（４）国内研究動向紹介

「自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関する

ワークショップ」

３月１９日の「自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関するワークショップ」は公開、３月２０日の「生物画像データベース検討ならびにナノスーツ法に関するワークショップ」は科研費メンバーに限ります。

主催：文部科学省科学研究費新学術領域「生物規範工学」、環境省
日時：３月１９日１３：３０～１８：００
場所：北海道大学工学部　フロンティア応用科学研究棟 レクチャーホール
URL：http://www.eng.hokudai.ac.jp/building/detail.php?area=2

プログラム：
開会の挨拶（１０分）：「情報科学でつなぐ自然史学と工学の連携：バイオミメティクスとネイチャーアイランド北海道」生物規範工学領域代表　下村政嗣

開会の挨拶（１０分）：　環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室長　吉川和身

事業報告（３０分）：環境省事業「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討について」
富士通総研　長谷川誠

招待講演（１）（３０分）：「自然史財の総合的研究について」
科学研究費「自然史財の総合的研究」代表　北海道大学名誉教授　馬渡俊介

招待講演（２）（３０分）：「北海道博物館について」
北海道開拓記念館副館長　出利葉浩司

招待講演（３）（３０分）：「バイオミメティクス市民セミナー　北大博物館の取り組みについて」
北海道大学総合博物館教授　大原昌宏

招待講演（4）（３０分）：「ナノスーツ法：自然史学を変える電子顕微鏡観察法」
浜松医科大学教授　針山孝彦

招待講演（5）（３０分）：「千歳におけるものつくり：ナノテクノロジー・プラットフォームとPWC」
千歳科学技術大学教授　カートハウス・オラフ

パネルディスカッション（６０分）：ネイチャーアイランド北海道におけるもの作りと博物館の役割

パネラーからの話題提供とディスカッション
モデレーター：高分子学会常務理事事務局長　平坂雅男
パネリスト：
浜松医科大学教授　針山孝彦
国立科学博物館研究主幹　野村周平
北海道大学総合博物館教授　大原昌宏
北海道大学名誉教授　科学研究費「自然史財の総合的研究」代表　馬渡俊介
北海道開拓記念館副館長　出利葉浩司
千歳科学技術大学教授　カートハウス・オラフ
生物規範工学領域代表　下村政嗣

速報

ISO/TC266 Biomimetics 第 4 回会議（ベルギー Liège）WG1 報告

大阪大学大学院　工学研究科　精密科学・応用物理学専攻　齋藤彰

本会議に関し、場所の詳細や会議構成の全体像については他に説明がなされると思う。よって以下、全体像についてもある程度の補足は行いつつ、筆者が主担当を務めた WG1 を中心に述べたい。

1．WG1: Terminology, concepts and methodology

WG1 の会議が行われた状況は、以下のとおりである。
開催日時：2014 年 10 月 20 日（会議一日目）13:40 ～ 19:45、22 日（会議三日目）9:00 ～ 14:00（WG1 を含む全体討論）
参加者：TC266 関係者全員
場　所：Faculty of Law and Political Science – The Jean Constant Criminology School of Liège, Build. B31（会議は全てこの一室で行われた。図 1 のように矩形が二重になった配置の着席となった。図 2 に会議直前の様子を示す）。

2．これまでの流れ

WG1 の主題は、前項が示すとおり「定義、概念と方法論」である。「国際標準」を策定するからには、言葉と定義が

図 1　会場の様子

図 2　会議開始直前の様子（筆者の席から）

基礎になるのは言うまでもない。だが、さらに突っ込んで言えばWG1最大の使命は「何を以てBiomimeticsとなすか」という判断基準を明文化すること、である。これが曖昧だと「正規」と「似非（えせ）」の境界が揺らいでしまい、「標準」自体が成立しなくなるからである。

たとえば生物を規とせず、人による工学だけで導かれた技術（ex. フォトニック結晶など）は、結果的に生物機能と共通することがあっても（自然界でフォトニック結晶をもつ生物が今世紀に入って多数、発見されている）、技術の起源で生物不在なのでBiomimeticsには該当しない。逆に、生物をそのまま借りた技術（ex. 細菌に作らせるインシュリン）は、生物「借用」であって、そこに人間不在なので生物「模倣」ではない。つまり「生物機能」を規として「人間が作った」技術が前提となる。

しかし、もとより生物・物理・化学から工学に至る、広範かつ膨大な境界領域を必然的に含むBiomimeticsは、宿命的に多くの曖昧さを内包してしまう。そこにWG1の困難が凝縮されている。一方で、こうした定義・言語の明確化が、ひいては「創造的な検索」に代表される情報技術を支えており（WG4）、あるいは新たな現象・物質（WG2）や最適化プロセス・意匠（WG3）などの拾い出し・定義を可能にするので、すべてのWGと恐らく最も密接に関わっているWGである。

このようにWG1は基盤的なWGであるがゆえに早期の整備が企図され、ISOの初段（PWI：Preliminary Work Item）設定後、規格発行に至る6段階のうちすでに4段目（DIS：Draft International Standard＝原案）の草案に対する投票が2014年7月に行われている。投票結果は、本会議前に「賛成2/3以上、反対1/4以下」の基準を辛くも満たして通過している。「辛くも」なのは、日本とカナダの反対票による（後述）。参考までに投票で決定権のあるPメンバー国では、棄権はベルギーと英国の2国で、他のドイツ（議長国）、フランス、イスラエル、韓国、中国、チェコ、は賛成票であった。本会議は、次の5段目（FDIS：Final Draft International Standard＝最終規格原案。6段目はもう発行である）への改訂を前に、7月のDIS投票時に提出された各国の修正要求を検討する場であった。

3. 議事と当日の様子

3.1 前提条件

過去3回の国際会議での議論（2012年10月～）とウェブ会議を経て、Biomimeticsの判定基準として右記の3原則が採用されており（図3）、一種の拠り所となっている（これはもはやWG1に限られた話でなく、WG3でもこの原則に照らした議論に多くの時間が割かれた。詳細はWG3の報告を参照いただきたいが、たとえばCAO (computer-aided optimization)、SKO (soft kill option) に基づくアプローチがBiomimeticsか否かについては、何度もこの3原則に立ち返って議論されていた）。

Criteria for a biomimetic product
（バイオミメティクス3原則）

---

1. Function analysis of biological system
【「生物」の分析に基づく】
2. Abstraction from system to model
【生物から「原理抽出」しモデル化】
3. Transfer and application without using the biological system
【生物を（そのまま）利用するのでなく「（ヒトの）技術に転換」】

→ Biomimetics YES or NO（判定）

図3　バイオミメティクスの3原則

草案作成ではこれまでこの基準にのっとり、各事例（ハスの葉に基づく超撥水技術や、げっ歯類の歯に基づく自己研磨機能をもつ刃など）に関する判定の例示・検証や、言葉の定義付与による足場固めの作業が行われてきた。しかし上述のとおり回避困難なグレーゾーンも多く、判定が紛糾することも多い。しかも国益を背景に、各国の思惑が絡んでくると、話はさらに複雑になる。

草案に反対票を投じた日本とカナダに限らず、賛成国からも修正案は多数提出され（合計45件）、A4換算で15頁にもわたった。WG1に充てられた初日午後の枠内で、その修正案ほぼ全てを俎上にあげて処理し切ったConvener・H. Beismannの手腕は称賛に値するが、時間は大幅に超過し、予定の4時間どころか6時間超の白熱した議論が展開された。コーヒーブレイクを尊重する欧州人が多数いながら休憩による中断も無く、終了時には20時近くになっていた（さらに最終日である3日目、WG1の議論はこの修正案とは別に1時間以上続けられた）。議論のすべてを網羅することは紙幅の関係で到底不可能であるが、要点は以下の通りである。

3.2 対象読者と用語

今回、カナダは初参加ながら「声が大きく」、前半はその提案・検討に多くが割かれた。最初に紛糾した議題は「本

草案は対象ユーザが曖昧であり、矛盾すら含んでいる」という提案である。つまり対象を「技術系に限らぬ幅広い人々（特にデザイナーや経営者を含む）」と記しておきながら、肝心の中身が技術に偏りすぎており幅広い人々には理解困難である、との主張である。対策として一般向けの大幅な加筆・修正の提案がなされたが、長い議論の末、端的に言えばISOが「工業」規格である点から（つまりユーザは工業関係者が主体との判断である）軽微な加筆に留まった（この議論が終わった時点で15時を回っていた）。

次に、第２章（辞書的に用語の定義・説明が並んでいるパート）の不備、である。もともと本章には自己言及や言葉足らずなどの不備が多く、日本からも修正提案を多く出しており、逐次訂正を行っていった。ただしBiomimetics – Biomimicry – Biomimesisなど混乱した類義語について、大小の差異に始まって重箱の隅に陥る場面もあり、曖昧な境界が不鮮明のままで残るなど、棚上げ事項も存在している。また、これら混迷する用語をベン図により視覚的に包括して整理し、理解の助けとする目的だった「図１（フランス提案）」（本稿の図１と関係なく、草案における図１）が、大多数の判断で削除されたのは少し惜しい気もした。一方で、こうした視覚的な整理は（図の出来が良ければ）大いに助けとなるが、出来次第では語弊の源にもなり、弊害が利点より勝ることもあり得たので、止むなし、という所である。

3.3 日本提案の中心議題

次に、日本提案でもあり最重要項目の１つに「3原則（図３）の適用範囲」がある。上述の通りBiomimeticsのYes/No判定には「人」と「他の生物」両者の関与が必須であるが、その判定基準を巡っては前回の会議（第３回：プラハ）から紛糾している。特に日独間で対立が色濃く、代表例は遺伝子工学で作るSpider Silkである。この場合、現在の主な技術例では細菌への遺伝子導入によってクモ糸素材蛋白を生産しており、本来の定義では冒頭の通り「生物借用」に過ぎない。一方、ドイツは強引な拡大解釈からこれをBiomimeticsとして容認し、その定義を広く適用している（居城邦治委員（北大教授）の調査によれば、背景にはドイツ国内の予算獲得やそのための宣伝、またそれに絡んだ研究グループ等さまざまな事情が影響していそうであるが、その詳細をここで述べるのは本意でない）。本件は日本が提出したDIS反対票の主な根拠でもあるため、我々も準備を重ねてきた（たとえばドイツの強硬論に対し、比較的穏健なフランスへの協力を仰ぎつつ臨むなど）。

ところが会議直前に配布されたDIS草案では（注：これは投票の根拠になったDIS草案でなく、７月のDIS投票時に提出された修正案コメントを部分的に反映した直近のDIS修正草案）では、驚くべきことに最重要句without using the biological system（図３）が削られる改変がなされていた。しかも直前になって、このドイツ寄りの改変（「生物借用」を禁じる句を削った、つまり「生物借用」を容認しやすい改変である）がフランス提案だと判明するなど、我々は一時、窮地に立たされた。「生物借用」につながるこの改変は、３原則の意義が揺らぐ極めて危険な代物である。当日の議論では、ドイツ（と、やはりというかフランス）の改変案に対し、日本は文言の重要性や、「生物借用」の明確な（一瞥してわかる）禁止原則を示す観点から粘り強く交渉し、何とかwithout…の重要句を保持できた。

さらに引き続き、３原則判定について「明確さ」を標榜した無理な○×判定に、日本は継続して反対してきた（これも主な対立は日独間である）。ドイツの主張は「標準規格は曖昧さを排除し、明確を以てすべし」という一見もっともらしいものだが、一方、どうしても判断が難しいケースがある。先ほどのSpider Silkで言えば、「生物借用」の点では人間不在なので判定×ながら、遺伝子解析自体は工学で（つまり人間介在がある）、また紡糸技術など他要素にも工学を含むと見なせる場合があり、「総合多数決」的な○×判定では○とすることも、百歩譲れば誤りではない、とも言える。ただしその○は、深刻な×を内包する○であり、とても万全の○ではない。それを結果だけで「○」としては完全な○と区別できず危険、と考える我々は（曖昧なものを明確な○と喧伝するのは当然、危険である）、○×にHybrid判定導入の妥協案を示した。

結論として最終的にHybrid案の導入には至らなかったが、単純な○でない旨を示すMatrix（○×で構成される）を書き加えて明示する、という形での合意を得て、何とか主張を入れられた。この際、我々が主張の根拠としたのは、内容を明確にするほど「明確な矛盾（ex. 上記の○×混在）」も浮き彫りになること、最近ISO/TC 276が立ち上がったBiotechnologyとの境界問題（つまり「生物借用」を容認すると、Biotechnologyはすべて Biomimeticsに入り得る）、拡大解釈した○判定では規格が「何でもあり（標準の判定が実質、素通し）」の骨抜きになる危惧、将来的なWG4での検索利便性、などの点である。一方で、意見を共有する英・カナダの協力が非常に助けになったことも否めない（カナダと英国も議長国ドイツの言う「明確さ」自体に反論コメントを事前投票していたため、この協力は事前にある程度は予想でき、我々の狙いでもあった。ただし彼らとは事前交渉はしていない）。なおカナダの「明確さに限界あり」という見方は我々と共通だが、彼らは対策としてhybrid容認ではなく「明確でない分、各々の事例をさらに

大幅に増量して詳述する」という対案を出していた。しかし「ISO 文書は規格であって、教科書ではないので」と却下される結果になった。

3.4 国際的な攻防

カナダは今回、上述した件も含め、草案のタイトル変更からあげくに大幅加筆・全面改訂に至るまで過激な要求を続け、DIS 検討段階での遅い初参加なのに今さらここまで要求するかと驚かされた。筆者などは、会議開始直後の「幅広い対象ユーザという矛盾」を突く強い長い主張には半ば呆れて反論しかけたし（ただし事前の修正要求を見る限り、カナダが貴重な味方になる可能性があったため、何とか自重を続けて対決は避けた）、他のドイツ委員がカナダ委員を少し強めに諭す場面もあった（が、ひるむ様子もまたなかった）。Convener はよく穏便に我慢したと思う。

しかしカナダの主張自体は、一貫して従来の不備を突くきわめて真っ当な内容が多く、唯一の反対票仲間として日本に益する場面も非常に多かった。ただし最終日になって、次段の FDIS への議論に際し、FDIS に行く前に、改めて文書全体を見直す機会（投票を含む）を新たに設ける提案をし、物議を醸す場面があった。彼らの提案には、DIS 修正案でもいまだに残る不備を一新し得る長所もあるが、迅速な文書公開には大きな障害となり、前会議を含めて長らく議論してきた我々はそこまでの出戻り要求には同調できず、ここではドイツ側に寄る形になった。この点、筆者は初日の盟友カナダには厳しく「理由」を問われることになった（上記の説明をした）。他の欧州各国とも賛否の「結果」だけでなく根拠を立てており、理屈で動く彼らと対抗できる論陣は非常に重要であった（結果だけでは相手にならない）。

3.5 補足

重要な補足として最後に 2 点、追加したい。まず WG1 から派生して Sustainability に関する議論と草案（Work item）を、英国が責任者となって立ち上げる新提案が承認されたこと（ただし類似内容を含む既存の TC が ISO 内に複数あり、それらとの重複には留意が必要、と日本からは釘を刺した。なお日本は新提案自体には賛成票を投じた）。次に、「biomimetics 3 原則における 2. 原理抽出の際に間違いを犯し、その結果、応用も誤るなどした誤謬例がいろいろ埋もれており、検証すべし」として調査を行うこと（カナダ主導）、で合意した。

4．総括

初日で 6 時間強、最終日を入れると 7 時間超にわたり意見を戦わせ、WG1 の DIS は（7 月の投票では賛成多数で通過していたが）修正要求の検討も終了した。今後、Convener による迅速かつ正確な修正を待つことになる。新たな修正・提案は別として、まだ 2015 年春の Convener 会議に向けて、本会議で議論されたコメントの反映については確認などの窓が開かれている。率直に言えば、じつは先述した「拡大解釈による○判定の頻発→『何でもあり（判定が素通し）』の骨抜き標準」になる危惧は結局、ぬぐい去れていない。が、そうならないために日本ができる攻防としては、ここが限界である。各国の利益や思惑を背負う国際対抗図に直面し、難しさを痛感しつつ、有効な規格策定に結実することを切に望む次第である。

【問い合わせ先】
Tel：電話 06-6879-7298、Fax：06-6879-7299
E-mail：saito@prec.eng.osaka-u.ac.jp
URL：http://www-ss.prec.eng.osaka-u.ac.jp/html/member/stuff/saito.html

BULLETIN

速報

工業製品のデザイン・アルゴリズムが国際標準へ

ISO/TC266 Biomimetics, WG3 Biomimetic Structure Optimization 日本代表 Expert
日本工業標準調査会（JISC）バイオミメティクス国内審議委員会副委員長・主査
産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門　阿多誠文

はじめに

2014 年 10 月 20 ～ 22 日、ベルギーワロン地方の Liege においてバイオミメティクスに関する国際標準化を進めている ISO/TC266 Biomimetics の第 4 回総会が開催された。ドイツのベルリンにあるドイツ規格協会（DIN）で第 1 回総会が開催されたのは 2012 年 10 月 9 ～ 10 日だったので、バイオミメティクスの国際標準化活動はちょうど 2 年が経過したことになる。今回の第 4 回総会で、はやくもバイオミメティクスに関連する用語の標準化を進める WG1 と、バイオミメティック構造最適化アルゴリズムの標準化を進めている WG3 の標準の原案が、国際標準として発行されることになった。筆者は日本代表のエキスパートとして WG3 の活動に関わってきた。ここまでの議論の過程で、WG3 の原案をそのまま国際標準とすることに次第に疑問を感じるようになった。以降 Ballot で反対票を投じ、数回に及ぶウェブ会議でも原案の不備を指摘、性急に国際標準（IS）にするのではなく、当面は技術仕様書（TS）として公開するよう求めてきた。今回の第 4 回総会では初日午前中が WG3 の議論に充てられた。予想どおりの激しい議論になったが、結局この国際標準成立を止めることができず、近々国際標準として発行されることになり、忸怩たる思いに駆られている。

本稿ではまず、これまでのバイオミメティクスの国際標準化の活動の経緯を、その背景も含めて再度簡潔に整理する。加えて ISO/TC266 Biomimetics、WG3 Biomimetic Structural Optimization の活動に筆者がどのように取り組んできたのか、ドラフトが国際標準になることに対してどのような対応を取ったのか、国際標準になるとどのようなインパクトがあるのか等について解析を行う。それら諸々のことを鳥瞰した上で、今後日本が取るべき対応について思うところを整理する。

再鳥瞰、バイオミメティクス国際標準化の背景

EU が競争力強化、優れた知の創出、資源のプール、グローバリゼーションへの対応、欧州研究領域を作り上げる事への寄与等を目的として、科学技術の研究開発に係わるフレームワークプログラム（FP）を開始したのは 1984 年のことである。欧州の市場統合化が明確に打ち出された

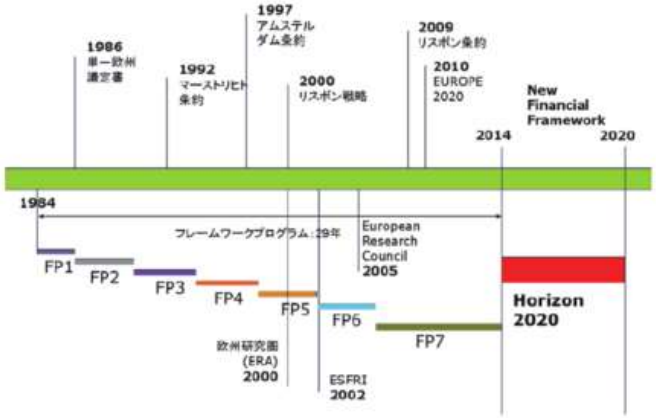


図 1　欧州のフレームワークプログラムの推移（出典：Ref.[1]）

1987 年の FP2 から、欧州のグローバル戦略の要として国際標準化の重要性が認識され始め、1991 年からの FP3 のフェイズに入ると、国際標準化のための研究開発プログラムへの資源の投入も始まった。このように欧州では、1990 年代から欧州の市場統合とグローバル化の重要な戦略課題として、国際標準化活動への取り組みが展開してきた。

科学技術の研究開発予算が大きく増加した FP7 は 2007 年に始まり、2014 年に Horizon 2020 へと継承されている。欧州においてバイオミメティクスの研究開発が本格化したのは、この FP7 からである。ドイツではバイオミメティクスの国際標準化に向けたプロジェクト ISO BIONIK Project が本格的に始動している。ドイツ国内の産学連携のバイオミメティクスの研究開発枠組みである BIOKON、ドイツ技術者協会 VDI、そしてドイツ規格協会 DIN の協働で、標準原案の VDI-Guideline "Biomimetics" の作成が始まったのも FP7 が始まった 2007 年である。BIOKON は 2009 年 3 月に BIOKON International へと国際展開しているが、これも国際標準化を欧州のグローバル戦略の基本に位置付けている欧州委員会の政策を反映した動きであろう。

2011 年 3 月 18 日、BIOKON International、VDI、DIN は合同で国際標準化準備会議を発足させ、同年 5 月 16 日、DIN からジュネーブの国際標準化機構（ISO）に対して、バイオミメティクスに関する新しい専門委員会（TC）設立の提案を行っている。この提案は、5 月 20 日には ISO の技術管理委員会（TMB）から ISO 加盟各国へ周知され、意見の聴取が行われた結果、正式に ISO/TC266 Biomimetics の設立が決まった。

その当時日本では、下村教授がバイオミメティクスに関する新学術領域の設立に向けて奔走していた。経済産業省から ISO/TC266 Biomimetics 発足の連絡を受けて、2012 年

表 1　ISO/TC266 Biomimetics　参加国と各国規格協会略称

参加国	
P メンバー	O メンバー
中国（SAC）	アルゼンチン（IRAM）
チェコ（UNMZ）	デンマーク（DS）
フランス（AFNOR）	フィンランド（SFS）
ドイツ（DIN）：幹事国	インド（BIS）
日本（JISC）	イラン（ISIRI）
韓国（KATS）	カザフスタン（KAZMEMST）
ベルギー（NBN）	マレーシア（DSM）
オランダ（NEN）	ポーランド（PKN）
イギリス（BSI）	セルビア（ISS）
イスラエル（SII）	スウェーデン（SIS）
カナダ（CSA）	スイス（SNV）
	タイ（TISI）
	アメリカ（ANSI）

表 2　これまでの本会議

総会	日時	会場	開催地
第 1 回総会	2012 年 10 月 9、10 日	DIN	Berlin, Germany
第 2 回総会	2013 年 5 月 22、23 日	AFNOR	Saint-Denis, France
第 3 回総会	2013 年 10 月 29、30 日	UNMZ	Prague, Czech
第 4 回総会	2014 年 10 月 20 ～ 22 日	Univ. of Liege	Liege, Belgium

3 月、下村教授と筆者がドイツのデュッセルドルフに VDI と BIOKON のキーパーソンを訪問、国際標準化に関する意見交換を行った。今後の研究開発と産業化に資する有益な社会基盤としてのバイオミメティクスの国際標準を協働して作成していくことで合意、日本も積極的に ISO/TC266 Biomimetics に参画することになった。この決定を受けて、公益社団法人高分子学会のバイオミメティクス研究会に、ISO/TC266 Biomimetics の国内審議委員会が設置された。このような経緯を経て、2012 年 10 月 9 ～ 10 日の両日、ドイツのベルリンにある DIN で ISO/TC266 Biomimetics が開催され、バイオミメティクスに関する国際標準化が動き始めた。

表 1 に、第 4 回総会時点での参加国を示す。第 4 回からカナダが新しく P メンバーとして参加した。表 1 に示したとおり、第 4 回総会までアメリカは投票権のないオブザーバー国として参加している。2011 年 5 月に ISO の TMB から加盟各国へドイツによる新 TC 設立の提案が周知された際、米国国家規格協会（ANSI）はこれに参画すべきかどうかのパブリックコンサルテーションを行っている。この結果に基づき、最終的にアメリカは、投票権のないオブザーバーとして参加することを決めている。アメリカのバイオミメティクスの研究開発の基本には、「生物を模倣することで持続可能な社会に貢献する」という明快で合理的考え方があり、バイオミメティクスのマーケットはすでに広がりを見せつつあるという認識がある。このような研究開発と産業化の現状から、アメリカは標準化戦略では ISO を舞台にしたデジュールではなく、デファクト標準を選択したものと思われる。なお、第 4 回総会後アメリカはオブザーバーを辞したようであるが、このことについては後述する。

表 2 には、これまで ISO/TC266 Biomimetics 本会議が開催された日時、会場と開催地を示した。なお、第 5 回は 2015 年 10 月、京都において開催予定である。

ISO/TC266 Biomimetics では何を標準化してきたのか

この 2 年間、ISO/TC266 Biomimetics は、どのような体制で何を標準化しようとしてきたのだろうか。第 1 回ベルリン総会で、以下 3 つの作業委員会（WG）が発足した。WG1 "Terminology and methodology"、WG2 "Structure and materials"、WG3 "Biomimetic optimaization"。日本は最後に生物学と工学を融合するデータの活用について北

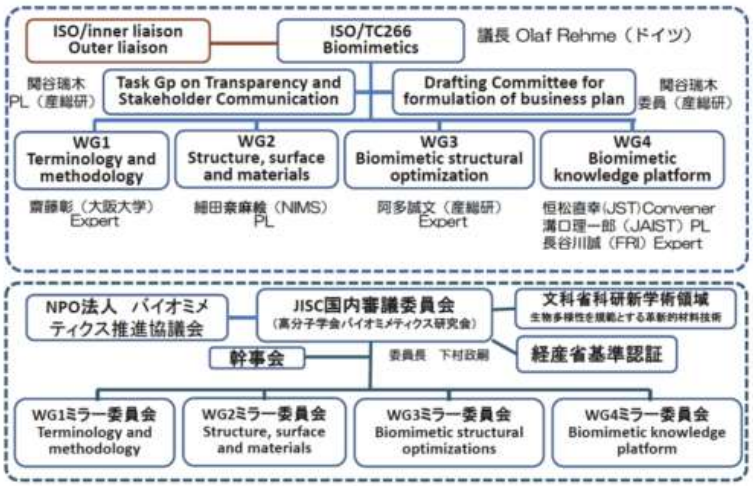


図 2　ISO/TC266 Biomimetics と JISC 国内審議委員会の体制

海道大学の長谷山氏が基本的な考え方を示し、次の ISO/TC266 Biomimetics 第 2 回総会において、WG4 を立ち上げるかどうかについて議論することで合意した。議論の結果、日本の提案は予備段階からの始める新しい作業原案として認められ、WG4 が発足した。現在の ISO/TC266 Biomimetics、その国内審議委員会の体制について図 2 にまとめた。WG1、WG2、および WG4 の主査の皆様からも本誌に寄稿していただけるものと期待して、本稿では WG3 の顛末に話を絞る。

WG3 Biomimeic Structural Optimization は何を標準化したのか

以下、筆者が関わってきた WG3 の活動を概要し、何が標準化されたのか、それは研究開発や産業化にどのような影響を及ぼすのか、解析する。

生物の模倣により最適な工学的ソリューションを得るには、二つの方法がある。一つは生物の動きの模倣で、先々月号の本誌 Food for Thought の Autonomous で述べたとおり、これは自律分散システムの基本である。もう一つは生物の形の模倣である。たとえば生物は外的ストレスを緩和し均一化するように成長し、ストレスのかからないところは軽量化しようとする。バイオミメティクスの国際標準化を担う ISO/TC266 Biomimetics の WG3 Biomimetic Structural Optimization が取り組んできたのは、そのような生物の順応的成長を工業製品の最適化に応用するアルゴリズムの標準化で、工業製品のデザインコンセプトに関わる標準化である。表 3 に ISO/TC266 WG3 が今回の第 4 回総会で国際標準として発行することを決めた工業製品の最適化アルゴリズムを整理する。

第 4 回総会に先立ち行われた、DIS となった作業原案を国際標準の最終ドラフト FDIS にするかどうかの投票結果は、賛成 5 カ国、反対は日本のみ、棄権が 4 カ国であった。この投票では棄権は集計されず、賛成票と反対票を投じた 6 カ国のうち 5 カ国の賛成、83％の賛成で FDIS 化が承認された。成立条件は 2/3 以上の賛成である。

筆者のコメントに対する激しい議論の最後に、事務局から、時間が押している状況を理由に、FDIS の確認をせずにそのまま国際標準発行への手続きを行いたいとの提案があった。筆者はこれまで標準化へのワーキングを TS 化のワーキングに移管すべきと主張し、これを理由に反対票を投じてきた。しかし FDIS 化が承認された後には、そのドラフトを TS 化するプロセスへ移管することはできない。さらに今回参加したイギリスとカナダを含めて、その事務局提案に反対する国はなかった。万策尽きて観念するしかない状況だった。WG3 のワーキングドラフトは数カ月のあいだに国際標準として発行されることになった。

なぜこれらアルゴリズムの国際標準化に反対したのか

上に述べたとおり、2012 年 3 月にデュッセルドルフの VDI のオフィスで VDI と BIOKON のキーパーソンと国際標準化に関する意見交換を行った際に合意したことは、「今後の研究開発と産業化に資する有益な社会基盤としてのバイオミメティクスの国際標準を協働して作成いくこと」であった。実際に現在のバイオミメティクスの国際標準化活動において、ドイツと日本の存在は他の国を抜きん出ている。このような経緯で積極参加を決めたにもかかわらず、筆者は最後の 2 回の投票でそのまま標準化していくことに反対票を投じた。なぜ反対したのか、今さらではあるが、その理由をここで整理しておく。

まず表 4 にこれまで WG3 の作業のたたき台になったドラフト及びワーキングドラフトのタイトルを示す。最初に「バイオミメティックな情報処理」に多少混乱した。ワーキングの原案となったのは DIN のガイドライン Biomimetic Optimization - Application of Evolutionary Algorithms である。その当時筆者は WG3 で取り上げられている様々なアルゴリズムの上位概念に Evolutionary Algorithms、つまり進化論的最適化アルゴリズムがあるものと理解していた。客観的事実としてみれば、この進化論的アルゴリ

表 3　国際標準となる工業製品の最適化手法とその生物モデル、及び最適化の目的

最適化手法	生物モデル	目的
Computer Aided Optimization（CAO）	木の順応的成長	形状最適化
Soft-Kill Option（SKO）	骨の順応的ミネラリゼーション	トポロジー最適化
Computer Aided Internal Optimization（CIAO）	木の繊維の配向	射出等による局所的な樹脂の配向最適化
Method of Tensile Triangle	大きな木の板状根	形状最適化

表 4　ISO/TC266 Biomimetics WG3 のドラフトタイトルの推移

ドラフト	タイトル
DIN から ISO へ提案	Biomimetic Optimization and Information Processing
DIN ガイドライン	Biomimetic Optimization - Application of Evolutionary Algorithms
第 1 回総会 WG3 ドラフト	Biomimetics - Biomimetic Optimization
第 2 回総会 WG3 ドラフト	Biomimetics - Biomimetic Structural Optimization

ズムという概念はその後 WG3 の議論で出てこなくなった。さらにフランスの AFNOR における第 2 回総会以降は、Structural という言葉が入って WG3 は Biomimetic Structural Optimization というタイトルとなった。生物の動きを模倣する最適化は含まないことと理解した。

この国際標準化がはじまって以降、筆者はこの標準化作業原案に対して、日本の意見の取りまとめをすべく、様々な関係者とインタビューを重ねてきた。とりわけこの作業課題に関しては機械工業会の関係者の意見が有用である。工業部品の構造最適化には、サイズ、形状、トポロジーといった様々な最適化が含まれるが、メルセデス・ベンツ社のバイオニックカー [2] の例に代表されるように、これから産業界に大きなインパクトを持つのはトポロジーの最適化であろう。そこでトポロジーの最適化ということに的を絞ってインタビューをすすめた。

日本の民間企業からは「そのような最適化アルゴリズムは使っていないから、それが国際標準になっても関係ない」という意見が多かった。このアルゴリズムをバイオミメティクスの国際標準とすることに積極的に賛成する声は聞かれなかった。その反面、SKO のような 1980 年代に開発が始まった古いアルゴリズムを標準化することへの強い反発は数多く聞かれた。そこで、聞き取り調査の結果や文献等を基に、トポロジー最適化のアルゴリズムに限って、独自にその体系化を試みた。

Topology Optimization（連続緩和法；整数条件緩和）
- ① Level set method（Osher, Sethian et al.,）
- ② HMD 均質化設計法（この中に数理法と SKO）
- ③ Density method
- ④グランドストラクチャー法

Topology Optimization（離散的問題として解く方法）
- ①進化論的アルゴリズムを利用する方法
- ② Cellular automaton を利用する方法
- ③ ESO 法（Evolutionary Structural Optimization）

これはオーソライズされたカテゴリー分けではないが、離散的に解くのか連続的に解くのかという視点で整理するとこういった分類が可能である。ここで大事なことは、トポロジー最適化のアルゴリズムの全体像から見れば SKO は多くの手法のほんの一つに過ぎないという点であり、加えて大事なことは SKO が進化論的アルゴリズムに基づく最適化とは本質的に異なるという点である。表 2 の DIN ガイドラインのタイトルの矛盾である。

このような国内の聞き取り調査と、SKO の位置づけ等に関する情報を整理したうえで、これが国際標準となった時に何が起きるのかを考えた。確かにドイツ国内では自動車の部品の設計等に SKO が使われ、そのことが特許の明細書に記載されている。この事実から、SKO が国際標準になれば、SKO を使ってシャーシやエンジン部品を作製しているドイツの車は、「バイオミメティクスの国際標準手法により作製された車」になる。筆者が日本の産業界に聞うてきたのは、「SKO は使っていないから、我々には関係ない」で済むのかどうかである。どう考えてもこれが国際標準になった場合に日本にとって利点は何もないのではないか、逆にドイツだけが国際競争力で得をするのではないか、もはやこれを疑う余地はなかった。そこでこの原案は国際標準としてではなく、TS として公開すべきとの意見を添えて、第 2 回総会の前の Ballot から反対票を投じてきた。また、ドイツが議長を務める ISO/TC266 の標準化には、標準化の手続き上もいろいろな問題が散見された。以下に国際標準化に反対を表明した理由をまとめておく。これらの意見は Ballot の際に日本からのコメントして TC266 事務局から公開された。

理由 1、定義の問題
バイオミメティクスの定義を標準化する WG1 において、何がバイオミメティックな構造最適化で何がそうでないのか、はっきりと定義されていない。これは WG1 と WG3 のジョイントワークとすべきである。個人的には WG3 で取り上げられているアルゴリズムはバイオミメティックというよりバイオインスパイアードなアルゴリズムのような気がする。

理由 2、標準化しなければならない合理的理由の問題
たとえば上に述べたトポロジーの最適化アルゴリズムのう

ち、SKO だけをバイオミメティックな最適化アルゴリズムとして国際標準にする合理的理由は何か。大事なことは、SKO でしか出来ないことがあるのかどうかであるが、機械工学の専門家の話では SKO と同じことができるトポロジー最適化アルゴリズムはほかにも存在する。SKO だけを国際標準にしても、工業製品の外見から SKO が用いられたかどうかを見極めることもできない。従って現時点で SKO だけを国際標準にしなければならない合理的理由は見いだせない。

理由 3、この標準化プロセスの透明性の問題
TC266 の標準化の会議に出席している多くは生物学者である。WG3 のドラフトは機械工学に係わる内容であるが、それぞれの参加国内で機械工学の専門家との話し合いはほとんど行われていない。各参加国内におけるステークホルダーコミュニケーションが欠落しており、標準作成過程における透明性が担保されているとはとても言い難い状況にある。加えて、ISO/TC266 Biomimetics の総会に全く参加せずに賛成票を投じている国がある。TC266 が無責任な標準化を行っていると言われても仕方がない状況にある。

理由 4、ナノテクノロジーの標準化に学ぶべき
ナノテクノロジーやバイオミメティクスといった新興の学際領域では、研究開発と産業化促進のために様々な事前ルール作りは必須であるが、そのルールは性急すぎるとイノベーションの阻害要因になることに注意が必要である。たとえば ISO/TC229 Nanotecghnologies は 2005 年から 10 年の年月を費やして、現在までに 40 報以上のドキュメントを発行している。このうちリスク評価法に関わる 3 報のみが国際標準（IS）として発行され、あとは 28 報が技術仕様書（TS）として、11 報が技術報告書（TR）として発行されている。

このような理由をつけて、ドラフトは ISO の TS としてしばらく公開し、その後国際標準として機能すると判断されその合意ができた時点で再度国際標準にする手続きを取るべきである、という主張を行ってきた。第 4 回総会の WG3 の議論の時間のほとんどを、筆者の反対意見に対する議論に費やしたものの、上でも述べたとおり、投票結果は、反対は日本だけで、賛成 5 カ国、棄権 4 カ国で、最終的にはこの国際標準原案（DIS）は国際標準最終原案（FDIS）を経ずに国際標準となることが確認された。あとで標準策定の内規を確認すると、もう 1 カ国反対があれば、原案の大幅な変更があれば FDIS のプロセスが必要になったはずである。これも TC 事務局にうまく押し切られた。

本会議前に会うべきだった人

本会議終了後の夕方 Liege から Brussels に移動、翌日 Brussels から Copenhagen に移動した。デンマーク工科大学の教授 Ole Sigmund 氏に会うためである。氏は International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization（ISSMO）の会長を務められた構造最適化の専門家である。氏の著書 [3] を購入して読んでみようとしたのだが、基礎知識を持たないものには難解だった。

筆者は上述したような国内の意見と標準化手続き上の問題に基づいて反対意見を述べてきたが、この標準原案の内容が学術的に妥当なのかどうか、専門家の意見をお聞きしたかった。事前にドラフトの内容を伝えていたので、話は早かった。研究室にうかがって、開口一番飛び出した言葉は "This document is ridiculous"、とんでもない、だった。ドイツの提案が科学的にどのような点がおかしいのかを詳しく説明していただいた。氏はこのドラフトの国際標準化を止めるべく、デンマーク規格協会（DS）にも連絡を取られたとのこと。基本的には国際標準化はボランタリー活動であり、DS から ISO/TC266 の第 4 回本会議参加のための支援は得られなかったとのことで、参加を断念されたようである。

筆者は第 4 回総会前にどうしても外せない用事があり、本会議直前に Liege に入った。筆者の都合で Sigmund 氏との面談が本会議の前ではなく後になってしまった。氏の話を事前に詳しく伺っていれば、もっと取るべき対抗手段があったはずで、残念である。ただ、氏の指摘された内容は公開される国際標準の改訂作業には大変有益な情報であり、できれば改訂作業まで責任を果たしていこうと考えている。

なお、今回国際標準として公開される内容についての「おかしい、科学的な誤りがある」といったコメントを公表して良いとのことで、ここでは Sigmund 氏のお名前を出させていただいた。専門家に話をうかがいに行くとほかの人を紹介されはっきりとした感想をうかがえないことが多いのだが、氏は自らの意見をしっかりと伝え、その科学的根拠も丁寧に説明していただいた。感謝している。反対してきた WG3 の標準化が決まり多少意気消沈した直後の訪問だったが、筆者にとっては少しだけ胸のつかえが取れたような思いのするインタビューだった。

ドイツで始まった国際標準の普及活動

ドイツ技術者協会VDIのホームページに、2014年11月5、6日の両日デュッセルドルフで開催されるセミナーの案内が掲載された[4]。セミナーの内容はGestaltoptimierung – Computer Aided Optimization（CAO）とTopologieoptimierung – Soft Kill Option（SKO）である。そのプログラム[5]の詳細に参加費用890ユーロとある。現在1ユーロが137円ほどの換算レートなので、日本円で12万円ほどの受講費用である。これ以上は憶測になるので、今回国際標準となる工業部品の最適化アルゴリズムのセミナーが始まったという事実のみ記す。そのうち日本でもTÜV SÜDあたりが国際標準セミナーをはじめるのだろうか。

次の手は何か

今回VDIはCAOやSKOといったバイオミメティックな構造最適化アルゴリズムの国際標準化に成功した。VDIのホームページには、今回の国際標準のベースになったガイドラインの他にも、Biomimetics - Biomimetic robots, Biomimetics - Architecture, civil engineering, industrial designといった標準ガイドラインが準備されている[6]。これも準備されている事実のみ記す。自動車や飛行機といった工業製品にトポロジー最適化アルゴリズムが広く使われるようになってきたが、さらにロボティックスや建築といった分野でもトポロジーの最適化アルゴリズムは広く使われるようになってきている[7]。生物屋と機械屋が手を組まないと太刀打ちできない世界である。

アメリカはバイオミメティクス標準化から降りた

今回の第4回総会のあとにISOから配信されたドキュメントで注目すべきことが起きた。これまでバイオミメティクスの国際標準化に投票権のないオブザーバーとして参加してきたアメリカが、そのオブザーバーも辞めてしまったことである。ここは敢えて憶測を巡らしてみる。

今回初めて参加したカナダがそうであったように、アメリカが最も関心を持って推移を見守っていたのは、筆者が担当したWG3ではなく、用語の定義の標準化を進めていたWG1であったことは間違いないだろう。そのWG1も原案が国際標準となる。ただその内容は、同じく新興の学際領域として国際標準化活動が展開したナノテクノロジーのISO/TC229 Nanotechnologiesの標準化の考え方とは大きく異なる。具体的な事実を振り返ると、TC229のWG1は2005年から10年にわたって、ナノテクノロジーに係わる用語の定義を標準化する作業を担ってきた。筆者の理解が間違っていなければ、現在TC229のWG1で作成されたISOから発行されたドキュメントは13報で、それらは全て国際標準ではなく技術仕様書TSである。

たとえばISO/TS80004-1および2では、ナノのスケール、ナノ物体のナノ粒子、ナノファイバー、ナノプレートなどが丹念に定義され公開されている。ナノを1～100nmとした際、「直径が100nmを超えるならカーボンナノチューブではないのか」、「量子サイズ効果が出るもっと小さい領域をナノとすべき」、「エマルジョンなどが主体のナノフードではサブミクロンまで広げるべき」等々、様々な意見があった。このような意見をうけて、1～100nmの前にApproximatelyがいいのかNominallyなのかといった形容詞の議論まで時間をかけて慎重に進められ、それでもなお標準とせずに技術仕様書としてISOから公開している。

このようなTC229のナノテクノロジー関連の標準化の進め方の詳細は、今回のTC266 Biomimeticsの第4回本会議でも筆者から参加者に紹介した。加えて、新興の学際領域で性急に標準を作成することが、その領域の研究開発や産業化にプラスに働くのかどうか、イノベーションプロセスを阻害しないのかどうか、慎重に見極めなければならない、ということも述べた。

たとえばナノマテリアルの管理に関してこれまで本誌で何回も述べてきたことであるが、アメリカは個別材料ごとの管理策を決めようとする。従ってアメリカの管理策の基本は個別の材料ごとのガイドラインである。これに対して欧州は「ナノマテリアルの管理はどうあるべきか」といった枠組み議論からはじめるので、管理策は行動規範になる。TC229のWG1は、2005年から10年もの年月をかけて、30カ国以上の国が参加して協議を重ね、ナノテクノロジーの定義に係わる13報の技術仕様書（TS）を作成してきた。このTSの作成にアメリカはPメンバーとして積極的に関わってきた。

これに対してTC266のWG1はバイオミメティクスの定義をわずか2年で国際標準にしてしまった。国際標準化では用語の解釈の違いをはっきりさせて標準化することより、バラつきを粘り強く調和させて統合していく努力を重ねていかなければならないはずだ。今回のTC266のWG1がすすめたバイオミメティクスの標準化は、同じくナノテクノロジーの用語の標準化を進めてきたTC229のWG1とは根本的に考え方が異なる。以上、多分に憶測であるが、

アメリカが降りた理由はここにあるような気がする。

やはり出てきた「持続可能性」

バイオミメティクスの標準化が始まって以降、これまで本誌で繰り返し述べてきた心配事の一つが、「バイオミメティクス＝持続可能性」といった短絡的なマネジメントに結びつくことだった。研究開発をすすめるうえで、バイオミメティクスの研究開発は持続可能な社会の実現に貢献する、というロジックは有効である。しかしバイオミメティクス＝持続可能性ではないはずだ。今回の第 4 回本会議で「バイオミメティックな持続可能性」や「持続可能性の評価法」の標準化を次のアイテムとしていく議論が進められた。

以下私見である。すでに持続可能性や持続可能な開発といったコンセプトがベースになっている複数の ISO の標準が発行されている。たとえば、

ISO 9001 Quality Management System
ISO 14001 Environmental Management System
ISO 26000 Social Responsibility
ISO 20121 Sustainable Event Management
ISO/CD 37101 Sustainable development and resilience of communities -- Management systems -- General principles and requirements

等である。ISO 9001 と 14001 がマネジメント標準（規格）で ISO 26000 はガイダンスである。

また、現在 ISO の持続可能性を冠した専門委員会等には、

ISO/IEC JTC 1/SC 39 Sustainability for and by Information Technology
ISO/ TC 59/SC 17 Building construction / Sustainability in building construction/ Sustainability indicators
ISO/TC 190/SC 7/WG 12 Sustainable remediation
ISO/TC 268 Sustainable development in communities
ISO/PC 277 Sustainable procurement

等がある。このように概観しただけでも、国際標準化において持続可能性や持続可能な開発といった視点が重要な位置を占めていることが分かる。

これからどう展開するのかまだ予測がつかないところもあるが、バイオミメティクス＝持続可能といった短絡的なマネジメントのものさしが作られるようなことになると、また日本の産業界にとって悩ましい問題になる。議論に耐える専門の知識を持った人材をもって対応する必要がある。

もっと戦略議論を

今回の第 4 回総会を以て WG3 の活動はしばらく休止となる。依然としてこのような性急な標準化を止めることができなかったことに後悔が残る。ただし、標準が公開されればすぐに改訂の提案ができるので、今後もやれるだけのことは試みようと思っている。

約 2 年にわたる標準化活動を振り返ると、やはりドイツの戦略議論の周到さには脱帽せざるを得ないし、これまで幾度となく指摘されてきたことだが、改めて日本もバイオミメティクスの研究開発とその産業化に資する国際標準化活動になるようにもっと戦略議論を重ねる必要を感じている。これに関しては今後も JISC のバイオミメティクス国内審議委員会の場で議論を重ねていきたい。

最後にもうひとつ。今回の総会で各参加国の若い研究者や技術者がしっかりと意見を述べている姿を目のあたりにした。日本の国内審議委員会等になかなか出席できない方は、ぜひ後進にその役割を譲っていただき、これからの国際標準化の重責を担っていける若手の育成を考えていただければと思う。

第 4 回総会参加者。右端が筆者。Iwiza Tesari 氏撮影。

謝辞

（株）豊田中央研究所の中野充氏には、JISC の国内審議委員会 WG3 の委員として、同社の専門家の方の意見をお聞きいただくなど、大きな貢献をしていただいた。同僚の安順花は、丹念に各国の標準化機構の戦略動向を精査、レポートしてくれた。この情報は各国の動きの把握に大いに役に立った。同僚の関谷瑞木は、今回の第 4 会総会で ISO/TC266 Biomimetics のなかに Transparency and Stakeholder Communication のタスクグループ設立の提案

を行い、そのプロジェクトリーダーに就任した。各参加国できちんと意見の集約を行い、それを持ち寄ってより良い責任ある国際標準を策定できるよう、今後このタスクグループは ISO/TC266 Biomimetics のなかで重要な役割を担っていくことになる。これまでの国際標準化活動への貢献に対して謝意を表すとともに、今後の PL としての活躍を期待する。

最後に、ISO/TC229 Biomimetics, WG3 Biomimeteic Structural Optimization のコンビナーを務めたドイツの Karlsruhe Institute of Technology（KIT） の Iwiza Tesari 博士に謝意を表す。互いの立場の主張は厳しい議論になることが多かったが、4 回の本会議と数回のウェブ会議を重ねて、その人となりを理解でき信頼を持てるようになった。できればまた今回発行される国際標準の改訂作業で議論したいと、私信が届いた。言わずもがな、望むところである。

References：

[1] 科学技術・イノベーション動向報告 ~EU 編~
科学技術振興機構研究開発戦略センター（2014 年 3 月）

[2] http://www.hyperraum.tv/tag/bionic-car/

[3] Topology Optimization Theory, Methods and Application, By M. P. Bendsoe, O. Sigmund, Springer (2003).

[4] http://www.vdi-wissensforum.de/de/nc/angebot/detailseite/event/02SE139011/

[5] http://www.vdi-wissensforum.de/fileadmin/redaktion/dokumente/programme/seminar/02SE139011.pdf

[6] http://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/vdi-standards-details/?tx_wmdbvdirilsearch_pi1%5Bmode%5D=1&tx_wmdbvdirilsearch_pi1%5Bhandbook%5D=1896707&cHash=428271a2c846161bf7a3fed96d6eef43

[7] http://www.biomimetic-architecture.com/

[8] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983&published=on&includesc=true

速報

ISO/TC266 Biomimetics ベルギー会議　WG4 報告

北陸先端科学技術大学院大学　溝口理一郎

1. WG4: Knowledge infrastructure of biomimetics

本 WG は以下の要領で議論を行った。

開催日：2014 年 10 月 21 日（会議二日目）
時間：13:40 ～ 16:10
参加者：TC266 関係者全員（今回は Single session）

2. 議事内容

Convener の都合が合わず、今回欠席であったので筆者が代理で司会役を務め、かつ、Project Leader として GW4 の活動方針説明を行った。本 WG は 2 年前の会議において北海道大学教授の長谷山氏の発案で発足し、筆者はその後を受け継いだ形である。前回の会議で達成することができなかった WG4 の活動内容に関する合意を得ることが今回の主目的である。実際、それを明確に定義する Scope の記述の合意が最初の話題となった。その結果、工学者と生物学者の双方が必要とする適切な情報を生物データベース（DB）から検索する操作を支援するための Ontology-Enhanced Thesaurus を構築する過程を標準化することとなった。

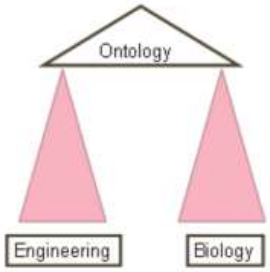


図 1　Ontology-enhanced thesaurus

WG4 が最終的に目指すゴールとしては、生物規範工学に関わる技術者、生物学者が必要とする適切な情報を見つけることを支援することにある。本質的には DB 検索支援という問題である。従って、DB 検索支援の定番であるシソーラス [1] を強化することで対応可能となる。そこで図 1 に示した Ontology-enhanced thesaurus の考えを提案した。オントロジー [2] という抽象的な概念をしっかり整備して、工学と生物科学の間にあるギャップを埋めることによって、両者の間の行き来がスムースになると期待される [3]。このことは WG4 のタイトルである、Biomimetics の（概念的）基底構造を組織化するという考えに繋がる。ここでは、オントロジーの中でも特に「機能オントロジー」[4, 5]

に注目する。機能は工学者が実現したいものであり、生物が既に実現している機能を参考にして新しい発想が生まれることが期待されるからである。このことを意識して、以下の二段階の支援を提案した。

Step 1：工学と生物科学とで共有する機能概念が存在するが、用語として異なる場合に対処するための機能語彙の翻訳支援 [6]。

Step 2：そのような概念が存在しない場合、あるいは存在していても、生物側の DB でその概念を用いてインデックス付けされていない情報がある場合（missing link と概念化）に対処するために、機能オントロジー以外のオントロジーも準備して、その Missing link を補償する方法 [9]。

そして、Step 2 に関して、モデルケースとして小規模のオントロジーを実装し、その上で動く Keyword Explorer[9] というアプリのデモを行った。WG4 が標準化すべきものはそのようなオントロジーの開発プロセスなのであるが、開発プロセスの標準化を行う前に、そもそもそのようなオントロジーの開発の意義自体を WG メンバーで共有することが不可欠であるので、その意義を具体的に示すためにアプリを作成し、デモを行った。実際、その意図通りデモは非常に効果的であった。発言者全員がデモプログラムの意義を理解しただけではなく、その斬新さと有用性を深く理解することに大きく貢献した。Keyword Explorer は、実現したい機能が入力されると、オントロジーを探索して [7, 8]、それを実現している可能性のある生物種の候補を表示する。既に知られている生物種の表示は当然であるが、まだ知られていないが、可能性が期待できる生物種（Missing link）を表示する能力を持つことが興味深い。Keyword Explorer は表示された生物種ノードを右クリックするだけで DBpedia や Wikipedia、Google、Cinii 等から瞬時に情報を取って来ることができる。それらを総合して、適切な Keyword を選定して、本格的な情報検索を実行することが可能になる（図 2 参照）。このデモを通して、実に稔り豊かな意見交換が行われた。

その要約は以下の通りである。全発言者は、発言の冒頭において、Keyword Explorer に関する賛辞を惜しまなかったことが印象的だった。参加者の多くは生物学者であったため、情報処理に関わる Clarification question も多数あった。その内で重要なものを一つ紹介する。オントロジーは OWL や RDF 等の論理に基づく言語で厳格に定義されるので、その上で推論エンジンを動かせば、効率が悪くなり、大規模化に問題が生じるのではないかという心配である。的を射た質問であるが、我々の実装では Keyword Explorer は論理に基づく推論は行っていないのでその心配はない。実は、この話題は Keyword Explorer の設計上の一つの根幹に触れる話題である。工学的に実現したい機能を与えられて、そのヒントになりそうな生物種を探索する問題において、厳格な推論操作によって候補を見つけることは至難である。どこにあるか分からないものを探索する操作は、厳密な推論の積み重ねが要求される証明問題とは性質が全く異なるからである。従って、我々は意識的に論理に基づく推論を避けて、連想に基づく柔らかい推論を採用している。従って、効率は良く、大規模化にも対処可能である。

最も長い間議論された話題は、工学と生物学という異分野の研究者が交流することが必須である Biomimetics の研究では、お互いが使う用語の相違が災いしてスムースな意見

図 2　Keyword 探索支援の具体例

交換ができないという大きな問題を抱えている。これは全参加者が等しく共有する課題で有り、それを解消することに貢献する「用語の翻訳」問題で意見交換が盛んに行われた。筆者のプレゼンテーションの一つの中心課題が、工学で用いられる機能語彙を生物学で用いられる語彙へ翻訳するプロセスの標準化が含まれていたことがそのきっかけを作った。その話題が発展して、工学者と生物学者の思考プロセスにまで議論が及び、Biomimetics における科学の仕方、ものの考え方のモデルを作って、それを標準化する案にまで発展した。確かに、研究テーマとしては大変面白いので、参加者の共感を得たのであるが、人の思考過程は標準化にはなじまないということで最終的には没となった。

次は情報検索のプロセスの理解において、単に Keyword マッチングのみを想定した従来型の検索から進んで、生物が機能を実現しているプロセスやモデルを明示的に扱いつつ検索するプロセスを標準化に組み入れるかどうかの議論となった。ちょうどそのことを研究として行っている研究者が委員として参加しているので話題になった。一瞬、ここで用語の問題で相互理解が進まないという事態になったが、その話題の提供者が言う「プロセス」は我々が言う機能のことであり、機能分解されてできた部分機能などを参照しつつ検索することをさしていることが分かり、コミュニケーションの問題は解消した。また、検索のやり方自体を標準化にするかは、確定はしていないが、筆者は標準化にはなじまないという意見表明を行った。話題提供者の提案内容が不明確であったので、本人から詳しい情報提供を受け、今後検討することとなった。

3. 結論

上述の様に、率直なかつ緊密な意見交換を通して、WG4 の活動内容の Scope が一つの拡張を含めて承認された。拡張は、対象ユーザを工学者に限定するのではなく、生物学者が工学の情報を探すケースも支援対象にするという「両方向性の支援」の実現である。これは本 WG の成果をさらに有用にするために役立つ拡張である。Keyword Explorer のデモはかなり良い印象を与えたが、重要なことはそれ自体は標準化対象では無いことである。標準化の対象としては、そのような非常に有用なアプリを構築する可能性を持つ、Knowledge infrastructure of biomimetics としての Ontology-enhanced thesaurus の開発プロセスの標準化を行うのが WG4 の活動である。しかし、何もなしに構築過程だけの標準化は難しいので、実際には、例題という位置づけでオントロジーを開発しつつ、それから抽出する形でオントロジー構築過程の標準化を行うことで合意した。

今後は、今回の総会での合意事項を文章化して、Working Draft の記述を日本側が主導権を持って行うこととなる。

【問い合わせ先】
E-mail：mizo@jaist.ac.jp
URL：http://www.jaist.ac.jp/profiles/info_e.php?profile_id=614

References：

[1] 國岡崇生、他、JST シソーラス map、情報管理、Vol.55、No.9、pp.662-669、2012
[2] 溝口理一郎、役に立つオントロジー工学、PEN、Vol.4、No.6、pp.3-13、2013
[3] 古崎晃司、バイオミメティック・オントロジーの試作と利用、日本化学会第 94 春季年会、1_F5_32、2014
[4] Julie Hirtz , Robert B. Stone, et. al, A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Effort, NIST Technical Note 1447, 2002.
[5] Yoshinobu Kitamura, Sho Segawa, Munehiko Sasajima, Shinya Tarumi and Riichiro Mizoguchi: Deep Semantic Mapping between Functional Taxonomies for Interoperable Semantic Search, Proc. of the 3rd Asian Semantic Web Conference (ASWC 2008), LNCS 5367, pp. 137-151, February 2-5, Bangkok, Thailand, 2008
[6] Cheong, H. et. al.,: Biologically Meaningful Keywords for Functional Terms of the Functional Basis, Journal of Mechanical Design Copyright c 2011 by ASME, FEBRUARY 2011, Vol. 133, DOI: 10.1115/1.4003249.
[7] Takeru Hirota, et al.: Divergent Exploration of an Ontology: Poster & Demo Notes of the 7th International Semantic Web Conference (ISWC 2008), October 26-30, Karlsruhe, Germany, 2008
[8] Terukazu Kumazawa, et. Al.: Toward Knowledge Structuring of Sustainability Science Based on Ontology Engineering,?Sustainability Science, Vol.4, No.1, 2009.
[9] Kozaki, K. et al.: A Keyword Exploration for Retrieval from Biomimetics Databases, Proc. of Joint International conference on Semantic Technology JIST2014, Springer 2014 (to appear).

速報

より良い国際標準の作成のために
ー ISO/TC 266 Biomimetics にタスクグループ "Transparency and Stakeholder Communication" を設置

ISO/TC 266 Biomimetics, TG "Transparency and Stakeholder Communication" PL
ISO/TC 266 Biomimetics, "Drafting Committee for formulation of business plan" Member
産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門　関谷瑞木

はじめに

国際標準化機構（ISO）のバイオミメティクスに関する第266 専門委員会（TC266 Biomimetics）の第 4 回総会が、ベルギーの南東部ドイツとの国境近くに位置する工業都市リエージュで、10 月 20 日から 3 日にわたって開催された。本稿では、新しいタスクグループ（TG）設置の提案を中心に、最終日の全体会議（Plenary meeting）での議論を速報する。

前回チェコのプラハで開催された第 3 回総会の際に、次回つまり本総会の各ワーキンググループ（WG）の議論は二つの WG のパラレルセッションではなく、すべての参加者が議論に参加できるよう運営することが決められていた。その決定に従って、ホストのベルギー代表は、リエージュ大学の広めの講義室に大きな 2 重のラウンドテーブルを用意して各国代表を迎えた。

TC 266 の参加国の内訳については本誌冒頭の「工業製品のデザイン・アルゴリズムが国際標準へ」を参照いただきたい。投票権のある P メンバーであるドイツ、イギリス、フランス、日本、韓国、カナダ、チェコ、ベルギー、また投票権のない O メンバーとしてフィンランドとスイスの代表が参加した。P メンバー登録をしている国々のうち、中国からは今回も出席者はなく、前回は出席していたイスラエルも今回は参加していなかった。一方で、新たに P メンバーとなったカナダと初参加のスイスの代表を迎えた。

最終日、全体会議（Plenary meeting）の様子

本稿で紹介する全体会議は総会 3 日目の最終日に設定され、出席登録をしたすべての国が参加した。最終日の全体会議のメインの議題は、各 WG のコンビーナからによる議論のまとめを Resolution として確認する作業と、今後の予定の報告である。今総会は WG1 および WG3 の標準原案（ドラフト）が国際標準（IS）化の一歩手前のコミッティドラフト（CD）の段階にあったため、両 WG 標準原案の

IS 化に反対する日本および新規参加国を中心に初日から厳しい議論となった。WG1 と WG3 に関しては個別の議論の際に IS 化することで一応の合意に至ってはいたものの、激しい議論の応酬は新規参加国を中心に最終日まで続いた。議論の詳細な内容については各 WG を担当するエキスパートの方々からの報告に譲る。ここでは簡単に各 WG で採択された事項についてお伝えする。

バイオミメティクスの用語の規格化を行っている WG1 は最短で国際標準を発行するプロセスを経ることの賛否を問うた。定義の問題を中心に議論が尽くされていないとして最後まで議論が紛糾したものの、最終的には賛成多数で最終国際規格案（FDIS）投票を経ない最短のプロセスで IS 化されることが決まった。ところで WG1 の議論では持続可能性の視点での議論が欠けていると指摘された。この「持続可能性とバイオミメティクス」に関する課題は、第 3 回総会以降、構造・材料の規格化に取り組む WG2 においても議論となっていた。そこで、この課題を WG2 の議論とは切り離し、WG1 において新たに持続可能性に関連する 2 つプロジェクトをカナダとイギリスを中心に提案することで合意された。構造の最適化について規格化を進める WG3 もまた FDIS を経ない最短のプロセスで IS 化することが提案されたが、WG1 のようには議論とならなかった。IS 化に反対する国が日本だけであったことがすんなりと提案が通った一つの理由と考えられる。日本がコンビーナとなっている WG4 は新たに練り直したスコープに反対はなく、今総会で WG4 のプロジェクトリーダー（PL）に就任した溝口氏を中心に、今後新規の標準化作業原案（NWIP）を作成することで了解された。各 WG の詳細について本誌の ISO 総会報告特集に各 WG のエキスパートが速報をよせている。ご参照いただきたい。

TC266 Biomimetics が活動を開始してほぼ 2 年で、ドイツは自国が作成した 2 つの標準原案を国際標準の発行まで持ち込んだことになる。バイオミメティクスと同じく新興の学際領域として展開したナノテクノロジーの国際標準化が ISO/TC 229 Nanotechnologies で議論されているが、2005 年に始まった TC229 の道のりに比べて、TC266 における IS 化までの道のりは格段に短い。ドイツは最終日の議決の際に最短のプロセスで原案を IS 化する理由としてバイオミメティクス研究開発の Visibility を上げるため、と述べた。しかし、参加国が納得のゆく十分な議論が尽くされたのかどうか、バイオミメティクスの研究開発とその産業化に資する国際標準が策定されたのかどうか、懸念が残る。

新しいタスクグループの立ち上げを提案

なぜ新しいタスクグループ（TG）が必要なのか。2 日間にわたる各 WG の議論の間および最終日の全体会議の際に、標準原案の内容について十分な議論が尽くされておらず、また各参加国のステークホルダーの意見を反映する術がきちんと整えられていないことがこの国際標準化の問題点として何度も指摘された。今回は初めて参加する代表が多く、新規参加者の率直な視点から、図らずも TC266 における不十分なステークホルダー・コミュニケーションが深刻な問題として顕在化していることが露呈した。

このような状況を踏まえて、最終日の全体会議において TC266 に新しく TG "Transparency and Stakeholder Communication" を設けることを筆者から提案した。この新しい TG の目標は、標準化作成プロセスの透明性の担保および関係者間のコミュニケーションの促進によって、より良い国際標準を作ることである。工業標準として有用な良い国際標準を作成するためにはどのようなことが必要であるか。一つには TC266 Biomimetics でどのような活動が進められているのかきちんと開示し、将来のユーザーとなる企業や消費者、専門的な知識を持つ研究者、手続きに精通した専門家など様々なステークホルダーの間で十分な情報の共有をすることであろう。これは各国代表が国内でのステークホルダーに対しての責任を果たすことでもある。また、TC の責任として発行済み標準のレビューを行う必要もある。透明性の確保と十分なステークホルダー・コミュニケーションは ISO もそのガイドラインで取り組みを要請している課題である。

実際の活動は次回の総会からになるが、具体的な取り組みを考えるとき何をもってステークホルダーと十分にコミュニケーションが取られたかと判断することは容易ではない。しかし、たとえば中国などのように TC266 Biomimetics の発足当初から投票権のある P メンバーとして参加登録をしていながら、一度も議論に参加することなく、しかし投票においては常に賛成票を投じている国が存在している。このようにほぼ習慣的に賛成票を投じることは良い標準を作成することにはつながらないと考えられ、他の TC の活動においてもこのことは問題視されている。

バイオミメティクスの研究開発もそうであるが、学際で研究開発が進められる最先端の科学技術では社会的な影響について多くの観点から考察し、課題を抽出し、取り組むことが必須となる。課題の解決の鍵を握るのは関係者間の十分なコミュニケーションである。ISO には透明性の確保やコミュニケーションのための仕組みが準備されているから

わざわざ別途取り組む必要はなく、手順を守っていれば自ずと透明性も確保され、コミュニケーションも進むとの意見も出された。しかし、ISO が備えているのはあくまでもツールであって、そのツールを活用して「良い国際標準を作成する」というゴールは TC の活動において、為すがままにしておいてもたどり着けるものではない。

先例に学ぶ

参加国が多いとは言えない TC266 において少数精鋭の各国の代表に過剰な負担がかからないよう配慮しつつ、TG の作業に具体的にどのように取り組むのがより効果的なのか。バイオミメティクスの「自然に学ぶ」という謙虚な姿勢をこの新しい TG での取り組みにも反映させ、多くの先輩 TC の経験に積極的に倣ってゆきたいと考えている。繰り返しになるが、TC266 Biomimetics の新しい TG で取り組むこととなる課題は、同じ学際の領域で研究開発が進み、同様に国際標準化が議論されているナノテクノロジーにおいても指摘されている。まずは、TC229 Nanotechnologies の多様な経験から多くのことを学べるだろう。

果たすべき役割は大きい

筆者が新しい TG の提案の行った際に、より広い公平の視点からも国際標準の作成プロセスでステークホルダーの取りこぼしをできるだけなくすようにすべきであるとの指摘がベルギー代表からなされた。たとえば経済的規模の小さい発展途上国など、国内に活発な規格協会の存在しない国々などの参画をどう促すかなどである。ここでもまた、TC229 Nanotechnology での取り組みが参考になるだろうと考えられる。具体的にはアジアナノフォーラム（ANF）の枠組みを活用した外部リエゾンの構築による TC229 Nanotechnologies の活動への積極的な参加といった事例である。あるいは、国内の規格協会の支援を十分に受けられない国々を標準作成のプロセスに取り込むツイニング標準の活用などである [1]。

今後の方針について

具体的にどのような手段で取り組むのかは国内審議委員会、国内のステークホルダー、そしてこの取り組みに関心を示してくれた他国代表とこれからしっかりと詰めてゆかねばならない。ボランタリーベースの試みを参加国の協力を仰いで進めることになる。具体的な手法は様々に考えられるが、比較的小さな TC266 Biomimetics では実行できることには限りがあるかもしれない。各国の代表が責任をもって自国内での十分な議論を促すよう図るためにいろいろと検討を始めている。

新しい TG 立ち上げの提案の背中を強く推してくれたのは残念なことに、現在の参加国の国内で適切な企業や研究者の声を十分に拾い上げていないということがはっきりとしたことにであった。それは国内でのバイオミメティクスの標準化に向けた様々な取り組みをしている、つまりきちんと声を拾っていると我々が考えていたドイツも例外ではなかった。日本にとって有用な高い品質の国際標準を作成するために国内のステークホルダーの声をきめ細やかに拾い上げるようにしたい。日本の企業の方々には、「うちには関係ない」と言わず、「うちに関係のある標準を作りたい」とどんどん声を上げていただきたい。

次回第 5 回総会は京都で 2015 年 10 月に開催される予定である。

Reference：

[1] Guidance on Twinning in ISO Standards Development Activities
http://www.jsa.or.jp/itn/pdf/shiryo/twinning_guidance.pdf

BRIEF REPORT

短報

ISO TC266Biomimetics 第 4 回会議（リエージュ会議） WG2 報告

（独）物質・材料研究機構　細田奈麻絵

ISO/TC 266 Biomimetics の作業グループ 2（WG2）では、材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術に関するバイオミメティックな開発に関しての国際標準化の作業原案について討議している。作業原案は、バイオミメティックな開発のフレームワークを提供するものであり、Working draft ISO/WD 18457 として 2013 年 8 月に日本チームより出された。WG2 は、スタート時に議長の交替があったため WG1 及び WG3 に比べて 1 年遅くスタートした。現在は作業原案から委員会原案に移行する段階にある。

前回のプラハ会議では、原案のスコープが確定され、その中に、最近のバイオミメティクスで頻繁に取り上げられている「生物表面」についての記載と生物表面及びバイオミメティクスにより作られた表面の評価方法を追加することになった（韓国チーム担当）。また、議長より、サステイナビリティをベースにしたより複雑なバイオミメティックな開発手法やバイオミミクリーの記載の追加が提案され、ウェブ会議を通して議論を進めることとなった（原稿は提案したベルギーチームが作成）。WG2 ではリエージュ会議までに以下の内容を実施した。

1）新規作業原案の記載内容の確認

・生物表面と表面の評価方法については、記載内容に問題があり大部分を付録に移動した。原稿で推奨されていた表面ぬれ性の測定手法に関して現在も問題が残っている。具体的には、学術的に評価されているのかリファレンスがないので分からないことである。生物表面測定の実績がない手法が記載されていることになる。ここで紹介されたぬれ性評価方法について市場での知名度について日本で事業を展開している接触角計のメーカー数社に問い合わせたが知らないという回答が得られたことから、実績のない測定方法であることが確認された。

・サステイナビリティやバイオミミクリーの記載内容については、これまでの作業原案の内容に合わない点や議論不足など記載内容に問題があり作業原案に加えることを見合わせた。

2）委員会原案の内容の検討とページ数を 20 ページ以内

にまとめた。

作業原案の修正は、ウェブ会議を通して議論され、最終的には日本チームにより修正され作業原案として提出された。この作業原案はISO参加国に配布され、委員会原案(CD)として承認するか否かの投票が10月7日までに行われた。投票結果は以下の通りである。

投票参加国：ベルギー、カナダ、中国、チェコ共和国、フランス、ドイツ、イスラエル、日本、韓国、グレートブリテン及び北アイルランド連合王国

賛成（コメントなし）：ベルギー、中国、チェコ共和国、日本、韓国
賛成（コメントあり）：カナダ、ドイツ
反対：なし
棄権：フランス、イスラエル、グレートブリテン及び北アイルランド連合王国

この投票に寄せられたコメント（110件）を基に、2014年10月21日ベルギーのリエージュで開催された国際標準化委員会で議論がなされた。コメントの内訳は以下の通りである。

一般的なコメント:21件（カナダ:8件、ドイツ:13件）
技術的なコメント：4件（ドイツ：4件）
編集に関するコメント：85件（カナダ：1件、ドイツ：84件）

リエージュ会議

2014年10月21日午前中にWG2の会議が開催された。討論の時間は3時間に限られているため、一般的なコメントに焦点を絞り議論を行った。事前に提出されたコメントにおいて、改善を要求する場合は具体的な改善の提案も明示することが要求されているが、カナダからのコメントの多くは、具体的な改善の提案について不明瞭な記載が多かったため、再提出を要求することになった。WG2の原案では、数多くのバイオミメティクスの開発例が紹介されている。これは、バイオミメティクス開発を理解する上で有効ではあるが、項目により文章の量にバラツキがあり、数ページに渡るものは、短く修正することになった。表面評価方法に関して書かれている内容について標準化に適しているかどうか再検討する必要があるが、WG2に参加しているPメンバーには専門家がいないため、課題が残されている。会議終了後に、WG1の議長と話し合い、ドイツのWG2メンバーに生物表面の測定に詳しいスペシャリストを加えてもらう内諾を得た。前回のプラハ会議で、検討項目とされたサステイナビリティについて、今後はWG1内の新プロジェクトとして新しく提案されるサステイナビリティに関する作業原案において議論されることになった。

今後は、委員会原案の最終案としてまとめられて提出され、それから2カ月後に採択に関する投票が行われる。この後は、大きな修正はできなくなるため十分な議論を行いたいものである。

リエージュ会議の回想

国際標準・規格原案の作成に関する活動については、財政的裏付けが十分でない場合が多く、各国の専門委員会委員は、ボランティア精神に基づいた貢献を行っている。今回のリエージュ会議は開催国にも関わらず国からの援助がなく、主催者の私費で準備されていた。会議に参加していた各国の専門委員は、会議場費も支払えない状況を知り、参加者全員がポケットマネーから寄付をするという心温まる場面があった。

所属班: B01-2 班
所属機関: 名古屋工業大学 若手研究イノベータ養成センター
氏名: 石井大佑

国武豊喜先生 文化勲章受章 祝賀特別講演会

「分子組織化学 —自己組織化がもたらす新しい科学技術の世界—」

に参加して

総括班評価グループの国武豊喜先生の文化勲章受章を記念して、自己組織化、時空間機能、ナノテクノロジーならびにバイオミメティクス等の幅広い領域における最先端の研究から、「分子組織化学」がもたらした新しい学術の潮流と新産業への展開を考える講演会を、11 月 21 日（金）に領域代表の下村教授主催で開催した。

九州大学の君塚先生のグループでは、分子凝縮系（液体）を国武研で学んだ分子組織系へ発展させた。光エネルギーの分子貯蔵を、アゾベンゼンを例にとって説明し、イオン液体になるアゾベンゼンを用いることで、エネルギー貯蔵能の倍増に成功している。

山形大学の佐野先生は、自己組織化を生み出す相互作用を分類し、カーボン材料のファンデルワールス力の偏りを利用した自己組織化について講演された。カーボン材料はファンデルワールス力だけでも強力な引力が働き、凝集しやすい。この凝集力を利用したカーボンナノチューブ被膜は、自己組織的に形成可能であることを示している。

産総研の山口先生の講演では、自己組織化による脂質二分子膜の研究系譜を詳細にまとめ、自己組織化研究関連書籍の出版に関する講演をされた。NTS では、国武先生監修の自己組織化ハンドブックの編集秘話に関しての説明をされた。これまでには無いガイド図で整理したことがポイントで初版は数 10 部しか在庫が無いほど売れている。

奈良先端大の藤木先生は、らせん高分子の無触媒での合成に関する研究を紹介された。アキラルな高分子にキラル小分子であるリモネンを混合するだけで、円偏光に活性な分子自己組織体を得ることができることを示している。

京セラの山下先生の講演では、固体酸化物形燃料電池について、エネルギーのしくみに関して詳細に説明され、燃料電池の開発事例について講演された。

熊本大学の国武先生は、自己組織化により並べた分子構造を AFM や STM で観察した研究例を紹介し、表面に分子を配列させることの重要性を講演された。

DIC の加藤先生は、パラジウム触媒をフィルム中に閉じ込めることで、10 万回繰り返し利用可能な触媒反応を実現した研究について講演された。触媒量はフィルムを切り出すことで可能であり、また、触媒除去も容易であるエコプロセスである事を示された。

NIMS の有賀先生は、界面組織化を利用することで、分子レベルの凹凸構造を実現している。LB 膜の分子認識に関する研究を紹介し、単分子でのセンシングに関する講演をされた。

東京理科大の橋詰先生の講演では、ナノハイブリッド界面作製のための表面修飾法の開発、生物資源のハイブリッド化による材料作製、作製した材料のバイオ応用に関する研究を紹介された。

九州大学の藤川先生は、ナノメンブレンの開発背景とその後の応用に関した講演をされた。絶縁膜、イオン交換膜、イオン伝導膜、物質分離膜への具体的な利用例、特に火力発電所で生成される窒素と二酸化炭素の分離能について示された。

東京工業大学の原先生の講演は、分子が平滑基板上に自己組織化によって吸着、組織化、脱離していくかていを STM や AFM により明らかにした研究を紹介された。また、粘菌コンピューターに関する研究例を紹介された。

領域総括の下村先生は、バイオミメティクスの現在の潮流を講演された。また、評価グループの国武先生は、これまでの脂質二分子膜の研究の生い立ちについて講演された。

講演会を通して国武先生の分子を自在に組織化するという思想が取り入れられた講演が多く、分子合成、自己組織化、分子レベルでの分析・解析、原子レベルの観察技術など、様々な角度での個性溢れる研究例を聴くことができたとても賑やかで異色の講演会となった。講演時間が 15 分と短かったため、質疑応答の時間は割愛されたが、その後の意見交換会では深い議論がなされていた。このような多方面への研究の拡がりは、今後の生物規範工学も引き継いで見習っていく必要があると感じた。

国武先生の特別講演の様子

下村代表の講演の様子

講演会の様子

所属班: B01-3 班
所属機関:（独）産業技術総合研究所
氏名: 穂積篤

「自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関するワークショップ」に参加して

２０１５年3月１９日（１３：３０–１８：００）に、北大工学部フロンティア応用科学研究棟　レクチャーホールにて「自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関わるワークショップ」が開催された。最初に下村新学術領域代表から本ワークショップの趣旨説明を頂いた後、環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室長の吉川和身氏から、「環境省は、環境規制、モニタリング、温暖化対策等、規制官庁のイメージがあり、技術、科学に対しては派手な貢献はない。しかし、生物を使った浄化技術等（環境工学、環境保全）の実績はある。環境省としては、将来的にバイオミメティクスを環境技術として使って行こうと考えている。ただ、バイオミメティクスの高いポテンシャルを認めているが、どうやって役所のシステムに落とし込んでいくのかが今後の課題であり、更なる議論が必要であると考えている。環境省単独ではなく、各省庁（文科省、経済省）と連携で進めていきたい。」旨のご挨拶を頂いた。続いて、富士通総研の長谷川誠氏から、環境省事業「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討について」の事業報告があり、それ以外に５件の招待講演とパネルディスカッションが行われた。下記にそれらの講演の概略を記載する。

１）富士通総研　長谷川誠氏
環境省事業「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討について」
本事業の目的は、環境研究、環境技術開発の戦略をインプットすること、実証への展開を目的に、調査・検討を実施することであり、Ｈ２５の事業提言では、企業が何を考えているか？のヒアリング結果をもとに、短中期的な取り組みとして以下の６つの項目が挙げられた。
１）プラットフォームとしてのデータ解析基盤整備
２）地域での実証事業による成功事例の創出
３）研究の推進と体制構築
４）利用者への普及
５）大学・企業への普及、啓発、人事育成
６）対象領域、対象範囲の拡大
これをもとに、Ｈ２６事業の実施内容として４つの項目が実施された。

１）自然模倣技術・システムの実用化に向けた選定及び調査
２）持続可能な社会に向けて社会システム、ライフスタイルの変革に係わる検討
３）他の施策との連携による検討
４）ワークショップの開催

２）「自然史財の総合的研究について」
北大名誉教授　馬渡駿介氏
　文化財と自然史標本では公的位置づけにおける差が大きい。東日本大震災で被災した文化財に対して公的修復活動は行われたが、自然史標本には公的保護がないのが現実。文化財に準じて自然史標本（社会の財産）にも公的保護制度を適用することが重要ではないかという説明があった。そのためには文化財保護法の改訂、システム整備が重要であり、場合によっては、自然史保護法の制定も重要であるとの指摘があった。

３）「コラム　最近の自然史展示あれこれ」
北海道開拓記念館副館長　出利葉浩司氏
　博物館のできること（資料収集の技術、成果の普及）の中で、展示のあり方に焦点を絞った講演があった（オックスフォード大学のピット・リバース博物館他を例にして）。北米の博物館ではジオラマを使った展示が主で、特に背景（写真ではなく絵画）を工夫しているとの説明があった。

４）「バイオミメティクス市民セミナー　北大博物館の取り組みについて」
北大総合博物館教授　大原昌宏氏
　北大総合博物館の活動として、バイオミメティクス市民セミナー（これまでに３９回実施、参加者は毎回約６０名）を３年間行ってきた。セミナーを通して、市民にどのようにして「バイオミメティクス」を認知してもらえるよう務めてきたか、その手法と試みについての説明があった。

５）「ナノスーツ法：自然史学を変える電子顕微鏡観察法」
浜松医科大学教授　針山孝彦氏
　ナノスーツ法開発のルーツとその利点について、実際の生物の観察事例とあわせて分かりやすく解説して頂いた。また、ナノスーツ法の医学応用だけでなく、工学応用についても紹介があった。

６）「千歳におけるものづくり：ナノテクノロジープラットフォームとPWC」
千歳科学技術大学教授　カートハウス・オラフ氏

千歳科学技術大学内の生物模倣関係の研究クラスター、北海道バイオ・材料イノベーションについて紹介があった。具体的な研究事例として、海藻から抽出された抗腫瘍活性物質、ケイ酸・炭酸混合物の結晶合成、ビールのコクの定量化（センサー開発）などの紹介があった。

7）パネルディスクカッション「ネーチャーアイランド北海道におけるもの作りと博物館の役割」（モデラー　高分子学会事務局長　平坂雅男氏）

最後に、「ネーチャーアイランド北海道におけるもの作りと博物館の役割」と題したパネルディスクカッションが行われた。

・博物館からの情報発信が理想的だが、現状では限られた発信しかできない。博物館のプレットフォームを利用したい人間にもっとアピールしていくべきだ。
・持続可能性社会を目指すことから始める。今の社会は、環境破壊に向かっているので現状ではNG。そのアイディアこそ博物館にあると思う。
・自然史標本の重要性を考えれば、環境省が博物館を持てばいいのではないか？等々。

所属班: B01-3 班
所属機関:（独）物質・材料研究機構
氏名: 重藤暁津

所属班: B01-3 班
所属機関:　北海道大学
氏名:　新倉謙一

日本化学会第 95 回春季年会 ATP

「倣うーバイオミメティクスと新材料」参加レポート

日本大学理工学部船橋キャンパスで３月２６および２７日に開催された日本化学会/アドバンスト・テクロノロジー・プログラム（ATP）「倣う―バイオミメティクスと新材料」のセッションに参加させて頂いた。２日間で２件の基調講演，２件の招待講演，１６件の依頼講演があり，バイオミメティクスに関して活発な討論が行われた。

2015 年 3 月 26 日に開催された ATP セッション“倣う – バイオミメティクスと新材料”では，生物が発現する優れた機能を工学的なデバイスや機器等にシステム化して“手にとって使える”状態にするための分野横断的連携の成果が数多く発表された．新規性の高いそれらの内容は，学術分野のみならず新規事業展開を模索する企業聴講者の強い興味も集め，セッション会場は終日ほぼ満員の活況を呈した．

講演全体を通して，近将来に実用化可能性の高い生物学と工学のコラボレーション分野の例として，構造材料や電子材料が挙げられると考えられる．2020 年の東京オリンピックを見据えて材料“超”寿命化や環境調和型の都市構築などが唱えられているが，例えば海洋生物に学んだ防汚表面や摩擦特性に優れた構造はこの要求にも非常に良く合致すると考えられるし，花粉など新しい材料の応用展開も期待される．また，材料の寿命予測には微小欠陥からマクロな破断までのスケールを跨いだ破壊進展の監視を長期的に行なわなければならないが，そのためには材料表面や内部で生じる応力や熱などの変化を検知するためのデバイスや材料を複合化する必要がある．昆虫の構造色に学んだ変形対応発色が可能な薄膜は，他からの電力供給を必要としない半永久的に利用可能な歪みセンサなどとしての応用が可能と考えられるし，同様の構造色を利用した表面構造を利用した光学基板や海棲生物の微小流路を利用した微量液

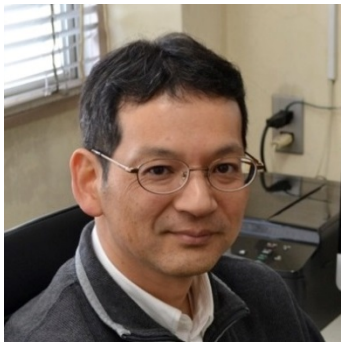
体輸送構造，ならびに多様な生物の自己修復/分泌メカニズムに倣った機能性表面構造は，日常の生活と非常に近い所にある構造材料と人間の相関をモニター/ネットワーキングするための生体系センサや有機 EL 関連技術，ならびにセンシングした情報を可視化するためのデバイス（携帯端末など）の信頼性向上にも貢献すると考えられる．また，これらの異なる材料の優れた物性をなるべく損なわないように複合化するための補助技術としての接合技術も紹介された．

本セッションではさらに，多様な技術開発を効率良く展開するためのデータベース構築（博物学的な生物データ探索や画像検索システム設計）の取り組みの紹介，ならびにこれらの技術動向を俯瞰した解説講演などもあり，バイオミメティクスという分野を要素技術開発に止まらず実用まで系統立って理解するのに非常に役立ったと考えられる．

３月２７日は 東工大の原先生による「自己組織化，時空間機能，そして揺律創発ー origin of life, origin of intelligence に向けてー」というタイトルで基調講演が行われた。膨大な情報や計算処理を，現在の高速コンピューターで処理していくことの課題を提示し，その解決策として生物が回答を見いだすアプローチについて最新の研究成果を挙げながら講演された。海洋機構海洋生命理工学研究開発センターの出口茂先生と椿玲未氏からは海中の生物に関する講演があった。出口先生は「深海は宝の山」というメッセージにあふれた講演であった。また椿氏は，カイメンのように，まるで動いていないようにみえる生物が，小孔を通じて水流を起こす際に，水流を低エネルギーで起こすための節約戦略について発表していた。光や栄養素が少ない深海での生物戦略は，低エネルギー社会の実現にとって有用な知見になり得ることが示されていた。陣内浩司先生からは「電子線顕微鏡によるソフトマテリアルナノ構造観察の新展開」という演題で招待講演があった。電子線トモグラフィーの最新情報に関しての情報のなかで，３次元構造解析に加えて新しい次元要素，例えば測定試料の経時変化，３次元元素マッピングなど，実例をあげて紹介していた。これらの直接観察の技術によって新しい材料機能の精度をより高められることがよくわかった。田中博人先生からは「自己組織化シワの羽ばたき翼膜への応用」という演題で講演が行われた。機械工学を専門とする田中氏は，高分子フィルムのしわをつかって翼膜の機械的強度を持たせる手法に関して報告していた。しわを作るための手法のみでなく実際に羽として浮力を生み出すのに有効であることを示しており，バイオミメティクスの戦略が広い分野で活かされていることを感じさせた。私(新倉)は金ナノ粒子の集合体とウイルスタンパクの集合体の類似性(バイオミメティクス)について発表させて頂いた。産総研ナノシステムの安順花氏からは「バイオミメティクスに関する市民及び産業界の意識調査」，関谷瑞木氏からは「バイオミメティクスの国際標準化最新動向」の講演があった。最後に富士通総研の長谷川誠氏から「バイオミメティクスに関する国内外

の政策動向」について紹介が行われた。バイオミメティクスの国際標準化が世界で進められている現状がよくわかった。科学技術イノベーションの中でもバイオミメティクスの位置づけの重要性が見直されており，環境低負荷での物作りという観点から環境・経済・社会への貢献が大きいことが期待されていることが発表され，産学連携のセクションにふさわしい締めくくりであった。閉会の挨拶で穂積先生がおっしゃたように，生物規範工学はすでに化学や工学の枠をこえ様々な分野・領域で重要なコンセプトになっており，無限の可能性をもっていることを感じることができる有意義な２日間であった。

所属班：公募研究班
所属機関：広島大学　大学院理学研究科附属臨海実験所
氏名：植木龍也



「自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関するワークショップ」および「生物画像データベース検討ならびにナノスーツ法に関するワークショップ」に参加して

３月１９日（木）～２０日（金）の２日間，北海道大学工学部ならびに千歳科学技術大学において文部科学省科学研究費新学術領域「生物規範工学」（下村政嗣領域代表）が主催する標記の２つのワークショップが開催された。初日のワークショップは公開で約 30 人の参加者が，２日目は班員約 20 名が参加した。本稿では，これらのワークショップについて紹介する。

（１）自然模倣技術・システムによる環境技術開発に関するワークショップ

本ワークショップは，本学術領域と環境省が共同で２年間行ってきた事業「自然模倣技術・システムによる環境技術開発」を総括するものである。北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟レクチャーホールを会場として，本学術領域の下村代表，環境省の吉川室長の挨拶と富士通総研の長谷川氏による事業報告に続き，５件の招待講演が行われた。

本学術領域は生物模倣（バイオミメティクス）から生物規範工学へという大方針にのっとり，生物学と工学，それらをつなぐ情報学の連携によって革新的な新技術の開発と新しい社会，ライフスタイルの構築を目指す。挨拶と報告の中で，そのベースとなるバイオミメティクスは徐々に社会に浸透しつつあるが未だ悪いイメージも残っていること，社会・市民とのコミュニケーションを図ること，企業の経営者や技術者の理解を深めることが重要であることなどが説明された。環境政策としての後片付けの技術から予防する技術への転換という言葉が印象的であった。

最初の招待講演は「自然史財の総合的研究について」と題し，北海道大名誉教授の

馬渡氏から，自然史標本および博物館の意義と役割，東北の大震災の後に実感した文化財と自然史財の保護制度の大きな違い，日本学術会議の提案による博物館新設に向けた動きについて紹介された。自然史標本および博物館にこそ持続可能性のヒントがあるという言葉が印象的であった。

次の講演は北海道開拓記念館の出利葉氏による「北海道博物館について」の講演で，博物館におけるアウトリーチ活動の現状に関し，生物の分類・生態を利用者に伝えるためのジオラマ作成やさわれるパーツ配置などの工夫について，海外の博物館の実例も含めて詳しく紹介された。

３つめの北海道大学総合博物館の大原氏による講演「バイオミメティクス市民セミナー　北大博物館の取り組みについて」では，まずバイオミメティクスに関する市民セミナーを紹介された。これまでの３年間本学術領域と連携して，一つの大きなテーマを半年間継続し，概ね月１回のペースでセミナーを開催するスタイルで，高い効果を上げてきた。博物館としてはオープンコースウェアに対して教材を提供するほか，ＪＳＴの支援を得てバイオミメティクスの教材一式をトランクキットという形で提供している。学術研究面ではＳＥＭ画像の収集に力を入れている。

続いて浜松医科大学の針山氏による「ナノスーツ法：自然史学を変える電子顕微鏡観察法」の講演があった。クレストの研究ではじめて開発に成功し，本学術領域において大きく発展しつつあるナノスーツ法の発見の歴史と現状，応用について講演があった。新規マテリアルの開発によってその利用対象が広がり，病理診断への応用が進んでいるとの紹介があった。

５番目の招待講演は「千歳におけるものつくり：ナノテクノロジー・プラットフォームと PWC」と題して，千歳科学技術大学のオラフ氏から，ホトニクスバレープロジェクト，美々プロジェクト，ナノテクノロジープラットフォームの紹介があった。

最後に高分子学会事務局長の平坂氏をモデレーターとして，パネルディスカッションが行われた。博物館の役割，サイエンスコミニュケーションの重要性，企業との連携強化といったポイントが挙げられた。持続可能な社会の構築に向け，バイオミメティクスあるいはバイオテクノロジーがいかに貢献できるか，限りある資源を使い切る方向に進む旧来の技術とは一線を画す，革新的な技術につなげることが重要なポイントである。

（2）生物画像データベース検討ならびにナノスーツ法に関するワークショップ

２日目のワークショップではまず浜松医科大学の針山氏と高久氏，松本氏の３名により，千歳科学技術大学研究棟のナノテクノロジー・プラットフォーム事業で共同利用に供されている電界放出型操作電子顕微鏡(FE-SEM)を使用して，実演講習が行われた。ここでは２種類の試薬を用いたナノスーツ法の比較実演が行われ，参加者はいずれも興味深くその作業を見守った。作業手順そのものは非常に簡便でありながら，高い保護効果がえられることがわかり驚いた。今後，広く普及し，SEM 観察による画像記録の発展に大きく貢献すると期待される技術である。昆虫を生きたまま観察できるという件では，実際，幼虫がステージを外れて歩き回ることで装置内部にたまり，メーカーのメンテナンス作業者を驚かせたというエピソードが印象的であった。

午後の講演では，波大学菅平高原実験センターの町田氏から，昆虫類の微細構造について従来の方法とナノスーツ法の違いが詳しく紹介され，ナノスーツ法によって本来の形態を保持したまま観察できるようになり研究が格段に進んだという経験談が披露された。特に従来は不可能であった SEM 観察後の核染色や切片作成といった組織学的解析が可能になったことが大きなメリットであるとの説明があった。

最後のセッションは，これまで継続的に実施されてきた生物画像データベースの検討会であった。最初に，北大総合博物館の大原氏と村上氏から，植物の葉，甲虫の表面，蝶の翅，ウニなど幅広い生物の微細構造の SEM 画像が提示され，その構造と機能について参加者による活発な検討が行われた。続いて，国立科学博物館の片山氏からは様々な魚の吸盤構造の SEM 画像の紹介があった。魚類に関しては多くの吸盤表面に微絨毛構造が形成しており，ヤモリなどと同様の吸着手法を進化の過程で獲得しているようだが，水中での吸着であるため，粘液も出している様子が観察されたとのことであった。また，一部の魚類ではスポンジ様の構造で吸着している種類もいるとのこと。最後に，国立科学博物館の野村氏より昆虫体表面に形成しているモスアイ構造について話題提供があった。基本的には無反射性，超撥水性，低付着性の機能を有しているが，同じ蝶の仲間でも眼の表面にモスアイ構造が形成していない種類もいるため，一般的に言われている以外の機能も考えられるとのことであった。また昆虫を観察する際に，微小な構造は観察する SEM によって若干構造の見え方に差があったことから，この違いが本当に SEM の機種に依存するものなのか，昆虫のコンディションの違いによるものかを十分に検討する必要があるとのことであった。

２日間の二つのワークショップを通して，本学術領域のこれまでの成果と現状，今後の方向性が班員および関係者によって再確認された。５年の研究期間のうち４年目となる平成２７年度は，本学術領域の実質的なアウトプットとその先に向けてのステップとして重要な年度となることと思われる。

2015年1月12日発行(毎月1回12日)第102巻 第1号 ISSN 0386-5576

特集 工学と生物学の掛け橋となる バイオミメティクス

技術総合誌 オーム

OHM

新春特大号

1

2015・JAN.

1914(大正3)年創刊

特集

工学と生物学の融合により次世代型のモノづくりを実現する

バイオミメティクス

生物多様性に学ぶ技術革新

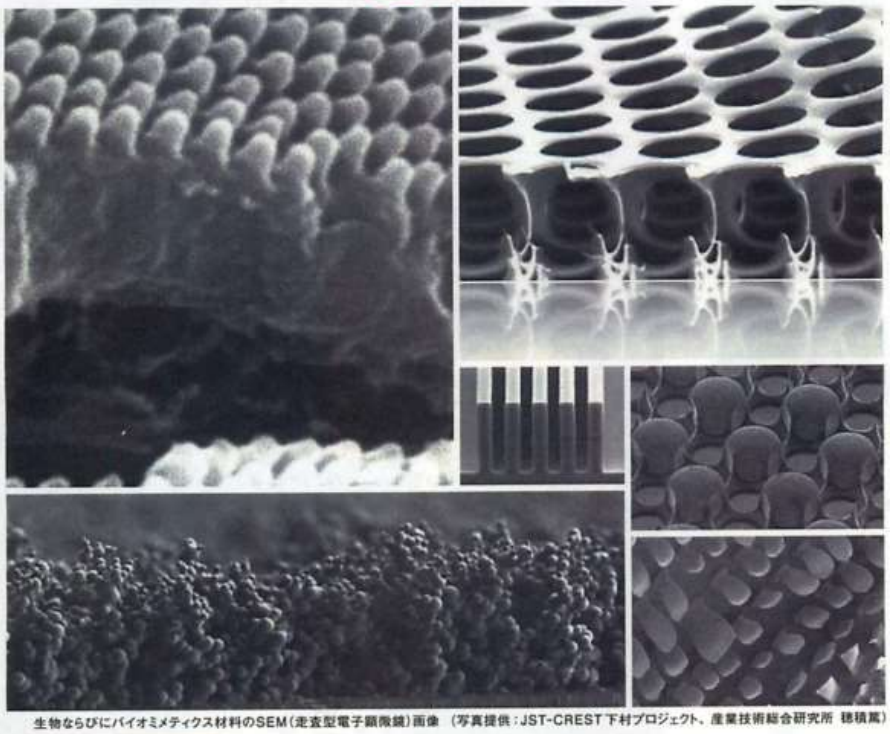
●トップインタビュー 高原 淳 高分子学会 会長

解説 リチウムイオン電池の釘刺し試験とプロテクタの使用例／省エネに資するクリーンデバイス社会実装推進事業

ライセンス 平成26年度

電験二種二次試験 解答解説

技術士一次試験「電気電子」 解答解説



生物ならびにバイオミメティクス材料のSEM(走査型電子顕微鏡)画像 (写真提供:JST-CREST下村プロジェクト、産業技術総合研究所 穂積篤)

http://www.ohmsha.co.jp/

座談会「特集 バイオミメティクス」

異分野連携による「バイオミメティクス」がもたらす技術革新とは?

高分子学会バイオミメティクス研究会(運営委員長:下村政嗣千歳科学技術大学教授)の活動がスタートして2年が経過した。そして、日本におけるバイオミメティクスの産業化を進める産学官連携プラットフォームとして、「バイオミメティクス推進協議会」が研究会の主要メンバーで設立された。今回、推進協議会メンバーの方々に、協議会発足までの経緯や役割、今後の展望、工学と生物学の融合、異分野連携などについて座談会形式でお話いただいた。

平坂 雅男 高分子学会 常務理事・事務局長
針山 孝彦 浜松医科大学 教授
森 直樹 京都大学 准教授
井須 紀文 LIXIL 分析・評価センター長
出口 茂 海洋研究開発機構 海洋生命理工学研究開発センター長
長谷山 美紀 北海道大学 教授
下村 政嗣 千歳科学技術大学 教授

バイオミメティクス推進協議会の役割

下村 本日、司会を務める千歳科学技術大学の下村です。座談会に入る前に、バイオミメティクス推進協議会について少しお話したいと思います。

協議会の発足は、バイオミメティクス(生物模倣)に関してヒューマンネットワークをいかに作っていくか、また、欧州の活発な動きに対して日本での産業展開をどうすべきかを皆で考えようというのがきっかけでした。協議会は、産学連携の母体となり、研究・開発のベースとなるものを産業にどのように結びつけていくか、あるいは集めたデータベースをいかにうまく使っていくか、という結びつけの役目があります。そして、もう1つ協議会の役割として重要なのが、国際標準化です。国際標準化は欧州を中心とする活発な動きに対して、日本からも標準化提案を行いました。日本提案は、生物学者そして材料学者が各々持っているデータベースを共通に使用して、各分野の研究者がwin-winのコラボレーションをするための仕組み作りです。そのためには、バイオミメティクス分野のオントロジー、つまり生物学での専門用語を材料系や工学系などにも使える言語に変えていくということが重要になります。日本からの提案は、まず、テキストデータを世界の生物学者や工学者が使えるように体系化し、オープンにすることです。国際標準の本来の役割からいって、世界中の人がバイオミメティクスに関するデータを共有できるわけですから、極めて有益だと思います。また、日本は、すでに実証段階になっているバイオミメティクスの画像検索システムを持っていますが、このシステムにも、オントロジーは役立ちます。日本の競争力を考えた場合、オントロジーの体系を標準化でオープンにし、一方で、日本独自の画像検索システムをクローズにする戦略が必要です。

平坂 高分子学会の平坂です。協議会は、バイオミメティクス分野での産学連携を進める組織として、高分子学会内に設けられたバイオミメティクス研究会が起点となり、2014年6月に設立されました。協議会やコンソーシアムというと、企業の社長などが集まり発起人となっ

て始めることが多いですが、バイオミメティクス分野は、高分子系だけでなく、機械系や電気系、情報系などもあるため、各産業界のトップが一致団結して、組織を形成することは容易ではありません。特に、進展が著しいバイオミメティクスの分野では、多くの時間を費やしてしまいます。そこで今回、NPO 法人としてバイオミメティクス推進協議会を立ち上げることになりました。宣伝もしていない状況で、問い合わせが数多くあることを見ても、企業の研究者や開発者、特に協議会に入ることを希望している人たちは、バイオミメティクスという新しいプラットフォームを使って自分の研究を進化させたい、という意欲にあふれています。成功事例を１つでも２つでも早く出すことが重要だと思っています。彼らが期待しているのは、今まで自分のフィールドで考えていた研究・開発テーマ以外のものが何か出てくるだろうということです。それは、まさに融合領域のコラボレーションの成果ではないでしょうか。その意味で推進協議会の発足は非常に有意義だと思います。

バイオミメティクス推進協議会への参加経緯

下村　まずは簡単な自己紹介と、協議会に参加することになったきっかけについて、森先生からお願いします。

森　京都大学の森です。私の専門は農芸化学で、植物が昆虫に食べられないためにどうしているのか、昆虫が植物を食べるためにどうしているのか、といった昆虫と植物の相互作用のケミストリーを研究しています。下村先生が代表を務めている「生物規範工学」と呼ぶバイオミメティクスの研究プロジェクトに関わらせていただいたのは、藤崎憲治先生の「昆虫 COE」（京都大学 21 世紀 COE プログラム・昆虫科学が拓く未来型食料環境学の創生）に参画していたからだと思っています。昆虫 COE は中間評価に苦しんだのですが、やっていたこと、あるいはやろうとしていたことは極めて有意義なものだったと思います。昆虫 COE はエントモミメティックサイエンス（昆虫模倣科学）という新たな学問領域の創生を目指していました。例えば、アメンボがどうして水の上を走るのかなど、昆虫の様々な機能をもっと物理や工学の言葉で解釈すれば、そこに何か新しい技術が生まれるのではないか、という視点もその１つでした。今回は、昆虫 COE の発展型という意味で参加させていただきました。

井須　LIXIL の井須です。私は材料科学分野が専門です。もともと INAX 時代から環境負荷を下げるモノ作りをしていて、2000 年ぐらいから自然に学ぶモノ作りを始めました。現在は、多少部署が変わりましたが、CO_2 を減らす技術を提供したいという思いがあり、今は住宅材料を中心に環境負荷の削減、これはメーカーの使命ですが、モノをつくる時やお客さまに使っていただく時の環境負荷をいかに下げられるか、といった研究・開発を粛々とやっています。バイオミメティクスの研究プロジェクトには INAX から東北大学に移られた石田先生の奨めもあり、参加させていただくことにしました。

下村　政嗣
（しもむら　まさつぐ）
千歳科学技術大学　教授（北海道大学・東北大学名誉教授）

九州大学工学部卒。九州大学大学院工学研究科合成学専攻修士課程修了（工学博士）。九州大学工学部助手、東京農工大学工学部助教授、北海道大学電子科学研究所教授、理化学研究所フロンティア研究システム時空間機能材料研究グループチームリーダー、東北大学多元物質科学研究所教授等を経て、現職。

平坂　雅男
（ひらさか　まさお）
公益社団法人 高分子学会
常務理事・事務局長

早稲田大学大学院理工学研究科修了。帝人（株）中央研究所入社後、アモルファスシリコン太陽電池の研究で工学博士取得（北海道大学）。研究企画部長、構造解析研究所長、知財戦略室長を経て、現職。

長谷山　北海道大学の長谷山です。私の専門は情報科学で、画像・映像や音楽・音響信号などの解析研究をしています。Web データなども含まれていますので、ビッグデータ解析屋というのが私の現状の研究者としての立ち位置です。私の出身は工学部の電子工学科で、数学者の先生に育てられ助教として研究を続け、その後、文部科学省の在外研究員としてワシントン大学で生物を研究し、今は北海道大学の情報科学研究科で教鞭をとっています。まるで融合領域の申し子のような人間です。様々な分野の人と接することができたのは、私の研究にとって非常に有意義だったと思います。そんなこともあって、自然

にバイオミメティクスにも触れていったという感じでしょうか。

出口　茂
（でぐち　しげる）
独立行政法人
海洋研究開発機構
海洋生命理工学研究開発
センター長

京都大学工学部卒。京都大学大学院工学研究科高分子化学専攻博士課程単位認定退学。博士（工学）。新技術事業団（現・科学技術振興機構）長期在外若手研究員（スウェーデン、ルント大学）の後、海洋科学技術センター（現・海洋研究開発機構）入所。グループリーダー、チームリーダーを経て、現職。

出口　海洋研究開発機構（JAMSTEC）の出口です。私の専門は高分子化学です。今は、深海に住んでいる変わった生き物を、どうバイオミメティクスに結びつけるかの研究をしようとしているところです。バイオミメティクスの研究プロジェクトに参加したきっかけは、ある学会の講演を傍聴した際、たまたま前の席に下村先生が座られていて、ちょっと話があると言われて…。下村先生、私はなぜ選ばれたのでしょうか？（笑）。

下村　出口さんは現在、大きな海洋データを持っている海洋生命理工学研究開発センターのセンター長です。高分子化学が専門の人がJAMSTECにいるということは、異分野連携を進めるのに絶好だと思い、お誘いしました。

針山　浜松医科大学の針山です。私は、もともと細胞はどのように興奮して、どのように世の中を見ているのか、という視覚生理学研究をしていたのですが、だんだん視覚生理学から光生物学に変わっていきました。それは職を得た場所が東北大学の応用情報学研究センターだったからですが、そこは医学・工学・経済学の3つの講座で構成されていて、私は助手でした。実験の合間にしていたテニスをきっかけに他の科の先生や学生と交流を持つようになり、それまで知らなかった他の学問の言葉を覚えることができました。バイオミメティクスに興味を持ったのは、様々な会合に生物学者として参加させていただいたことがきっかけです。また、書籍『昆虫ミメティクス―昆虫の設計に学ぶ』を編纂する時に下村先生に手伝っていただいたこともあり、今回参加させていただくことになりました。

平坂　平坂です。私は構造化学が専門ですが、卒業後はポリマー技術を得意とする帝人に入社しました。帝人に入社すると、たいてい化学系の研究をするのですが、私は関係のない無機薄膜、太陽電池の研究や磁性材料など無機材料系の研究で育ってきました。その後、研究企画を担当するようになってからは、エレクトロニクスからライフサイエンスまで幅広くやるようになり、ライフサイエンス分野では、下村先生とハニカムフィルムを一緒に開発しました。そうこうしているうちに、バイオミメティクスも面白いね、ということになり、関わるようになりました。今は帝人から高分子学会に移り、バイオミメティクス研究会とISO（国際標準化機構）という大きな事業にドップリつかっています。海外でのISOなどの会議に出席すると、日本はヨーロッパなどに比べて2周も3周も遅れていることを実感します。バイオミメティクスは高分子だけの世界ではなく、それぞれの分野の融合の世界だと思い、それなら基盤を作るために協力しましょう、ということで参加させていただいています。

バイオミメティクスで重要な異分野連携

下村　バイオミメティクスは、「生物規範工学」として取り組んでいる研究プロジェクトの中間評価のヒヤリングでも、まだまだ理解されていないことが分かりました。そのためには、まず幅広く生物学、工学、情報科学など各分野で異分野連携をしていく仕組み作りが必要です。世界的には、バイオミメティクスは昔から知られています。古くはレオナルド・ダヴィンチに遡って、カローザスが合成した絹糸を真似たナイロンや、メストラルが開発した野生ゴボウの種の表面の構造を使った面ファスナー（マジックテープ）など。帝人がモルフォ蝶の羽からヒントを得たモルフォテックス繊維、LIXILがカタツムリの殻をヒントに防汚外壁を開発した経緯もあります。さらに、潜水艦のソナーのような軍事研究の歴史もあります。今世紀になって、ヤモリの指先を真似たゲッコーテープなどが開発された背景を考えてみると、生物学者が面白い構造を発見して、その機能を解明したいと思っていたところに、たまたまナノテクの研究開発者がモデルを作って、原理を確認して商品化している。それは異分野連携がうまくいったからこそ成功したのです。しかし、日本は異分野連携が弱い。異分野連携をどのようにして行っていくかが重要だと思います。

平坂　これまでの異分野連携というのは、工学系だと例

えば化学と機械、化学と電気、企業だと化学産業と自動車産業など、それほど離れていない分野同士で行われていました。バイオミメティクスでは、生物系と工学系という極端な異分野連携になります。生物系と材料系の人がどうやって連携していけばよいのか今まで分かりませんでした。しかし、バイオミメティクスが出てきて、材料系研究者と生物系研究者が何となく分かち合えるというか、少しずつ意見交換できるようになってきているように思います。そのためには、何らかの"場"が必要ですね。

下村　例えば、ウィーン（オーストリア）の自然史博物館にはバイオミメティクスの常設展示があり、ミュンヘン（ドイツ）にある博物館にも常設展示があります。また、フランスの自然史博物館は、館長が自ら解説記事を書き、ロンドンの自然史博物館のキュレーターはバイオミメティクスやフォトニクスの国際会議で招待講演をしています。また、サンディエゴ動物園は、バイオミメティクスの経済効果予測をしています。博物館や動物園は生物資源のデータベースを持っているので、そのデータを活用できるように工学者などとの異分野連携をするべきだと思いますね。JAMSTECはデータベースをたくさんお持ちですが、そのあたりはいかがですか。

出口　生物のデータベースはJAMSTECが運用しているものも含めてたくさんありますが、アクセスすると、最初に「学名を入れよ」と問われます。生物学を専門としない人は学名なんて知りませんから、使うまでのハードルがものすごく高いというのが現状です。バイオミメティクスにデータベースは重要だ、と皆が言うのですが、実際はそれを活用できないのです。そうした意識のギャップを何とかすることが先決ではないでしょうか。今、バイオミメティクスで本当に求められているのは、遺伝子にフォーカスした分子生物学ではなく、昔ながらの生物学というか、生物の形質を言葉や図、写真などで表す「記載」という分野ですね。ヨーロッパはそうした記載みたいなものを大事にして育てていったという歴史があると思うのですが、日本はそうでなかったような気がします。

井須　生物や人類が、何万年以上も前から建築材料として使われてきた土が、今はプラスチックなどの人工材料に替わりましたが、昔の日本人は身近な自然にある素材をうまく使うことを考えていました。弊社は、材料研究が中心ですが、環境負荷を減らすために自然に学ぼうという考えがあります。そして、我々は工業化において、暮らしの中の負荷をどのようにして下げていくかを考えています。エネルギーミニマムな自然界というところに何かヒントがあるのではないかと思っています。

平坂　バイオミメティクスと環境という観点では、帝人のモルフォテックス繊維についても、光学干渉を用いているため、染色剤が不要といったように、環境に優しいところがあります。バイオミメティクスにおいては、環境が1つのキーワードになりますね。

日本らしいバイオミメティクス

下村　帝人もLIXILも生物学者がいたわけではないのに、なぜ帝人がモルフォ蝶に、なぜLIXILがカタツムリに注目したのかが気になりますね。

森　日本は環境が多様なので、生物が多様で身近だったということがあると思います。日本が海外のように博物学をベースにするのは難しいでしょうから、ちょっと違った方向、例えばモノ作りを意識したバイオミメティクスが日本らしいのではないでしょうか。

針山　ヨーロッパの大学の生物学系の研究者は、博物館を通ってから自分の研究室に行くというスタイルが多いですね。それを見ていると、ヨーロッパ人の「神様が作ったものをしっかりと見て学んでから生物学をやりましょう」という発想がよく分かります。日本の生物学者は「自然という八百万の神がいて、それはもう知っている、もう敬っている」となってしまう。博物学をきちんと学ばず、一部のよいところだけを学ぶ。その魂だけを勉強すれば、他所の魂も知ることができるだろう、と大きく勘違いしてしまうのです。でも、それは日本文化のよいところでもあるので、そこをベー

針山　孝彦
（はりやま　たかひこ）
浜松医科大学
教授（副学長、図書館長）

横浜市立大学文理学部卒。岡山大学理学専攻修士課程修了、東北大学医学専攻博士課程中退（理学博士）。東北大学応用情報学研究センター助手、浜松医科大学医学部助教授等を経て、現職。

長谷山　美紀
（はせやま　みき）
北海道大学大学院
情報科学研究科　教授

北海道大学工学部卒。北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了（博士（工学））。北海道大学応用電気研究所（現・電子科学研究所）助手、北海道大学工学部助教授、ワシントン大学客員助教授を経て、2006年より現職。

スにしてモノ作りを考えていく方がいいのかもしれませんね。

長谷山　分野による文化の違いをお互いに理解しないと、使えるものも使えるようにならないし、知識の共有はできませんね。データベースというと、すぐに数値の話になってしまいますが、日本はモノや情報を収集して整理する能力が非常に優れており、分類学における特別な科目に対しては、大変精緻に調べられていると思います。そういうものから今後は、生物学や工学を共に理解し、ヨーロッパやアメリカとは違った方法や見方で、バイオミメティクスのデータベースの構築を可能にすることが重要だと思っています。今、私たちが世界に勝てる精緻なデータベースを作ることと、ネットワーク化がこれからの鍵になる気がします。これによって異分野連携が可能になるのではないでしょうか。

下村　環境や生物学と工学の融合の話をしてきましたが、農学ではどのような見方ができるでしょうか。

森　農学という立場から見ると、1つの土地に1つの稲しか生えていないというのは、実は自然破壊、環境破壊なのです。人間が生きるためには自然破壊をしているのだ、と考えておかなければダメです。ですから、サスティナビリティとはいったい何だとなると、非常に難しい。そもそも農業自体は自然破壊、環境破壊をしているのです。工学系の先生方には、そのことを知ったうえで解決策を考えないといけないと伝えたいです。針山先生は、ホモ・ドメスティカスという言葉を提唱されていますが、簡単にお話いただけませんか。

針山　ヒトのことをホモ・サピエンスと言いますが、サピエンスというのは賢いという意味で、ホモはヒトというラテン語です。誰もがホモ・サピエンスになりたいのですが、実際はホモ・ドメスティカスです。ドメスティカスというのは、エリアに限られた家畜化した生き物のことで、人間を対象にしてホモ・ドメスティカスという名前をつけました。人は、自分が家畜化した生き物であることを忘れて自然破壊をし続ける。その破壊を自分のエリアでどんどん進めて、それが地球全体に拡がり、気づいたら自分たちの居場所を汚している状況なのです。汚しているにも関わらず、自然は広いものだと錯覚して、里山や森を壊す。自然の均衡を破壊せず、自然に学んで作って、それを誰かに教えていく。それが、ホモ・ドメスティカスがホモ・サピエンスになる方法だと思います。ホモ・サピエンスになる本当の姿というのは、自分たちは節度を守る生き物であるということを振り返ってみることだと思うのです。

データベースを工学と生物学間で共用

下村　日本でデータベースを作るのが大変だといっても、大学にも国立科学博物館にもJAMSTECにもたくさんあるわけです。それをどう使いこなすかが課題です。ヨーロッパは、博物学がきちんと確立されているので成功例が多いのですが、日本の場合は、犬も歩けば棒に当たる的なことでやってきて、ようやく最近、システマチックにやりましょうという要求が出てきました。協議会設立の主旨のように、情報科学の力で、そのようなデータベースを工学と生物学の間で共用して使えるようにするというのは、日本初ではないのでしょうか。

長谷山　世界では行われていない初の試みだと思います。各々が集めた精緻なデータというのは知識の集まりです。博物学や生物学におけるデータ研究者が意図を持って集めたもの、つまり必要だという知識が集められたものです。博物学や生物学のデータは知識で、それをつなげると新しい分野の知識を創出することになる。データベースをつなげることが、これからの鍵になっていくのではないでしょうか。大変な作業ですが、情報科学の立場からすると、データをつなげるのは学問的には可能です。そこからどのような知識を引き出すことができるかが極めて重要になると思います。情報科学屋と生物屋とモノ作り屋の三者が一緒になって初めて新しい知識、いわゆるイノベーションフィールドが拡がっていくのだと思います。

平坂　検索エンジンだけでは意味がなくて、生物学者と

材料系研究者と、もしかしたらアカデミックな人たちが喧々諤々と議論をしながらアイデアを出していく場がないとダメですよね。

出口　先ほど構造を作る話が出ましたが、工学の人は、生物が持つ機能を分析し、模倣した構造を作ることができます。そこからさらに一歩進めて、工学的な解析の内容を生物学者にフィードバックすれば、生物の違った見方を提供できて生物学にもプラスになるはずですが、今はそのような状況にはなっていません。工学者が生物学からデータを一方的に取って、そこで終わってしまっているようなところがあり、もったいない気がします。

針山　これまでのデータベースというのは、出口センター長がおっしゃるように、どちらかというと生物学者が出したデータをそのまま使って、工学者が何かを作り、結果的に生物学者は何もしない、と受け取られて終わりという感じでしたね。例えば、電子顕微鏡で直接生体観察できる技術「ナノスーツ」は１つの成功例だと思っています。私は最初、１人でやりたいと考えていましたが、１人では絶対に達成できなかった。下村先生や私の周りの若い研究者、化学者や生物学者、工学者もいて、よいネットワークができて実現したのです。データベースがきちんとできても、結局、それを運用するのは人なので、日本人としての、よい意味での護送船団方式にもう一度戻ることも重要なのではないでしょうか。

異分野連携で重要な言葉の壁の克服

森　異分野連携で難しいと感じるのは、工学者と私たち生物学者の言語がまったく違うことです。そこに長谷山先生のような情報分野の言語が入ってくると、チンプンカンプンで…（苦笑）。でも、何でもフランクに聞ける雰囲気、キャパシティが広いのはよいですね。針山先生がおっしゃった成功例というのはまさしくそこではないでしょうか。異分野連携では分野別の異なる言語が課題で、それをどう解決していくかが大事だと思います。

出口　そうですね。今、スーパーサイエンスハイスクールというのがありますが、若いうちから生物をやると決めて、その専門分野しか勉強しない。それは違うと思うのです。例えば、構造色のもととなる回折・反射を説明するブラッグの法則は物理の範疇に入りますが、それを理解するのに高度な専門知識は必要ありません。そのようなベーシックなところは広く浅く知るという教育をすべきで、そのうえで専門分野を深く特化するという形にしないと、言語の違いはいつまでも埋まらないと思います。そのあたりの基礎知識が今、どんどん狭くなってきているというのは非常に大きな問題ではないかと思いますね。

長谷山　私も同感です。いつも物理だ、化学だ、生物だ、と高校や中学の科目に捉われ過ぎていますね。これからの次代を担う若者を枠にはめてしまうことはないと思うし、それがもしかしたら融合領域というものを下に見てしまうことになるかもしれない。新しいものが生まれるというのは連携して実現するわけですから、そこを下に見てしまうという風潮があるとすれば、それは我々、先輩が作った古い化石のような思い込みが問題ではないでしょうか。

出口　融合領域は多分、様々な分野をどう組み合わせるかのパッケージングの妙だと思います。これとこれを組み合わせたら面白い、というのが伝わらないと、プロの間でも会話ができないですね。

井須　イノベーションは日本語で「創造」と書きますが、ものすごくよい漢字を当てていると思います。創造というのは倉を刀で切るということですよね。これはまさに融合で、いろんな知識を破って融合した時に何か新しいものが作り出される、というのはぴったりですね。協議会メンバーも、メンバー同士で情報交換して材料などの研究をしているようですが、とてもよいことだと思います。もちろんデータベースも大事ですが、人が集まるというコミュニティが大切だと思います。

出口　JAMSTEC には数理

井須　紀文
（いず　のりふみ）
株式会社 LIXIL　技術研究本部
分析・評価センター長

東北大学理学部卒。東北大学大学院理学研究科地学専攻修士課程修了。名古屋工業大学大学院物質工学専攻博士課程修了（社会人大学院制度）、博士（工学）。小野田エー・エル・シー（株）（現・クリオン（株））、（株）INAX（現・（株）LIXIL）基礎研究所長、同 総合技術研究所創造技術研究室長、同 総合技術研究所 IBA 推進室長等を経て、現職。

森　直樹
（もり　なおき）
京都大学　農学研究科
応用生命科学専攻　准教授

筑波大学第二学群農林学類卒。京都大学農学研究科農芸化学専攻博士課程修了（農学博士）。京都大学農学研究科助手、米国農務省研究所研究員を経て、現職。

科学をやっている人もたくさんいるのですが、最近、バイオミメティクスに興味を持ってくれる人が結構いるんです。物理の人がいみじくも言ったのは、「生物ってすごい！こんなに生き物って面白いんだ、今まで知らなかった」と。コミュニティを拡大していくことは大切ですね。

平坂　問題は近くにそういった人がいるかいないかですね。以前、国際標準化の仕事で、森先生と一緒に生物と材料の機能を割り当てる表を作った時、生物学者と工学者がお互いに意見を出し合って、すごくまとまった表を作ることができました。あれが工学系だけだったら推論でしかないですよね。専門領域の人しか周りにいないから、そこでしか考え方が広がらない。協議会も、様々な分野の人たちが集まっているからこそよいのです。

虫を触れない子が増えてきた現実

針山　アウトリーチ活動で八丈島へ行った時、自然に恵まれた環境にいるのに虫を触れない子が増えていることを知りました。私は、虫は友達だと思うのですが、最近は、友達はゲームになってしまった。ゲームの中では野心がある子でも、虫に実際触ったことがなければ、いくら教育を受けても自然に戻ることへのハードルができてしまう。できる限り自然に触れながら大きくなって欲しいと思います。コンピュータゲームばかりやっていたら、バーチャルの世界で生きるようになってしまい、自然の中に魂があることを分からないのではないかという危機感を感じます。

長谷山　情報科学やコンピュータというのは、ここにどんな可能性や期待があるのか、といった好奇心からできた学問です。なぜ高解像度やデジタル放送にしたのか、もちろん産業的にいろいろなことがありますが、やはり綺麗なものを見れば綺麗だと思い、その綺麗なものをもっと綺麗に見たい。だからこそ、それを実現する技術ができたのです。いわば情緒の世界を実現してきた。だからゲームも私は同じだと思うのです。ゲームで遊んでいる子供たちに、その根幹にある技術がなぜ生まれてきたのかを把握してもらいたいですね。

森　美しいものを美しい、と感じることは大事ですよね。それは情緒を育てることにつながりますから。今の教育は、情緒を育てていないように思います。京都大学のオープンキャンパスで、男子高校生に「体温が冷たいのが分かるから、虫を触ってごらん」と言っても、虫に触れないのです。触るのは女の子だけです。嘆かわしい。それから、生物系では今、分類学者がどんどんいなくなっています。分類することが廃れているのです。現在、生物学では分子生物学が隆盛ですが、分類学が廃れると、生物学の根幹が失われ、100年後に一体どうなるのかが心配です。そこに情報学が入ったらこんなことができる、分類学と情報学が組み合わさったらこんなことができるのか、ということを若手研究者たちに示すことができる、それがバイオミメティクスの大事な役割だと思います。

井須　世界的に産業のグローバル化が進められている中で、各国の違う文化的なバックグラウンドを持つ工場では、同じ言葉では話ができません。例えば、セラミックス材料の評価をどのようにすればよいのかを議論する時に、トラディショナルなセラミックス評価方法が非常に役立つのですが、誰も知らなくなってしまった。若い人がやろうとしても、できなくなっているのです。新しいことをする時には、分類学のような基礎的なところをもっと大事にしないとうまくいかないと思います。これは森先生がおっしゃったような、きちんと残さなければいけない技術が、どんどん失われている気がします。生物だけでなく、産業もかなり危機的な感じがしますね。

バイオテクノロジーとバイオミメティクスの違い

下村　世の中の人には、バイオテクノロジーとバイオミメティクスの違いを分かってもらえていませんね。生物細胞のサイズは約10μmで、その表面や内部には、ナノからマイクロに至る階層的なサブセルラーサイズ構造があります。電子顕微鏡を駆使した自然史学者・生物学者は、生物の特異な機能の発現には特徴的な構造が対応していることを見出してきました。今、国際標準化の中

でホットな議論の１つは、スパイダーシルク（カイコとクモ、両者のメリットを併せ持つ新素材）をバイオミメティクスと言うか、バイオテクノロジーと言うか、なんです。農学だと、その境は連続的につながっているのでしょうけれど、そのあたりはどうですか。

森　それは難しい質問ですね。バイオテクノロジーは、確かに農学では非常に身近な言葉です。物質生産を基盤にしたバイオテクノロジー、品種改良を目指すバイオテクノロジーは農学の重要な研究事項です。一方で、生物を電子顕微鏡で見ると非常に精緻な構造があって、それがどうやって作られているかは分かっていませんが、そこに私たちの知らない機能がどんどん出てきているのです。これはサブセルラーサイズの観点から見たバイオミメティクスと言えるかもしれません。ただ、個人的には、現時点では厳密な区別は難しいような気がします。

下村　バイオテクノロジーは、どちらかと言えば遺伝子を触って大腸菌に何かものを作らせるという、基本的には分子レベルあるいはタンパク質などですよね。バイオテクノロジーでサブセルラーサイズの、あるいはもっと大きなものを作ることはできないのですから、そこは明らかにバイオミメティクスの特色ではないでしょうか。バイオミメティクスなら飛行機だって作れます。バイオテクノロジーでは、飛行機や自動車は作れませんから（笑）。

出口　抽象化のプロセスが入っているかどうかでしょう。クモの糸を例にすると、重要なのはクモの糸をそのまま作るのではなく、クモの糸がなぜ丈夫なのか、メカニズムを解明したうえで、そこにさらに強くしたプロセスが入っていれば、そちらはバイオミメティクスと呼んでもよいと思います。クモの糸が丈夫だからといって、そのまま作っただけではバイオミメティクスとは言えないのではないでしょうか。

下村　スパイダーシルクは、クモの遺伝子を大腸菌に入れて作っている限りはバイオテクノロジーという位置づけではないでしょうか。ナイロンのように、完全に人間の合成化学の力で作るなら、それはバイオミメティクスということになるのでしょうけれど…。

バイオミメティクスの社会受容性

下村　協議会は、博物学と情報科学の連携によってデータをうまく使いながら、農学、工学、生理学などの人たちと、バイオミメティクスを活用して新しい技術を確立して様々な材料・製品を作っていくことを目指しています。果たしてその新しい技術が、本当に社会受容性があるものなのか。社会受容というのは、単に環境に優しいものを作るだけではなく、戦争には使ってはいけないものもあると思うんです。バイオミメティクスのもとを探ると、DARPA（米国国防高等研究計画局）なんですよ。軍事研究というのは即、今の世の中で使える諸刃の剣みたいなところがあるんです。そのあたりが、認証が絡むと難しい議論になるのではないかと思っています。

長谷山　危なくなればなるほど認証というものが必要になってきますね。ISOのバイオミメティクスの規格化を検討する技術委員会（ISO/TC266）の幹事国ドイツでは、すでに自国での認証プロセスを準備しているわけですから、それがそのまま世界の標準になるかもしれないと思うと、いろいろ考えさせられますね。システマチックに新しいものを生み出す方法があるとしたら、その１つは融合だと思います。研究者というのは、何かを極めなければ研究にも開発にもなりませんが、もう少し別なものを身につけるような方法も考えた方がよいのかもしれません。何かを極めるためには複数のものを持つという文化を許容しないと、新しいものを生み出す際、常に障害が出てくるような気がします。

平坂　私は電子顕微鏡が専門ですが、顕微鏡の技術者というのは撮ることに一生懸命になっていて、材料や生物にあまり関心がない。私は、それは絶対にダメだと思っています。観察するのは楽しいかもしれませんが、やはり材料の何を知りたいのか、材料が分かっていて自分はこの材料をこうしたいんだと思っていないと、よい写真は撮れません。だから、「きちんと材料や生物のことを勉強しなさい。そうしないと、よい写真は撮れないよ」と周りに言っています。自分はよいと思っても、他人から見ればそんな写真はいらない、となってしまいますから。どこにモチベーションを持っていくかがすごく重要ではないかと思いますね。

下村　本日は、有意義なお話をありがとうございました。読者の皆さんには、本特集をご覧いただき、バイオミメティクスへの理解を深めていただきたいと思います。

低炭素・循環・自然共生を可能にする環境・生命文明社会の創造に向けて

中井　徳太郎
環境省　大臣官房審議官
Tokutaro Nakai

日本および世界が直面している諸課題

日本では2004年に人口が1億2,784万人のピークを迎え、高齢化率が19.6%と世界に先行して本格的な人口減少・超高齢化社会に突入した。これを受けて、国土計画など各種の見直しや、国民の健康寿命の延伸が課題となっている。

また、所得・購買力の低下によるデフレ、化石燃料大量輸入による資金の流出といった経済問題も抱えている。累積1千兆円を超える財政赤字が深刻化し、経済力の陰りとともに国際的なプレゼンスも低下しつつある。

さらに世界的な視点から見れば、枯渇性のエネルギー・資源の大量消費を前提とした社会が気候変動の進行を引き起こすなど、地球の環境容量は限界に達しつつある。人的な開発により、自然環境が本来持つ恵みと強さを喪失しているのである。

人々が充実した暮らしを享受できる社会へ

このような世界が直面している課題を克服するために、我々は再生可能なエネルギー・資源を基本とし、森林や里山、河川や海といった自然が豊かに繋がる良好な自然環境の創出に取り組んでいる。すなわち、人や生態系の「安全」の基盤のうえに、低炭素・循環・自然共生が統合的に達成された「真に持続可能な社会」の実現である。

未来にあるべき社会では、海外からのエネルギー・資源の獲得に充てられていた資金や企業・家計などに潤沢に存在する資金が自立・分散型の低炭素エネルギー社会の構築などの国内の環境投資・消費に振り向けられることで、国内・地域内の経済循環の拡大が見込まれる。また、多くの企業や人が自然の繋がりを豊かにする取り組みに参加することで、自然と共生する経済社会が実現すれば、地域内のコミュニティが強く濃くなるとともに、「人も自然の生態系の一部である」という日本人が受け継いできた自然観に立った、健康で心豊かな暮らしを送ることができるようになる。

未来のあるべき社会・ライフスタイルを実現する技術の導入

真に持続可能な社会の実現に向けて、少子高齢化、資源枯渇といった将来の社会条件・制約を踏まえたうえでのバックキャスティングにより、あるべき社会システムやライフスタイルを描き、それを実現するためのツールとしての技術を社会に着実にビルトインしていくことが必要となる。

この時、自然は搾取するものではなく、そこから学び、守るべきものでなくてはならない。豊かさと幸せを実感するためには、単に我慢する、省エネ製品に買い換えるという呼びかけではなく、自然の英知や日本の歴史・伝統からヒントを得て技術を掘り起こすことでライフスタイルの変革を促進させることが求められる。このような要求を満たす技術は、長い年月をかけて成熟した生物・生態系の中にこそ眠っている。自然と共生し、真に「エコなシステム」を実現するためには、自然から学んだ独創的技術の開発・実証、導入促進を行っていくことが有用である。

また、我が国の優れた技術を途上国のニーズ・文化・社会と調和するようチューニングして市場に展開することは、日本の国際的プレゼンスを向上させるだけでなく、途上国市場で鍛えられた技術を日本へ導入するリバースイノベーションにも繋がることが期待される。

このように自然から学び、自然と共生していくことは、国内経済問題および地球環境保全の双方の解決策となり得るものである。我々環境省としても、自然の英知に学んだ持続可能な社会システムの開発を進め、環境生命・文明社会の実現に取り組んでまいりたい。

経済産業省としての取り組み

安永 裕幸
経済産業省　大臣官房審議官
Hiroyuki Yasunaga

何をもって「バイオミメティクス」と定義するか、は簡単でない。だが、少しだけ誇張して言えば、およそすべての技術は何らかの形で生物の形態や機能を模倣し、それを人工物によって、ある程度まで再現する、という形で進化してきた。その「ある程度」という尺度が近年の様々な技術の進歩により、急速にその完成度を上げてきている、というのが現在のバイオミメティクス全般を取り巻く状況であろう。そういう意味では、バイオミメティクスは、広範な科学技術分野における、汎用的な研究開発の方法論として、その有効性を増しつつあると言えよう。

経済産業省としても、バイオミメティクスには注目しているところであるが、これまでに、いわゆる「国家プロジェクト」の形での採り上げ方をしたことはない。だが、例えば今回、本稿を書くために調べたところ、産業技術総合研究所（AIST）において52テーマの研究が、いろいろな部門で行われていることが分かった。参考のため、ここにそのいくつかを列挙することとする。

① バイオメディカル研究部門においては、近江谷部門長などが「ウズベンモウソウに学ぶ生物化学発光」の研究を行い、細胞イメージングなどへの応用を企図しているほか、芝上上級主任研究員ほかが「ミドリムシに学ぶ高分子材料」として、ミドリムシの機能を用いたプラスチックやナノファイバーの製造技術の研究を行っている。

② 健康工学研究部門においては、安積研究グループ長ほかが「細胞膜に学ぶイオンを選択的に吸着する技術」、「マッコウクジラに学ぶ小型浮力操作システム」の研究を通じて、高度な医療・福祉デバイスの研究を行っているほか、佐藤研究グループ長が「嗅覚神経系に学ぶ人工の鼻センサ技術」として高度な嗅覚センサの研究を行っている。

③ ヒューマンライフテクノロジー研究部門においては、丸山グループリーダーほかが「止血機能に学ぶ人工臓器デバイス評価法」の研究に基づく血液ポンプの開発を、また、伊藤グループリーダーほかが「骨の石灰化に学ぶ再生医療型のナノ複合材料」の研究に基づく医療用機能性材料の開発を行っている。

④ そのほか、「松ぼっくりに学ぶ水分制御シート材料」の研究による水貯蔵・砂漠緑化の実現、「傷の再生に学ぶ自己修復材料」、「マグロやウナギの皮膚に学ぶ低摩擦塗料」、「魚の構造色に学ぶ調光技術」、「ショウジョウバエの越冬に学ぶ融点制御」、「病原体の感染機構に学ぶバイオセンサ、除染・吸着素材」、「コットンに学ぶ3D繊維成形材料」、「生体硬組織や軟骨に学ぶ有機無機複合材料」、「棒状ウィルスに学ぶナノカプセル材料」、「生体内分子シャペロンに学ぶナノ空間ゲル材料」、「膜タンパク質に学ぶナノチューブ酸化触媒」、「爪のハード・ソフト複合構造に学ぶ壊れにくい材料」など、極めて多岐にわたる研究が行われている。

今後、これらの中から将来の産業へのインパクトの大きいものを順次、産業界に「橋渡し」していくことが必要となるものと期待している。

また、これまでに気づいていない異分野からの研究シーズにも注目することが必要であろうし、産業界からの要望にも積極的に応えていくべく、研究現場との連携を深めたい。

バイオミメティクスの日本の研究開発動向

バイオミメティクス研究開発のトレンドと現代的意義

千歳科学技術大学　総合光科学部　教授　下村　政嗣

2011年5月、ドイツ規格協会（DIN）は、ジュネーブの国際標準化機構（ISO）に対して、バイオミメティクスに関する新しい技術委員会（TC）設立の提案を行った。DINの提案は、ISOの第266番目の技術委員会「ISO/TC266 Biomimetics」として承認され、2012年10月にベルリンで1回目の国際委員会が開催され、2014年10月にベルギーで開催された4回目に至るまでに4つの標準化の課題が審議されている。さらに、2011年8月12日付けの『Financial Times』（オンライン版）は、"Inspired, naturally"と題する記事において、San Diego動物園が2010年10月に上梓した報告書"Global Biomimicry Efforts：An Economic Game Changer"において、「Biomimicryの分野が、米国において15年後に年間3,000億ドルの国内総生産、そして2025年までに160万人の雇用をもたらす」という経済予測を行ったことを報じた。

Biomimicry（バイオミミクリー）とは、『Biomimicry: Innovation Inspired by Nature（邦訳：自然と生体に学ぶバイオミミクリー）』の著者で、Biomimicry 3.8の創設者でもある生態学者Janine Benyus博士の命名であり、バイオミメティクスと同義である。2012年8月にはZurichにおいて、San Diego動物園、Zurich動物園、Biomimicry Europe、Biomimicry 3.8などとの共催のもと、"Biomimicry Europe Innovation and Finance Summit"が開催され、2回目は2014年9月に開催された。

バイオミメティクスの技術変遷

生物を模倣するという考え方は古く、ナイロンやマジックテープ、鮫肌を模倣した競泳水着のように、我々の身の周りには生物からヒントを得て開発された製品が多い。実は、ドイツが国際標準化を提唱し、バイオミミクリーが国際的な活動を始めた背景には、今世紀に入ってヨーロッパを中心に展開した自然史学とナノテクノロジーのコラボレーションに基づく「材料系バイオミメティクス」の新潮流がある。1950年代、Biomimeticsの命名者であるOtto Schmittは、神経システムにおける信号処理を模倣して、入力信号からノイズを除去し、矩形波に変換する電気回路として知られている「シュミット・トリガー」を発明した。絹糸を模倣したナイロンの開発はそれよりも古く1930年代であり、植物の種が動物に付着することを模倣した面状ファスナー（VELCRO）は、1940年代に製品化されている。これらの黎明期を経て、1970年代に化学の分野において、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣しようとするBiomimetic Chemistryとして「分子系バイオミメティクス」の世界的な学術潮流を迎える。1980年代に盛んになった人工光合成の研究は、色素増感太陽電池の基礎を明らかにし、ゲルアクチュエーターの研究は人工筋肉などの発明をもたらした。その後、分子生物学の大きな展開により、遺伝子を中心として生命現象を解明する研究が生物学の主流になっていくなかで、1980年代後半からはLB膜（分子累積膜）や分子エレクトロニクスの台頭と相俟ってBiomimetic Chemistryの主流は生物学とは距離を置くこととなり、「分子組織化学」や「超分子化学」として分子ナノテクノロジーの基礎を形作る。

一方、機械工学や流体力学の分野でもバイオミメティクス研究の潮流が起こり、昆虫の飛翔や魚の泳ぎを真似たロボットや、コウモリの反響定位や昆虫の感覚毛を模倣したソナーやレーダーなどが開発された。新幹線の形状が、カワセミのくちばし形状を模倣してトンネル突入時の流体抵抗を低減することや、パンタグラフにフクロウの風切羽の構造を適用することで防音効果が得られることはよく知られている。「機械系バイオミメティクス」の研究は衰退することなく継続し、軍事産業、鉄道や船舶、航空機産業のみならずマイクロマシンやMEMSなどの先端技術分野、エコ家電製品などにも影響を与えている。

そして今世紀に入り、材料研究の分野においてバイオミメティクス研究の新潮流が欧米を中心に注目を集めるとともに、その実用化の動きが始まりつつある。蓮の葉の超撥水性、ヤモリや昆虫の足の接着性、サメ肌の流体

抵抗低減化、蛾の眼の持つ無反射性、モルフォ蝶の鱗粉が放つ構造色など、生物表面に形成されるナノ・マイクロ構造に起因する特異な機能を模倣して、テフロンを使わない撥水材料、接着物質を使わない粘着テープ、スズ化合物を使わない船底防汚材料、金属薄膜を使わない無反射フィルム、色材を用いない発色繊維などが開発されている。これらの発見は、博物学と呼ばれる自然史学や分類学とナノテクノロジーの連携によってなされたものである。ナノテクノロジーの世界的な発展とその成果によって、走査電子顕微鏡SEMの性能は向上し、広く普及した。それまでニッチであった生物の「サブセルラー・サイズ構造」のミクロ構造が明らかにされたのである。生物学者や分類学者が明らかにした生物の持つ表面階層構造をヒントにして、材料ナノテクノロジーの研究者が類似の構造を人工的に製造し、その構造に起因した機能を人工的に発現させようとする研究が欧州、とりわけドイツと英国から生み出された。材料科学の成果は、生物学にフィードバックされ、ここに生物学と工学のwin-winの共同研究のループができ上がったのである(図1)。

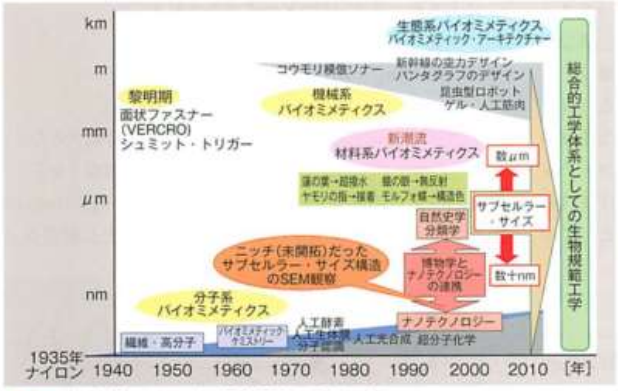


図1　バイオミメティクス研究開発のトレンド

図2　バイオミメティクス研究開発の現代的意義
蓮の葉は超撥水性を示す。蓮の葉の表面は、ワックスを分泌するとともに、細胞よりも小さな凸凹がある。マイクロメーターよりも小さな表面凸凹構造は撥水性を高めることが知られており、蓮の葉の超撥水性は、フッ素コーティングとは異なる機構で発現されている。数十km先の山火事を感知できるナガヒラタタマムシは、センサ細胞内の液体が熱膨張することを利用して高感度センシングを達成しており、化合物半導体を使った高感度温度センサとは機構が異なる(特集扉ページ参照)。

バイオミメティクス研究の意義

技術とは、自然に働きかけ、利用して生き残る術であり、人間にもまた生物にも、それぞれの「技術体系」がある(図2)。やや極端な言い方をすると、産業革命やIT革命以来、人間の技術体系は、化石資源や原子力をエネルギー源とし、鉄、アルミ、シリコン、そして希少元素などを原料として、高温、高圧条件やリソグラフィを駆使してモノを作り、情報や価値を生み出してきた。一方、植物や動物は、太陽光や化学エネルギーを用いて、炭素を中心とするユビキタス元素(CHOPINS：Iはinorganicの意)を主として、常温、常圧で分子集合や自己組織化によって、場合によっては時間を掛けながらモノを作る「生物の技術体系」とも言うべき仕組みを持っている。地球環境の持続可能性の観点からすると、生物の技術体系は低環境負荷である。高炭素社会による完全な炭素循環が達成されているのだ。40億年をかけた生物の進化適応は、壮大なるコンビナトリアル・ケミストリーであり、生物の多様性はその結果なのである。

今、世界が改めてバイオミメティクス、バイオミミクリーに注目する理由は何であろうか。それは、既存の工学体系だけに依存することから脱却するために、生物の生き残り戦略の結果である「生物の多様性」に学び、「人間の叡智」を組み合わせることで、「新しいパラダイムに基づく技術革新」に基づく「低環境負荷技術体系」を構築することにある。バイオミメティクスがもたらすパラダイムシフトと、バイオミミクリーが問う持続可能性への寄与を統合し、技術革新をもたらす総合的なバイオミメティック・エンジニアリングとしての生物規範工学の体系化が急がれる。

日本企業の研究開発の現況：「材料・素材」分野
構造発色繊維とフィルム

帝人(株) 構造解析センター 形態構造解析グループリーダー 広瀬 治子

バイオミメティクスによって発明・製品化を実現する方法として、生物の形態や仕組みを学んで技術・製品にすることを「バイオロジープッシュ」、技術のうえで問題が生じ、その問題解決策を生物に求めることを「テクノロジープル」といい、このためには異分野連携、異なる専門家の協力が必要となっている。構造発色繊維は、このテクノロジープルによって生まれた繊維である。日産自動車(株)でのマーケティングの結果、魅力的な色材の開発が必要となり、このためにアマゾンのモルフォチョウを研究して製品化を目指した。1995年に、日産自動車(株)、田中貴金属工業(株)、帝人(株)で製品としてのモノづくりがスタートした[1]。

モルフォチョウの翅の構造

オスのモルフォ蝶の翅表面には、約50μm×約200μm×約4μmの鱗粉(りんぷん)があり、その鱗粉は、リッジとラメラの積層構造からなっていた。ラメラは屈折率1.4～1.5の厚さ70～80nmのタンパクからなり、ラメラとラメラの間には空気層が存在することになる。空気の層は、屈折率1.0で140～160nm厚であり、ラメラと空気層を足すと約17層構造であった(図1)。

構造発色のメカニズム

複数の波が重なり、新たな波ができたり、打ち消し合ったりすることを干渉といい、波が強め合う干渉と弱め合う干渉がある。光が屈折率の高い薄膜を通る時、ある波長の光が強め合い、ある波長の光が弱め合う干渉を生じて目に入射される(図2)。この時、図3に示した薄膜干渉理論から、反射波長λ(目に入る色)と、反射率R(目に入る光の強度)は以下の式で表される。

$$\lambda = 2\,(n_1 d_1 \cos\theta_1 + n_2 d_2 \cos\theta_2) \cdots ①$$

$$R = (n_1 - n_1)^2 / (n_2 + n_2)^2 \cdots ②$$

(n：屈折率　d：層厚　θ：屈折角)

干渉発色効果は$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda / 4$の時最大となり、2つのポリマーの屈折率差が大きいほど発色は強くなる[2]。モルフォ蝶の翅は約70nmのタンパク層と約140nmの空気層とが多層構造を作り、θを0とすると反射波長は

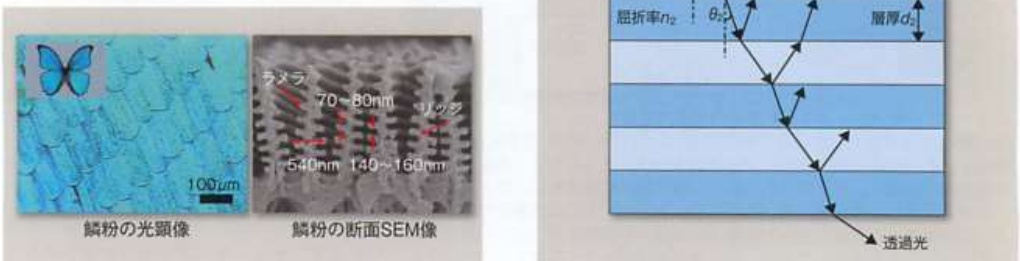


図1 モルフォ蝶の翅のOM像とSEM像

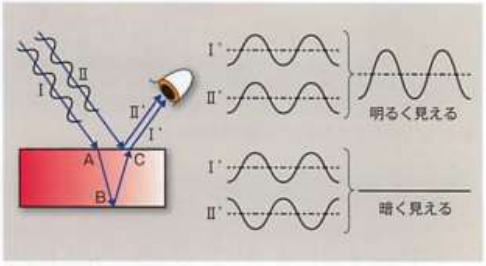


図2 干渉のメカニズム

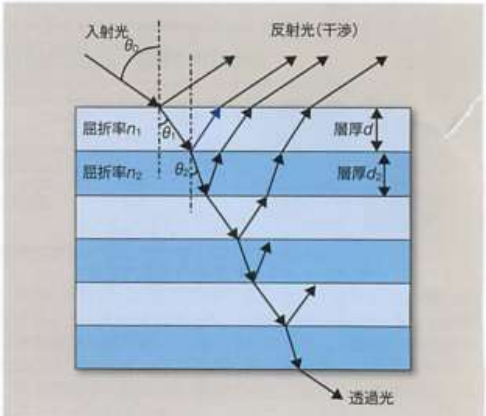


図3 薄膜干渉理論

約490nmとなり、青い光を反射することになる。染料や顔料ではなく、構造によって発色することを構造色という。

構造発色繊維

構造発色のメカニズムの解明から、屈折率の異なる2種類のポリマーを張り合わせることで発色させることが可能であると予測された。ポリマーの選択として、2種類のポリマーの屈折率差が大きいこと、2種類のポリマーが界面で剥離しないこと、繊維として耐久性があり強伸度を持つことなどの条件を満たすポリマーとして、高屈折率のPETと低屈折率のNylonを選択した。しかし、PETとNylonの屈折率差はわずか0.05で、モルフォ蝶の屈折率差0.5には大きく及ばず、積層数を61層にして繊維断面を扁平にし、層厚を70～100nmにコントロールし、発色させることに成功した(図4)。また、層厚を変えて色調を作り、引張強度は3～4cN/dtexで、150℃での乾熱収縮率を4%以下にすることで発色品質の安定化を実現した。そのほか口金の設計、直接延伸方式の確立によりスケールアップして生産に至った。

構造発色フィルム

自動車や電子・電気機器の外装材には、軽量で複雑な三次元形状成型が容易な高分子が多く用いられているが、近年差別化を図るためにその意匠性の向上が求められている。モルフォ蝶の発色メカニズムを模倣して、屈折率の異なる2種類の樹脂を約100nmの層厚で、数百層交互に積層することによって光学干渉効果を使った構造発色による超多層フィルムを開発した(図5)。2種類のポリエステル樹脂は、それぞれ別の押出機で溶融され、溶融状態で積層された樹脂はシート状に押し出され、クエンチドラムで急冷される。その後、Tg以上の温度で縦・横に逐次2軸延伸され、オーブン内で熱固定される。層厚を変えることで、青・緑・赤の反射色を作り出した。このフィルムに印刷を組み合わせたり、インサート成型によって部位による厚さを変化させることで、場所によって色合いを変化させてキラキラと光って見えるようにして、特異な意匠を表現することができる[3]。

今後の展開

我が社では、今回紹介した製品のほかに、蓮の葉や蛾の目などを模倣した製品を作っているが、バイオミメティクスによる発明・製品化には、多様な専門家間の強い協力が不可欠である。生物学情報と工学的情報を結びつける画像データと知識創造のプラットフォームにより、チームジャパンとして新たな製品開発を進めていきたい。

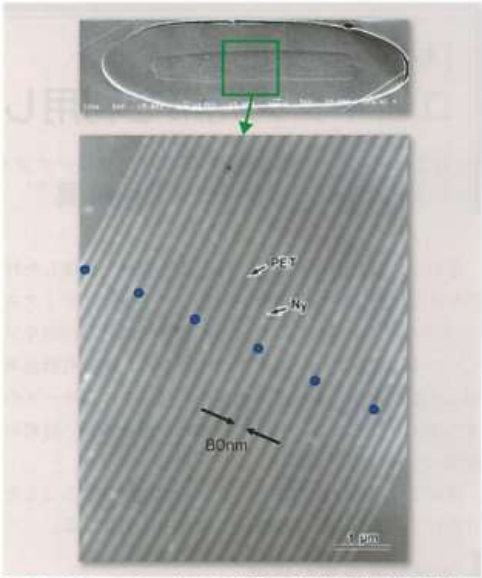


図4　モルフォテックス®の断面SEM像(上)と部分拡大TEM像(下)

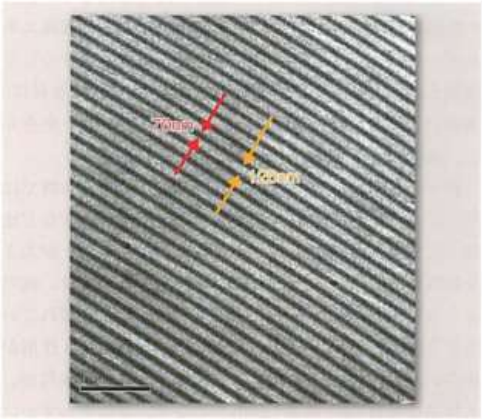


図5　超多層フィルムの断面TEM像

◆参考文献◆

(1)広瀬治子：高分子，Vol.60，No.5，p.298，2011
(2)J.A.Radford, et al.：Polym.Eng.Sci., Vol.13，No.3，p.216，1973
(3)小山松淳：プラスチックスエージ，p.54，2011

「材料・素材」分野
ユビキタス元素を利用した撥液表面／材料の開発

独立行政法人 産業技術総合研究所　サステナブルマテリアル研究部門
※1 研究グループ長　※2 研究員　穂積 篤※1　浦田 千尋※2

蓮の葉の驚異的な撥水性、自己洗浄機能を模倣した材料や表面処理に関する研究が最近のバイオミメティクス（生物模倣技術）ブームにも乗って世界的に再び活況を呈している。最近では、撥水性だけでなく、油や有機溶剤のような低表面エネルギー液体や、血液やマヨネーズのようなエマルションに対しても有効な撥液表面／材料の開発に注目が集まっている。

本稿では、様々な液体をスムーズに滑落させることを可能にする新しい撥液処理技術について紹介する。

高滑落性表面の特徴

最近の撥液処理は２つの手法に大別することができる。蓮の葉を模倣した従来の超撥水処理と同じく、表面の微細構造化と長鎖有機フッ素化合物による低表面エネルギー化により、見かけの接触角を極限まで大きくして液滴と固体表面の接触面積を小さくする手法と、反対に、表面は平滑なまま液滴と固体表面の相互作用を小さくし、液滴の滑落性を向上させる手法である[1]~[4]。

我々の技術は後者に属し、長鎖有機フッ素化合物ではなく、ユビキタス元素（具体的には炭素やケイ素など地球上に豊富に存在し無害な元素）を利用することが大きな特徴である[1]~[4]。そのため、我々の表面では、油のような低表面エネルギー液体は一見べったりと濡れているように見える。しかし、液滴と固体表面の相互作用が小さいため、接触角ヒステリシス（$\Delta\theta$、前進接触角（θ_A）と後退接触角（θ_R）の差）が小さくなり、基板をわずかに傾けるだけで液滴はテールを引くことなくスムーズに滑落していく。また、処理表面は極めて平滑なため、基材の光学特性や意匠性に影響を及ぼさないという利点がある。

開発した高滑落性表面

我々は最近、これまで撥水性／親油性であると信じられてきたアルキル基終端有機シラン（$C_nH_{2n+1}Si(OC_2H_5)_3$）、n=1-18）に tetramethoxysilane（TMOS：$Si(OCH_3)_4$）を加えて作製したハイブリッド皮膜表面が、様々な低表面エネルギー液体に対して優れた滑液性を示すことを見出した[1]。

表１に示すように、同じ原料（n=10）を用いたにも関わらず、「ナノスペーサー」として機能する TMOS を加え、表面の官能基密度を制御するだけで低表面エネルギー液体の滑落性が著しく向上することが分かる。また、低表面エネルギー液体の動的挙動は、用いるアルキル基終端有機シランの鎖長に依存することも確かめている。鎖長が長くなるに従い（n>12）、皮膜にクラックが発生するとともに、官能基間の相互作用が大きくなり、官能基の運動性が低下するため滑落性が著しく低下する。反対に、鎖長が最も短いメチルトリエトキシシラン（n=1）

表１　各種液体に対する動的接触角（θ_A/θ_R）、接触角ヒステリシス（$\Delta\theta=\theta_A-\theta_R$）、転落角（$\theta_T$、5μL）：$C_{10}$ ハイブリッド皮膜（膜厚：700nm、上段）、C_{10} 単分子膜（膜厚：1nm、下段）

プローブ液体	表面張力 [dyn/cm]	θ_A/θ_R [°/°]	$\Delta\theta$ [°]	θ_T [°]
水	72.8	109/100 109/86	9 23	40 90
ジヨードメタン	50.8	73/71 65/59	2 6	6.2 27
オレイン酸	32.8	52/47 42/27	5 15	9.0 57
大豆油	31.3	52/47 45/27	5 18	11 54
トルエン	28.4	37/36 23/14	1 9	2.5 26
p-キシレン	28.3	39/37 25/14	2 11	3.2 18
n-ヘキサデカン	27.5	36/34 21/8	2 13	3.4 21
テルペン油	27.0	31/31 16/<5	0 —	2.7 —
n-ドデカン	25.4	27/25 7/<5	2 —	2.5 —
n-デカン	23.8	21/20 <5/<5	1 —	2.4 —
エタノール	22.1	29/25 <5/<5	4 —	8.8 —

のみを原料に用いて作製したハイブリッド皮膜は平滑かつ透明で、*n*-ヘキサデカンに対する接触角ヒステリシスは小さく（θ_A/θ_R=36°/30°、$\Delta\theta$=6°）、転落角（θ_T）は8.4°であった。この皮膜の大気中における耐熱性を調べたところ、350℃で24時間以上加熱しても皮膜の撥油性は変化しないことが分かった（図1）。これは、撥液成分であるメチルシリル基（CH_3-Si）が高温下でも変化しないためである[2]。

我々はまた、離漿（ゲル化構造から液体が押し出される現象）に着目し、撥液成分を自己分泌する機能を持った新しい撥液材料を開発した。ゲルマトリックスの中に各種直鎖状アルカン（C_mH_{2m+2}、m=10、12、14、16）を添加して作製した透明オルガノゲルはm=16の場合のみアルカンが離漿する。この表面に、ケチャップやマヨネーズなどの粘性液体を滴下したところ、オルガノゲル表面をスムーズに滑落した（図2（b））。一方、離漿しないオルガノゲル表面（m=14）では、これらの粘性液体は表面に付着したままであった（図2（a））。これは、離漿によりオルガノゲル表面に油膜が形成し、ゲル表面と粘性液体との相互作用が抑制されたためと考えられる。オルガノゲルの離漿現象を利用し、生物の分泌機能を人工的に再現することで、滑落性に優れた撥液表面を作製することが可能となった。

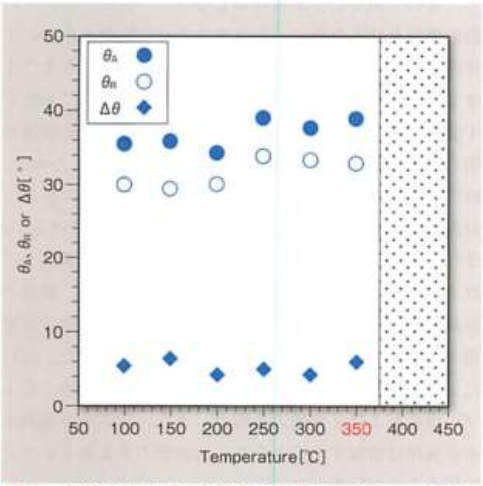


図1　各温度における耐熱試験24時間後のC_1ハイブリッド皮膜の動的接触角（θ_A/θ_R）と接触角ヒステリシス（$\Delta\theta=\theta_A-\theta_R$）の変化　（ハッチ部位：測定不能）

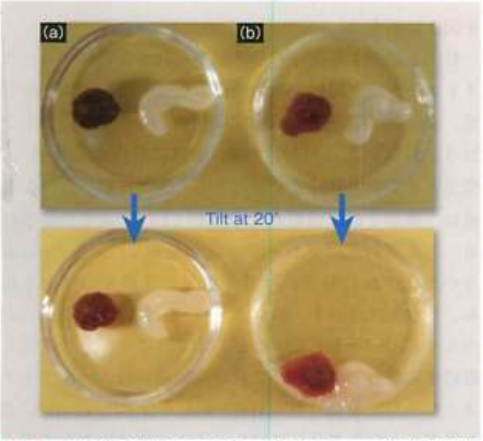


図2　オルガノゲルのマヨネーズとケチャップに対する撥液性　(a)m=14（離漿なし）　(b)m=16のアルカンを用いた場合（離漿あり）

今後に向けて

微細構造や長鎖有機フッ素化合物を用いることなく、水、低表面エネルギー液体（含む高温油）、エマルションなどに対して優れた滑落性を示す撥液表面／材料について、我々の最近の研究事例を紹介した。

生物は「ユビキタス元素」を利用して、常温・常圧という極めて温和な環境下で優れた機能材料をいとも簡単に作り上げている。この生物の究極のモノ作りに倣い、そこに人類の叡智を加えることで、コストだけではなく、現在の社会が抱えている資源、エネルギー、環境問題を解決し、持続可能性社会を実現することが可能になるであろう。この分野は、まだまだ無限の可能性を秘めている。

なお、本研究の一部は科研費24120005の助成を受けて行われた。

◆参考文献◆

(1) C. Urata, B. Masheder, D. F. Cheng, A. Hozumi: "How to reduce resistance to movement of alkane liquid drops across tilted surfaces without relying on surface roughening and perfluorination", Langmuir, 28, 17681-17689, 2012

(2) C. Urata, B. Masheder, D. F. Cheng, A. Hozumi: "A thermally stable, durable and temperature-dependent oleophobic surface of a polymethylsilsesquioxane film", Chem. Commun., 49, 3318-3320, 2013

(3) D. F. Cheng, C. Urata, M. Yagihashi, A. Hozumi: Statically Oleophilic, but Dynamically Oleophobic Smooth Nonperfluorinated Surface, Angew. Chem. Int. Ed., 51, 2956, 2012

(4) D. F. Cheng, C. Urata, B. Masheder, A. Hozumi: A Physical Approach to Specifically Improve the Mobility of Alkane Liquid Drops, J. Am. Chem. Soc., 134, 10191, 2012

「機械・ロボット」分野
MEMSへの応用

東洋大学　理工学部　生体医工学科　教授　望月　修

生活習慣病治療の経過モニタリングや日頃の健康チェックを継続的に行うには、

① 病院に頻繁に行く必要がないこと
② 1日のうちに何時に検査しなければならないとか、薬を飲まなければならない、などといった時間を気にすることがないこと
③ 苦痛を伴わない非侵襲であること

などが必要である。このために各自が携帯できる健康検査用機器の小型化が重要である。

例えば、血液検査装置を作ることを考えてみよう。この装置に要求される機能は、①血液採取、②血液検査、③病院との通信である。血液採取には注射器で吸い取るような機構（アクチュエータ）が、また検査のためには、LED光を使った光学系と情報処理コンピュータが必要である。病院との通信のためのネットワーク環境の整備も重要である。この装置自身がある程度判断して作動することで、人がこれまで行っていた部分、例えば病院に通うといったことを補完できる。

これらの機能を持たせれば、この装置はいわゆる医療検査ロボットと言える。ただし、この装置全体の大きさを腕時計程度にしなければ、患者にとって負担となる。コンピュータや通信回路といった部分はすでにマイクロスケールである。今はまだ小さくできていない部分は、注射器とピストンを動かすためのアクチュエータ部分である。これを何とかしなければ、要求される事柄を達成できない。

蚊の吸血メカニズム

そこで我々は、蚊の吸血機構に着目したのである。吸血には針、ポンプ、ストレージがセットになっているはずである。まず、それらの構造、機能、位置を解剖することにした。具体的には、パラフィンで固めた蚊を0.5μmの厚さの切片に切り、それらを1枚ごとに染色した後、画像データとしてコンピュータに取り込み、それらを再構築して三次元構造データを取得した。つまり、蚊の体内をあらゆる角度から見えるようにした。

この結果、ポンプの構造は2つの部屋が直列につながったものであることが明らかとなった。次に、ポンプの動的機能を見るために、シンクロトロン放射光を用いて体内を透過し、いわゆるX線撮影のように、生きたままで吸血する際のポンプ運動を観察した。ポンプを動かす筋肉の動きも生体電位計測し、ポンプ運動との関連を明らかにした。また、ポンプの性能を評価するために、針内の流動測定を、共焦点顕微鏡を用いたマイクロPIV計測により行った。蚊は満腹になるまで吸い続けるが、それに要する時間は3分弱である。これでは顕微鏡下に蚊をセットするだけで時間が経ってしまうので、満腹中枢神経を取り除き、ストレージの後、端に穴を開ける施術をすることにより、実験計測中血を吸い続けた。これにより計測ができるようになり、針の摩擦抵抗値、ポンプの構造および必要動力を得た。また、針の中を通過する赤血球は溶血することなく、元の形のままストレージに届くことが分かった。

血液検査装置の開発研究

以上の結果から得た血液検査用マイクロ装置の概念図を図1に示す。

針内を通過する血球の形体検査を行うためにフローサイトメーターと同様の光学系を組むことで、赤血球変形能、血球数、凝集能や細胞性局在タンパクなどの検出を行う。針開面から照射されたLEDは針内部を透過し、受光素子でその散乱光を検出する。腹部に溜められた血液は、腹部下部に設置した多波長LEDにより照明される。その反射光はグレーティングを通し、MEMSにより小型化された分光光度計で微量血液検査に使用される。ヘマトクリット、コレステロール値、グルコースレベルやCRP（炎症反応）など、オンサイトで生体情報を取得することができる。これら検出結果は、内部データストレージに蓄積され、WiFiもしくはBluetoothにより外部へと転送され、リアルタイムの血液検査を実現する。蚊本体を含む計測モジュールは、絆創膏のように皮膚へ貼付することで、無痛で採血を行うだけでなく、モ

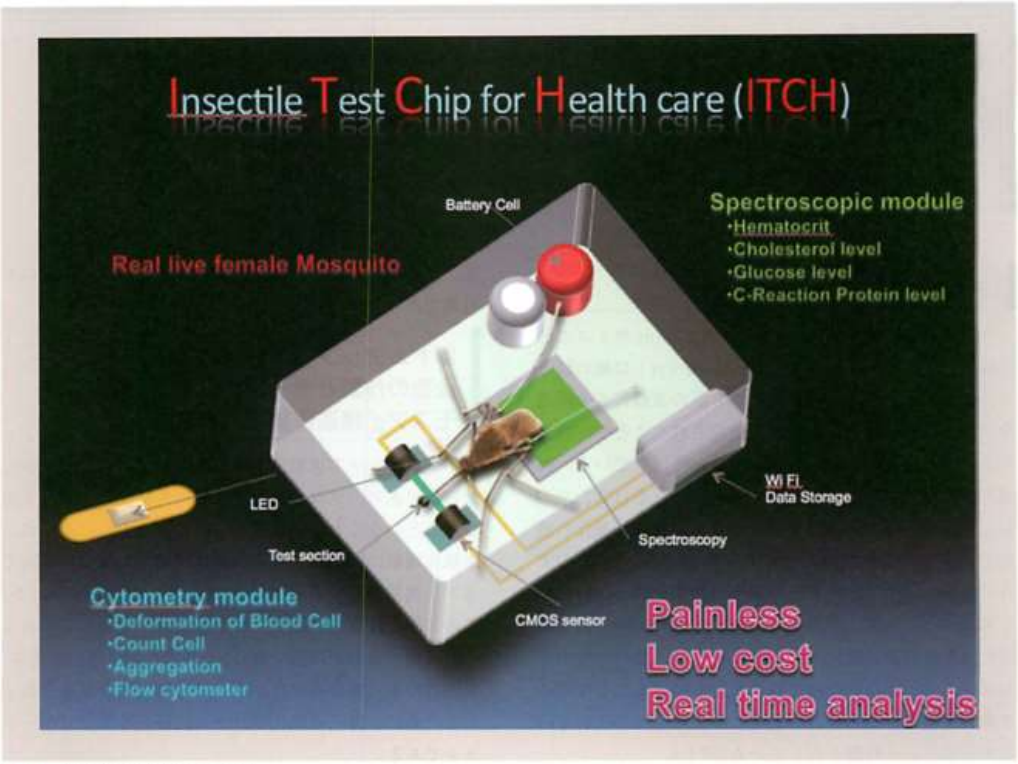


図1　血液検査装置イメージ図

ジュール底面の抗ヒスタミン系塗薬により使用感をさらに向上させる。

この装置には、アクチュエータや回路を動かす動力源である電池が必要である。これも装置全体に対して大きな容積と重さを占める。将来的には、この部分も代替エネルギーとしたい。そのために、我々は植物の吸水機構について調べている。なぜなら機械的動作を伴わずに吸血できれば、その部分の機構を省略できるからである。現在、根のポンプ作用に着目して研究を行っている最中である。

米国における人工複眼の研究

センシングのためのマイクロレンズアレイに昆虫の複眼を応用しようとする研究がある（図2）。マイクロレンズアレイはMEMS技術でできるであろう。また、それらのレンズからの情報はディテクターアレイに集光すればよいが、平面ではなく球面状に配置しないとレンズとの距離が等しくならない。そのあたりが難しい技術となるであろう。この複眼レンズができれば、立体的に180°以上の範囲をカバーできるようになる点で利用価値は高い。これをカプセル型内視鏡に組み込むことで見逃しのない検査が可能となるであろう。

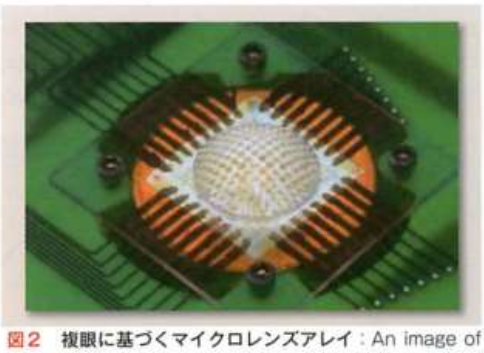


図2　**複眼に基づくマイクロレンズアレイ**：An image of the experimental camera built to mimic the eyes of arthropods. Credit John Rogers, University of Illinois at Urbana-Champaign.

「家電」分野

蛾の目を模倣したスーパー反射防止フィルム

三菱レイヨン(株) フェロー 魚津 吉弘

モスアイ反射防止構造

モスアイ構造とは、図1に示す数100nmサイズの凹凸構造のことである。モスアイ(Moth-eye)は蛾の眼ということであるが、実は多くの蝶も眼の表面にこの構造を有している。蛾の眼で最初に確認されたことや、語呂がよいことなどから、モスアイ構造と呼ばれている。外部からの反射を防止することで外敵に存在を目立たなくしたり、外光を有効に取り込んだりするために進化の過程で形成されてきたものと考えられている[1]。このように、表面にナノオーダーの微細な曲率を持った錘状体を形成することで、空気との接面から基材との界面まで屈折率を連続的に変化させることにより、屈折率界面を形成することがないために界面反射も防げることで極めて低い反射率、ならびに可視光の波長域全域の反射を防止できるという特徴を有している(図1)。

従来、この構造は、レーザー光の干渉露光や電子線描画といったトップダウンの方式により金型を作製し、その金型を用いてナノインプリントの手法で作製されていた[2]。しかし、これらのトップダウンの方式では超大面積の加工や曲面上への加工は困難であり、超大面積の加工に必須の継ぎ目のない大型のロール金型の作製は不可能であった。

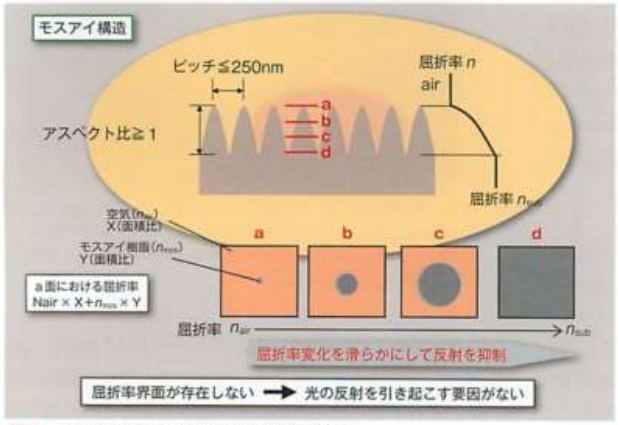


図1 モスアイ構造と無反射性となる理由

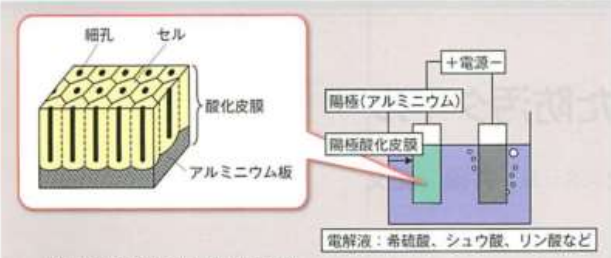
ボトムアッププロセスによる大型ロール金型の作製と光インプリントによるモスアイ構造作製プロセス

ボトムアップの思想である自己組織化現象は大面積化が容易であり、プロセス化する際にも簡便な装置で実現できるということで注目されている。ただし、この自己組織化現象には作製される組織化構造が完璧には制御できず、欠陥が必ず存在するという欠点が存在している。この欠陥を許容しうるアプリケーションに対してのみ自己組織化の適用が可能である。モスアイ反射防止構造は、規則性の中に多少の欠点があっても無反射を保証されているために、自己組織化プロセスに好適なアプリケーションである。

アルミニウムを酸性電解液中で陽極酸化すると、表面にポーラスアルミナと呼称される多孔性の酸化被膜が形成される。この酸化被膜は、アルミニウムに耐食性を付与するための表面処理として古くから用いられてきた[3]。その構造は、セルと呼ばれる一定サイズの円柱状の構造体が細密充填した構造となっている(図2)。各セルの中心には、セルサイズの約1/3の均一な径の細孔が配置しており、各細孔が膜面に垂直に配向して配列している。また、セルのサイズ(細孔の間隔)は陽極酸化の際の電圧に比例し、細孔間隔を10～500nm程度の範囲で制御することが可能である[4]~[6]。各細孔の径は、細孔間隔に比較してかなり小さいものである。

テーパー形状のモスアイ金型は、アルミニウムの陽極酸化と形成した細孔をエッチングにより拡大する処理を複数回繰り返すことで形成される[7]。

モスアイ型反射防止フィルムは、図3のように光ナノインプリントにより作製される。



自己規制化配列する電圧とセルサイズ

	印加電圧[V]	セルサイズ[nm]
硫酸	25	63
シュウ酸	40	100
リン酸	195	500

250 nm以下のピッチを製作するにはシュウ酸電解液が適している

図2　ポーラスアルミナとその作製方法

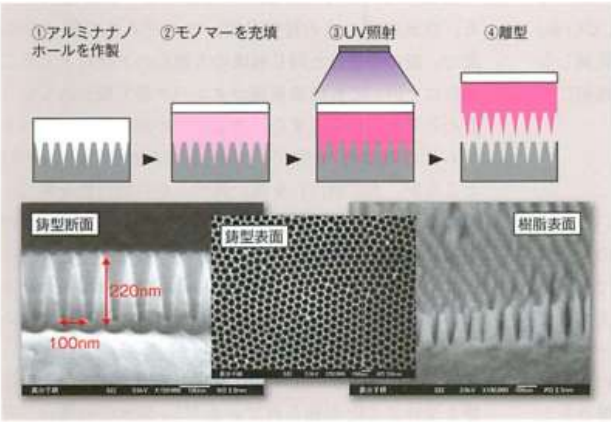


図3　モスアイ型反射防止フィルム作製プロセスの模式図

まず、モスアイ金型に光硬化性樹脂を充填し、PETなどの透明な基材フィルムを被せる。次に、基材フィルム側からUV光を照射し、光硬化性樹脂を硬化させる。最後に、基材フィルムと一体化した形状を付与した樹脂を鋳型から剥離することにより、モスアイ型反射防止フィルムが作製される。図3の下側の写真は、それぞれSEM写真であり、左は作製したモスアイ金型の断面の写真であり、中央がその表面の写真である。多くの欠陥点は存在するが、直径約100nmのテーパー状の細孔がきれいに配列した形状となっている。また、右は形成したモスアイフィルムの写真である。モスアイ金型の形状が、きれいに転写されていることが確認できる。

近年、神奈川技術アカデミーの益田プロジェクトと三菱レイヨンの研究グループでは、大型のアルミニウムロールを用いて、継ぎ目のないモスアイロール金型を作製し、このロール金型で連続的に樹脂フィルム上にモスアイ構造をナノインプリントにより形成することに成功している。

モスアイ反射防止構造の特性

樹脂板の両面に反射防止フィルムを貼り付け、蛍光灯の映り込みの確認を行った。従来の二層タイプの反射防止フィルムを貼り付けた樹脂板では蛍灯の映り込みがはっきりと見えたのに対し、モスアイフィルムを貼った樹脂板では映り込みはほぼ確認できなかった。

標準的な5度の角度を持たせた正反射を測定する方法により反射率の測定を行った。市販品の一般的なARフィルムは、視感度の最も高い570nm付近の反射を選択的に防止するような特性を有している。それに対し、モスアイフィルムは570nm付近も含め可視光域全域において、反射率が0.5%以下と非常に小さい値となっている。また、入射角度が50度の光に対してまで低い反射率となっている。

◇　◇　◇

アルミナナノホールアレイが大面積に、しかも曲面に形成できるという特性を利用して、アルミニウムのロールへの陽極酸化を行い、大型のロール鋳型を作製し、このロール鋳型を用いて連続的に樹脂フィルム上にモスアイ構造をナノインプリントにより形成できることが確認されており、大面積・低コストモスアイフィルムの工業化の実現が期待されている。

◆参考文献◆

(1) P. B. Clapham, M. C. Hultley : Nature, 244, 281, 1973
(2) 都市エリア産学官連携促進事業，大阪／和泉エリア，光ナノ構造創生技術の研究開発拠点／光ナノ構造創生技術の産学官連携拠点，成果育成事業A，表面無反射構造作製技術の開発 http://www.ostec.or.jp/tec/area/index2.html
(3) H. Masuda, K. Fukuda : Science, 268, 1466, 1995
(4) H. Masuda, M. Yotsuya, M. Asano, K. Nishio, M. Nakao, A. Yokoo, T.Tamamura : Appl. Phys. Lett., 78, 826, 2001
(5) T. Yanagishita, K. Nishio, H. Masuda : Jpn. J. Appl. Phys., 45, L804, 2006
(6) T. Yanagishita, K. Nishio, H. Masuda : J. Vac. Sci. B, 25, L35, 2007
(7) T. Yanagishita, K. Yasui, T. Kondo, K. Kawamoto, K. Nishio, H. Masuda : Chem. Lett., 36, 530, 2007

「建材」分野
ナノ親水技術を用いた防汚タイル

(株)LIXIL 技術研究本部 分析・評価センター長 井須 紀文

地球環境への負荷低減と商品価値の向上を同時に実現するためには、「つくる」「つかう」「もどす」の各段階で環境負荷を下げながら、同時に、人にとって新しい価値を生み出す「人と地球を考えたものづくり」を目指す必要があると考えている。その1つのヒントは、自然が長時間かけて作り上げた生物や地球にある。生命は、環境中に比較的豊富に存在する元素を省資源、省エネルギーで非常にうまく利用し、循環する機構を産み出している。

本稿では、カタツムリから学び、環境負荷を低減しながら、人にとっての価値を上げた住空間の防汚技術について述べる。

カタツムリと住宅

生命が誕生したのは約38億年前と考えられているが、一気に多様な生物が出現したのは約5.4億年前のカンブリア紀初頭であり、この頃にカタツムリの祖先である原始単殻類など硬い殻を持つ生物も出現したと考えられている。生物が鉱物を生成するバイオミネラリゼーションは、有機物が関与する常温常圧下での溶液からの析出反応が特徴であり[1]、生体硬組織には主にリン酸カルシウムと炭酸カルシウムが利用されている。カタツムリの殻はアラゴナイトとタンパク質の複合体であり、最上部の殻皮層と3層の石灰質層（棱柱層、層板層、真珠層）からなる。石灰層は、アラゴナイトがタンパク質マトリックスで囲まれているが、殻皮は硬タンパクだけからなる[1],[2]。カタツムリの殻の主成分であるアラゴナイトは$CaCO_3$の高圧相であるが、常圧下でいとも簡単に作られている。結晶化には、タンパク質を構成するアスパラギン酸のCOO-基、硫酸含有糖タンパク質のSO_3-基が重要な役割を果たすと考えられている[2]。また、殻の形成には、海水中であれば豊富に溶けているカルシウムを容易に利用することができるが、陸生の貝であるカタツムリは、効率よく経口摂食する必要がある。そのためか、殻の厚さ薄いが、一方で移動のためのエネルギーを下げることができる。

このようにカタツムリは省資源、省エネルギーなプロセスで彼らの住宅である殻を作っている。さらに、カタツムリの殻表面には、住宅にとって重要なメンテナンスに関する工夫が施されている。

カタツムリの防汚技術

表面の汚れ難さを評価する指標の1つに接触角がある。空気中での水の接触角は、カタツムリの殻は約80度で、殻の主成分と同じ組成の方解石の2倍以上と水に濡れにくい。これは殻表面がタンパク層で覆われているためと考えられる。また、空気中での油の接触角はカタツムリの殻は約10度で、方解石とほぼ同じ値を持つ。ところが、水で油汚れを洗い流せるかの防汚性を調べるため、水中での油接触角を測定した結果、カタツムリの殻には油滴が付着し難いことが分かった（図1）。このことは、カタツムリは水に濡れている状態では油汚れが非常に付着しにくく、また、油汚れが付着しても水で洗い流しやすいことを意味する。

濡れは固体表面の化学的な性質と表面の微細構造の影響を受けることが知られている[3]。親水性の場合、表面積増加率が高いほど、また、空隙が大きいほど、親水

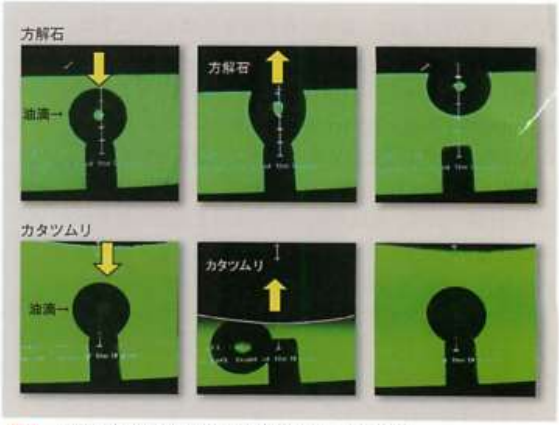


図1 水中での油接触角の測定（汚れやすさの評価）

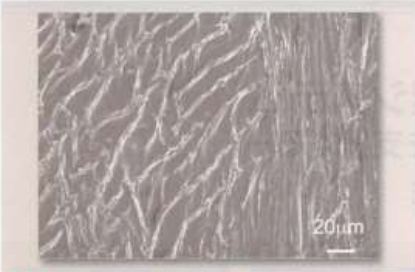


図2　カタツムリの殻表面の写真

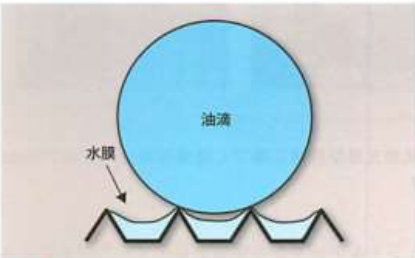


図3　カタツムリの汚れ防止メカニズム

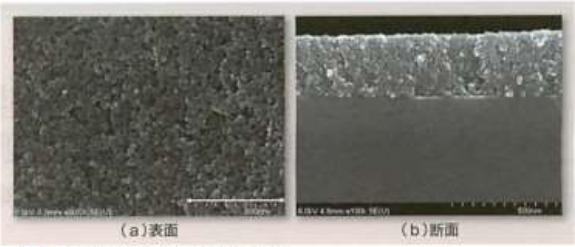


図4　防汚タイルの電子顕微鏡写真

図5　防汚タイルの曝露試験結果

性が増すことが知られている。殻表面の硬タンパク質層には、約0.5mm間隔の成長線、直交する約0.1mm間隔の溝、さらに約10μm間隔のしわが形成されている（図2）。このようなmmからμmオーダーの複合的な凹凸構造が表面積を増加させ、親水性を上げるとともに、しわが雨樋のように水を流しやすくなる効果を持つと考えられる（図3）。

ナノ親水防汚タイル

一般に、タイルは他素材に比べて適度な水濡れ性を示し、化学的に安定であることから、汚れにくい性質が長期間継続する[4]。しかし、都市部ではサッシなどを固定するシーリング材由来のオイル成分がタイルに付着して撥水状態となり、煤煙や排気ガスなどが付着する場合があるため、汚れを防ぐにはさらなる親水化が必要である。そこで、タイルよりも高い親水性を持つ数十nmサイズの球状ケイ酸化合物を用い、タイル表面にナノ親水層を形成した（図4）。高い表面積によって親水性が高くなるとともに、ナノスケールの凹凸に水が入り込み、汚れが落ちやすくなる。また、空気中の水分の吸着により静電気が起こりにくく、空気中の汚れ物質が付着しにくくなった[5]。たとえ汚れ物質が付着しても、降雨時にはタイル表面と汚れ物質の間に水が入り込んで流れ落ちやすくなる。目地部分にシリコーン系シーリング材を詰めた屋外曝露試験でも高い防汚効果を確認できた（図5）。この技術により、昼夜を問わず雨だけで汚れを落とし、メンテナンス（洗浄）を半減することができた。

◇　◇　◇

防汚技術は、掃除の手間から解放されるユーザーメリットとともに、節水による環境負荷低減を同時に実現するため、そのニーズは高く、トイレやキッチンなどの水周り製品についても防汚・抗菌処理技術開発が行われている[6]。カタツムリは身の周りにある元素をうまく利用し、常温常圧でいとも簡単に殻を作っている。今後は、「つくる」場面の技術も自然から学びたいと思っている。

◆参考文献◆

(1)長田義仁編：バイオミメティックスハンドブック，エヌティーエス，pp.983-986,2000
(2)内田亨，山田真弓編：動物系統分類学，第5巻下，軟体動物Ⅱ，pp.13-21，中山書店，1999
(3)岩澤康裕ほか監修：界面ハンドブック，エヌティーエス，pp.283-286，2001
(4)橘高義典：REFORM，Vol.3，p.21，1995
(5)内野正勝，渡辺修：工業材料，Vol.52，pp.40-44，2004
(6)井須紀文：溶接学会誌，Vol.78，pp.11-14，2009

「生物・博物・情報」分野

バイオミメティクス・画像検索システム

―生物の微細構造から材料開発の発想を支援する―

北海道大学大学院　情報科学研究科　教授　長谷山　美紀

バイオミメティクスは、生物の構造や機能、製造プロセスからものづくりの着想を得る新しい技術体系である。生物学と工学や医学などの分野が連携することで、持続可能な社会の実現に向けて、技術革新をもたらすものとして産業界から注目されている。一方で、異なる分野の連携には、互いの知識を習得する必要がある。特に、バイオミメティクスは生物の知識が必須であるが、その習得は生物の多様性ゆえに容易ではない。現在までにバイオミメティクスは優れた製品や技術を世の中に輩出してきたが、継続的にものづくりに新しい潮流を生み出し、次世代の持続可能な産業基盤を形成するには、生物に関わるものづくりのための情報を入手する仕組みが必要である。このような背景の下、発想支援型の画像検索理論に基づくバイオミメティクス・画像検索基盤が開発された。望む情報を入手するために検索エンジンを使うことは広く知られているが、生物データベースに含まれる大量の画像を活用するものづくりのための検索基盤を実現する試みは世界で初めてであり、日本発の技術とサービスの創出に向けて期待されている。

バイオミメティクスと画像データ

バイオミメティクス・画像検索基盤は、生物から取得されたデータを蓄積し、その中から、ものづくりに有益なデータを探し出すことを支援する検索基盤である。地球上の生命の歴史に培われた多様な生物から有益なデータを研究者個人の知識や労力を費やすことで収集するのは、生物形態の果てしのない多様性から大変困難である。また、どのようにしてバイオミメティクスに活用できるデータを収集するのかを考える時、膨大な多様性に関する標本と情報が蓄積されている博物館の協力を得ることが極めて効率的である。博物館が持つ生物に関する知識と顕微鏡により観察された表面構造画像が、ものづくりに有益な知見を与える可能性が現実のものとなってきた。

発想を支援する画像検索の研究

バイオミメティクスのみならず、近年、大量に蓄積されたディジタルデータから価値を見出すことが重要とされ、様々な研究が行われている。特に、画像や映像はその娯楽性から産業化も早く、すでにたくさんの検索サービスが利用されている[1]。既存の検索サービスは、コンテンツに付与されたメタデータにより行われている。このメタデータとして、撮像時に得られる情報（撮像日時や場所など）や、あらかじめ付与された撮像内容を表すキーワードが用いられている。日常の生活の一部となった検索サービスも適切にキーワードを選ぶことができなければ、必要な情報を入手することは難しい。

出典：野村周平、長谷山美紀：生物模倣技術と新材料・新製品への応用、第9章第5節、p.688 図5より転載

図1　発想支援型理論に基づく画像検索システム Image Vortex

この新たな課題に対して、大量のデータから必要な情報を発見するための可視化手法が提案されており、その代表的な手法として発想支援型画像検索が挙げられる[2]。発想支援型検索に基づき実現されたシステムが「Image Vortex」である。実現されたインタフェースを図1に示す。Image Vortex は、ユーザーが適切にキーワードを選ぶことができない場合でも、蓄積された大量の画像の中から希望する画像を効果的に獲得できるように画像を配置する。ユーザーは、この配置を通して、画像データベースの全体を俯瞰し、効率よく希望の画像に辿り着くことが可能となる。

ものづくりの発想を支援する「バイオミメティクス・画像検索基盤」

バイオミメティクスの異分野連携を支援するバイオミメティクス・画像検索基盤の試作システムが、Image

表1　図2(a)、(b)、(c)に示す画像の生物のインベントリ情報

	大分類	目	科	種和名	部位	体サイズ	倍率
(a)	昆虫	コウチュウ目	カミキリムシ科	エグリトラカミキリ	中脚(左脚)ふ節下面	14mm	×1,200
(b)	昆虫	コウチュウ目	ケシキスイ科	オオキマダラケシキスイ	中脚(左脚)ふ節下面	5mm	×1,800
(c)	昆虫	コウチュウ目	ゾウムシ科	ヤサイゾウムシ	中脚(左脚)ふ節下面	8mm	×1,400

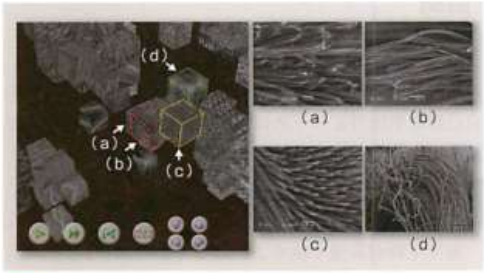


図2　バイオミメティクス・画像検索基盤のインタフェースとその検索結果

Vortexを基にして実現された。試作システムでは、検索対象となるデータベースにコウチュウ目のSEM画像125枚(国立科学博物館から提供)を用いた。検索の様子を図2に示す。図2では、類似した模様の画像が近傍に位置している様子が確認できる。さらに、画像中の模様が類似している3枚の画像(a)～(c)に注目する。各画像の情報を表1に示す。表1より、3つの画像の撮像対象は3種の甲虫の付節（脚部の先の接地部）の下面である。一方で、すべての画像において撮像された昆虫の科が異なるだけでなく、その体サイズは、(a)は(b)の約3倍、(c)の1.6倍となっている。撮像倍率は、各々、1,200倍、1,800倍と1,400倍であり、体サイズの差に比べて付節下部の形状の差は小さい。甲虫の付節は、その生息環境下で接地面に吸着と着脱を繰り返す部位である。甲虫を専門とする研究者と議論を行った際に、生息環境に適した毛構造を生成した結果、類似した形状を持ったのではないかとの意見が示された。

また、(d)は、国内繊維メーカーが開発した合成繊維の顕微鏡像である。この繊維は、優れた拭き取り性能が認められ、ワイピングクロスとして使用されている。1本ずつの繊維の様子が、長く滑らかなカーブを描いているものと折れ曲がっているものが混在していることが確認できる。この様子は、近傍に配置された(a)～(c)の甲虫の付節下面にも確認され、生物と材料という極めて異なる素材であっても、その表面構造が互いに類似していれば、検索が可能となることを示しており、異分野の知識連携によるイノベーション創出の可能性を示唆するものと考える。以上のように、バイオミメティクス・画像検索基盤を用いて、生物多様性を背景とした様々な構造の画像を検索することで、新材料の開発や新しいものづくりに気づきが期待できる。

図2に示す試作システムにさらに改良と高度化が施され、ネットワーク経由で検索が可能な環境が整備されている。利用者がパーソナルコンピュータとその上で動くWebブラウザ、インターネット接続環境などを用意すれば、自身の開発場所から検索サービスを利用することができる。検索基盤では、インベントリ情報の閲覧や検索結果のキーワードによる絞り込みも可能である。また、画像を質問とした検索を可能とする機能が備えられており、画像による画像の検索が可能である。この機能を用いることで、生物についての知識が少なく適切なキーワードを見つけられない場合でも、技術開発やものづくりの現場で得られた画像を質問として生物の情報を入手することができる。

◇　◇　◇

異なる研究分野に蓄積された大量のデータの背景には、分野に固有の貴重な知識が存在する。貴重な知識には、言語化されにくいものも多く、他者が利用するのは容易ではない。社会が解決を望む問題は複雑さを増し、問題の所在さえ見え難い現状で、個別の研究分野の研究者に知識がたまっていたのでは、解決の方策を見出すには限界がある。バイオミメティクスは、現在の社会が抱える問題を解決する試みと捉えることができる。知識の蓄積としての異分野データベースの連携を通して、産業の創出を支援する産学連携プラットフォームの実現が望まれる。

なお、本研究では 国立科学博物館動物研究部の野村周平研究主幹から提供いただいた画像を使用した。

◆参考文献◆

(1)長谷山美紀：画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース，電子情報通信学会誌，Vol.93，No.9，pp.764-769，2010
(2)M. Haseyama, T. Ogawa：Trial realization of human-centered multimedia navigation for video retrieval, International Journal of Human-Computer Interaction, Vol.29，No.2，pp.96-109，2013

「環境・エネルギー」分野

マグロの皮膚に学ぶ低燃費型船底防汚塗料

日本ペイントマリン(株) 技術本部 本部長 山盛 直樹

人類は自然界よりいろいろ学び、文明を発達させてきた。翼を広げて飛ぶ鳥が飛行機の誕生に結びついたことは否めないし、海洋においても、魚の形が船の形状に寄与したであろう。現在、海洋生物の動きを生物模倣したロボットの研究開発もなされている（図1）[1]。一方、海洋には魚類以外にも様々な生物が生息する。その中で、基盤に付着しないと生息できない生物（付着生物）がある。付着生物が海洋を航行する船舶に付着すると船舶の航行に支障を来たすし、これを防止するために様々な処理がなされてきた。

付着生物との知恵比べから生まれ、発展してきた船底防汚塗料

太古の昔より、人類は海との関わりの中で船を利用してきた。その当時から海中の付着生物には悩まされてきている。船底防汚塗料の技術は付着生物との知恵比べで発展してきた。19世紀になり、木造船から鋼鉄製の船に主役が移るに従い、これら付着生物を防止する目的の「船底防汚塗料」が開発されてきた。

初期の船底防汚塗料の組成は、海水に対し不活性なバインダーとなる樹脂に、生物付着を防止するための化合物(防汚剤)を混合したものを基本としていた。1970年代になると、自己研磨型船底防汚塗料(SPC：Self-Polishing Copolymer）が出現した。これは、樹脂が加水分解を受けて水溶性になり海水に溶出する。この作用で自己研磨性が発現し、常に塗膜表面が更新されることから長期間の防汚性能の維持を可能にした。低摩擦型塗料は、この自己研磨型塗料をベースに低摩擦機能を付与した塗料である。

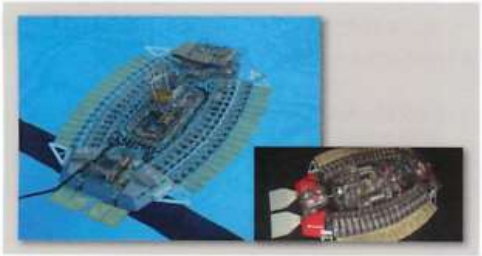


図1 イカを模倣した水中ロボット

生物の知恵に学ぶ低摩擦塗料

海洋生物が高速で泳ぐことは早くから知られ[2],[3]、イルカなどの哺乳類、マグロやカジキなどの魚類は、進化の過程でより速く、より効率的に少ないエネルギーで遊泳する方法を獲得してきた。より速く、より効率的に泳ぐことができれば、無駄なエネルギー消費を抑制することができる。この生物が進化の過程で身につけた知恵を塗料に応用できれば画期的な低摩擦塗料が実現できる。

マグロやカジキなどの大型の魚類の瞬間的な速度は、時速100kmを超えるとも言われている。このような高速で海水中を遊泳するためには、これら魚類に流線型の

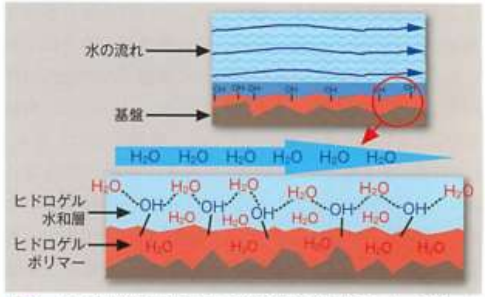


図2 ヒドロゲル構造による摩擦抵抗低減のイメージ図

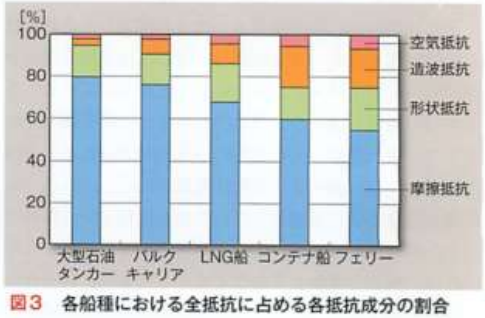


図3 各船種における全抵抗に占める各抵抗成分の割合

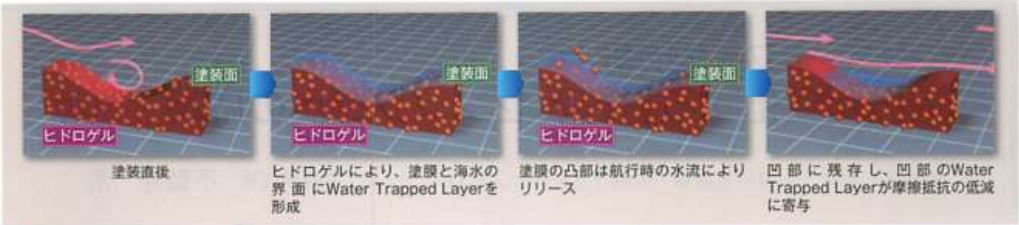


図4　ヒドロゲル技術を用いた低摩擦塗料の概念

体系や、推進力の源となる筋肉の生理的なメカニズムが大きく関与しているが、さらに体表の表面状態や表面に存在する物質が、摩擦抵抗を低減している可能性も考えられる。このような粘液状の物質は、粘性のある糖や蛋白質の複合体で、水と非常に親和性の高い化合物であると考えられる。我々は、これらの生物からヒント（バイオミメティック：生物模倣）を得て（図2）、水と新和性の高いヒドロゲル技術を用いた摩擦抵抗を低減する船底防汚塗料を開発した。この摩擦抵抗を低減することは、船舶の燃料消費の低減、排出される炭酸ガスの削減につながることから、この摩擦抵抗を低減しようという試みが以前から行われてきた[1]。

船舶が海洋を航行する際に種々の抵抗を受けるが、そのうち海水と接する船底部分の摩擦抵抗の割合が最も大きく、船舶が受ける全抵抗の50～80%程度を占めると言われている。図3は各船種における全抵抗（＝燃費）に占める抵抗成分の割合の概略を示す。塗膜では摩擦抵抗を減らすことで燃費を低減させるが、図3に示すように船種により全抵抗に占める摩擦抵抗の割合が異なることから、船種による燃費低減効果は異なる。

2007年より4%の燃費削減が可能な船底防汚塗料（LFC：Low Friction Coatings（低摩擦塗料））を市場導入した。ヒドロゲル技術を船底防汚塗料に応用するための最適化検討を行い、これによって開発した低摩擦塗料は、曳航水槽を用いた全長3mのWigley型数式模型船での検証試験で、従来の自己研磨型塗料（SPC）に比べて全抵抗で約4%低下した。また、この効果は実船でも実証した[5]。曳航水槽試験や実際の船舶における試験などを経て、自己研磨型塗料を上回る低燃費型船底防汚塗料（商品名：LF-Sea）を市場に導入し、2010年に第7回エコプロダクツ大賞審査委員長特別賞を受賞した。

現在のところ、この塗料の摩擦抵抗低減メカニズムは、塗膜表面に存在する水を捕捉する層（Water Trapped Layer）が、塗膜面の表面粗さを減少させる方向に作用し、水との摩擦抵抗を減少させているのではないかと考えている[6]（図4）。このLFCの知見を基にさらにヒドロゲル技術を改良した新規低摩擦型船底防汚塗料がA-LFC（Advanced LFC／商品名：A-LF-Sea）である。深江丸（神戸大学の練習船）による就航解析（定点での燃費解析・速力解析）では、A-LFCは従来型SPCやLFCより高性能な低摩擦性能が検証できた（表1）。このA-LFC単独では船種により異なるものの、従来型塗料（SPC）に比べて7～8%の燃費低減効果、下塗り塗料である防食塗料との組み合わせで10%程度の燃費低減効果があると考えている。

表1　深江丸での低燃費（＝低摩擦）効果

年	A/F塗料	n数	試験期間	平均速力（年平均）	燃料消費量（定点間）	燃料削減率
					速度補正（12.4ノット）	
				ノット	L	L	%
2010年	従来型（SPC）	24	2010.2～2011.1	12.41	242.0	242.0	基準
2011年	LFC	19	2011.2～2012.1	12.51	235.2	231.5	−4.4%
2012年	A-LFC	19	2012.2～2013.1	12.49	226.7	223.8	−7.5%

◇　◇　◇

海洋生物が進化の過程で獲得した摩擦抵抗を減らす知恵よりヒドロゲル技術に着目し、低摩擦型塗料を開発した。2014年6月時点で低摩擦型塗料は1,200隻に採用され、そのうち2013年より市場導入したA-LF-Seaは200隻以上採用された。A-LF-Seaは、Seatrade Asia Award 2014でTechinical Innovation Awardを受賞した。この受賞を機に低摩擦型塗料がより多くの船舶に塗装され、燃費の削減や炭酸ガス発生の抑制による地球温暖化防止に寄与できることを望む。

◆参考文献◆

（1）戸田保幸：日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.43、No.4、p.103、2008など
（2）永井實：イルカに学ぶ流体力学、オーム社、1999
（3）小濱泰昭：バリティ、Vol.17、No.10、p.39、2002
（4）山盛直樹：表面化学、Vol.27、No.11、p.669、2006
（5）戸田保幸、山盛直樹、島田守、荒木英治、鈴木敏夫ほか：日本船舶海洋工学会講演会論文集、第4号、p.301、2007
（6）山盛直樹、島田守：TECHNO-COSMOS、Vol.22、p.30、2009

「センサネットワーク」分野

構造色が変化する材料とセンシングへの応用

独立行政法人 物質・材料研究機構　先端フォトニクス材料ユニット　主幹研究員　不動寺　浩

タマムシの構造色の模倣

構造色は光の干渉、回折、屈折、反射など物理的な性質に起因する発色現象である。シャボン玉や水面上の油膜の薄膜干渉、CDやDVDの表面での回折など、可視光の波長レベルの規則構造によって特定波長の光のみが反射、透過することで構造色が引き起こされる。この構造色は数多くの生物で観察されている。例えば、青いメタリックな金属光沢が特長であるモルフォ蝶は、構造色の代表例である。また、メラミン色素を含む黒い外皮を持つ甲虫類（タマムシ、クワガタ、カブトムシ、カナブンなど）の昆虫でも構造色を有するものが知られている。ヤマトタマムシは、正倉院の玉虫厨子（たまむしのずし）に代表されるように古代から高級装飾素材として利用されてきた。最近の研究により、タマムシの構造色は2種類のクチクラが積層した多層膜干渉に起因することが解明されている[1]。

著者らはタマムシの構造色の模倣を試みている。図1にミドリフトタマムシ（タイ国原産）と、その構造色を模倣した人工のタマムシを示す。写真Aに両者を並べて比較した。この模倣タマムシの構造色は、規則配列したコロイド粒子による可視光（緑色）のブラッグ回折に起因する。写真Bは表面の走査電子顕微鏡像で、粒径200nmのポリスチレン製のコロイド粒子が規則配列していることが分かる。これまでの研究からコロイド粒子は、面心立方格子face center cubic, fccで（111）面に配向している。構造色、すなわちブラッグ回折の波長ピーク位置は、fcc（111）面の面間隔d_{111}に依存する。近年、この回折ピーク（構造色）を利用した新材料や、デバイスへの応用の研究が活発に行われている。

構造色が変化する生物

魚類の表皮（虹色素胞）にはグアニンと呼ばれる板状結晶（無色透明）が積層しており、薄膜干渉あるいは多層膜干渉により可視光を選択的に反射する。また、構造色が変化する生物も知られている（図2、構造色変化のモデル）。例えば、熱帯魚のルリスズメダイは、運動性の虹色素胞によって構造色を瞬時に青色から緑色へと変化させる。この構造色変化は反射小板の周期間隔を調整によって行われている。一方、ネオンテトラは、まったく別の仕組みで構造色を変化している。ネオンテトラは反射小板の角度を変えることで構造色が変化する。イカやタコの一部では、多層膜構造を構成する反射小板の厚みの変化によって構造色が変色する。また、クシクラゲではネオンサインが点滅するような構造色変化が報告されている。繊毛内部構造に円筒が積層することで光を選択反射する。さらに、繊毛がウエーブのように脈動することで、入射する白色光の角度が変化し、ダイナミックな虹色の構造色変化が観察される。

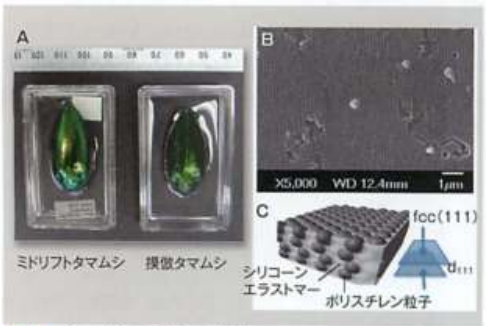


図1　タマムシの構造色の模倣

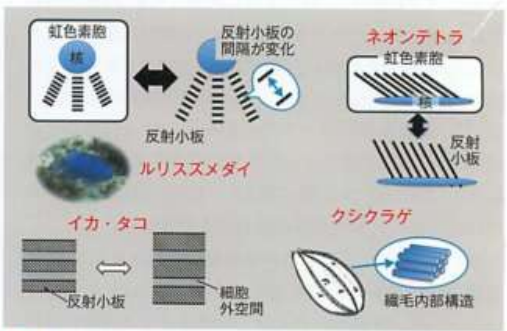


図2　構造色が変化する生物

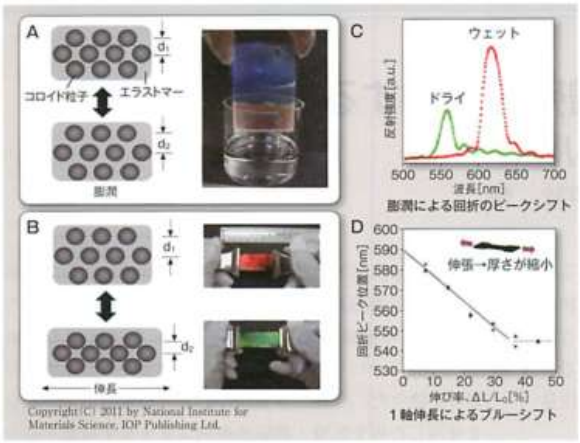


図3　構造色が可逆変化する新材料

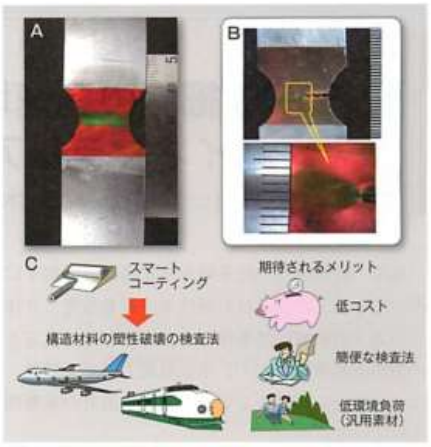


図4　歪み可視化技術への応用

生物における構造色変化は多種多様であり、これらの仕組みを理解することは、新材料やデバイス設計の規範として非常に有益である[2],[3]。著者らは、図1Cで示したシリコーンエラストマーの中に規則配列したポリスチレン粒子の間隔 d_{111} を制御することで構造色が変化する新材料の開発とその応用を推進している。

構造色が変化する新材料

図3に示すように、この新材料は膨潤現象と機械変形による構造色が可逆的に変化する[4]。Aではエラストマーを液体で膨潤するとコロイド粒子間（d_{111}）が拡大する。写真では、オクタンに漬すと構造色が青色から赤色に変色している。エラストマーの体積が膨張する結果、粒子配列面の面間隔も拡大する。ビーカーより引き上げ乾燥させると、元の青色の構造色が回復する。一方、Bではゴムシート表面に形成した新材料が、弾性変形で構造色が赤色から緑色へ変色している。エラストマーの変形によりコロイド粒子間（d_{111}）が縮小するためである。応力を取り除くと元の構造色に回復する。

これら構造色変化は、視覚で認識するだけでなく簡易な分光器で計測が可能である。例えば、Cの膨潤現象ではブラッグ回折の反射ピークを計測し、ドライ状態からウェット状態の変化が、波長ピーク（λ）が550nmから625nmの変化として確認できる。膨潤の程度によって回折ピークのシフト量が変化するため溶媒センシングへの応用が期待できる。一方、試験片を1軸方向に伸張すると厚さが縮小することで回折ピークが低波長方向へシフトする。Dは試験片の伸び率（$\Delta L/L$）と回折ピークの波長の関係を示している。初期状態（590nm）から35%伸長時では回折ピークが550nmと約40nmのブルーシフトが観察された。ピークシフト量から応力変形の程度を測定できるので、新原理による歪みセンサや応力センサへの応用が可能である。

歪み可視化技術への応用

最後に、社会インフラ分野における構造色変化するセンシング材料への応用についての研究を紹介する（図4）。この新材料を構造材料の歪み可視化技術への応用を検討している[5],[6]。Aはアルミの試験片に成膜し、引っ張り試験機でアルミ片を塑性変形させた。くびれ部の塑性変形している領域では、構造色が赤色から緑色に変色していることが視認できる。また、ノッチ（切り込み）を形成した試験片では応力が集中し、変形領域の分布を観察することが可能である。図4Cのイラストに示すように非接触で目視できるため、低コストで簡便な環境負荷の少ない新しい検査技術としての応用が期待できる。

◆参考文献◆
(1)木下修一：生物ナノフォトニクス―構造色入門，朝倉書店，2010
(2)不動寺浩：PEN News Letter, Vol.3, No.8, pp.7-12, 2012
(3)H. Fudouzi：Sci. Tech. Adv. Mat.12, 064704-1, 2011 (DOI：10.1088/1468-6996/12/6/064704)
(4)H. Fudouzi:Adv. Powder Technol., Vol.20, No.5, pp.502-508, 2009
(5)不動寺浩，澤田勉，田中義和，有尾一郎，百武荘，西崎到：検査技術，Vol.18, No.9, pp.26-30, 2013
(6)http：//www.nims.go.jp/publicity/digital/movie/mov140212.html

「医療」分野
ヒトiPS細胞の高速増殖を誘導するメカノバイオマテリアル

九州大学　先導物質化学研究所　教授　木戸秋　悟

近年、幹細胞の分化系統が分化誘導液性因子によるばかりでなく、培養基材の弾性率や接着強度、立体形状などの力学的機械的諸条件にも強く依存して決定されるとの報告が相次ぎ[1]~[3]、生体組織力学場を模倣、あるいはその効果を制御する培養力学場の設計の重要性が注目されている。

細胞と細胞外環境の力学的相互作用に依存した細胞機能応答は、細胞自身が備えている力覚メカニズムに基づく挙動であり、細胞のメカノバイオロジーと呼ばれる分野において盛んに研究が進められている。細胞のメカノバイオロジー挙動については、生体内でも重要な役割を果たしていることが強く示唆されているとともに、幹細胞の培養操作における制御未確立な諸現象に関わっていることも指摘されており[3]、再生医工学においては、特にその系統的理解とメカノバイオミメティックな操作技術の確立が重要となる。この課題に対して我々は、幹細胞のメカノバイオロジーを操作するバイオマテリア「幹細胞メカノバイオマテリアル」の開発に取り組んでいる。その最近の成果の1つとして、本稿ではiPS細胞の高速増殖を可能とするメカノバイオマテリアルの設計について紹介する。

iPS細胞の培養基材設計

iPS細胞（induced Pluripotent Stem Cell）は、体細胞へOct3/4、Sox2、Klf4の遺伝子を導入し、細胞を初期化することによって得られる人工の多能性幹細胞である[4]。ES細胞と同様に呼吸器、消化器、肝臓等となる内胚葉、造血器、循環器、筋肉、骨等となる中胚葉、そして表皮、神経、感覚器等となる外胚葉へと分化することのできる三胚葉分化能を有し、かつ倫理面での問題を回避できることから医療応用への展開が近年加速しつつある。実際に、病態解明の点ではALS（筋萎縮性側索硬化症）患者由来の細胞を初期化、ニューロン細胞への分化誘導による病態の再現、さらにドラッグスクリーニングへの応用が報告されている[5]。さらに、細胞移植による再生医療への応用に関しても精力的に研究が行われている。滲出型加齢黄斑変性に対する治療法として、網膜色素上皮細胞障害を起こした新生血管を抜去し、iPS細胞由来の網膜色素上皮細胞シートを移植する治療法[6]、[7]について2013年、厚生労働省から臨床実験の認可が降りた。今後、さらにこのような患者由来の細胞を使用した再生医療・細胞治療例はますます増加するものと期待され、iPS細胞はこれまで治療困難であるとされていた病態の解明、治療法の検討に非常に有用である。iPS細胞を種々の細胞に分化誘導して用いるためにはその前段階として、未分化状態を維持し分化を阻止した状態で大量・高速に増殖させることが重要であるが、現在のところ確立されている培養方法（フィーダー細胞層利用およびフィーダーフリーマトリゲル利用）は、異種生物由来の原料を元に経験的に決定された条件での培養法であり、培養基材の化学的・力学的特性の明確な定義がなされているとは言えず、iPS細胞の真に最適な培養基材の条件は、必ずしも未だ確立されてはいない。特に、細胞培養基材の化学・力学特性は、幹細胞分化の系統決定に強く影響する重要なファクターであり、これら2つの特性を正確に定義した基材の設計が求められている。特に培養基材の力学的特性は幹細胞性の維持に重要な影響を与える。2006年、Dischersらは間葉系幹細胞（Mesenchymal stem cell：MSC）を、異なる弾性率を有する基材上で培養すると、基材弾性率に依存して、神経細胞、筋芽細胞、骨芽細胞への系統決定がなされることを報告した[1]。このような物理的・力学的環境条件の刺激が細胞の機能応答を誘導する現象とそのメカニズムを包括的に表現する言葉として、メカノバイオロジーという術語が名古屋大学の曽我部らによって提唱されている。幹細胞のメカノバイオロジーの制御は、再生医学や細胞治療工学において実用的にも極めて重要な課題であり、iPS細胞培養基材の設計において明確に定義する必要があると言える。培養基材の化学・力学特性の正確な設計を行うためには、フィーダー細胞を用いず、系統的にこれら両特性を系統的に調節可能な培養基材が必要とされる。

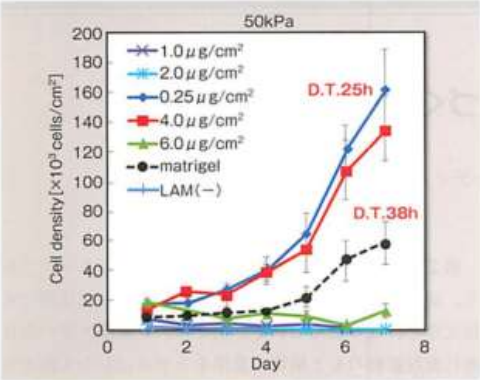


図1　50kPa ゼラチンゲル上でのラミニン固定密度を変えた際のヒト iPS 細胞の増殖曲線
マトリゲル（破線）に比し、0.25 μg/cm² ラミニン固定密度条件（菱形）で倍加時間 D.T. は 1.5 倍短縮。

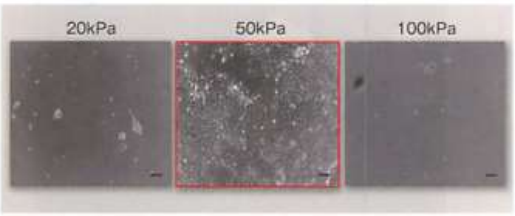


図2　異なる弾性率を有するゼラチンゲル上で培養した iPS 細胞の 7 日培養後の増殖挙動
ラミニン反応条件：0.5mg/mL。スケールバー：100 μm. 50kPa のゲル上においてのみ、iPS 細胞は正常な増殖を示す。

ヒト iPS 細胞を高速増殖する最適化基材

以上の設計要件に対して我々は、独自に確立した弾性率可変ラミニン固定化ゼラチンゲルを用いて、分散培養されたヒト iPS 細胞の増殖を従来のマトリゲル上でのフィーダーフリー培養の 1.5 倍程までに高速化できる至適培養基材を開発した[8]。

具体的には、弾性率可変の光架橋性ゼラチンゲルの表面にマトリゲルの主成分であるラミニンを化学固定し、ゲル弾性率とラミニン固定密度の両者を調節したうえで iPS 細胞の増殖挙動を調べたところ、特に 50kPa の弾性率およびラミニン固定密度 0.25 ～ 4.0 μg/cm² のゼラチンゲルにおいて、従来のマトリゲル培養系を遥かに上回る増殖が見られた（図 1）。倍加時間は従来のマトリゲル上での 38 時間に対して、最適化されたラミニン固定化ゼラチンゲル上では 25 時間となった。これは、10^8 ～ 10^9 個の iPS 細胞を準備する際に従来数か月程度掛かっていた調製期間が、1 か月強ほどまでに短縮できる可能性を示す。上の条件で増殖した iPS 細胞は、正常なコロニー形成、未分化性を示すポジティブマーカー（SSEA-4、TRA-1-60、TRA-1-81）の陽性とネガティブマーカー（SSEA-1）の陰性、および胚葉体作製後の自発分化において三胚葉分化が確認された。一方、高速増殖の見られた条件以外のゲル弾性率とラミニン固定密度においては、iPS 細胞の増殖は観察されなかった（図 2）。

◇　◇　◇

以上の知見は、治療措置の迅速化につながるものであり、再生医療の基盤技術としての重要な意義を有する。また、従来の iPS 細胞培養法において多用されているマトリゲル培養が iPS 細胞の高速増殖のための最適化において不十分なものであることを示しており、培養基材の表面化学のみならず、基材弾性特性の最適設定が本質的であることを示唆している。特にヒト iPS 細胞の培養では、個々の細胞をバラバラに分散させた状態からの増殖が難しく、生存維持のために ROCK 阻害剤の添加が必要である。ROCK 阻害剤は iPS 細胞内の細胞骨格タンパク質であるミオシンの過剰活性化を抑制することで、分散孤立した iPS 細胞の細胞内張力の異常な亢進を回避させる[9]。このことはヒト iPS 細胞が細胞内応力の状態に敏感であることを意味し、その生存と最適な増殖のためには、iPS 細胞の応力状態自体を操作し得る培養力学場の設計が重要となることを示唆するものである。幹細胞操作材料の高機能化のためには、生体と同様の軟らかさを有するゲル材料の力学場設計がブレークスルーとなる可能性が窺われ、メカノバイオメミティックスの観点からの細胞操作材料の開発が強く期待される。

◆参考文献◆

(1) AJ. Engler, S. Sen, HL. Sweeney, DE Discher : Cell, Vol.126, pp.677-689, 2006
(2) JP. Winer, PA. Janmey, ME McCormick, M. Funaki : Tissue Eng. PartA, Vol.15, pp.147-154, 2009
(3) C. Yang, MW. Tibbitt, L. Basta, KS. Anseth: Nat. Mater. Doi : 10.1038/NMAT3889, 2014
(4) K. Takahashi, S. Yamanaka et al. : Cell, Vol.131, pp. 861-872, 2007
(5) N. Egawa, H. Inoue et al. : Science Translational Medicine 4,145ra104, 2012
(6) F. Osakada, M. Takahashi et al. : Journal of Cell Science, Vol. 122, pp.3169-3179, 2009
(7) Y. Hirami, M. Takahashi et al : Neuroscience Letters, Vol.458, 126-131, 2009
(8) 人工多能性幹細胞の培養方法及び培養材料，木戸秋悟，内海彩香，江藤浩之，国立大学法人九州大学，国立大学法人京都大学，特願 2014-39524
(9) M.Ohgushi, Y.Sasai : Trends in Cell Biol. Vol.21, pp. 274-282, 2011

「地域づくり」分野
滋賀での実践—自然に学ぶ地域づくり—

NPO 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　星野　敬子

滋賀県は、琵琶湖水系が育む豊かな自然に恵まれている。近畿地方の中核部に位置しながら、里山や自然の風景が今も色鮮やかに残る地域である。琵琶湖の固有種をはじめとする動植物の種類が多いことでも有名である。県民や企業、行政の環境への意識が高く、「環境先進県」としても知られる。2011 年 10 月、この滋賀県の産官学が連携し、NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン（ANJ）を設立した（図 1）。自然がつくり出してきた省エネ・省資源、循環型の仕組みやデザインを社会に活かす取り組みを推進している。

ANJ 活動内容

第 1 の活動は、情報収集とネットワークづくりである。バイオミミクリー、バイオミメティクス、ネイチャー・テクノロジーなどのキーワードをもとに、国内外の事例や研究を調査している。本分野の第一人者に指導いただきながらネットワークの構築も進めている。滋賀経済同友会と連携し、研究者と企業のマッチングを目指した産学連携サロンも開催してきた（図 2）。滋賀県の中小企業は本分野に強い関心を寄せており、応用まで視野に入れた生物学者や、課題解決の方法を生物学・生態学に求める工学者など、専門性と同時に広い視野を持つ研究者が、今後ますます増えることを期待している。

図 1　NPO 法人設立時の連携協定調印式
滋賀県の産官学 7 団体と、バイオミミクリーの生みの親ジャニン・ベニュス氏が代表を務める Biomimicry 3.8 が連携協定を結び、ANJ が活動をスタートした。

第 2 の活動は、製品開発のためのコーディネートである。研究者と滋賀県の企業や行政をつなぎ、試作機の実用化などに取り組んでいる。例えば、立命館大学の高倉秀行教授監修のもと植物の葉序をモデルにした太陽光発電装置ソーラープランツを開発した（図 3）。上方の葉が

図 2　産学連携サロン
大学研究者による研究発表と交流会の 2 部構成サロン。2012 年 9 月から実施しており、主に滋賀県内で事業を営む企業が参加。

図 3　太陽光発電装置ソーラープランツ
太陽光パネル配置のモデルとしたのはホウセン力の葉序。滋賀県内企業の協力のもと、3 基の点灯試験を実施している。

図4　水環境調査用アメンボロボット
アメンボは水上では前後4本の脚で体を支え、波を吸収し、中脚2本で水面を蹴り移動する。この機構をモデルとして開発したロボット。

図5　小学生対象ワークショップ
屋外で昆虫採集を行い、その形や機能を観察し、それを活かした未来のものづくりを考えるワークショップを開催した。

下方の葉に重ならない角度を持つ葉序（フィボナッチ数列）に倣って集光型太陽光パネルを配列し、単位面積当たりの発電量最大化に取り組んでいる。このほか、中央大学の中村太郎教授が研究するアメンボの動きをモデルにしたロボットの試験に協力している。アメンボは水陸両方で移動できる機構を持ち、浅瀬に強く、急旋回が得意などの特徴がある。この動作に基づく機動性の高い水陸両用ロボットを水環境調査に役立てることを目指し、琵琶湖における航行試験を実施している（図4）。

第3の活動は、教育・アウトリーチである。ウェブサイトで研究者コラムなどの情報を発信するほか、ワークショップやシンポジウムの開催を通じて広く一般に普及する機会を設けている。学校などの教育機関や、企業や行政主催のイベントにおける講演や出展も多数行ってきた。子ども向けのプログラム開発と実施にも力を入れている。新鮮な目で自然を手本として見つめ直し、その仕組みやデザインに学ぶことで実現する製品開発やライフスタイルづくりを体験できるプログラムである。フィールドワーク、工作実験、事例学習、アイデアのブレインストーミングなどを盛り込んでいる。これまでに延べ1,000人を超える参加者を得て、滋賀県内を中心に実施してきた。地域の小学校の協力のもと、学校教育で活用できるパッケージづくりにも取り組んでいる（図5）。

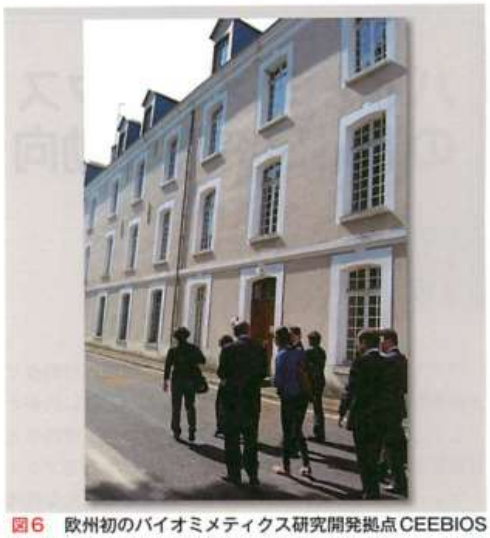


図6　欧州初のバイオミメティクス研究開発拠点CEEBIOS
2014年6月ANJ関係者およびISO/TC266 Biomimetics国内審議委員会委員ら12名が現地を視察した。

最後の活動は、地域振興である。バイオミメティクスの学術的な研究が進む中、産業や人材育成に結実させる社会的な基盤が求められている。この基盤整備に向けた1つの活動として、欧州初のバイオミメティクス研究開発拠点CEEBIOS（Centre Européen d' Excellence en Biomimétisme de Senlis）と交流を行っている（図6）。この拠点は、フランスのサンリス市にあり、かつてのフランス陸軍訓練所跡地（100,000m²）に研究センター、ビジネスセンター、会議・展示場、教育センターなどの施設整備が進められている。サンリス市がその中核を担い、欧州の産官学民連携により2014年7月に運営を始めた。

国際的なネットワークづくりに関心を持つサンリス市は、日本の活動事例としてANJに注目した。2013年10月より3度にわたる交流を通じて、サンリス市とANJの事務局がある滋賀県近江八幡市の関係機関5団体が調印した連携協力に関する協定書が作成された。具体的な連携内容についての議論はこれからだが、教育、観光、産業技術などにおける地域連携の可能性が見出された。ANJは本連携などを通じて、バイオミメティクスによる地域振興に寄与したいと考えている。

バイオミメティクスの海外研究開発動向

公益社団法人 高分子学会
常務理事、事務局長
平坂 雅男

バイオミメティクスは、生物の構造や機能、行動などから着想を得て、新しい技術開発やものづくりに活かそうとする科学技術であり、最近では、生物学・博物学と材料科学や工学との学際融合に基づいた研究開発プラットフォームとして着目され、既存とは異なる新たな研究開発のプロセスとして期待されている。そして、バイオミメティクスは、生物の構造模倣にとどまらず、生物が保有するプロセスや持続可能性を実現する社会システムの観点からも関心が持たれている。このような背景の中、バイオミメティクスの国際標準化が始まり、海外の研究開発が活発化している。ここでは、誌面の都合もあるので、フランスおよびドイツを中心に最近の状況について紹介する。

研究ネットワーク

ドイツでは、BIOKON（Bionics Competence Network）が中核的となってこの分野の研究開発や産業展開をリードしてきたが、フランスも遅ればせながら動き出した。フランスの研究開発や製品開発の情報がフランス語という言語の問題もあり、日本ではその活動についてあまり知られていなかったが、国際標準化の活動を通して日仏連携が構築されるにしたがって、多くの情報が入るようになった。最近のトピックスとしては、バイオミメティクスの研究拠点（CEEBIOS：Centre Européen d'Excellence en BIOmimétisme à Senlis）が、パリから北へ約50kmのサンリス市に2013年10月に設立されたことがある。サンリス市のフランス陸軍駐屯地跡（約100,000 m²）を活用し、研究施設や教育施設を整備するとともに、ビジネスセンターを設置し、産学連携の強化が図られている。企業としては、ロレアル、ソフィプロテオル、アルケマ、クラリアントなどが参画する予定であるという。また、フランス国防省装備総局（DGA）から「バイオミメティクス関連の防衛技術応用におけるイノベーション」と題した報告がサンリス市で行われていることから、政府との関係も深いと考えられている。バイオミメティクスは、従来型の研究開発や技術革新のアプローチに対して、生物を規範とする新たな革新的アプローチであると考え、CEEBIOSでは企業の研究開発の中核となるマネージャーを対象に、バイオミメティクスによる製品開発や産業化についての教育にも注力している。

一方、ドイツはBIOKON以外にもBiomimicry Germanyが2014年に設立されている。このBiomimicry Germanyでは、生物多様性を理解し、持続的可能な社会変革することをミッションとして、学際的な問題解決の研究に加えて教育まで幅広い活動を行おうとしている。また、ドイツではシャウエンブルク財団がスポンサーとなり、優れた研究業績に対して、隔年で国際バイオミメティクス賞（International Bionic Award）を授与している。2014年は、ライプニッツ研究所の3名が1位を受賞している。彼らは、トビムシのクチクラの堅牢（けんろう）かつ効率的な撥水表面の特性を模倣し、機械的にも安定な高分子膜の研究を行っている。また、フラウンホーファーIPA（生産技術・オートメーション研究所）が、スズメバチを模倣した股関節手術のためのドリル開発で2位を受賞している。

製品展開

バイオミメティクスで代表的なサメ肌の模倣については、すでにSPEEDO社の水着で有名となったが、その他の製品展開も多い。例えば、ドイツのVochechem社は、サメ肌構造を形成する船舶用の塗料を市販している。また、研究段階ではあるが、ルフトハンザ航空は、飛行機の胴体にサメ肌コーティングによる燃費向上テストを行っている。2014年秋のパリモーターショーにおいても、

図1 プジョーのコンセプトカー（パリモーターショー2014）

図2　ハンディモップへの応用

フランスのプジョーがサメ肌ボディのコンセプトカーを図1のように展示していた。

撥水性の高いロータス効果の製品展開では、Erlus社（ドイツ）が屋外用のセルフクリーニング機能を有する撥水コーティング剤を販売し、Cenano社（ドイツ）も、ガラス、プラスチック、セラミックス、大理石、革、木材の金属など様々な材料に適用することができる撥水コーティング剤を販売している。Saint-Gobain社（フランス）もガラスコーティングの研究開発を行っている。米国においても、STO社がStoCoat® Lotusan®の商標で外壁用のコーティング材料を販売している。

一方、機械分野では、ドイツのFESTO社が像の鼻、トンボの飛行、カンガルーの歩行などを模倣した研究を行い、製品に技術展開している。また、フラウンホーファーIPAでは、整形外科用の治具開発のバイオミメティクス研究を積極的に行っている。先に述べた股関節手術の治具以外にも、アナコンダのヘビと猫の牙をモデルとして椎体形成術に用いる器具（swallowing bone punch）を開発している。

生態構造と機能の研究を製品開発に利用し、市販されている製品も多い。Elise社（ドイツ）は、軽量化を実現する最適なアプローチとして珪藻の構造を解析し、軽量構造のソリューション・モデルを提供している。自動車のタイヤ・ホイールのデザインにバイオミメティクスを適用し、20%の軽量化を実現している。また、Blacknoise社（ドイツ）は、猛禽類やペンギンなどの翼の流体力学研究から、風切音を低減した冷却ファンを開発し、販売している。身近な製品では、Vileda社（ドイツ）が、生態のフレキシビリティから着想した図2に示すようなハンディモップを実用品として販売している。

図3　女性用化粧品（オールラーヌ）

化粧品分野での研究開発も行われている。ロレアルでは、髪のダメージの原因がセラミドの欠落にあることを解析し、生体機能を模倣して人工セラミドを開発しシャンプーなどの頭髪ケアの製品に展開している。バイオミメティクスの領域であるかは議論があるが、製品には「Bio-Mimetic ceramide」と表示されている。また、ロレアル以外のフランスの化粧品メーカーも、「Biomimétique」を製品に表示した化粧品を販売している。例えば、高級化粧品と知られているオルラーヌの女性用パックには、図3に示すように「BIOMIMÉTIQUE」と記載されている。さらに、Lotus Effectの名称も、Manhattan社のネイル製品に「Manhattan Lotus Effect」と表示され、また、ポーランドのBell社も「Air Flow Lotus Effect」の商品名でネイル製品を販売している。

バイオミメティクスの建築分野での応用では、建築家ミック・ピアス がシロアリ塚の機能を分析し、ジンバブエに冷房がなくても涼しさを保つオフィスビルを設計したことが有名であるが、最近では、建築家やデザイナーもバイオミメティクスに関心が高く、都市設計にも応用しようと考えている。

研究開発連携

バイオミメティクスに関連する国際連携では、EUの第7次研究枠組み計画（FP7）の枠組みの中でいくつかの研究開発が行われている。Octopus Projectは、イタリアがプロジェクトリーダーとなり、イスラエル、スイス、ギリシャ、そして英国が参加し、2009年から2013年まで実施された。このプロジェクトは、タコの生体を模倣して柔らかく器用なロボットを開発することを目標としている。具体的には、ロボットのためのソフトマテリア

図4　博物館の展示(ロータス効果)

図5　地下鉄駅の常設展示(パリ)

ル、ソフトアクチュエータ、触覚受容システム、伸縮性皮膚、吸盤機構および筋肉のメカニズムなどの研究を行っている。すでに8足の水中ロボットを開発している。このような技術は、生物医学への応用ではソフトな内視鏡の開発にも発展できると考えられている。

CSII（Convergence Science Network of Biomimetics and NeuroTechnology）は、2013年から2016年までのプロジェクトであり、スペインがプロジェクトリーダーとなり、スイス、イタリア、イギリス、そして米国や日本もメンバーとして参加している。神経科学や情報科学の分野が驚異的な進歩を遂げているが、神経工学の発展が遅れていることから、バイオミメティクスと神経工学における国際的な基盤を築くことを目的としている。2014年10月には脳を規範とする研究分野において、ICT、神経工学、新規材料および計算科学のワークショップ「BRAIN-FETs 2014」をイタリアで開催している。CSIIでは、生物学と工学の融合した教育プログラムにも力を入れている。その一部のプログラムは、YouTubeで動画配信されている。

ドイツでは、フラウンホーファー研究所を中心に国内外との連携が盛んである。フラウンホーファーIPAは、先に述べた機械メーカーであるFESTO社と共同でバイオミメティクスハンドを開発している。最近では、IPAとニュージーランドのオークランドバイオエンジニアリング研究所が、筋骨格モデルを用いたセンシングの共同プロジェクトを2014年11月に開始している。

一方、フランスでは、CODATA（COmmittee on DATA for Science and Technology）の活動の中で、バイオミメティクスの研究者ネットワークを構築するために、国内外の研究者情報を収集している。この取り組みは、フランスのO3D（Observatoire des Données du Développement Durable：持続可能性のデータに関する情報センター）のプログラムとして行われ、先に述べたCEEBIOSに関与するメンバーが中核となって進められている。また、フランスの持続可能開発大臣の支援プログラムとして、情報通信の研究拠点（Le pôle de compétitivité Images et Réseaux）、自動車の産業クラスター(iD4CAR)、環境と持続可能性の委員会（Le Comité 21）、環境産業のクラスター(Eco-origin)が共同でバイオミメティクスに関する会議を2014年10月に開催し、国内での産官学連携を推進している。

啓蒙活動

欧州の博物館では、バイオミメティクスに関する常設展示が行われている。例えば、ウィーン自然史博物館ではバイオミメティクスの応用分野が展示紹介されている（図4）。また、ドイツ博物館(ミュンヘン)では、さらに、自己組織化のプロセスまで展示している。一方、企業活動としても、ルフトハンザ航空が機内誌にバイオミメティクスの自社での応用展開を紹介するなどしている。

フランスの海洋学研究所の情報誌はインターネットでも入手できるが、この冊子のバイオミメティクスの特集号には、パリ自然史博物館長Gilles Boeufが寄稿し、バイオミメティクスの歴史から製品開発までの解説とともに、フランスの課題が述べられている。また、フランスでは、パリ市内の地下鉄のホームに生物多様性や持続可能性について複数のブースが常設されており、その1つにバイオミメティクスが紹介されている（図5）。このように、自然を模倣する技術が、持続可能性にどのように寄与するかについて欧州では認知度が高く、このような意識のもと、学術的な研究のみならず産業化に向けた動きが活発化している。

バイオミメティクスの国際標準化

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　研究主幹
阿多　誠文

2014年10月20～22日、ベルギーのLiégeにおいてISO/TC266 Biomimeticsの第4回総会が開催された。標準化活動が始まって2年、早くもバイオミメティクスに関連する用語のWG1と、バイオミメティック構造最適化アルゴリズムのWG3の原案は、国際標準として発行されることが決まった。国内における様々な関係者との面談を経て、ドイツが提案してきた工業部品の形状やトポロジーの最適化アルゴリズムをまずは技術仕様書として公開すべきとし、性急に国際標準にすることに反対してきた筆者にとっては、残念な結果となった。

ここでは、バイオミメティクスの国際標準化の始まった経緯とこれまでの活動内容について概要し、これから日本がなすべきことについて整理する。

ISO/TC266 Biomimeticsはどのように動き始めたのか

バイオミメティクスの国際標準化は、ドイツが標準化を行うために進めていたISO BIONIK Projectで周到に準備されていた。そのプロジェクトは、ドイツ国内の産学連携のバイオミメティクスの研究開発枠組みBIOKON、ドイツ技術者協会VDI、そしてドイツ規格協会DINの協働で進められ、FP7が始まった2007年から標準の原案となるVDI-Guideline「Biomimetics」の作成が始まっている。2009年3月にBIOKONは、BIOKON Internationalへと国際展開しているが、これも国際標準化を欧州のグローバル戦略の基本に位置付けている欧州委員会の政策を反映した動きであろう。2011年3月18日、BIOKON International、VDI、DINは合同で国際標準化準備会議を発足させ、同年5月16日、DINからジュネーブの国際標準化機構ISOに対して、バイオミメティクスに関する新しい専門委員会（TC）設立の提案を行っている。この提案は、5月20日にはISOの技術管理委員会（TMB）からISO加盟各国へ周知され、意見の聴取が行われた。

当時日本では、東北大学教授（当時）の下村氏がバイオミメティクスに関する新学術領域の準備を進めていた。経済産業省からISO/TC266 Biomimetics発足の連絡を受けて、2012年3月、下村氏と筆者がドイツのVDIとBIOKONのキーマンを訪問、国際標準化に関する意見交換を行った。今後の研究開発と産業化に資する有益な社会基盤としてのバイオミメティクスの国際標準を協働していくことで合意、日本も積極的にISO/TC266 Biomimeticsに参画することになった。この決定を受けて、公益社団法人高分子学会のバイオミメティクス研究会に、ISO/TC266 Biomimeticsの国内審議委員会が設置された。

このような経緯を経て、バイオミメティクスの国際標準化を担うISO/TC266 Biomimeticsが活動を開始、その第1回本会議が2012年10月9日と10日の両日、ドイツのベルリンにあるDINで開催された。提案国のドイツ、中国、チェコ、日本、韓国、オランダ、イギリス、開催日前日になって参加を決めたフランスが投票権のあるPメンバーとして参画した。後にベルギー、イスラエルがPメンバーとして参画、今回のベルギーのLiégeにおける第4回本会議からカナダも参画している。表1に現時点における参加国をまとめた。

アメリカの標準化ボディASTMは、ISO/TC266 Biomimeticsに参画すべきかどうかのパブリックコンサルテーションを行い、投票権のないオブザーバーメンバーとして参加することを決めている。アメリカのバイオミメティクスの研究開発の基本には、「生物を模倣することで持続可能な社会に貢献する」という明快で合理的考え方があり、バイオミメティクスのマーケットは広が

表1　ISO/TC266 Biomimetics参加国と各国規格協会略称

参加国	
P（Participating）-member	O（Observer）-member
中国（SAC）	アルゼンチン（IRAM）
チェコ（UNMZ）	デンマーク（DS）
フランス（AFNOR）	フィンランド（SFS）
ドイツ（DIN）※幹事国	インド（BIS）
日本（JISC）	イラン（ISIRI）
韓国（KATS）	カザフスタン（KAZMEMST）
ベルギー（NBN）	マレーシア（DSM）
オランダ（NEN）	ポーランド（PKN）
イギリス（BSI）	セルビア（ISS）
イスラエル（SII）	スウェーデン（SIS）
カナダ（CSA）	スイス（SNV）
	タイ（TISI）
	アメリカ（ANSI）

りを見せつつあるという認識がある。このような研究開発と産業化の現状から、アメリカは標準化戦略ではISOを舞台にしたデジュールではなく、デファクト標準を選択したものと思われる。

ISO/TC266 Biomimeticsでは何を標準化するのか

活動を開始した新しいISO/TC266 Biomimeticsは、どのような体制で何を標準化しようとしているのだろうか。第1回ベルリン総会で、以下のような3つの作業委員会(WG)が発足した。

(1) WG1「Terminology and methodology」

WG1は、バイオミメティクスに関わる基本的な用語やバイオミメティクスの手法に関する規格策定のためのWGである。WG1のコンビーナは、ドイツのHeike Beismann氏が務めてきた。

(2) WG2「Structure and materials」

WG2は、事前の投票と意見聴取に対してイギリスとフランスから、叩き台であるVDIのガイドラインの内容が適切でないとの反対意見が出されていたため、議論となった。今後もWGの内容、議論の方向など、緊密なコミュニケーションが必要との含みを持たせて、一応は設置の方向で議論は落ち着いた。WG2のコンビーナはドイツのOlga Speck氏から、現在はベルギーのStephan Hoornaert氏に代わっている。

(3) WG3「Biomimetic optimization」

ここでは、生物の順応的成長に学ぶ工業製品のデザイン最適化アルゴリズムの標準化を進めてきた。コンビーナにはドイツのIwiza Tesari氏があたってきた。

このような大枠が決まった後、各国のデータの取りまとめをするTask Groupの設置が確認され、委員を任命した。さらに、今後議論の進捗など情報の交換をするリエゾンにISO内部の11のTCと、外部リエゾンとして欧州標準化委員会(CEN)の5つのTCが提案され、了承された。

日本は最後に、生物学と工学を融合するデータの活用について北海道大学教授の長谷山氏が基本的な考え方を示し、次のフランスで開催された第2回AFNOR総会において、WG4を立ち上げるかどうかについて議論することで合意した。議論の結果、日本の提案は予備段階から始める新しい作業提案として認められ、WG4が発足した(図1)。

総会における議論の詳細は紙面の都合で割愛するが、現在のISO/TC266 Biomimetics、その国内審議委員会の体制について図2にまとめた。

表2には、これまでの本会議開催日と開催場所をまとめた。

図1 第4回総会参加者。一番右端が筆者

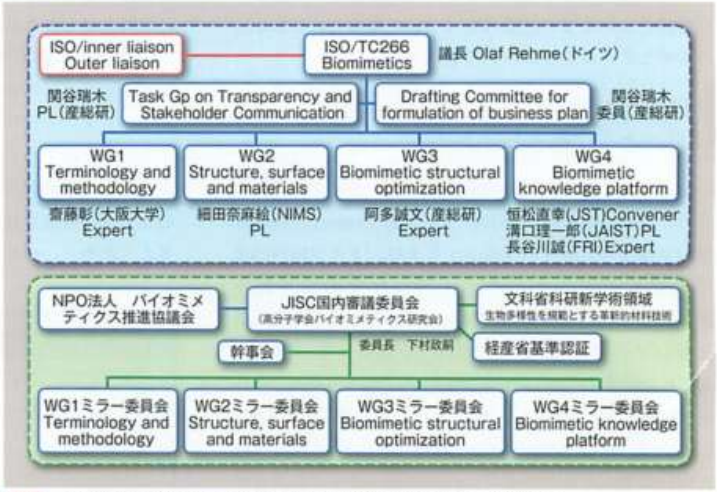


図2 ISO/TC266 BiomimeticsとJISC国内審議委員会の体制

表2 これまでの本会議の開催日と開催場所

総会	日時	会場	開催地
第1回総会	2012年10月9、10日	DIN	Berlin/Germany
第2回総会	2013年5月22、23日	AFNOR	Saint-Denis/France
第3回総会	2013年10月29、30日	UNMZ	Prague/Czech
第4回総会	2014年10月20～22日	Univ. of Liége	Liége/Belgium

めた。

WG3 Biomimeic Structural Optimization は何を標準化したのか

以下、筆者が関わってきたWG3の活動を概要する。

生物の模倣により最適な工学的ソリューションを得るには、2つの方法がある。1つは動きの模倣で、これは自律分散システムの根幹をなす。もう1つは形の模倣であり、例えば、生物は外的ストレスを緩和し均一化するように成長し、ストレスの掛からないところは軽量化しようとする。バイオミメティクスの国際標準化を担うISO/TC266 Biomimetics の WG3 Biomimetics. Biomimetic Structural Optimization が取り組んできたのは、そのような生物の順応的成長を工業製品の最適化に応用するアルゴリズムの標準化で、工業製品のデザインコンセプトに関わる標準化である。

筆者は、これまでWG3で扱っている最適化アルゴリズムが日本ではほとんど使われていないこと、最適化アルゴリズムがバイオミメティクスであるという明確な定義が合意されていないこと、CAOやSKOと呼ばれる構造やトポロジー最適化アルゴリズムだけを標準化する合理的理由が見当たらないこと、それぞれの国で標準化に出席している生物学者と機械系専門家との議論が行われていないこと、学際領域での性急な標準化は研究開発とイノベーションを阻害すること、といった理由から、今すぐに国際標準にするのではなく、技術仕様書（TS）として公開してから再度検討すべきと主張してきた。しかし、明確な反対は日本だけで、最終的にこのドラフトは国際標準として発行されることが今回の第4回本会議で決まった。標準公開後、改めて改訂の提案を要求していく予定である。

現在のところは工業製品・部品の最適化だけが取り上げられているが、すでにドイツ規格協会はバイオミメティック・ロボティクスや、バイオミメティック・アーキテクチャといった標準の原案を作成しており、これらは早晩国際標準化のワーキングアイテムとして提案されてくるだろう。最適化のアルゴリズムはサイズや形より、今後はトポロジーが中心になっていく。ややもするとバイオミメティクスはニッチな世界の話と見られがちだが、このようなアルゴリズムが国際標準になったとしたら、広範な産業へ影響が及ぶことは必至である。日本の産業界にどのような影響があるのか、十分に検討を重ねて臨む必要がある。

また、今後国際標準としての展開の中で環境規制とどのように絡んでくるのか気になるところであり、一般的な工業製品が対象になることからものづくりシステムに直接影響を与えることも考えられる。今回の総会では、「持続可能性」についての標準化を進めることが決まった。持続可能性は9000や14000シリーズの根幹をなしてきたコンセプトである。バイオミメティクスの研究者が持続可能性を主張したいのはよく理解できるのだが、バイオミメティクス＝持続可能といった短絡的なマネジメント規格になると、日本の産業にとって悩ましい存在になることは必至である。日本の産業界に与える影響はいかほどになるのか、それを見極めたうえでの磐石な国際標準化活動の対応が求められる。

自律分散システムとサービスロボット

最後に、もう1つの生物模倣による最適化である動きの模倣について思うところを述べる。生物の動きから抽出される最も基本的な概念は「自律分散」である。自律とは、他からの支配・制約などの他律を受けず、自らの規範に従って行動できることである。例えば、イワシの群れやアリの隊列は、全体を統率する機能はないのに全体として目的を持って行動するシステムである。そのような自律した個体が相互に作用を及ぼし合いながら、全体として機能する系が自律分散システムである。

自律分散システムの開発は、生物の模倣を強く意識しながら1970年代後半から取り組まれ、制御ネットワークシステムの国際標準取得(ISO 15745)など、日本が強みを持つ分野である。注目すべきは、生物の動きの模倣から始まった自律分散システムが、これからのサービスロボット開発の基本になっていくことである。経済産業省は、日本のロボット産業の足元市場規模推計を発表、2025年頃になるとサービス分野は製造分野などを追い越し、2035年には5兆円の市場規模になると予測している。何でもかんでもバイオミメティクスではないだろうが、このような大きな将来マーケットもバイオミメティクスという基本概念で支えられていくことを認識しながら国際標準化に取り組むことは、日本のバイオミメティクスの研究開発とその産業化に大きな意義を持つだろう。

我々は、バイオミメティクスのような振興学際領域の研究開発や国際標準化動向などを、月刊の情報誌として電子版で無料配信している。お申し込みは、氏名と配信用メールアカウントを明記のうえ nano-pen-ml@aist.go.jp まで。記事は、ポータルサイト PENGIN、http://www.pengin.ne.jp/ からも購読できる。

科学技術政策におけるバイオミメティクス

(株)富士通総研　第一コンサルティング本部
社会調査室　シニアコンサルタント
長谷川　誠

本稿では、ヨーロッパ、アメリカ、日本のバイオミメティクスに関する政策について概説する。

ヨーロッパの動向

ヨーロッパでは、ドイツが他国に先駆けてバイオミメティクスの可能性に着目し、政策として研究開発や産業化を進めている。

ドイツでは、2007年に政府が発表した生物多様性国家戦略に、「生物多様性とそのイノベーションのポテンシャル」と題した項が設けられ、生物多様性をイノベーション創出に活用するアプローチの1つとしてバイオミメティクスが取り上げられている。

また、連邦教育研究省(BMBF)は、バイオミメティクスのアプローチで持続可能な発展を促進するために、研究助成プログラム「持続可能なプロダクトと技術のためのバイオニックイノベーション」(BIONA)において、3,000万ユーロを助成している。代表的なバイオミメティクスの産学官ネットワークであるBIOKONもBMBFの資金援助を受けて設立された。

フランスにおいても2012年に、エコロジー・持続可能開発・国土整備省が「グリーン経済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」を発表するなど、バイオミメティクスに着目している。

EUにおいては、第7次フレームワークプログラム(FP7)や、その後継プログラムであるHorizon2020を見る限り、現状バイオミメティクスを政策ツールとして取り上げるまでの動きには至っていないようである。ただし、BIOKONとドイツ技術者協会(VDI)が共同で、Horizon2020でバイオミメティクスの国際標準化活動への予算措置を行うこと、また、バイオミメティクス研究の予算枠を設けることを提言するという動きが出てきている。

アメリカの動向

アメリカでは、ドイツやフランスのように政策でバイオミメティクスを取り上げる動きは見られず、バイオミメティクスに関するコンサルティングや教育を行っているBiomimicry 3.8のような民間組織が主導する形となっている。ただし、国立科学財団(NSF)や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プロジェクトへの助成が行われている。

また、地域の取り組みではあるものの、2009年にサンディエゴ市が、サンディエゴ動物園、地域の4大学、イノベーション支援機関CONNECTとともに、バイオミメティクスの地域ネットワークBRIDGEを構築し、クリーンテックとしてバイオミメティクスを位置付け、クラスター形成を進めている。

日本の動向

バイオミメティクスに関する包括的なプロジェクトとしては、2012年からスタートした文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」が端緒となっている。同研究は、生物の技術体系に学び、低環境負荷型の新しい技術規範である「生物規範工学」を創成することを目的としている。

2013年からは環境省が、持続可能な社会を実現するための手段としてバイオミメティクスに着目し、その実用化と普及促進に向けて、検討に着手した。

さらに2014年には、総合科学技術イノベーション会議が発表した「科学技術イノベーション総合戦略2014」において、ナノテクノロジーのコア技術の1つとして「生体模倣を活用した新たなデバイスの要素技術開発、システム化」が盛り込まれた。また、特許庁がバイオミメティクスに関する特許出願の技術動向調査を開始した。

民間の活動としては、高分子学会バイオミメティクス研究会やモノづくり日本会議のネイチャーテクノロジー研究会、2014年に発足したNPO法人バイオミメティクス推進協議会がある。

◇　◇　◇

バイオミメティクスは、科学技術政策だけでなく、持続可能な社会への転換を図る世界的な動きの中で環境政策とも関連付けられている。ドイツでは、早くから政府が積極的に支援を行っており、それによって構築されたネットワークが国際標準化活動などの基盤になっている。2013年から我が国の政府も動き出しており、今後の支援拡大が期待される。

本稿は，２０１３年１０月から２０１４年１２月まで１５回にわたり，オーム社の雑誌「OHM」に連載されたコラムを基にしたもので，オーム社の了解を得て掲載するものです。

バイオミメティクス事始め
—生物多様性がもたらすパラダイムシフトと技術革新—

新学術領域「生物規範工学」領域代表・千歳科学技術大学　下村政嗣

第一回　今なぜ，バイオミメティクスなのか？
Mining the past for the future.

”Inspired, naturally”と題する Financial Times オンライン版記事（2011 年 8 月 12 日）は， San Diego 動物園が, “Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer”と題する報告書において「Biomimicry の分野が，米国において，15 年後に年間 3000 億ドルの国内総生産，そして 2025 年までに 160 万人の雇用をもたらす」と予測していることを紹介した。経済の流れを変える Biomimicry とは，何か？

バイオミミクリーは,” Biomimicry: Innovation Inspired by Nature” (2002 年) を記した Janine Benyus 女史の造語であり，その語源は「生物模倣」と翻訳される” 生物に学ぶ“科学技術を意味する Biomimetics（バイオミメティクス）である。バイオミメティクスという言葉は，シュミットトリガ（「OHM」誌の読者には説明不要）の開発者である神経生理学者 Otto Schmitt が命名したもので，1950 年代後半には論文に記載されている。1970 年代後半には，化学において Biomimetic Chemistry という世界的な学術潮流が展開された。そもそも”生物に学ぶ” ことは古くからある考え方であり，ナイロンやマジックテープ，新幹線のデザインなど, ”生物に学んだ” 工業製品は私たちの日常生活に広く浸透している。今世紀に入って，欧米を中心にバイオミメティクスが注目され，2011 年にはドイツで国際見本市が開催され，さらには昨年から国際標準化の動きが始まった。古くから言われてきた”生物に学ぶこと”が, 今なぜ，注目されているのだろう？

２０１３年８月日産自動車は，人が操作しなくても衝突を回避し自動走行できる試作車を発表した。自動運転車は，「究極の安全車」として自動車メーカーのみならずグーグルも開発をすすめている。日産のセールスポイントは，「ハチの複眼にヒントを得たレーザー技術や，魚群の行動パターンを生かした集団走行技術などを開発に生かした」ところにあり，2020 年の実用化を目指している。すでに日産は，群の中でぶつからない魚の行動パターンにヒントを得て集団走行するロボットカー「エポロ（EPORO)」を開発していた。

実は，日産のバイオミメティクスは，これに限らないのである。1995 年に帝人と共同して “モルフォテックス“という構造色発色繊維を開発している。その商品名が示すように，モルフォテックスは”生きた宝石“と呼ばれるモルフォ蝶の鱗粉の発色原理をヒントにした繊維であり，多層膜干渉によって発色することで，色あせのない光沢のある色調をもたらしている。屈折率の異なるナイロンとポリエステルを７０～９０nm の周期で６０層も積層した１５ミクロン径の繊維をつくる帝人の紡糸技術の背景には，絹糸を模倣してナイロンを開発した繊維業界に脈々と受け継がれてきた”生物模倣技術の DNA”のようなものがあるのかもしれない。

バイオミメティクスに対する世界の注目度の高まりは，発表された論文数に如実に現れている。今世紀に入ってバイオミメティクスが世界的に注目された背景には，ナノテクノロジーの急速な展開があると言って良いであろう。ナノテクノロジーの著しい発展によって走査型電子顕微鏡が普及し，生物の持つユニークな機能がその微細構造との関係で明らかになりつつある。博物学と言われている分類学，形態学などとナノテクノロジーとの連携が，欧米におけるバイオミメティクスの駆動力になっているのである。

２０１２年３月に San Diego で開催された SPIE(international society for optics and photonics)で基調講演をした San Diego Zoo Institute for Conservation Research の James Danoff-Burg 所長の演題は，”The Future is the Past？Mining the past for the future"であった。壮大なる“コンビナトリアル・ケミストリー”とでも言うべき進化適応の結果である生物多様性が，バイオミメティクスのネタであることを意味している。まさに温故知新である。

参考文献

“Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer”
http://www.sandiegozoo.org/images/uploads/BiomimicryEconomicImpactStudy.pdf
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，2010 年 5 月号

第二回　ムシは，世界を救う？
From Prometheus to Nausicaa

“今回は本気です”。２０１３年９月６日，世界中のアニメファンは驚き，そして失望を感じた。それ以上にショックだったのは，“文化人にはならない”という宣言。宮崎駿さんを講演会に呼べないものかと密かに企てていた筆者にとって，この発言は，ギャラ以上に心配なことになった。講演してくれないかも・・・。なぜ，宮崎駿さんに講演をしてもらいたいのか・・・それは勿論，不朽の名作「風の谷のナウシカ」でムシを主人公にした意図と意味を伺いたいからである。

バイオミメティクスにとって，ムシはまさに救世主なのである。はからずも，２０１３年９月８日に放映されたTBS「がっちりマンデー!!」は，“今　虫がアツい！新企画「虫ビジネス」トンボが！タマムシが！蚊が！ビジネスで大活躍！？”を特集した。本誌コラムでもおなじみの森永卓郎さんが“CM２の後で”紹介したのは，ナミブ砂漠に生息する甲虫であるゴミムシダマシ。この虫の背中は親水性と疎水性のパッチワークになっており，背中に集めた水滴を逆立ちして口に運び生き延びている。乾燥地や山岳地帯で水を捕集する材料の設計指針を与えるものと期待されているのである。ちなみに，ゴミムシダマシの水捕集機構を Nature 誌に紹介したのは，「眼の誕生――カンブリア紀大進化の謎を解く」で有名なロンドン自然史博物館の Andrew Parker 教授で，彼は古生物学者でありながらフォトニック結晶に関する国際会議では常連の招待講演者でもある。

昆虫は，壮大なる“コンビナトリアル・ケミストリー”とでも言うべき進化適応の結果である生物多様性の宝庫であり，温故知新の師でもある。昆虫に学ぶべきであることは，多くの科学ジャーナリストや生物学者が指摘しているところであった。ユニバーサルデザイン研究所の赤池学さんの「昆虫力」（2006 年）の帯には“昆虫パワーが人類を救う！”と明記してある。農水省の木村滋さんの「昆虫に学ぶ」（1996 年）では，“先端科学技術が解析した昆虫の機能を利用する試みがはじまった”。東京農工大学の晋後　一さんの「人が学ぶ　昆虫の知恵」（2008 年）では“昆虫が国家を救う”（かつて養蚕業がこの国の経済を支えた）という記述まである。「けんびきょうでわかった！いきもののスゴイ能力」（2007 年，戒能洋一，安立直樹）では“注射針にも応用された，刺されても痛くない蚊の針のしくみ”が紹介された。“エントモミメティクス（昆虫から学ぶ科学）”を提唱した藤崎憲治先生（京都大学名誉教授）の「昆虫未来学―「四億年の知恵」に学ぶ―」（2010 年）では“人は，虫なしでは生きられない！”と言い切っており，そして「アラマタ生物辞典」（2011 年，荒俣宏監修）によると，“生物に学び，ヒトは進化する！”のである。

欧米では工学の成果が出ていた（Peter Forbes の”The Gecko's Foot: How Scientists are Taking a Leaf from Nature's Book” (2006)「ヤモリの指　―生き

もののスゴい能力から生まれたテクノロジー」)。そして，日本でも温故知新が始まるのである。“工学系の方々へ昆虫の生きる仕組み（構造と機能）を「動作原理説明書」や「性能仕様書」，または「設計図」として提供し，研究開発のヒントとなることをめざす”昆虫の生きる仕組みを解説したハンドブックである「昆虫ミメティックス～昆虫の設計に学ぶ～」（2008 年，下澤 楯夫，針山 孝彦監修）が登場し，工学と生物学のマリアージュに向けて科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（JST CREST）が主催したシンポジウム『昆虫ミメティクスとナノマテリアル』の講演録を編集した「昆虫に学ぶ新世代ナノマテリアル」（2008 年，筆者監修）を世に問い，2010 年 6 月 8 日に国立科学博物館で開催された「次世代バイオミメティック材料の研究動向と異分野連携」ジョイントシンポジウムを基に起草した「次世代バイオミメティクス研究の最前線―生物多様性に学ぶ―」（2011 年，バイオミメティクス研究会編集，筆者監修）が出版された。これを機に，生物と工学の総合的な異分野連携による研究プログラム「生物規範工学」が 2012 年から始まった。

赤池学さんの「自然に学ぶものづくり：生物を観る，知る，創る未来に向けて」（2005 年）の帯には，“植物力，動物力，昆虫力，微生物力に学ぶ「時を経た技術」は，環境や人類を裏切らない”とある。生物多様性は，すなわち「高炭素世界の完全リサイクル型技術」がもたらした結果であり，生物の生き残る仕組みに学んで新しい技術規範（パラダイム）を体系化した「生物規範工学」を創生することは，「人間の技術体系」が内包し解決すべき喫緊の課題である，環境・資源ならびにエネルギー問題の解決に寄与し「持続可能性社会」の実現に資するのである。

あんたは火を使う
そりゃわしらも 少しは使うがの
多すぎる火は 何も生みやせん
火は森を一日で灰にする
水と風は
百年かけて森を育てるんじゃ
わしらは水と風の方が ええ
（風の谷のナウシカ　より）

第三回　日本人の自然観とバイオミメティクス
The whetstone for the wits

2013 年９月末，Euro Intelligent Materials 2013 に招待されてフランクフルトに向かう全日空の機内で，「ガリレオ X：シマシマの謎　動物の模様を“数学”で解く？」というビデオプログラムを観た。シマウマや熱帯魚などの生物の模様が，自己組織化的に形成されるチューリング・パターンであり，砂丘の風紋などの非生命現象と同じ原理で形成されることを判り易く解説した番組である。“田んぼのひび割れ”現象を使って“トンボの翅脈”のような模様を作った日本大学の中原明生先生の研究紹介があり，我々も嘗て微粒子集合体を使って自己組織化によるパターン形成と機能材料化を試みていたこともあって，繰り返して拝見した。トンボの翅脈のパターンは，分類形質に使われるほど種類によって厳密に決まっているが，“乾燥亀裂”によるパターン形成を制御することができれば，自己組織化によるバイオミメティック材料の作製に寄与できる。

生物の模様形成に関する数理科学的なアプローチとしてチューリングの拡散反応方程式が有名であるが，実は，それ以前に，寺田寅彦が“割れ目と生命”という論文において考察していることを知った。詳細は，大阪大学の近藤 滋先生の近著「波紋と螺旋とフィボナッチ: 数理の眼鏡でみえてくる生命の形の神秘」に詳しい。寺田の先見性には，改めて感服するとともに，“複雑系科学の予言者”の著作に触れることもまた，温故知新だと思うにいたった。

そんな折りに，寺田の著作を読み直す機会を日刊工業新聞社の村山茂樹記者が与えてくれた。日刊工業新聞では，２０１３年８月１４日から毎週水曜日に「自然に学ぶモノづくり」を１３回にわたって連載した。９月４日の記事は，「ナノテク進展　走る欧米　日本は二周遅れ」という見出しであった。日本のバイオミメティクス研究開発の現状については，機会あるたびに周回遅れだと評してきたのであるが，各所で取材をした村山記者の目にはもはや二周回に映ったようである。村山記者から，“生物や自然に調和し学ぶ“ことは日本人が最も得意とするところなのに何故周回おくれなのか？と問われ答えに窮したこともあり，寺田寅彦の「日本人の自然観」（東洋思潮，昭和十年十月）に教えを請うことにした。

桜の花に歓喜し，虫の音色を愛で，落葉に涙する，そんな日本人の自然感の根底にあるものは，“無常感”である。温帯性の島嶼（とうしょ）である日本列島は，四季の変化と豊かな自然の恵みを受ける一方，毎年襲来する台風と，時折やってくる地震と津波による壊滅的な破壊があっても再生してきた。日本人は，石作りの頑丈な構造物を作って自然に対峙するのではなく，破壊されてもすぐに再建することができる“木と土と紙”の構造物を選んだ。これらの素材は日本の風土に適した再生可能素材であり，強度や調湿機能などの観点から，バイオミメティクスの分野でも注目度がアップ

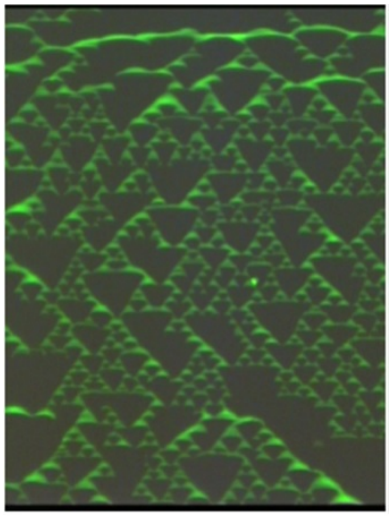
している。

“無常観”は日本の科学技術にいかなる影響を与えたであろうか。いみじくも寺田寅彦は，「日本において科学の発達がおくれた理由はいろいろあるであろうが，一つにはやはり日本人の以上述べきたったような自然観の特異性に連関しているのではないかと思われる。（中略）全く予測し難い地震台風に鞭打たれつづけている日本人はそれら現象の原因を探究するよりも，それらの災害を軽減し回避する具体的方策の研究にその知恵を傾けたもののように思われる。おそらく日本の自然は西洋流の分析的科学の生まれるためにはあまりに多彩であまりに無常であったかもしれないのである。」と論じている。

そして，周回おくれの原因はもう一つあるように思えてならない。それは，富国強兵策以来の産業構造と学術体系，そしてその背景にある縦割り行政である。縦割り分野別の選択集中は，いち早く近代化するためには有効であるものの，今となっては障害である。Euro Intelligent Materials 2013 におけるセッション責任者が昆虫学者であることに見られるように，ヨーロッパにおけるバイオミメティクス展開の背景には，生物と工学のシームレスな“異分野連携”がある。学術に垣根がないことが，近代国家の証である。我が国のバイオミメティクス成功の鍵は，自然史学を中核とする生物学とモノ作りや情報に関わる工学の総合的な異分野連携であり，周回遅れを脱した時に，この国の近代化が達成される。アジアにおける近代化国家たるには，異分野連携に基づく総合力が問われるのである。2012 年 6 月のガリレオ X で「バイオミメティクス　生物模倣が拓く未来」が放映された。

“愚者は経験に学び，賢者は歴史に学ぶ（ビスマルク)”・・・もって他山の石とせよ

微粒子集合体が形成するシェルピンスキーガスケット構造　貝殻の模様に似ている
（作製観察：澤田石哲郎博士）



第四回　博物館と機内誌とバイオミメティクス
Klug kopiert

前回に続き，機内の話。

２０１３年 10 月 29 日にバイオミメティクス国際標準化 TC266 の第三回総会がプラハで開催された。日本からは，Knowledge Infrastructure for Biomimetics を幹事国として提案をしたこともあり１１名が出席した。プラハ会議の前に，花粉画像データベースを作成しているウィーン大学植物園を訪問，昆虫，鉱物の膨大なコレクションで有名な国立自然史博物館にも足をのばした。生物多様性や絶滅危惧種，地球環境問題などのテーマ展示の一角に”Lernen von der Nature”（自然から学ぶ）という常設ブースがあり，建築，材料，センサーなどの分野におけるバイオミメティクスの展示があった。バイオミメティクスの常設展示は，残念ながら日本の博物館では未だないが，ヨーロッパでは，ウィーンに限らない。ヨーロッパ最大の科学博物館であるミュンヘンのドイツ博物館にもバイオミメティクスの常設展示がある。博物館はまさに温故知新の場なのである。余談だが，ドイツ博物館の W.Heckel 館長は物理学者で，著者が在外研究でミュンヘン工科大学に滞在した時には学生だったこともあり，2011 年にドイツ博物館を訪問した折りには館長自ら案内してくれた。

2013 年 4 月，世界最大規模の見本市であるハノーバー・メッセの会場で TC266 議長国のドイツ規格協会（DIN）との打ち合わせがあり，ドイツのバイオミメティクス・コンソーシアム BIOKON の展示や FESTO 社のトンボ型ロボット BionicOpter のフライトデモンストレーションを見る機会を得た。翌日，フランス規格協会（AFNOR）との打ち合わせでハンブルグからパリに向かうルフトハンザ機内で，何気なくめくった機内誌 Lufthansa Magazin に眼が釘付けになった。”Learning from nature”と題するルフトハンザの技術レポートである。エアバス A340 の機体に Fraunhofer 研究所が開発した“サメ肌リブレット”コーティングを施し燃費向上のテストを２年間にわたって実施する。“サメ肌リブレット”構造とは，マイクロメータ・スケールの周期的な溝構造で流体抵抗を減らすことが知られており，2008 年の北京オリンピックで多くの世界新記録を出した英国 SPEED 社の競泳水着レーザー・レーサー（LZR RACER®）に採用され，かつて 3M 社が製造した“リブレット・フィルム”は歴史あるヨットレース，アメリカスカップで使われたこともある。エアバス社は小型機Ａ320 に“リブレット・フィルム”を貼って燃費向上の実験をしていたようであるが，ついにルフトハンザは大型機 A340 に適用しようとしているらしい。

プラハ会議のための訪欧においても，ルフトハンザ機内誌に驚かせられることになる。産総研の関谷瑞木氏（TC266 の Drafting Committee メンバー）は，帰国に際しルフトハンザでフランクフルトに向かい，Lufthansa Magazin に”Bionik, Klug Kopiert”（賢く真似る）と題する 11 ページにわたる記事を見つける。リブレット構

造による低燃費化をはじめ，航空機の骨格構造の強度化・軽量化，撥水材料，ハニカム構造，など航空機に関連するバイオミメティクスの紹介である。”No large aircraft is yet able to fly like a dragonfly”という文章とともに，FESTO 社の BionicOpter の勇姿が掲載されている。実は，2008 年にはアメリカン航空の機内誌 American Way にも”Inspired by Nature”という記事が掲載されていた。

2010年10月には国立科学博物館では“自然に学ぶネイチャーテクノロジーとライフスタイル展”が開催された。日本科学未来館，兵庫県立人と自然の博物館，赤穂市立海洋科学館，北海道大学総合博物館，などでも特別企画や展示を行い，2014 年 3 月には科学技術館でも企画している。ANA や JAL の機内誌にも載ると嬉しいのであるが。ちなみに，JST サイエンスチャンネルの“エコフロンティア”というバイオミメティクス番組はシンガポール航空で放映されたらしい。

“真に独創的な人間のみが，他人から借りることを知っている”　エマーソン

ウィーン自然史博物館の展示（千歳科学技術大学 O.Karthaus 教授撮影）

第五回　バイオミメティクスのロゴと・・・ゴロ
Bridge over troubled water

日本のエアラインの機内誌でもバイオミメティクスの話題をとりあげてくれないかなあ〜と妄想していたら，全日空の昔のロゴマークがレオナルド・ダ・ヴィンチの考案したヘリコプターだったことを思い出した。San Diego 動物園の経済レポート「Global biomimicry efforts. An Economic Game Changer」には，Da Vinci Index という経済指標があり, 右肩上がりのカーブを示している。なるほど, Finantial Times をして“バイオミミクリーは産業革命に匹敵する技術革新である”と言わせた根拠は，Da Vinci Index だったのだ。レオナルド・ダ・ヴィンチが「鳥の飛翔に関する手稿」や「パリ手稿」において，鳥の飛翔メカニズムの考察をもとに様々な飛行機械の設計をしていることは，温故知新である。ルフトハンザ，JAL，エアチャイナ，ガルーダインドネシア航空，シンガポール航空等々，多くのエアラインが鳥のデザインをロゴマークにしている。ANA がダ・ヴィンチのヘリコプターをロゴマークにしたのは，その前身が日本ヘリコプター輸送株式会社だったからだ。

２０１３年１０月，パリの北 50km に位置する中世の古都市 Senlis 市に，バイオミメティクス研究拠点 CEEBIOS （Centre Européen d’Excellence en Biomimétisme de Senlis）が設立された。１０万平米におよぶフランス陸軍第 41 通信連隊の駐屯地跡地に，約千２百万ユーロを投じて，研究施設，ホール，ビジネスセンター等を含む総合的な施設の整備が始まろうとしている。CEEBIOS のロゴマークは，色違いの４羽のカワセミだ。日本の新幹線が，その空力デザインにカワセミを学んだことに因んでいる，と Senlis 市の関係者から聞いた。２０１４年2月 12 日に札幌で開催する Joint international symposium on“Nature-inspired Technology (ISNIT) 2014” and“Engineering Neo-biomimetics V”には，CEEBIOS の責任者である Senlis 市副市長の Francis Pruche 氏を招待している。CEEBIOS にはパリの自然史博物館館長も関わっていることも申し添えておきたい。CEEBIOS 設立の背景とフランスにおけるバイオミメティクスの動向については，産業技術総合研究所ナノシステム研究部門ナノテクノロジー戦略室の情報サイトである”PENGIN-PEN Global Information Network”に帝人の平坂雅男氏が寄稿した「フランスにおけるバイオミメティクス」に詳しい。阪急コミュニケーションズが定期発行している月刊雑誌 Pen とは全くの別物なので，ネットで検索する際にはご注意願いたい。ちなみに，PEN の命名は”Public Engagement with Nano-based emerging technologies”の頭文字を使った，一種の語呂合わせである。

欧米では自治体や博物館，動物園がバイオミメティクスに積極的に関わっている。SanDiego 動物園では 2009 年に，BRIDGE (Business, Research, Innovation, Design, Governance, and Education) という，SanDiego Zoo Global, SanDieg

市，California 大学 SanDiego 校（UCSD），SanDiego 大学，SanDiego 州立大学，Point Loma Nazarene University，CONNECT（1985 年に UCSD が設立した，SanDiego 地域における研究の商業化及びハイテク・ベンチャー企業の設立支援のためのネットワーク組織）を中核とするネットワークを設立し，2012 年にはさらに企業や大学の参画を得て，産官学連携組織である Centre for Bio inspiration を設置している。

BRIDGE は，語呂合わせとしては，まことにセンスが良い。Bio-based Industries Initiative というヨーロッパのバイオ関連企業のコンソーシアムが，持続可能性と脱石油社会に向けた Horizon 2020（EU の 800 億ユーロの研究・イノベーション投資）への提案書の表紙のロゴマークは“bridge2020”であり，”Biobased and Renewable Industries for Development and Growth in Europe”の語呂合わせである。

ふと，サイモンとガーファンクルの「明日に架ける橋」の一節が脳裏をかすめた。日本のバイオミメティクスにおける”bridge”と”troubled water”は，何なのであろうか？

“自然は暗号に満ちている”　カール・ヤスパース
未来への架け橋は自然が与えてくれる，かもしれない。

第六回　バイオミメティクスは持続可能性の救世主
First come, first served

“バイオミメティクス ISOー日本に打撃，独の提案が委員会原案に”と題する日刊工業新聞の記事（2013 年 12 月 18 日付け，村山茂樹記者）が，関係者の中で波紋を呼んでいる。「国際標準化機構におけるバイオミメティクスの規格作りで，ドイツの提案内容が日本のモノづくりに影響を与える可能性が出てきた。生物の形を製品に最適化するアルゴリズムの標準化を検討する作業部会（WG3）で，日本がほとんど活用していない手法が承認，委員会原案になることが決まったからだ。このまま標準化されれば日本の産業界はバイオミメティクス分野で競争力を失うことになりかねない。今後の巻き返しが必要になっている。」

本コラムでも紹介しているように，2011 年にドイツが提案したバイオミメティクスの国際標準化の議論は，スピード感を持って進められている。国際委員会は既に３回開催され，２０１４年 10 月に予定されているベルギーでの国際委員会では，議長国ドイツが提案した３つの WG の議論がまとめられそうである。BIOKON とドイツ技術者協会 (VDI)が協働で作成してきた国内のガイドラインを基にして，ドイツ規格協会（DIN）がジュネーブの国際標準化機構にバイオミメティクスに関する新しい技術委員会（TC）設立の提案を行ったのは 2011 年 5 月である。日本工業標準調査会(JISC)の担当である経済産業省産業技術環境局環境生活標準化推進室から，日本が TC に参加すべきかどうするかを問われた時，正直なところ“バイオミメティクスで何を標準化するのだろう？”と思った。当初，イギリスはドイツ提案に反対していたし，アメリカは様子見であった（結果的には，イギリスは投票権のある P メンバーとして TC に参画しており，オブザーバーメンバーであるアメリカが P メンバーになるのも時間の問題だ)。

そもそも，ドイツが提案をした背景にはなにがあるのか？ドイツの本音を知りたくて，2012 年 3 月に産業技術総合研究所ナノシステム研究部門の阿多誠文氏（WG3 の日本の担当幹事）とともに，Dusseldorf 国際空港に隣接する VDI のオフィスを訪問した。Dr. Ljuba Woppowa，Dr. Heike Seitz（BIOKON に出向）と意見交換を行うなかで，「健全で責任あるバイオミメティクスの研究開発と産業化のための有益な指標」がこの分野の健全な発展と，さらには持続可能性社会の実現に向けた技術革新にとって不可欠である，という確固たるポリシーを読み取ることができた。”From standards for fireworks to sustainable development – ISO tackles new areas” と題する ISO の Web News（2012 年 7 月）でも，持続可能性に向けた技術革新を担うものとして ISO/TC 266 - Biomimetics の新設が紹介された。

ベルリンで開催された第一回国際委員会において，ドイツ提案の三つの WG と事

務局をサポートするタスク委員会が設置され，パリで開催された第二回国際委員会で日本提案の WG4 が設置された。
WG1 “Terminology and methodology”（幹事国　ドイツ）
WG2 “Structures and materials”（幹事国　ベルギー）
WG3 “Biomimetic structural optimization”（幹事国　ドイツ）
WG4 “Knowledge infrastructure for biomimetics”（幹事国　日本）
ここで申し添えておきたい事は，WG4 の提案と承認が，安倍内閣の成長戦略中短期工程表の数値目標である「国際標準化機関における幹事国引受件数を，2015 年末までに世界第 3 位に入る水準（95 件）に増やす」ことに，はからずも貢献していたことである。
　余談であるが，Soundcritters という楽曲試聴サイトに，Biomimetics という曲を見つけた。ワーグナーを思わせる荘厳な冒頭は温故知新である。配信元は曲名について，“Biomimetics is a great mix between epic orchestra with choir and massive synthesizers and dubstep elements” と説明している。アーティストにとっても”バイオミメティクス”は異分野連携＝great mix のイメージが強いようである。ISO において我が国が巻き返しを図るためには，早急に産官学の連携体制を組織する必要がある。
“歴史は繰り返す。一度目は悲劇として，　二度目は喜劇として”（マルクス）・・・轍を踏まないためにも，まずは隗より始めよう

ISO 本部が隔月で発行している ISO Focus（issue #100）に“Biomimetics boom calls for standards”と題した Ljuba と Heike へのインタビュー記事が掲載されている。

第七回　バイオミメティック・ソムリエ？
You are what you eat

私事で恐縮であるが，還暦を迎え“赤い”グッズを頂戴した。還暦の赤は，産着の赤であり，赤には魔除けの意味があるのだそうだ。還暦祝賀会では，Chateau Smith Haut Lafitte の 2006 年の赤をはじめ, いろんなワインを楽しませて頂いた（感謝）。1982 年にライン河畔の古都マインツに滞在したこともあって，ワインは赤よりも白が馴染み深い。同時期にマインツ大学にいた大野弘幸さん（現東京農工大学工学部長）は，いつのまにか赤ワインにも造詣が深くなり，先般，工学部長室で，蘊蓄とともにいろんな赤ワインをごちそうになった（感謝）。酔った勢いで, “ワインの成分は判っているのだから，科学的に銘柄を当てることはできるはず”, とソムリエには叱られるような議論になり, “ケミカル・ソムリエ（大野発案）”の研究プロジェクトを妄想するにいたった。

ワイン組成は複雑多様で熟成の仕方でも変わってくる。銘柄が判るセンサの開発は挑戦的な課題である。“プリンと醤油でウニの味がする”, で有名な九州大学大学院システム情報科学研究院の都甲潔さんは，生体膜を模した人工の脂質膜を電極に貼り付け, 味成分の溶液に浸した時に起こる膜電位変化で味を感知する，「人工の舌」ともいうべき味覚センサを開発した。脂質の種類を変えることで，塩味，酸味，苦味，甘味，うま味，に特異的かつ選択的に応答する脂質膜を作り，それぞれの電位変化のパターンによって，どんな味がするのかを知ることができるのである。都甲センサの開発当時，筆者も人工脂質膜のパイオニアである国武豊喜教授の研究室に居て，都甲さんと国武先生の共同研究を垣間みていた。都甲センサは, 舌のバイオミメティクスであり, 温故知新である。

神戸大学理学研究科の尾崎まみこさんは，同じ巣にいる働きアリが，仲間と別の巣の“敵”を化学的に識別していることを明らかにした。「巣ごとに特徴的な体表炭化水素の混合パターンを仲間と共有するアリは，遭遇相手を特有な化学感覚子で触れ，同巣仲間と判断すれば寛容に振る舞い，異巣の個体が体表にまとう炭化水素パターンを感知すると攻撃行動を発動する」のだそうである。同じ巣に居ると，同じものを食すので，似通った匂いを身につけるようなのである。ちなみに，働きアリの敵味方識別能に比べ雄アリのそれは，少し劣るようである。外食が多いヒトの雄も，そうなるのだろうか？

喰ったものは，そのまま身に付く？のか。本当に, “赤い鳥小鳥なぜなぜ赤い　赤い実を食べた”なのであろうか。フラミンゴの色は餌由来だそうだ。一方，健康サプリメントであるサメ軟骨コラーゲンやコンドロイチンを飲んでも，決してサメにはならない。野菜ばかりを喰っていても，ジュゼッペ・アルチンボルド（マニエリスムを代

表するイタリアの画家）が描いた「四季」（野菜や果物で構成された肖像画）のような顔にはならない。ましてや，“ヒトを喰って”も，歌川国芳の「人かたまって人になる」にはなりはしない。フグ毒テトロドトキシンは，餌となるヒトデ類，貝類による生物濃縮だと言われている。気仙沼湾のホタテが，貝毒検出によって出荷規制された。東日本大震災の津波で，海底土中にあった貝毒プランクトンの休眠胞子が巻き上げられたものとみられている。毒は，身に付くようである。

ファッション誌 VOGUE のウェブ版（2012 年 5 月）に，Biomimetic cosmetics という記事を見つけた。ちょっと刺激的な写真に引き続き，”It is an absolute novelty: biomimetic cosmetics, and it's the first brand to talk about it in the world.”で始まる記事は，”And the brand’s. Starting from Biomimetics.”で結ばれている。すでにロレアルは，バイオミメティクスを冠したヘアケア商品を上市しているようである。バイオミメティクスは，毒では困るが，身に付いて女性が綺麗になるのは良い事である。

都甲さんと同じく，尾崎さんも九州大学の同期（理学部生物学科）である。味覚を多変数解析するところは，情報エレクトロニクスの研究者の発想である。生物学者のアプローチは，やはり，化学受容蛋白を見つけるところから始まるのだ。これは，文化の違いである。

白鳥は哀しからずや空の青海のあをにもそまずただよふ（若山牧水）　　たまには静かに酒飲みの孤高を

還暦，そして，六十而耳順（「論語」“為政”）

第８回　バイオミメティクスは, “似て非なるもの”？
Nature & technology will work as one ?

北海道大学総合博物館で毎月，バイオミメティクス市民セミナーを初めて２年になる。２０１４年３月９日に開催した平成２５年度最後の市民セミナーは，神戸大学の北條賢さん（前回のコラムで紹介した尾崎まみこさんの共同研究者）による「シジミチョウ，その騙しのテクニック」。シジミチョウは，モルフォ蝶のように派手で目立ちはしないが，日本ではよく目にする小さな蝶である。シジミチョウの幼虫の多くはアリと共生するのだそうである。シジミチョウの幼虫は蜜を分泌し，アリは蜜をもらい天敵から幼虫を守る。アリとアリマキの関係のようだ。ところが，クロシジミはもっと“したたか”である。クロオオアリはクロシジミ幼虫を自分の巣の中へと運びいれ, 餌を与え, 体を掃除し, 糞の処理までする。アリから口移しで給餌されるわけだから，クロシジミ幼虫の体表にある炭化水素の成分はクロオオアリと同じである。つまり，“仲間”なのである。そして，クロシジミはアリの巣から羽化するのだそうだ。クロシジミの蜜にはトレハロースとグリシンが含まれており，アリにとっては“麻薬”のような作用があるようで，時にはアリの幼虫の世話を放棄してでもクロシジミの世話をする。これはもはや，共生ではなく寄生なのである。

北條さんによると，かかるシジミ蝶の行動は“擬態”なんだそうである。擬態というと，補食のために体の色や形をランの花に似せたハナカマキリや，花弁の形をメスバチの姿に擬してオスバチを誘い受粉をさせるハンマーオーキッドというラン，などが有名である。擬態は，英語で mimicry。その語源は mime。mime は，パントマイムのマイムである。pantomime は，"panto"（すべてを） "mimos"（真似る），という古代ギリシャ語が語源なのだそうだ。ムシが花を真似，花がムシを真似る。“擬態”とは, 真似るものと真似られるものとが, “似て非なるもの”なのである。即ち, 生物（bio）を真似る（mime）バイオミメティクス（biomimetics）やバイオミミクリー（biomimicry）は，生物とは“似て非なる”人工のもの，と考えるべきなのである。

現在，バイオミメティクスの国際標準化（ISO/TC 266）において，spider silk の取り扱いが問題になっている。蜘蛛の糸は，絹糸よりも強度や伸縮性に優れているので注目はされていたものの，大量生産が困難であった。最近，遺伝子工学によって蚕や大腸菌に蜘蛛の糸を作らせることが可能となり，spider silk は一躍有名になり世界的にも注目を集めている。国際標準化で議論になっているのは，spider silk がバイオミメティクスなのかバイオテクノロジーなのか，という点である。国際標準化ではまず，バイオミメティクスの定義が議論される。当初のドイツ提案では，spider silk はバイオミメティクスとバイオテクノロジーのボーダーラインと位置付けられていたのであるが，プラハで開催された第三回国際委員会において，バイオミメティクスだ

と主張を翻したのである。遺伝子を組み替えた大腸菌に作らせているのであるから，どう考えてもバイオテクノロジーなのであるが，何故かドイツは頑である。ちなみに，バイオテクノロジーの国際標準化委員会（ISO/TC 276）の設置はバイオミメティクスよりも遅く，2013 年であり，議長国はドイツである。

　バイオミメティクス（biomimetics）は，その語源からも判るように，生物の進化適応の戦略に学び（温故知新），人間の叡智で新たなエンジニアリングを創成しようとするものなのであり，それゆえに生物とは“似て非なるもの“を作ることになる。絹糸の模倣であるナイロンが，“似て非なるもの”であることは明白である。むしろ筆者は，biomimetics と bioinspired の違いを気にしていた。どちらも生物の生き様に触発されて“似て非なるもの”を作るのである。先般，産業技術総合研究所ナノシステム研究部門の山口智彦部門長と懇談したおりに，biomimetics は“生物が生きるパラダイムを明らかにしなければならない”が，bioinspierd は“生物に触発された人間の勝手な妄想”でも良い，とアルコールも入っていたこともあって，少々過激な結論を得た。鳥を見て飛行機を作るのは bioinspiration であり，biomimetics ではない。トンボとオスプレーでは，そのホバリングのメカニズムは，全く違うのである。Lufthansa の機内誌に曰く，　”No large aircraft is yet able to fly like a dragonfly”.

青は之を藍より取りて藍より青し。氷は水之を為り水より寒し。（荀子）

“像”の愛称を持つバイオインスピレーション
手前の ANA 機には“Inspiration of JAPAN”の“タグライン”が施される

第９回　バイオミメティクスは，赤い糸？
Marketing of Biodiversity to Sustainable Economy

バイオミメティクス推進協議会を NPO 法人として発足することにした。我が国のバイオミメティクス産業振興の求心力となる産官学連携組織を目指す。従前より，ドイツの BIOKON のような産学官コンソーシアムを構想していたが，国際標準化の議論が煮詰まり国内認証機関の準備をしなければならないこと，「ナノスーツ法」という新しい電子顕微鏡観察法の普及を図ること，さらには，膨大な生物学の情報を工学に技術移転するプラットフォームとしての“バイオミメティクス・データベース”への要求が高まったこともあり，協議会の設置を急ぐ事にした。

「ナノスーツ法」とは，高真空下において生きた状態で生物の生態観察を可能とする“非常識な”電子顕微鏡観察技術であり，浜松医科大学の針山孝彦教授を中心に生物学と工学の共同研究によって開発された。この技術の発見は，ウジ虫が走査型電子顕微鏡の真空チャンバーの中で生きていたことに端を発する。ウジ虫の表面には“バイオフィルム”と称される“ネバネバ”が分泌されており，保護膜として作用している。顕微鏡観察時の電子線照射によって“ネバネバ”が重合し，高真空下においても乾燥に耐えることができる保護フィルムが形成されたのである。“ネバネバ”を真似た“バイオミメティック・バイオフィルム”をボウフラに塗り，プラズマ照射した後に高真空下で走査型電子顕微鏡観察をすると，ボウフラは干涸びること無く生きており，観察後に水にもどすと，ちゃんと蚊に羽化したのである。

ちなみに, “バイオフィルム”という用語は，下水道等に発生する“ぬるぬるしたバクテリアの集合体”や，歯垢のもとになるプラークなどに使われており，あまり良いイメージではないこともあって, “バイオミメティック・バイオフィルム”という筆者の提言は退けられた。最終的には宇宙服をイメージした“ナノスーツ”と命名され，生きた状態で生物の高解像度電子顕微鏡観察を可能とする画期的な手法として米国科学アカデミー紀要に掲載された。“ナノスーツ法”は，生物表面の真の構造を知らしめてくれるものであり, “バイオミメティクス・データベース”構築にとっても極めて重要である。

“バイオミメティクス・データベース”は，生物学から工学への技術移転を行うための基礎基盤である。生物多様性に基づく膨大な量のデータから，如何にして，工学者が使えるデータを系統的かつ効率的に抽出すればよいのだろうか。生物学の知識のない工学者にとって，膨大な博物学情報からバイオミメティクスに関する知識やヒントを得ることは，たやすい事ではない。博物館や国際的な生物学データベースが有するテキスト情報は，生物の学名などの分類学的情報であり，その検索には少なからぬ専

門的知識が要求される。一方，画像情報はテキスト情報に比べると，直裁的である。画像イメージは，専門性に関わらず，インスピレーションを誘発しやすいのである。北海道大学の長谷山美紀教授が開発した Image Vortex という検索システムは，類似画像をクラスター化する画像検索技術であり，さらには，画像類似性から「気づき」を見出す「発想支援型データベース」をもたらす。現在，国立科学博物館や山階鳥類研究所，北海道大学綜合博物館などが収蔵する昆虫，魚類，鳥類，植物などの電子顕微鏡画像データベースによって“長谷山エンジン“の有効性が確認された。今後は，バイオミメティクス推進協議会がプラットフォームとなって，深海生物，農業，材料や機械，環境などの様々な分野のデータベース，学会や学術文献情報等ともリンクする。生物の多様性と進化適応の歴史を現代社会の喫緊の課題である持続可能性経済に繋げる，温故知新のプラットフォームなのだ。

　推進協議会の発足を急いだもう一つの理由は，近江八幡商工会議所のスピード感ある活動だ。琵琶湖を擁する滋賀県は環境意識が高く，経済界，自治体，大学等のてこ入れでアスクネイチャー・ジャパンを設立し，フランス Senlis 市に設立された CEEBIOS（本コラム No. 5 で紹介）との連携も始まっている。本年２月に Senlis 市の Francis Purche 副市長を招いた会議の懇親会で，老舗菓子屋『たねや』で食した近江八幡名物“赤こんにゃく”のオリーブオイルかけは美味であった。近江八幡には，赤い糸こんにゃくもある。

利は余沢　三方よし。売手よし，買手よし，世間よし　（近江商人の経営哲学）

第１０回　バイオミメティクスは近代化の証？
Biomimetics is a great mix of taxonomy and nanotechnology.

２０１４年４月に千歳科学技術大学に異動した。国際空港がある（正確には，“隣にある”）大学で，キャンパスに隣接する美々（びび）自然公園には，カシワ林，千歳湖など豊かな自然があり，ラムサール条約の登録湿原であるウトナイ湖に注ぐ美々川の源流もある。国立科学博物館の野村周平博士によると，昆虫採集ポイントの一つであるそうだ。早速，フィールドワーク付きの「昆虫の飛翔に関するワークショップ」を開催することにした。

透明な翅を持つセミの写真撮影が難しいことから，かねてより野村氏は，透明なセミの翅が無反射性であることを指摘していた。北海道大学の下澤楯夫名誉教授は，透明な翅を持つエゾハルゼミの翅表面が，直径 100 nm，高さ 250 nm 程のナノパイルで覆われていることを見出した。可視光の波長よりも小さなナノパイルが配列した構造は，蛾の複眼表面にもあり“モスアイ構造”として知られる無反射性を示す。蛾の眼が黒いのは，光が反射せずに効率良く眼の内部に入るためである。だから，蛾は，夜でも飛翔できる。エゾハルゼミは保護色を持ったアブラゼミとは違い，下地の木肌を透して見せることでカモフラージュしているようなのだ。

ところが，アブラゼミの不透明な翅の表面にもナノパイル構造が見出された。表面の微細な凸凹構造が撥水性を増強することは，Cassie-Baxter 理論として知られており，蓮の葉が水を弾く現象の本質である。名古屋工業大学の石井大祐助教は，セミの翅の水滴の接触角が 160 度以上であることを測定した。超撥水性である。陸棲の昆虫にとっては，雨や夜露に濡れることは危険なのである。眼も翅も濡れては困るのだ。

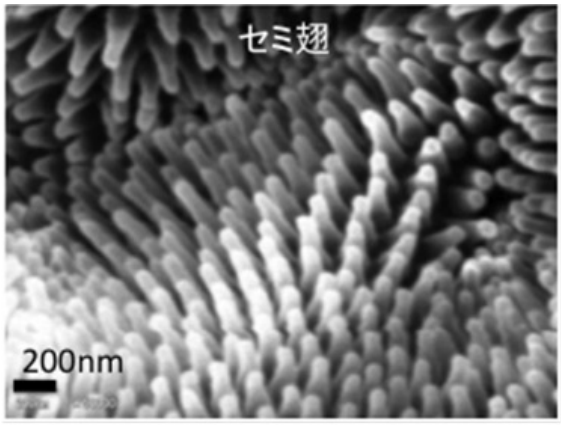
セミやカメムシなどは，後翅の飛翔筋が退化しており，“半翅目”と呼ばれる。前翅の後縁と後翅の前縁には連結部位があり，飛翔時には前胸の飛翔筋が２枚の翅を駆動する。２枚の翅は，後翅の前縁にある湾曲した鉤を前翅の後縁にある長い溝に引っ掛けて連結される。２枚の翅の根本は胴体に沿って前後数 mm で離れているので，羽ばたく時には後翅の鉤は前翅の溝に沿ってカーテンレールのフックのように動く。鉤の往復運動には摺動摩擦が発生する。下澤名誉教授は，摺動部である溝の表面がナノパイルで覆われていることを見出した。微細な凸凹構造は，鉤と溝の実効接触面積を小さくし，摺動摩擦が低減される。

昆虫の脚の先端は“ふ節”と呼ばれ，微細毛が密集している。表面積が大きい。ヤモリの脚先も同じで，ピーター・フォーブスの著作「ヤモリの指―生きもののスゴい能力から生まれたテクノロジー」（早川書房）でも紹介されているように，van der Waals 力と呼ばれる分子間に働く極めて微弱な力が，表面積が大きい故に集積され，壁や天井を歩くに十分な吸着力が生じるのである。細かい毛が壁の表面に吸着するの

である。もし，壁の表面の凸凹が，“ふ節”の毛の先端よりも小さかったらどうなるだろう。毛先と壁の実効接触面積は小さくなり，セミの翅の摺動部のように低摩擦になる。ナノスケールの凸凹がムシを滑らせることは，物質材料研究機構の細田奈麻絵博士も指摘している。浜松医科大学の針山孝彦教授は，アブラゼミの翅を敷き詰めたシートをつくり，その上にアリを載せて歩けるかどうかを調べた。案の定，アリは歩けなかった。そこで，三菱レイヨンの魚津吉弘氏の協力を得て，ディスプレイ等の反射防止を目的に開発したモスアイ構造フィルムである“モスマイト”でも同様の効果があることを確認した。誘蛾灯や食品フィルムへの応用が期待される。

　この成果は，北海道大学綜合博物館において定期的に開催している“バイオミメティクス画像検討会”での異分野連携が背景にある。画像検討会では，いわゆる博物学者や生物学者，材料学，電子工学，情報科学などの工学系研究者が，ムシや植物の電子顕微鏡画像を見ながらブレーンストーミングを行っている。まさに温故知新である。バイオミメティクスの新潮流が，博物学とナノテクノロジーの連携によるものであることは，ピーター・フォーブスの著作にも詳しい。かかる異分野連携がバリアフリーにできる国は，さほど多くはないのである。我が国での博物学とナノテクノロジーの連携は，緒に就いたところだ。異分野連携は，近代化の証でもある。

“恋に焦がれて 鳴く蝉よりも 鳴かぬ蛍が 身を焦がす”・・・ムシの恋にも模倣のネタが



エゾハルゼミの翅のナノパイル構造（撮影：下澤楯夫北大名誉教授）

第１１回　バイオミメティクスは総花的？
It’s a small world.

エコロジカル・エコノミクスという経済理論があるそうだ。Robert Costanza という生態学者が提唱したことを滋賀県立大学副学長の仁連孝昭教授から伺った。仁連先生は，経済学者にして生態学者であり，本コラム 2014 年 6 月号で紹介した「アスクネイチャー・シャハン」の理事長でもある。生態系というと，つい，食物連鎖ヒエラルキーを思い浮かべるが, “食うか食われるか“だけの単純な”ピラミッド型“の関係ではなく，複雑に入り組んだ”ネットワーク“として捉えるべきなのである。生態系は自己組織的な調節によって恒常性（ホメオスタシス）を保っており持続可能である。かかる生態系ネットワークに学ぶことで新しい経済システムを考えよう，というのがエコロジカル・エコノミクスのようである。

バイオミメティクスでは，ついつい個々の生物の構造や機能の模倣に関心が向かい勝ちであるが，生物が孤立して生きている状況は極めて希である。ドイツのバイオミメティクスのリーダーである Gorb 先生は, ご主人が昆虫, ご夫人が植物の専門家で, 昆虫と植物の攻防に学ぶバイオミメティクスを展開している。昆虫の脚先にある符節には微細毛があり van der Waals 力で植物の表面を歩くことができるのであるが, 食虫植物であるウツボカズラの壷状の捕虫器の表面は符節の微細毛の先よりも小さな凸凹構造があり，結果として多くのムシは捕虫器の内壁をすべって歩く事ができない。一方，壷の口に潜んで虫を捕らえるカニグモ科のクモが知られている。ウツボカズラの上前を撥ねるクモの脚先はどうなっているのであろう？補食者と犠牲者との関係は，そんなに単純ではなさそうであるし，かかる複雑な関係を背景にして脚の構造が決められているようだ。

“群れ”という視点も必要である。西成活裕東京大学教授の著書「クルマの渋滞 アリの行列・渋滞学が教える「混雑」の真相」によると，アリの隊列ではアリの数が増えても歩行速度が常に一定なために渋滞がないのだそうである。先を（つまり，欲望と成長を）急ぐがあまりに渋滞を引き起こし結果として効率が低下するような経済原理は，生物の群れの仕組みに学ぶべきところが多いようである。アリの行列は，エコロジカル・エコノミクスの一つの例かもしれない，と勝手に解釈した。

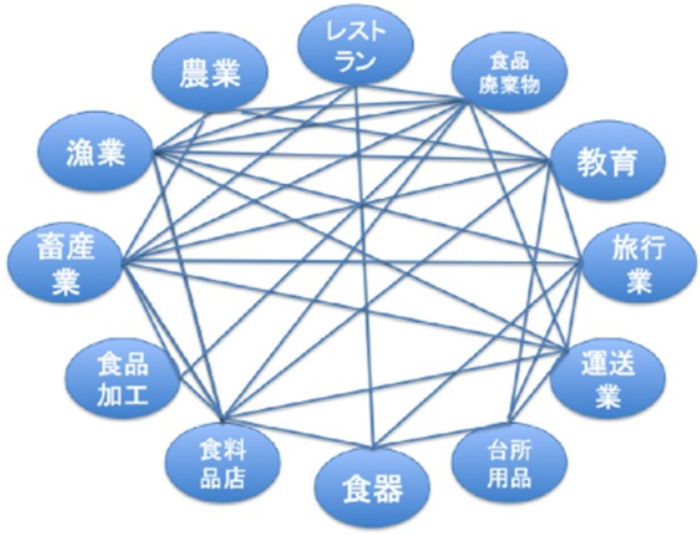
図は，２０１４年６月にアスクネイチャー・シャハンが Senlis 市の CEEBIOS を訪問した折りに，仁連先生が”Bio-design for local economy”という題目でアスクネイチャー・ジャパンの紹介をされた時に使われたパワーポイントから頂戴したものを日本語化したものである。地域経済活動の多様性，業界間の関連性等を生態系ネットワークのアナロジーとして捉えたものである。図では食産業に注目している。この曼荼羅のような図は，筆者が好んで使うネットワーク理論である”It’s a small world”

そのものである。“六次の隔たり”というフレーズで知られるこの情報理論は，コオロギの鳴き声の同期化や蛍の集団発光などのシンクロナイズする現象や，サッカー応援時のブブゼラの合唱，株の暴騰・暴落，バブル経済崩壊の説明にも使われているようである。筆者は，“色んな分野のキーパーソンとコネクションを持つ事ができれば世界を掌握できる”という勝手な解釈をし，この理論に異分野連携の重要性を感じているのである。

仁連先生が書いた図の記述にある，農業や輸送，観光といった“食”に関する経済用語は，バイオミメティクスにおいては自然史学，分類学，農学，生理学，化学，物理学，数学，ナノテクノロジー，機械工学，・・・に始まり，建築学，都市デザイン，経済学，社会学，環境学，・・・という学術領域に置き換えることができる。あるいは，飛翔，遊泳，接着，形態形成，発生，分化，視覚，嗅覚，聴覚，触覚，などの生物学用語と，摩擦，流体力学，接合，フォトニクス，オプティクス，粘弾性，材料強度，などの物理，化学の学術用語に置き換えることができる。

生物多様性の数だけバイオミメティクスの多様性があり，ネットワークに登場する領域や用語も多様になる。それ故に，バイオミメティクスは総花的にならざるを得ない。総花的という言葉は，決して褒め言葉ではない。そこで，”It’s a small world”に網羅的に配置された概念や用語をオントロジー等の情報科学の知恵をもって関連付けることで，総花的ではない，総合的な技術体系，経済体系，社会体系，としての“バイオミメティクス曼荼羅”を作ってみたいと思うこのごろである。

新しき葡萄酒は新しき革袋に　（マタイ伝）　仁連先生の講演でも引用



図提供：滋賀県立大学　仁連教授

第１２回　バイオミメティクスの平和利用？
The smallest feline is a masterpiece.

庭の手入れをさぼったら，猫が巣くってしまった。カミさんは近所迷惑にならねばと気をもんでいるが，娘は３匹の子猫に名前をつけ，息子はカラスが狙っているぞと心配している。猫と犬はよく比較されるが，ダ・ビンチによると，“猫はどんなに小さくても最高傑作である”らしい。まずは，とにかく優雅である。2010 年の Science 誌に掲載された”How Cats Lap: Water Uptake by Felis catus.”という論文が犬猫論争に火をつけた。MIT の機械工学者らの共同研究チームによると，“犬は舌を水中に入れて掬うように飲むのに対し，猫は，曲げた舌先に接した水を一気に引っぱりあげることで，慣性力で形成された水柱を優雅に食べる”のだそうである。翌年，ハーバード大学の生物学者が，犬も同じ方法で飲んでいると反論したものの，「それでもイヌの飲み方は品がない」とご自身もコメントしている。走りも，猫がまさるようである。軍事用ロボット開発で有名な Boston Dynamics 社は，2005 年に BigDog という荷役用四足歩行ロボットを開発，さらに 2013 年には時速 25Km で自立走行できる WildCat を発表した。WildCat のプロトタイプの Cheetah は時速 45Km なのだそうだが動力源は外部供給であった。WildCat は米国防総省国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）の M3（Maximum Mobility and Manipulation）という研究プログラムで開発されたもので，他にも同社では DARPA 支援の下，SandFlea（ハマトビムシ）という名のジャンプ・ロボット，SquishBot (Soft Quiet Shape-shifting robot)と呼ばれる柔軟で自在に変形するロボット，RiSE というヤモリテープを使った垂直歩行ロボットなどを開発している。そして昨年，Google が同社を買収したことは記憶に新しい。

DARPA は生物模倣のプログラムに積極的だ。Z-Man 計画と呼ばれるプログラムでは，Charles Stark Draper 研究所が開発した gecko-inspired paddles と呼ばれるグローブを履いた体重 100Kg のヒトが，スパイダーマンのように垂直な壁を登った。また，Nano Air Vehicle (NAV)プログラムでは，AeroVironment 社が Drone というハチドリ型偵察用ロボットを開発した（オバケの Q 太郎の仲間にドロンパといアメリカ生まれのオバケを思い出した・・・）。また，米陸軍研究所(ARL)は英国の BAE Systems，NASA ジェット推進研究所やハーバード大学，MIT 等と MAST(Micro Autonomous Systems and Technology)と呼ばれるコンソーシアムを組織し，昆虫を模倣した軍事用ロボットを開発している。例えば，カリフォルニア大学バークレー校の Biomimetic Millisystems 研究室では，OctoRoach と名付けられた自律歩行ロボットや，助走し飛翔する BOLT(Bipedal Ornithopter for Locomotion Transitioning)という羽ばたき式飛翔体（オーニソプター）などを作っ

ている（ウサイン・ボルトよりも速い？）。BAE Systems UK Education Programme というウェブサイトでは，Insect technology や”Bug Eye” technology 等の解説があり昆虫ミメティクスと MAST プログラムの重要性が説かれている。ちなみに，DARPA は HI-MEMS(Hybrid Insect Micro Electromechanical Systems)という“昆虫サイボーグ化プログラム”で，カブトムシやタバコスズメガにチップを埋め込み行動を制御しようとしているが，バイオミメティクスの観点からすると，これは頂けない。

　総合科学技術会議の革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）が日本版 DARPA を目指しているように，軍事研究は往々にして民生技術に転用され，時として技術革新をもたらす。一方，本年 5 月，ジュネーブで特定通常兵器使用禁止制限条約（CCW：Convention on Certain Conventional Weapons）の自律型致死兵器システム（LAWS: Lethal Autonomous Weapons Systems）に関する会議が開催された。昆虫型軍事ロボットは災害救助でも威力を発揮する。バイオミメティクスの societal implication が問われる。“原子力の平和利用”の轍を踏まぬように。

アトムは完全ではない。何故なら悪の心を持たないからだ。（手塚治虫）　―子猫は悪さをする―

庭に巣くった猫　プライバシー保護のため顔はご容赦を

第１３回　バイオミメティクスと SNS
Do as I say, not as I do.

先月号に引き続き猫噺。“猫にマタタビ，お女郎に小判“で有名なマタタビの実には，細長いものと，瘤だらけのものがある。後者は木天蓼（もくてんりょう）と呼ばれ漢方でも処方される。この瘤はマタタビの実に虫が寄生することで形成された虫癭(ちゅうえい)と呼ばれ，寄生虫の分泌物によって刺激された植物組織が異常発育した”こぶ状のもの“，つまり，虫瘤である。アリとの共生で有名なアブラムシは，虫瘤をつくる寄生昆虫の代表格である。アブラムシの排泄物は甘露と呼ばれるほど糖度が高く，アリの好物であるが故に蟻巻（アリマキ）は外敵から守られる。一方，虫瘤を作るアブラムシはアリに守られる必要はないものの，大量の甘露を処理しなければ巣の中は水浸しになってしまう。そこで，アブラムシは巧妙な方法で甘露を処理する。それは，甘露を安定な“液体の球“にするのだ。甘露の球は，虫瘤内に貯蔵され虫瘤の開口部から運び出す事ができるほど安定なのである。フランスの物理学者 David Quere 教授は，2001 年の Nature 誌に掲載された”Liquid Marbles”と題する論文で，疎水性の物質が甘露球の表面を覆うことで安定化することを証明した。以後，Liquid Marbles は，バイオミメティクス研究の重要な課題になっている。

北大綜合博物館で定期開催している画像検討会で，千歳科学技術大学のキャンパス内で採取したハルニレの虫瘤が話題になり，アブラムシに詳しい北大農学部の秋元信一教授から，開口部のない虫瘤があることを教えてもらった。どうやって甘露の処理をするの？という疑問は，産業技術総合研究所の深津武馬博士らによって明らかにされていた（2012 年の「Nature Communication」）。開放型虫瘤の内壁は厚いワックス層で覆われ疎水性であるのに対し，閉鎖型虫瘤の内壁は親水性のスポンジ状表層構造であり甘露が速やかに吸水されるのである。研究グループは，「内壁の親疎水性を決めるのは植物ではなくアブラムシ側にあり，“昆虫が自らの都合の良いように植物の形態や生理状態を改変するという”操作現象“に関する新しい知見であり，外部要因による植物の性質の制御という観点からも興味深い」と結論している。また，いくつかの疑問が頭をもたげる。ハルニレの虫瘤は緑から赤に変色し，まるで果実が熟れるように段々と色ついている。鳥や大きな虫が，実と間違って虫瘤を食すことはないのだろうか？植物にとっては，樹液をタダ取りする邪魔な寄生虫の巣である虫瘤をムシの外敵によって排除してもらう，という戦略があっても良いはずだ。動く事のできない植物は，動ける昆虫よりもシタタカなはずだ。そもそも，植物のメリットは何なのだ？開放型と閉鎖型では，アブラムシの脚の構造は違うのか？閉鎖型の壁の構造は水輸送や吸水材料のヒントになりそうだ・・・，等々。

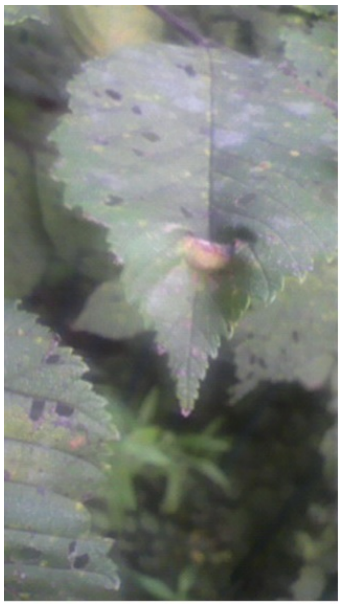
そんなことを妄想していたら，科学研究費「生物規範工学」のメンバー間の連絡メ

ールが“炎上”した。三菱レイヨン（株）の魚津吉弘フェローが Current Biology に掲載された”Rapid Convergent Evolution in Wild Crickets”という論文を紹介したことが，きっかけである。“フラット翅の雄コオロギ。コオロギの「沈黙」という選択？”と評された論文の内容は，ハワイ諸島にいる雄コオロギが，寄生バエのアタックを避けるために発音に関与する翅の構造を驚くほどの短期間で変化させ，鳴く能力を捨てたというものである。翅脈は，発音だけでなく飛翔にも重要な構造であるはずだ。様々な分野の研究者を巻き込んで，メール上で議論の輪がひろがった。多様な分野の専門家がいる事は，「生物規範工学」の売りである。まさに，It’s a small world だ。

画像検討会は，いろんな分野の専門家が face to face で議論をする場ではあるが，開催にあたっての物理的，時間的な制約がある。嘗て，妹尾堅一郎先生（「生物規範工学」の評価委員）から，「SNS はバイオミメティクスにピッタリ！」という示唆を頂戴した。そこで，魚津さんに頼んで Facebook にバイオミメティクスの集団を作ってみた。ある日，「キサントパンスズメガが欲しいなあ」とつぶやいたら，北海道開拓記念館のキュレーターである堀繁久氏から「今朝，記念館の前でエビガラスズメを捕まえた」という返信が即座に来たので，その有効性に驚いた（どちらも，長い吻を持っており，液体輸送のバイオミメティクスの対象である）。SNS を有効に利用するにあたっての筆者の課題は，Facebook をまめにフォローする暇をいかにして作るか，である。

学而不思則罔，思而不学則殆（論語為政）　SNS が“猫に小判”にならぬように。

ハルニレの虫瘤。夏も終わり虫瘤も激減した。



第１４回　バイオミメティクスは，宗教？
Nano meets Bio, East meets West.

２０１４年９月に長崎大学で開催された高分子討論会では，三日間にわたって“生物模倣による新規機能生材料・次世代型プロセスの創成”のセッションが設けられた。「鰯の頭も信心から」と題する下澤楯夫北海道大学名誉教授の招待講演は，立ち見が出るほどの盛況であった。講演要旨に云（いわ）く，「煮干しは，イワシを煮沸・乾燥したものである。その頭部とエラブタは，生きていた時と同じく銀色の金属光沢を保っている。煮沸と乾燥処理された生物体が，生の状態と同じ金属光沢を呈することは，少し不思議なことである。体の後ろの鱗で覆われた部分は，生の状態では銀色に光るが，煮干しではくすんだ灰色になる。（中略）煮干しのエラブタ外面の透明な骨片を機械的に剥がすと，体表の透明骨片を内側から裏打ちしていた上皮組織が，鰓糸に付いたままで乾燥した金属光沢のフィルムとなって表れる。透明骨片に接して外側を向いていたフィルム面を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察したところ，金属光沢面には，幅 10 μm，厚さ 2-3 μm，長さ数 100 μm ほどのリボンが折り重なって敷き詰められていた。リボン状の細胞には，グアニンと思しき厚さ 70 nm 程の結晶板が同程度の距離を隔てて 7-8 回繰り返す多層薄膜干渉構造が入っていた。（中略）多層薄膜による強い干渉反射で金属光沢を作り出している生物としては，タマムシやモルフォ蝶などが良く知られており，これらを模倣した『金属無しの金属光沢製品』も既に開発されている。」

下澤先生は，科学研究費「生物規範工学」の内部評価グループの一員である。工学部電子工学科の出身で理学部生物学科の助教授を経て応用電気研究所（現　電子科学研究所）の教授となり，シュミット・ニールセンの「スケーリング：動物設計論」を翻訳し，我が国バイオミメティクスのバイブル的存在である「昆虫ミメティックス―昆虫の設計に学ぶ」を監修した。コオロギの気流感覚毛が，ノイズの中から分子１個の運動エネルギーを検出できるほど高感度であることを見出した研究は，今なお世界中の研究者が引用している。「昆虫ミメティックス」の謳い文句は，“工学系の方々へ昆虫の生きる仕組み（構造と機能）を「動作原理説明書」や「性能仕様書」，または「設計図」として提供し，研究開発のヒントとなることをめざす”ことであり，下澤先生は工学者のセンスをもって自ら生物を観察し，その生き残り戦略の本質を見抜こうとする姿勢を一貫している。

２０１４年に古希を迎えられたが，生来の熱血と一徹ぶりと元気さは，論語の “従心” （「七十而従心所欲，不踰矩」）とは少々ほど遠い感もある。内々（うちうち）では，“バイオミメティクスの教祖”とも呼ばれており，かく言う筆者も“耳従”の齢を迎え（論語の六十而耳順），“下澤教”のエバンジュリストを任じている。教祖は常々，“下村

のような年寄りでは遅すぎる。工学の学生に生物の観察をさせよ。”と曰（のたまわ）くので，大学院では遅すぎると感じ，学部学生にバイオミメティクスを伝道すべく大学を移った次第である。九州大学を皮切りに東京農工大学，北海道大学，東北大学に続き５つめの大学である。

九州大学に在籍していた折りには，長崎の地を踏む事はほとんどなかった（近いと思うとなかなか行かないものである)。今般，たまたま宿が近かったこともあり，出島を訪れた。改めて，長崎が日本の近代化の窓口であったことを知ることになる。医者であるシーボルトは博物学にも造詣が深く，鳴滝塾では薬草園を作り，また多くの動植物をヨーロッパに持ち帰っている。おそらく塾生らに，生物を観察することの重要性を説いたに違いない。長崎はまた，キリスト教との窓口でもあり，更には，対中国貿易の港でもあった。異分野が繋がる空間だったのだ。

チャンポンを食べながら，長崎における「和漢洋」が我が国の近代化をもたらしたように，異分野連携がもたらす科学の近代化，これこそが教祖が広めたいバイオミメティクスなのである，との確信をもった。そして，もっと欲を言えば, “和洋折衷”ではなく,「日本人の自然観（寺田寅彦)」を鑑みたうえで, “和魂洋才”,“和魂漢才”となるべきバイオミメティクスを創りたいものである。そのためにも，教育は欠かせない。バイオテクノロジーとバイオミメティクスの違いが，この国ではまだまだ理解されていないからだ。

「艫舵なき船の大海に乗り出だせしが如く」杉田玄白（蘭学事始）　一歩先を行くものの常である

煮干しの頭も信心なり

下澤楯夫北海道大学名誉教授提供

第１５回　バイオミメティクスと自己組織化

Patna rhei. (There is nothing permanent except change.)

２０１４年１１月３日，我が国におけるバイオミメティクス研究の草分けである国武豊喜先生（九州大学名誉教授，北九州産業学術推進機構理事長）に，“現代化学の最重要領域である分子組織化学や新たな分子組織材料の形成手法を開拓“した功績で文化勲章が贈られた。国武先生には，科学研究費「生物規範工学」の評価委員長をお願いしており，我が国のバイオミメティクス研究にとっても，また，不肖の弟子（筆者）にとっても大変な栄誉である。

1970 年代，国武研究室では合成高分子や界面活性剤ミセルを使った人工酵素の開発を皮切りに，細胞膜を模倣した合成二分子膜の研究を世界に先駆けて行っていた。細胞を取り囲む生体膜は，リン脂質が水中で自発的に集合して形成される厚さ数 nm の二次元超薄膜である。リン脂質は，グリセリンと脂肪酸の二鎖型エステルを疎水性骨格とし，リン酸エステルを親水性部とする両親媒性化合物である。両親媒性とは，水にも馴染む，油にも馴染む，ということであり，水の中では疎水鎖を内側に親水性部を外側に向けたペアが二次元に配列した二分子膜構造を形成する。リン脂質の構造的特徴を一般化することで，ジアルキルアンモニウム塩と呼ばれる簡単な化学構造を有する合成化合物が生体膜と同じ二分子膜構造を形成することを見出した。1977 年にアメリカ化学会誌の速報に掲載された”A totally synthetic bilayer membrane”は，バイオミメティック・ケミストリーの新時代を切り開く画期的な論文であり，その後の分子組織化学の礎となるのである。

当時，国武研究室は，高分子化学という講座名が冠されており，主たる研究発表の場は高分子学会であった。高分子学会内部では，共有結合でつながっていないものは高分子ではないので合成二分子膜を発表するのは如何なものか，と言う議論も少なからずはあったが，分子集合体が市民権を得るのにさほどの時間は要さなかった。むしろ，本質的な議論は，分子集合と分子組織の違いであった。ジアルキルアンモニウム塩は，正電荷を有する窒素原子に二本の長いアルキル鎖が結合した化合物である。一方，抗菌性を有する逆性石けんとして知られている臭化セチルトリメチルアンモニウム等の一本鎖型の両親媒性化合物は，いわゆる石けんミセルを形成する。ミセルは球状の分子集合体であり，石けん分子は融合離散している。それに対し，二分子膜は，細胞の内と外を隔てることができるほど，安定な分子の集合体なのである。

“分子間相互作用を強くすることで秩序性が高くなりミセルから二分子膜への構造転移がおこる”との合成化学的な設計思想から，液晶化合物に特徴的な芳香族グループを分子内に有する一本鎖型両親媒性化合物を系統的に合成し，二分子膜構造が形成されることを見出した。このプロジェクトには筆者も参画し学位論文を書かせて頂い

た。しかし，研究が進めば進むほど，分子集合と分子組織の違いを明確にする必要に迫られた。分子が勝手に集まるのは自己集合であり，集まって安定な構造をつくるのが自己組織化，という簡単な説明は，分野を越えてコンセンサスを得ることは出来ない。非平衡熱力学を提唱したプリゴジンは，物質やエネルギーの絶え間ない出入りがある非平衡開放系で混沌とした無秩序から自発的に形成された秩序構造である散逸構造が自己組織化であり，結晶のような平衡系で形成される秩序構造を自己集合として区別している。

　そもそも「自己組織化」という概念は，自然科学や社会科学の学術分野のみならず，社会一般でも用いられている。そこで，国武先生の監修のもと，産総研の山口智彦博士と筆者が編集幹事となり，非線形数理の三村昌泰先生，西浦廉政先生，複雑系物理学の吉川研一先生，甲斐　昌一先生，生物物理学の宝谷紘一先生，電子工学の都甲潔先生，等々様々な分野の協力のもと，2009 年に 940 頁におよぶ「自己組織化ハンドブック」を世に問うた。これは，生体膜のバイオミメティクスを出発点とすることで，「自己組織化」をキーワードとした異分野連携の学術潮流を生み出そうとする先駆的な試みであった。

　生物は分子レベルから地球スケールにいたる幅広い領域で自己組織化的な階層構造とシステムを作っており，バイオミメティクスにとって自己組織化は本質である。今，やっと異分野連携によるバイオミメティクス研究が始まろうとしている。その礎は，分子組織化学にあった。我が師の先駆性をあらためて認識している。嘗て，学問には境目はなかったのである。

「生き残るのは，強いものでも賢いものでもなく，変わろうとするものである」ダーウィン　―　自己組織化は動的な秩序形成　常に変化する

1988 年に九州大学で開催された第３７回高分子討論会の参加証タイピン。二分子膜と内在タンパクを九州に因んでデザインしたもの。

平成２６年度
特許出願技術動向調査報告書（概要）

バイオミメティクス

平成２７年３月

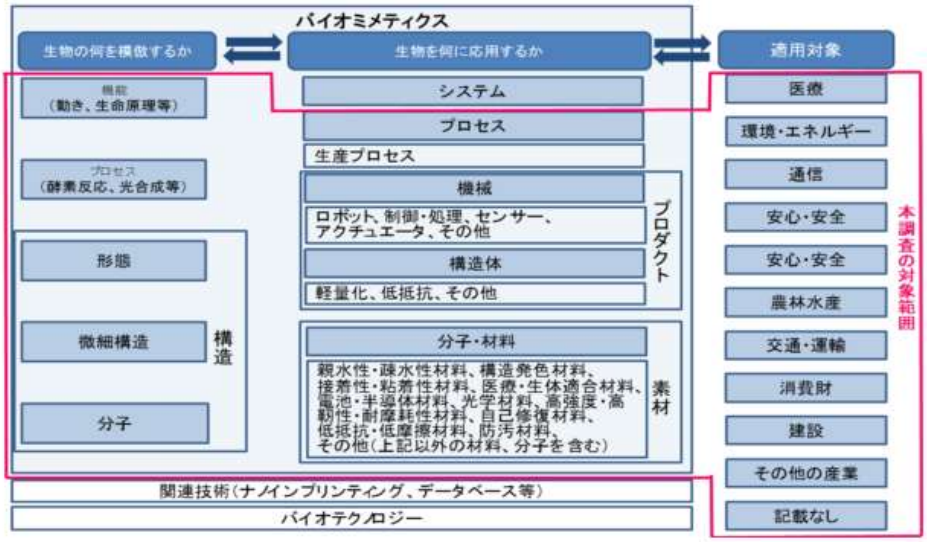
特　許　庁

問い合わせ先
特許庁総務部企画調査課 知財動向班
電話：０３－３５８１－１１０１（内線２１５５）

ISO/TC266[1]では、バイオミメティクスは、生物の構造や機能を抽出し、それを抽象化し、工業製品に応用したものと定義する方向で議論されている。本調査では、上記の定義をベースにしつつ、生物から何らかの着想を得ていると考えられる技術を広く対象とした。

上記の考え方に基づいて作成したバイオミメティクスの技術俯瞰図を図１に示す。図中の赤線で囲まれた部分を、本調査の対象としている。

図１　バイオミメティクスの技術俯瞰図



「分子・材料」は、親水性・疎水性材料、構造発色材料、接着性・粘着性材料等の各種機能性材料のほか、人工酵素等の分子を指す。

「構造体」は、カワセミのくちばしを模倣した新幹線やハコフグを模倣した車等、表面構造のようなミクロな構造でなく、マクロな構造を模倣したものを指す。ISO/TC266 WG3の対象となっていることから、今回は対象にした。

「機械」は、主に生物を模倣したロボットを指す。ロボットは、特許庁の過去の特許出願技術動向調査で扱われているため、今回は、バイオミメティクスの観点から、補完的に調査を行っている。

「プロセス」は、バイオミネラリゼーション[2]やバイオテンプレート[3]を応用したものづくり等、生物の物質生産や構造形成を生産プロセスに応用するものを指す。

「システム」は、生物にヒントを得た交通システムや都市構造等を指す。特許としては、要素技術としての出願になると考えられるため、本調査の対象からは除いている（要素技

[1] バイオミメティクスの国際標準化を議論する委員会
[2] 生物の無機鉱物を作る作用
[3] 生物の組織や構造を鋳型にして、金属材料等に微細構造を転写し、機能を発現させる技術

術は「機械」で見出されると考えられる)。

関連技術として、ナノインプリンティング等、生物の微細構造を模倣した材料を生産するために利用できる技術が挙げられる。しかし、これらは、バイオミメティクスの技術というよりは、バイオミメティクスとの相乗効果が期待できる技術として位置付けられるものであり、また、特許庁の過去の特許出願技術動向調査で扱われているため、調査対象外としている。

生物画像のデータベース等、研究開発の基盤になる技術についても、当該技術そのものはバイオミメティクスの技術ではないため、関連技術に含め、特許調査の対象外としている。

バイオミメティクスが、生物の構造や機能にヒントを得て、人工物に応用する技術であるのに対して、バイオテクノロジーは、生物や生物材料をそのまま、または、一部改変して利用する技術である。バイオテクノロジーはそれだけで広範な技術分野であり、また、特許庁の過去の特許技術動向調査で扱われているため、対象外としている。

第２章　市場環境調査[1]

第１節　日本

表１に、日本におけるバイオミメティクス関連製品の事例を示す。

表１　日本における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	99%クラリティコーティング	蓮の葉の表面構造	超撥水性表面を有する成形物	シチズンセイミツ株式会社
		マイクロガード加工タイル	カタツムリの殻の表面構造	タイル建材	株式会社イナックス（現株式会社LIXIL）
		撥水ウィンドウ	蓮の葉の表面構造	自動車用撥水ガラス	日産自動車株式会社
	構造発色材料	モルフォテックス	蝶の羽の積層構造	化学繊維	帝人ファイバー株式会社 日産自動車株式会社 田中貴金属工業株式会社
	光学材料	モスマイト	蛾の眼の表面構造	反射防止フィルム	三菱レイヨン株式会社
	接着性・粘着性材料	ヤモリテープ	ヤモリの足の表面構造	分析用粘着テープ	日東電工株式会社
		EC-VX500 他 スクリュープレスサイクロン	ネコ科動物の舌の表面構造	サイクロン掃除機	シャープ株式会社
	医療・生体適合材料	ランセット針	蚊の針の形状	注射針	株式会社ライトニックス
	低抵抗・低摩擦材料	WATER GENE マーリンコンプ	カジキの体表面のぬめり	競泳水着	美津野株式会社 （現ミズノ株式会社） 東レ株式会社
	防汚材料	A-LF-Sea	マグロの体表面の構造	超低摩擦型船底防汚塗料	日本ペイントマリン株式会社
構造体	低抵抗	ES-GE80L他 ドルフィンバル	イルカの表皮のしわ、尾びれの形状	洗濯機	シャープ株式会社
		500系新幹線	カワセミのくちばしの形状	新幹線の先端形状	西日本旅客鉄道株式会社

出典：各種資料から株式会社富士通総研作成

第２節　米国

表２に、米国におけるバイオミメティクス関連製品の事例を示す。

表２　米国における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	Lotusan coating	蓮の葉の表面構造	コーティング剤	Sto Corp
	接着性・粘着性材料	Entropy TacTile	林の地面の色・模様、吸着法	接着性のカーペットタイル	Interface FLOR
	光学材料	Mirasol ディスプレー	蝶の羽の発色メカニズム	ディスプレイ	Qualcomm
	防汚材料	Sharklet Textured Film	鮫肌の表面構造	細菌繁殖防止フィルム	Sharklet Technologies Inc.
	その他	Seal-Tite (Brinker Technology)	血小板の傷口を塞ぐメカニズム	パイプラインの漏洩箇所の察知、漏洩防止	Seal-Tite International
		Biomatrica system	クマムシ、ブラインシュリンプの乾燥耐性に関わる分子機構	DNA、RNAを室温管理できる試薬容器	Biomatrica
構造体	低抵抗	Pax Water mixer	海草の螺旋構造	ミキサー	PAX Scientific
機械	制御	Bluestar 32-bit module BluePacket and GreenLink	魚や蟻の群行動のメカニズム	センサー	Blutronix Inc.
		スマートグリッドアプリケーションのためのソフトウェア・アルゴリズム	イルカの群行動のメカニズム	ソフトウェアアルゴリズム	Green Wavelength

出典：各種資料から株式会社富士通総研作成

[1] 日本、米国、欧州、中国、韓国の５カ国・地域のうち、中国、韓国については、バイオミメティクス関連の製品化事例が見当たらなかったため、本章では、日本、米国、欧州における事例を示す。

要約

第３節　欧州

表３に、欧州におけるバイオミメティクス関連製品の事例を示す。

表３　欧州における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	Lotusan	蓮の葉の表面構造	撥水性塗料	(独)Evonik社等
		Mincor TX TT	蓮の葉の表面構造	繊維用スプレー	(独)BASF社
		swallowing bone punch	ヘビと猫の牙の形状	椎体形成術に用いる医療器具	(独)フラウンホーファーIPA(生産技術・オートメーション研究所)
	低抵抗・低摩擦材料	エアバスA340-300	鮫肌のリブレット構造	機体塗料	(独)ルフトハンザ航空(仏)エアバス
		船舶塗料	鮫肌のリブレット構造	船舶塗料、コーティング	(独)VOSSCHEMI
		LZR Racer	鮫肌のリブレット構造	競泳水着	(英)スピード・インターナショナル
	医療・生体適合材料	Ceramid R	セラミドの分子構造	化粧品(人工セラミド)	(仏)ロレアル
構造体	低抵抗	冷却ファン	猛禽類や海洋鳥類の翼の形状	ノイズレス製品	(独)Blacknoise社
	軽量化	タイヤ・ホイールの軽量化	珪藻の構造	自動車	(独)Elise社
	その他	Dustino	象の鼻の制御機構	ハンディモップ	(独)Freudenberg Household Products社
機械	ロボット	BionicOpter	トンボの羽ばたき機構	ロボット	(独)フエスト社
		SmartBird	鳥の羽ばたき機構	ロボット	
		Bionic Handling Assistant	象の鼻の制御機構	ロボット	
		AquaJellies2.0	クラゲの制御機構	ロボット	
		Air Penguin	ペンギンの制御機構	ロボット	

出典：各種資料から株式会社富士通総研作成

第４節　関連製品情報のまとめ

１．バイオミメティクスの主な関連製品を調査した結果、いずれの国・地域においても、現状、製品化している事例の数は限られていることがうかがえる。

２．主要な製品として、以下の（１）～（３）のような事例がみられた。

（１）親水性・疎水性材料（撥水性塗料、タイル建材、撥水ガラス等）、構造発色材料（化学繊維）、光学材料（反射防止フィルム、ディスプレイ）、接着性・粘着性材料（粘着テープ、カーペットタイル、サイクロン掃除機）、医療・生体適合材料（注射針、化粧品）、低抵抗・低摩擦材料（競泳水着、航空機の機体塗料、船舶塗料）、防汚材料（船底防汚塗料）等の、分子・材料に関するもの

（２）構造体の低抵抗化（冷却ファン、洗濯機、ミキサー、新幹線の先頭形状）、軽量化（自動車のホイール等）等に関するもの

（３）ロボット（トンボや象の鼻等を模倣したロボット）や、機械の制御（センサー、スマートグリッド制御のためのソフトウェア等）に関するもの

3．植物（蓮）の葉、あるいは、魚類（カジキ、マグロ、鮫）の体表面のような、生体表面の微細構造を模倣した製品が、各国・地域から出されている。特に、蓮の葉の微細構造を模倣した疎水性材料は、いずれの国・地域においても製品化されている。現状では、これらが、生体表面の微細構造の模倣がバイオミメティクスの技術開発の中心となっていると考えられる。

4．日本においては、親水性材料・疎水性材料、接着性・粘着性材料等、分子・材料分野に関する製品化事例が目立つが、欧州、米国においては、機械分野に関する製品化事例もみられる。欧州では、ドイツのFesto社が、トンボ、鳥、象、クラゲという様々な生物を模倣したロボットの製品化に成功している。また、米国では、Green Wavelength社のスマートグリッドの制御に関する事例が見られる。

5．欧州については、ドイツ、フランス、イギリスで、製品化の事例がみられた。特に、ドイツは、他の2国に比べて多くの事例が見られるとともに、分子・材料分野だけにとどまらず、構造体分野、機械分野に関する製品化の事例も見られ、製品化が進んでいる様子がうかがえる。

6．バイオミメティクスは、新規材料のデザインだけでなく、生産プロセスへの応用の可能性も期待されているが、生産プロセスに関わる製品化事例は、いずれの国・地域においても見当たらなかった。世界的に見ても、生産プロセスへの応用はまだ進展していないことが考えられる。

要約

第３章　政策動向調査

第１節　日本

１．文部科学省　平成 24 年度科学研究費補助金新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」（略称：「生物規範工学」）[1]

「生物多様性」すなわち「高炭素世界の完全リサイクル型技術」に学び、新しい技術規範を体系化した「生物規範工学」を創生することを目的とし、細胞内部や表面に形成される数百 nm～数ミクロンの「サブセルラー・サイズ構造」が持つ機能の解明により、生物多様性と生物プロセスに学ぶ材料・デバイスの戦略的設計・製造を達成することを目指すもので、期間は平成 24 年度～28 年度となっている。

研究班は、総括班と 3 つの研究班（A01 班～C01 班）、公募班から構成される。A01 班では、走査型電子顕微鏡写真を中心とする生物画像を、オントロジー[2]と大容量画像データ検索技術を用いて検索できるようにすることにより、研究開発者の発想を支援する「バイオミメティクス・データベース」の構築が進められている。

B01 班は 5 つの班からなる。B01-1 班は、やわらかく変形可能な生物界面に見られる防汚機能、摩擦特性制御、吸着脱離機能に着目し、新しい摩擦制御界面システムや吸着脱離システムの開発を目指している。B01-2 班は、生物が光学材料としての機能を達成しているメカニズムを明らかにすること、高機能でかつ自然に優しい光学材料を手に入れることを目指している。B01-3 班は、生物の多様な機能（昆虫の足の可逆的接着性、カタツムリ や蓮の葉のセルフクリーニング現象、自己増幅・自己複製修復機能等）を規範として、新しいエレクトロニクス実装等への展開を目指している。B01-4 班は、昆虫の情報伝達、環境適応等における制御系に注目し、低環境負荷型植物保護法の確立、汎用元素を使った高感度センサーの開発、乾燥耐性・放射線耐性を持つ昆虫細胞の医療への応用を目指している。B01-5 班は、生物のメカニクス・システムに注目し、再生医工学を目指した高機能メカノバイオミメティック材料の創製や、昆虫規範型飛行ロボットの設計指針の確立を目指している。

C01 班は、B01 班、および、A01 班の成果をシーズに、持続可能な社会に必要なライフスタイルをニーズとして、両者をマッチングさせるためのテクノロジー創出システムの構築を目指している。

第２節　ドイツ

１．　ドイツ連邦教育研究省（BMBF）による研究助成

研究プログラム「持続可能なプロダクトと技術のためのバイオニックイノベーション」（BIONA：Bionic Innovations for Sustainable Products and Technologies）において、バイオニクスのアプローチから持続可能な発展を促進するために、3,000 万ユーロを助成している。同プログラムがカバーする領域は、「材料と表面」、「軽量化デザインと

[1] 文部科学省　平成 24 年度科学研究費補助金新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」領域ホームページ（http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/）
[2] コンピューターが理解可能な抽象的概念の体系。

資源の効率性」、「デザインと建築」、「ロボティクス」、「センサー技術」、「プロセス」、「組織と情報」と幅広い。

2．　ドイツ研究振興協会（DFG）による研究助成

バイオミメティクスに関連するプロジェクトが、52 件実施されている（2013 年 10 月 31 日現在）。ナノテクノロジー・材料分野が多く、材料の階層構造による機能発現、自己集合、自己修復を扱ったものが多く見られる。特に、2009 年からスタートした「バイオミメティック材料の研究：材料の階層構造により発現する機能」（SPP 1420）は、重点計画（Priority Programmes）となっている。

3．　産学官ネットワーク BIOKON の構築

ドイツにおけるバイオミメティクスの産学官ネットワークである BIOKON は、ドイツ連邦教育研究省（BMBF）の助成を受け、2001 年に設立された。最近の動きとして、BIOKON がドイツ技術者協会（VDI）と共同で作成したドイツ国内のガイドラインをもとに、2011 年にドイツ規格協会（DIN）が ISO に対して、バイオミメティクスについての技術委員会の設立の提案を行い、TC266 が設立された。

第３節　国際標準化の動向

2011 年にドイツ規格協会（DIN）が国際標準化機構（ISO）に対して、バイオミメティクスの国際標準化を議論する技術委員会（TC:Technical Committee）の設置を提案し、ISO/TC266 が設立された。投票権を持つＰメンバーとして、ドイツ、チェコ、フランス、ベルギー、イギリス、オランダ、イスラエル、日本、中国、韓国が参加しており、ドイツが議長国を務めている。2014 年には、新たにカナダがＰメンバーとしての参加を表明した。

ISO/TC266 は 4 つの作業部会（WG:Working Group）と 4 つの WG に関わる事項を扱うタスクグループから構成される。WG1 はバイオミメティクスや関連する概念・用語の定義、WG2 はバイオミメティックな材料・構造の開発のフレームワーク、WG3 は構造最適化のアルゴリズム、WG4 はバイオミメティクスにおける知識インフラ（データベース検索に必要なシソーラス、オントロジー）を扱っている。

表 4　ISO/TC266 に設置されている WG

WG	タイトル	議長国
WG1	Terminology, concepts and methodology	ドイツ
WG2	Biomimetic Materials Structures and Components	ベルギー
WG3	Biomimetic Structure Optimization	ドイツ
WG4	Knowledge infrastructure of biomimetics	日本

出所：各種資料から株式会社富士通総研作成

これまで 4 回の総会が開催されており、2014 年 10 月にベルギーのリエージュで開催され

要約

た第4回総会では、ドイツが議長として議論を主導してきたWG1とWG3が国際標準として発行されることが決まった[1]。なお、WG2は作業原案から委員会原案に移行する段階、WG4は予備段階にある。また、WG1から派生して バイオミメティクスと持続可能性 に関する作業項目（Work item）を、イギリスが責任者となって提案することが承認された[2]。その他、標準化作成プロセスの透明性の担保および関係者間のコミュニケーションの促進を目的とする新たなタスクグループ”Transparency and Stakeholder Communication”の設置や、第5回総会を2015年10月に京都で開催することが決定された[3]。

[1] http://www.pengin.ne.jp/?p=869
[2] http://www.pengin.ne.jp/?p=878
[3] http://www.pengin.ne.jp/?p=860

第４章　特許動向調査

第１節　調査範囲・調査方法

１．調査対象国

出願先国別の出願・登録状況の調査対象国としては、日本、米国、欧州、中国、韓国とし、これら５か国・地域での出願、登録を合計して「日米欧中韓への出願」、「日米欧中韓での登録」として調査を実施した。この場合、各国・地域の公報を個別にカウントする「公報単位」で集計を行った。さらに、特許協力条約（Patent Cooperation Treaty:PCT）に基づく国際出願も調査の対象とした。

欧州への出願については、欧州特許庁（EPO）への出願及び欧州特許条約（EPC）加盟国38か国のうち、使用データベースであるGlobal Patent Index(GPI)の収録対象国である34か国（オーストリア(AT)、ベルギー(BE)、ブルガリア(BG)、スイス(CH)、キプロス(CY)、チェコ(CZ)、ドイツ(DE)、デンマーク(DK)、エストニア(EE)、スペイン(ES)、フィンランド(FI)、フランス(FR)、イギリス(GB)、ギリシア(GR)、クロアチア(HR)、ハンガリー(HU)、アイルランド(IE)、アイスランド(IS)、イタリア(IT)、リトアニア(LT)、ルクセンブルク(LU)、ラトビア(LV)、モナコ(MC)、オランダ(NL)、ノルウェー(NO)、ポーランド(PL)、ポルトガル(PT)、ルーマニア(RO)、セルビア(RS)、スウェーデン(SE)、スロベニア(SI)、スロバキア(SK)、サンマリノ(SM)、トルコ(TR)）を対象とした。

２．調査対象期間

出願及び登録動向の解析は、出願年（優先権主張年）が2001年から2012年までを対象に行った。ただし、調査対象期間に該当する出願であっても、検索実施日（2014.11.23）より後に公開（公表）された出願や検索実施日前の公開（公表）であってもデータベースへの収録のタイムラグによりその時点でデータベースに収録されていない出願等、解析の対象とはなっていないものがあることに留意が必要である。

３．出願人国籍

解析の対象とした出願人国籍は、日本、米国、欧州、中国、韓国の５か国・地域であり、それ以外の国は「その他」とした。欧州国籍の定義は、欧州特許条約（EPC）加盟の３８カ国（アルバニア(AL)、オーストリア(AT)、ベルギー(BE)、ブルガリア(BG)、スイス(CH)、キプロス(CY)、チェコ(CZ)、ドイツ(DE)、デンマーク(DK)、エストニア(EE)、スペイン(ES)、フィンランド(FI)、フランス(FR)、イギリス(GB)、ギリシア(GR)、クロアチア(HR)、ハンガリー(HU)、アイルランド(IE)、アイスランド(IS)、イタリア(IT)、リヒテンシュタイン(LI)、リトアニア(LT)、ルクセンブルク(LU)、ラトビア(LV)、モナコ(MC)、マケドニア旧ユーゴスラビア(MK)、マルタ(MT)、オランダ(NL)、ノルウェー(NO)、ポーランド(PL)、ポルトガル(PT)、ルーマニア(RO)、セルビア(RS)、スウェーデン(SE)、スロベニア(SI)、スロバキア(SK)、サンマリノ(SM)、トルコ(TR)）と

した。

出願人の国籍は公報に記載されている出願人の住所を出願人の国籍とし、出願が複数出願人による共同出願の場合は、筆頭出願人の住所を出願人国籍とした。

また、出願人別の出願・登録件数上位ランキングにおいて、複数の出願人による出願は、出願人のランキングでそれぞれ1件とカウントした。出願人国籍別の解析を行う際は、出願時の出願人の住所でカウントした。

また、出願人の属性で「その他」には、国、地方公共団体、知的財産管理・技術移転機関（TLO等）を含む。

4．使用したデータベース

特許文献はGPI（Global Patent Index）で、2014年11月23日に検索した。

5．調査方法

検索された特許公報（要約、特許請求の範囲、図面等）を解析し、ノイズ除去後に技術区分付与を行った。同一ファミリーに属する特許には同じ技術区分を付与した。

技術区分の付与に当たっては、一つの出願に複数の該当項目がある場合は該当項目すべてに技術区分付与を行った。

6．解析に当たっての留意点

出願あるいは登録件数は、調査対象国あるいは日米欧中韓へ出願、登録された件数をそれぞれ1件ずつ公報単位で集計した。

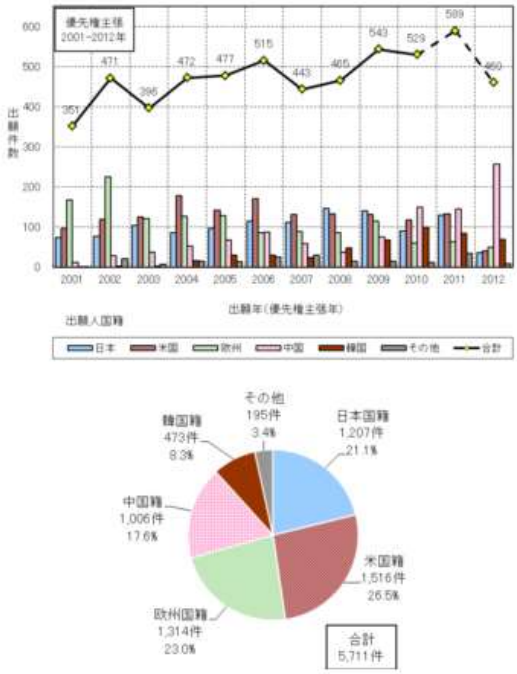
第2節　全体動向調査

1．[出願先：日米欧中韓]出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率

日米欧中韓への出願における出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率を図2に示す。日本国籍・米国籍の出願人による出願件数は横ばい、欧州国籍の出願人による出願件数は減少、中国籍・韓国籍の出願人による出願件数は増加している。特に、2008年から2012年にかけて、中国籍の出願人による出願件数の増加が著しい。

出願件数比率は、米国籍が25.6%と最も多く、次いで、欧州国籍が23.0%、日本国籍が21.1%となっている。

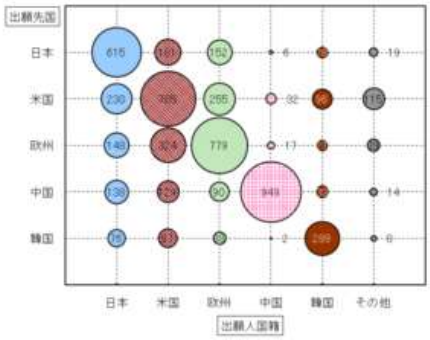
図２　［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率
（出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）



２．［出願先：日米欧中韓］出願先国別－出願人国籍別出願件数

調査対象期間全体（優先権主張年ベースで 2001 年～2012 年）における、出願先国別かつ出願人国籍別の出願件数を図 3 に示す。日本国籍の出願先は、日本が 615 件と最も多く、次いで、米国が 230 件、欧州が 143 件、中国が 138 件、韓国が 76 件となっている。いずれの国も自国への出願が多いが、中国、韓国は特にその傾向が強い。

図３　［出願先：日米欧中韓］出願先国別－出願人国籍別出願件数
（出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）



要約

第３節　技術区分別動向調査

１．［出願先：日米欧中韓］技術区分別出願件数推移

技術区分別出願件数推移を図 4-7 に示す。

図 4 に示されるように、応用先による分類では、「医療・生体適合材料」、「親水性・疎水性材料」、「光学材料」の件数が多い。「光学材料」は 2007 年から 2009 年にかけて件数が増加している。「ロボット」は近年の伸びが大きい。「防汚材料」は、2001 年では「親水性・疎水性材料」に次いで多く、2002 年は「医療・生体適合材料」に次いで多いが、その後は減少傾向にある。

図 4　［出願先：日米欧中韓］技術区分別出願件数推移
（技術区分：応用先、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

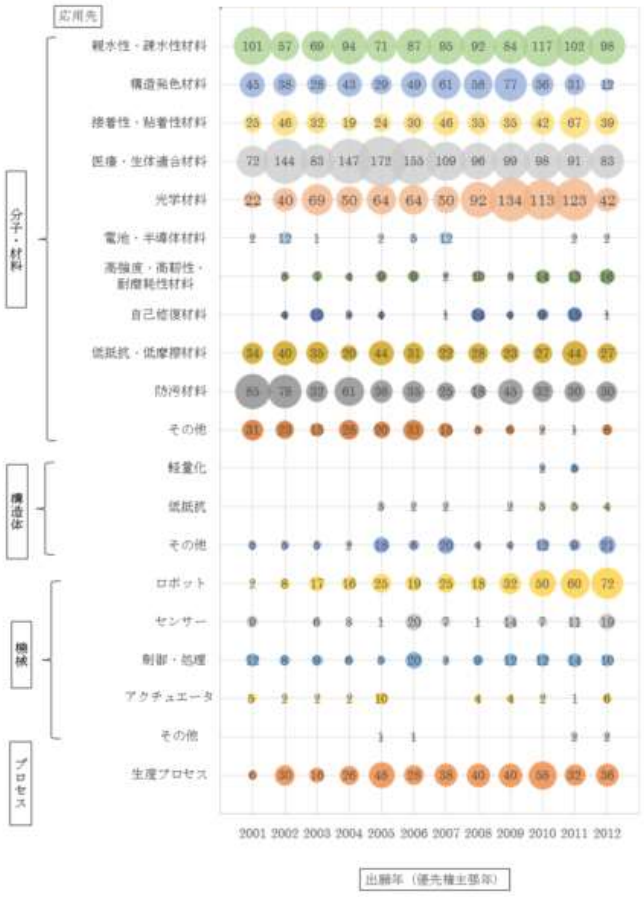


図 5 に示されるように、応用産業による分類では、「人工器官」、「発電設備」、「輸送

用機器材料」、「輸送用機器部品」、「家電・光学部品」、「建築材料」の件数が多い。「発電設備」、「輸送用機器材料」、「家電・光学部品」、「建築材料」は増加傾向にある。

図 5　［出願先：日米欧中韓］技術区分別出願件数推移
（技術区分：応用産業、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

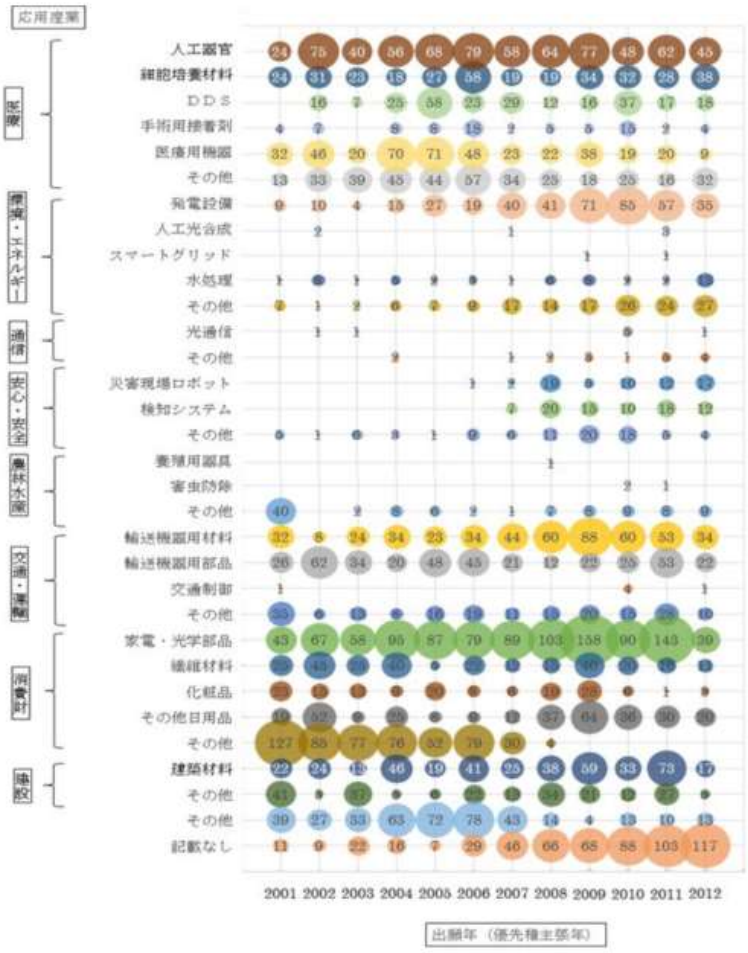


図 6 に示されるように、模倣の対象による分類では、「微細構造」を模倣したものが突出して多い。なお、今回は、検索語として、ナノ・マイクロ構造により機能を発現する材料に関する用語を含めているため、その点に留意が必要である。

要約

図 6　［出願先：日米欧中韓］技術区分別出願件数推移
（技術区分：模倣の対象、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

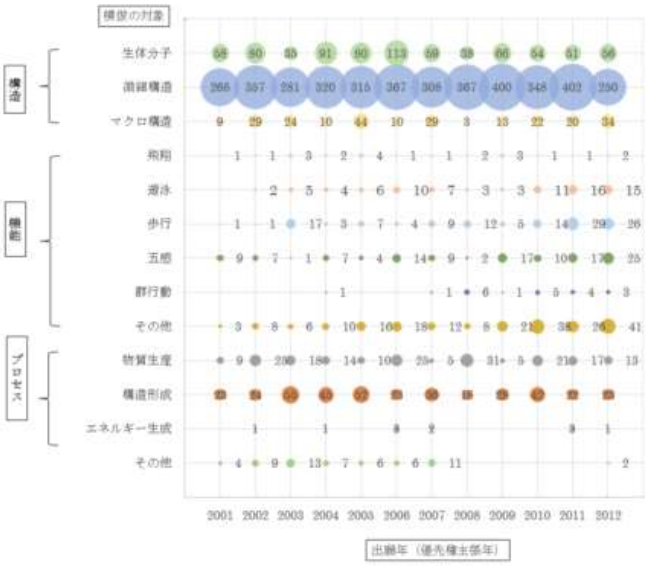
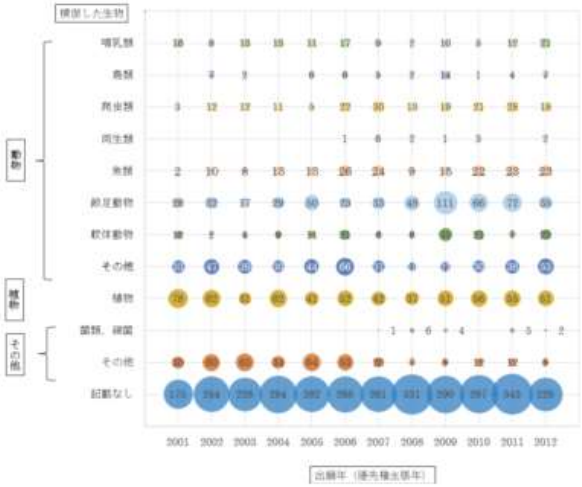


図 7 に示されるように、模倣した生物による分類では、「記載なし」が多いが、記載されているものの中では、「節足動物」、「植物」が多い。

図 7　［出願先：日米欧中韓］技術区分別出願件数推移
（技術区分：模倣した生物、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）



２．［出願先：日米欧中韓］技術区分別－出願人国籍別出願件数

技術区分別－出願人国籍別出願件数を図 8-11 に示す。

図 8 に示されるように、応用先による分類では、米国籍、欧州国籍、中国籍、韓国籍は、「医療・生体適合材料」、「親水性・疎水性材料」が多く、同様の傾向を示している。欧州国籍は「防汚材料」が、中国籍は「ロボット」が、韓国籍は「光学材料」が多いという違いもある。日本国籍は、「構造発色材料」と「光学材料」が多く、他の国･地域とは傾向が異なる。

図 8　［出願先：日米欧中韓］技術区分別－出願人国籍別出願件数
（技術区分：応用先、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

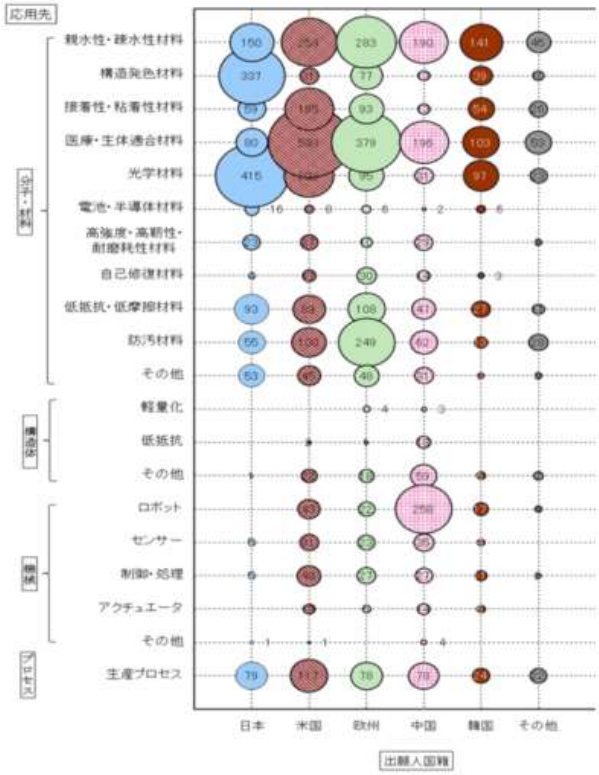


図 9 に示されるように、応用産業による分類では、米国籍、欧州国籍は、「人工器官」、「医療用機器」が多い。日本国籍は「家電・光学部品」が 530 件と極めて多い。中国籍は、「記載なし」が多く、用途が想定されていない特許が多いものと見られる。韓国籍は、「発電設備」と「家電・光学部品」が多い。

要約

図 9　［出願先：日米欧中韓］技術区分別－出願人国籍別出願件数
（技術区分：応用産業、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

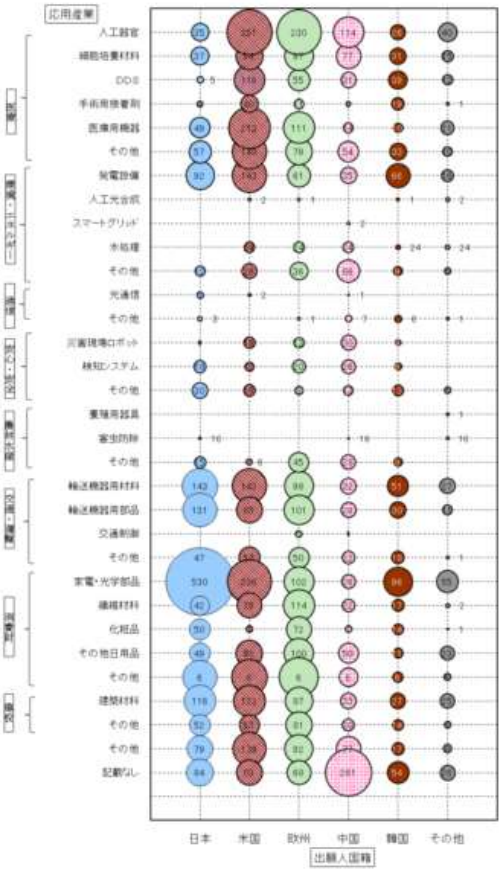


図 10 に示されるように、模倣の対象による分類では、いずれの国･地域も「微細構造」が突出して多い。なお、今回は、検索語として、ナノ・マイクロ構造により機能を発現する材料に関する用語を含めているため、その点に留意が必要である。米国籍、欧州国籍、韓国籍は「生体分子」も多い。中国籍は、「遊泳」、「歩行」、「五感」等、「機能」を模倣した出願も比較的多く見られる。

図 10　[出願先：日米欧中韓]技術区分別－出願人国籍別出願件数
（技術区分：模倣の対象、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

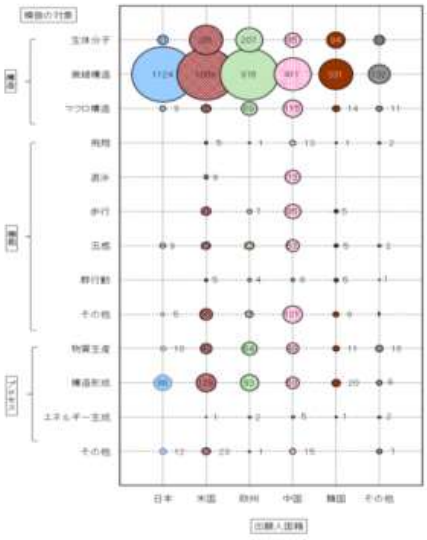
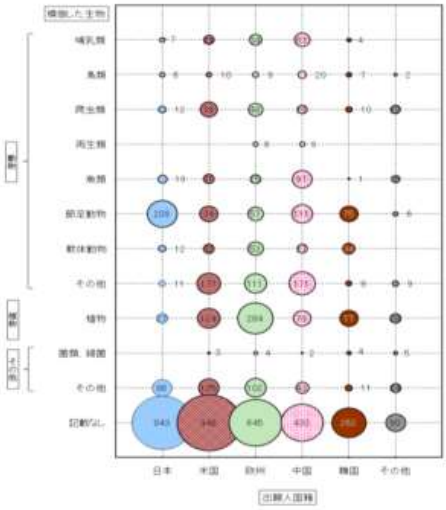


図 11 に示されるように、模倣した生物による分類では、いずれの国･地域も「記載なし」が多いが、記載されているものの中では、日本国籍と中国籍は「節足動物」が、米国籍と欧州国籍は「植物」が最も多い。日本国籍が「節足動物」に偏っているのに対し、米国籍、欧州国籍、中国籍は様々な生物に分布が見られる。

図 11　[出願先：日米欧中韓]技術区分別－出願人国籍別出願件数
（技術区分：模倣した生物、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

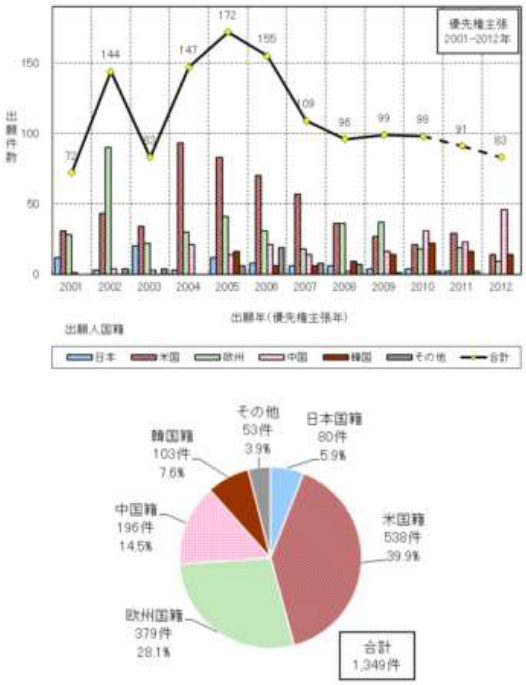


３．［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率

出願件数が多い「医療･生体適合材料」「親水性・疎水性材料」「光学材料」、日本国籍出願人の出願が多い「構造発色材料」、近年、出願件数が増加している「ロボット」について、出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率を図 12-図 16 に示す。

図 12 に示されるように、「医療･生体適合材料」の出願件数は、2005 年以降は減少傾向にある。出願件数比率は、米国籍が 39.9%と最も多く、次いで、欧州国籍が 28.1%、中国籍が 14.5%となっている。米国籍、欧州国籍の出願人による出願件数は、減少傾向にあるが、中国籍、韓国籍の出願人による出願が近年増加している。

図 12 ［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率（応用先による分類、大分類：分子･材料、中分類：医療・生体適合材料、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）



注）2011 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 13 に示されるように、「親水性・疎水性材料」の出願件数は、2002 年以降、やや増加傾向にある。出願件数比率は、欧州国籍が 26.5%と最も多く、次いで、米国籍が 24.2%、中国籍が 17.8%となっている。欧州国籍の出願人による出願件数は、減少傾向にある。一方、中国籍、韓国籍の出願人による出願が近年増加している。

図 13 ［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率（応用先による分類、大分類：分子・材料、中分類：親水性・疎水性材料、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

注）2011 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

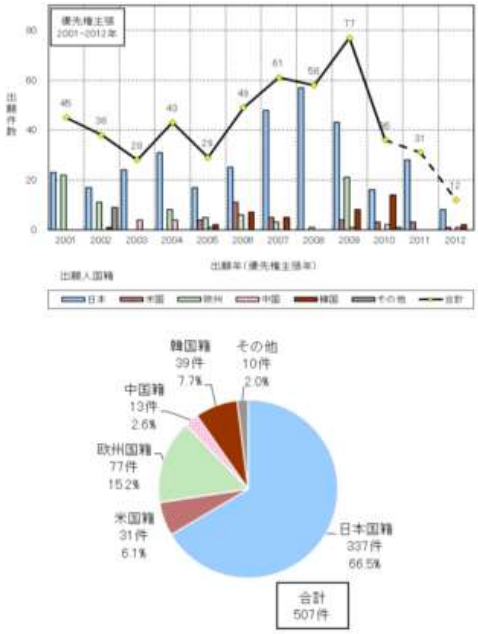
図 14 に示されるように、「光学材料」の出願件数は、2007 年から 2009 年にかけて 2 倍以上に増加している。出願件数比率は、日本国籍が 48.1%と約半数を占めており、次いで、米国籍が 23.4%、韓国籍が 11.2%となっている。中国籍は、3.6%と少なく、また、近年の大きな増加も見られない。

図 14 ［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率（応用先による分類、大分類：分子・材料、中分類：光学材料、出願年（優先権主張年）：2001-2012年）

注）2011 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 15 に示されるように、「構造発色材料」の出願件数は、2005 年から 2009 年にかけて増加している。出願件数比率は、日本国籍が 66.5%と半数以上を占めており、次いで、欧州国籍が 15.2%、韓国籍が 7.7%となっている。中国籍は、2.6%と少なく、また、近年の大きな増加も見られない。

図 15 ［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率（応用先による分類、大分類：分子・材料、中分類：構造発色材料、出願年（優先権主張年）：2001-2012年）



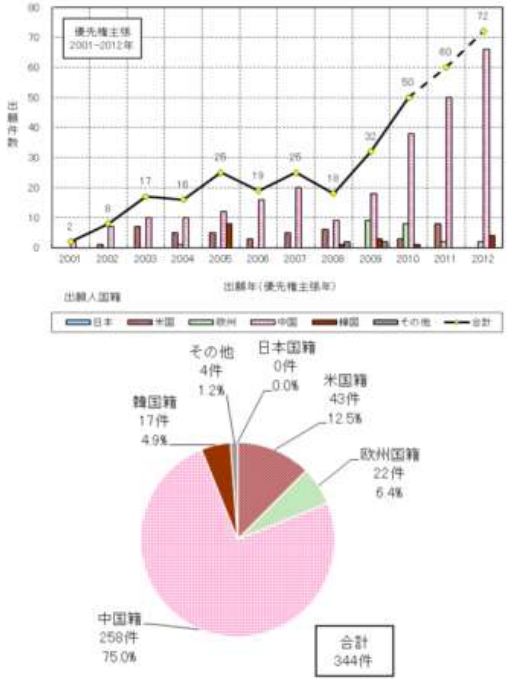
注）2011 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 16 に示されるように、「ロボット」の出願件数は、2008 年以降、増加している。出願件数比率は、中国籍が 75.0%を占めており[1]、次いで、米国籍が 12.5%、韓国籍が 4.9%となっている。日本国籍の出願人による出願は 0 件であった[2]。

[1]中国では、魚類、昆虫等の動物を模倣したロボットに関する出願が多く、これらの技術開発が盛んに行われているとみられる

[2]本調査では、検索語を設定するにあたり、調査対象を「生物から何らかの着想を得たもの」に限定するため、「バイオミメティクス」、「バイオインスパイアード」等、バイオミメティクスに関連する検索語を用いて文献抽出を行った。したがって、それらのキーワードを含まない特許は抽出されない。日本国籍出願人による出願特許では、上記のキーワードが使用されない傾向が高いと考えられ、そのために、実態よりも出願件数が少なくなった可能性がある。

図 16 ［出願先：日米欧中韓］出願人国籍別出願件数推移及び出願件数比率（応用先による分類、大分類：機械、中分類：ロボット、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）



注）2011 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

第 4 節　出願人別動向調査

日本、米国、欧州、中国、韓国への出願件数全体について、件数 10 位までの出願人ランキングを表 5 に示す。10 位までの出願人国籍は、日本 5 社、米国 3 社、欧州、中国、韓国については、それぞれ 1 社であった。1 位の 3M INNOVATIVE PROPERTIES（米国）が出願件数で 2 位以下を圧倒していた。

表５　出願人別出願件数上位ランキング
（日米欧中韓への出願、出願年（優先権主張年）：2001-2012 年）

順位	出願人名称	出願件数
1	3M INNOVATIVE PROPERTIES CO (US)	255
2	CREAVIS TECH & INNOVATION GMBH (DE)	97
3	シャープ	82
4	UNIV JILIN (CN)	60
5	UNIV CALIFORNIA (US)	59
6	富士フイルム	55
7	MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY (US)	46
8	POSTECH ACAD IND FOUND (KR)	43
9	日産自動車	38
10	パナソニック	37
10	トヨタ自動車	37

要約

第５章　研究開発動向調査

第１節　調査範囲・調査方法

１．調査対象期間

2001 年～2013 年（発行年ベース）に世界で発表された論文を対象に解析を行った。

２．調査対象

調査対象とする雑誌は、本調査の実施にあたり設置した有識者委員会の意見を踏まえ、バイオミメティクス分野の専門誌、および、バイオミメティクス関連分野をカバーしているインパクトファクターの高い国際的な主要誌から、表 5-1-1 に示す 52 誌を選定した。解析の対象とする論文は、この 52 誌に掲載されたバイオミメティクス関連技術に関する原著論文とし、総説、解説記事等は解析の対象外とした。調査対象期間中に発行された論文であっても、データベース検索実施日（2014 年 12 月 16 日）時点でデータベースに収載されていなかった論文は調査対象となっていないことに留意が必要である。

３．使用したデータベースと検索式

論文検索のデータベースとして、米国立医学図書館 National Library of Medicine 作成の Medline、米国化学会 American Chemical Society の Chemical Abstracts Service 部門作成の HCAplus、Elsevier B.V. 社作成の Compendex、ProQuest 社作成の PQSciTech を用いて 2001 年～2013 年（発行年ベース）に、バイオミメティクス分野の専門誌およびインパクトファクターの高い国際的な主要誌 52 誌に掲載された論文を対象に検索（2014.12.16 検索実施）を行った。上記 4 つのデータベースの検索にあたっては、オンライン検索サービス STN を利用した。MEDLINE は National Library of Medicine（米国政府）、STN は American Chemical Society の登録商標である。

なお、今回の調査では、バイオミメティクス関連のキーワード（biomimetic, biomimic, bioinspire, nature inspire, bionic 等）を含む論文を対象としている。したがって、分子系バイオミメティクスから派生し、一つの分野として発展している超分子化学等のように、これらのキーワードを含まない関連分野の論文は対象外となっていることに留意が必要である。

４．調査方法

検索で抽出された 6272 件の論文について、抄録を解析対象とし、必要に応じて一次文献の解析を行った。抄録を読み込み、ノイズ除去後に技術区分付与を行った。

５．技術区分

論文調査の技術区分は、特許の解析において設定したものと同一とした。

６．解析にあたっての留意点

（１）研究者の所属機関とその国籍

研究所属機関の論文発表件数ランキングにおいて、研究所属機関とは筆頭著者

所属機関を、研究者所属機関の国籍とは筆頭著者所属機関の所在国籍を表している。

（2）研究者別の解析

研究者別の解析については、書誌データの著者欄に収録されている全ての著者を対象に行った。名寄せを行う際、同一著者であるかの判別がつかない場合には、名寄せを行わず別人として処理を行った。また、別人だとしても同姓同名の場合、判別不明であるので実際の論文発表件数よりも多くあるいは少なく集計されている可能性がある。

（3）欧州国籍の定義

欧州国籍の定義は、欧州特許条約（EPC）加盟の38カ国（アルバニア(AL)、オーストリア(AT)、ベルギー(BE)、ブルガリア(BG)、スイス(CH)、キプロス(CY)、チェコ(CZ)、ドイツ(DE)、デンマーク(DK)、エストニア(EE)、スペイン(ES)、フィンランド(FI)、フランス(FR)、イギリス(GB)、ギリシア(GR)、クロアチア(HR)、ハンガリー(HU)、アイルランド(IE)、アイスランド(IS)、イタリア(IT)、リヒテンシュタイン(LI)、リトアニア(LT)、ルクセンブルク(LU)、ラトビア(LV)、モナコ(MC)、マケドニア旧ユーゴスラビア(MK)、マルタ(MT)、オランダ(NL)、ノルウェー(NO)、ポーランド(PL)、ポルトガル(PT)、ルーマニア(RO)、セルビア(RS)、スウェーデン(SE)、スロベニア(SI)、スロバキア(SK)、サンマリノ(SM)、トルコ(TR)）とした。

第２節　全体動向調査

2001年～2013年（発行年ベース）にバイオミメティクス分野の専門誌およびインパクトファクターの高い国際的な主要誌 52 誌に掲載されたバイオミメティクスに関する論文のうち、検索された 6,272 件を読み込み、バイオテクノロジー等、調査対象に含まれない文献を除去した結果、4,051 件が解析対象となった。

すべての技術区分における研究者所属機関別論文発表件数推移及び比率を図 17 に示す。論文発表件数は年々増加傾向にある。累積件数では米国籍が 30.9%、欧州国籍が 29.9%、中国籍が 18.1%で、この３つの国・地域で全体の約８割を占めている。日本国籍は 5.2%と割合が低い。

図17　研究者（筆頭著者）所属機関国籍別論文発表件数推移と論文発表件数比率（発行年：2001-2013年）

第３節　技術区分別動向調査

1．技術区分別論文発表件数推移

技術区分別論文発表件数推移を図 18-21 に示す。

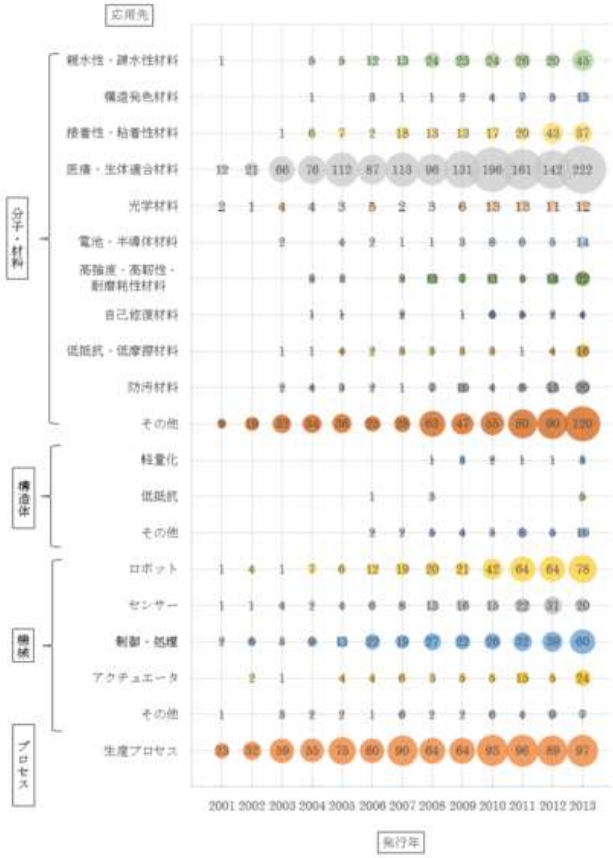
応用先では、「医療・生体適合材料」が多く、「親水性・疎水性材料」、「ロボット」、「生産プロセス」が増加傾向にある（図 18）。

応用産業については、「人工器官」や「細胞培養材料」等の「医療」が多い。「記載なし」が多いが、この中には、材料の物性や製法、ロボットの機能等に関する文献が見られた。調査対象が論文であるため、応用産業に言及していないものが多いと考えられる。一方で、各産業別の件数は少ないが、様々な産業への応用を目指して研究開発が行われていることがうかがえる。（図 19）。

模倣の対象としては、「微細構造」や「生体分子」が多い（図 20）。

模倣した生物については、「記載なし」が多いが、記載されているものの中では、「節足動物」、「植物」、「軟体動物」が多い（図 21）。なお、「記載なし」は、タンパク質等、生体分子を模倣したものが多かった。

図 18　技術区分別論文発表件数推移（技術区分：応用先、発行年：2001-2013 年）



要約

図 19　技術区分別論文発表件数推移（技術区分：応用産業、発行年：2001-2013 年）

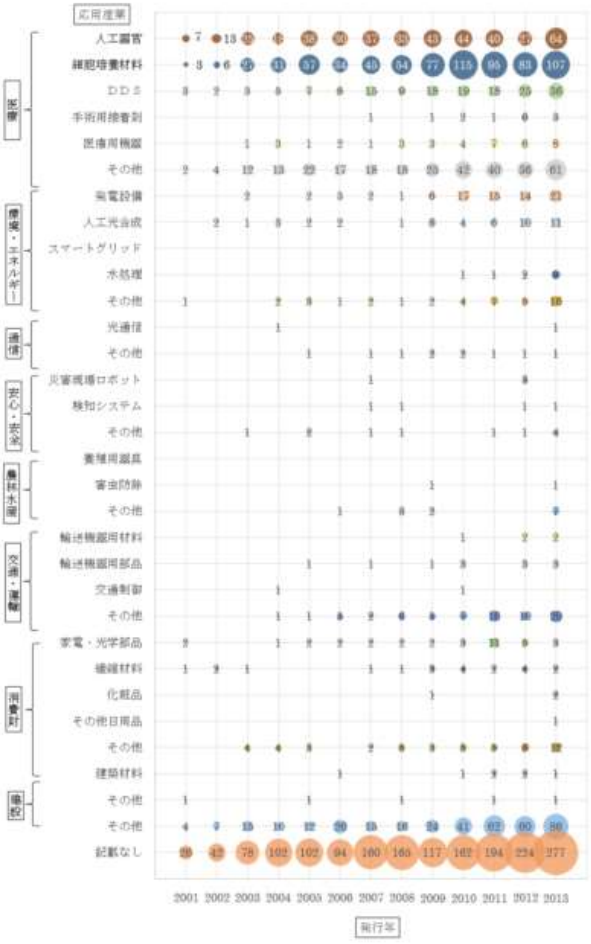


図 20　技術区分別論文発表件数推移
（技術区分：模倣の対象、発行年：2001-2013 年）

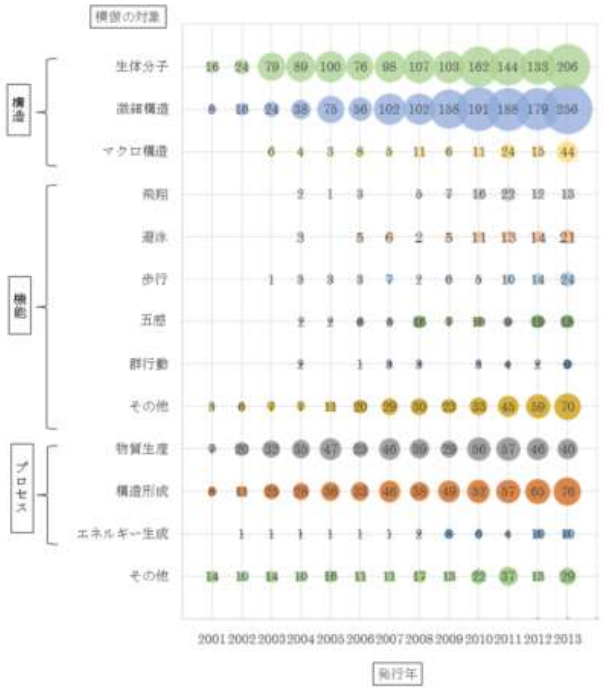
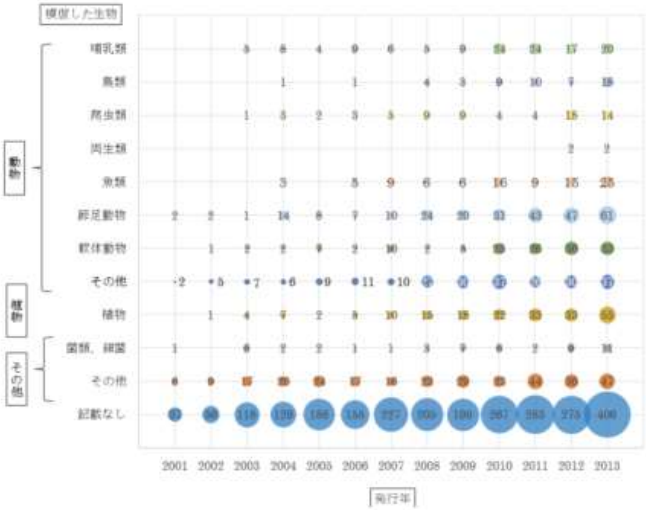


図 21　技術区分別論文発表件数推移
（技術区分：模倣した生物、発行年：2001-2013 年）



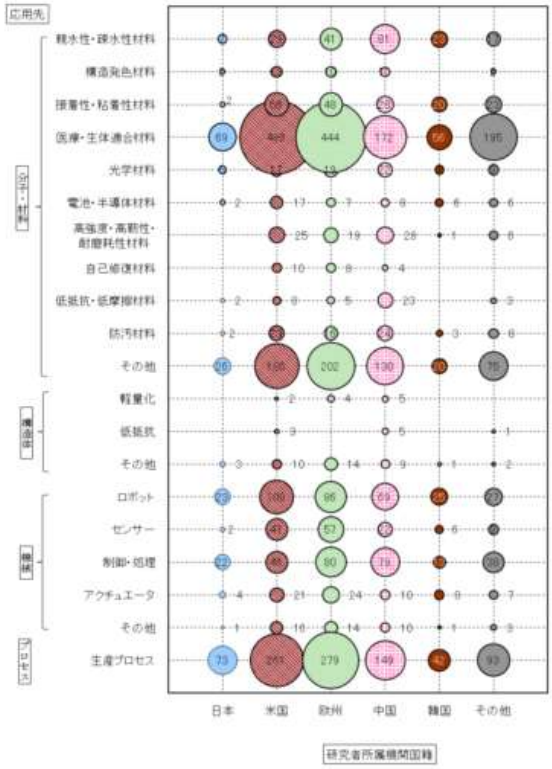
要約

2．技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数

技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 22-25 に示す。

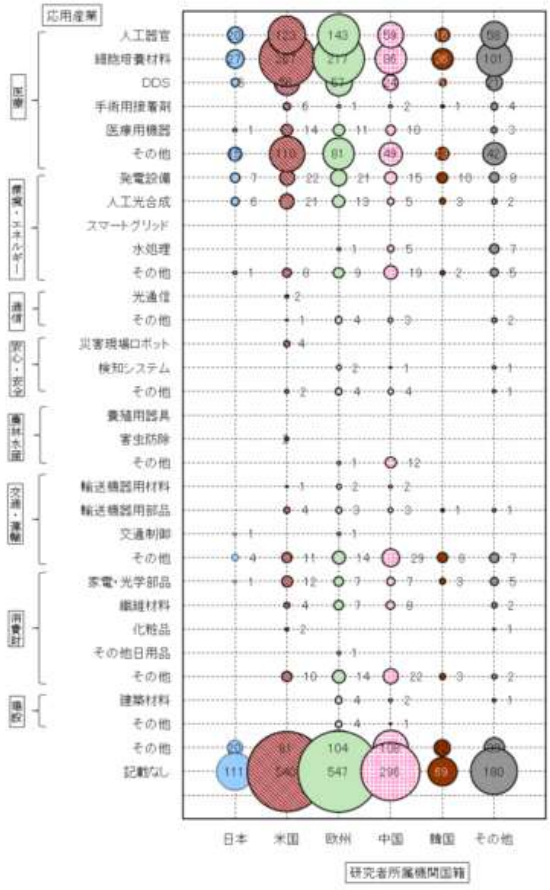
応用先については、日本国籍以外の国・地域は、「医療・生体適合材料」が最も多く、次いで「生産プロセス」が多い。日本国籍は「生産プロセス」が最も多く、次いで「医療・生体適合材料」となっている。その他、各国・地域で共通して多いものとして、「ロボット」、「制御・処理」、「親水性・疎水性材料」が挙げられる。日本国籍以外の国・地域は、「接着性・粘着性材料」も多いが、日本国籍では少ない。（図 22）

図 22　技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数（技術区分：応用先、発行年：2001-2013 年）



応用産業については、各国・地域とも、「医療」の「細胞培養材料」「人工器官」が多い。（図 23）

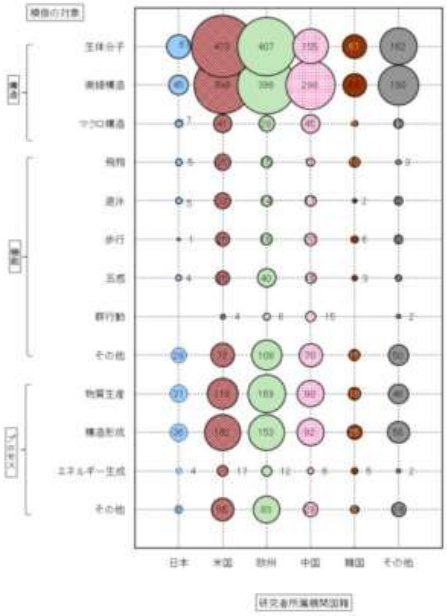
図 23　技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数（技術区分：応用産業、発行年：2001-2013 年）



模倣の対象については、中国籍以外の国・地域は、「生体分子」が最も多く、次いで「微細構造」が多くなっている。中国籍では、「微細構造」が最も多く、次いで、「生体分子」となっている。（図 24）

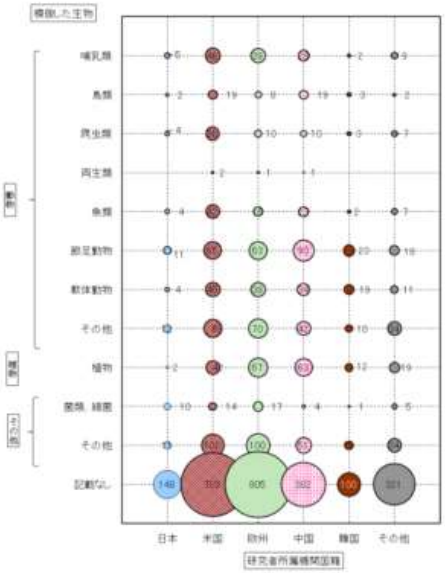
要約

図 24　技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数（技術区分：模倣の対象、発行年：2001-2013 年）



模倣した生物については、いずれの国・地域においても、「節足動物」が最も多い。全体の論文発表件数の多い、米国籍、欧州国籍、中国籍を比較すると、「軟体動物」や「植物」が多い点は同様の傾向であるが、米国籍では「爬虫類」も多い。（図 25）

図 25　技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数（技術区分：模倣した生物、発行年：2001-2013 年）



第４節　研究者所属機関・研究者別動向調査

研究者所属機関別の論文発表件数上位ランキングを表 6 に示す。ここでいう研究者所属機関は、筆頭著者の所属する研究機関を表している。

上位 20 位に、米国の大学が 9 つ、中国の大学または国の研究機関が 5 つ登場している。

表 6　研究者所属機関別論文発表件数上位ランキング（発行年：2001-2013 年）

順位	所属機関	件数
1	University of California（米国）	112
2	Chinese Academy of Sciences（中国）	106
3	Jilin University（中国）	89
4	Max-Planck-Gesellschaft（ドイツ）	64
5	Northwestern University（米国）	52
6	Korea Advanced Institute of Science and Technology（韓国）	44
7	Beihang University（中国）	40
8	Massachusetts Institute of Technology（米国）	38
9	Universidade do Minho（ポルトガル）	37
10	University of Michigan（米国）	35
11	National University of Singapore（シンガポール）	34
12	Zhejiang University（中国）	32
13	Harvard University（米国）	31
14	Seoul National University（韓国）	30
15	Georgia Institute of Technology（米国）	29
16	Tsinghua University（中国）	28
17	University of Illinois（米国）	27
18	Stanford University（米国）	25
18	Purdue University（米国）	25
20	Nanyang Technological University（シンガポール）	24

要約

第６章　総合分析と提言

第２章から第５章に示した調査結果を元に、本調査を進めるに当たって設置した有識者委員会、および、有識者へのヒアリングを踏まえて、分析を行い、提言をまとめた。

なお、有識者委員会は、本調査を進めるにあたり、本テーマに係る技術や技術経営についての知見を有する学識経験者、産業界有識者等から助言を受けるために設置したものである。有識者ヒアリングは、特許動向分析による仮説検証の補強を行うために、本テーマにおける学識経験者や産業界有識者に、技術の現況や今後の動向等についてヒアリングを実施したものである。

第１節　総合分析

１．応用先に関する分析

市場環境調査で、分子･材料の製品化事例が比較的多い（表 1～表 3）ことや、特許動向調査、研究開発動向調査のいずれにおいても、分子･材料の件数が多い（図 4、図 18）ことから、現在において材料分野はバイオミメティクスの主要な応用先であると言える。2000 年頃に起こった材料系バイオミメティクスの潮流とその後の発展が、調査結果から見て取れる。また、継続的に特許出願が見られること（図 4）、論文発表件数が増加していること（図 18）から、材料系バイオミメティクスは今後もバイオミメティクスの主流であり、まだまだこれから発展していく領域であり、今後の展開が期待できる。

「分子・材料」の中では「医療・生体適合材料」が最も多く（図 4、図 18）、バイオミメティクス材料の主要な応用先であることがうかがえる。「医療・生体適合材料」の特許出願件数は 2005 年をピークに減少傾向にあるものの、論文は増加傾向にあり（図 4、図 18）、今後も活発に研究が行われるものと考えられる。

特許出願件数では、「医療･生体適合材料」に加えて、「疎水性・親水性材料」や「光学材料」の件数も多い（図 4）が、論文発表件数はそれほど多くない（図 18）。これは、ロータス効果やモスアイ効果等、生物が持つ構造の機能発現メカニズムは既に解明されており、製造技術等の特許出願が行われているのではないかと考えられる。市場環境調査では、製品化事例として、「親水性・疎水性材料」や「低抵抗・低摩擦材料」が比較的多く、「医療・生体適合性材料」はあまり見られなかったが（表 1～表 3）、この理由としては、医療分野は規制による障壁が高いことが考えられる。

米国籍、欧州国籍、中国籍、韓国籍の出願人では、「医療・生体適合材料」「親水性・疎水性材料」が多いのに対して、日本国籍の出願人では、「光学材料」と「構造発色材料」が多く（図 8）、この 2 つは日本の強みと言えそうであるが、出願件数の推移を見ると、どちらも減少傾向にある（図 14、図 15）。

「疎水性・親水性材料」は、特許出願件数の比率では、米国、欧州、中国の順であるが、近年、中国の出願件数が伸びており、2010 年～2012 年は最も多くなっている（図

13)。論文発表数でも、中国が 40.9%を占めている（図 22)。

プロセスについては、特許動向調査では年 30 件程度の出願が見られ（図 4)、研究開発動向調査では年 90 件程度の論文発表数が見られる（図 18）が、特許、論文ともに近年の件数の伸びはみられない。

本調査にて開催した有識者委員会においては、有用な物質・構造を省エネルギーで生産する術を生物に学ぶことで、生産プロセスの革新につながるとの意見があり、その期待は大きい。一方、有識者ヒアリングでは、「生物の生産プロセスをそのまま模倣するだけでは時間がかかる」、「生産したものに十分な耐久性を持たせるのが難しい」といった課題が指摘されている。また、有識者委員会では、我が国では、本調査の対象期間より前に、ボトムアップ・ナノテクノロジー[1]の大きな実績があり、それを活かして、新たな研究テーマを見出すことも必要との指摘があった。このような課題が、特許、論文の件数が伸びていない要因であると考えられ、今後の研究が求められる。

「機械」については、特許動向調査、研究開発動向調査のいずれにおいても、「ロボット」の件数の伸びが大きい（図 4、図 18)。特許の出願件数では、中国が 75%を占めており、また、近年の出願件数の増加が著しく、全体の伸びを牽引していることが分かる（図 16)。

また、論文発表件数でみると、「制御・処理」も近年伸びている（図 18)。市場環境調査では、米国において魚やアリの群れ行動に着想を得たセンサーや、イルカの群行動をヒントにしたアルゴリズムを製品化した事例も見られていることからも（表 2)、今後、「制御・処理」の分野における技術開発が活発化することが考えられる。有識者ヒアリングでも、生物模倣ロボットの研究者から、「歩行や遊泳等、生物の動きの自律分散的な制御則を模倣することは、構造を模倣することとは異なり、広範な分野への応用が可能である」と、制御・処理、中でも特に、自律分散制御システムの重要性を指摘する意見が挙がった。有識者委員会においても、自律分散制御システムは、構造の模倣に比べて応用範囲が広いため、バイオミメティクスの市場拡大のために重要であるとの意見が挙がっている。

2．応用産業に関する分析

「医療」は、特許出願件数、論文発表件数のいずれにおいても、件数が多いことから、中でも件数が多い「人工器官」「細胞培養材料」を中心に、今後もバイオミメティクスの主要な応用産業であると考えられる（図 5、図 19)。しかし、この分野では、米国籍、欧州国籍の出願人による出願件数が多く、日本は劣勢にある（図 9)。「環境・エネルギー」も比較的件数が多く、特許動向調査では増加傾向にある。各国における再生可能エネルギー導入政策等の環境政策を背景に、最も件数が多い「発電設備」を中心に、近年、注目度が高まっていると考えられる（図 5)。また、特許出願件数では、

[1] 素材を加工して微細な構造を作るトップダウン型の技術に対して、原子や分子から構造を組み立てる技術。

「消費財（家電）」「交通・運輸（輸送機器材料、輸送機器部材）」「建設（建築材料）」も件数が多い。

研究開発動向調査においても、件数は少ないものの、様々な産業に分布が見られた（図 19）。市場環境調査においても、製品化事例は、タイル建材、撥水ガラス、化学繊維、ディスプレイ、サイクロン掃除機、船舶塗料等、様々であり（表 1～表 3）、バイオミメティクスの応用産業は多岐に渡っていると言える。

特許動向調査、研究開発動向調査のいずれにおいても、応用産業の記載がないものの件数が多いことから、応用産業が明確になっていない技術が多いものと考えられる（図 5、図 19）。なお、研究開発動向調査は論文を対象にしているため、応用産業の記載のないものが多くなる傾向があると考えられ、その点に留意が必要である。

3．模倣対象に関する分析

特許動向調査、研究開発動向調査のいずれにおいても、模倣している生物名が記載されていないものが多いものの、模倣の対象となっている生物は幅広い（図 7、図 21）。国籍別でみると、日本国籍の出願人では節足動物（多くが昆虫と見られる）に偏っている一方で、米国籍、欧州国籍、中国籍の出願人による出願では、爬虫類や魚類、植物等、比較的いろいろな生物に分布が見られる（図 11）。全体の論文発表数に占める比率は、日本が 5.2%と件数自体が少ないため（図 17）、比較が難しいが、有識者ヒアリングにおいても、日本の弱みとして、生物の機能の検証とプロトタイプ開発はほとんど海外であることが指摘されている。

模倣の対象となっている生物の特長は、特許動向調査では「構造」が突出して多いのに対し（図 6）、研究開発動向調査では、「機能」「プロセス」の占める割合も比較的多い（図 20）。また、研究開発動向調査では、「構造」「機能」ともに件数が同程度で伸びていることから（図 20）、今後は、「構造」に加えて、「機能」を模倣対象とした技術開発も活発化することが考えられる。

微細構造の模倣に関して、有識者委員会において、生物を模倣した「微細構造」をつくる際、従来のようなナノテクノロジーに頼る方法では生産コストが高くなり、事業化が難しいとの問題点が指摘された。企業においてバイオミメティクスの活用に取り組んでいる研究開発者へのヒアリングでも、「表面の微細構造の模倣に注目しているが、ある程度のサイズ以下の微細加工は、当社の商品の価格帯を考えると、コストが高くなってしまうので難しい」「構造がつぶれてしまうと機能が出なくなる」「微細構造があると、平面よりも傷つきやすいし、汚れがつきやすいので、使えるような特性が出せていない」「小面積では量産化に成功した例があるが、大面積化が難しい」という問題が挙げられた。これらは、バイオミメティクスというよりは、製造技術に関するものと言える。

4．ポジションに関する分析

特許動向調査では、日本は米国、欧州と比較してほぼ同程度の出願件数であるが（図2）、研究開発動向調査では、米国、欧州だけでなく、中国にも大きく差をつけられている（図17）。この要因として、日本と海外の研究力の差だけでなく、日本におけるバイオミメティクス研究の中心領域が、本調査のスコープから外れてしまったことも影響していると考えられる。バイオミメティクスの研究は、1970年代から、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣するBiomimetic Chemistryの研究が盛んになり、その後、分子集合体の化学や超分子化学といった方向に向かった。日本では、このような分子レベルを研究対象とするバイオミメティクスが台頭した。そのため、2000年以降を対象期間として、「バイオミメティクス」等のキーワードをもとに論文を抽出した本調査においては、上記のような日本の研究論文は、抽出の対象外となった可能性に留意する必要がある。

2000年以降は、ナノテクノロジーの進展と相俟って、材料系バイオミメティクスの研究が世界的に活発になっているが、日本は材料系の研究においては遅れをとることとなった。特に欧州では、ドイツにおいて、政策的にバイオミメティクスの研究開発を推進しており（第3章 第2節）、その差が大きいと考えられる。米国については、バイオミメティクスというよりは、バイオ分野において強いことが影響していると考えられる。

出願先については、現状、いずれの国籍においても、自国への出願が中心となっていることから（図3）、自国市場での実用化に向けた技術開発が中心になっていると考えられる。

製品化については、そもそも事例が少ないという点を考慮する必要があるが、市場環境調査によると、欧米に比べて、日本は材料分野に偏っており（表1～表3）、機械分野でのバイオミメティクスの活用が遅れていると見られる。

要約

第２節　提言

以下の(1)～(2)のポイントを踏まえて、提言 1～5 をまとめた。

(1) 日本は、Biomimetic Chemistry やロボット研究において、かつては、アクティビティーが高く、分子系バイオミメティクスでは世界をリードしていたが、今世紀になっての材料系バイオミメティクスの新潮流を掴むことができなかった。その理由は、生物学と工学の異分野連携が恒常的になされていない、この国の文化的風土にある。
(2) 本調査の対象期間は、今世紀になっての最新情報に限られているので、前世紀末における我が国における分子系バイオミメティクス、機械系バイオミメティクスの高いアクティビティーが反映されていないことに、留意が必要である。

【提言 1】
バイオミメティクスの応用先は今後も材料分野が主流であると考えられる。より多くの製品化事例を今後生み出していくためにも、製造コストの削減や耐久性の向上、量産化等の微細構造の製造技術の更なる技術開発が求められる。
また、バイオミメティクスの市場拡大に向けては、制御・処理の分野にバイオミメティクスの考え方を取り入れていくべきである。特に、重要性が指摘されている自律分散制御システムの開発と実用化の推進がなされていくことが期待される。

市場環境調査で、分子･材料の製品化事例が比較的多い（表 1～表 3）ことや、特許動向調査、研究開発動向調査のいずれにおいても、分子・材料の件数が多い（図 4、図 18）ことから、現在において材料分野はバイオミメティクスの主要な応用先であると言える。また、継続的に特許出願が見られること（図 4）、論文発表件数が増加していること（図 18）から、材料系バイオミメティクスは今後もバイオミメティクスの主流であると考えられる。しかし、製品化事例が比較的多いものの、まだまだ数えられる程度である。実用化に向けては微細構造の製造技術が重要であり、今後より多くの製品化事例を生み出していくためにも、製造コストの削減や耐久性の向上、量産化等の微細構造の製造技術の更なる技術開発が求められる。

また、バイオミメティクスの応用先は分子・材料だけに留まるものでない。動き等の原則を抽出して応用する「制御・処理」の特許出願件数は多くないものの、論文発表数が近年増加している（図 4、図 18）。総合分析において述べている通り、有識者ヒアリングや有識者委員会でも、制御・処理、中でも特に、自律分散制御システムの重要性が指摘されている。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」において、ロボティクスの研究は行われているが、自律分散制御システムの研究は行われていない（第 3 章 第 1 節）。一方、米国では、魚やアリの群れ行動に着想を得たセンサーや、イルカの群行動をヒントにしたスマートグリッド制御のためのアルゴリズムのような製品化事例も見られ（表 2）、既に実用化が始まっている。我が国においても、制御・処理、中でも特に、自律分散制御システムの開発と実用化の推進がなされていくことが期待される。

【提言 2】
応用産業として医療分野を特定し、分子・材料分野での応用のみでなく、材料、機械、プロセス各技術分野の融合によりバイオミメティクスの応用を実現するためのプロジェクトの創設が期待される。

有識者委員会において、バイオミメティクスは、技術分野も応用産業も幅広いため、それらを一つのプロジェクトにしようとすると、焦点がぼやけてしまうという指摘があった。その問題を解決するには、技術分野と応用産業のどちらかを設定するのが良いと考えられる。これまでのバイオミメティクスの研究は、材料やロボットといった各技術分野で個別に進められてきており、技術分野の側を特定して様々な応用展開を図ってきたと言える。しかし、そのアプローチでは、どうしてもシーズ起点になってしまう。そこで、応用産業の側を特定したアプローチが必要であると考えられる。

総合分析の 2.「応用産業に関する分析」において述べた通り、医療分野はバイオミメティクスの主要な応用産業である。企業の研究開発者へのヒアリングにおいても、「生体適合材料について、コラーゲンを塗るという従来の方法でなく、接着する際の表面構造に着目して、より本質的な方法でタンパク質が付着しにくいコーティングをつくるというテーマが魅力的である」という意見や「バイオミメティクスの医療応用は今後、3 次元臓器が重要になるだろう」との意見が上がっており、今後もバイオミメティクスの知見のさらなる活用が期待される。

医療へのバイオミメティクスの応用は、医療・生体適合材料等の分子・材料分野での応用がメインになると考えられるが、それだけでなく、医療機器、センサー、血液検査装置、義肢、介護ロボット、臓器の 3 次元構造の構築プロセス等、様々な技術の応用も期待され、かつ、それらのシステム化が求められることから、応用産業のターゲットとして有望であると思われる。現状は、米国籍、欧州国籍の出願人による特許出願件数が多く（図 9）、日本は劣勢にあるため、研究開発の一層の強化が求められる。

したがって、応用産業として医療分野を特定し、分子・材料分野での応用のみでなく、材料、機械、プロセス各技術分野の融合によりバイオミメティクスの応用を実現するためのプロジェクトの創設が期待される。

【提言 3】
模倣の対象として、より様々な生物から着想を得るべきであり、そのためには、科学研究費補助金「生物規範工学」において開発が進められているバイオミメティクス・データベースのような研究開発者の発想を支援するツールや、博物館が持つ多様な生物の知見の活用が有効である。また、応用する際には、メカニズムが完全に解明されていなくても効果がありそうなものを積極的に応用していくべきである。

特許において、どの生物を模倣しているかを見ると、日本国籍の出願人では節足動物（多くが昆虫と見られる）に偏っている一方で、米国籍、欧州国籍、中国籍の出願人による出願では、爬虫類や魚類、植物等、比較的いろいろな生物に分布が見られる（図 11）。企業にお

いてバイオミメティクスの活用に取り組む研究開発者へのヒアリングにおいても、「どの生物でも何らかの優れた点を持っており、生物から学ぼうという目で見れば、必ずヒントとなる部分が見つかる」という意見が挙がっており、より様々な生物から着想を得るべきである。生物から着想を得るために活用できるツールとしては、文部科学省科学研究費補助金の新学術領域研究「生物規範工学」においては、研究開発者の発想を支援する「バイオミメティクス・データベース」の開発が進められている（第3章 第1節）。また、博物館は多様な生物を俯瞰的に見ていることから、その知見も活用できるだろう。

生物学の知見を応用するにあたっては、企業においてバイオミメティクスの活用に取り組む研究開発者へのヒアリングでは、「バイオミメティクスを活用した製品化、商品化の事例が少ないのは、メカニズムが解明されているものを応用しようとするからであり、その場合、研究成果が出るのを待たないといけない」、「原理・原則が完全に解明されていなくても、形は応用できる」との指摘があった。機能の模倣には、メカニズムの解明が必要だが、構造の模倣のように、応用可能なところから応用していくことが、バイオミメティクスのアプローチによる成功例を創出するために重要であると言えよう。

【提言4】
「生物規範工学」に続くプロジェクトの立ち上げや、教育プログラムの開発、生物に着想を得るというコンセプトで様々な分野の研究者を集める拠点の形成等により、研究力の強化を図るべきである。

論文発表件数に表れている通り、2000年頃に欧州を中心に起こった材料系バイオミメティクスの潮流に中国はキャッチアップしたが、日本はできなかった。その要因は、研究体制にあると言える（図17、図22）。欧米では、生物学者が材料系バイオミメティクスを提起し、そこにエンジニアが参画したが、日本ではそのような動きがなかった。有識者ヒアリングでも、「欧米と日本の差はスタートの違いであり、エンジニアリングから入ると、生物にヒントを得るという視点は出てこなかっただろう」、「日本の弱みは、生物の機能性の検証、および、初期プロトタイプの開発は全て海外発である点」という指摘があった。論文発表件数の差は、将来的に技術開発力の差となって現れてくるため、長期的な視野で研究力の強化に取り組むことが必要であり、特に、エンジニアリングの視点を取り入れた生物学の研究の推進が重要であると考えられる。具体的な施策として、我が国では、バイオミメティクス関連のプロジェクトとして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」が実施されているところであるが（第3章 第1節）、それに続く、より実用化を視野に入れたプロジェクトの創設が期待される。ドイツではバイオミメティクスの産学官ネットワークである BIOKON に国が多額の投資をしており、それが国際標準化活動の基盤にもなっているという経緯がある。我が国でも、バイオミメティクス推進協議会が立ち上がりつつあるところであり、そうしたネットワーク形成への支援を検討する必要がある。

また、有識者ヒアリングにおいて、欧米でバイオミメティクスの研究が進んでいる一因として、バイオロジーから入り、それをエンジニアリングと組み合わせる文化があるためではないかとの指摘があった。我が国の大学には、バイオミメティクスを専門とする学部やコースはないが、工学的な視点を持つ生物学者や生物に関心を持つ工学者を育成する教育プログ

ラムの開発や、ハーバード大学の Wyss Institute のような、生物に着想を得るというコンセプトで様々な分野の研究者を集める拠点の形成を進めるべきである。従来は、材料、プロセス、ロボット等の各分野が別々に発展してきたが、世界で戦っていくためには、より広い視野で研究体制を考えていく必要がある。

【提言 5】
バイオミメティクスの応用産業は、医療、消費財、交通・運輸（輸送用機器部材）、建設（建築材料）、環境･エネルギー等と多岐に渡るが、応用産業が明確になっていない技術も多くあるため、応用産業とのマッチングを行い、バイオミメティクスでしかできない適用領域を見出すことが求められる。そのためには、異なる分野間の知識をつなぐ仕組みとしてのバイオミメティクス・データベースの構築が必要である。

今回の調査では、医療、消費財、交通・運輸、建設、環境･エネルギー、安全･安心、農林水産業、通信等、様々な産業への応用を目指して、バイオミメティクスの研究開発が行われていることがうかがえた。これだけ応用産業が多岐に渡る技術は他になかなかないと考えられ、これは、バイオミメティクスが特定の技術分野というよりは、生物を模倣するというアプローチであるからだと考えられる。

一方で、特許動向調査においても、研究開発動向調査においても、応用産業が明確になっていないものも多数見られた（図 9、図 19）。これらの技術について、生物を模倣することでしか実現できない機能が求められる適用領域を見出すことが、その実用化を推進するために必要である。

また、バイオミメティクスはその応用先が分子･材料、構造体、機械、プロセスと全く異なる技術分野にわたっており、また、その応用産業は極めて幅広い。応用産業とのマッチングを行うためには、既存の技術分野、産業の壁を超える必要がある。そこで、異なる技術分野・応用産業の知識を結びつけるバイオミメティクス・データベースが不可欠であると言える。文部科学省科学研究費補助金の新学術領域研究「生物規範工学」において、オントロジーと大容量画像データ検索技術を用いた「バイオミメティクス・データベース」の構築が進められているが、これは今のところ、他国には見られない我が国独自の取り組みである（第 3 章 第 1 節）。また、バイオミメティクスの国際標準化を議論している ISO/TC266 では、我が国が議長国として、バイオミメティクスにおけるデータベース検索に必要なオントロジーを扱う WG4 の議論をリードしており、我が国が競争優位性を発揮できるところであると言える（第 3 章 第 3 節）。有識者ヒアリングでも、生物学者とエンジニアの間をつなぐ翻訳者の存在の重要性を指摘する意見や、「生物規範工学」で構築中のオントロジーの拡充を期待する意見が挙がった。このような単一の学会や業界の枠を超えた取り組みは、バイオミメティクスだけに留まらず、異分野連携のブレイクスルーになり得るという点でも積極的な取り組みが期待される。

News Release

経済産業省
Ministry of Economy, Trade and Industry

平成 27 年 5 月 19 日

特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

注目技術分野における特許の出願動向調査結果をとりまとめました
～知財における日本の強み弱みを見据えた研究開発戦略構築へ～

特許庁は、日本が目指すべき研究開発の方向性を示すため、人工知能技術、バイオミメティクス等の社会的に注目を集めている技術分野を中心に14の技術テーマ（以下、「通常型テーマ」という。）を選定し、特許の出願動向調査を実施しました。また、日本企業が中国市場へ進出することを支援するため、鉄道車両等の中国において出願が活発に行われている技術分野を中心に6の技術テーマ（以下、「中国特化型テーマ」という。）を選定し、中国特許文献を読み込む出願動向調査を実施しました。

1. 概要

特許庁では、市場創出に関する技術分野、国の政策として推進すべき技術分野を中心に、今後の進展が予想される技術テーマを選定し、特許出願技術動向調査を実施しています。また、中国への出願が急増しており、出願動向を注視する必要があることから、平成26年度は新たに中国特許文献を読み込む調査を開始しました。

2. 調査結果の概要（一部抜粋）

＜通常型テーマ＞

・人工知能技術

○人工知能技術はビッグデータを学習することにより近年性能が向上しており、ビッグデータ分析技術の日本への出願件数は多いが、人工知能技術は少ない。

★日本における人工知能技術の進展を促すため、ビッグデータを人工知能の学習のために活用することができる環境を整えることが重要。

・バイオミメティクス

○バイオミメティクスの特許出願件数は米国が多いが、日本、欧州もほぼ同程度。

○バイオミメティクスでは親水性・疎水性材料に関する特許出願が多く、日本は光学材料、構造発色材料に関する特許出願が多い。

★バイオミメティクスの応用先は今後も材料分野が主流であると考えられ、微細構造の製造技術の更なる技術開発が重要。

＜中国特化型テーマ＞

・鉄道車両

○中国での鉄道車両車体シェアは南車、北車による寡占状態。

○推進装置の主電動機や車両方式の電気駆動において、日本国籍の出願が多い。

★日本が優位性を有する技術分野については今後も研究開発を継続していくことが望ましい。

3. まとめ

今回の調査では、今後の進展が予想される技術テーマについて知財における日本企業の強みや弱みを把握することができました。また、中国においては出願件数が急増している中、鉄道の推進装置のように日本国籍の出願人が他国よりも多く出願している分野があることが分かりました。

今後も、特許庁では特許出願技術動向調査等の特許情報を産学官に広く情報発信することを通じ、企業や大学等の研究開発戦略策定、各府省庁の産業政策・科学技術政策の策定に協力します。

※特許出願技術動向調査の URL:
http://www.jpo.go.jp/cgi/link.cgi?url=/shiryou/gidou-houkoku.htm

※平成 26 年度調査実施テーマ一覧

＜通常型テーマ＞

・人工知能技術
・バイオミメティクス
・自動車エンジンの燃焼技術
・農業関連技術
・防災・減災関連技術
・内視鏡
・トレーニングマシン
・低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）
・次世代海洋産業
・抗体医薬
・高吸水性樹脂
・非接触給電関連技術
・次世代無線 LAN 伝送技術
・レアメタル関連技術

＜中国特化型テーマ＞

・鉄道車両
・収穫・脱穀機
・空気調和機（エアコン）
・鉄鋼材料（鋼板等の被覆）
・鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）
・パワー半導体デバイス

（本発表資料のお問い合わせ先）
特許庁総務部企画調査課長　前田
担当者：小川
電　話：03－3581－1101（内線　2155）
03－3592－2910（直通）

特許出願技術動向調査について

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

■「特許情報」を活用した「技術動向の分析と情報発信」を行うために、社会的に注目されている技術分野、中国において出願が活発に行われている技術分野等について調査を実施。

関係府省

産業政策・
科学技術政策
の基礎資料

特　許　庁

特許出願技術動向調査

市場動向、政策動向、特許出願動向、論文発表動向等を踏まえて、技術開発の進展状況、方向性を分析

新規参入企業・研究機関の動向等を分析

特許情報から国際競争力の分析、我が国が**目指すべき研究開発・技術開発の方向性等を提言**

特許庁 審査部

審査の基礎資料
新規な技術分野に関する基礎資料

産業界
大学
研究機関

研究開発戦略
M＆A戦略
知的財産戦略
の策定支援

1

調査項目のイメージ

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

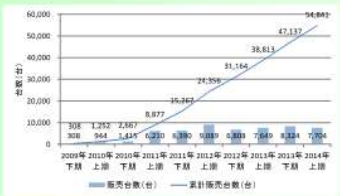
－平成２６年度特許出願技術動向調査「非接触給電技術」より抜粋－

技術俯瞰図

調査対象技術の全体像

市場環境調査

国内におけるEV販売台数の推移



出典：日本自動車販売協会連合会「新車販売台数状況」及び全国軽自動車協会連合会「軽四輪車通称名別新車販売確報」より作成

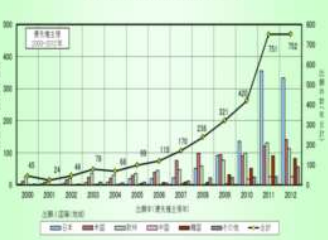
政策動向調査

米国の技術開発プロジェクト

2010年	ORNLプロジェクト		・クレムゾン大学のInternational Center for Automotive Research（CU-ICAR）（米）、Cisco（米）、Duke Energy（米）が当プロジェクトに参画。 ・2013年3月18日にはEvatranが技術等入と試品のデザインを担当する下請け契約を結んだことを発表した。 ・2013年以降、1年目はデザイン研究を行い、2年目は6.6kWと10kWのデザインを6種の市販EVに搭入、3年目にはそれらのEVを現場に設置し、限定的な実証実験を行う。
2012年	DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program		・Hyundai America Technical Center, Mojo Mobility（米）が参画している。 ・本プロジェクトの目的は、85%以上の総合システム効率を持ち、6.6kW以上の給電が可能で、規定の電磁波放射ガイドラインに従いながら最大限の位置ずれ許容性を持つ非接触給電システムを開発、導入、実証することにある。
2012年	Assistant Secretary of Defense for Operational Energy Plans and Programs		・空軍は海外基地における研究開発に投資しており、その予算は2012年度には160万ドル、FYDP（Five Year Defense Plan）を通して660万ドルが充てられている。そのうちにline - of - sight energy transferが可能な非接触給電システムの調査と開発が含まれていた。

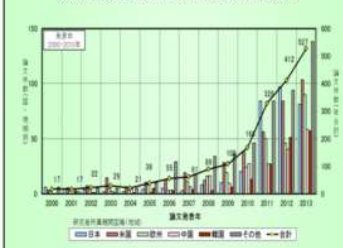
特許出願動向調査

出願人国籍別出願件数推移



研究開発動向調査

研究者所属機関国籍別論文発表件数推移



調査結果の分析と今後の提言

調査結果に基づく提言

●「車両用の磁界共振技術」の研究開発をさらに進め、漏洩電磁界対策、異物侵入対策、ロバスト性能向上等の周辺課題に取り組んでいくことが重要である。

●「モバイル機器用の磁界結合技術」の研究開発をさらに進めるとともに、非接触受電部のモバイル機器内への実装技術やモジュール製造技術のプロセスとノウハウを確立することが重要である。

2

特許出願技術動向調査テーマ

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

平成２６年度特許出願技術動向調査テーマ一覧

＜通常型テーマ＞
- 人工知能技術
- バイオミメティクス
- 自動車エンジンの燃焼技術
- 農業関連技術
- 防災・減災関連技術
- 内視鏡
- トレーニングマシン
- 低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）
- 次世代海洋産業
- 抗体医薬
- 高吸水性樹脂
- 非接触給電関連技術
- 次世代無線LAN伝送技術
- レアメタル関連技術

＜中国特化型テーマ＞
- 鉄道車両
- 収穫・脱穀機
- 空気調和機（エアコン）
- 鉄鋼材料（鋼板等の被覆）
- 鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）
- パワー半導体デバイス

★平成１１年度より特許出願技術動向調査を開始
★平成２６年度までに２０４テーマの調査を実施

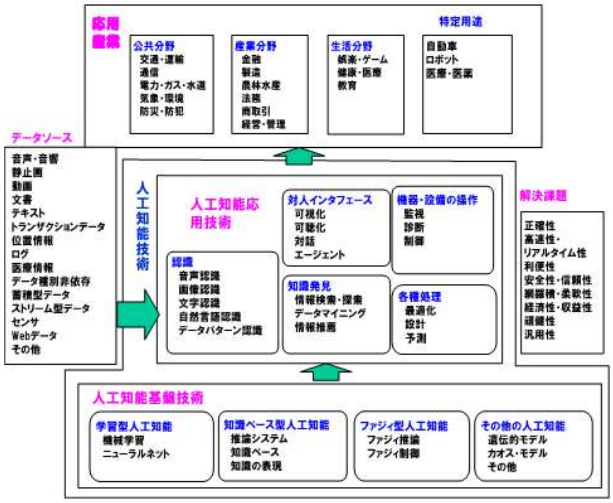
特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

通常型テーマ

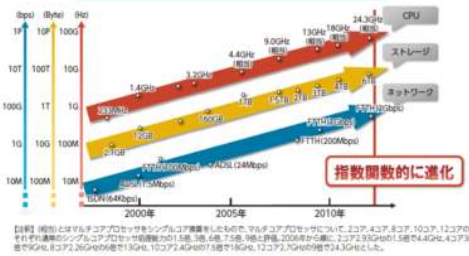
人工知能技術

- 人工知能技術は機械が人間同様に思考するための技術である。人間の脳と同じ機能を再現しようとする技術から、人間の知的な活動の一部を再現することで知能があるように見える技術まで幅広い技術を含む。
- 近年のコンピュータ処理パワー性能の向上、デジタルデータ量の増加により人工知能の性能が向上している。

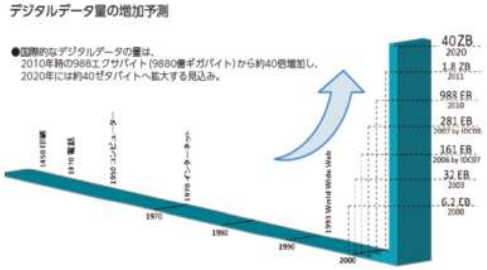
人工知能技術の技術俯瞰図



コンピュータ処理パワーの向上



デジタルデータ量の増加予測

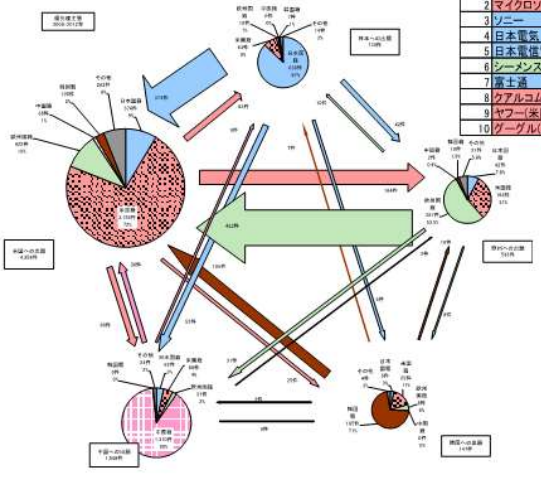


人工知能技術

- 米国籍出願人による出願が多く、出願件数上位ランキングではアイ・ビー・エム、マイクロソフトが１、２位を占めている。
- ビッグデータ分析技術に関しては日本への出願もある程度あるが、人工知能技術では米国への出願が日本への出願に比べて圧倒的に多い。今後は人工知能の性能向上のため、大量のデータを活用できる環境を整えることが好ましい。

人工知能技術の出願件数上位ランキング
（出願先:日米欧中韓、出願年:2008-2012）

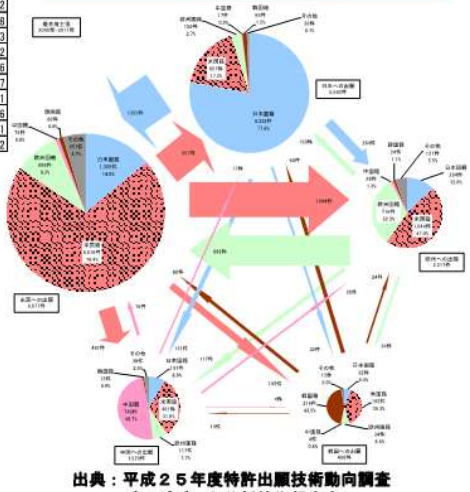
人工知能技術の出願人国籍別出願件数収支
（出願年: 2008-2012）



全体

順位	出願人名称	出願件数
1	アイ・ビー・エム(米国)	562
2	マイクロソフト(米国)	278
3	ソニー	153
4	日本電気	122
5	日本電信電話	116
6	シーメンス(ドイツ)	107
7	富士通	101
8	クアルコム(米国)	96
9	ヤフー(米国)	91
10	グーグル(米国)	72

ビッグデータ分析技術の出願人国籍別出願件数収支
（出願年:2000-2011）

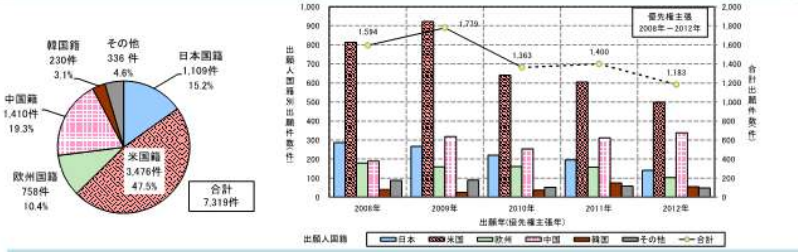


出典：平成２５年度特許出願技術動向調査
ビッグデータ分析技術報告書

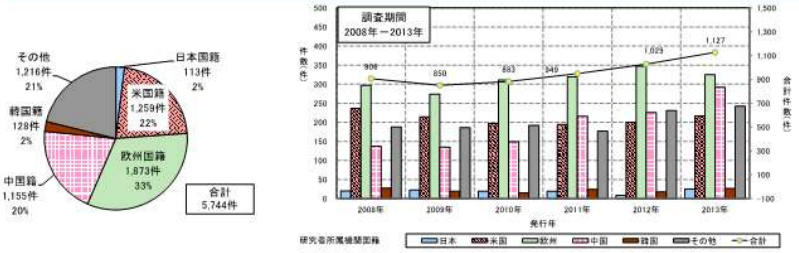
人工知能技術

- 人工知能技術の特許出願件数は出願人国籍別にみると、米国籍出願人による出願が最も多く、全体の47.5 %を占める。
- 論文発表件数は2009年以降増加傾向にある。出願人国籍別にみると、欧州国籍出願人による出願が33%と最も多く、日本国籍によるものは2%と欧州、米国、中国籍と比較して少ない。
- 論文発表件数シェアが特許出願件数シェアと比較して低いことを踏まえ、最先端の人工知能技術を研究する研究者の育成を行うことが望まれる。

人工知能技術の出願人国籍別特許出願件数推移及び出願件数比率
（出願先：日米欧中韓への出願、出願年2008-2012年の出願）



人工知能技術の研究者所属機関別論文件数推移及び論文件数比率（2008-2012年）

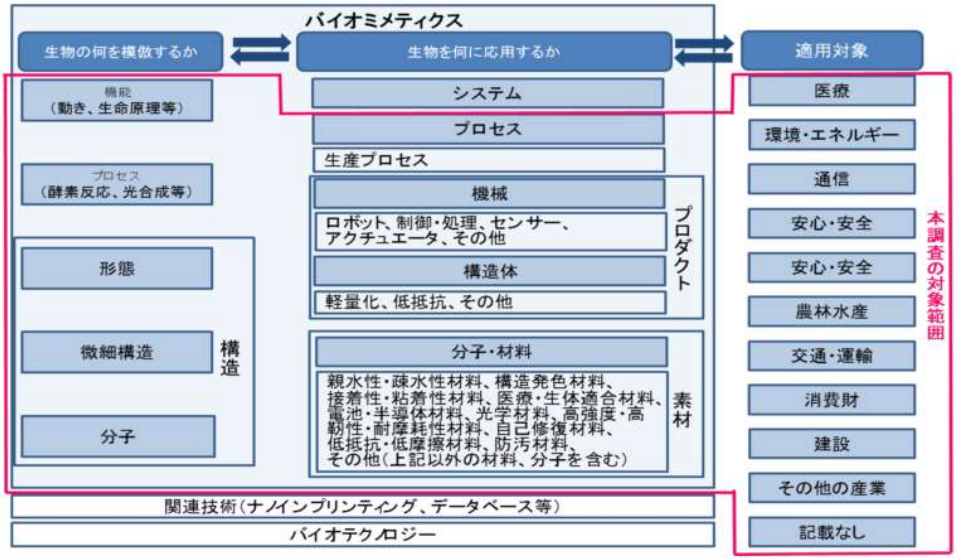


バイオミメティクス

- ISO/TC266[※1]では、バイオミメティクスは、生物の構造や機能を抽出し、それを抽象化し、工業製品に応用したものと定義する方向で議論されている。
- 本調査では、上記の定義をベースにしつつ、生物から何らかの着想を得ていると考えられる技術を広く対象とした。

※1：バイオミメティクスの国際標準化を議論する委員会

バイオミメティクスの技術俯瞰図



バイオミメティクス

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 各国とも「分子・材料」分野の製品化事例が比較的多い。
- 米国や欧州では「機械」分野の「ロボット」「制御・処理」の製品化事例もみられる。
- 日米欧中韓への出願件数は、米国籍、欧州国籍、日本国籍、中国籍の順となっているが、大差はなく拮抗。

日本における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	99%クラリティコーティング	蓮の葉の表面構造	超撥水性表面を有する成形物	シチズンセイミツ株式会社
		マイクロガード加工タイル	カタツムリの殻の表面構造	タイル建材	株式会社イナックス（現株式会社LIXIL）
		撥水ウィンドウ	蓮の葉の表面構造	自動車用撥水ガラス	日産自動車株式会社
	構造発色材料	モルフォテックス	蝶の羽の積層構造	化学繊維	帝人ファイバー株式会社 日産自動車株式会社 田中貴金属工業株式会社
	光学材料	モスマイト	蛾の眼の表面構造	反射防止フィルム	三菱レイヨン株式会社
	接着性・粘着性材料	ヤモリテープ	ヤモリの足の表面構造	分析用粘着テープ	日東電工株式会社
		EC-VX500 他 スクリュープレスサイクロン	ネコ科動物の舌の表面構造	サイクロン掃除機	シャープ株式会社
	医療・生体適合材料	ランセット針	蚊の針の形状	注射針	株式会社ライトニックス
	低抵抗・低摩擦材料	WATER GENE マーリンコンプ	カジキの体表面のぬめり	競泳水着	美津野株式会社（現ミズノ株式会社） 東レ株式会社
	防汚材料	A-LF-Sea	マグロの体表面の構造	超低燃費型船底防汚塗料	日本ペイントマリン株式会社
構造体	低抵抗	ES-GE60L他 ドルフィンパル	イルカの表皮のしわ、尾びれの形状	洗濯機	シャープ株式会社
		500系新幹線	カワセミのくちばしの形状	新幹線の先端形状	西日本旅客鉄道株式会社

出願人国籍別特許出願件数比率
（出願先：日米欧中韓への出願、2001～2012年の出願）

米国における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	Lotusan coating	蓮の葉の表面構造	コーティング剤	Sto Corp
	接着性・粘着性材料	Entropy TacTile	林の地面の色・模様、吸着法	接着性のカーペットタイル	Interface FLOR
	光学材料	Mirasol ディスプレー	蝶の羽の発色メカニズム	ディスプレイ	Qualcomm
	防汚材料	Sharklet Textured Film	鮫肌の表面構造	細菌繁殖防止フィルム	Sharklet Technologies Inc.
	その他	Seal-Tite (Brinker Technology)	血小板の傷口を塞ぐメカニズム	パイプラインの漏洩個所の察知、漏洩防止	Seal-Tite International
		Biomatrica system	クマムシ、ブラインシュリンプの乾燥耐性に関わる分子機構	DNA、RNAを室温管理できる試薬容器	Biomatrica
構造体	低抵抗	Pax Water mixer	海草の螺旋構造	ミキサー	PAX Scientific
機械	制御	Bluestar 32-bit module	魚や鳥の群行動のメカニズム	センサー	Blutronix Inc.
		BluePacket and GreenLink			
		スマートグリッドアプリケーションのためのソフトウェア・アルゴリズム	イルカの群行動のメカニズム	ソフトウェアアルゴリズム	Green Wavelength

欧州における主要なバイオミメティクス製品

大分類	中分類	製品	模倣したもの	用途	開発企業
分子・材料	親水性・疎水性材料	Lotusan	蓮の葉の表面構造	撥水性塗料	（独）Evonik社等
		Mincor TX TT	蓮の葉の表面構造	繊維用スプレー	（独）BASF社
		swallowing bone punch	ヘビと猫の牙の形状	椎体形成術に用いる医療器具	（独）フラウンホーファーIPA（生産技術・オートメーション研究所）
	低抵抗・低摩擦材料	エアバスA340-300	鮫肌のリブレット構造	機体塗料	（独）ルフトハンザ航空 （仏）エアバス
		船舶塗料	鮫肌のリブレット構造	船舶塗料、コーティング	（独）VOSSCHEMI
		LZR Racer	鮫肌のリブレット構造	競泳水着	（英）スピード・インターナショナル
	医療・生体適合材料	Ceramid R	セラミドの分子構造	化粧品（人工セラミド）	（仏）ロレアル
構造体	低抵抗	冷却ファン	猛禽類や海洋鳥類の翼の形状	ノイズレス製品	（独）Blacknoise社
	軽量化	タイヤ・ホイールの軽量化	珪藻の構造	自動車	（独）Elise社
	その他	Dustino	象の鼻の制御機構	ハンディモップ	（独）Freudenberg Household Products社
機械	ロボット	BionicOpter	トンボの羽ばたき機構	ロボット	（独）フエスト社
		SmartBird	鳥の羽ばたき機構	ロボット	
		Bionic Handling Assistant	象の鼻の制御機構	ロボット	
		AquaJellies2.0	クラゲの制御機構	ロボット	
		Air Penguin	ペンギンの制御機構	ロボット	

9

バイオミメティクス

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- バイオミメティクス全体の出願件数は増加傾向であり、特に中国は魚類、昆虫等の動物を模倣したロボットに関する出願が近年著しく出願が増加している。
- 応用先による分類では、「親水性・疎水性材料」がいずれの国籍でも比較的多い。日本国籍以外は「医療・生体適合材料」が多い一方、日本国籍は「光学材料」、「構造発色材料」が多い。
- 出願件数のランキングでは、欧米が1位、2位を占めているものの、日本企業も上位10位に5社ランクインしている。
- バイオミメティクスの応用先は今後も材料分野が主流であると考えられる。より多くの製品化事例を今後生み出していくためにも、製造コストの削減や耐久性の向上、量産化等の微細構造の製造技術の更なる技術開発が求められる。

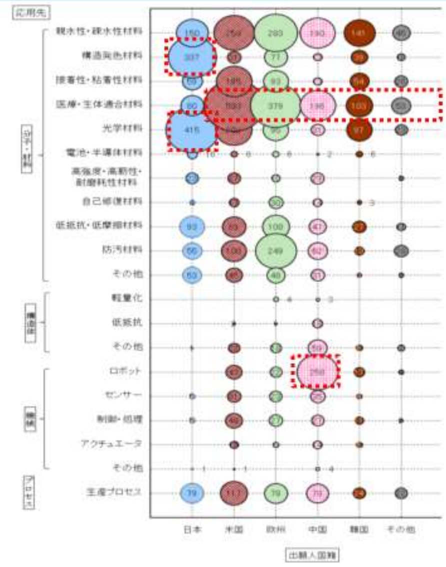
出願人国籍別特許出願件数推移及び出願件数比率
（出願先：日米欧中韓への出願、2001～2012年の出願）

注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

バイオミメティクスの出願件数上位ランキング
（出願先：日米欧中韓、2001年-2012年の出願）

順位	出願人名称	出願件数
1	3M INNOVATIVE PROPERTIES CO (US)	255
2	CREAVIS TECH & INNOVATION GMBH (DE)	97
3	シャープ	82
4	UNIV JILIN (CN)	60
5	UNIV CALIFORNIA (US)	59
6	富士フイルム	55
7	MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY (US)	46
8	POSTECH ACAD IND FOUND (KR)	43
9	日産自動車	38
10	パナソニック	37
10	トヨタ自動車	37

バイオミメティクスの技術区分別（応用先）－出願人国籍別出願件数
（出願先：日米欧中韓、2001年-2012年の出願）



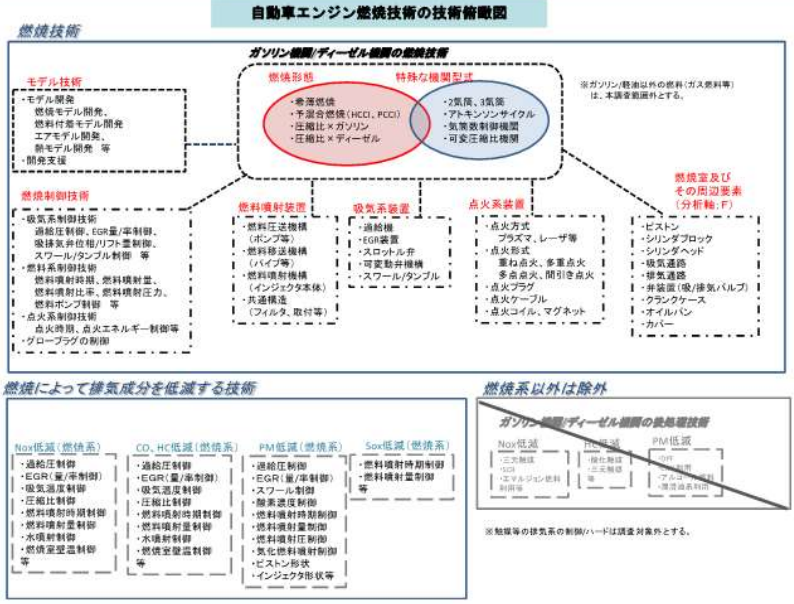
10

自動車エンジン燃焼技術（ＳＩＰ※連携テーマ）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 本調査における「自動車エンジンの燃焼技術」の調査対象は、「燃焼技術」と「燃焼によって排気成分を低減する技術」に分けられる。
- 「燃焼技術」は、燃焼制御技術、燃料噴射装置、吸気系装置、点火系装置、燃焼室及びその周辺要素（ピストンやシリンダブロック、シリンダヘッドなど）、モデル技術、燃焼の形態（希薄燃焼など）、特殊な機関型式（可変圧縮比機関など）に分類し、「燃焼によって排気成分を提言する技術」は、燃焼によって、Noxを低減する技術、CO,HCを低減する技術、PMを低減する技術、Soxを低減する技術に分けられる。

自動車エンジン燃焼技術の技術俯瞰図



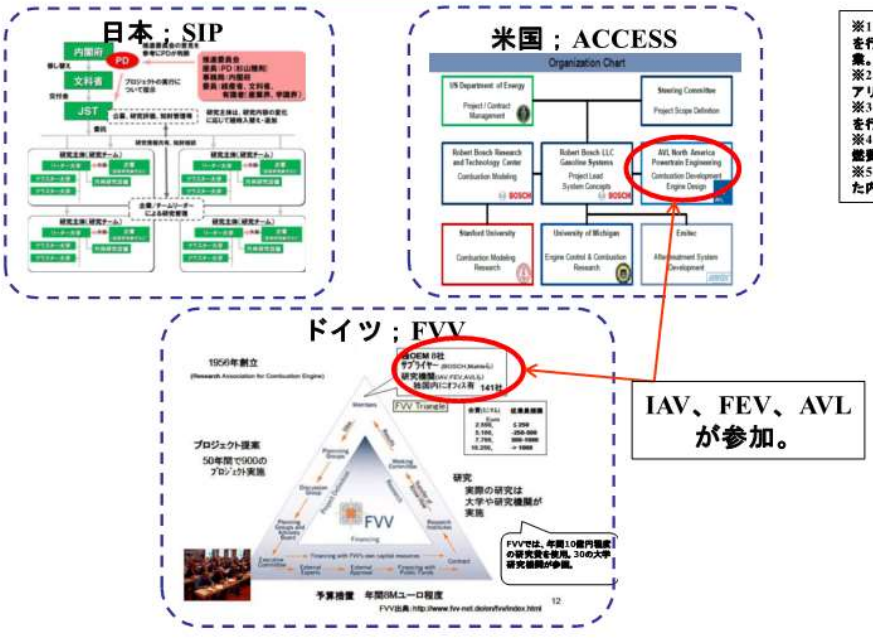
※：ＳＩＰとは、戦略的イノベーション創造プログラム。総合科学技術・イノベーション会議が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために新たに創設するプログラム。

自動車エンジン燃焼技術（ＳＩＰ※連携テーマ）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 規制強化に伴い、国家プロジェクトの中で産官学が連携し、イノベーションを推進していく動きが見られる。
- カーメーカーの開発行為の一部を担うAVL ※1やIAV ※2 、FEV ※3といった会社が米国のACCESS ※4やドイツのFVV ※5に参加している。

自動車エンジン開連の日米欧の産学官連携

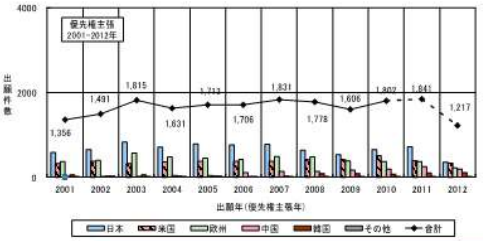


※1：AVLは、エンジンなどの研究/開発などを行っているオーストリアに本社を構える企業。
※2：IAVは、ドイツに本社を構えるエンジニアリング企業。
※3：FEVは、エンジンなどの研究/開発などを行っているドイツに本社を構える企業。
※4：ACCESSとは、米エネルギー省による燃費向上プロジェクト。
※5：FVVとは、国や企業からの支援を受けた内燃機関の研究コンソーシアム。

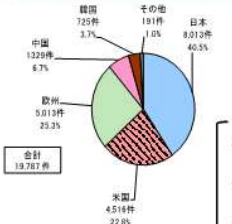
自動車エンジン燃焼技術（ＳＩＰ※連携テーマ）

- 自動車エンジン燃焼技術の出願件数比率を国籍別で見ると、日本国籍からの出願が最も多く、40.5%を占めている。
- 特許出願件数のランキングにおいても、日本企業が上位にランクインしている。
- 燃焼技術の内、各技術区分を国籍別で見ると、日本国籍の出願が全体的に多い結果となっているが、一部の技術区分（モデル技術）では欧州国籍の方が多い結果となっている。
- 欧米では、カーメーカーの開発行為及び産学連携を担う会社が、大学及び自動車産業のニーズを取り込んだモデル技術を開発しており、日本でもそのような会社の創出が望まれる。

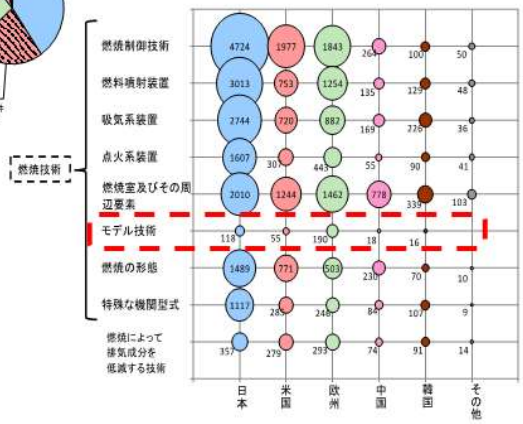
自動車エンジン燃焼技術の出願人国籍別特許出願件数推移（出願先：日米欧中韓、2001～2012年の出願）



自動車エンジン燃焼技術の日米欧中韓への特許出願比率（出願年：2001年-2012年）



燃焼技術及び燃焼によって排気成分を低減する技術の出願人国籍別出願件数（出願年：2001年-2012年）



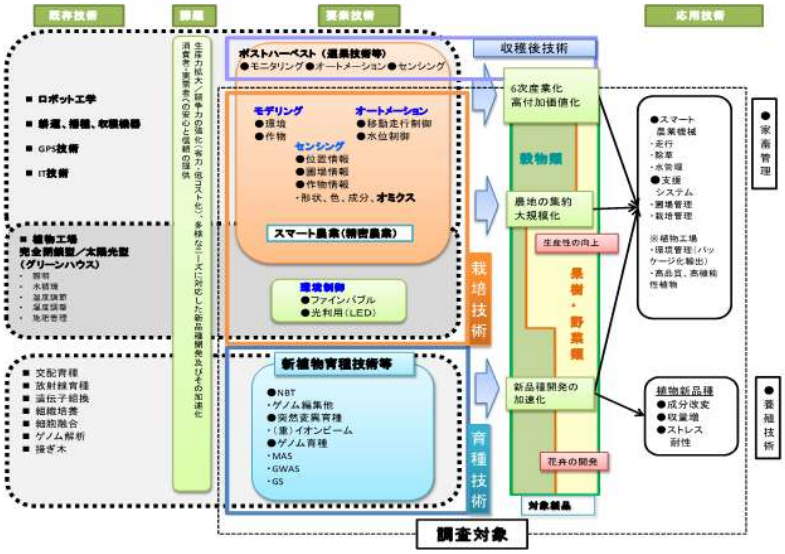
自動車エンジン燃焼技術の日米欧中韓への特許出願件数ランキング（出願年：2001年-2012年）

順位	出願人	件数
1	トヨタ自動車	2,576
2	日産自動車	1,040
3	フォード(米国)	952
4	ボッシュ(ドイツ)	866
5	GM(米国)	855
6	本田	665
7	マツダ	659
8	デンソー	570
9	現代自動車(韓国)	514
10	ダイムラー(ドイツ)	451

農業関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

- 本調査における対象技術は、栽培技術・育種技術の要素技術及び応用技術とした。
- 栽培技術には、スマート農業（ロボット技術やICT、GPS等の先端技術を活用し、超省力化や高品質生産等を可能にする新たな農業）、植物工場の一部としてファインバブル※1 やLEDを用いた光による栄養成分等の制御技術※2 が含まれる。
- 育種技術には、ゲノム編集技術※3等のNew Plant Breeding Techniques（NBT）※4やマーカー利用選抜※5などのゲノム育種を中心とした新しい育種技術が含まれる。

農業関連技術の技術俯瞰図（出願先：日米欧中韓、2001～2012年の出願）



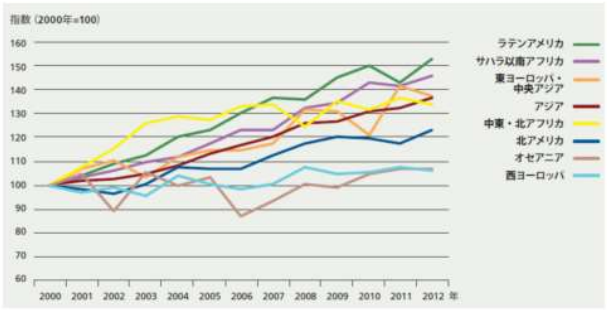
※1：百マイクロメートル以下の微細な気泡を扱う技術で、バブル発生時の活性酸素などによる滅菌や水質浄化などの技術が実用化されており、水耕栽培植物の生育促進への応用も研究されている
※2：LED光の波長を制御するなどにより栄養改変や発育促進を目指す光照射技術
※3：DNAの特定部位をヌクレアーゼにより切断可能にした技術。切断の修復の過程で、欠失や挿入変異が起こり、塩基配列特異的な遺伝子改変が生じる
※4：NBTの主要な技術であるゲノム編集等の技術は、遺伝子組換え技術（従来技術に分類）を新規作物の作出段階で利用する技術である。ゲノム編集技術を利用して作られた種は、外来のDNAを含まず、最終的に自然界で生じる突然変異や交配によってできた種と同様で、遺伝子組換え技術を利用した痕跡が残らない。
※5：ゲノム上にある優良形質を決定している遺伝子（群）及びその周辺のDNA塩基配列を目印（DNAマーカー）として選抜育種を実施する手法

農業関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 世界全体でみると農業生産高は増大しており、特にラテンアメリカ、サハラ以南アフリカ等の途上国において著しい。
- 2009年に、農地の効率的な利用を促すことを目的として「平成の農地改革」と言われる改正農地法が施行された。農家や農業生産法人以外の企業などが農地を借りる際、従来は市町村長が認めた耕作放棄地や遊休地に限られていたが原則として自由になった。また、農地を購入できる農業生産法人への企業の出資比率の上限も10%以下から50%未満に引き上げられた。さらに、農地の賃貸、貸付（リース方）が可能になり、また、農地を所有できる農業生産法人の要件が大幅に緩和された。
- その結果、施行後約5年で1,576法人の新規参入があった（内、NPOが406社、株式会社が975社）。農地法改正前の新規参入数436社と比べて約3.6倍の一般法人の参入があり、農地を利用して農業経営を行う法人は着実に増加していることがうかがえる。

世界各地域での食糧生産量推移



出典：（公社）国際農林業協働協会、世界食料農業白書 2012年報告（2012）
注）食糧純生産：作物と畜産の粗生産から飼料と種子を控除

新たに参入した農業生産法人数の推移

農業生産法人の増加

	改正農地法施行前（H15.4～H21.12）	改正農地法施行後（H21.12～H26.6）	増加数	増加率
参入法人数	436	1,576	1,140	361%
内株式会社	250	975	725	390%
1年当たり平均参入数	65	350	286	542%

出典：農林水産省　企業等の農業参入について

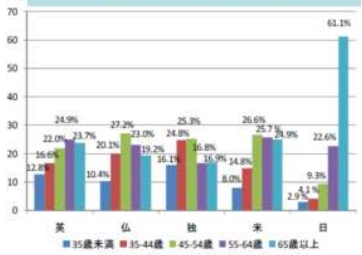
15

農業関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

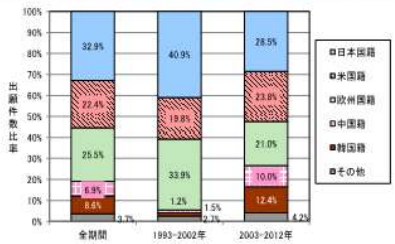
- 日本では、65歳以上の農業従事者が60%を超え高齢化が顕著化している。
- 農業関連技術（栽培技術）分野においては、日本国籍、米国籍、欧州国籍の出願人による出願件数が多いが、2000年代以降、中国籍、韓国籍の出願件数が急増しており、相対的に日本国籍の出願比率が減少している。
- 日本が強みを有する圃場や作物に対するセンシング技術をさらに発展させつつ、高齢化により失われる恐れがある熟練農業者の知識やノウハウを取り込んだ包括的な農業情報に関するデータベースを構築することが望まれる。

各国の農家の年齢構成

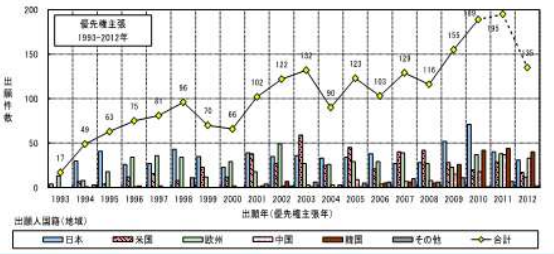


出典：農林水産省資料（2013）
http://www.cas.go.jp/jp/tpp/pdf/2013/6/130611_nougyou.pdf

農業関連技術（栽培技術）の出願人国籍別特許出願件数比率（出願先：日米欧中韓、1993～2012年の出願）



農業関連技術（栽培技術）の出願人国籍別特許出願件数推移（出願先：日米欧中韓、1993～2012年の出願）



農業関連技術（栽培技術）の特許出願件数ランキング（出願先：日米欧中韓、出願年：1993年-2012年）

1993－2002年			2003－2012年		
順位	出願人	出願件数	順位	出願人	出願件数
1	CLAAS KGaA mbH（ドイツ）	67	1	Deere & Company（米国）	143
2	クボタ	42	2	CLAAS KGaA mbH（ドイツ）	74
3	Deere & Company（米国）	32	3	CNHグループ（イタリア）	36
4	井関農機	27	4	井関農機	21
5	農業・食品産業技術総合研究機構	24	5	ヤンマー	16
5	富士重工業	24	5	クボタ	16
5	Lely（オランダ）	24	7	江蘇大学（中国）	15
8	サタケ	19	8	農村振興庁（韓国）	14
9	Case Corp（米国）	16	9	シャープ	13
10	ヤンマー	15	9	Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH（ドイツ）	13
			9	中国農業大学（中国）	13

16

防災・減災関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

- 防災・減災関連技術は、自然災害とそれに伴う2次災害に対して、それらを防いだり、災害による被害を最小限にとどめたりすることに関連する技術である。
- 防災・減災技術は、地震や気象などの自然災害の観測、災害発生のメカニズム解明、災害発生やそれによる被害状況を予測するための「①観測・予測技術」、災害発生前に自然災害に対する抵抗力、復元力、耐久力などを構造物・自然環境に予め付与しておくための技術や、2次災害として発生する停電への対策などの「②予防技術」、自然災害が発生した場合に被害を最小限に留め、早期復旧を目指す「③被害対応技術」、観測・予測、予防、被害対応の各技術分野から得られる情報を統合化ならびに共有化することによって、防災・減災機能を一層効果的にするための「④情報統合化技術」、の4分野に分類できる。

防災・減災関連技術の技術俯瞰図

分類		原因	現状の問題点	課題	解決手段
①観測・予測技術	地震・津波予測	首都直下地震	・予知できるメカニズムが未解明 ・警報発出までのリードタイムが長い ・空振り率が大きい（米国で75%[竜巻]）	高速化・即時性・迅速化 高精度化・高解像度化 高信度化・高適中率化 効用性・被害軽減度 汎用性・普遍性	・マルチパラメータフェーズドアレーレーダ（注1） ・多地点協調観測（注2） ・4次元変分法（注3） ・3次元画像解析・セル追跡（注4） ・バックワードトラジェクトリ（後方流跡線）（注5） ・高精細津波浸水上推定（注6） ・可視化手法（注7） ・気象予測データ収集配信（注8）
	横火予測	プレート運動			
		活断層			
	豪雨・雷予測	積乱雲			
	台風予測	低気圧・前線			
	竜巻・ダウンバースト	積乱雲			
		対流・上昇流			
	リスクアセスメント	災害リスク			

分類	目的	現状の問題点	課題	解決手段
②予防技術	耐震・免震・制震	省エネルギーの制御	・防波堤・防潮堤の構築（ハード対策では限界） ・ソフト面（アクティブ制御など）の開発が遅れている ・ゼネコン各社は独自のソフト面の開発は非公開	効用性 耐久性 早期復旧性 効用性・被害軽減度 経済性・小型化 安定性	・診断（耐震・液状化） ・地盤調査 ・耐震壁、建物強度補強工法 ・すべり併用複合免震、積層ゴム支承 ・履間ダンパー型、マスダンパー型 ・直立堤、傾斜堤、消波ブロック被覆堤 ・シミュレーション、施設被害軽減化 ・UPS、バックアップ電源、電力グリッド
	防波堤・防潮堤	水エネルギーの制御			
	液状化対策	診断・対策			
		構造強靭化			
	停電対策	停電と停電による影響予防			

分類	収集データ	現状の問題点	課題	解決手段
③被害対応技術	安否確認	衛星データ	・ネットワーク上に情報を流通させる仕組みが不十分 ・情報の標準化が不十分 ・通信系の障害・輻輳 ・システム認知度が少ない ・情報弱者対策が不十分 ・通信輻輳時の安否確認の仕組みが不十分 ・短時間での推定が未達成	確実性・正確性 迅速化 即時性 高精度化 信頼性	・多様な情報メディア群の活用（通信・放送、衛星データ、ソーシャルメディア） ・高精度リアルタイム被害推定 ・医療防災ネットワーク ・ハザードマップの作成 ・災害状況・災害発生位置情報収集
	情報共有	ソーシャルメディアデータ			
		携帯メール			
	情報収集	伝言ダイヤル			
		被災情報			
	情報配信	医薬品情報			
		放送メディア			
	警告				
	被害推定	被災場所 災害規模			

分類	収集データ
④情報統合化技術	観測・予測 予防 被害対応データ

現状の問題点
観測・予測、予防、被害対応の情報が連携されていない

課題
効用性
汎用性

解決手段
・災害関連情報システム連携

利用者（応用産業）
公共機関
（自治体、警報、消防など）
社会インフラ
（鉄道、電力・ガス・水道、電気通信、放送など）
農林水産業
建設業（含む土木）
製造業
流通業
情報提供業
（気象情報、緊急通報等）
運輸・物流
医療機関
保険業

構造物（適用対象）
橋梁
道路・トンネル
河川・海岸
空港・港湾
ビル・家屋
沿岸コンビナート
宅地・造成地
通信・情報設備
観測設備

標準化
①観測・予測技術関連
・ISO16822、17713等：気象の計測方法
等
②予防技術関連
・ISO23469：インフラ・構造物の設計の基本－地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用
・ISO 22762-1：エラストマー耐震絶縁装置－第1部：試験方法
・IEC 61587-2：電気機器の機械構造－IEC 60917及びIEC 60297の試験－第2部：キャビネット及びラックの耐震試験
・IEC/TS 61463：ブッシング－耐震認定
・国内：ISO/IEC対応JIS
等
③被害対応技術関連
・ISO22320：社会セキュリティー危機管理－危機対応に関する要求事項
・ITU-T FG-DR&NRR TR：災害復旧システムの要件
・ITU-T E.107：緊急通信サービスと各国の緊急通信サービスとの相互接続のためのフレームワーク
等

注1：積乱雲の発達を特定より高速に観測するためのフェーズドアレイ型のアンテナを採用したレーダー
注2：多地点で得られる観測データを利用して、広範囲（数100km程度）にわたる予報を行う方法
注3：気象現象を予測する際に、大気の状態を立体的空間と時間（4次元）で捉え、予測精度の向上を図る方法
注4：積乱雲のセル（積乱雲を構成する最強の最小単位）を追跡し、ゲリラ豪雨への発達を予測する解析方法
注5：ある地点で観測された大気物質の起源について、その地点に到達するまでの経路上で何が起こったかを遡って解析する手法
注6：海岸から内陸へ津波がかけ上がる高さ（遡上高）を防護施設の倒壊等を考慮して高精度に推定する方法
注7：地震津波観測網などの観測データから津波の遡上を可視化する手法
注8：気象データの解析結果に基づく予報及び警報等の各種気象情報の配信方法

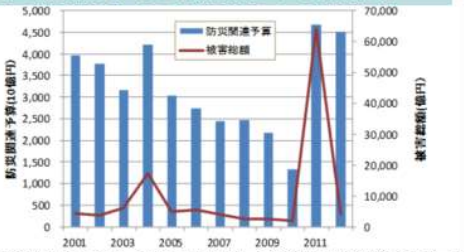
SIP課題「レジリエントな防災・減災機能の強化」関連項目

17

防災・減災関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

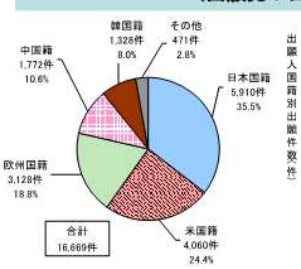
- 我が国の防災関連の予算は、2004年の中越地震以降漸減し、2011年の東日本大震災以降、大きく増大している。2001年から2012年までの12年間の平均では、我が国の防災関連予算は年当たり約3.2兆円となっている。
- 防災・減災関連市場は、観測・予測、予防、被害対応、情報統合化の各技術に対応して存在し、インフラ市場（世界）は10兆円規模である。
- 出願人国籍別の出願件数は、日本国籍の出願が全体の35.5%と最も多く、次いで米国籍の24.4%、欧州国籍の18.8%の順になっている。年推移の伸び率では、中国籍や韓国籍の出願件数の伸び率が日米欧の国籍からの出願件数の伸び率より大きい。

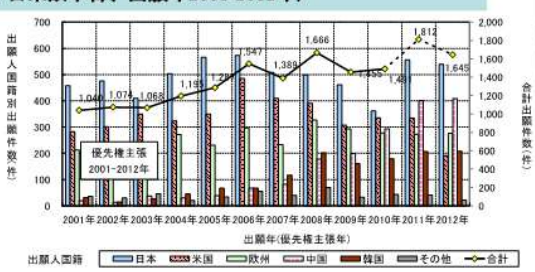
我が国の防災関連予算と自然災害による被害総額



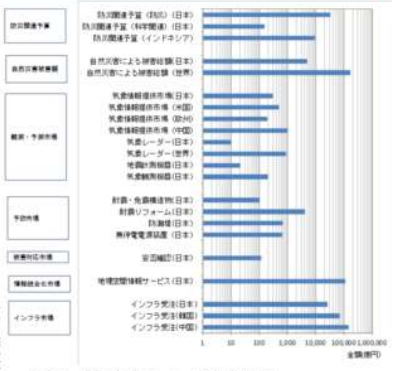
出典：内閣府「防災白書」のデータをもとに作成、被害総額は総務省統計局データをもとに作成

防災・減災関連技術の出願人国籍別の出願件数推移及び出願件数比率（出願先：日米欧中韓、出願年2001-2012年）





防災・減災関連市場の規模



出典：各種公表データをもとに作成

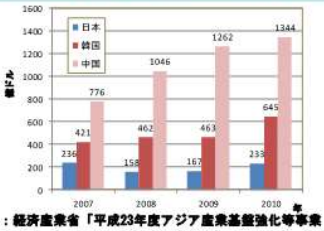
18

防災・減災関連技術（ＳＩＰ連携テーマ）

- 予防技術についての出願件数は日本が57.4%と圧倒的に多いが、2007年から2010年にかけて一時的に減少している。これは、2004年の新潟県中越地震後の件数増加とみられるピークを過ぎたことが原因と考えられる。韓国の2004年以降の増加は、同年に制定された「災難及び安全管理基本法」も影響していると考えられる。
- 水道や発電プラントといったインフラの受注実績は日本は、中国及び韓国に比べ低い。
- 国際標準に関して、予防技術については日本からの提案が多いが、被害対応技術については、米国や欧州に遅れを取っている。情報統合化技術については、全体として提案数が少ない。システムの運用・維持管理を行うための、被害対応技術や情報統合化技術に関する国際規格の提案強化と併せ、既存規格も取り込んだ防災・減災技術基盤の構築が望まれる。
- この基盤を利用した情報の統合化を進め、我が国が強みを持つ予防技術を柱とする総合的な防災・減災関連システムの技術開発を行うことにより、防災・減災関連技術を付加価値としたインフラシステムの国際展開が期待できる。

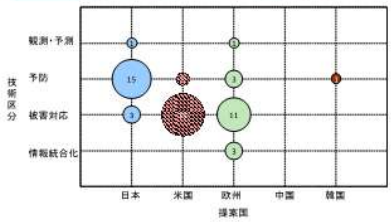
技術区分（予防技術）ー出願人国籍別の出願件数推移、出願件数比率、出願件数ランキング（出願先：日米欧中韓、出願年2001-2012年）

日本・韓国・中国の海外インフラ受注実績の推移



出典：経済産業省「平成23年度アジア産業基盤強化等事業（インフラ・システム輸出に係る基礎情報収集調査）（2012年3月）」

技術区分別国・地域別の国際規格提案数



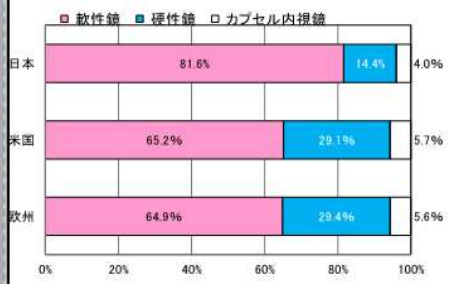
19

内視鏡

- 「内視鏡」とは、外部から直接観察できない対象物の内部の状態を、光学レンズや光ファイバー、電気信号などを介して観察を行うものである。
- 内視鏡は主に、胃・大腸検査などに用いられる軟性内視鏡、腹腔鏡手術などに用いられる硬性内視鏡、小腸検査などに用いられるカプセル内視鏡の３種類に分類される。
- 内視鏡種類別のシェアでは、日本で軟性鏡のシェアが8割を超え、米欧でも6割を超えている。

内視鏡の技術俯瞰図

日米欧の内視鏡種類別のシェア(2013年)

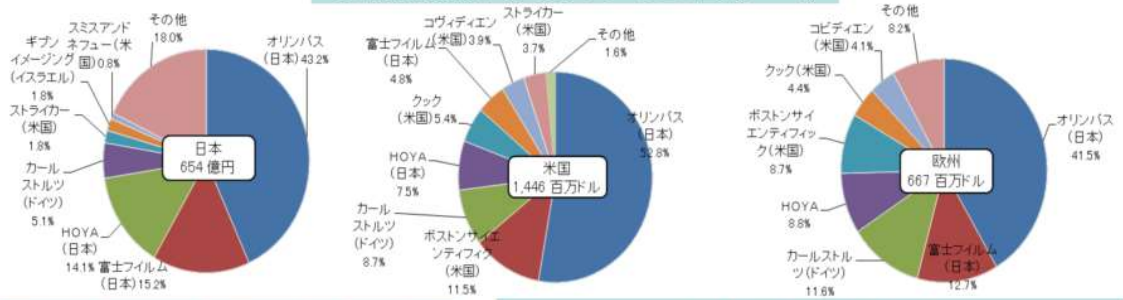


20

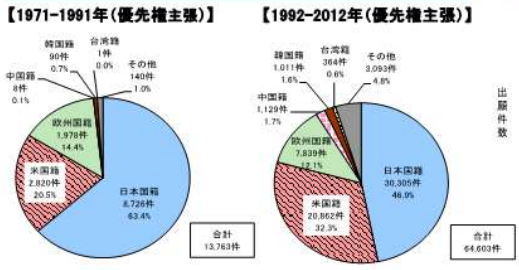
内視鏡

- 日本企業は世界で初めて胃カメラを開発したこともあり、技術的優位性を有し、内視鏡市場において高いシェアを有する。
- 日米欧で、オリンパスが1位の市場シェアを有しており、富士フィルム、ＨＯＹＡも上位にランクインしている。
- 日本国籍出願人の優位性は維持されているが、米国籍出願人による出願の比率は増加傾向。
- 日本国籍出願人は出願件数も最多で、2003年以降、年間2,000件前後の出願を行い、米国籍、欧州国籍出願人がそれに次いでいる。

日米欧の内視鏡市場におけるシェア上位企業(2012年)



出願件数比率（出願先：日米欧中韓台伯露印ASEANイ、出願年：1971-1991,1992-2012年）



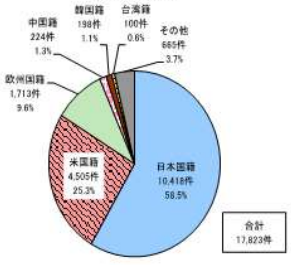
出願人国籍別出願件数推移
（出願先：日米欧中韓台伯露印ASEANイ、出願年：1992-2012年）

内視鏡

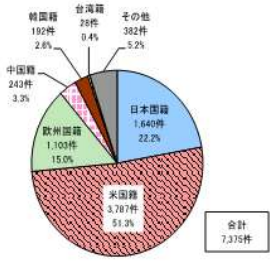
- 軟性鏡は日本国籍出願人が優位であるが、硬性鏡については海外企業の出願が活発に行われており、カプセル内視鏡についてはイスラエルの企業が出願人別のランキングにおいて上位にランクインしている。
- 日本が優位性を有する軟性鏡について低侵襲化・高精度化を進め、治療機能を備えた高度な軟性鏡の研究開発を進めるとともに、軟性鏡で築いた観察・撮像技術等における強みをいかし、硬性鏡分野への進出を拡大させることが重要。
- また、カプセル内視鏡も診断時間短縮化のための技術開発を進め、市場での普及を図っていくことが望まれる。

内視鏡種別の出願人国籍別出願件数比率
（出願先：日米欧中韓台伯露印ASEANイ、出願年：1992-2012年）

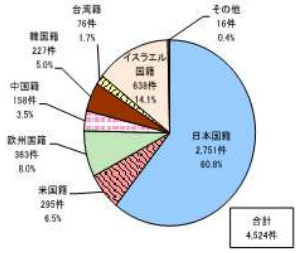
軟性鏡



硬性鏡



カプセル内視鏡



内視鏡の特許出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓台伯印露ASEANイ、2004年-2012年の出願）

軟性鏡

順位	出願人（出願人国籍）	出願件数
1	オリンパス株式会社	3,643
2	富士フイルム株式会社	1,672
3	HOYA株式会社	965
4	ジョンソンアンドジョンソン（米国）	697
5	コヴィディエン（米国）	258

硬性鏡

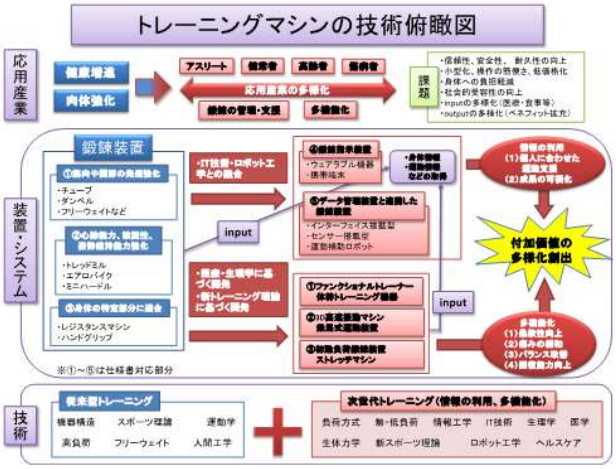
順位	出願人（出願人国籍）	出願件数
1	コヴィディエン（米国）	782
2	ジョンソンアンドジョンソン（米国）	571
3	オリンパス株式会社	450
4	カールストルツ（ドイツ）	165
5	インテュイティブサージカル（米国）	154

カプセル内視鏡

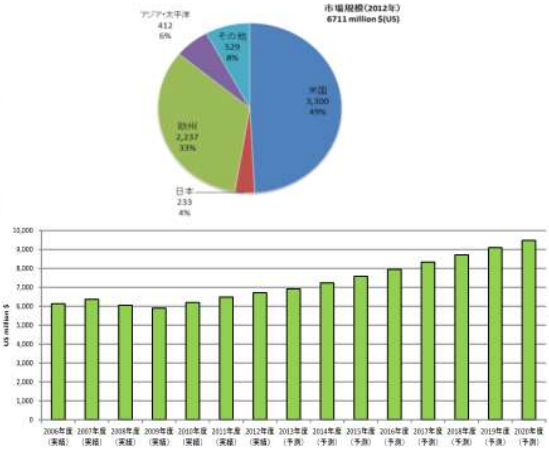
順位	出願人（出願人国籍）	出願件数
1	オリンパス株式会社	2,013
2	ギブンイメージング（イスラエル）	265
3	シーメンス（ドイツ）	191
4	HOYA株式会社	104
5	富士フイルム株式会社	76

トレーニングマシン

- 本調査におけるトレーニングマシンの調査対象としては、①筋肉や関節を発達強化するための装置、②心肺能力、動作の敏捷性または姿勢維持能力強化のための鍛錬装置、③身体の特定部分の筋肉や関節を鍛錬する装置、④鍛錬のための指示を与える装置、および⑤鍛錬のデータ管理といった鍛錬に関する情報機器等を含む。
- トレーニングマシンの2012年の市場規模は世界で67億ドルであり、国別では米国が最大で49%、欧州が33%、日本は4%である。世界の市場の推移は、全体として拡大傾向にある。



トレーニングマシン市場の国別内訳と(2012年)と推移(世界)

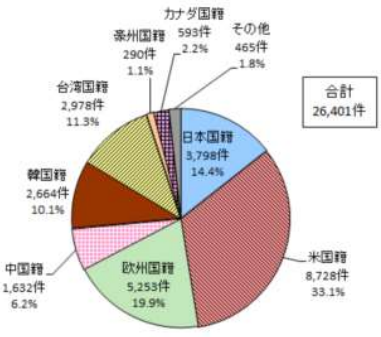


（出所：Global Industry Analysts, Inc. PHYSICAL FITNESS EQUIPMENT 2014年9月発行）

トレーニングマシン

- 特許出願件数は2004年までは上昇傾向で、2004年以降は横ばい傾向である。
- 出願人国籍別にみると、全体の33.1%を占める米国籍出願人による出願が最多。次いで欧州が19.9%、日本国籍が14.4%、韓国籍が10.1%、台湾国籍が11.3%、中国籍が6.2%であり、日本国籍出願人は3位となっている。

トレーニングマシンの出願人国（地域）籍別出願件数推移及び出願件数比率
（出願先国：日米欧中韓台豪加、出願年：1996～2012年）

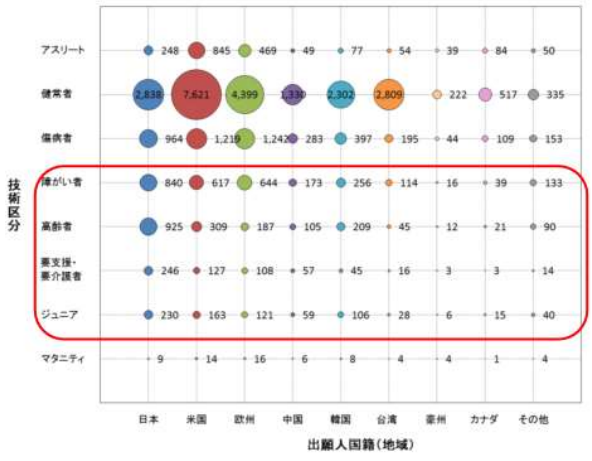


注）2011年以降はデータベースの収録の遅れ、PCT出願の各国以降のずれ等で、全出願データを反映していない可能性がある。

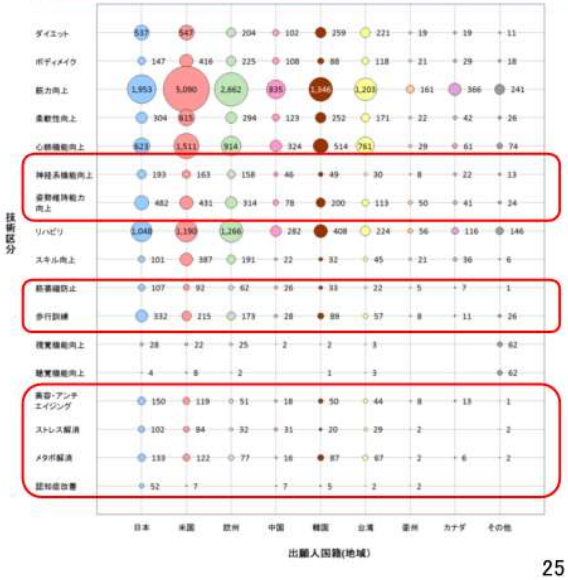
トレーニングマシン

- 運動者別の出願動向では、いずれの国、地域においても健常者向けのトレーニングマシンの出願件数が最多。
- 障がい者、高齢者、要支援・要介護者、ジュニア向けの出願件数で、日本国籍が最多。
- 鍛錬目的別の出願動向では、神経系機能向上、姿勢維持能力向上、筋萎縮防止、歩行訓練、美容・アンチエイジング、ストレス解消、メタボ解消、認知症改善で日本国籍出願人の出願件数が最も多い。
- 健康寿命の延伸、介護予防に取り組むにあたり、高齢者向けのマシン開発やメタボ解消、認知症予防、筋萎縮防止に効果のあるマシン開発を活発化させるべき。

運動者別－出願人国籍・地域別の出願件数
（出願年：1996～2012年）



鍛錬目的別－出願人国籍・地域別の出願件数
（出願年：1996～2012年）

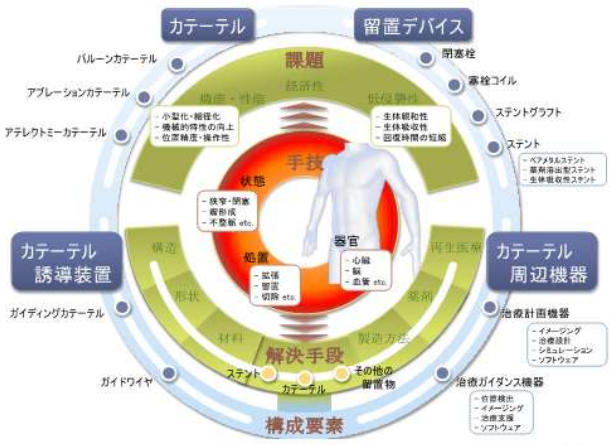


25

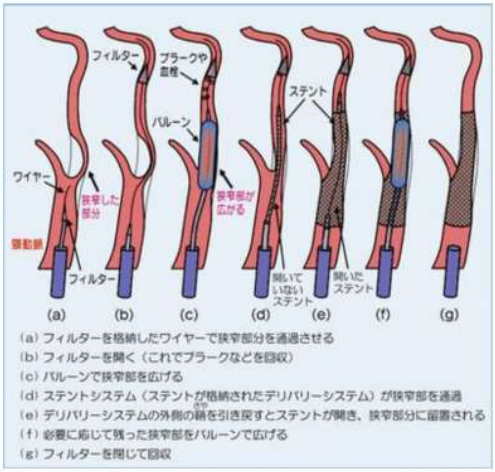
低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）

- 低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）とは、患者に設けた小さな開口部から挿入して治療などを行う医療機器であり、患者の負担を低減し、治療期間の短縮を可能にする機器である。
- 冠動脈や脳血管の閉塞・狭窄、脳動脈や大動脈の動脈瘤、不整脈などの手術・治療に用いられる。
- 1990年代以降、頸動脈狭窄症、心筋梗塞に対するカテーテルを用いたバルーン治療として、血管の中でバルーンカテーテルを用いて狭窄部位を拡張し、そこに金属でできた網目状の筒（ステント）を留置する治療が行われるようになった。

低侵襲医療機器の技術俯瞰図



バルーンカテーテルを使った治療法



出典：（公財）循環器病研究振興財団、循環器病あれこれ［72］切らずに頸部の血管を治療、図4　CAS治療の手順、
http://www.jcvrf.jp/general/pdf_arekore/arekore_072.pdf（2015年1月27日アクセス）

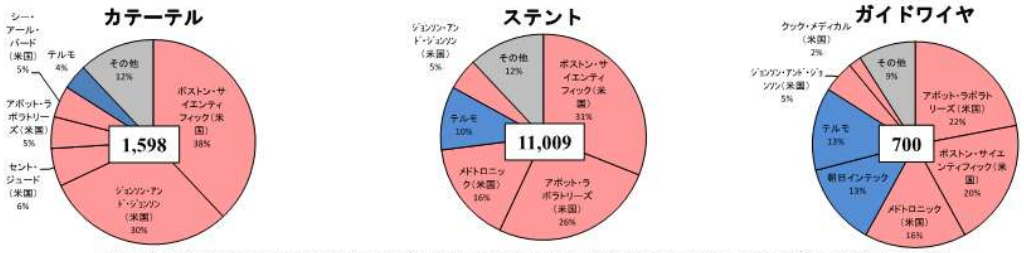
26

低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

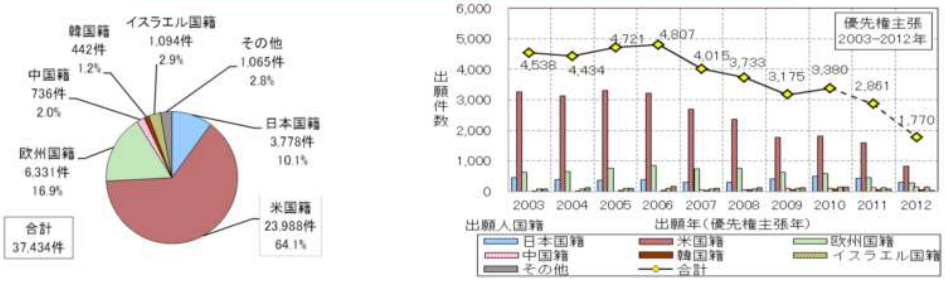
- カテーテル、ステントの市場において、複数の有力米国企業が高いシェアを有している。しかしながら、ガイドワイヤにおいて、自動車やプリンタ用ワイヤを製造していた朝日インテックが市場参入に成功し、上位にランクインしている。
- カテーテルの特許出願件数においても、米国籍出願人による件数が最多であるが、2007年以降件数が減少傾向にある。

低侵襲医療機器の器具毎の企業別市場シェア(単位：百万ＵＳ＄、2013年)



出典：Grand View Research「Interventional Devices Market Analysis by product and segment forecast to 2020」May2014を基に作成

低侵襲医療機器の出願人国籍別特許出願件数推移及び出願件数比率
（出願先：日米欧中韓以伯印豪ASEAN中東への出願、2003～2012年の出願）



低侵襲医療機器（循環器系カテーテル及び関連機器）

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- カテーテルの出願人別件数ランキングでは米国企業が上位を占めている。ガイドワイヤの市場に参入した朝日インテックは、ガイドワイヤの特許出願件数が１位となっている。
- 薬剤を放出する機能を付加した薬剤溶出型ステント(DES)については、論文動向からみて、活発な研究活動が行なわれていることが伺え、市場も着実に拡大している。
- 他産業で活用していたガイドワイヤとカテーテルとの融合や薬剤とステントとの融合といった融合技術の開発に注力し、低侵襲医療機器の付加価値の向上を図るべきである。

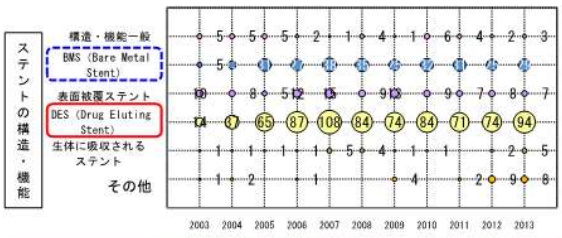
低侵襲医療機器の特許出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓、出願年：2003-2012年）

順位	出願人	件数
1	Boston Scientific Scimed(米国)	2,164
2	Boston Scientific(米国)	1,481
3	Medtronic Vascular(米国)	1,249
4	Cook Medical Technologies(米国)	1,123
5	Abbott Cardiovascular Systems(米国)	1,062
6	テルモ	1,040
⋮	⋮	
14	朝日インテック	425

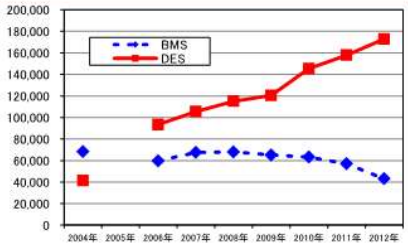
ガイドワイヤの特許出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓、出願年：2003年-2012年）

順位	出願人	件数
1	朝日インテック	308
2	テルモ	234
3	Boston Scientific （米国）	156
4	Boston Scientific Scimed （米国）	154
5	Cook Medical Technologies （米国）	94

ステントの論文発表件数推移
（論文発表年 2003～2013年）



ステント留置患者数の推移（BMSとDESの比較）



出典：国立循環器病研究センター「2012年度循環器疾患診療実態調査報告書」

次世代海洋産業

- 世界的なエネルギー需要の高まりや技術革新に伴い、大水深の海洋資源開発や海洋再生エネルギーの導入に向けた研究・開発が活発化している。
- 海洋産業とは、海洋の開発、利用、保全等を担う産業であり、次世代海洋産業の調査では、資源探査船、掘削船、輸送船等の海洋資源開発技術、洋上風力発電での浮体構造物等の洋上発電技術、超大型浮体構造物等の洋上空間利用技術を調査対象とした。
- 海洋産業の市場予測としては、2020年まで洋上風力発電施設や浮体式生産施設等の市場が大幅に伸びていくと予想されている。

海洋産業の技術俯瞰図

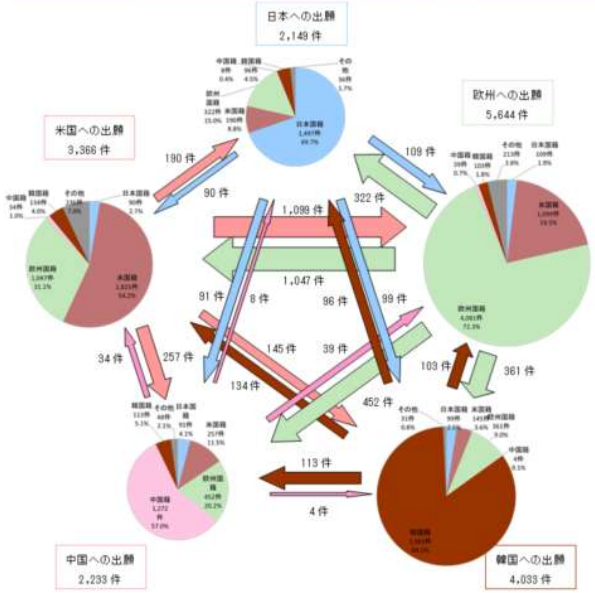
海洋産業の市場予測

出典：国土交通省　海事レポート2013、平成25年度版、p.1、「海事局最前線」中の「海洋産業の世界規模での成長」
http://www.mlit.go.jp/maritime/kaijireport/kairepo12.html

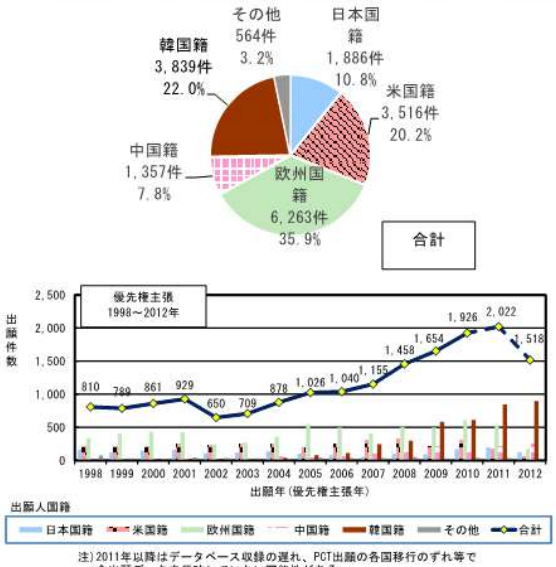
次世代海洋産業

- 日米欧中韓の出願件数収支では、欧州と韓国への出願が多くなっており、欧州が各国へ活発に出願している。
- 出願人国籍別の出願件数比率でも、欧州国籍からの出願が一番多く、韓国国籍からの出願が二番目に多い。
- 韓国は2007年以降出願件数が増加傾向にある。これは2007年に米国のトランスオーシャン・オフショア社が韓国のサムスン重工業を提訴した事件（原告敗訴）により、韓国国内で特許の重要性が高まったことが要因とされている。

次世代海洋産業の出願先国別－出願人国籍別特許出願件収支
（出願先：日米欧中韓、1998～2012年の出願）



次世代海洋産業の出願人国籍別特許出願件数推移及び出願件数比率
（出願先：日米欧中韓への出願、1998～2012年の出願）



注）2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

次世代海洋産業

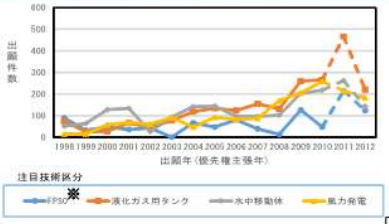
特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 次世代海洋産業全体の出願件数ランキングでは、韓国企業が上位3位までを独占。
- 近年出願件数が大幅に増加している液化ガス用タンクの分野では、韓国企業が上位10位までに4社ランクインしている。出願件数が増加傾向にある風力発電の分野では、欧米企業が上位を占めている。
- 次世代海洋産業では、韓国や欧州から出願が活発に行われていることを踏まえ、日本に適した特許を取得すべき分野を見定め、積極的に特許権を獲得していくことが重要である。

次世代海洋産業の出願人別出願件数上位ランキング
（出願先：日米欧中韓、 1998～2012年の出願）

順位	出願人	件数
1	サムスン重工（韓国）	1,054
2	大宇造船海洋（韓国）	1,009
3	現代重工（韓国）	468
4	三菱重工業	404
5	ガストランスポール・エ・テクニガズ（フランス）	291
6	テクニップ（フランス）	273
7	シュルンベルジェ（米国）	232
8	SBMオフショア（オランダ）	229
9	サイペム（イタリア）	166
10	エクソンモービル（米国）	143
10	アケル（ノルウェー）	143

技術区分別の出願件数推移
（出願先：日米欧中韓、 1998～2012年の出願）



注）2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

※ガス生産貯蔵積出設備

出願人別出願件数上位ランキング
（液化ガス用タンク）
（出願先：日米欧中韓、 1998～2012年の出願）

注目技術：液化ガス用タンク

順位	出願人	件数
1	大宇造船海洋（韓国）	434
2	サムスン重工（韓国）	399
3	ガストランスポール・エ・テクニガズ（フランス）	168
4	現代重工（韓国）	130
5	三菱重工業	78
6	バルチラ（フィンランド）	59
7	アケル（ノルウェー）	44
8	コリア・ガス（韓国）	39
9	エクソンモービル（米国）	34
10	KAIST（韓国）	33

出願人別出願件数上位ランキング
（風力発電）
（出願先：日米欧中韓、 1998～2012年の出願）

注目技術：風力発電

順位	出願人	件数
1	ゼネラルエレクトリック（米国）	72
2	アロイス・ボッペン（ドイツ）	66
3	サムスン重工（韓国）	65
4	三菱重工業	57
5	ヴェスタス（デンマーク）	41
6	スウェイ（ノルウェー）	36
7	ノルスク・ハイドロ（ノルウェー）	26
8	シーメンス（ドイツ）	18
8	サニーエレクトリック（中国）	18

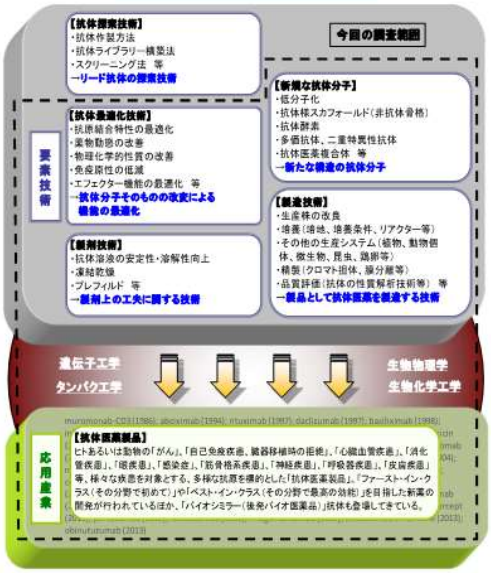
31

抗体医薬

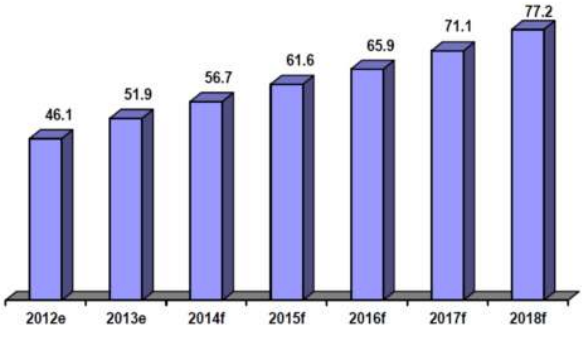
特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

- 抗体医薬は標的となるがん細胞等に対して特異的に結合するため、副作用の少ない効果的な治療薬として期待されている。
- 抗体医薬の市場規模は2018年に772億ドル(約9兆円)に達すると予想されている。

抗体医薬の技術俯瞰図



世界のモノクローナル抗体医薬市場
（Billion US$, 2012-2018）



出典：Global Protein Therapeutics Market Outlook 2018 (RNCOS, January 2014)

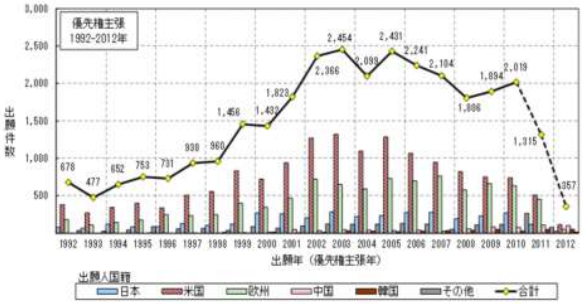
32

抗体医薬

- 世界の医薬品売上高ランキング上位10位まで合計売上高をみると、2005年以降、抗体医薬による売り上げが増加している。
- 特許出願をみると、1990年代以降2003年頃まで特許出願件数は増加傾向にあり、抗体医薬の市場が拡大化する前に特許出願件数がピークを迎えている。

世界の医薬品売上高ランキング上位10位までの合計売上高推移とその内訳（2002年～2013年）

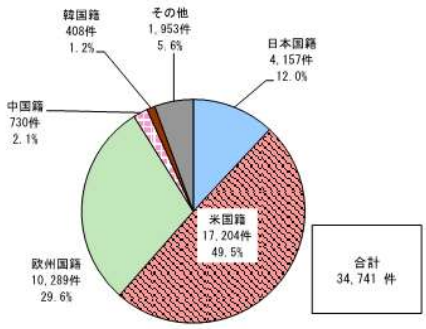
抗体医薬の出願人国籍別出願件数推移（出願先：日米欧中韓、出願年：1992年-2012年）



抗体医薬

- 特許出願をみると、米国による出願が最も多く、欧州が続いている。
- 欧米に先行された現状を踏まえ、欧米の流れと調和を取りながら、独創的な技術研究開発を行い、欧米先行の現状が今以上に進むことを阻止する努力が必要である。
- 公的機関が基礎技術から産業応用に至る一気通貫の基盤整備を行なうことにより、我が国企業等における研究開発の活性化を図ることが期待される。

抗体医薬の出願人国籍別出願件数比率（出願先：日米欧中韓、出願年：1971年-2012年）



抗体医薬の出願件数ランキング（出願先：日米欧中韓、出願年：1971年-2012年）

順位	出願人	出願件数
1	ホフマン・ラ・ロシュグループ（スイス）	4,598
2	ファイザー（米国）	1,063
3	ブリストル・マイヤーズ・スクイブ（米国）	1,051
4	アムジェン（米国）	1,008
5	バイオジェン・アイデック（米国）	904
6	ノバルティスグループ（スイス）	829
7	協和発酵キリン	696
8	ジョンソン・エンド・ジョンソングループ（米国）	642
9	アストラゼネカグループ（イギリス）	632
10	アボット・ラボラトリーズ（米国）	622

高吸水性樹脂

■ 高吸水性樹脂は紙おむつ製品の原材料として使われており、需要が増大している。さらに、土壌の保水性を向上させる改質材等、高機能性樹脂として幅広い応用が期待されていることから注目が高まっている。

高吸水性樹脂の技術俯瞰図

高吸水性樹脂の市場規模推移（世界市場）

出典：株式会社富士経済「2014年液状樹脂市場の展望とグローバル戦略」

高吸水性樹脂

■ 特許出願件数比率では日本国籍（40.6%）による出願が最も多い。

■ 出願件数推移をみると、1980年から1999年にかけて穏やかな増加傾向を示しているが、2000年以降は出願件数が減少傾向にある。

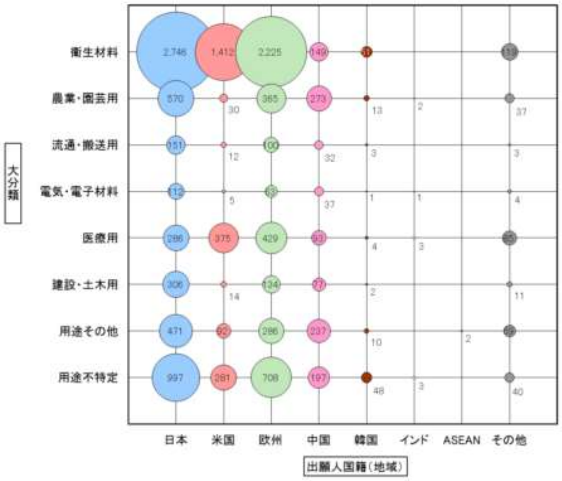
高吸水性樹脂の出願人国籍別出願件数推移及び比率
（出願先：日米欧中韓、出願年：1980-1999年）

注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、国際出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

高吸水性樹脂

- 日米欧国籍出願人共に、「衛生材料」の出願比率が高く、「衛生材料」以外では、日本国籍出願人では「農業・園芸用」、米国籍出願人及び欧州国籍出願人では「医療用」の出願比率が高い。
- 今後は、高吸水性樹脂の新規な用途開発により、衛生材料市場に次ぐ新たな市場の創設が望まれる。特に、農業・園芸用途では、地球温暖化防止や人口増加による食料問題の解決策として、日本発の高吸水性樹脂技術による砂漠化防止や節水農業等の推進等により、技術による市場の拡大を目指すとともに、持続可能な社会の実現に貢献していくことが望まれる。

高吸水性樹脂の用途別－出願人国籍別の出願件数
（日米欧中韓印ASEAN への出願、出願年：1980 年～2012 年）

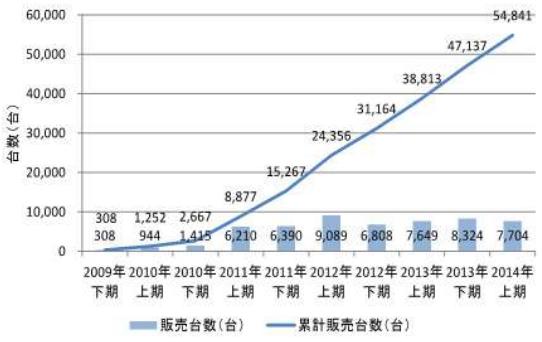


非接触給電関連技術

- 非接触給電とは電源ケーブルを用いることなく電力を伝送する技術である。原理は古くから知られていたが、2007年にマサチューセッツ工科大学の研究チームが2m離れた距離で60Wの電力を送ることに成功し、関心が高まっている。
- 送電側と受電側がワイヤレスになることで高い利便性が期待でき、モバイル機器等の小型機器から電気自動車等の大型機器まで、多様で幅広い製品分野への応用が進められている。

非接触給電関連技術の技術俯瞰図

国内における電気自動車販売台数の推移

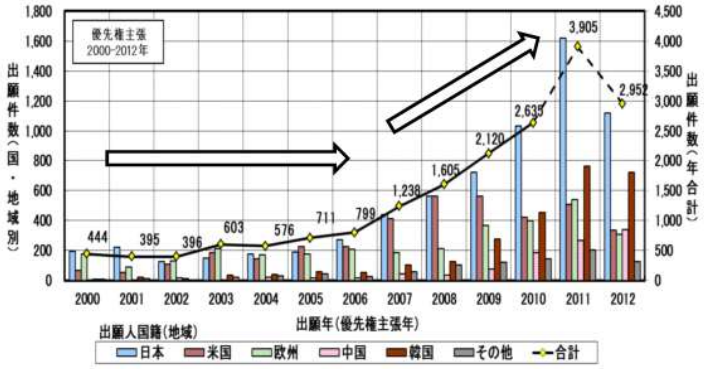


出典：日本自動車販売協会連合会「新車販売台数状況」及び全国軽自動車協会連合会「軽四輪車通称名別新車販売確報」をもとに作成

非接触給電関連技術

- 非接触給電関連技術の出願件数は、マサチューセッツ工科大学の研究チームが発明した新たな非接触給電方式の影響により、2007年を境に増加傾向である。
- 出願件数をみると、パナソニックが1位、サムソン電子が2位、クアルコムが3位と家電メーカーが上位を占めている。
- 自動車メーカーではトヨタ自動車が4位にランクインしている。

非接触給電関連技術の出願人国籍別特許出願件数推移
（出願先：日米欧中韓、2000～2012年の出願）



注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、国際出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

非接触給電関連技術の特許出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓、出願年：1995年-2012年）

順位	出願人	件数
1	パナソニック	943
2	サムソン電子(韓国)	807
3	クアルコム(米国)	715
4	トヨタ自動車	611
5	アクセスビジネスグループ(米国)	503
6	ソニー	437
7	豊田自動織機	360
8	セイコーエプソン	345
9	フィリップス(オランダ)	337
10	SEW-オイロドライブ(ドイツ)	266
11	WITRICITY CORP(米国)	254
12	KOREA ADV INST SCI&TECHNOLOGY (韓国)	239
13	LG INNOTEK CO LTD(韓国)	234
14	シーメンス(ドイツ)	229
15	東芝	216
16	ロバート・ボッシュ(ドイツ)	210
17	半導体エネルギー研究所	191
18	BAARMAN D W(米国)	181
19	三洋電機	179
20	PHILIPS INTELLECTUAL PROPERTY GMBH (ドイツ)	178

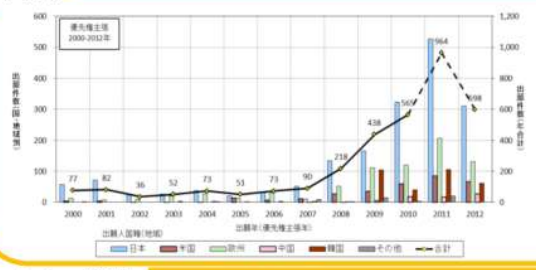
39

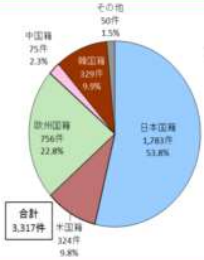
非接触給電関連技術

- 電気自動車等の車両の出願、モバイル機器の出願において、日本国籍出願人による出願が最も多く、今後も車両用、モバイル機器用の研究開発を更に進めていくことが期待される。

非接触給電関連技術の用途別特許出願件数推移及び比率
（出願先：日米欧中韓、出願年：1995年-2012年）

車両

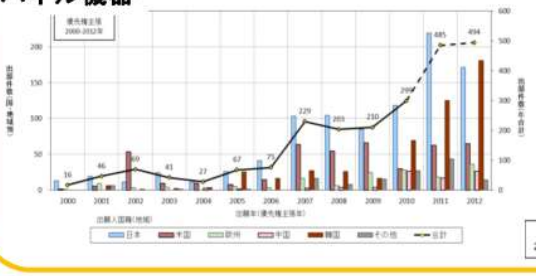


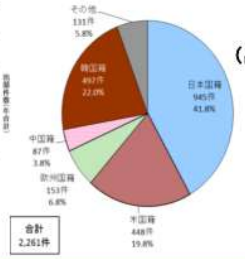


出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓、1995～2012年の出願）

順位	出願人	件数
1	トヨタ自動車	503
2	豊田自動織機	175
3	KOREA ADV INST SCI&TECHNOLOGY (韓国)	147
4	日産自動車	124
5	住友電装	115

モバイル機器





出願件数ランキング
（出願先：日米欧中韓、1995～2012年の出願）

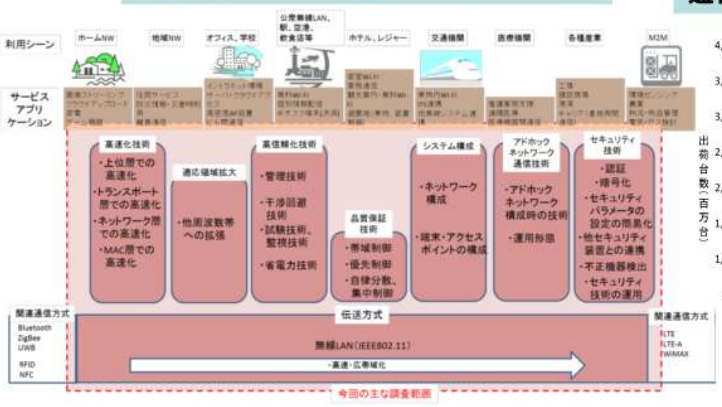
順位	出願人	件数
1	セイコーエプソン	114
2	サムソン電子(韓国)	104
3	ソニー	93
4	パナソニック	82
5	LG電子(韓国)	63

40

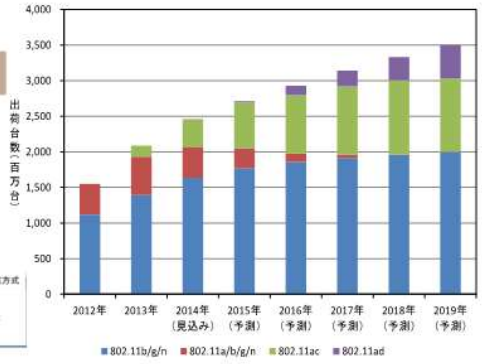
次世代無線LAN伝送技術

- 無線LANは家庭内、オフィス、公衆など様々な場所で利用されている。近年、急増するデータ通信料に対応すべきIEEE802.11ac（最大伝送速度6.9Gbps）、IEEE802.11ad（最大伝送速度7Gbps）などの次世代無線LANの通信規格が策定され、新たな通信規格IEEE802.11ai（認証を高速に完了するための規格）、IEEE802.11ax（最大伝送速度はIEEE802.11acの4倍以上）等の策定を目指した標準化活動も行われている。

次世代無線LAN伝送技術の技術俯瞰図



通信規格別無線LAN市場規模推移・予測

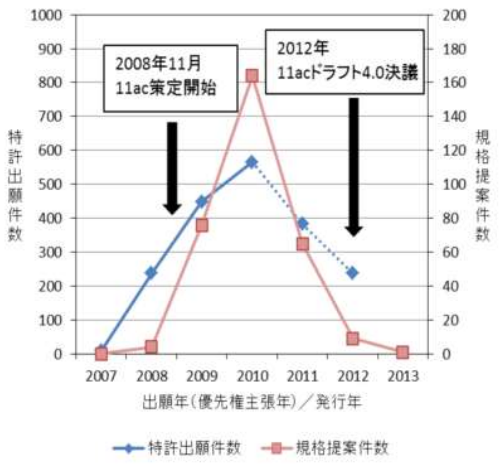


出典：2014 Wireless Connectivity Market Analysis、2014年11月、テクノシステムリサーチ、p.40、
3.3.2.WiFi Market Forecast by Standard, 2012-2019

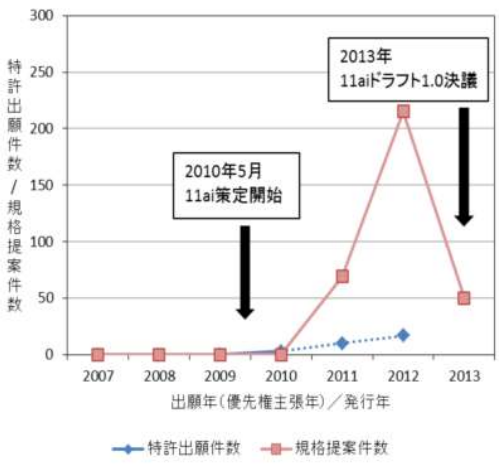
次世代無線LAN伝送技術

- IEEE802.11acについて標準化の企画提案件数が増加するのにあわせて、特許出願件数も増加し、企画提案件数が減少するにつれて特許出願件数も減少している。
- 次世代無線LANであるIEEE802.11aiについては2011年以降企画提案件数が増加しており、特許出願件数も増加の傾向をみせている。

IEEE802.11acの特許出願及び標準化の企画提案件数の年推移



IEEE802.11aiの特許出願及び標準化の企画提案件数の年推移



次世代無線LAN伝送技術

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

■「CSMA/CA」※1、「周波数チャネル選択」等の干渉回避技術や、「セキュリティパラメータの設定の簡易化」、「SSID認証」※2などのセキュリティ技術については日本が優位性を有している。現在標準化活動が行われているIEEE802.11axやIEEE802.11aiに関連する上記技術について技術開発を推進し、特許出願と標準化活動を戦略的に行うことが期待される。

IEEE802.11ax技術と関連のある技術区分毎の国籍・地域別特許出願件数順位（出願年：2007-2012年）

順位	CSMA/CA		周波数チャネル選択		端末省電力	
	国籍	件数	国籍	件数	国籍	件数
1	日本	146件	日本	29件	米国	620件
2	米国	93件	米国	16件	日本	406件
3	韓国	35件	欧州	11件	韓国	219件
4	欧州	25件	韓国	7件	欧州	107件
5	中国	9件	その他	6件	その他	89件

※1:CSMA/CAは搬送波感知多重アクセス／衝突回避方式の略である。送信の前に待ち時間を挿入することで衝突を防ぐ。
※2:SSIDは無線LANにおけるアクセスポイントの識別名を表す。

IEEE802.11ai技術と関連のある技術区分毎の国籍・地域別特許出願件数順位（出願年：2007-2012年）

順位	セキュリティパラメータの設定の簡易化		SSID認証		自動認証		認証の高速化	
	国籍	件数	国籍	件数	国籍	件数	国籍	件数
1	日本	207件	日本	85件	日本	42件	日本	28件
2	米国	77件	米国	68件	韓国	26件	中国	28件
3	韓国	30件	韓国	32件	その他	23件	欧州	8件
4	中国	13件	中国	30件	米国	19件	韓国	7件
5	欧州	11件	その他	21件	中国	19件	米国	3件

43

レアメタル関連技術

特許庁 JAPAN PATENT OFFICE

■ 本調査では、鉱業審議会で定義されたレアメタルのうち、日本国内で各種部素材製品の原料として用いられる元素を調査対象とした。
■ また、上記レアメタルと需要面で密接な関係がある元素、現状その利用が限定的であるがその利活用の拡大が問題となっている元素についても調査対象とした。
■ 本調査で対象とした元素について、下記表中に赤太文字で示す。

レアメタル関連技術の調査対象とした元素

族 / 周期	1 (アルカリ族)	2 (アルカリ土族)	3 (希土族)	4 (チタン族)	5 (バナジウム族)	6 (クロム族)	7 (マンガン族)	8 9 10 (4周期:鉄族) (5・6周期:白金族)	11 (銅族)	12 (亜鉛族)	13 (アルミニウム族)	14 (炭素族)	15 (窒素族)	16 (酸素族)	17 (ハロゲン族)	18 (不活性ガス族)
1	1 H 水素															2 He ヘリウム
2	**3 Li リチウム**	**4 Be ベリリウム**									**5 B ホウ素**	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム									13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	**21 Sc スカンジウム**	**22 Ti チタン**	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	**27 Co コバルト**	**28 Ni ニッケル**	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	**31 Ga ガリウム**	**32 Ge ゲルマニウム**	**33 As ヒ素**	**34 Se セレン**	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	**39 Y イットリウム**	**40 Zr ジルコニウム**	**41 Nb ニオブ**	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテニウム	**45 Rh ロジウム**	**46 Pd パラジウム**	47 Ag 銀	**48 Cd カドミウム**	**49 In インジウム**	50 Sn スズ	**51 Sb アンチモン**	**52 Te テルル**	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	**56 Ba バリウム**	57 ～ ランタノイド	72 Hf ハフニウム	**73 Ta タンタル**	**74 W タングステン**	**75 Re レニウム**	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	**78 Pt 白金**	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	**83 Bi ビスマス**	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89 ～ 103 アクチノイド	104 Rf ラザフォージウム	105 Db ドブニウム	106 Sg シーボーギウム	107 Bh ボーリウム	108 Hs ハッシウム	109 Mt マイトネリウム	110 Ds ダームスタチウム	111 Rg レントゲニウム							

ランタノイド	**57 La ランタン**	**58 Ce セリウム**	**59 Pr プラセオジム**	**60 Nd ネオジム**	61 Pm プロメチウム	**62 Sm サマリウム**	**63 Eu ユウロピウム**	**64 Gd ガドリニウム**	**65 Tb テルビウム**	**66 Dy ジスプロシウム**	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イッテルビウム	71 Lu ルテチウム
アクチノイド	89 Ac アクチニウム	90 Th トリウム	91 Pa プロアクチニウム	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm キュリウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリホルニウム	99 Es アインスタイニウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデレビウム	102 No ノーベリウム	103 Lr ローレンシウム

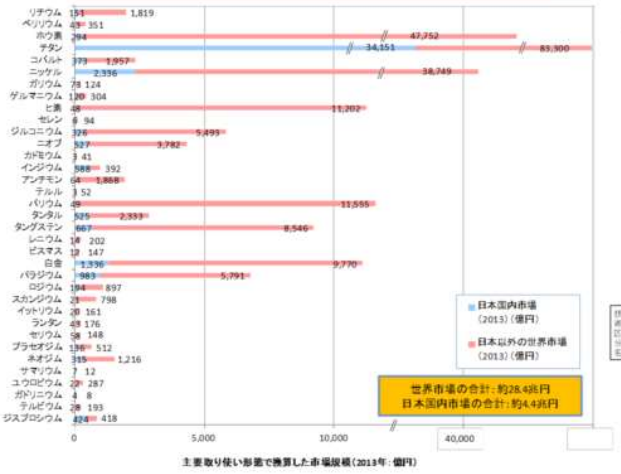
※着色部はレアメタル元素
（濃い色はレアアース17元素）

44

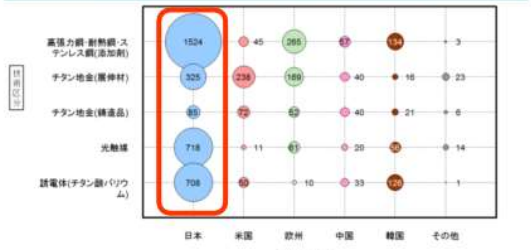
レアメタル関連技術

- レアメタルの世界市場は、2013年で約28.4兆円（今回調査対象とした元素の消費量を主要な取扱形態の素材単価で換算した場合）。一方、国内市場は、2013年で約4.4兆円で、チタン及びニッケルの消費量が多い。
- 日本国籍の出願人はチタンを利用した製品に関する特許出願件数が他国と比較して多い。
- 日本国籍の出願人はニッケルを含むリチウムイオン二次電池正極材に関する特許出願件数が他国と比較して多いが、韓国企業の出願人による出願件数が伸びている。
- 我が国が世界的な比較優位を確保しているレアメタル関連技術のうち、海外の企業や研究機関が研究開発等を急速に拡大させているものについては、特許出願等による防衛策を促すことが必要。

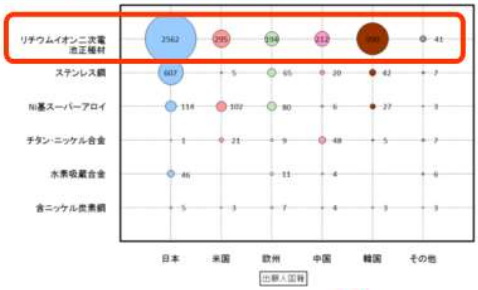
調査対象とした各元素消費量を主要取扱形態の相場で換算した場合の我が国の消費割合（元素別）



チタンの用途別－出願人国籍別出願件数



ニッケルの用途別－出願人国籍別出願件数

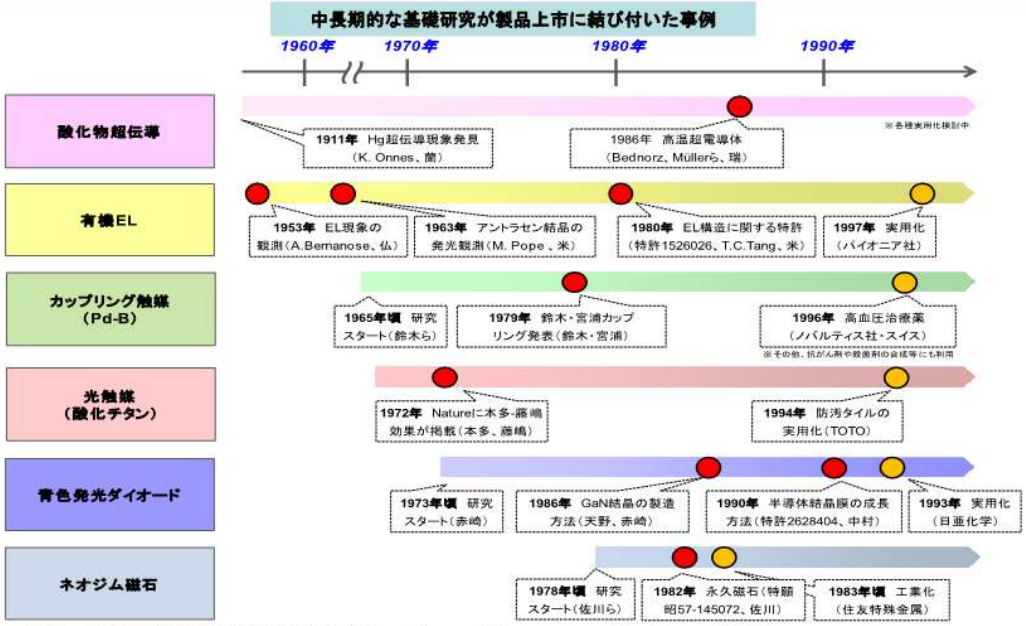


出典：第２部市場環境調査に各元素の主要取扱形態の相場（2013年末）を乗じて概算推計。

レアメタル関連技術

- レアメタル関連技術で基礎研究から上市までに要する時間は、少なくとも20～30年ということも言えることから、レアメタル関連技術の研究開発については、今後も基礎研究からしっかり時間をかけて、維持、拡大させていくことが必要になると考えられる。
- そのためには、ユーザーのニーズを深く読み取りながら、中長期的な視点に基づく研究開発計画を策定することが必要である。

中長期的な基礎研究が製品上市に結び付いた事例



出典：北川副委員長提供資料等ともとに三菱UFJリサーチ＆コンサルティング作成

中国特化型テーマ

47

鉄道車両

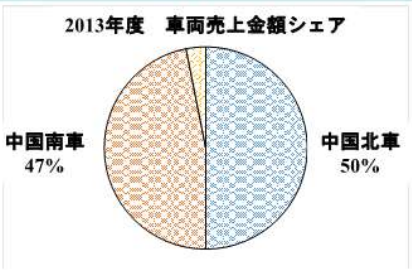
- 鉄道車両に関連する技術としては車体、台車、推進装置、車体保守等、車両自体に関連した技術が挙げられる。
- 中国では2000年代、高速鉄道に関して海外企業からの技術導入を行ってきたが、2013年度では車両売り上げの大半が中国南車と中国北車で占められている。

鉄道車両の技術俯瞰図

中国における鉄道車両の技術導入

車両形式	技術導入元
CRH1	ボンバルディア（ドイツ）
CRH2	川崎重工業
CRH3	シーメンス（ドイツ）
CRH5	アルストム（フランス）

中国における鉄道車両売り上げシェア

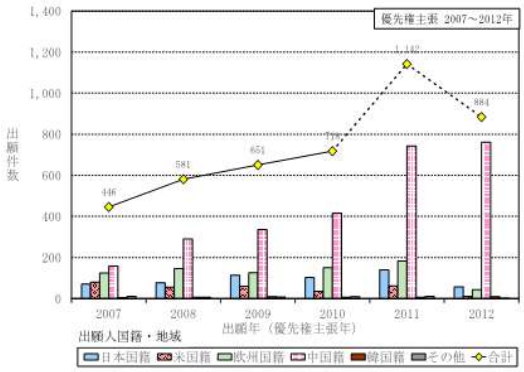


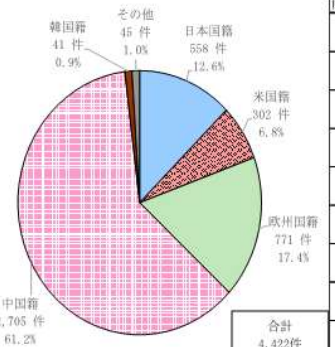
48

鉄道車両

- 中国への出願件数は増加傾向にあり、中国籍による出願が61.2%を占めている。
- 出願件数では中国南車と中国北車が1、2位を占めている。

鉄道車両の出願人国籍別出願件数推移、比率、出願件数上位ランキング（出願先：中国、出願年：2007-2012年）





特許全体		
順位	出願人名称	出願件数
1	中国南車(中国)	518
2	中国北車(中国)	491
3	シーメンス(ドイツ)	146
4	三菱電機	113
5	ボンバルディア・トランスポーテーション(ドイツ)	105
6	クノールブレムゼAG(ドイツ)	88
7	アルストム・トランスポール(フランス)	79
8	日立製作所	70
8	ゼネラル・エレクトリック(米国)	70
10	北京交通大学(中国)	69

注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

鉄道車両

- 日本の出願人は主電動機を中心に推進装置関連技術において特許出願がなされている。主電動機内の制御部分は解析が難しく、日本の優位性が維持できている模様。
- 推進装置分野など日本企業が優位性を有する技術領域において、今後も継続的な研究開発によって常に技術で先行しておくという研究開発戦略と、特許出願等による知的財産の適切な保護が望まれる。

鉄道車両の技術区分別－出願人国籍別出願件数（中国への出願、出願年：2007-2012 年）

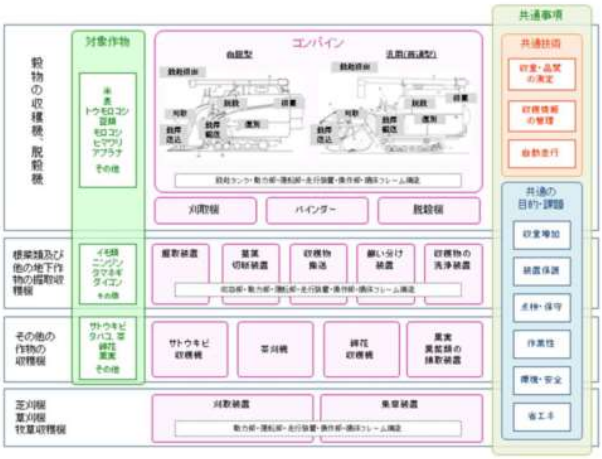
推進装置の特許出願件数上位ランキング（中国への出願、出願年：2007-2012 年）

推進装置		
順位	出願人名称	出願件数
1	三菱電機	45
2	中国南車(中国)	34
3	日立製作所	33
4	ボンバルディア・トランスポーテーション(ドイツ)	27
5	ゼネラル・エレクトリック(米国)	26
5	中国北車(中国)	26
7	シーメンス(ドイツ)	20
7	アルストム・トランスポール(フランス)	20
9	東芝	19
10	西南交通大学(中国)	11

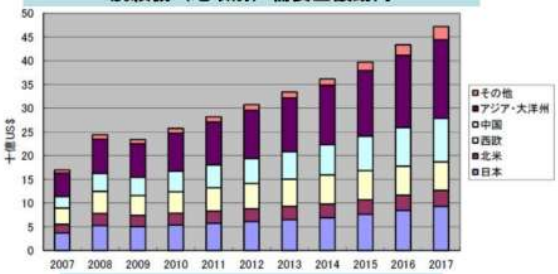
収穫・脱穀機

- 増え続ける穀物需要に対する農作物の生産現場において、収穫などの農作業を効率良く行うためには、コンバインをはじめとする穀物の収穫機・脱穀機が必要となる。
- 中国及びアジアのコンバインハーベスター／脱穀機（地域別）市場は、他の地域に比べて著しく拡大している。
- コンバインについては、世界の中でも特に中国・インド・東南アジアの需要が高く、販売台数シェアでは世界全体の43.5%を占めている。

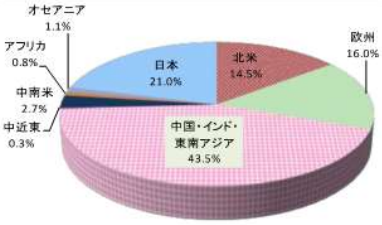
収穫・脱穀機の技術俯瞰図



コンバインインハーベスター/脱穀機（地域別）需要金額動向



コンバイン地域別販売台数シェア

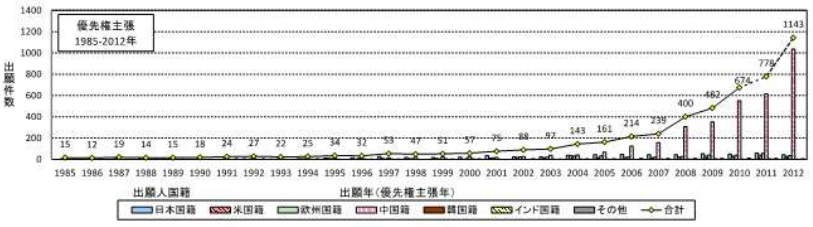


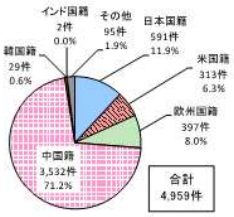
51

収穫・脱穀機

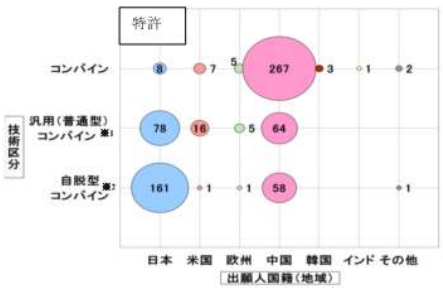
- 中国への出願件数は、2003年以降、中国籍出願人による出願が急増しており、特許出願件数比率では中国籍出願人による出願が全体の71.2%を占める。日本国籍出願人による特許出願件数比率は、11.9%と中国籍出願人に次いで多い。
- 日本国籍出願人は、日本で開発された技術である自脱型コンバインに関する出願件数が多い。他方、汎用コンバインは欧米の企業が得意とする技術であるが、特許・実用新案ともに、欧米国籍出願人による出願件数は日本国籍、中国籍出願人よりも少ない。

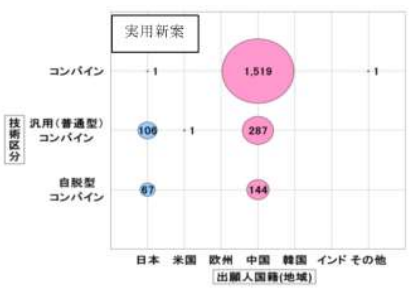
収穫・脱穀機の出願人国籍別の出願件数推移及び出願件数比率（出願先：中国、出願年：1985-2012年）





収穫・脱穀機の技術区分別－出願人国籍別の出願・登録件数（出願先：中国、出願年：1985～2012年）





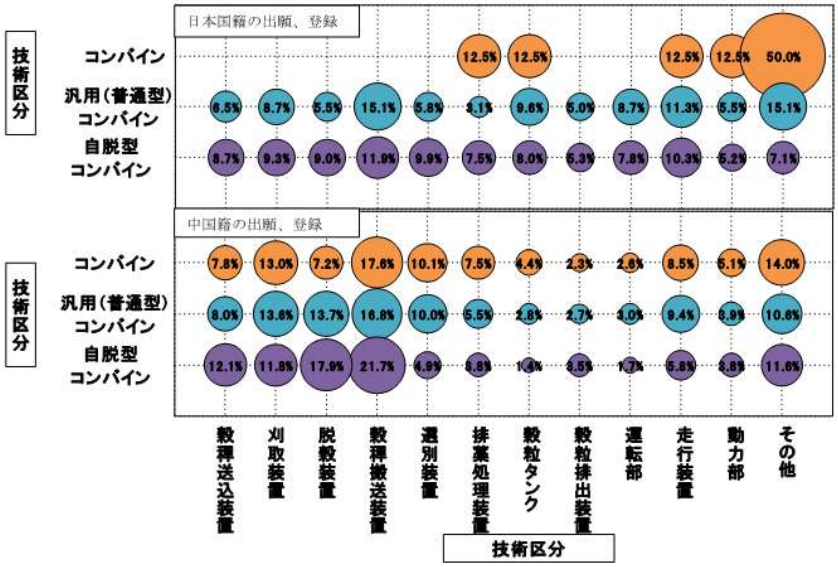
※1：汎用（普通型）コンバイン：様々な穀物の収穫、脱穀を行うことができるコンバイン
※2：自脱型コンバイン：水稲の収穫、脱穀に適したコンバイン

52

収穫・脱穀機

- 汎用コンバイン、自脱型コンバインに関して、日本国籍出願人は、各技術に偏りなく出願しているのに対し、中国籍出願人は刈取装置、穀稈搬送装置の技術に出願が集中しており、穀粒タンク、穀粒排出装置、運転部、動力部といった技術に関する出願の割合は小さい。
- 今後も中国の農機市場は拡大することが予想されるところ、日本で培われた自脱型コンバインの技術の優位性を維持するべく引き続き権利化を進めることが重要である。
- 欧米企業が得意とする汎用コンバインの分野においても、自脱型コンバインの技術を汎用コンバインに転用し、権利を取得、活用することで、他国企業との競争を有利に運ぶことが望ましい。

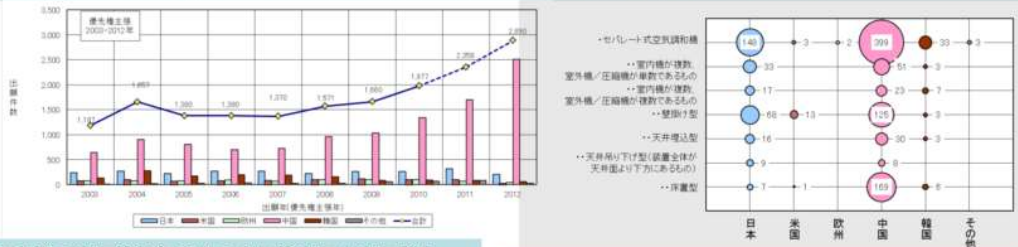
収穫脱穀機の技術区分別の特許出願・実用新案登録件数比率（出願先：中国、出願年：1985-2012年）



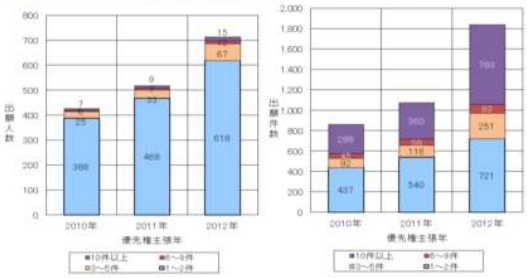
空気調和機（エアコン）

- 空気調和機（エアコン）とは、建物の室内環境の温度や湿度等を制御するものである。
- 中国は、現在世界最大の空気調和機の市場であり、最大の輸出国である。また、中国市場では日本で一般的な壁掛型だけではなく、床置型の空気調和機が販売されている等の商材の違いがある。
- 中国における空気調和機に関する特許出願は増加しており、特に中国籍出願人による出願が急増している。
- 直近の3年間についてみると、中国籍出願人数及び出願件数は共に増加している。
- 中国籍出願人による中国への出願についてみると年1、2件の出願しかしていない出願人（少件数出願人）による出願が、全体の45%を占めている。

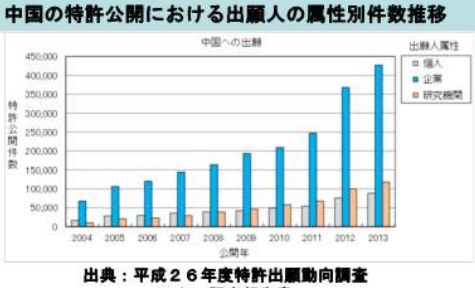
空気調和機の出願人国籍別の出願件数推移及び技術区分別の出願件数（出願先：中国、出願年：2003-2012年）



空気調和機の出願件数頻度別の中国籍出願人出願動向



中国の特許公開における出願人の属性別件数推移

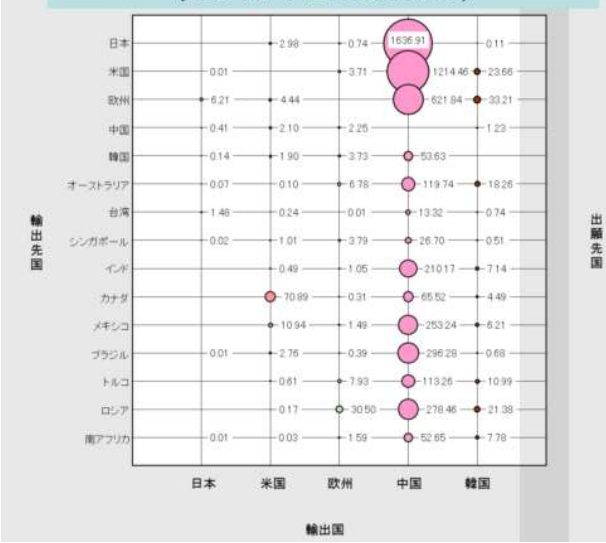


出典：平成２６年度特許出願動向調査 マクロ調査報告書

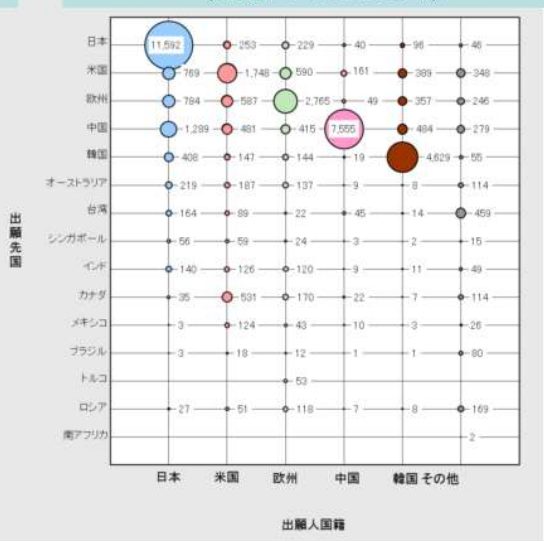
空気調和機（エアコン）

- 中国は、世界各国へ空気調和機を輸出しているものの、中国籍出願人による中国国外への出願件数は少ない。
- 各国籍出願人ともに自国以外の出願先国として中国への出願が多い。

空気調和機に関する世界の輸出入動向
(2012年、単位100万USドル)



空気調和機に関する世界の特許出願件数
(出願年：2008-2012年)



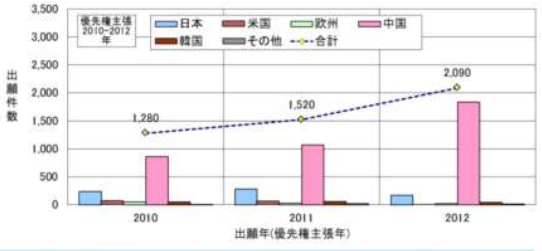
空気調和機（エアコン）

- 中国における空気調和機の出願件数ランキングでは、中国企業が1位、2位を占め、日本企業としては三菱電機が3位にランクインしている。
- 特許出願よりも実用新案出願の方が全体の出願件数は多い 。
- 中国では侵害訴訟、特に実用新案権による訴訟が増加しており、その中には個人による訴訟も見られた。このような少件数出願人の出願が、将来、日本企業にとってリスク要因となる可能性があるため注意が必要である。

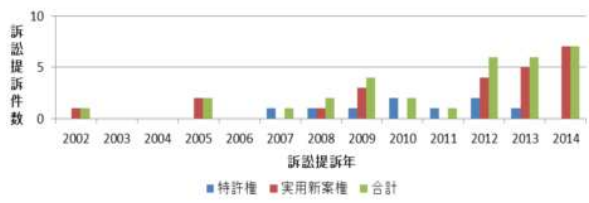
空気調和機の出願件数ランキング
（出願先：中国、出願年：2003～2012年）

順位	出願人	件数
1	珠海格力電器（中国）	580
2	美的集団（中国）	212
3	三菱電機	174
4	LG電子楽金電子（天津）電器（中国）	131
5	海爾集団（中国）	124
6	ダイキン工業	114
7	パナソニック	95
8	LG電子（韓国）	91
9	奥克斯（中国）	86
10	海信集団（中国）	63

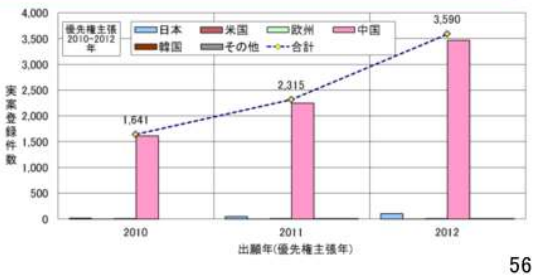
中国における空気調和機の特許出願件数推移



中国における空気調和機の侵害訴訟件数推移 2002-2014年



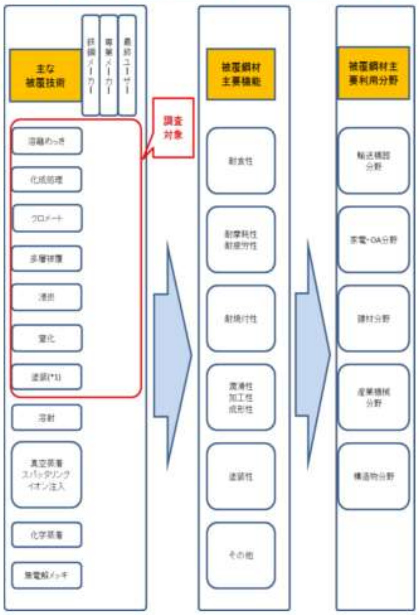
中国における空気調和機の登録実用新案件数推移



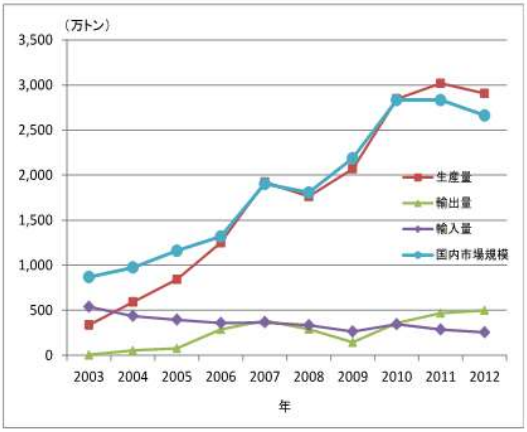
鉄鋼材料（鋼板等の被覆）

- 鋼板等の鉄鋼材料は溶融めっき等で被覆することで耐食性、耐摩耗性、加工性等、多岐にわたる機能を付与することができる。中国ではめっき鋼板の国内生産量が急速に拡大するとともに輸出量が輸入量を上回るようになっている。

鉄鋼材料（鋼板等の被覆）の技術俯瞰図



中国のめっき鋼板の生産及び輸出入推移

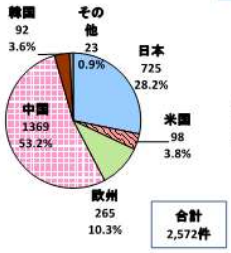


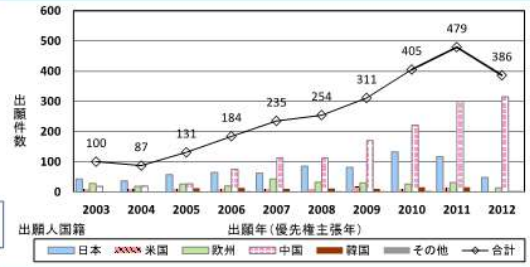
出典：金属世界導報、World Steel Associationのデータより作成

鉄鋼材料（鋼板等の被覆）

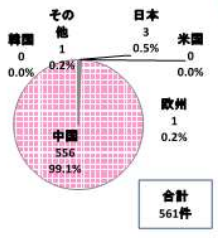
- 中国への出願件数をみると、中国籍が53.2%と最多で、日本国籍が28.2%と続いている。
- 日本国籍出願人、中国籍出願人が出願件数を伸ばしている。
- 実用新案登録件数は2008年以降急増しており、中国籍出願人によるものが99%を占めている。

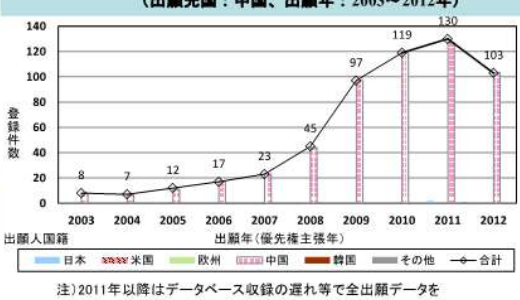
鉄鋼材料（鋼板等の被覆）の出願人国籍別特許出願件数推移及び比率（出願先国：中国、出願年：2003～2012年）





鉄鋼材料（鋼板等の被覆）の出願人国籍別実用新案登録件数推移及び比率（出願先国：中国、出願年：2003～2012年）



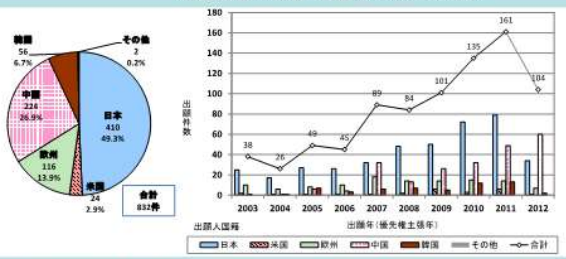


注）2011年以降はデータベース収録の遅れ等で全出願データを反映していない可能性がある。

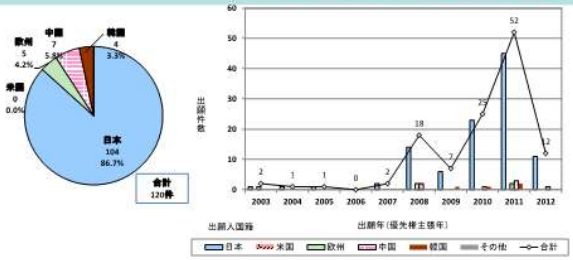
鉄鋼材料（鋼板等の被覆）

- 自動車用途は、日本国籍出願人によるものが最も多く、中国籍出願人、欧州国籍出願人が続き、この3者で約90%を占める。
- 現状最強の引張強さが980MPa以上の鉄鋼材料は、日本国籍出願人が86.7%を占め日本の独壇場である。
- 中国においては、2011年の第12次5カ年計画を受けて策定されたロードマップの中で自動車用高強度鋼板の品質・生産安定性の向上が目標として挙げられたところ、これを受けて、関連する出願が増えていくことが予想される。特に自動車用高強度鋼板に関しては、我が国の出願人による中国への出願が圧倒的に多い分野であるが、今後は技術的優位性の維持に留まることなく、低コスト化等を含め、総合的な競争力の強化を意識した技術開発が重要である。

自動車用の鉄鋼材料（鋼板等の被覆）の出願人国籍別特許出願件数推移及び件数比率
（出願先国：中国、出願年：2003-2012年）



高強度鋼（引張強度≧980MPa）の鉄鋼材料（鋼板等の被覆）の出願人国籍別特許出願件数推移及び件数比率
（出願先国：中国、出願年：2003-2012年）

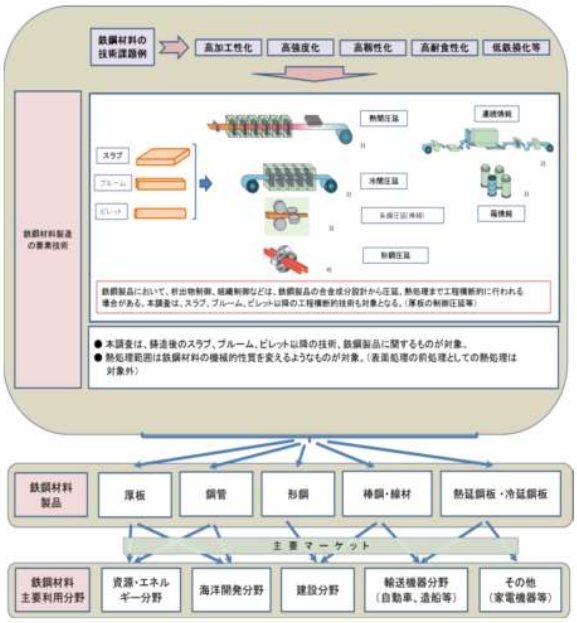


注）2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

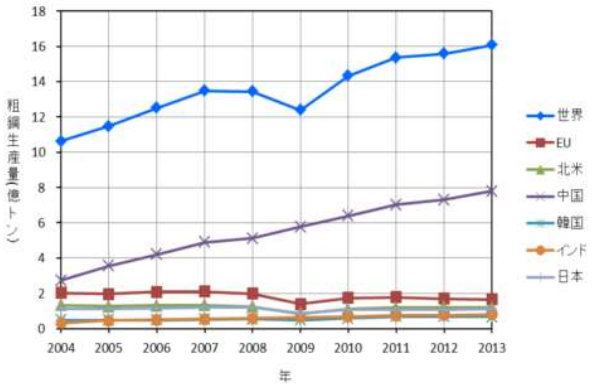
鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）

- 鉄鋼材料は合金成分設計の他、圧延、熱処理技術によって高強度、高加工性、高靭性等の物性が付与される。本調査では鉄鋼材料の「圧延」、「合金」、「熱処理」に関する技術を調査対象とした。
- 近年、中国では粗鋼の生産量が急速に増加し、2013年時点では世界シェアの約50%を占めている。

鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）の技術俯瞰図



世界の粗鋼生産量の推移

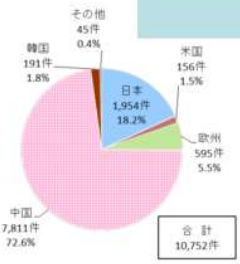


出典：World Steel Associationのデータより作成

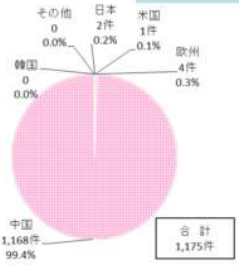
鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）

- 中国に出願された特許のうち、72.6%は中国籍出願人によるものである。中国籍出願人による出願件数は増加傾向にある。
- 中国における実用新案登録件数の99.4%は中国籍出願人によるもので、その登録件数は増加傾向にある。そのため、特許のみならず、実用新案についても訴訟リスク等に警戒する必要がある。

鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）の特許出願件数推移および件数比率
（中国への出願、出願年：2003年～2012年）



鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）の実用新案登録件数推移および件数比率
（中国での登録、出願年：2003年～2012年）



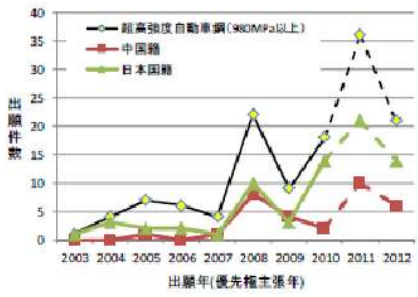
注）2011年以降はデータベース収録の遅れ等で全出願データを反映していない可能性がある。

鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）

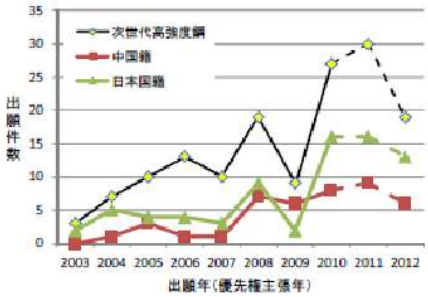
- 中国の第12次5ヵ年計画を受けて策定された中国鉄鋼科学技術ロードマップにおける冷延鋼板分野では、超高強度自動車用鋼、次世代高強度鋼の材料開発が課題とされている。
- 冷延鋼板分野における超高強度自動車用鋼及び次世代高強度鋼の中国籍出願人による特許出願件数は増加傾向にあるが、日本国籍出願人による特許出願件数は、2010 年において中国籍出願人による特許出願件数を上回っている。
- 中国において、第中国鉄鋼科学技術ロードマップに基づき技術開発が推進されていることを認識しつつ、超高強度自動車用冷延鋼板等、日本が特許出願において優位な鉄鋼材料製品について、低コスト化を意識しつつ優位性を維持・拡大し、中国製品に対するより一層の差別化を図ることが望まれる。

鉄鋼材料（圧延、合金、熱処理）における冷延鋼板分野の特許出願動向
（出願先：中国、出願年：2003～2012年）

超高強度自動車用鋼



次世代高強度鋼

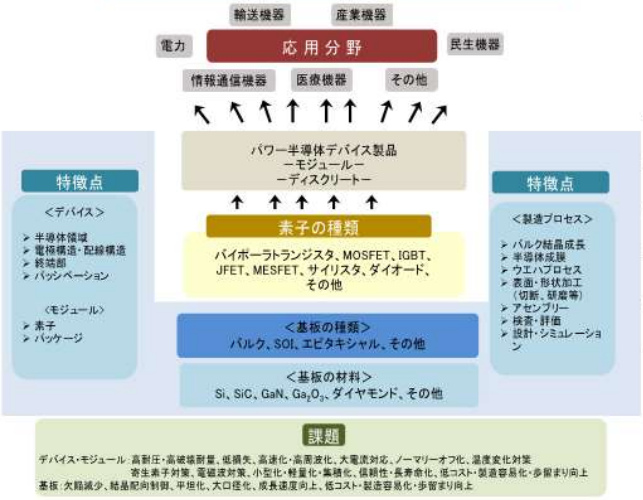


注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

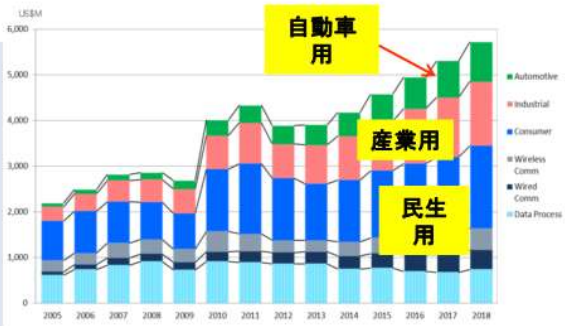
パワー半導体デバイス

- パワー半導体デバイスは電力の制御・変換及び供給を行うための半導体素子である。中国はエネルギー需要拡大への対応が迫られており、国内市場が大きいことから一大消費国となる可能性がある。
- パワー半導体デバイスの中国市場規模は2005年の21.8億ドルから2013年に38.9億ドルに成長した。2013年以降も平均年間成長率8%で推移すると予測されている。

パワー半導体デバイスの技術俯瞰図



パワー半導体デバイスの中国市場

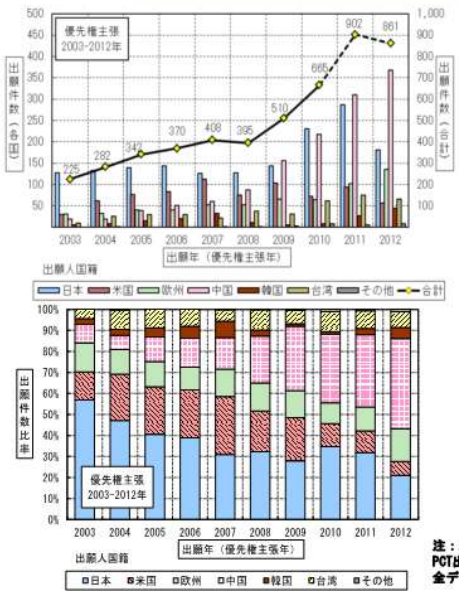


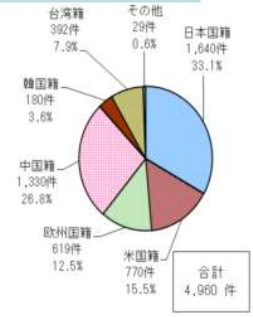
出典：IHSグローバルより作成

パワー半導体デバイス

- 中国に出願された特許出願件数は増加傾向にあり、日本国籍による特許出願が最多ではあるが、中国籍出願による出願件数比率が増加傾向にある。
- 出願人別の出願件数はインフィニオンテクノロジーズが1位であり、日本企業では三菱電機が3位、パナソニックが5位である。

パワー半導体デバイスの出願人国籍別出願件数推移、比率、出願件数ランキング（出願先：中国、出願年：2003～2012年）





順位	出願人名称	件数
1	インフィニオンテクノロジーズ(欧州)	263
2	HHグレース半導体製造(中国)	237
3	三菱電機	220
4	アルファ&オメガ セミコンダクタ(米国)	163
5	パナソニック	156
6	電子科技大学(中国)	142
7	東芝	138
8	ルネサス エレクトロニクス	134
9	富士電機	127
10	富士通	115

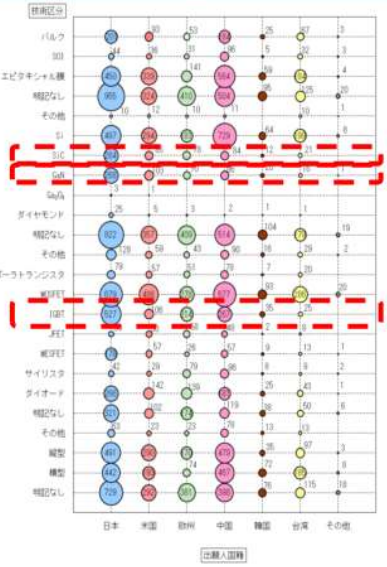
注：2011年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で、全データを反映していない可能性がある。

パワー半導体デバイス

- 基板の材料・素子の種類別に出願件数をみると、どの国籍の出願人もSiを用いたパワー半導体及び外部から電圧を加えることで電流の流れを制御するMOSFET※1に関する出願が多い。
- 日本国籍出願人は、高温動作が可能なSiCやGaNを用いたパワー半導体、輸送機器、産業機器、電力システム向けに利用され、大電力の高速スイッチングが可能なIGBT※2に関する出願も多く、SiCやGaN、IGBTの技術開発を進め、技術的優位性を確保することが期待される。

※1:金属酸化物半導体電界効果トランジスタ
※2:絶縁ゲートバイポーラトランジスタ

基板の材料・素子の種類別ー出願人国籍別出願件数
（出願先：中国、出願年：2003～2012年）



基板の材料・素子の種類別ー出願件数ランキング
（出願先：中国、出願年：2003～2012年）

SiC

順位	出願人名称	出願件数
1	インフィニオンテクノロジーズ(欧州)	65
2	三菱電機	48
3	富士通	46
4	パナソニック	43
5	電子科技大学(中国)	29

GaN

順位	出願人名称	出願件数
1	富士通	100
2	インフィニオンテクノロジーズ(欧州)	59
3	パナソニック	46
4	西安電子科技大学(中国)	27
5	東芝	23

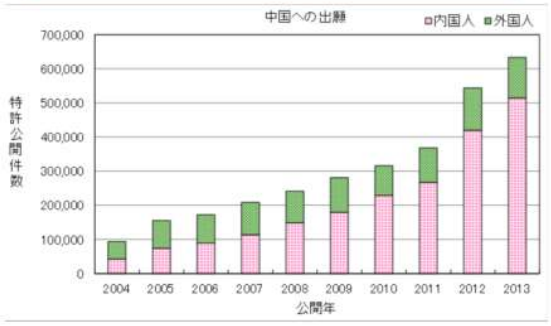
IGBT

順位	出願人名称	出願件数
1	三菱電機	130
2	インフィニオンテクノロジーズ(欧州)	125
3	富士電機	97
4	電子科技大学(中国)	57
5	東芝	46

65

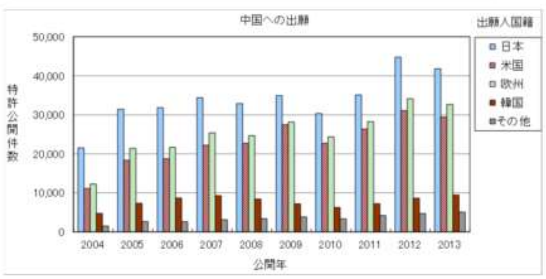
参考

中国の特許公開件数に占める内・外国人別件数推移
（公開年2004年から2013年）

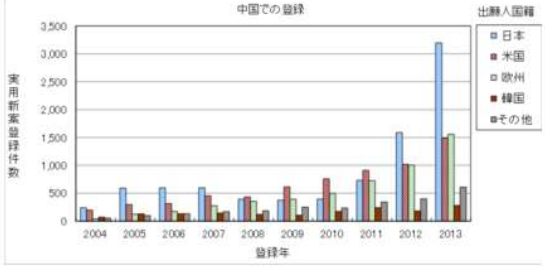


中国の実用新案登録件数に占める内・外国人別件数推移
（登録年2004年から2013年）

中国の特許公開件数に占める日米欧韓国籍出願人の件数推移
（公開年2004年から2013年）



中国の実用新案登録件数に占める日米欧韓国籍出願人の件数推移
（登録年2004年から2013年）



出典：平成２６年度特許出願動向調査
マクロ調査報告書

66

平成 26 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 27 年 3 月 30 日

株式会社富士通総研

目次

1. 本検討の概要 1
1.1. 背景と目的 1
1.2. 実施概要 1
1.2.1. 自然模倣技術・システムの実用化に向けた選定及び調査 1
1.2.2. 自然模倣技術・システムの今後のあり方に関する検討 2
1.2.3. ワークショップの開催 2
1.3. 検討会の設置・運営 2
2. 自然模倣技術・システムの実用化に向けた選定及び調査 5
2.1. 調査対象技術の選定 5
2.2. 実用化したときの環境面及び経済面での貢献に係る調査、検討 18
2.3. 実用化に向けての課題の明確化、解決手法の検討 18
2.4. 実証試験における試験計画の策定 18
3. 自然模倣技術・システムの今後のあり方に関する検討 20
3.1. 持続可能な社会の実現に向けた社会システム・ライフスタイルの変革に係る検討 20
3.1.1. 実施目的 20
3.1.2. 実施方法 20
3.1.3. 調査結果 20
3.1.4. まとめ 22
3.2. 他の施策との連携に係る検討 24
4. ワークショップの開催 28
4.1. 目的 28
4.2. 開催概要 29
4.3. 実施内容 31
4.3.1. 東京開催 31
4.3.2. 滋賀開催 35
5. まとめと提言 43
5.1. まとめ 43
5.2. 提言 44
5.3. 今後の検討課題 46

1. 本検討の概要

1.1. 背景と目的

平成 24 年 4 月に閣議決定された「第四次環境基本計画」では、目指すべき持続可能な社会の姿として、『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として、「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』を掲げている。

この社会の実現に向けては、極めて効率的なエネルギー・資源の循環を達成している自然を参考とした技術・システム、すなわち「自然模倣技術・システム」の活用が有望な手段であると考えられる。そこで、本業務においては、来年度以降の実証への展開を視野に入れて、自然模倣技術・システムについて調査・検討を行った。また、ワークショップを開催し、調査・検討結果について普及促進を行った。

1.2. 実施概要

1.2.1. 自然模倣技術・システムの実用化に向けた選定及び調査

昨年度、環境省が実施した「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」（以下、「昨年度業務」という）における成果をもとに、2、3 年で実用化が見込まれる有望な技術を選定し、実用化に向けて、以下について調査、検討を行った。

①調査対象技術の選定

昨年度業務において作成した既存事例データベースに掲載されている技術の中から、応用段階や実証にかかる費用等も考慮して、調査、検討を行う技術（以下、「選定技術」という）を 10 件程度選定した。

②実用化したときの環境面及び経済面での貢献に係る調査、検討

選定技術がそれぞれ実用化・普及したときに、広く普及したことによる省エネルギー等の環境保全効果や、コスト・メンテナンス性等の経済効果について、評価指標の検討を行い、検討した評価指標を用いて、選定技術の環境保全効果及び経済効果について調査を行った。

③実用化に向けての課題の明確化、解決手法の検討

選定技術のうち、既に実用化が見込まれながらも、まだ普及に至っていない技術について、実用化又は普及に至らない原因となっている解決すべき課題を明らかにし、その解決手法について検討を行った。

④実証試験における試験計画の策定

選定技術の実用化に向けて行うべき実証試験の試験計画を策定した。このとき、対象技術ごとに試験者や試験期間、試験場所の想定を行い、それぞれの候補を挙げるとともに、試験実施に係る費用の試算を行った。

1.2.2. 自然模倣技術・システムの今後のあり方に関する検討

① 持続可能な社会の実現に向けた社会システム・ライフスタイルの変革に係る検討

持続可能な社会の実現のために、自然模倣技術・システムの導入と併せて行うべき社会システム・ライフスタイルの変革について検討した。単なる技術の導入に留まらず、主に自然模倣技術・システムを持続可能な社会の実現にどのように寄与させていくのかについて、生物、工学系等の自然科学の専門家のほか、ビジネス・社会科学等の専門家に対し、ヒアリングを行った。

②他の施策との連携に係る検討

自然模倣技術・システムの研究開発または利用について、環境省または他省庁が実施している施策との連携について検討を行った。

1.2.3. ワークショップの開催

自然模倣技術・システムの研究開発及び有効利用の一層の促進並びに昨年度業務、前項(1)および(2)の業務の成果の普及促進を目的として、持続可能な社会の実現にむけた自然模倣技術・システムの利用手法等に関するワークショップを開催した。東京及び地方で各 1 回開催し、現地の企業や研究機関等に所属する生物学や工学の研究者等を含めた有識者 20 名程度を対象に行った。

1.3. 検討会の設置・運営

自然模倣技術・システムの利用可能性に関する検討会（以下、検討会）を設置し、調査検討の内容・進め方について助言を得た。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。委員は次頁に示す通りである。

自然模倣技術・システムの利用可能性に関する検討会　委員名簿

（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　研究主幹
	石田　秀輝	合同会社地球村研究室　代表社員 東北大学名誉教授
	井須　紀文	株式会社LIXIL　技術研究本部　分析・評価センター　センター長
	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　シニアディレクター　兼　環境本部　グリーンビジネスイノベーション統括部　シニアディレクター
○	下村　政嗣	千歳科学技術大学　総合光科学部　バイオ･マテリアル学科　教授 北海道大学名誉教授　東北大学名誉教授
	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 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・グローバル研究推進室 （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　事務局長
	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 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 生物多様性保全計画研究室 室長

検討会は、平成 26 年 12 月 15 日を初回として、計 3 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 26 年 12 月 15 日（月）　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：
・検討会の趣旨及び本年度事業の実施方針について
・対象技術の選定について
・ワークショップ企画案について

【第 2 回】
日時：平成 27 年 1 月 28 日（水）　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：
・選定技術の環境面及び経済面での効果と実証への展開について
・社会システム・ライフスタイルの変革に係るヒアリングについて
・報告書目次案について
・ワークショップ進捗報告
・その他（新学術領域「生物規範工学」と環境省の共催ワークショップについて等）

【第 3 回】
日時：平成 27 年 3 月 17 日（火）　13 時 00 分～15 時 00 分
場所：株式会社富士通総研　5 階　大会議室
議事：
・ワークショップ開催報告
・社会システム・ライフスタイルの変革に係るヒアリング報告
・報告書（案）について

2. 自然模倣技術・システムの実用化に向けた選定及び調査

2.1. 調査対象技術の選定

昨年度業務において作成された既存事例データベースに掲載されている技術の中から、以下の①～④に示す考え方で、調査、検討を行う技術（以下、「選定技術」という）の候補を 10 件程度選定した。

① 昨年度、作成した既存事例のデータベースから、「応用段階」が実用化段階であるものを抽出。
② 「開発手法」が生物利用であるものを除外（バイオマス等は既に別事業で扱われているため）。
③ 「社会への効果」について、「主たる効果」が環境への効果であるものを抽出（環境への効果が副次的であるもの、効果が医療等、環境負荷低減以外のものを除外）。
④ 実証を想定し、国プロで扱う必要がないもの（既に商品化され広く用いられているもの、既に実証が行われているもの等）、費用が高額になるもの（コンパクトシティ、建築物等）を除外。

さらに、選定技術の候補を、2014 年 7 月に発表された中央環境審議会意見具申「低炭素・資源循環・自然共生政策の統合的アプローチによる社会の構築　～環境・生命文明社会の創造～」の「4.5. あるべき未来を支える技術の開発・普及（環境技術の開発・普及）」に沿って、以下の通り、整理した。

図表 1　選定技術候補の整理

具体的施策例	求められている技術	対象技術候補（カッコ内は模倣している生物）
水素や熱を活用した自立・分散型エネルギー社会の実現	水素利活用技術	
	再生可能エネルギー	a. 色素増感型太陽電池 （a1. トリバネチョウの翅、a2. 葉緑体） b. 潮力発電装置（マグロのヒレ） c. 波力発電システム（ジャイアント・ケルプ） d. 風力発電の羽（イルカの皮膚）
	熱利用技術	
天然資源から循環資源への抜本的改革	破砕物からの有用物の革新的選別技術	
	太陽光パネル等再エネ由来希少金属回収・リサイクル技術	
	蓄電池の寿命後のリノベーション技術	
	持続可能なエネルギー・資源利用に資する先進的環境技術	
脱フロン社会の構築	ノンフロン技術	
バイオマスが支える資源・経済が循環する社会の創造	バイオ燃料製造高度化技術、木材直交集成板高断熱住宅・建築物等バイオマス利用技術高度化技術、国産バイオマス発電・熱利用技術等	e. 竹繊維より強い高機能繊維（竹） f. 強度の高い新しい複合材（樹木の細胞壁）
	家畜・農業廃棄物を利用した発電・熱利用技術	
エネルギー消費が少なく豊かで健康的な社会システム・ライフスタイルの創出	超高効率パワー・光デバイスを活用した社会全体の徹底的な省エネ技術	g. エネルギー効率に優れる水中ロボット（ブルーギル） h. 低摩擦材料（生物の表面構造） i. 船舶のコーティング剤（サメの鱗）
	ネイチャーテクノロジー	j. 新しいエアコン（ミイデラゴミムシ） k. 調湿機能壁材 （k1. シロアリの巣、k2. 地殻水熱反応） l. シーリングファン（カエデの種子） m. 湿度・温度を一定に保つ住宅（シロアリの巣）
	グリーンベンチャーテクノロジー	
	地域適応型技術	
環境技術のショーケースとなる国立公園づくり	生態系・景観配慮型の再エネ・省エネ技術等	
森・里・川・海のつながりを維持・回復する技術イノベーション	環境配慮型ダム、河川の生態系回復工事等	
イノベーション・国際展開	先導的な低炭素技術（L2-Tech）	n. CO2を除去する人工膜フィルター（ヒトの肺）
	途上国のニーズに応える技術	o. 吸水シート（バラの花びら） p. 超節水風呂（アワフキムシの泡）

出所：株式会社富士通総研作成

対象技術候補として選定した技術の概要は以下の通りである[1]。

a1. 光を効率的に吸収するトリバネチョウの羽

- ■ 機能
  - ・ トリバネチョウは、黒い色素だけでなく、羽の特殊構造によって光エネルギーを効率的に吸収する。トリバネチョウの鱗粉は重なることで六角形のハニカム構造をしたミクロサイズの模様を作り出す。そのハニカム構造によって太陽光は屈折し、黒い色素まで伝えられて吸収される。光エネルギーはそこで電子エネルギーに代わり、やがて熱に変換される。
- ■ 応用技術
  - ・ 効率的に光を吸収する、色素増感太陽電池に応用されている。

a2. 光の量を調節する植物

- ■ 機能
  - ・ 植物の葉緑体に含まれる色素 β カロテンの1つであるキトサンフィルは、太陽の光が強いときには吸収した光から過剰に生産したエネルギーを熱に変えて捨て、光が弱いときにはより光を吸収しやすい物質に変わって光を集める。
- ■ 応用技術
  - ・ 過剰な電子の生成を防ぐ、人工的な電子移動化合物に応用されている。
- ■ 応用技術提案
  - ・ 光合成で行われる光エネルギー移動や電子移動を制御する因子を解明することで、電気機器や光触媒、新しい種類の太陽電池に応用できる。

b. 低抵抗で泳ぐマグロ

- ■ 機能
  - ・ 流線型のボディと大きな三日月型の尾ビレ、それを動かす強力な筋肉のおかげで、マグロは海中を高速で進むことができる。外洋（水深 200m よりも深い海域）を回遊生活するマグロは、体の前の部分はあまり動かさず，尾ビレの付け根から後ろだけを振り子のようにくねらせて推進力を得ている。これは「マグロ型泳法」と呼ばれて

[1] 出所：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 (http://www.naturetech-db.jp/) 、積水化学工業株式会社　自然に学ぶものづくり研究助成プログラム (http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/research/)

おり、マグロの他にもサメやサバに見られる泳ぎ方である。この泳ぎ方は、動かす部分を少なくして水の流れに対して体をできるだけ一直線に保つことで水の抵抗を抑え、無駄なエネルギーの消費を抑えられる。マグロのように高速度で泳ぎ続ける魚にとっては効率の良い泳ぎ方である。

■ 応用技術

・ 効率的に発電できる潮力発電装置の開発に応用されている。

■ 商品・サービス

・ マグロのヒレの動きに着想を得た「バイオストリーム」
（バイオパワーシステムズ社）

c. ジャイアント・ケルプに学ぶ新しい波力発電

■ 機能

・ カリフォルニアのモントレー湾やオーストラリアのタスマニア島の近くの海には、全長数１０メートルから１００メートルまで成長する巨大な海藻が生息している。なんと１日に数１０センチも成長すると言われ、「ジャイアント・ケルプ」（巨大な昆布という意味）と呼ばれている。ジャイアント・ケルプの一つ一つの「葉」の付け根の部分の間には、気体がつまった小さな「浮き袋」がついており、たくさんの浮き袋を持つことで、巨大な海藻が海中で倒れてしまわないように支えている。また、この「浮き袋」のおかげで、「葉」は海流に沿ってひらひらと大きく広がるので、海藻はたくさん日光を浴びて光合成を行うことができる。

■ 応用技術

・ オーストラリアにあるバイオパワーシステムズ社は、海中でゆらゆらと揺れる海藻の動きに着想を得て、「バイオウェーブ」という波力発電装置を開発した。全高２５メートルの装置であるバイオウェーブは、海流に合わせて「浮き」の部分が揺れて、装置の根本に取り付けられたタービンを回転させる発電する。潮流による揺れを回転運動に代え、それによって発電機を駆動している。

■ 商品・サービス

・ 波力発電システム（バイオウェーブ）

d. 低抵抗のイルカの皮膚

■ 機能

- イルカの皮膚には弾力性があり、高速度で泳ぐ際に皮膚にくぼみを作ることで水の抵抗を抑え、効率的に高速度で泳ぐ。

■ 応用技術

- 凹凸のあるメッシュ状樹脂を使って、頭部、背中に配したアルペンスキー用のスポーツウェア開発に応用されている。イルカの皮膚と同じように機能する、カーボンナノチューブとシリコンでできた人工皮膚の開発に応用されている。

■ 応用技術提案

- 空気や水の抵抗に強い素材の開発に応用できる。空気抵抗の少ない飛行機や電車、風力発電の羽等に応用できる。

e. 軽量で硬い竹

■ 機能

- 竹は軽量で硬い。竹は、幹の内側から外側の方にかけて、硬い皮で覆われた維管束が密に存在しており、密度が濃く、硬い。

■ 応用技術

- 竹繊維より強い高機能な竹繊維の開発に応用されている。竹繊維を用いた繊維強化プラスチックに応用されている。竹繊維を用いた繊維強化プラスチックはスピーカーの振動板に応用されている。

■ 応用技術提案

- 竹の強度を利用して、新しい繊維の開発に応用できる。竹繊維を用いた繊維強化プラスチックは、環境負荷の少ないボートの素材に応用できる。

f. 衝撃を吸収する樹木の細胞壁

■ 機能

- 樹木は強風や豪雪に見舞われても倒れないように、バネのようにしなやかな構造を持っており、衝撃を吸収できる。木を構成する無数の細胞壁は、衝撃に耐えられるように自ら硬くした細胞壁が骨組みの役割を果たし、強風や豪雪があたっても、クッションのように細胞壁が変形して衝撃を吸収する。また、細胞壁を構成するセルロースという物質は、糸が絡み合ったような繊維状の形をしており、外から力が加わると、この繊維がしなり、衝撃を和らげる。

■ 応用技術

- 衝撃を吸収する木材として体育館や病院の床に使われている。

■ 応用技術提案

・ 細胞壁の構造は、2つ以上の異なる素材を一体的に組み合わせた複合材の開発に応用できる。樹木が進化の過程で作り上げた細胞壁の生成プロセスを解明することで、より強度のある新しい複合材の開発に応用できる。

g. 水の抵抗を抑えるブルーギルの胸ヒレ

■ 機能

・ ブルーギルは、胸ヒレを前に動かした後、胸ヒレの上部と下部をU字型に丸めることで水の抵抗を最小限に抑え、スムーズに泳ぐ。

■ 応用技術

・ 効率的な推進が可能な、ウレタン・プラスチック製のヒレとナイロン製の腱を制御するポリマーに電気を通して動く人工ヒレの開発に応用されている。

■ 応用技術提案

・ ブルーギルのヒレ型推進装置の開発に応用できる。推進速度にかかわらず動きを制御できる、高い操作性を持った、低騒音の、エネルギー効率に優れる水中ロボットの開発に応用できる。機雷の排除や港湾の監視、資源探査などに使われる水中ロボットに応用できる。

h. 生物の表面構造に学ぶ機能性材料の創製

■ 機能

・ 生物の水をはじいて汚れを寄せつけない撥水性、光を反射しない眼の構造のような技術の多くは、体表面に形成された階層的微細構造が起因となっていることが明らかにされてきた。また、生体内でものの形が自然に組み上がる“自己組織化”のプロセスも注目されている。自己組織化は、汎用元素を利用して小さなエネルギーでものづくりが可能となるため、低コスト化や環境負荷の低減を進めるために、材料開発に活かそうとする研究が活発化している。

■ 応用技術

・ 自己組織化の手法として、ハニカム状に水滴を配列させて蒸発させることで、ナノからマイクロメートルの領域で、規則的に孔が並んだ多孔質薄膜が開発されている。

・ この多孔質膜の応用研究では、バラの花びらの構造を模倣した撥水性と親水性を合わせもつ金属-高分子ハイブリッドシートが開発されている。

■ 応用技術提案

・ これらの薄膜を使って低摩擦材料を創製する研究が行われている。たとえば砂漠に生息するトカゲやヘビは砂の中を泳ぐように移動するが、体表面の摩擦抵抗が極めて低いために砂にすれて体が傷つくことはない。そして、ヘビの体表面は平滑ではなく、ハニカムのような微細構造を有していることが明らかになっている。そのような構造に倣い、潤滑剤を用いずに金属表面の摩擦特性を制御しようという研究が進められている。摩擦特性が低くなれば、金属の耐久性が向上し、製品寿命が長くなる。

i. 汚れが付きにくく低抵抗であるサメ

■ 機能

・ サメの鱗は、細い突起とV字型の溝が付いた形状になっており、それが全て尾びれの方向に向かって整然と並んでいる。これらは循鱗と呼ばれている。サメが泳ぐ際には、V字型の溝の部分に小さな渦ができ、鱗の表面で水流が乱れることを防ぎ、水をスムーズに流すことで泳ぐときの抵抗を抑えている。この効果はゆっくりとした速度で進むときに最も有効である。水の抵抗を抑えることで泳ぐときのエネルギー消費を最小限に抑えている。また、循鱗は互いに曲がって重なり合っているので、付着物が付いてもそぎ落とされてしまい、その結果、汚れにくい。

■ 応用技術

・ 水の抵抗が少ない競泳用水着の素材に応用されている。

■ 応用技術例

・ 水の抵抗が少ない競泳用水着の素材に応用されている。

j. 毒霧を噴射するミイデラゴミムシ

■ 機能

・ ミイデラゴミムシは、攻撃されて危険を感じると、防御のために大きな音と一緒にとても臭い霧状のガスを、お尻の先から外敵に向けて一気に噴射する。噴射液の温度は100℃にも達し、天敵のカエルや鳥に火傷を負わせ、人の手にかかると皮膚を茶色に変色させ、悪臭をこびりつかせるくらい強力である。お尻の向きを変えればどの方向にも噴射できる上、数発連続して噴射もできる。この防御用の毒霧は常にお腹に霧を貯めている訳ではなく、毒液の成分である2種類の化学物質を、それぞれお腹の中で2カ所に分けて貯めておき、危険を感じるとそれらを反応室と呼ばれる部屋に送って、急激に反

応させて毒霧を作る。そして、化学物質が爆発的に反応する時に発生する熱と圧力を利用して、お尻の先から外敵に向けて高温高圧の霧を一気に噴射する。毒霧を２種類の化学物質に分けて貯めておき、必要な時に必要な分だけ反応させて作り出す事で、無駄なく効率よく毒霧を使うことができる。

■ 応用技術

・ 水を細かい霧状にして噴射し、水が蒸発するときに周りから熱を奪う効果を利用した新しいエアコンの開発に応用されている。２種類の化学物質を混合して噴射する仕組みを利用した消火器に応用されている。

■ 応用技術提案

・ 新しい形の消火器やスプレーとして応用できる。バネを使わずに噴射できる、新しいタイプの薬の吸入器や噴霧器などに応用できる。霧状の消火剤を噴射する、多目的型の自動消火器の開発に応用できる。

k1. 優れた空調機能を持つシロアリの巣

■ 機能

・ サバンナ地帯に生息するシロアリの巣は、昼と夜の寒暖の差が非常に激しいにも関わらず、温度を常に30℃に維持している。それは、湿度の調整やガス交換をすることができる土が持っているとても小さな孔と、アリ塚自体の構造によるものである。シロアリの巣の地上に出ている部分は数メートルだが、地下には数十メートルの蟻道と呼ばれるトンネルがあり、蟻道の下にある地下水によってトンネル内の土が湿って涼しくなっている。この蟻道は煙突のように地上に出ているトンネルとも繋がり、風が巣内部に入ると冷却され、それと同時に換気も行われる。

■ 応用技術

・ 自然冷却の仕組みを取り入れた建物に応用されている。調湿機能を持った壁材開発に応用されている。

■ 商品・サービス

・ 調湿機能を持った壁材「エコカラット」(LIXIL)

■ 応用技術

・ シロアリの巣の構造を利用して、快適な住居や倉庫の開発に応用できる。

k2. 地殻の水熱反応に学ぶ高機能材料開発

- ■ 機能
  - ・ 古くから、貴重品や食糧などの保管庫として利用されてきた土蔵は、内部の温度と湿度が１年を通してほぼ一定に保たれ、天然のエアコンとも呼ばれている。土にはもともと微細な孔が無数に存在し、湿度の変化に応じて水蒸気を吸放出している。分厚い土壁で囲まれた土蔵は、その土の機能を最大限に活かしたものであり、季節や天候の変化による湿気や乾燥から保管物を守ってきた。
  - ・ タイルやレンガなど土の建材は、一般に 1000℃以上の高温で焼成するが、これでは微細な孔が塞がれてしまい、土蔵のような機能を発揮できない。そこで着目されたのが、水を使って固化すること、すなわち、蒸して固める方法である。地殻の地表に近い部分では、100℃程度の熱水の働きにより、岩石や鉱物の結晶が形成されている。
- ■ 応用技術
  - ・ このメカニズムを利用して土を固化する研究が行われ、ナノサイズの孔をもつ調湿機能性素材がすでに開発されている。
- ■ 応用技術提案
  - ・ 現在は、数百ミクロンの細孔をもつ土や１ナノメートル以下の超微細孔をもつ鉱物に新たな結晶を成長させ、数ナノの微細孔を付加する研究が進められている。大きさの異なる孔をもつ多孔体は、調湿・調温だけではなく、揮発性ガスなどの物質の吸着・分離機能も合わせて発現させることができる。さらに、触媒を導入することで、吸着物質の分解も可能にしようという研究へ発展している。

1. 滞空時間が長いカエデの種子

- ■ 機能
  - ・ カエデの種子は、回転するときに羽に発生する小さな空気の渦（翼端渦）により、翼上方の空気圧が下がり、翼果が吸い上げられ、長時間滞空できる。カエデの種子の重さと羽の長さは、カエデ独特の回転ができるよう絶妙なバランスで保たれている。
- ■ 応用技術
  - ・ 消費エネルギーを削減し、羽が回転する際のファンの音を最小に抑えた、一枚バネの新しいシーリングファン（天井に取り付けられた回転する羽）に応用されている。
- ■ 商品・サービス
  - ・ 一枚バネの新しいシーリングファン

■ 応用技術提案

・ カエデの種子の構造を参考に、超小型ヘリコプターや超小型無人機、惑星探査ロボットに装着する着陸用パラシュートに応用できる。空気や水の流れを最適化する機械・ファンを開発できる。

m. いつでも快適なシロアリの巣

■ 機能

・ サバンナ地帯に住むシロアリは、数十年もの長い年月をかけて、高さ6～7mの土の巣を作る。サバンナ地域の気温は、昼間50℃、夜は0℃と温度差がとても激しい。こんな厳しい環境の中でも、巣の中の温度は、いつも30℃ぴったりに調節されている。その秘密の鍵を握っているものの一つは、巣の材料である土の隙間（団粒構造）にある。土には目には見えないくらいの10億分の数メートルという、小さな隙間がたくさんある。このバクテリアよりも小さな隙間は自動的に湿度をいつも一定に調整する機能を持つ。湿度が高いと湿気を吸い水として隙間に貯め、低いと湿気（ガス）として空気中に放出することで湿気を調節する。また、大量の隙間（空気の層）が熱を遮断する役割をし、湿度の変化を抑えている。

■ 応用技術

・ 無電源エアコンは実際に一般家庭で使われはじめている。そして、家の室内の湿度や温度がほぼ一定になることが確認された。エアコンを使わないので、無理することなく二酸化炭素の排出量も減らせる。また素材の中の小さな穴は、空気中のガスや匂いも吸着するので、室内の空気をきれいにすることもできる。

■ 応用技術提案

・ 近年、家庭内の消費電力は増加の一途をたどっており、大きな問題となっている。また、その内訳では、エアコンが最も大きな消費となっている。シロアリの巣が持つ、温度・湿度を一定に保つ機能を持つ仕組みを住宅に応用すれば快適な空気環境をつくる「無電化エアコン」ができる。それは、消費エネルギー削減にも繋がる。

n. 二酸化炭素を効率よく除去する人の肺

■ 機能

・ 人の肺は、陸上で効率的にガス交換を行い、酸素を取り入れ、二酸化炭素を排出する。肺の中では、枝分かれして細かくなった気管支の先に小さな丸い肺胞が房状についており、その周りを毛細血管が

取り巻いている。肺胞と血管を隔てる薄い膜は厚さ1μmと非常に薄く、二酸化炭素が血液中から肺胞へと速やかに排出される作りになっている。肺胞の表面積はテニスコートと同じくらいであり、効率良くガス交換を行うことができる。血液から二酸化炭素を運び出すのを補助する化学物質「炭酸脱水素酵素」の働きにより、二酸化炭素の除去速度は、酵素がない場合の1000倍となる。

■ 応用技術
- 排煙中の二酸化炭素を90%以上除去する機能を持った人工膜フィルターの開発に応用されている。

■ 商品・サービス
- 排煙中の二酸化炭素を90%以上除去する機能を持つ人工膜フィルター（カルボザイム社）

■ 応用技術提案
- 工場や火力発電所から排出されるガスから二酸化炭素を分別・除去する技術に応用できる。

o. 超撥水性と水滴の吸着性を併せ持つバラの花びら

■ 機能
- バラの花びらには、親水性と、疎水性を持つ表面の凸凹構造による超撥水性がある。これによって、バラの花びらにある水滴は球体となり、表面にくっつく。

■ 応用技術
- 水滴をはじき、かつ、吸着する金属－高分子ハイブリッド構造でできた新しい人工シートに応用されている。

■ 応用技術提案
- 水滴をはじき、かつ、吸着する人工シートを用いて、エネルギーを使わずに水分を収集し、水の少ない乾燥地や砂漠での作物栽培に応用できる。

p. 泡で身を守るアワフキムシの幼虫

■ 機能
- アワフキムシの幼虫は、排泄された水分に自らが分泌する有機物を溶け込ませて石けんを作り出し、お腹の気門から空気の粒を吹き込んで泡立て、できた粘度の高い泡の固まりを巣にしている。幼虫が分泌する有機物に泡立ちをよくしたり泡を壊れにくくしたりする働きがあるため、泡の巣はとても丈夫で、雨風にさらされたくらいで

は吹き飛ばず、日照りでひからびることもない。泡の中の空気が断熱材の働きをするので、巣の中にいれば外気の変化から身を守ることができる。また、アリなどがこの泡の巣に侵入しようとすると、石けんの水溶液で溺れて呼吸できずに死んでしまう。

■ 応用技術

・ 超節水で省エネルギーのお風呂の技術開発に応用されている。

■ 応用技術提案

・ 車いすのまま入浴できるお風呂の開発に応用できる。水圧がかからないお風呂の開発に応用できる。

以上の候補について、検討会において議論を行い、実証の実施に当たっての実現性等を考慮し、対象技術として以下を選定した。

A. 生物に学ぶトライボロジー
※h. 低摩擦材料（生物の表面構造）に対応
B. 省エネ建材＋撥水・撥油材料
※k. 調湿機能壁材（k1. シロアリの巣、k2. 地殻水熱反応）に対応
C. 水環境に配慮したものづくり（水処理・防汚）
※i. 船舶のコーティング剤（サメの鱗）に対応
D. 自己組織化技術
※h. 低摩擦材料（生物の表面構造）に対応
E. 環境観測用ロボット
※g. エネルギー効率に優れる水中ロボット（ブルーギル）に対応

また、検討会において、有識者の意見を踏まえ、バイオミメティクスにおけるトレンド等を考慮し、以下を追加した。

F. バイオミメティックデザイン（工業デザインへの応用）
※既存事例データベースにおける以下の技術に対応
落ち葉のパターンを取り入れた新しいタイルカーペットの張り方、
自然で綺麗なデザイン、ビルの壁や部屋の壁紙などのインテリア
G. 超小型風力発電機
※既存事例データベースにおける以下の技術に対応
トンボの翅に学ぶ昆虫型小型飛翔体、マイクロ風力発電機

なお、これらの共通基盤になるものとして、バイオミメティクス・データ検索基盤とデータベースを位置付けた。

2.2. 実用化したときの環境面及び経済面での貢献に係る調査、検討

選定技術の環境面、および、経済面での効果について調査し、評価指標を検討、以下の通り、整理した。選定技術は研究開発段階にあり、環境保全効果、経済効果の評価は困難であるため、今後の課題である。

図表 2　選定技術の環境保全効果・経済効果

選定技術	環境保全効果の評価指標	経済効果の評価指標
A. 生物に学ぶトライボロジー	・資源利用の削減 ・エネルギー消費削減	・メンテナンス性の向上 ・製品の長寿命化
B. 省エネ建材 ＋撥水・撥油材料	・調湿に必要なエネルギー消費削減 ・有機フッ素化合物の使用削減	・電気・ガス利用のコスト削減 ・メンテナンス性の向上
C. 水環境に配慮したものづくり （水処理・防汚）	・生態系保全	・メンテナンス性の向上
D. 自己組織化技術	・製造プロセスのエネルギー消費削減	・製造コスト削減
E. 環境観測用ロボット	・防災（災害現場の調査） ・国土の保全への貢献	・観測コストの削減
F. バイオミメティックデザイン （工業デザインへの応用）	・エネルギー消費削減	・デザイン性を兼ね備えることによる付加価値向上
G. 超小型風力発電機	・CO2削減	・生産コスト削減

出所：株式会社富士通総研作成

2.3. 実用化に向けての課題の明確化、解決手法の検討

選定技術のうち、A. 生物に学ぶトライボロジー、B. 省エネ建材＋撥水・撥油材料、D. 自己組織化技術、E. 環境観測用ロボット、F. バイオミメティックデザイン（工業デザインへの応用）、G. 超小型風力発電機については、国内で研究が行われているという点で実現性があるが、実証を行うには、まだ研究開発が必要な段階にあると言え、実証事業ではなく、研究助成の形での支援が求められる。C. 水環境に配慮したものづくり（水処理・防汚）については、試験場所は想定されるが、地域における環境課題の抽出とそれに対して具体的にどのような技術を使うかについての検討が必要である。

2.4. 実証試験における試験計画の策定

前述の通り、選定技術は、まだ研究開発が必要な段階にある等の理由により、実証を行うのは困難と考えられる。一方、本年度業務で開催したワークショップでは、自然生態系に寄り添うバイオミメティクス工法の事例として、樹木の根系ネットワークを模倣し、自然生態系を復元する土砂崩れ防止工法が紹介され、自然生態系の循環まで視野に入れた環境整備をテーマとした実証の可能性が示唆された。このような技術は、環境面（生態系保全等）と経済面（施工コスト削減等）の双方で効果が期待でき、また、一部は既に実用化しているものもある。費用面でも、規模が大きくないものであれば、実証試験は可能と考

えられる。

試験者は、技術を保有する企業・大学、地域の環境に精通している地方公共団体環境研究機関、試験場所を提供する地方公共団体が想定される。試験期間は、環境への効果を評価するために、3~5 年程度は必要と考えられる。費用については、例えば、ワークショップで紹介された、日鐵住金建材株式会社による土砂崩れ防止工法「ノンフレーム工法」では、1000 平方メートルで約 2600 万円（人件費を除く）である[2]。技術によって費用は異なると考えられるが、環境整備となると一定の面積が必要になるため、同程度の費用がかかることが想定される。

[2] 国土交通省　新技術情報提供システム（NETIS、http://www.non-frame.com/about/pdf/NETIS-CB-020050-A.pdf）

3. 自然模倣技術・システムの今後のあり方に関する検討

3.1. 持続可能な社会の実現に向けた社会システム・ライフスタイルの変革に係る検討

3.1.1. 実施目的

持続可能な社会の実現のために、自然模倣技術・システムの導入と併せて行うべき社会システム・ライフスタイルの変革について検討する。単なる技術の導入に留まらず、主に自然模倣技術・システムを持続可能な社会の実現にどのように寄与させていくのかについて調査を行う。

3.1.2. 実施方法

有識者へのヒアリング調査を実施した。ヒアリング対象者、調査実施日は以下の通りである。

■ヒアリング対象者

株式会社積水インテグレーテッドリサーチ　主席研究員　　白鳥　和彦　氏

■調査実施日

2015 年 2 月 13 日

積水化学グループでは、「自然」に学んだ「基礎サイエンス」の知見を活用しようとする大学・研究機関の研究活動を支援するために、「積水化学　自然に学ぶものづくり研究助成プログラム」を、創立 55 周年記念事業の一環として、2002 年度より毎年実施している[3]。白鳥氏はその事務局運営を担当しており、様々な自然模倣技術・システムを俯瞰的に把握していることから、ヒアリング対象者として選定した。

3.1.3. 調査結果

ヒアリング結果は以下の通りである。

①自然模倣技術・システムの実用化について

- これまで 190 人の研究者に助成を行ってきた。これまでは、個人への助成だけだったが、2013 年からチームによる異分野連携研究への助成を開始した。
- 分野別では、特にケミカル分野が多いが、生物系の研究者も応募しており、生物の特異な機能がどのように発現しているかというテーマの研究が多い。
- 大学の研究は、研究そのものの独自性で選ばれるので、今あるものを形にするという

[3] 積水化学工業株式会社 Web サイト(http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/research/index.html)

実用化の視点があまりない。一方、企業にとっては実現性が大事で、量産可能、安定してつくれる等の点が重視される。

- 応募してくる研究者の研究がすぐに使えるかというと難しい。今のところ、実用化した例はない。
- 研究者への義務を課さずに助成を行ってきたので、必ず実用化しなければならない、当社が研究成果を使わせてほしいということはない。
- 材料よりもシステムの方が実用化に近いのではないか。例えば、ヒラムシに学ぶ多関節ロボットは、中央制御でなく、自律分散制御により、様々な環境に適応可能であるが、このような情報工学に近いテーマの方が実用化に近いのではないか。
- 材料は、構造が分かっても、今の工業技術で作れるのか、今の材料を代替できる価格か、信頼性の評価等、クリアしないといけない課題が多々ある。
- 材料は、走査型電子顕微鏡（SEM）でナノ構造がようやく分かってきた段階で、製造技術の開発やどのような用途に使っていくかの検討はこれからではないか。
- 生物の構造そのものを使うよりは、原理・原則をどのように使っていくかを企業や研究者が一緒になって考えないといけない。現状は、テーマを設定して、どうしたらものをつくれるかという議論まで行けておらず、そこが必要である。
- ナノ構造で機能が発現するメカニズムは分かったが、ナノ構造がどのように作られるのか。生物はナノ構造をどうやって作っていて、人間がそれを真似することができるのか。人間の工業的な量産技術でつくれるのか。
- 構造を真似して同じものをつくるのが正解か。似たようなもの、例えば、サメ肌水着のような、というアプローチもあるのではないか。
- 有望なのは、多額の投資がなされる医療や宇宙開発、量産性より機能が重要な領域だろう。
- 今年度の異分野連携枠の採択案件で、「里山を守り豊かな水資源へとつながる『育水』に学ぶ降雨浸透モニタリングシステムの開発と地下水涵養域を考慮した水理地質構造モデルの構築」というテーマがあった。土木、センサー、情報科学の研究者がチームで提案。自然模倣技術・システムとは少し違うが、街づくり的なものに自然を活かすという視点で興味深く、また実用化に近いと考えている。
- 材料分野で異分野連携のテーマ設定は難しい。例えば、アプローチAとアプローチBがあるとすると、その組み合わせでなく、淘汰されていくイメージである。機械分野の方がやりやすいのではないか。例えば、ロボットだと、素材、制御というように各分野にテーマを分割することができる。
- 用途について、例えば、分子モーターができれば、今までできなかったことができるようになる。しかし、自然に学ぶという着眼点で、出来上がったものが画期的ということはなかなかなく、性能がよいということで置き換わるのではないか。
- 「自然に学ぶ」という言葉にこだわったのは、バイオミメティクスに限らないという

ことである。学問領域としては、バイオテクノロジーとバイオミメティクスは異なるが、そこにこだわらない。

- 生物の機能の研究は長期的な視野を持って続けるべきである。ただし、単なる研究ではなく、実用化の視点を入れて、絞込みを行い、実用化に近いものを手厚く助成することが必要である。

②社会システム・ライフスタイルの変革について

- 環境を守らないといけない、やらなくてはいけないという意識が強いが、そのような考え方は一般市民には通じない。環境が主であってはいけない。便利だということがまずあって、よく見てみたら、環境にやさしい、持続可能である、ということが必要。
- 一般市民はエコに関心があっても、エコが第一義ではない。それは、企業、研究者、行政の仕事であり、よいものができて、それが、気が付いたら環境にもやさしいという仕組みを提供することが必要。
- 強制するのではなく、喜んでまでとはいかないが、社会システムや生活スタイルをトータルで考えてあげないといけない。例えば、エアコンの温度を下げるというのであれば、20℃でも暮らせる生活スタイルや住居、衣服を併せて提示する必要がある。
- 今の技術を、社会の枠組みを変えることで何か使えるかもしれない。生産性という価値観からはできないが、ライフスタイルを変えることで使えるかもしれない。そこをやらないと実用化にいかないのではないか。
- 環境と経済は反しない。ただし、現状は、整合性が取れない方向にあるということ。

3.1.4. まとめ

昨年度業務において実施されたヒアリング調査の結果も踏まえて、今回のヒアリング結果から示唆される課題を以下に整理した。

① 実用化の視点を入れて研究開発を行う

今回のヒアリングでは、企業にとっては実現性が大事であり、量産可能、安定してつくれる等の点が重視される一方で、大学の研究は、研究そのものの独自性が重視され、今あるものを形にするという実用化の視点があまりない点が自然模倣技術・システムの実用化における問題として指摘されている。昨年度業務において実施されたヒアリング調査でも、「微細構造を作る工程にコストがかかるので、価格が高くなってしまう。」「生物模倣の研究者と話をすると、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い。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。」という意見が企業の研究開発者から挙げられている。

また、今回のヒアリングでは、生物の機能の研究は長期的な視野を持って続けるべきという指摘もあり、昨年度業務のヒアリングでも「生物の機能発現のメカニズムが

分からないとつくれないし、品質を保証できない。」という意見も挙がっている。

こうした点を踏まえると、単なる研究でなく、実用化の視点を入れた生物の機能の研究と、企業における量産化や安定生産のための研究開発が課題であると言えよう。

② 早期の実用化が見込まれる分野を見出し、成功事例をつくる

今回のヒアリングでは、材料よりも、自律分散制御のような情報工学に近いテーマの方が実用化に近いのではないかという意見があった。自然模倣技術・システムの研究開発は、2000 年頃に起こった材料系バイオミメティクスの潮流を背景に、現在、材料分野を中心に展開しており、今後もそれは続くと予想される。一方で、昨年度業務の報告書でも述べられている通り、成功事例の創出が求められていることから、技術的なインパクトだけでなく、実用化までのスピードという観点で、テーマや対象領域を見る必要がある。

また、バイオミメティクスにおいては生物学とエンジニアリングの異分野連携が重要であることは各所で指摘されているところである。今回のヒアリングにおいては、材料分野では異分野連携のテーマ設定が難しいが、例えば、ロボットだと、素材、制御というように各分野にテーマを分割することができるので、機械分野の方が、異分野連携がやりやすいのではないか、という意見があった。昨年度業務のヒアリングにおいても、「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。」という意見が上っており、成功事例の創出を目指したテーマを設定する上で重要な示唆であると言える。

③ 「自然に学ぶ」というコンセプトで広く捉える

今回のヒアリングでは、学問領域としては、バイオテクノロジーとバイオミメティクスは異なるが、そこにこだわることで展開が阻害されるよりは、「自然に学ぶ」という言葉でこれを捉え、展開を図るという意見があった。昨年度業務の報告書においても、産業という点ではシームレスであるべきという指摘がなされている。技術としての区別は必要であるが、その応用においては、「自然に学ぶ」というコンセプトで広く捉えることが有効であると考えられる。

今回のヒアリングでは、「『育水』に学ぶ降雨浸透モニタリングシステムの開発」のような研究は、自然模倣技術・システムとは少し違うが、街づくり的なものに自然を活かすという視点で捉えると非常に興味深く、また実用化に近いと考えている、との意見もあり、環境への効果を分かりやすく示すという点でも、自然生態系の循環を視野に入れた環境整備の技術を自然模倣技術・システムとして捉えていくべきであると考えられる。

3.2. 他の施策との連携に係る検討

自然模倣技術・システムの研究開発または利用について、環境省または他省庁が実施している施策との連携について検討を実施した。検討の結果、各段階において活用可能と考えられる環境省の施策として以下が挙げられた。

■研究開発段階の施策

①環境研究総合推進費（総合環境政策局　環境研究技術室）

持続可能な社会構築のための環境政策の推進にとって不可欠な科学的知見の集積及び技術開発の促進を目的として、環境分野のほぼ全領域にわたる研究開発を実施している。

本事業は、環境省が必要とする研究テーマ（行政ニーズ）を提示して公募を行い、広く産学民官の研究者から提案を募り、研究部会の審査を経て採択された課題を実施する、環境施策貢献型の競争的研究資金である。環境省がトップダウン的に研究テーマや研究リーダー等の大枠を決めた上で、研究チームを競争的に選定するなど、行政ニーズに立脚した戦略的な研究開発を強力に推進している。研究の対象分野は、図表 3 に示す 5 分野（第 1 部会～第 5 部会）となっている。

なお、本事業では平成 27 年度新規課題において、「持続可能な社会実現のための自然模倣による社会システムの開発に関する研究」が取り上げられたものの、対象となる新規課題はなかった。

図表 3　環境研究総合推進費　研究の対象分野

出所：環境省　環境研究・技術総合情報サイト

（http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/gaiyou/gaiyou_2.html）

■技術開発・実証段階の施策

②CO２排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（地球環境局温暖化対策課）

本事業では、将来的に大幅なCO2排出削減に資する技術を社会に導入するため、将来の地球温暖化対策強化につながる技術開発・実証事業を国の主導により強力に進め、CO２排出量の大幅な削減を目指す。

将来の規制等温暖化対策強化のシナリオに基づき本事業で開発・実証する技術課題を設定し、現状及び目標の技術成熟レベルや実施体制・計画、CO2 排出削減効果等から、外部専門家の評価・審査により事業実施主体を決定する。

また、進捗管理を強化し技術目標到達の確度を高めるため、事業の実施中、毎年度技術成熟レベルを判定し、必要に応じて開発・実証上の課題の特定とその対策の指導・助言、実施計画の変更等を行うことにより、効果的・効率的な技術開発・実証の執行を図る。

■製品化・普及段階の施策

③環境技術実証事業（総合環境政策局　環境研究技術室）

既に実用化段階にありながら、環境保全効果等について客観的な情報がないために普及が進んでいない先進的環境技術について、開発者でも利用者でもない第三者機関が環境保全効果を実際の現場等で実証し、その結果を環境省ウェブサイト等で公表することで、環境技術の普及を促すとともに実証方法の確立を図り、環境保全に資することを目的としている。

本事業は、1)有識者からなる検討会での議論を踏まえ、実証対象とする技術分野を設定 2)実証運営機関及び実証機関を公募の上、選定　3)実証機関において、企業等への対象技術の公募・選定、試験計画の策定、実証試験の実施、実証試験結果報告書の作成　4)実証試験結果報告書の公表、実証した技術に対し実証番号及びロゴマークの交付を行う。

■事前評価段階にある技術について、研究開発、技術開発、製品化、普及までを視野に置いた評価等を行う施策

④CO2テクノロジーアセスメント推進事業（総合環境政策局　環境研究技術室）

環境技術分野では異なる分野の技術が融合しており、これらの動向を研究機関や企業が俯瞰することは困難である。そこで国が技術の開発動向の情報を研究機関や企業に提供し、技術開発の発展性を促進していく役割を担うことが重要となる。

どの様な技術が低炭素社会を創造し、人々の暮らしを安全・安心な方向へと導いていくのかを国民にも明らかにすることが、当該技術の円滑な普及のために必要である。本事業では実証段階に至る前の革新的なCO2排出抑制技術の開発動向を把握し、テクノロジーアセスメントにより当該技術の環境特性等の評価等を実施し、公表を行う。

■まちづくりに関する施策

⑤先導的「低炭素・環境・自然共生」地域創出事業（グリーンプラン・パートナーシップ事業）

第四次環境基本計画では、目指すべき持続可能な社会の姿として、「低炭素」・「環境」・自然共生」の統合的達成を挙げている。この実現のため、本事業は、各種基盤情報の整備や地方公共団体による計画策定とそれに基づく低炭素地域づくり事業について、事業形成段階の支援から事業計画の策定・FS 調査、再エネ・省エネ設備の導入までの包括的支援プログラムを提供し、低炭素・循環・自然共生地域の統合的達成の具現化を目的とする。

支援事業は、1 号（「実行計画」に位置付けられた事業に係る設備の導入）、2 号（実行計画上事業の事業化に向けた調査の実施及び計画の策定）、3 号（自然公園における低炭素・自然共生型地域づくり事業に係る設備の導入）、4 号（里地里山等地域の自然シンボルと共生した先導的な低炭素地域づくり事業に係る設備の導入）の 4 つに区分される。

図表 4　先導的「低炭素・環境・自然共生」地域創出事業（グリーンプラン・パートナーシップ事業）の概要

出所：平成 27 年度環境省概算要求 主要新規事項等の概要

(http://www.env.go.jp/guide/budget/h27/h27-gaiyo.html)

⑥「低炭素・循環・自然共生」地域創生実現プラン策定事業

地域において新たなエネルギー需給システムの構築等による低炭素地域づくりを追求する動きと併せて、地域資源を活用した環境投資促進、他地域とのネットワーク形成による地域資源循環圏の実現、魅力ある生活・交流空間創造等を通じて、雇用の創出や地域活性化を目指そうとする動きが活発化している。そのような背景の下、本事業は、地域において、低炭素・循環・自然共生を統合的に達成し、まち・ひと・しごとの創生を図っていくため、地域における当該検討の際に目指すべき地域の将来像とその実現に向けたプラン策定のあり方を示すとともに国の支援策を取りまとめるものである。(1)「モデル地域創生プラン」策定事業、(2) 評価指標化検討事業、(3) 全国プラン策定事業の 3 つの事業からなる。

図表 5 「低炭素・循環・自然共生」地域創生実現プラン策定事業

出所：平成 27 年度環境省概算要求 主要新規事項等の概要
(http://www.env.go.jp/guide/budget/h27/h27-gaiyo.html)

4. ワークショップの開催

4.1. 目的

環境への大きな効果が期待される一方で、社会実装が十分には進んでいない自然模倣技術・システムに関して、研究開発及び有効利用の一層の促進、並びに、昨年度及び本年度業務の紹介を目的として、持続可能な社会の実現にむけた自然模倣技術・システムの利用手法等に関するワークショップを、東京と地方で開催した。

東京開催では、自然模倣技術・システムの研究開発に取り組んでいない企業・研究機関に対して関心をもってもらい、研究開発に着手するきっかけとなる行動を促すことを、主な目的とし、大手の企業・研究機関に所属している、マネージャークラスの研究者を、主な対象として実施した。

地方開催では、自然模倣技術・システムを活用した成功事例の創出に向けて、日本国内でのモデル地域をつくることを、主な目的とした。開催地は、自然模倣技術・システムの活用により、環境への効果が期待できる地域として、自然模倣技術・システムに関する取り組みが活発な滋賀県とした。参加者は、研究者、企業経営者、自治体関係者、地域金融機関関係者、博物館関係者等を対象とした。

4.2. 開催概要

日時、場所、プログラムは以下の通りである。

【東京開催】

日時：2015 年 2 月 17 日　14:00-17:00

場所：株式会社富士通総研　5 階　大会議室

プログラム：

時間	実施内容
14:00-14:05	開会挨拶 環境省　総合環境政策局　環境研究技術室長　吉川　和身　氏
14:05-14:15	環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介 株式会社富士通総研　長谷川　誠
14:15-15:15	パネルディスカッション 【テーマ】 先行企業の研究開発における自然模倣技術・システムの活用事例 【モデレーター】 平坂　雅男　氏　公益社団法人高分子学会　常務理事　事務局長 【パネリスト】 下村　政嗣　氏　千歳科学技術大学　総合光科学部 バイオ・マテリアル学科　教授 中野　充　氏　株式会社豊田中央研究所　先端研究センター 先端・グローバル研究推進室 （兼）材料・プロセス 2 部　主任研究員 松浦　啓一　氏　独立行政法人国立科学博物館　名誉研究員
15:15-15:25	休　憩
15:25-16:35	バイオミメティクス・データ検索基盤の体験デモ 【データ検索基盤紹介】 長谷山　美紀　氏　北海道大学大学院　情報科学研究科　教授 【モデレーター】 平坂　雅男　氏　公益社団法人高分子学会　常務理事　事務局長 【コメンテーター】 松浦　啓一　氏　独立行政法人国立科学博物館　名誉研究員
16:35-16:55	「バイオミメティクス研究開発における持続可能性の位置づけとそのパラドックス」 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 研究主幹　阿多　誠文　氏
16:55-17:00	閉会挨拶 千歳科学技術大学　総合光科学部　バイオ・マテリアル学科 教授　下村　政嗣　氏

【滋賀開催】

日時：2015 年 2 月 24 日　14:00-17:00

場所：ラ・コリーナ近江八幡　たねや農藝

プログラム：

時間	実施内容
14:00-14:05	開会挨拶 環境省　総合環境政策局　環境研究技術室長　吉川　和身　氏
14:05-14:10	ご挨拶 近江八幡市長　冨士谷　英正　氏
14:10-14:30	「バイオミメティクスの新潮流：分子から都市設計まで」 千歳科学技術大学　総合光科学部　バイオ･マテリアル学科 教授　下村　政嗣　氏
14:30-14:40	環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介 事務局　株式会社富士通総研　長谷川　誠
14:40-15:20	「滋賀における自然共生社会の試み」 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター　センター長　内藤　正明　氏
15:20-15:30	休憩
15:30-17:00	パネルディスカッション 【テーマ】 ・滋賀県のまちづくりへの自然模倣技術・システムの活用可能性 ・持続可能な社会システム・ライフスタイルのあり方 ・持続可能な社会システム・ライフスタイルの実現に向けた取組み 等 【モデレーター】 平坂　雅男　氏　公益社団法人高分子学会　常務理事　事務局長 【パネリスト】 下村　政嗣　氏　千歳科学技術大学　総合光科学部 バイオ・マテリアル学科　教授 赤池　学　氏　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 石田　秀輝　氏　合同会社地球村研究室　代表社員 内藤　正明　氏　滋賀県琵琶湖環境科学研究センター　センター長 仁連　孝昭　氏　滋賀県立大学　副学長 NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン　理事長

4.3. 実施内容

各会場における実施内容は以下の通りである。

4.3.1. 東京開催

東京開催では、企業の研究開発者を中心に、12名の参加のもと、環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介、パネルディスカッション、バイオミメティクス・データ検索基盤の体験デモ、講演「バイオミメティクス研究開発における持続可能性の位置づけとそのパラドックス」を行った。

①環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介

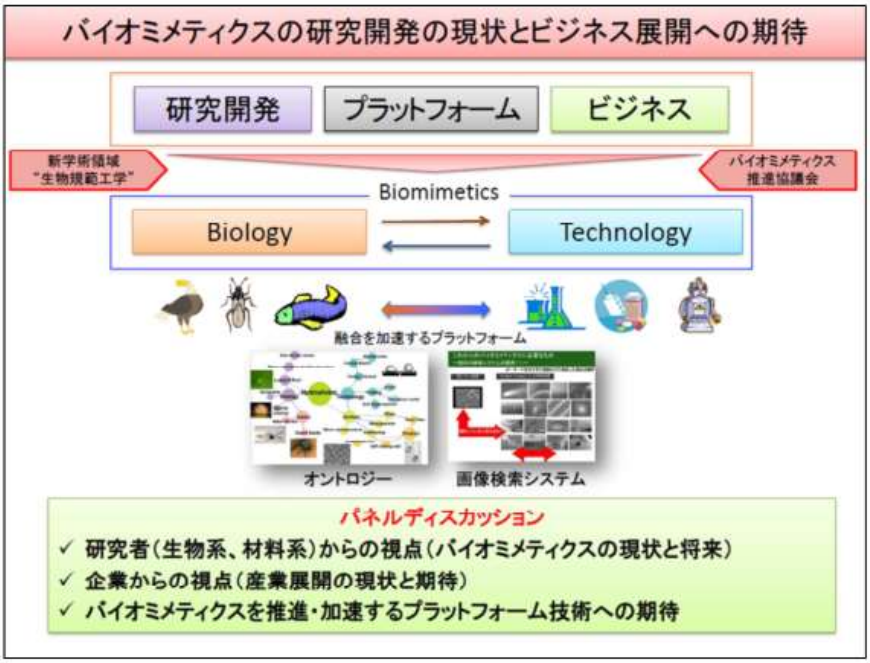
株式会社富士通総研の長谷川シニアコンサルタントにより、環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」について、昨年度および本年度業務の紹介と本ワークショップの開催の狙いの説明が行われた。

②パネルディスカッション

モデレーターとして、公益社団法人高分子学会 常務理事 事務局長の平坂雅男氏、パネリストとして、千歳科学技術大学 総合光科学部 バイオ・マテリアル学科 教授の下村政嗣氏、株式会社豊田中央研究所 先端研究センター 先端・グローバル研究推進室（兼）材料・プロセス 2 部 主任研究員の中野充氏、独立行政法人国立科学博物館 名誉研究員の松浦啓一氏を迎え、パネルディスカッションを行った。

バイオミメティクスの研究開発の現状とビジネス展開への期待をテーマに、各パネリストにより、生物学者の視点、材料科学者の視点、企業の研究開発者の視点から話題提供が行われた後、バイオミメティクスを推進・加速するプラットフォーム技術への期待等についてディスカッションが行われた。

図表 6　パネルディスカッション（東京開催）のテーマ



出所：平坂雅男氏作成

図表 7　パネルディスカッションの様子

③バイオミメティクス・データ検索基盤の体験デモ

バイオミメティクス・データ検索基盤の開発者である北海道大学大学院　情報科学研究科の長谷山美紀教授により、バイオミメティクス・データ検索基盤についての説明と体験デモが行われた。

体験デモにおいては、生物と材料という異なるものの画像であっても、表面構造が互いに類似していれば、バイオミメティクス・データ検索基盤により検索が可能であることを示す事例が紹介され、異分野の知識連携による発想支援の可能性が示された。また、参加者から事前に提供された材料の走査型電子顕微鏡（SEM）画像をクエリ画像として、参加者がバイオミメティクス・データ検索基盤を操作し、検索を体験、独立行政法人国立科学博物館の松浦名誉研究員により、生物学者の視点から、生物の SEM 画像との関連性についてコメントをいただいた。

参加者からは、環境データとの連携等によるバイオミメティクス・データ検索基盤の充実への期待や、様々な企業によるディスカッションの場の必要性、生物学者によるコメントの有用性を指摘する意見が挙がった。

図表 8　体験デモの様子

④講演「バイオミメティクス研究開発における持続可能性の位置づけとそのパラドックス」

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の阿多誠文研究主幹により、バイオミメティクスと持続可能性の関係について、我が国の環境政策・科学技術政策、OECD における持続可能な開発に関する議論、ISO における国際標準化の動向やテクノロジーアセスメント[4]の考え方を交えて、ご講演いただいた。

講演では、テクノロジーアセスメントに関して、対象とする技術が真に持続可能な社会の実現に寄与するかどうかという視点での評価や、持続可能な社会の実現のためにどのようなサービスが必要とされ、そのためにどのような技術が必要かという視点での評価がなされるべきとの意見が述べられた。

また、提言として、今後のバイオミメティクス研究開発において、環境と経済の持続発展が不可分であることを認識する必要があること、「バイオミメティクス＝持続可能」という根拠がない考え方が規格や環境規制に発展すると研究開発のリスク要因になることを理解する必要があること、研究開発と同時並行にテクノロジーアセスメントの活動を進めるべきであることが述べられた。

図表 9　講演の様子

[4] 技術のもたらす正や負の副次的影響を総合的・包括的に予見・分析することで、社会的な課題設定や政策的な意思決定の方向性を広く提示する理念や活動を指す。副次的影響には、経済、環境、倫理、法、社会、文化に及ぼす影響など広く含まれる。（参考：阿多誠文氏提供資料）

4.3.2. 滋賀開催

滋賀開催では、研究者、地元経済界トップ、行政トップ等、23 名の参加のもと、基調講演、環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介、地元研究者による講演、パネルディスカッションを行った。

開催にあたって、開催地である近江八幡市の冨士谷英正市長からご挨拶をいただいた。

①基調講演「バイオミメティクスの新潮流：分子から都市設計まで」

千歳科学技術大学 総合光科学部 バイオ・マテリアル学科 教授の下村政嗣氏にバイオミメティクスの最新動向について講演いただいた。

講演では、バイオミメティクスの活用領域が、「生態系バイオミメティクス」とも言うべき環境整備や都市設計の領域にまで及んでいること等が紹介された。

図表 10　講演の様子

②環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」の紹介

株式会社富士通総研の長谷川シニアコンサルタントにより、環境省「自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討」について、昨年度および本年度業務の紹介と本ワークショップの開催の狙いの説明が行われた。

③講演「滋賀における自然共生社会の試み」

地元研究者による講演として、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター長の内藤正明氏にご講演いただいた。

講演では、琵琶湖の現況、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターの研究内容、持続可能な社会のあり方（先端技術型社会と自然共生型社会）、びわ湖メインストリート“湖国文化圏構想”等について紹介が行われた。

また、バイオミメティクスのもつ意義に関して、生物を利用した新たな技術開発によってさらなる経済的利益を生み出すためのものという印象を受けるが、実際は、真に持続可能な社会の実現に貢献する技術システムであるとの意見が述べられた。

持続可能な社会のあり方に関しては、大量生産、消費社会、一過的廃棄を特徴とする「先端技術型社会」ではなく、適量生産、市民社会、循環・再生を特徴とする「自然共生型社会」を目指すべきであり、そのためには技術開発だけでなく、都市構造や交通などのハードももちろん、その背景をなす価値観の転換も併せて行う必要があると述べられた。また、技術開発にあたっては、社会は技術に何を要求しているか、誰のため・何のための技術であるかという議論が必要とも述べられた。

最後に、バイオミミクリーへの期待として、生き物の驚異を深く理解することで、それが持つ真の価値を認めれば、破壊的な搾取はあり得ず、生態系の中で新たな文明を作り直す（廃物・廃熱を出さない、再生可能資源のみで動く、他者との共生を基本とする）という方向性が述べられた。

図表 11　講演の様子

図表 12　先端技術型社会／自然共生型社会の特徴

	先端技術型	自然共生型
技術	規格／大量生産 ・時間効率 ・枯渇資源 ・世界共通 ・工業的生産 消費社会 ・供給側主導 ・使い捨て ・物の所有消費 一過的廃棄 ・非再生的 ・非分解的	適量／多様生産 ・資源効率 ・再生性資源 ・地域固有 ・工芸的生産 市民社会 ・利用側主導 ・高品質長寿命 ・ｻｰﾋﾞｽの利用/ﾚﾝﾀﾙ 循環・再生 ・再生的 ・自然還元的
都市	大規模工業化 大都市化 広域連携	農工バランス 都市と農村の融合 地域自立
価値観	経済効率	人々の豊かさ

出所：内藤正明氏作成

④パネルディスカッション

モデレーターとして、公益社団法人高分子学会 常務理事 事務局長の平坂雅男氏、パネリストとして、千歳科学技術大学 総合光科学部 バイオ・マテリアル学科 教授の下村政嗣氏、株式会社ユニバーサルデザイン総合研究所 代表取締役所長の赤池学氏、合同会社地球村研究室 代表社員の石田秀輝氏、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター長の内藤正明氏、滋賀県立大学副学長 NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン理事長の仁連孝昭氏を迎え、パネルディスカッションを行った。

持続可能な社会システム・ライフスタイルのあり方、滋賀のまちづくりにおける自然模倣技術・システムの活用をテーマに、各パネリストによる話題提供の後、ディスカッションが行われた。

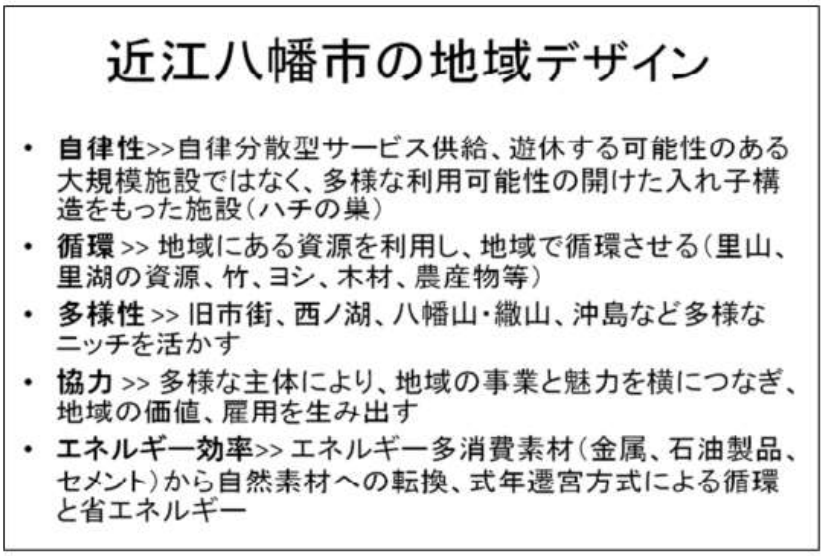
図表 13　パネルディスカッション（滋賀開催）のテーマ

出所：平坂雅男氏作成

図表 14　パネルディスカッションの様子

パネリストからの話題提供として、仁連氏からは、自然の犠牲の上に成り立っている社会から自然に適う社会への転換が必要であり、そのために、人間のライフスタイル、自然との関わり方の転換が必要との意見が述べられた。また、持続可能な地域デザインとして、自律分散型のサービス供給、地域資源利用による資源循環、各地域のもつ多様性の活用、多様な主体間での協力、省資源・省エネ化等が重要との意見が述べられた。

図表 15　持続可能な地域デザイン



出所：仁連孝昭氏作成

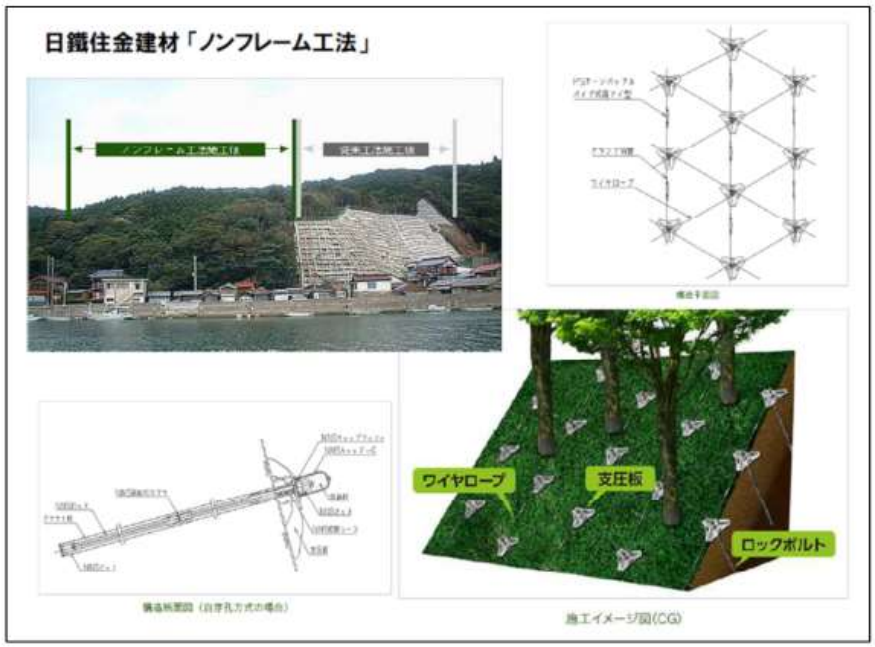
赤池氏からは、今後の社会の方向性について、物質的な豊かさを追求する人間中心の社会から、心と体の豊かさ、快適さを求めつつ自然や社会との調和を目指す方向へ変化するとの意見が述べられた。また、バイオミメティクスの活用に関して、生物の構造を模倣するだけでなく、生物のもつ優れた設計思想や生態系に学んだり、生物による生産物を利用するという方法を有機的に組み合わせていく必要があるとの意見が述べられた。

図表 16　バイオミメティクスの 4 つのフェイズ

出所：赤池学氏作成

また、生物生態系に学ぶ地域づくりの事例として、日鐵住金建材株式会社による、樹木の根系ネットワークを模倣し、自然生態系を復元する土砂崩れ防止工法「ノンフレーム工法」が紹介された。

図表 17　生態系バイオミメティクスによる環境整備の例



出所：赤池学氏作成

石田氏からは、人類史を俯瞰したときの現在の社会の位置付けとライフスタイルデザインの重要性について意見が述べられた。産業革命により 18 世紀後半から始まった近代社会は、現在、文明から文化への移行期にあり、その予兆として、人はモノの豊かさより心の豊かさを求めるようになっている。環境制約の中で心豊かな生活を送るためにはライフスタイルデザインが必要になる。また、ライフスタイルのデザインにあたって、固有の自然観をもつ日本人が世界を率先して新しい価値観をつくっていくことが重要との意見も述べられた。

ディスカッションは、日本人の自然観や、これからの社会のあり方、技術のあり方にまで及び、活発な議論が行われた。

会場からは、「地域経済界での取り組み状況として、滋賀県では琵琶湖を中心に環境と経済の両立に取り組んでいる。滋賀経済同友会では BMI（生き物に学ぶ革新的ものづくり）研究会を立ち上げ、県としての取り組みを提言しようとしており、国の支援をお願いしたい。」という意見があがった。また、「大きな方向性は理解できたが、実績が出てこないと市民に理解してもらえないため、何から順番に取り組んでいくべきかを具体化する必要がある。」という意見も挙がった。

最後に、パネリストから環境省への提言として、博物館のアウトリーチやものづくりのワークショップ、滋賀県として目指す具体的な目標の設定・共有とそこに至るシナリオ・インセンティブの検討、そのための教育、失敗してもよいからまずはアクションを起こすこととそのための生物に学ぶ拠点の形成が挙げられた。

5. まとめと提言

5.1. まとめ

昨年度業務では、今後取り組むべき施策を、以下に示す通り、短中期的な取り組みと長期的な取り組みに分けて提言している。

○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
② 地域での実証事業による成功事例の創出
③ 自然模倣技術・システムの研究の推進と体制構築

○長期的な取り組み

④ 需要サイド（利用者）への普及・啓発
⑤ 供給サイド（大学、企業）への普及、啓発
⑥ 自然模倣技術・システムの対象範囲・対象領域の拡大

各施策についての本年度の取り組み状況と成果は以下の通りである。

①については、東京開催のワークショップで、企業の研究開発者を対象に、バイオミメティクス・データ検索基盤の体験デモを実施した。ワークショップでは、環境省が保有する環境データとの連携の重要性が指摘された。東京開催のワークショップでは、バイオミメティクス研究開発における「持続可能性」の位置づけについて講演が行われ、後述するテクノロジーアセスメントの観点でも環境データとの連携が一層、重要性を増している。

②については、実証への展開を視野に、実用化に向けた技術の選定と調査を実施した。選定した技術で実証を行うには、まだ研究開発が必要な部分が多いと考えられる。一方、滋賀のワークショップでは、生物生態系に学ぶ地域づくりの事例として、樹木の根系ネットワークを模倣し、自然生態系を復元する土砂崩れ防止工法が紹介された。自然模倣技術・システムを自然生態系の保全・回復まで含めて広く捉えることで、この事例のような水系整備をテーマとした地域での実証の可能性が見出された。

③については、環境省において、2014 年 7 月の中央環境審議会意見具申「低炭素・資源循環・自然共生政策の統合的アプローチによる社会の構築　～環境・生命文明社会の創造～」において、着目すべき環境技術の一つとしてネイチャーテクノロジーが位置付けられている。また、現在、中央環境審議会において、「環境研究・環境技術開発推進戦略」の改定が審議されており、自然模倣技術・システムをこの戦略上に位置付けることが議論されているところである。

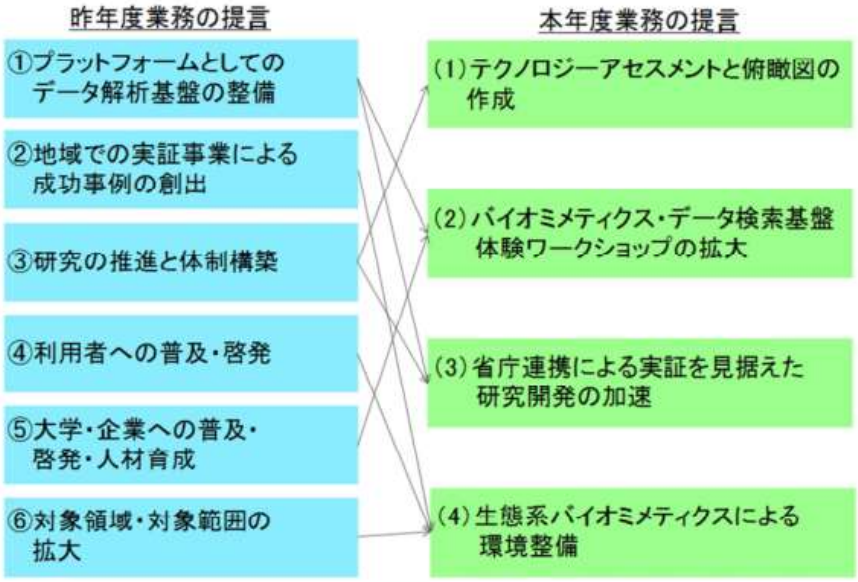
④、⑤、⑥については、自然模倣技術・システムの普及促進を目的に、東京、および、滋賀でワークショップを開催した。東京開催では、企業の研究開発者を対象にバイオミメ

ティクス・データ検索基盤の体験デモを行い、その有用性を感じていただけた。滋賀開催においては、研究者だけでなく、地域経済界トップや行政トップに出席いただき、滋賀を自然模倣技術・システム活用のモデル地域としていくことで共通認識が得られた。また、今後の取り組みポイントとして、魅力ある自然模倣技術・システムのあり方を示していくアウトリーチ活動や博物館の積極的関与が挙げられた。

5.2. 提言

昨年度業務における提言と本年度業務の調査検討結果を踏まえて、自然模倣技術・システムの活用を促進していくための施策として、以下に示す(1)～(4)が、検討会から提言された。図表 18 に昨年度業務において提言された施策と、本年度業務において提言する施策の関係を示す。

図表 18　昨年度業務の提言と本年度業務の提言の関係図



出所：株式会社富士通総研作成

(1) テクノロジーアセスメントと俯瞰図の作成

自然模倣技術・システムは、持続可能性に貢献できる技術として期待されているが、どのように貢献できるのかが明らかになっていない点が普及促進の障壁になっている

と考えられる。この障壁を取り除くためには、自然模倣技術・システムの持続可能性への寄与を評価し、明らかにするためのテクノロジーアセスメントが必要である。バイオミメティクスの国際標準化を議論している ISO/TC266 においても、2014 年 10 月に開催された第 4 回総会において、バイオミメティクスと持続可能性の関係を議論するワークアイテムが今後提案されることが決まっており、「バイオミメティクス＝持続可能性」という根拠のない考え方が国際規格や環境規制に発展することで研究開発のリスク要因となることを防ぐという点でも、その必要性が高まっていると言える。テクノロジーアセスメントの実施過程で、自然模倣技術・システムを社会実装する上での課題や対応策も具体化されると考えられ、自然模倣技術・システムの社会・産業へのインパクトを評価する際に重要になる全体像の俯瞰のためのマップ作成においても必須になるものと考える。

実施にあたっては、環境研究総合推進費等の既存の施策を活用し、後述の(4)において活用する技術等を具体的な事例として評価していくことが有効であろう。

(2) バイオミメティクス・データ検索基盤体験ワークショップの拡大

本年度、東京開催のワークショップで行ったバイオミメティクス・データ検索基盤の体験デモでは、参加者に実際にデータ検索基盤を操作していただき、有効性を感じていただくことができた。同様のワークショップを他地域へも展開していくことで、関心があるが、具体的な行動にまで至っていない企業の活用のハードルを下げることができると思われる。現在あるデータに加えて、既存の環境データも取り込んで、トライアル的に検索を行うことで、新たな発想も期待できる。また、今回のワークショップでは、生物学者にも登壇していただき、生物画像についてコメントをいただきながら進行した。このようなワークショップにより、生物学者と企業の研究開発者とのマッチングの機会を提供することで、生物多様性の活用を推進することにもつながるものと考えられる。

(3) 省庁連携による実証を見据えた研究開発の加速

構造を模倣するだけでなく、ものづくりのプロセスから生物に学ぶようなチャレンジングな技術は、まだまだ研究開発が必要であり、省庁の連携によりスピードアップを図ることが求められる。実施にあたっては、これまでのバイオミメティクスの研究開発は、各技術について個別に進められてきた傾向があるため、バイオミメティクス・データ検索基盤を横串に蓄積したデータ・知見をネットワーク化することで、プロジェクト間の連携を図ることが必要である。生物から何を学ぶのか、情報技術を駆使して、複数のプロジェクトを横断的に俯瞰することで、自然模倣技術・システムを社会実装する上で個々の技術に共通する本質的な研究課題も見えてくるのではないかと考えられる。

(4) 生態系バイオミメティクスによる環境整備

これまでのバイオミメティクスは、主に製品としての工学設計への応用を中心に、議論されてきたが、自然生態系の循環まで視野に入れた環境整備やまちづくりにも展開できる技術やデザインも台頭している。今後の取り組みが期待される地域実証においては、このような自然生態系に寄り添うバイオミメティクス工法等をモデル的に導入することで、防潮堤に代わる多面的価値を持つ減災林等の基盤整備や、農業を含めた循環型の地域コミュニティの形成にも発展していくものと考えられる。

5.3. 今後の検討課題

前項の提言に掲げた施策を実施していくにあたり、今後、検討が必要な課題を、検討会における議論等を踏まえ、以下の通り、整理した。

(1) 「自然模倣技術・システム」の概念の整理

提言(1)の「テクノロジーアセスメントと俯瞰図の作成」と関連して、議論のベースとして、「自然模倣技術・システム」の概念を整理し、定義することが必要である。テクノロジーアセスメントを行うためには、まず、「自然模倣技術・システム」とはどのような技術であるか、共通認識を図る必要がある。現在、自然模倣技術・システムと類似する概念として、ネイチャー･テクノロジー、バイオミメティクス、バイオミミクリー等が用いられているが、これらと自然模倣技術・システムは何が同じで、何が違うかを明確にする必要がある。そして、具体的にどのような技術が含まれるかを示したものが俯瞰図になる。

普及促進という観点から考えると、「バイオミメティクス」や「生物模倣技術」は技術者以外には分かりにくいとか、なじみにくいという指摘もあるため、日本発の新たな用語を考案することも、概念整理の選択肢の一つとして検討の余地があると考えられる。

(2) 産業界における注目テーマとの関連付け

自然模倣技術・システムの活用においては、社会実装の担い手である企業の参画が不可欠である。そのためには、自然模倣技術・システムが環境にやさしいだけでなく、産業に波及効果を及ぼすポテンシャルを持っているというイメージを形成していくことも重要であろう。そのためには、現在、産業界において注目を集めているテーマと自然模倣技術・システムがどのように関係付けられるかを示すことも重要である。例えば、Industry4.0[5]において自然模倣技術・システムがどのように位置付けられるのか、3D プ

[5] ドイツ政府が、科学技術イノベーション基本政策「ハイテク戦略 2020」において、「未来プロジェクト」という名のアクションプランの一つとして掲げた。もののインターネット（Internet of Things: IoT）や生産の自動化（Factory Automation）技術を駆使し、工場内外のモノやサービスと連携することで、今までにない価値や、新しいビジネスモデルの創出を狙った次世代製造業のコンセプトである。（参考：独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター「次世代製造技術の研究開発　ドイツ編」平成 27 年 1 月）

リンティング、ロボット、人工知能、高機能性材料等と自然模倣技術・システムがどのように関係付けられるかを明らかにすることができれば、自然模倣技術・システムは、持続可能な社会の実現と産業技術の発展の方向性が一致するテーマであることを具体的に示すことができると考えられる。

(3) 幸福度と連動した新しいテクノロジーとしての位置付け

自然模倣技術･システムを従来の技術と同様に応用するだけでは、環境負荷が大きくなる。これからのテクノロジーは、環境制約の中で幸福を感じられるライフスタイルを定義して、それと連動したものである必要があり、そこに、自然模倣技術・システムの新規性を提示することも可能なのではないだろうか。既に、持続可能性指標と幸福指標の関係性に関する検討は各所で行なわれているが、それらの議論も踏まえつつ、提言(1)のテクノロジーアセスメントを通じて、持続可能性だけでなく、幸福度の向上に自然模倣技術・システムがどのように貢献できるのかを示していくことが重要である。

(4) 超学際的な連携（協働）の推進

地球・人間システムの統合的理解と、人類が目指すべき未来の地球社会像の共有、そしてそれを踏まえた持続可能な社会を実現するための新たな動きとして挙げられるのが、Future Earth である。

Future Earth とは、国際科学会議（ICSU）等の学術コミュニティを中心として、ファンディング・エージェンシーや政策決定者等と協働し、気候、物質循環、生物多様性、人間活動を含め、地球の変動を包括的に理解し、地球規模課題の解決に資する研究の総合的な推進を目指す国際協働の枠組みであり、2014 年に発足している。Future Earth は、文理の壁を越えた学際的（interdisciplinary）研究による理解と知の提供だけでなく、研究者コミュニティと社会の様々なステークホルダーが様々な問題に対し共通の視点を共有する、超学際的（transdisciplinary）な連携（協働）による新たな研究設計である。すなわち、行政・政策担当者、研究資金提供者、産業界、教育関係者、メディア、市民団体といったステークホルダーが研究者コミュニティと共通の視点を共有しつつ、研究の立案の段階から成果の普及に至るまで協働してダイナミックな地球の理解、地球規模の開発、持続可能な社会への転換という３つのテーマの枠組みで研究を進め、これらの研究の統合を行うことで、問題解決に向けた新たな知の創出と統合を目指す取組みである。

自然模倣技術・システムの研究開発・社会実装においても、Future Earth において提唱されている様々なステークホルダーによる視点の共有や、超学際的な概念は、重要な示唆を与えるものである。

(5) 地域実証における目標設定とシナリオ作成

提言(4)を進めていくにあたっては、地域の企業や行政、住民の参画が重要になる。本年度、滋賀において開催したワークショップにおいては、出席した地元企業の経営者から、「自然模倣技術・システムの活用を、ただ生物に学ぶということでなく、持続可能な社会の実現という大きな方向性で捉えるべきと感じたが、では、明日から何に着手したらよいかが分からない」という意見が上がった。持続可能性という大きな話だけでなく、地域が抱える問題を解決するための目標設定と、そこに至るシナリオ作成を、地域の企業や行政、さらには住民の意見を取り入れる形で実施・展開していくことが重要である。