性と多様性といった生命の論理は、工学とは異なるものであり、そこに我々は、「生命らしさ」や「いのち」を感じるのだろう。「生きる」ということの論理、それは「生命の知」とでも言うべきものである。生きており、生かされているということを見つめ直

し、「生命の知」に謙虚に学び、よく生きるためにそれを生かしていくこと、生命であるヒトと機械文明を築きあげた人が共鳴する姿、それこそが我々人間が今後進むべき道ではないだろうか。

また、東日本大震災が提起したもう一つの問題は、トランスサイエンス、すなわち、科学に問うことはできるが、科学だけでは答えることができない領域の顕在化であろう。科学技術のあり方の議論、さらには研究開発に、自然科学の研究者だけでなく人文・社会科学の研究者も、アカデミアだけでなく企業や政策決定者も、専門家だけでなく一般市民も参画することが求められるようになった。もちろん、それは、自然模倣技術・システムに限ったことではない。しかし、自然模倣技術・システムの研究開発に一般市民が参画するということは、トランスサイエンス的問題の解決だけでなく、もう一つの意味を持つ。人間自身が生命であることを思い起こせば、「生命の知」に学ぶということは、高度に複雑化・細分化し、ブラックボックス化されてしまった科学技術を利用者の手に取り戻すきっかけになるのではないだろうか。言わば「科学技術の民主化」である。科学技術を利用者の手に、そこからイノベーションが生まれ、停滞感の漂うこの日本を、そして世界を豊かに変えていくことになるはずである。

生命を基軸とする社会、すなわち、生命を中心に置き、生命を基準に判断し、生命を軸に回る社会、それは、環境省が掲げる「環境・生命文明社会」にも通ずるものであると考える。EU や米国においては、“Bioeconomy”というコンセプトが掲げられているが、これはその名の通り、経済のみを指すものであろう。生命「文明」は社会のあり方を変えていくこと、精神的な豊かさを実現すること、自然と共に生きるという文化を含めた概念であり、我が国から世界へ発信していくべきものである。

以下には、中核をなすものであり早期に着手すべき施策を短中期的な取り組みとして、それらを推進する下支えとなる施策を長期的な取り組みとして整理した。実施にあたっては、環境省単独でなく、関係する府省が一体となったスピード感のある施策展開が求められることから、府省の連携について付言した。

## 6.2.1. 短中期的な取り組み

### ① プラットフォームとしてのデータ解析基盤の整備

自然模倣技術・システムの研究は古くから行われてきたが、その社会応用は黎明期にある。モスアイフィルムやゲッコーテープ等、商品化に至った事例も散見されるが、多くの企業は様子見の状態であるとみられる。また、この分野の研究開発に着手している企業であっても、新しい分野、既存の領域から遠い分野であるが故に、社内的な理解を得るのが困難な状況にあると見受けられる。自然模倣技術・システムを実社会に応用していくためには企業をいかに引き込むかが重要であり、そのためには、連携のための場づくりとその「場」における成功事例の創出が有効である。連携のための場づくりを行

うにあたり、まず「場」に企業を誘引する要素が必要となる。そこで、本年度、作成した既存事例のデータベースを基に、既に文部科学省の科学研究費補助金「生物規範工学」において構築されているバイオミメティクス・データベース（工学者が昆虫、魚類、鳥類の電子顕微鏡画像を類似画像検索し、技術開発の着想を得ることのできる、発想支援型データベース）との連携を図る。企業の研究者へのヒアリングにおいても、既に稼動しつつあるツールとして、バイオミメティクス・データベースに高い関心が寄せられており、企業を「場」に引き付けるきっかけとして十分に機能するものと思われる。さらに、生物学者へのヒアリングにおいては、生物の形態や構造の情報と生息環境に関する詳細な情報を組み合わせることの有用性が指摘されていることから、環境省が保有する生物多様性情報や環境情報等の既存データを活用し、それらの連携による想起・創発の仕組み（環境メガデータ解析基盤）をそこに加えていくことで一層の高度化を図ることが期待できる。

多様な知識が連携し、自己成長するプラットフォームとすることを目指し、まずは、研究開発のツールとしてスタートし、これを基盤に人的ネットワークの形成を促進する。さらに、将来的には利用者への教育の基盤としても活用し、自然観の醸成やライフスタイルの転換に寄与することを視野に入れる。

実施にあたっては、既に関連するデータ解析基盤の構築に着手している文部科学省やJST、その他農林水産省等、関連するデータベースを保有する省庁との連携が有効である。

## ② 地域での実証事業による成功事例の創出

エネルギーや資源の循環システム等、社会システムへの応用を図る上では地域を限定したアプローチが有効である。また、自然観を醸成する上でもそれぞれが固有の自然資源を持つ地域に立脚することが望ましい。そこで、①で述べた成功事例の創出に向けて、自然模倣技術・システムの社会応用に積極的な企業の研究者と環境への意識が高い地域をマッチングし、ワークショップによる出口の探索やデータ解析基盤のトライアル利用による高度化、一般市民への普及・啓発、社会受容性の検証等の実証を行う。成果はシンポジウム等の情報発信活動により全国に発信していく。また、取り組みを一過性のものに終わらせないために、連携のための場を継続的に回していく仕組みを構築する必要がある。具体的には、異分野の研究者や産学が協働するためのテーマ設定（同じ問題を設定し、その解決に向けて各参加主体が異なるアプローチで取り組むことが異分野連携に有効）や企業が参加しやすいクローズドな仕組みの設計が挙げられる。

企業からは資金的な援助の必要性も指摘されているところであるが、まず立ち上げ時には国の強力なバックアップが求められる。例えば、BIOKON の例を見ると、ドイツ政府が 2001 年から 2007 年の間に 8.4 億ユーロもの資金を供与している。もちろん実証後に、自立自走できるよう準備をしておくことも必要である。これについては、農林

水産省で進められている 6 次産業化ファンドのような地域金融機関による資金援助やクラウドファンディングのような利用者による資金援助の仕組みの活用を模索する。データ解析基盤が将来的に利用者への教育基盤となることで、自然模倣技術・システムのリテラシーを高め、住民からの資金援助が促進されることを期待する。

### ③ 自然模倣技術・システムの研究の推進と体制構築

企業が生物学の知見を応用していくためには、機能発現のメカニズムの解明が必要であるとの意見がヒアリングでも聞かれたとおり、まだまだメカニズムが明らかになっていない生命現象は多い。また、生物学の知見を企業が応用可能にするためには、工学的な応用の可能性が見える段階まで研究が進められている必要がある。「環境・生命文明社会」の実現に寄与する、ライフイノベーション・グリーンイノベーションの次のコンセプトとして、次期推進戦略における重点化、さらには、内閣府や文部科学省等と連携して次期科学技術基本計画への反映を行うことで、公的資金の投入を呼び込み、環境省だけに留まらない大きなムーブメントとしていく。環境分野の研究費は平成 18 年度から 24 年度まで、おおむね科学技術関連予算の 3～3.5%で推移しているが、環境分野の重要性が高まっていることを鑑みると、一層の積極的な投資を行うべきである。

バイオミメティクスに関する研究は既に文部科学省や経済産業省によって助成されているプロジェクトで実施されていることから、それらと連携することで、研究成果の実用化への橋渡しを加速する。併せて、自然模倣技術・システムは新しい技術であるため、初期開発のリスクを企業単独で負わせない国家プロジェクトの枠組みや海外との連携の枠組みの構築（海外の研究機関が参加するプロジェクトへの助成、欧州の研究プロジェクトへの参画 等）も求められる。

また、戦略を実行する上で、研究への投資だけでなく、ドイツの BIONIK や米国の Biomimicry3.8 のような組織体制を構築する必要がある。

## 6.2.2. 長期的な取り組み

### ① 需要サイド（利用者）への普及・啓発

ライフスタイル・価値観の転換は時間がかかるものであり、長期的な視野で継続的に取り組む必要がある。具体的な施策として、地域における定期的なワークショップの実施や博物館における常設展示（博物館を地域における普及・啓発の拠点として活用）、小中高校における教育への組み込み、ライフスタイルの転換の誘導（利用者へのポイント供与、ライフスタイルの転換を利用者に提案する企業への補助金 等）、認証制度や公共調達等による自然模倣技術・システムを活用した商品の普及が考えられる。

### ② 供給サイド（大学、企業）への普及・啓発、人材育成

企業に、持続可能な社会の構築に向けた取り組みを早急に着手すべき課題として認識

させるとともに、自然模倣技術・システムがその実現手段として選択肢に上るのが当たり前になるようにするために、企業人への普及・啓発も重要である。ヒアリングでは、バイオミメティクスの研究会を設置し、バイオミメティクスの研究者の講演や製品化事例、他社の研究開発動向、自社製品への適用可能性等についての調査検討を行い、研究開発テーマを抽出、また、社内でのバイオミメティクスの普及に成功した事例も見られた。研究会を組成するところからスタートするのは難しい企業もあると思われるため、まずは、バイオミメティクスの専門家を交えたワークショップの実施から始めるのが効果的であると考えられる。

さらに、将来の研究を担う人材を養成するために、大学における教育コース（いずれは学科）の設置への支援も重要であろう。これらの基盤としては、前出のデータ解析基盤が活用できる。

また、農林水産省等と連携し、IPBES（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム）における生態系サービスの知識体系に自然模倣を入れ込むことを提案することも有効であろう。

### ③ 自然模倣技術・システムの対象範囲・対象領域の拡大

まずは生物の構造のモノへの応用が基軸になるが、将来的には、インスピレーションを得る対象として、生物の原理や行動、生物の社会システム、また、応用先として、産業や組織を想定する。具体的な施策としては、ビジネス系・社会科学系の専門家をメンバーに含めたワークショップ等の開催が有効であると考えられる。

## 6.2.3. 実現していくための方策とスケジュール

以下にロードマップと実現していくための方策を挙げる。

図表 31：ロードマップ

		2014年度	2015年度	2016年度
短中期の取り組み	①プラットフォームとしてのデータ解析基盤の整備	事例DBとバイオミメクスDBの連携の検討 環境メガデータの整理	事例DBとバイオミメクスDBの連携 環境メガデータ解析基盤の構築	バイオミメクスDBへの環境メガデータの統合
	②地域での実証事業による成功事例の創出	ワークショップによるテーマ深掘り	実証実施(3地域程度)	
	③自然模倣技術・システムの研究の推進と体制構築	次期推進戦略への提言 次期科学技術基本計画への提言	次期推進戦略への反映 次期科学技術基本計画への反映	推進体制の構築
長期の取り組み	①需要サイド(利用者)への普及・啓発		ライフスタイル転換を誘導する施策の検討	
	②供給サイド(大学・企業)への普及・啓発、人材育成	既存事例DBの公開	シンポジウムの開催	複数地域でのシンポジウム/ワークショップの開催 教育コースの設置支援
	③自然模倣技術・システムの対象範囲・対象領域の拡大		研究会の開催	

出所：富士通総研作成

【2014年度】

- データ解析基盤の構築に向けた検討
  - ・ 既存事例のデータベースとバイオミメクス・データベースの連携方法の検討
  - ・ 環境メガデータとして利用可能なデータの整理
- 実証テーマの深掘りを目的としたワークショップの開催とトライアル
  - ・ 地域や企業において参加者を固定して実施
  - ・ テーマとしては、データ解析基盤のトライアル利用による高度化、3Dプリンティングや自己組織化といったバイオミメクスの次世代イメージの形成、生物の原理や行動、生物の社会システムの応用を想定
  - ・ 実証の一部をトライアルとして実施、テーマ設定、実施内容、参加者等の実証の枠組みを検討
- 次期推進戦略、次期科学技術基本計画への提言
- 推進体制の構築
- 情報発信活動
  - ・ 企業/一般市民への普及・啓発を目的としたシンポジウムの開催

- ・ 本年度作成した既存事例のデータベースの公開
- ・ 普及・啓発のためのパンフレットの作成

#### 【2015 年度】

- データ解析基盤の構築
  - ・ 既存事例のデータベースとバイオミメティクス・データベースの連携
  - ・ 環境メガデータ解析基盤の構築
- 環境先進地域（3 地域程度）における実証事業
- 次期推進戦略、次期科学技術基本計画への反映
- 推進体制の構築（継続）
- 企業/一般市民への普及・啓発を目的としたシンポジウムの開催
- ライフスタイル転換を誘導する施策の検討（実証事業と連動）
- 大学における教育コースの設置支援
- 生物の原理や行動、生物の社会システムの応用をテーマとした研究会の開催

#### 【2016 年度】

- データ解析基盤の構築
  - ・ 既存事例のデータベース、バイオミメティクス・データベースへの環境メガデータ解析基盤の統合
- 環境先進地域（3 地域程度）における実証事業（継続）
- ライフスタイルの転換を誘導する施策の検討（実証事業と連動、継続）
- 情報発信のための複数地域でのシンポジウム/ワークショップの開催
- 大学における教育コースの設置支援（継続）
- 生物の原理や行動、生物の社会システムの応用をテーマとした研究会の開催（継続）、研究プロジェクトの組成

#### 6.2.4. 今後に向けて

前項において提示した施策に取り組んでいく上で、まず、本質的な課題として、自然模倣技術・システムとは何であるのか、生命を基軸とした社会へのパラダイムシフトにどのように貢献できるのか、さらに、豊かさ、幸福にどのように貢献できるのかを明確にする必要がある。一方で、自然模倣技術・システムを社会に展開し、「生命の知」をかたちに変えて実現していくためには、戦略的な取り組みも併せて必要であることから、本質論としての課題と戦略論としての課題の 2 つを両輪として達成していく必要がある。以下にそれぞれについて、検討会で挙げられた意見を整理した。

## ① 本質論としての課題

本質論としての課題は、大きく 2 つある。一つは、自然模倣技術・システムの概念の明確化や体系化、環境科学における位置付けの明確化、生物学や生物利用技術等の関連する他分野との関係性の明確化が挙げられる。もう一つは、自然模倣技術・システムとライフスタイルとの関係性の明確化である。新規領域としての自然模倣技術・システムを確立し、拡大・拡充し、さらに発展させていくために、また、後述する戦略論としての課題を達成するためにも、ロジックをしっかりと構築しておくことが重要である。

### 【自然模倣技術・システムの概念・位置付けの明確化、体系化】

- 工学の概念に対応する生物学的な概念を一旦、整理することが必要である。その上で工学側から生物側に移す可能性を探索するという話に持っていかないと、何となく工学の域の中で議論がされているということになりかねず、それではもったいない。「セカンドサイバネティクス」のような議論をもう一度、トレースバックする必要があるのではないか。
- 自然模倣という体系自体がどのような価値があって、どのようなイノベーション、パラダイムシフトを起こせるのかという大本のところを整理する必要があるのではないか。
- 動脈産業と静脈産業を連関させるべきという議論を農林水産省の事業で行っている。生産、加工、流通だけでなく、調達、調理、食事まで含め、さらに、その裏側にある、Food loss（食料のロス）、Food waste（食料の廃棄）といった静脈も含めて、動脈産業と静脈産業を連環で描き、その中で産業を創出するという考えであり、このプロジェクトでの議論と関連してくると思う。
- 自然模倣技術・システムは遺伝子の改変技術のような生物の利用技術ともつながるし、そこから生物資源の戦略的活用に広がっていくはずである。
- 環境科学、環境政策科学の中で自然模倣技術・システムを位置づける学の研究が必要ではないか。
- 自然模倣技術・システムの重要なところとして、実社会への応用だけでなく、未知なるサイエンスに貢献できるという循環の構造があるのではないか。

### 【自然模倣技術・システムとライフスタイルの関係の明確化】

- 生物多様性というテクノロジーとライフスタイルに影響を与えるものを Happiness の指標に入れて、テクノロジーの効果や波及効果を定量的にみるというアプリケーションを入れてもよいのではないか。そうすれば、経済や社会科学の人たちも巻き込める。
- ライフスタイルの変容と自然模倣技術・システムとがどのような関係にあるかというロジックをきちんと構築する必要がある。
- 何を最適化するのが重要である。これまでは、コストや性能等、工業製品に求め

られるものを最適化する方向で、それによって生じるマイナス面はあまり考えずに進んできたが、今後はそれが資源やエネルギー、さらには、Quality of Life（生活の質）になるのではないか。

- 工学の論理に対するパラダイムシフトをもたらす生物の論理、それに基づくライフスタイルの変容ということを提起するのであれば、これまで非科学と呼ばれてきた哲学、宗教、美学等からのインスパイアの方があるのではないか。工学や理学だけのプラットフォームだけでなく、社会科学との連携を通じて、もっと大きなパラダイムシフトや新しいものづくりのロジックを継続的に育てていくべきではないか。

## ② 戦略論としての課題

戦略論としての課題は、大きく 2 つある。一つは、産業界の巻き込みである。利用者の参画の必要性は前述のとおりであるが、企業の参画なくして、自然模倣技術・システムの社会への展開はあり得ない。もう一つは、利用者への浸透である。地道な普及・啓発が重要であることはもちろんであるが、社会への浸透をスピードアップするために認証制度等の仕組みの活用を検討することは今後の課題である。また、利用者にとって技術は何でもよく、産業としてはシームレスであるべきという視点も重要である。

### 【産業界の巻き込み】

- バイオミメティクスはある特定の技術分野というよりも、新しい視点・切り口であり、広範な技術分野に薄く広がるものだと思う。それだけではビジネスにつながらないが、範囲が広くいろいろな技術のベースになるという点で非常に重要である。ただし、時間がかかる活動である。そのようなところが企業に伝わっておらず、儲からないと思われているのが実態だと思う。
- バイオミメティクスは既存の製品をよくするための技術というよりも、イノベーションを生むための新しい視点であり、これまでなかった新しいテクノロジーや考え方をつくっていく枠組みとして企業が捉えられるような事例を作っていくところが特徴だと思う。
- バイオミメティクスは何かを解決するための小さな技術でなく、パラダイムを変えるような大きな体系であるべきだと思う。企業の人たちも何となくそのようなものがありそうだという期待はあるが、具体的にはどのような形でそれが出てくるのか見えづらいということだと思う。
- 生物を真似るという考えは昔からあり、同じ名前でも違う内容のものが出てきては消えていくのを繰り返しているもので、以前のものとは何が違うのかをきちんと打ち出せるとよい。
- まちづくりのように、既にインパクトが出ており、ビジネス化されているような事例を示し、課題として設計思想の異なる建材や自動車、家電への応用はどのようなところに壁があるのかを示した方がよいのではないか。
- ナノテクノロジーが企業の研究開発に入ってきたのは、電子顕微鏡の進歩によると

ころが大きかった。バイオミメティクスもいかに加速するか、加速するためにその核になるものが何なのかが明確になれば、企業も参入しやすい。

- 新規事例の創出に向けて、本年度提示した 3D プリンティングや自己組織化等の技術開発の方向性を、来年度以降、ワークショップ等を通じて具体化していく。

#### 【利用者への浸透】

- 認証制度の例として、サステイナブルな林業・漁業の認証制度がある。認証マークがついているだけで、2~3 割程度値段が上がるが、売れており、認証制度がうまく機能している例と言える。技術の社会実装は自然科学のセンスだけでは難しい。
- 認証制度は面白いと思う。認証 (certification) のためには、認定 (accreditation) をしないと行けない。そのためには、認定の基礎になる考え方がしっかりしていないと行けない。何となく手先の自然模倣で認証制度をつくと、それ自体がつぶれてしまう。そこをしっかりとやることを今後の計画に盛り込みたい。
- なぜ生物を模倣するとよいのかをきちんと論理構築して、それが利用者に分かる言葉で説明できないと認証制度をつくるのは難しいと思う。
- 地域の実証について、里山プロジェクト等が今まで行われてきたと思うが、今回は、1 地域は都市を入れる必要がある。ライフスタイルを含めてやっていると、人間がたくさんいる都市を何とかしないと行けない。
- 消費者にとっては、バイオミメティクスでもバイオテクノロジーでもよいものであればどちらでもよく、よいものがエコフレンドリーに手に入ればよい。技術は異なっても、産業としてはシームレスであるべきである。

技術も領域も、もちろん生命も、そして人も、特定の個では存在し得ない。地球という空間と 38 億年の歴史のつながりの中で存在している。「つながり」が生命の本質であるとすれば、「つながり」による価値創出が自然模倣技術・システムの目指すべきところではないか。そして、「つながり」こそ、失われつつある豊かさの一つではないだろうか。

生命を基軸とした豊かな世界の実現に向けて、前述の施策に早急に着手すること、また、今後に向けた課題に対して継続的に真摯に取り組むことをここに提言する。