

領域略称名：生物規範工学
領域番号：4402

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成29年6月

領域代表者 (千歳科学技術大学・理工学部・教授・下村 政嗣)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究領域の設定目的の達成度	6
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	9
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	10
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	20
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価	28

研究組織 (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	24120001 生物多様性を規範とする革新的材料技術	平成24年度～ 平成28年度	下村 政嗣	千歳科学技術大学・理工学部・教授	21
A01 計	24120002 バイオミメティクス・データベース構築	平成24年度～ 平成28年度	野村 周平	独立行政法人国立科学博物館・動物研究部・研究主幹	9
B01 計	24120003 生物規範界面デザイン	平成24年度～ 平成28年度	大園 拓哉	国立研究開発法人産業技術総合研究所・機能化学研究部門・研究グループ長	8
B01 計	24120004 生物規範機能構造・形成プロセス	平成24年度～ 平成28年度	針山 孝彦	浜松医科大学・医学部・教授	7
B01 計	24120005 生物規範階層ダイナミクス	平成24年度～ 平成28年度	細田 奈麻絵	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・グループリーダー	6
B01 計	24120006 生物規範環境応答・制御システム	平成24年度～ 平成28年度	森 直樹	京都大学・農学研究科・教授	11
B01 計	24120007 生物規範メカニクス・システム	平成24年度～ 平成28年度	劉 浩	千葉大学・工学研究科・教授	9
C01 計	24120008 社会的インプリケーションによる生物規範工学体系化	平成24年度～ 平成28年度	石田 秀輝	東北大学・環境科学研究科・教育研究支援者	7
統括・支援・計画研究 計 8 件					
A01 公	25120501 バイオミメティクス・データベースのオープンイノベーションプラットフォームへの展開	平成25年度～ 平成26年度	有村 博紀	北海道大学・情報科学研究科・教授	1
A01 公	15H01603 鳥類の羽毛内微細構造より発生する非虹色の構造色とその発生機構の多様性	平成27年度～ 平成28年度	森本 元	山階鳥類研究所・保全研究室・研究員	1
B01 公	25120502 昆虫の聴覚器規範設計の解明	平成25年度～ 平成26年度	西野 浩史	北海道大学・電子科学研究所・助教	1
B01 公	25120503 ナノバイオミメティックRGB構造色材料の高機能化と集積化	平成25年度～ 平成26年度	金森 義明	東北大学・工学研究科・准教授	1
B01 公	25120505 生体の情報処理機構を模倣したスケーラブルな高分子デバイスの創製	平成25年度～ 平成26年度	浅川 直紀	群馬大学・理工学研究院・准教授	1
B01 公	25120506 飛行生物の翼を規範としたマルチスケール構造を持つ柔軟伸縮フィルム	平成25年度～ 平成26年度	田中 博人	千葉大学・上海交通大学 国際共同研究センター・特任助教	1
B01 公	25120507 ゴカイや繊毛虫を規範とした全方向移動型流体内推進ロボットに関する研究	平成25年度～ 平成26年度	小林 俊一	信州大学・繊維学部・教授	1
B01 公	25120508 ホヤ類の被囊の微細構造および化学的性質を規範とする新規接着・防汚染物質の開発研究	平成25年度～ 平成26年度	植木 龍也	広島大学・理学研究科・准教授	1

B01 公	25120509 ヤモリ模擬構造への材料力学的アプローチ	平成25年度～ 平成26年度	山口 哲生	九州大学・工学研究院・准教授	1
B01 公	25120510 花粉表面の構造解析と自己組織化を利用した機能性マイクロ粒子のデザイン	平成25年度～ 平成26年度	Karthus Olaf	千歳科学技術大学・光科学部・教授	1
B01 公	25120511 微粒子由来凹凸構造を利用する気液分散体の安定化	平成25年度～ 平成26年度	藤井 秀司	大阪工業大学・工学部・准教授	1
B01 公	25120512 材料科学からアプローチするバイオクレプティクス	平成25年度～ 平成26年度	出口 茂	海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・主任研究員	1
B01 公	15H01592 自己組織化による動的微細構造表面を用いた海洋付着生物の接着制御	平成27年度～ 平成28年度	室崎 喬之	旭川医科大学・医学部・助教	1
B01 公	15H01593 メラニン顆粒を模倣した黒色粒子による艶感制御を伴う単色構造色材料の開発	平成27年度～ 平成28年度	桑折 道済	千葉大学・工学研究科・助教	1
B01 公	15H01594 珪藻細胞壁の微細構造が生み出す栄養取り込み機能の解明と物質拡散制御材料への応用	平成27年度～ 平成28年度	前田 義昌	東京農工大学・工学研究院・助教	1
B01 公	15H01595 好熱菌の環状脂質分子を模倣した高分子の自己組織化による機能材料の開発	平成27年度～ 平成28年度	山本 拓矢	北海道大学・工学研究院・准教授	1
B01 公	15H01598 電子顕微鏡による生きたナノ微細構造の解析～昆虫の多様な機能をサブセルラー化する～	平成27年度～ 平成28年度	高久 康春	浜松医科大学・医学部・特任助教	1
B01 公	15H01599 セミの翅の物理的防御機構を模倣した機能性ナノデバイスの創製	平成27年度～ 平成28年度	安井 隆雄	名古屋大学・工学研究科・助教	1
B01 公	15H01600 磁性ナノ粒子を用いた人工繊毛によるメタクロナル波の発現	平成27年度～ 平成28年度	津守 不二夫	九州大学・工学研究院・准教授	1
B01 公	15H01601 白血球に学ぶ濃度駆動型水中駆動源微粒子の微細表面加工のための流体工学的研究	平成27年度～ 平成28年度	玉川 雅章	九州工業大学・生命体工学研究科・教授	1
B01 公	15H01602 応力応答性粉末状粘着剤の創出	平成27年度～ 平成28年度	藤井 秀司	大阪工業大学・工学部・准教授	1
B01 公	15H01604 海綿動物に学ぶ水輸送システム	平成27年度～ 平成28年度	椿 玲未	海洋研究開発機構・海洋生命理工学研究開発センター・研究員	1
C01 公	25120504 生物規範工学にもとづくテクノロジーが創出する経済効果の分析(廃止)	平成25年度～ 平成25年度	馬奈木 俊介	東北大学・環境科学研究科・准教授	1
C01 公	15H01597 生物規範工学に関する消費者への価値提示型対話による社会実装のための調査	平成27年度～ 平成28年度	香坂 玲	東北大学・環境科学研究科・教授	1
公募研究 計 24 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

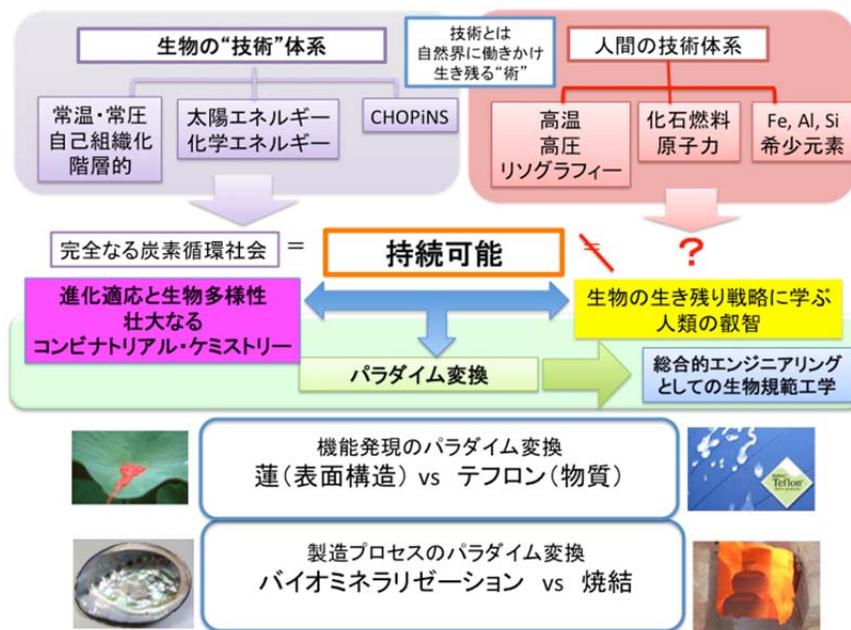
研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

本領域の目的は、「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」を創生することにある。細胞内部や表面に形成される数十 nm～数ミクロンの「サブセラー・サイズ構造」が持つ機能の解明によって「生物の技術体系」を明らかにし、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。人類の自然認識体系として本来一体のものであるべき、自然史学、生物学、農学、材料科学、機械工学、情報学、環境政策学、社会学を再架橋して、オープン・イノベーションのプラットフォームたる「バイオミメティクス・データベース」を構築するとともに、生物学と工学に通じた人材を育成する。環境政策に基づくソシエタル・インプリケーション（社会的関与）の観点から、新たな科学・技術体系としての「生物規範工学」を確立し持続可能性社会の実現に資する。

本領域が発足した背景には、産業革命以降、「人間の技術体系」が内包し解決すべき喫緊の課題である資源・エネルギーならびに環境問題を解決し、持続可能性に寄与し得る技術革新が世界的に求められている状況において、古くから知られていた生物模倣技術（バイオミメティクス）の分野に新しい研究潮流が勃興したことがある。

○ 生物多様性をもたらす持続可能なパラダイム

物理・化学の法則・原理は、自然現象の観察から導きだされたものであり、技術は、物理・化学の法則・原理に基づいて構築されるものである。「人間の技術体系」は、“鉄・アルミ・シリコン、希少元素等”を用い、“化石燃料や原子力をエネルギー源”とし、“高温・高圧プロセス”と“リソグラフィ”等の加工技術を駆使することで、エネルギーやモノを作り移動し情報や価値を生み出してきた。自然界に働きかけ利用して生き残る“術”を技術とするならば、「生物の技術体系」は、“炭素を中心とするユビキタス元素（CHOPiNS、iは無機物を総称する inorganic の意味）”を用い、“太陽光エネルギーとそれを植物が化学変換したエネルギー”を使い、“常温常圧における自己組織化プロセスによって分子・原子を積み上げた階層性”を特徴としている。二つの技術体系は、物理・化学の法則・原理に基づいているにもかかわらず、生産プロセスや機能発現のパラダイムが異なっている。例えば、蓮の葉は“テフロン”を使うことなく超撥水性を実現し、ヤモリは“ポストイット”なしで天井に張り付き歩きまわる。へビは化合物半導体を用いることなく赤外線を感知出来る。さらには、「生物の技術体系」が持続可能な「高炭素世界の完全リサイクル型技術」を可能としている背景には、「壮大なるコンビナトリアル・ケミストリー」とも称すべき進化適応のプロセスがある。長い時間をかけ、多様な環境条件下において、物理・化学の法則・原理の組み合わせを最適化することで、生産プロセスや機能発現のパラダイムが決定されたのである。



○ 異分野連携による「サブセラー・サイズ構造」の学理究明

今世紀に入り欧米を中心に、生物模倣技術が改めて注目され始めている。1930～1940年代にナイロンや面状ファスナーが発明されるなか、1950年代後半に生物学者によりバイオミメティクスの概念が提唱され、1970年代～1980年代にかけて第一世代とも言うべき Biomimetic Chemistry の勃興により「分子系バイオミメティクス」が体系化された。ロボティクスやセンサーの分野では比較的早くから「機械系バイオミメティクス」が注目されていた。そして、ここ十数年の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」とも言うべき新しい研究の潮流が展開されはじめた。

生物細胞のサイズは約 10 ミクロンであり、その表面や内部には、超分子集合体である膜・タンパク複

合体、オルガネラと称される細胞内小器官、シリア線毛やトリコーム毛状突起など数十～数百ナノメータから数ミクロンにいたる階層的なナノ・マイクロ構造があるものの、その詳細は電子顕微鏡でしか観察することができない。近年のナノテクノロジーの目覚ましい展開により電子顕微鏡が広く普及することで、分類学的には系統的なデータ収集が手薄であった「サブセラー・サイズ構造」とも呼ぶべき細胞内部や表面のナノ・マイクロ構造が明らかにされはじめた。構造と機能発現の相関性に関する自然史学・分類学からの問題提起をナノテクノロジーの視点から議論することで、生物学者は「サブセラー・サイズ構造」が有する機能発現機構を明らかにし、さらに、ナノ材料・ナノ加工の研究者は「サブセラー・サイズ構造」を人工的に模倣することで新しい材料やデバイスへの応用を図り始めている。これは、走査型電子顕微鏡の普及による「サブセラー・サイズ構造」の解明が、物理・化学的な側面から生物学を明らかにしたとともに、「材料系バイオミメティクス」とも言うべき新しい研究潮流をもたらしたことを意味している。とりわけ、欧米におけるバイオミメティクス研究中興の背景には、学術の融合を重んじる文化的風土と積極的に異分野連携を促進する科学技術政策がある。一方、我が国のバイオミメティクス研究は未だに縦割りの異分野連携が進んだ状態とは言い難く、欧米のキャッチアップ的な展開に留まった周回遅れの状況にある。生物学と工学を両輪として「サブセラー・サイズ構造」とその機能発現の背景となる「サブセラー・サイズ効果」の機構を解明し応用展開を図ることが周回遅れの状況から抜け出すために不可欠である。

○ 情報科学による生物から工学へのテクノロジー・トランスファー

本申請は、我が国が最も不得意とする異分野連携を組織的・体系的に行い、「生物の技術体系」の解明を通じて生物模倣技術ならびに自然史学・生物学研究の学術水準の強化と向上を図ることで、新たな学術領域・技術体系である「生物規範工学」を体系化する。環境・エネルギー・資源は、人間活動の現在と未来に関わる重大なキーワードであり、低炭素社会の実現は持続可能性にとって喫緊の課題であることに議論の余地はない。「生物規範工学」は、「生物の技術体系」に「人間の叡智」を組み合わせることで、「高炭素世界」の模倣がもたらす持続可能性＝「低炭素社会」を実現するパラダイムシフトである。

生物規範の基盤は生物多様性にあり、膨大な生物学データから工学的発想を導き出す必要がある。「生物学から工学への技術移転」や「工学から生物学へのフィードバック」を可能とする「発想支援型データベース」を構築することで、異分野連携を支えるオープン・イノベーション・プラットフォームが形成される。さらに、持続可能性に寄与する新産業創出のためには、体系化した技術が社会に受容されねばならない。これらを実現するためには、情報科学を駆使した生物学、工学、さらには社会科学の連携に基づく総合的な研究戦略と実施体制が必要である。本領域によって新たな学術領域が創出されるとともに、生物と工学に通じた次世代を担う人材育成にも大きく寄与することとなる。また、バイオミメティクスの国際標準化に関する提言を行い、我が国の国際競争力に資する。これにより、「知」の資産を創出するとともに、我が国の科学・技術を文化として育むことに資する。

○ 研究実施体制

総括班と3つの計画研究班を設け、班内ならびに班間の有機的な連携を図ることで目的を達成する。各班は原則として、生物系と工学系、数理系などの研究者が融合するように課題設定を行い、総括班においては研究協力者として企業研究者の積極的な参画を図る。

研究項目 A01「生物規範基盤」では、生物多様性をデータベース化することで、オープン・イノベーション・プラットフォームの基盤となる「バイオミメティクス・データベース」を構築するとともに、生物学と工学に通じた人材育成に寄与する。

研究項目 B01「生物規範設計」では、「サブセラー・サイズ構造」がもつ機能と形成プロセスを解明することによって「生物の技術体系」を明らかにするとともに、生物多様性に学ぶ材料・デバイスの戦略的設計・作製を達成する。具体的には、生物の「動き」「構造」「制御」に着目することで、持続可能性に寄与する技術革新のためのパラダイムを見出す。

研究項目 C01「生物規範社会学」では、環境政策に基づくソシエタル・インプリケーションの観点から、新たな科学・技術としての「生物規範工学」を体系化し、その産業化を図るとともに、持続可能性社会の実現と技術革新に資することを旨とする。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

研究項目 A01：生物規範基盤

A01 班における応募時の達成目標は以下のとおりである。「本研究の目的は、新たな技術を開発しようとする工学研究者が、生物の構造と機能に関する生物学研究者の知識を検索し、技術革新の着想を得ることのできるデータベースシステムを構築することである。本研究では、情報科学の技術を用いた工学と生物学のスムーズな連携を目指している。研究過程では、生物進化研究へのフィードバックも期待される。本研究が構築するデータベースは、インターネット上での運用を目指している。さらにアウトリーチ活動にも力を入れる。」さらに中間評価を受けた研究体制の見直し（H26年度）において、「発想支援型データベース」の構築と、特に「モスアイなどサブセルラー構造」への注力を明記し、より効率的、集中的な予算と人員の配置に務めた。

以上の目標設定とその後の見直しを受け、研究終了時の達成度は次の通りであった。1) 生物系小班は、昆虫、鳥類、魚類のSEM画像とテキストデータによるデータセットを、34,000件以上集積した。この中には生物のサブセルラー構造に関する情報が多く含まれている。2) 情報系小班では、1)により集積されたデータを元に、画像検索とオントロジーの連携に取り組み、オントロジー・データベースの成果を援用した画像検索システムを実現した。このシステムは当初の目的通り、インターネット上で運用され、「発想支援型データベース」としての機能を果たしつつある。3) アウトリーチ活動として、バイオミメティクスに関する企画展を国立科学博物館で開催（H28年4-6月）した他、科博以外の博物館での出展を4件行った。また、一般向けの書籍としてH28年3月に国立科学博物館叢書^⑩「生物の形や能力を利用する学問 バイオミメティクス」を出版した。

研究項目 B01-1 生物規範界面デザイン

工学部材界面の特性に関係する、生物における摩擦や抵抗の制御機構、付着機構等を「構造」、「動き」、「制御」の観点で科学的な理解を試みるとともに、そこから抽出した機能要素を基に、新しい工学的な機能材料デザインの提案が目的であった。研究開始当初は、生物機能の抽出よりも人工的なモデル凹凸構造における摩擦や抵抗の制御機構やその他の派生的応用（光拡散機能、キラルセンシング機能）について先行して研究が進んだため、2年目以降において生物規範工学としての研究体制を明確化するために、生物側からのフィードバックをより意識した研究体制への移行を行い、班間および班内での生物学と工学の連携が可能となった。その結果、ウバウオの吸着特性、マダラシミの凹凸表面の摩擦特性、フジツボ幼生の吸着特性など、生物における界面トライボロジー機構の一端が明らかとなり、そこから表面の凹凸構造、その内部の力学構造や化学特性とそれぞれの機能の相関が理解され、それらの結果と、蓄積されていた人工的モデル凹凸構造のトライボロジー特性を総合し、新しい表面機能を生み出すデザインの基盤的知識を得た。その基盤的知識に基づいて応用に至った例として、摩擦相手材とのサイズの組み合わせに応じて、摩擦力をこれまでになく大きくスイッチングできる可変凹凸表面デザインを提示できた。

研究項目 B01-2 生物規範機能構造・形成プロセス

生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスを開発するために、生物学的構造である、昆虫のモスアイ構造や構造色に焦点を当て、数学・物理・生物・化学・工学からなる異分野連携の研究チームを組織し、その機能を明らかにすることが、H24年度の目的であり、出口としては太陽電池パネルの高効率化を狙っていた。H26年度に中間評価で「生物学者と工学者そして数学者が連携した研究成果を挙げつつある」との高い評価と共に、ものづくりや工学応用と高効率太陽電池開発への明確な道筋を示すようにとの指摘を受け、1. 自己組織化的方法による高輝度表面構造の作製、2. 生物の形態形成の観察と工業化への検討、3. 生物の“厳密ではない構造がもたらす緻密な機能”の意味の解析に注力することとした。

それにより、1. 構造色の実現として、オパール粒子の3次元構造体への集積技術を拡大して表面積の

大きな高輝度材料表面作製を可能にし、2. クチクラ構造形成を生物が如何に行っているかについて、遺伝学的・形態学的実験を行い、上皮細胞の分泌物が微絨毛の配置を基盤とし、その後自己組織的に配列形成していることがわかり、3. モスアイ構造が、既に知られている反射低減効果だけでなく、超撥水性と撥水性に基づく自浄作用の効果、そして滑落に対する効果という多機能性を有していることを発見し、太陽光パネル表面に付与することで汚れや虫による汚染からも回避でき、高効率化に寄与できることがわかった。異分野の研究者の連携により、太陽電池パネルへの応用と工学応用の道筋を明らかにするという目的が達成された。加えて、生物は構造を少しだけ改変することで多機能性を産み出し、その緻密な機能は厳密ではない構造によって支えられていることがわかった。

研究項目 B01-3 生物規範階層ダイナミクス

生物のサブセラー・サイズ構造の階層性は、防汚（ナメクジや蓮の葉）、自己治癒（葉の表面）、可逆的接着性（昆虫の脚裏）など多様な機能を発現している。本研究では、生物物理・材料/表面科学の視点からそのしくみを解明し、革新的な材料開発を目指した。中間評価以降は、特にエレクトロニクス実装への応用が可能な基盤技術（可逆的接合、セルフアライメント技術、防汚/防錆性付与、自己治癒による長寿命化、放熱特性の向上など）を重点項目として位置付け研究を展開した。

接着のメカニズムの解明では、基質表面の化学的・形状的影響について具体的に明らかにした。行動解析では、ハムシが気泡を利用して水中を歩行できることを世界で初めて発見した。これらの生物学的研究は、泡を利用した水中でのセルフアライメント技術の発明へと繋がった。

メロン果実の表皮の割れを分泌液で修復するしくみ、魚の鱗の分泌液による超撥油のしくみを規範とした材料開発では、高機能・多機能性の多層膜皮膜の発明へと繋がった。開発した層状ハイブリッド皮膜は、優れた滑水性、ダメージを受けた際の自己治癒/修復、表面機能の回復、長期にわたる耐食性を実現した。ナメクジの分泌機能を模倣した自己分泌型機能材料は、防汚性のみならず、着氷防止、付着防止、超撥水性、撥液性などの表面機能を付与できることが明らかとなった。

これにより、エレクトロニクス実装への応用が可能な基盤技術として防汚・自己治癒など人工的な材料にない優れた多層膜皮膜の開発、全く新しい発想による泡を利用したセルフアライメント、可逆的な接着機構の実現などほぼ計画通り達成できた。

研究項目 B01-4 班 生物規範環境応答・制御システム

植物と昆虫・微生物の攻防（物理的・化学的シグナルの利用）、昆虫のセンシング（同種メスや仲間の認識）、環境適応機能（乾燥耐性）では、分泌器官、感覚毛や発音器における「サブセラー・サイズ」に基づく機能が巧妙に使われている。これらの制御機構を利用し、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た。中間評価以降は、特に「フェロモンブレンドの受容機構解明とそのモデル構築」と「多成分ブレンドの差分検出における感覚突起のサブセラー構造の機能」を重点項目と位置付け、研究を展開した。

その結果、2成分系フェロモンブレンドを利用するヒメアトスカシバから各成分に特異的に応答する性フェロモン受容体を同定した。特に、触角における各受容体の発現細胞の割合がフェロモンブレンドの構成比率と類似する傾向を示すことを見出し、2成分系検出機構の基礎知見を得た。また、クロオオアリ嗅覚受容体遺伝子を網羅的に同定した。アリは、複合成分で構成される匂いパターンを差をもとに仲間と非仲間を識別しており、この差分検出には内部神経間の相互連絡を制御するサブセラー構造が重要な役割を担っていた。また、領域内の公募班や B01-3 班と連携により、昆虫における振動に対する感受性を特定し、さらに振動を用いて害虫の行動を阻害する低環境負荷型の植物保護法を開発し、試作機によってその効果を実証した。さらに、ネムリユスリカ培養細胞の常温保存法は確立した。

このように、「低環境負荷型植物保護法の確立」、「フェロモンブレンドの受容機構解明とそのモデル構築」、「多成分ブレンドの差分検出における感覚突起のサブセラー構造の機能解明」、「細胞の常温保存方法の確立」をほぼ計画通り達成できた。

研究項目 B01-5 生物規範メカニクス・システム

生物の「動き」に及ぼす「サブセルラー・サイズ」効果を、メカニクスの立場から、単一細胞のレベルと昆虫のレベルで検討し、マイクロメカニクスとマクロメカニクスの機能を統合的に解明することで、生物規範材料「メカノバイオマテリアル」の創製と、昆虫羽ばたき飛行の統合的力学・生物学モデルの構築及び生物規範飛行システムのバイオミメティクスの研究開発を目指した。下記の4つの研究項目を中心に、研究を展開した。

1) 生物マルチスケール・メカニクス・システム：細胞、魚類、昆虫や鳥類など生物の運動の“波動性”と“流動性”に対して、横波と縦波のエネルギー変換率を表す波動エネルギー数を導入した結果、生物運動の最適化は、最大機械効率より最小移動コストで統一的に説明することが可能であり、新しい学理「生物マルチスケール・メカニクス」の創出への道筋を示した。

2) 生物規範細胞マイクロメカニクス・システム：細胞運動の制御と力覚検知メカニズムのメカノバイオミメティクス研究を重点的に実施し、(1)生体組織の曲率を感知する細胞運動の発見、(2)非一様な弾性場を運動する細胞には牽引応力の顕著なゆらぎが発生する“細胞運動波”の実証、(3)アクティブタッチ仮説の検証とアクティブタッチを担うMSチャネルの同定、(4)アクティブタッチ・システムによる重力感知などを実施し細胞運動の制御と力覚検知のロバストネスを確認した。とくにiPS細胞のフィーダーフリー分散培養の新しい技術開発による増殖率の大幅な改善と、宇宙実験による細胞の微小重力環境感知機構の解明がほぼ計画通り達成できた。

3) 生物規範飛行マクロメカニクス・システム：昆虫規範飛行システムの飛行力学・制御・最適化の生物飛行統合力学シミュレータを構築するとともに、昆虫飛行、小型飛行ロボット、小型風車専用の超低速風洞とDPIV流体計測システムの開発に成功した。さらに昆虫羽ばたき飛行の能動的・受動的原理の解明（柔軟翼の空力性能や安定性と乱流中の飛行安定性や制御）、飛行制御に関する神経系、筋骨格系、羽ばたき運動、空気力の発生など全過程への統合的解析・理解：神経・筋・骨格モデルの構築、フクロウ翼セレーション構造のトレードオフ原理（形態多様性、空力性能、静音性）、昆虫羽ばたき飛行における「動的力学ロバストネス」原理の解明などを実施した。とくに生物羽ばたき翼の運動・形態・変形・制御に関するロバストネス原理への総合的な解明は計画以上の大きな成果である。

4) バイオミメティクス・デザイン：(1)生物柔軟翼の受動的変形を規範とした柔軟伸縮皺フィルム人工翼と2枚翼ハチドリ規範型飛行ロボット、(2)鳥翼を規範としたロバストな高空力性能・低騒音性の小型風車やドローン用ロータなどの社会実装可能な技術開発に成功した。

研究項目 C01：生物規範社会学

持続可能な社会に必要なライフスタイル(ニーズ)を、オントロジーを駆使して行為と方法に置き換えることで、「未来の技術要素」を抽出し、B01班のサブセルラー・サイズ構造材料研究の成果を含むA班のバイオミメティクス・データベース研究の成果(シーズ)とマッチングさせ、人と地球を考えたパラダイムシフトを実現するためのテクノロジー創出システムを構築する。

多様なライフスタイルからニーズを見つけるためにオントロジー工学を応用し、生活シーンの中で述べられている行為を目的とその達成方式に分解、あるいは抽象度を上げた概念として抽出し、「行為分解木」として生活シーンを記述可能となった。

これにより、心豊かなライフスタイルを表現する標準語彙の集約(233語彙)を行うことができ、これにニーズとシーズのマッチングが効果的に行う手法論が構築できた。

これまでに蓄積した改善悪化に関するデータベース、TRIZ40の原理に関するデータベース、BioTRIZに関するデータベース、バイオミメティクスに基づく特許に関するデータベースを統合して、セレンディピティ指向のオープンデータ検索システムを開発でき、さらにA01, B01班と連携し、検索システムを活用して実際の社会ニーズの実証実験を行うことができた。これにより、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、サブセルラー・サイズ構造材料研究の成果を含むバイオミメティクス・データベース研究の成果をシーズとして、これら両者をマッチングさせ、人と地球を考えたテクノロジーのパラダイムシフトのためのテクノロジー創出システムを構築するという目的が達成された。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

問題点1 太陽電池の効率化

当初は、色素増感型太陽電池に昆虫複眼様表面構造と魚眼タペータム様反射機能を導入することで集光効率の向上を目指した新規構造の設計を計画したが、シリコン表面モスアイ構造の無反射性評価は行ったものの、電池材料、表面材料、反射材料の3要素材料のマッチングに手間取った。

問題点1に対する対策 バイオミメティック表面の多機能性利用と班間連携

中間評価における指摘も勘案し、限られた期間内においてバイオミメティック材料の有効性を明らかにするためには、既存の太陽光パネルにおける問題点の解決を図ることにも大きな意義があるとの視点に基づき、各要素がもたらす効率向上の実証を行うこととした。まずは表面材料に集中することとし、モスアイ構造が有する多機能性の一つである低摩擦性に基づく滑落性、分泌系バイオミメティクスに基づく防汚性に着目し、既存の太陽光パネル表面の防汚、着氷雪防止による発電効率向上を行うべく、計画研究 B01-2 と B01-3 との班間連携による寒冷地におけるフィールドワークを中心とした検証実験を行った。その結果、分泌系バイオミメティクスである温度応答性離漿材料 SLUG で表面処理した太陽光パネルの着雪防止機能を見出した。

組織変更とその効果について 生物マルチスケールメカニクス研究の強化

計画研究間の有機的な連携によって生物マルチスケールメカニクス研究を強化するために、計画研究 A01 班に所属する鳥類研究者の山崎剛史を計画研究 B01-5 班に移した。これにより、研究項目 B01-5 においては生物学、機械工学、細胞工学の異分野連携体制が強化され、とりわけ鳥の飛翔の機構解明がより一層進展した。一方、研究項目 A01 においては、公募研究班である山科鳥類研究所の森本元との連携により鳥類データ収集に支障をきたすこともなく、更には、千葉大学の桑折道済（公募研究班）との連携を図ることで、鳥の羽毛に学ぶ構造色材料の研究が大きく進展した。

組織変更とその効果について 生物付着を抑制する防汚材料の開発の強化

領域発足時の計画研究 B01-1 班は、材料工学系の若手研究者を主たる構成員としていたため、生物学側からのアプローチが不十分であった。海洋付着生物を専門とする電力中央研究所の野方靖行を研究分担者に迎え、更には、公募研究班である旭川医科大学の室崎喬之との連携を図ることで、海洋性付着生物の実験装置開発、フジツボ幼生の接着特性の新しい評価法などに著しい進展があった。

組織変更とその効果について 自己組織化実装におけるセルフアライメントの原理確認

計画研究 B01-3 班では、昆虫の附節がサブセルラー・サイズ構造である毛状構造（セタ）によって可逆的な接着を可能とすることに着目し、DNA（核酸）の分子認識機能を模倣した自己組織化的な接合を組み合わせることで、セルフアライメント型エレクトロニクス実装の技術開発を行う予定であり、領域発足時において人工核酸の権威である東北大学の和田健彦、DNA ナノテクノロジーに詳しい北海道大学の居城邦治を研究分担者とする研究組織とした。しかし、ボトムアップ・ナノテクノロジーに基づく接合と位置決めを可能とする実装基板の加工技術には課題が多く、研究期間内にセルフアライメントの原理確認を行うためにはトップダウン・ナノテクノロジーによる実装基板の加工が有効であると判断し、表面微細加工の手法に熟知している北海道大学の松尾保孝を研究分担者とする組織変更を行った。その結果、撥水性の微細毛によって保持された空気泡を介した接着機構を用いることで、水中でのセルフアライメント実装が可能であることを示した。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

・『研究対象が広いため総括的で具体性に欠けることから、中心となる到達点が明らかでなく、融合研究の結果どのような成果が出るのか分りにくい。また、個々の技術シーズが非常に多様であり、極めて多岐にわたる分野の研究者から構成されるため、研究に求心力が生まれにくい可能性が危惧される。』

サブセルラー・サイズ構造を中核とする生物の「動き」「構造」「制御」の解明を通じて、“自己組織化によって形成される“厳密ではない構造”が、緻密で多様な機能を備えかつ構造的擾乱やゆらぎに影響を受け難い“ロバストネス”とも言うべき機能安定性を有する“ことが「生物の技術体系」の背景にあるパラダイムの指導原理であるとの共通認識のもとで、計画研究並びに公募研究班における連携を図ることで我が国のバイオミメティクス研究の求心力を維持した。

・『さらに、総括班の組織と企業の研究者の関係について説明が十分ではないが、応用分野を研究計画に含めることも考えられる。』

総括班の産学連携グループを中核にしたバイオミメティクス推進協議会を設立し、高分子学会やナノテクノロジー推進協議会等の関連学協会の協力も得ながら、プラットフォームである「バイオミメティクス・データベース」ならびに検索システムの検証を通じてニーズオリエンテッドなテクノロジー創出を図った。

・『研究項目Cについては役割が明確でなく、国際標準化、サイエンスコミュニケーションなどの言葉はあるが、それを実質的に担う研究者が含まれるよう留意する必要がある。』

研究項目A01のオントロジー技術を導入するとともに、研究項目B01で得られた成果をBioTRIZに適用することで社会ニーズと技術シーズの関連付けに成功した。国際標準化については領域全体で対応することとし、研究期間内に3件の国際標準が発行した。またサイエンスコミュニケーションとして、博物館、科学館等における企画展示や定期的な市民セミナーを開催した。

<中間評価で指摘を受けた事項への対応状況>

平成26年6月に提出した中間評価報告書に対し、複合領域委員会から『中間評価報告書等による事前評価を行った結果、個別説明の必要ありと判断された計画研究がある』との通知を受けたが、文科省に問い合わせても書面審査での質問事項内容に関する伝達は無く、中間評価に係るヒアリングでは採択時の審査結果への対応を中心に発表をしたところ、「書面審査での質問に答えていない」と問われ「質問事項は伝えられていない」と答えるしかなかった。その結果、“分類学的には系統的なデータ収集が手薄であった「サブセルラー・サイズ構造」のデータベース化が本領域の展開に不可欠である”ことが研究計画書に明記してあるにもかかわらず、『活動自体が国立科学博物館としての本務との域を脱しておらず、領域全体への貢献を明確に示す必要がある。(研究項目A01への所見から抜粋)』などの事実誤認とも思われるような所見もあり、結果としては『本研究領域の中心的研究を確立させた領域計画書の再提出、およびそれに基づいた計画研究の再編成が必要であり、次年度における進捗状況の確認を要する。』との評価となった。中間評価においては、研究課題の集中、班間連携強化、テクノロジー創出の仕組み、組織のスリム化、公募研究の活用などの指摘を受けており、以下に、領域が受けた主要なコメントと対応策を記載する。

・生命の自己組織的な機構を応用する学理には未だ程遠い。

自己組織化によって形成される“好い加減な構造”が持つ多機能性や柔軟性、フェイルセーフ機構などの“ロバストネス”とも言うべき“機能安定性”が、生物の「動き」「構造」「制御」の解明を通じて得られたバイオミメティクスの指導的パラダイムであるとの共通認識に至った。

・3つの研究項目が集約せず、領域の最終目標が明確でない。

・高効率太陽電池開発、核酸の分子認識に基づくバイオミメティックな実装技術、生物マルチスケールメカニクス、などエビデンスや学理が明確ではない。

総括班主導において、研究項目 A01 で構築したデータベースと画像検索システムに基づく“画像検討会”と、生きた状態での生体観察法である“ナノスーツ法 (NanoSuit®法)”の実習普及を開催し、班間連携を促進する場を設定する。さらに班間連携による領域全体の研究課題として、(1) 生物付着を抑制する防汚材料の開発 (計画研究 B01-1 班を中核に A01、B01-3、B01-5、公募研究班)、(2) 無反射性と防汚性を併せ持つ光学材料による太陽電池の性能向上 (計画研究 B01-2 班を中核に A01、B01-1、B01-3)、(3) セルフアライメント型エレクトロニクス実装技術の開発 (計画研究 B01-3 班を中核に A01、公募研究班)、を選択することで応用研究の目標を明確にした。特に課題 (3) については研究組織の大きな変更をおこなった。また、研究項目 B01-5 班における「生物飛行マクロメカニクス」研究の推進強化を図るために A01 班から鳥類の専門家を移籍した。さらに、研究項目 B01-4 における「サブセラー・サイズ構造」の学理的課題である「ガ類のフェロモンブレンド受容機構」研究の結果を工学へ技術移転するために、B01-2 班との連携により数理科学的解析を開始した。

・テクノロジー創出にかかわるモチベーション維持や開発にかかわる実際の手続き、コミュニケーション、目利きなどを補助する人材の確保が必要である。

研究項目 C01 においては、社会ニーズと技術シーズの関連付けに A01 のオントロジー技術を導入するとともに、6つの自治体内 (秋田市、北上市、豊岡市、志摩市、沖永良部島 (知名町、和泊町)) に東北大学古川研究室分室を設置し、バックキャスト思考によるライフスタイルデザインを行い、将来ニーズを明確にするための人材育成を地域の自治体職員、地域企業人、住民に対して開始し、長期的にテクノロジー創出システムが実際の実装される基盤を強化した。

・テクノロジー創出を実現するための各計画研究組織間の有機的な連携体制にはなっていない。分担者を含め各組織のスリム化を期待する。

・研究助成が終了した後も、開発されたテクノロジー創生システムを多くの人々が利用できる環境作りも重要である。

テクノロジー創出の仕組みを研究終了後も恒常的に維持するために、総括班に設置した産学連携グループ等を中核として「バイオミメティクス推進協議会」を組織し、国際標準化への対応、バイオミメティクス・データベースの運用、ナノスーツ法の普及、異分野連携の維持、産学連携の推進、アウトリーチ活動等、本領域の求心力として位置付け、さらに、領域終了後には NPO 法人として申請することとしバイオミメティクス・ネットワーク・ジャパンとしての基盤整備をすることとした。

<再審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

中間評価における上記指摘を受け、計画研究課題の選択集中、計画研究項目間における連携を図るために、研究組織を大幅に変更した領域計画書を提出した結果、

『観測、データベース化の博物館学的内容から、広く工学、情報へと連携した内容に改善されており、理解され易くなっている。総括班のイニシアティブが発揮され、領域代表のリーダーシップにより、中間評価時の課題への対応が一定程度認められる。特に総括班として、研究全体を総合的、目的達成型に転換しようとする努力が認められる。』

との所見を受けた。

平成27年8月の複合領域委員会主査による進捗状況確認では、

『中間評価により指摘された事項への対応が概ねなされていることが確認された。総括班がイニシアティブを発揮し、異分野の相互理解が進み、融合型研究が推進された点は評価できる。』

とされ、本事後評価を受けるに至っている。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

研究項目 A01：生物規範基盤

・ データセット（画像データ+テキストデータ）構築（計画・野村、篠原、山崎）

総数 34,000 件を超える画像データおよびテキストデータを作成した。SEM 画像約 32,300 件、デジタルマイクロスコブ画像約 60 種 866 件、X 線 CT 画像約 200 種 600 件、マルチスペクトル画像約 200 種 600 件と、約 500 分類群の生物の適応についてのテキストデータを整備した。（*National Museum of Nature and Science Monographs*, 46, 1-339 (2017), *島津評論*, 73, 9-19 (2016)）

・ 画像検索システム構築（計画・長谷山、小川）

SEM 写真の画像特徴量をもとに類似画像を検索するエンジンを開発し、インターネット上において上記データセットを基盤とする「発想支援型データベース」を構築した。（*IEICE TRANS. INF. & SYST.*, 100, 7, 1-1 (2017)）

・ オントロジーによるキーワード検索（計画・溝口、古崎）

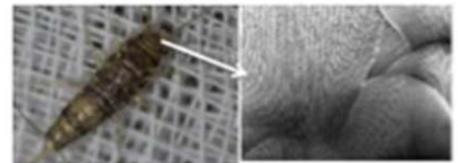
オントロジー強化型ソーラスを開発し、ニーズ側のキーワードを使ってシーズとなる生物の絞込検索を可能とした。（*人工知能学会論文誌*, 31, LOD-D_1-12 (2016)）



研究項目 B01-1 生物規範界面デザイン

・ 生物表面の摩擦力測定（計画・平井、A01 野村、長谷山、B01-2 下村との共同研究）

マダラシミの体表鱗片を場所毎に構造と摩擦力を評価し、頭部周辺の鱗片の溝周期のばらつきを発見し、これは特定サイズの凹凸に鱗片が捕捉されないための機能に関係すると推定した。（*トライボロジスト* 61, 215-221 (2016)）



・ 人工モデル凹凸（シワ）表面の開発（計画・大園）

摩擦制御デザインにおける相対サイズの重要性を見出し、人工モデル凹凸（シワ）において摩擦相手材との相対サイズに着目して調査し、摩擦を 80% 程度大きく変化できるシワ表面の開発にも至った。（*Soft Matter*, 12, 6176-6183 (2016), 特願 2016-80448, 産総研プレス 2016. 6）

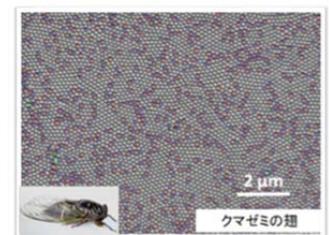
・ フジツボ幼生の付着前行動（公募・室崎、計画・野方との共同研究）

海中防汚機能表面開発のための基盤として、微細構造表面におけるフジツボのキプリス幼生の付着前行動を観察し、防付着性の材料デザインに有益な新規知見を得た。（*日本マリンエンジニアリング学会誌*, 52, 14-18 (2017)）

研究項目 B01-2 生物規範機能構造・形成プロセス

・ “厳密ではない構造がもたらす緻密な機能”を実現し、かつ多機能性を保有（計画・吉岡、下村、久保、石井、針山、不動寺、木村）

モスアイなどの自己組織化サブセルラー・サイズ構造が、相当の構造ゆらぎがあっても高い機能を示すことを電子顕微鏡を用いた構造解析やボロノイ分割などの数学的解析によって明らかにし、構造のロバストネスと多機能性を明らかにした。（投稿準備中）

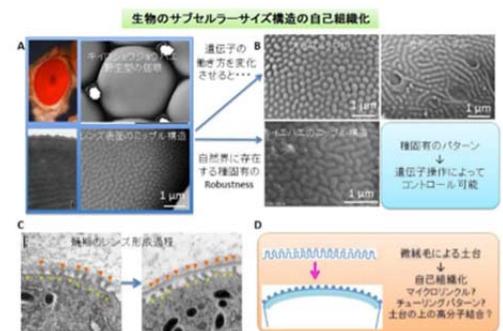


・ 生物のサブセルラー・サイズ構造の自己組織化による形態形成過程解明（計画・木村、針山）

ショウジョウバエを用いた遺伝子操作実験により、遺伝子とその産物によって細胞外分泌物の集積が制御されていることがわかり、細胞外物質が自己組織的にパターン化されることが強く示唆された。（*Zool. Sci.*, 33, 583-591 (2016)）

・ タマムシを模倣した自己組織化構造色材料作製（計画・不動寺・針山）

タマムシをマスターピースとしてレプリカを作製し、自己組織的にブラック反射構造を形成するコロイド粒子懸濁液に浸漬してタマムシの表面構造を作製可能とし、また 3 次元構造体への集積技術を拡大して表面積の大き



な材料表面に適応可能とした。このレプリカを野外に置くことで、タマムシが種内コミュニケーションに構造色を用いていることを証明した。(A. F. Tジャーナル, 58, 1 (2015)、成形加工, 29, 86-89 (2017))

・ NanoSuit®法の医学的展開 (公募・高久、計画・針山、石井、下村との共同研究)

生きたままで昆虫などの生物の微細構造の観察を可能とする NanoSuit®法を用いて、細胞や組織を濡れたままの状態を観察できることがわかった。(R. Soc. Open Sci., 4, 160887, 1-9 (2017))

・ 羽毛を模倣した構造発色 (公募・桑折、計画・B01-2 吉岡との共同研究)

メラニン顆粒を模倣したポリドーパミン粒子を用いた構造色材料の発色制御に成功した。(Langmuir, 33, 3824-3830 (2017))

研究項目 B01-3 生物規範階層ダイナミクス

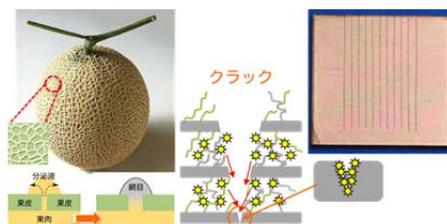
・ 生物の分泌機能を模倣した多機能性表面の開発 (計画・穂積、浦田)

ナメクジの分泌機能を模倣した自己分泌型機能材料を開発し、環境に応じて分泌を制御することで、防汚、着氷雪防止、付着防止、超撥水性、撥液性など多様な表面機能を付与できることが明らかとなった。(J. Mater. Chem. A, 3, 12626-12630 (2015))



・ メロンの補修機能を模倣した自己修復ハイブリッド皮膜の開発 (計画・穂積、浦田)

層状構造を有する透明ハイブリッド膜の層間に防錆材である TTA を高濃度で挿入することにより、1) ダメージを受けた箇所の自己補修/修復、2) 表面機能が低下した場合、最表面層の剥離、除去による表面機能の回復、3) 層間に導入されたトリルトリアゾール分子による長期にわたる防錆機能維持を実現した。(J Nanosci. Nanotechnol., 16, 9166-9172 (2016). ACS Appl. Mater. Interfaces, 5, 154-163 (2013))



・ 「泡」を利用して水中を歩く昆虫が契機—クリーンな水中接着への応用— (計画・細田)

ハムシが気泡を利用して水中を歩行できることを世界で初めて発見した。水中での気泡と剛毛の役割を明らかにし、特に疎水性表面状では陸上と同じように歩行でき、親水性表面上での水中歩行は低下することを明らかにした。この結果が、泡を利用した水中接着技術開発の契機となった。(Proc. Roy. Soc. B, 279, 4236-4242 (2012))

研究項目 B01-4 班 生物規範環境応答・制御システム

・ 振動による害虫の行動制御 (計画・高梨、B01-3 細田、椿、公募・西野との共同研究)

カミキリムシ類などの害虫が、行動阻害や忌避をおこす振動を特定した。(Zool. Sci. 31, 789-794 (2014)) さらに、カメムシ類やカミキリムシ類の害虫において、脚に内在する振動受容器(弦音器官)の微細構造を明らかにした。(Cell Tissue Res., 366, 549-572 (2016)) さらに超磁歪素子を用いた加振装置を用いて、害虫の行動阻害・忌避による防除法を開発し、農薬に頼らない新しい低環境負荷型の植物保護法を發展させた(日本農業新聞(2017))。



・ クロオオアリの巣仲間識別におけるサブセラー効果 (計画・尾崎)

クロオオアリの仲間識別は、複合成分で構成されるコロニー臭の自他の差を的確に検知し判断することによって達成される。このセンサーユニットのサブセラー構造を精査すると、各神経はそれぞれ独立しているわけではなく、途中の膨らみ部分で相互に連絡しあっていることを見出した。この構造によって、複合成分における差分を検出することで自他の認識が可能になると考えられ、環境変化に柔軟かつ迅速に対応できるロバストネスが確保される。(Sci. Rep., 5, 13541 (2015)、島津評論, 73, 41-48 (2017))



研究項目 B01-5 生物規範メカニクス・システム

・ 生物飛行統合力学シミュレータの構築 (計画・劉、安藤、公募・田中との共同研究)

昆虫飛行・小型ドローン・小型風車用の超低速風洞と DPIV 流体計測システムの開発に成功した。これにより、フクロウ翼セレーション構造の空力性能と静音性のトレードオフ原理 (*Bioinspir. Biomim.*, in press (2017))、昆虫羽ばたき飛行の関節飛翔筋がもたらす外骨格の受動的変形のロバストネス (*Biol. Lett.*, 12, 20150733 (2016))、乱流中での飛行制御のロバストネス (*Phil. Trans. R. Soc. B*, 371, 20150390 (2016)) を明らかにした。

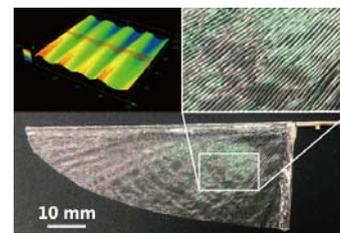


- ・ 自己組織化微小シワを持つ柔軟フィルム翼 (公募・田中、計画・劉との共同研究)

鳥の羽根のようにしなやかな柔軟性を持つ人工翼を目指して、フィルム翼面に微小なシワを規則的に配向させる製作方法を開発した。シワが無い場合に比べて、翼後縁部の過剰な変形が抑制され、推力が大きく向上した。 (*Bioinspir. Biomim.*, 10, 046005 (2015))

- ・ メカノバイオミメティクスによる細胞運動制御 (計画・木戸秋)

光リソグラフィによるゲルマトリックスのメカニカルパターンニング技術を開発・確立し、細胞運動を系統的に解析し、弾性材料上での細胞運動制御を明らかにした。 (*Biomaterials*, 41, 45-52 (2015))



●特許出願

- ・ 木戸秋 悟、内海 彩香、江藤 浩之，“人工多能性幹細胞の培養方法及び培養材料”，国立大学法人九州大学、国立大学法人京都大学，特願 2014-39524 (2014年2月28日)

研究項目 C01：生物規範社会学

- ・ オントロジー工学によるライフスタイルの明示化 (計画・古川、須藤、A0 溝口との共同研究)

ライフスタイルを行為分解木で明示化する新手法を構築し、自然界の解決策や戦前のライフスタイルとマッチングさせて、技術抽出や機能抽出を行うためのライフスタイル標準語彙 (233 語彙) を明らかにした。 (*環境科学会年会* (2016))

- ・ 生物模倣技術の最新動向と関連特許・イノベーションの分析 (公募・香坂、計画・古川、山内、小林、B01-2 石井との共同研究)

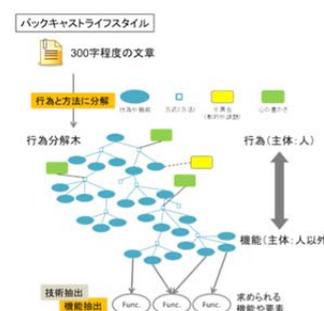
サステナビリティのための生物規範工学の構築と環境経営学との対話に向けて本領域の成果を紹介した。 (*サステナブルマネジメント*, 15, 98-112 (2016))

- ・ ネイチャーテクノロジー (計画・石田、古川)

厳しい地球環境制約の中で求められる心豊かなライフスタイルに必要なテクノロジーは生物規範型が最も有力であることを解説。 (“Nature Technology – Creating a Fresh Approach to Technology and Lifestyle”, Springer (2013))

- ・ 生物の不思議を工学に移転する技術- BioTRIZ (計画・山内、小林)

技術矛盾を見つけることで、求められる機能や要素を実現するような技術シーズを自然界から探索する方法である BioTRIZ の実際と有効性を論じた。 (*PEN*, 4, 13-18 (2013), *PEN*, 5, 9-12 (2014))



公募研究

- ・ 海綿の水路解析 (公募・椿)

X線マイクロCTを使い海綿の水路網を観察し、輸送機能におけるフェイルセーフ性の背景を見出した。 (*島津評論*, 73, 21-28 (2016))

- ・ リキッドマーブルの光制御 (公募・藤井)

アブラムシの甘露を模倣したリキッドマーブルからの物質放出を光制御した。 (*Adv. Funct. Mater.* 26, 3199-3206 (2016))

- ・ 界面活性剤としてのポリドーパミン粒子 (公募・桑折、公募・藤井の共同研究)

油水界面の安定剤としてポリドーパミン粒子を用いることでエマルジョンを作成した (*Polymers*, 8, 62-77 (2016))。

- ・ 羽毛を模倣した構造発色 (公募・桑折、公募・森本との共同研究)

メラニン顆粒を模倣したポリドーパミン粒子を用いた構造色材料の発色制御に成功した。 (*Sci. Rep.*, 6, 33984 (2016))

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

研究項目 A01：生物規範基盤

- ◎▲*M. Haseyama, T. Ogawa, S. Takahashi, S. Nomura, M. Shimomura, “Biomimetics Image Retrieval Platform”, *IEICE TRANS. INF. & SYST.*, 100, 1-1 (2017)
- ▲*T. Ogawa, A. Takahashi, M. Haseyama, “Classifying Insects from SEM Images Based on Optimal Classifier Selection and D-S Evidence Theory”, *IEICE Transactions. Fundamentals*, 99, 1971-1980 (2016)
- ◎▲下村政嗣, 平井悠司, 奥田直人, 町田龍一郎, 野村周平, 大原昌宏, 長谷山美紀, “生物表面の摩擦—自己組織化によるバイオミメティクス—”, *トライボロジスト*, 61, 215-221 (2016)
- ◎▲*野村周平, 斉藤一哉, 北川一敬, “コガネムシ上科における後翅前縁微細構造の形態比較”, *さやばねニューシリーズ*, 39-47 (2016)
- ◎▲*中瀬悠太, 野村周平, 枝廣雅美, 榎引敬嗣, “昆虫の内部構造観察のための X 線マイクロ CT”, *昆虫ニューシリーズ*, 19, 1-6 (2016)
- ▲榎引敬嗣*, 枝廣雅美, 野村周平, 中瀬悠太, 篠原現人, “マイクロフォーカス X 線 CT による昆虫および魚類の構造観察”, *島津評論*, 73, 9-19 (2016)
- ▲*古崎晃司, 來村徳信, 溝口理一郎, “生物規範工学オントロジーと Linked Data に基づくキーワード探索”, *人工知能学会論文誌*, 31, LOD-D_1-12 (2016)
- ▲*長谷山美紀, “生物顕微鏡像から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”, *タクサ：日本動物分類学会誌*, 38, 22-25 (2015)
- ◎*長谷山美紀, 野村周平, “第5節バイオミメティクスのデータベース化”, *生物模倣技術と新材料・新製品開発への応用*, *技術情報協会*, 683-692 (2014)
- 【アウトリーチ活動】野村周平, 篠原現人, 国立科学博物館 企画展『生き物に学びくらしに活かす—博物館とバイオミメティクス』, 東京 (2016年4月19日-6月12日)
- 【書籍出版】篠原現人, 野村周平 (編集), “生物の形や能力を利用する学問バイオミメティクス”, 東海大学出版部, 153 pp. (2016)

研究項目 B01-1 生物規範界面デザイン

- ▲K. Suzuki, *T. Ohzono, “Wrinkles on a textile-embedded elastomer surface with highly variable friction”, *Soft Matter*, 12, 6176-6183 (2016)
産総研 HP : http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2016/nr20160624/nr20160624.html
- ◎▲C. K. Roy, H. Guo, T. L. Sun, A. B. Ihsan, T. Kurokawa, M. Takahata, T. Nonoyama, T. Nakajima, *J. P. Gong, “Self-Adjustable Adhesion of Polyampholyte Hydrogels”, *Advanced Materials*, 27, 7344-7348 (2015)
- ▲K. Suzuki, Y. Hirai, M. Shimomura, *T. Ohzono, “Tunable Friction Through Microwrinkle Formation on a Reinforced Rubber Surface”, *Tribology Letters*, 60, 1-6 (2015)
- ▲K. Suzuki, Y. Hirai, *T. Ohzono “Oscillating Friction on Shape-Tunable Wrinkles”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6, 10121-10131 (2014)
- ▲*T. Ohzono, T. Yamamoto, J. Fukuda, “A liquid crystalline chirality balance for vapours”, *Nature Communications*, 5, 3735-3735 (2014)
- ▲*T. Ohzono, Y. Hirai, K. Suzuki, M. Shimomura, N. Uchida, “Reinforced shape-tunable microwrinkles formed on a porous-film-embedded elastomer surface”, *Soft Matter*, 10, 7165-7169 (2014)
- ▲*T. Ohzono, K. Suzuki, T. Yamaguchi, N. Fukuda, “Tunable Optical Diffuser Based on Deformable Wrinkles”, *Advanced Optical Materials*, 1, 374-380 (2013)
- ▲S. Yashima, N. Takase, *T. Kurokawa, *J. P. Gong, “Friction of Hydrogels with Controlled

研究項目 B01-2 生物規範機能構造・形成プロセス

- 1) ◎▲M. Iwata, M. Teshima, T. Seki, *S. Yoshioka, *Y. Takeoka, “Bio-Inspired Bright Structurally Coloured Colloidal Amorphous Array Enhanced by Controlling Thickness and Black Background”, *Advanced Materials*, 29, 1605050 (2017) in press
- 2) ◎▲Y. Takaku, H. Suzuki, H. Kawasaki, I. Ohta, D. Ishii, S. Hirakawa, T. Tsutsui, H. Matsumoto, S. Takehara, C. Nakane, K. Sakaida, C. Suzuki, Y. Muranaka, H. Kikuchi, H. Konno, M. Shimomura, *T. Hariyama, “Modified ‘NanoSuit®’ Preserves Wet Samples in High Vacuum: Direct Observations on Cells and Tissues in Field-Emission Scanning Electron Microscopy”, *R. Soc. Open Sci.*, 4, 160887 (2017)
- 3) ◎▲不動寺浩, “光学フィルムに関するバイオミメティクス”, *成形加工*, 29, 86–89 (2017)
- 4) ◎▲K. Muto, S. Ito, *D. Ishii, “Liquid Transport in Bio-Inspired Capillary-Driven Open-Air Channels”, *MRS Advances*, 2(19–20), 1111–1116 (2017)
- 5) ▲R. Minami, C. Sato, Y. Yamahama, H. Kubo, T. Hariyama, *K. Kimura, “An RNAi Screen for Genes involved in Nanoscale Protrusion Formation on Corneal Lens in *Drosophila melanogaster*”, *Zool. Sci.*, 33, 583–591 (2016)
- 6) ◎*M. A. Giraldo, S. Yoshioka, C. Liu, D. Stavenga, “Coloration Mechanisms and Phylogeny of Morpho Butterflies”, *J. Experiment. Biol.*, 219, 3936–3944 (2016)
- 7) ◎▲D. Ishii, H. Yamasaki, R. Uozumi, *E. Hirose, “Does the Kinorhynch have a Hydrophobic Body Surface? Measurement of the Wettability of a Meiobenthic Metazoan”, *R. Soc. open sci.*, 3, 160512 (2016)
- 8) ◎▲S. Ito, *D. Ishii, “Overwritable Liquid Selective Open Channel”, *Surf. Interf. Anal.*, 48, 1199–1202 (2016)
- 9) ▲T. Hariyama and Y. Takaku, “Dressing Living Organisms in the NanoSuit for FE-SEM Observation”, *JEOL News*, 50, 1–10 (2015)
- 10) 【アウトリーチ活動】針山孝彦 ほか, 浜松科学館 夏休み特別展「生き物から学ぼう!展」および記念講演会, 浜松市 (2016年7月16日–8月31日)

研究項目 B01-3 生物規範階層ダイナミクス

- 1) ▲M. W. England, C. Urata, G. J. Dunderdale, M. Yagihashi, *A. Hozumi, “Bio-Inspired Layered Hybrid Films Showing Long-Lasting Corrosion Resistance and Repeatable Regeneration of Surface Hydrophobicity”, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 16, 9166–9172 (2016).
- 2) C. Urata, M. W. England, T. Sato, *A. Hozumi (基調講演), “Bio-Inspired Smart Surfaces Showing Anti-X Properties”, The 3rd International Conference on Bioinspired and Biobased Chemistry & Materials 2016年10月17日 Nice, France
- 3) ▲C. Urata, G. J. Dunderdale, M. W. England, *A. Hozumi, “Self-Lubricating Organogels (SLUGs) with Exceptional Syneresis-Induced Anti-Sticking Properties Against Viscous Emulsions and Ices”, *J. Mater. Chem. A*, 3, 12626–12630 (2015).
- 4) N. Hosoda (基調講演), “Development of biomimetic underwater adhesion learning from a beetle”, Joint international symposium on “Nature-inspired Technology”, Sapporo, Japan (2014年2月13日)
- 5) ▲B. Masheder, C. Urata, D. F. Cheng, *A. Hozumi, “Novel Transparent Zirconium-Based Hybrid Material with Multilayered Nanostructures: Studies of Surface Dewettability Toward Alkane Liquids”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 154–163 (2013).
- 6) ◎*N. Hosoda, “The mechanisms of organisms as eco-materials design tools”, J. Kauffman, K.-M. Lee (eds), *Handbook of Sustainable Engineering*, Springer, 1249–1261 (2013)
- 7) 【アウトリーチ活動】細田奈麻絵, 高梨琢磨, 椿玲未, 不動寺浩, 下村政嗣, 齋藤彰, 劉浩, 針山孝彦, 石井大祐, 平井悠司, 田中博人, “バイオミメティクス—生物はナノテクノロジーのアイデアの宝庫”, サイエンスアゴラ, 日本科学未来館 (2013年11月9–10日)
- 8) ◎*N. Hosoda, S. N. Gorb, “Underwater Locomotion in a Terrestrial Beetle: Combination of Surface De-wetting and Capillary Forces”, *Proc. Roy. Soc. B*, 279, 4236–4242 (2012)

研究項目 B01-4 班 生物規範環境応答・制御システム

- 1) ▲R. Nakata, Y. Kimura, K. Aoki, N. Yoshinaga, M. Teraishi, Y. Okumoto, A. Huffaker E. A. Schmelz, *N. Mori, “Inducible De Novo Biosynthesis of Isoflavonoids in Soybean Leaves By Spodoptera *Litura* (Lepidoptera: Noctuidae) Derived Elicitors: Tracer Techniques Aided by High Resolution

- LCMS” , *J. Chem Ecol.*, 42, 1226–1236 (2016)
- 2) ◎*T. Takanashi, M. Fukaya, K. Nakamuta, N. Skals, H. Nishino, “Substrate Vibrations Mediate Behavioral Responses via Femoral Chordotonal Organs in a Cerambycid Beetle” , *Zool. Lett.*, 2, 18 (2016)
 - 3) ◎▲*H. Nishino, H. Mukai, T. Takanashi “Chordotonal Organs in Hemipteran Insects: Unique Peripheral Structures but Conserved Central Organization Revealed by Comparative Neuroanatomy” , *Cell Tissue Res.* 366, 549–572 (2016)
 - 4) 尾崎まみこ、竹市祐介、坂井健朗、枝廣雅美、”アリ型センサによる化学環境情報管理 “、島津評論、73, 41–48(2016)
 - 5) ▲M.K. Hojo, K. Ishii, M. Sakura, K. Yamaguchi, S. Shigenobu, M. Ozaki, “Antennal RNA-sequencing analysis reveals evolutionary aspects of chemosensory proteins in the carpenter ant *Camponotus japonicus*” , *Sci. Rep.*, 5, 13541 doi:10.1038/srep13541 (2015)
 - 6) ▲T. Yokoo, R. Takata, J. Yan, F. Matsumoto, M. Teraishi, Y. Okumoto, G. Jander, *N. Mori, “Identification of β -Phenylalanine as a Non-Protein Amino Acid in Cultivated Rice, *Oryza Sativa*” , *Commun. Integr. Biol.*, e1086045 (2015)
 - 7) ▲T. Aboshi, M. Ishida, K. Matsushita, Y. Hirano, R. Nishida, *N. Mori, “Stage-Specific Quercetin Sulfation in the Gut of *Mythimna Separata* Larvae (Lepidoptera, Noctuidae)” , *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 78, 38–40 (2014)
 - 8) ▲N. Yoshinaga, H. Abe, S. Morita, T. Yoshida, T. Aboshi, M. Fukui, J. H. Tumlinson, *N. Mori, “Plant Volatile Eliciting Facs in Lepidopteran Caterpillars, Fruit Fly, and Crickets: a Convergent Evolution or Phylogenetic Inheritance?” , *Front. Physiol.*, 5, 00121 (2014)
 - 9) ▲*N. Yoshinaga, C. Ishikawa, I. Seidl-Adams, E. Bosak, T. Aboshi, J. H. Tumlinson, N. Mori, “N-(18-Hydroxylinolenoyl)-L-Glutamine, a Newly Discovered Analog of Volicitin in *Manduca Sexta* and its Elicitor Activity in Plants” , *J. Chem. Ecol.*, 40, 484–490 (2014)
 - 10) ▲S. Murakami, R. Nakata, T. Aboshi, N. Yoshinaga, M. Teraishi, Y. Okumoto, A. Ishihara, H. Morisaka, A. Huffaker, E. A. Schemelz, *N. Mori, “Insect-induced Daidzein, Formononetin and their Conjugates in Soybean Leaves” , *Metabolites*, 4, 532–546 (2014)
 - 11) ◎▲R. Tsubaki, N. Hosoda, H. Kitajima, *T. Takanashi, “Substrate-borne vibrations induce behavioral responses of a leaf-dwelling cerambycid *Paraglenea fortunei*” , *Zool. Sci.*, 31: 789–794 (2014)
 - 12) ▲T. Aboshi, N. Shimizu, Y. Nakajima, Y. Honda, Y. Kuwahara, H. Amano, *N. Mori, “Biosynthesis of Linoleic Acid in Tyrophagus Mites (Acarina, Acaridae)” , *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 43, 991–996 (2013)

研究項目 B01-5 生物規範メカニクス・システム

- 1) ▲C. Rao, T. Ikeda, T. Nakata, *H. Liu. “Serrations can provide a novel solution to the trade-off between flow separation and force generation in owl silent flight” . *Bioinspir. Biomim.* accepted, selected for press release. (2017).
- 2) ▲*S. Ravi, *D. Kolomenskiy, T. Engels, K. Schneider, C. Wang, J. Sesterhenn, H. Liu, “Bumblebees Minimize Control Challenges by Combining Active and Passive Modes in Unsteady Winds” , *Sci. Rep.*, 6, 35043, 1–10 (2016)
- 3) ▲*H. Liu, S. Ravi, D. Kolomenskiy, H. Tanaka, “Biomechanics and Biomimetics in Insect-Inspired Flight Systems” , *Phil. Trans. R. Soc. B*, 371, 20150390 (2016). (invited)
- 4) ▲H. Tanaka, H. Okada, Y. Shimasue, *H. Liu. “Flexible flapping wings with self-organised microwrinkles” . *Bioins. Biomim.* 10(4):046005 (2015).
- 5) ▲T. Nakata and *H. Liu. “Aerodynamic performance of a hovering hawkmoth with flexible wings: a computational approach” . *Proc. R. Soc. Biol.* 279(1729), 722–731 (2012).
- 6) ▲A. Ueki, *S. Kidoaki, “Manipulation of Cell Mechanotaxis by Designing Curvature of the Elasticity Boundary on Hydrogel Matrix” , *Biomaterials*, 41, 45–52 (2015)
- 7) ▲T. Kuboki, *W. Chen, *S. Kidoaki, “Time-Dependent Migratory Behaviors in the Long-Term Studies of Fibroblast Durotaxis on a Hydrogel Substrate Fabricated with a Soft Band” , *Langmuir*, 30, 6187–6196 (2014)
- 8) ▲*N. Ando, R. Kanzaki, “Flexibility and Control of Thorax Deformation during Hawkmoth Flight” . *Biol. Lett.*, 12, 20150733 (2016)
- 9) ▲G. Ito, T. Kobayashi, Y. Takeda, *M. Sokabe, “Proteoglycan from Salmon Nasal Cartilage Promotes in Vitro Wound Healing of Fibroblast Monolayers via the CD44 Receptor” , *Biochem. Biophys. Res.*

Commun. 456, 792–798 (2015)

- 10) ▲H. Matsui, G. R. Hunt, K. Oberhofer, N. Ogihara, K. J. McGowan, K. Mithraratne, T. Yamasaki, R. D. Gray and E. Izawa. “Adaptive bill morphology for enhanced tool manipulation in New Caledonian crows”. *Sci. Rep.* 6, 22776 (2015)

研究項目 C01 : 生物規範社会学

- 1) R. Furukawa, H. Ishida, Y. Suto, M. Mitsuhashi, T. Yamauchi, H. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Fujihira, Y. Uchiyama, R. Kohsaka, “Lifestyle and Nature: Integrating Nature Technology to Sustainable Lifestyles”, Pan Stanford Publishing Pte Ltd, in press.
- 2) *石田秀輝 (監修), “自然に学ぶくらし(1), (2), (3)”, さえら書房, 各 47 p (2017) .
- 3) *石田秀輝, “光り輝く未来が沖永良部島にあった!”, ワニブックス, 255 p (2015) .
- 4) *石田秀輝、古川柳蔵, “地下資源文明から生命文明へ 人と地球を考えたあたらしいものづくりと暮らし方のか・た・ちーネイチャー・テクノロジー”, 東北大学出版会, 158p(2014).
- 5) *H. Ishida, R. Furukawa, “Nature Technology - Creating a Fresh Approach to Technology and Lifestyle”, Springer, 174p(2013).
- 6) *石田秀輝, “自然に学ぶくらし”, 小学校国語 6年生教科書, 光村図書, P180-188 (2014年検定済)
- 7) 【アウトリーチ活動】ライフスタイルデザインコンテスト, 日刊工業新聞 (2013, 2014, 2015, 2016); 未来のライフスタイルを募集し、賞を授与する活動を計画運営
- 8) 【受賞】第3回生物多様性日本アワード優秀賞(2013)「ネイチャーテクノロジー創出のシステム構築」
- 9) 【受賞】Good Design Award 2013 Best 100 (2013)「持続可能なライフスタイルデザイン手法」

公募研究

- 1) ◎▲室崎喬之、野方靖行 “微細構造表面におけるフジツボ幼生の付着前行動”、日本マリンエンジニアリング学会誌、第52巻、第1号、14-18 (2017) .
- 2) ◎▲A. Kawamura, *M. Kohri, S. Yoshioka, T. Taniguchi, K. Kishikawa, “Structural color tuning: Mixing melanin-like particles with different diameters to create neutral colors”, *Langmuir*, 33, 3824–3830 (2017).
- 3) ◎▲M. Paven, *H. Mayama, T. Sekido, H.-J. Butt, Y. Nakamura, *S. Fujii, “Light-Driven Delivery and Release of Materials Using Liquid Marbles”, *Adv. Funct. Mater.* 26, 3199–3206(2016).
- 4) ◎▲A. Kawamura, *M. Kohri, G. Morimoto, Y. Nannichi, T. Taniguchi, K. Kishikawa, “Full-color biomimetic photonic materials with iridescent and non-iridescent structural colors”, *Sci. Rep.*, 6, 33984 (2016).
- 5) ◎▲N. Nishizawa, A. Kawamura, M. Kohri, Y. Nakamura, *S. Fujii, “Polydopamine particle as a particulate emulsifier”, *Polymers*, 8, 62 (2016).
- 6) 椿玲未、枝廣雅美, “マイクロフォーカス X 線 CT システムを用いた海綿動物の水路解析”、島津評論、73, 21-28(2016)
- 7) ▲E. Baba, T. Yatsunami, Y. Tezuka, *T. Yamamoto, “Formation and Properties of Vesicles from Cyclic Amphiphilic PS-PEO Block Copolymers” *Langmuir*, 32, 10344–10349 (2016)
- 8) ▲Y. Tomikawa, T. Yamamoto, *Y. Tezuka, “Construction of Hybrid-Multicyclic Polymer Topologies Comprised of Dicyclic Structure Units by Means of an ESA-CF/Click-Linking Protocol”, *Macromolecules*, 49, 4076–4087 (2016)
- 9) ▲安井隆雄, 竹下大貴, 加地範匡, 柳田剛, 川合知二, 馬場嘉信, “細菌に対するセミの翅の物理的防御機構を模倣したナノデバイスの開発”, *昆虫と自然*, 51, 43-45(2016)
- 10) ▲F. Tsumori, H. Kawanishi, K. Kudo, T. Osada, H. Miura, “Development of three-dimensional printing system for magnetic elastomer with control of magnetic anisotropy in the structure”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 06GP18 (2016)
- 11) ▲F. Tsumori, R. Marume, A. Saijou, K. Kudo, T. Osada, H. Miura, “Metachronal wave of artificial cilia array actuated by applied magnetic field”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 06GP19 (2016)
- 12) ▲T. Hirose and M. Tamagawa, “Computational Model of a Neutrophil’s Propulsion by Concentration Gradient of Cytokine”, *Journal of Medical Imaging and Health informatics*, 46(6), 1472–1478 (2016)
- 13) ▲M. Tamagawa, T. Hirose, “Numerical Simulation of Transport Process of Cytokine Concentration on a Neutrophil Membrane to Elucidate Mechanism of Chemotaxis”, *ICIC Express Letters, Part B: Applications (An International Journal of Research and Surveys)*, 7(1), 31–37 (2016)
- 14) ▲Romaidi, T. Ueki, “Bioaccumulation of vanadium by vanadium-resistant bacteria isolated from

the intestine of *Ascidia sydneiensis samea*.” *Marine Biotech.*, 18(3), 359-371 (2016).

- 15) ▲植木龍也, 山口信雄, 紙野圭 “海産動物の接着機構の研究-接着物質の探索と応用展開-”, *オレオサイエンス*, 16(1), 511-518 (2016).
- 16) ▲*山口哲生, 赤峯彰, 澤江義則, ” ヤモリの足に学ぶトライボロジー”, *トライボロジスト*, 61, 243-248 (2016).
- 17) ◎▲*S. Fujii, S. Yusa, Y. Nakamura, “Stimuli-Responsive Liquid Marbles: Controlling Structure, Shape, Stability and Motion”, *Adv. Funct. Mater.* 26(40), 7206-7223 (2016)
- 18) ◎▲香坂玲, 藤平祥孝, 古川柳蔵, 山内健, 小林秀敏, 石井大佑, 内山愉太, ” 生物模倣技術の最新動向と関連特許・イノベーションの分析: サステナビリティのための生物規範工学の構築と環境経営学との対話に向けて”, *サステイナブルマネジメント*, 15, 98-112(2016)
- 19) ▲藤平祥孝, 内山愉太, 香坂玲, ” 生物模倣技術分野の特許出願と学術研究の動向と注目技術分野との比較: 日米欧間の地域での統計から”, *日本知財学会誌*, 13(2), 18-22(2016)
- 20) ▲*Y. Kanamori, T. Ozaki, and K. Hane, ”Fabrication of Ultrathin Color Filters for Three Primary Colors Using Guided-Mode Resonance in Silicon Subwavelength Gratings”, *Optical Review*, 21(5), 723-727(2014)

総括班で企画した出版

- 1) “インスツルメンテーションの視点からみたバイオミメティクス”, シーエムシー・リサーチ, p. 308, 2016年7月
- 2) “バイオミメティクスの技術展望と産業動向”, シーエムシー出版, p. 209, 2016年6月
- 3) “今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしいバイオミメティクスの本”, 日刊工業新聞社, p. 160, 2016年3月
- 4) “生物模倣技術と新材料・新製品開発への応用”, p. 702, 技術情報協会, 2014年7月

学術誌などでの特集

成形加工 2017年4月号、表面技術 2017年3月号4月号、日本知財学会誌 2016年12月号、島津評論 2016年9月、化学経済 2016年8月号、工業材料 2015年8月号、月刊機能材料 2015年7月号、日本動物分類学会誌 2015年2月号、OHM2015年01月号、化学工学 2014年6月号、工業材料 2013年11月号、「高分子論文集」2013年5月、月刊事業構想 2013年4月号、表面技術 2013年1月号、

総括班が主催したシンポジウム

国際シンポジウム

International Symposium on Engineering Neo-biomimetics シリーズ、2012年神戸, 2014年札幌, 2015年京都, 2017年東京)

Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS) シリーズ、2012年から毎年名古屋にて開催
2014年10月16日、” Biomimetics meets Museum: French-German-Japan Workshop on Mariage d’ Histoire Naturelle et Nanotechnology”, パリ国立自然史博物館

国内講演会 (全体会議併設公開講演会を除く)

2013年3月16日、公開講演会 “生物模倣技術 (バイオミメティクス) がもたらす技術革新と博物館の役割”、日本科学未来館

2016年6月6日、国立科学博物館企画展「生き物に学び、暮らしに活かす 博物館とバイオミメティクス」併設講演会、国立科学博物館

2012年10月2日、公開講演会ならびに “生物規範工学: 自己組織化とソフト界面と生物多様性” 公開ワークショップ、国立科学博物館

学会におけるセッション企画、展示

日本化学会アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP) で、バイオミメティクスのセッションを第93春季年会～第97春季年会まで企画。

第65回高分子討論会、第64回高分子学会年次大会、第63回高分子討論会、第60回 高分子夏季大学、第58回高分子夏季大学、においてバイオミメティクスのセッションを企画。

第72回昆虫学会、第67回コロイドおよび界面化学討論会、第59回日本応用動物昆虫学会、第23回日本MRS年次大会、第3回第4回島津新素材セミナー(2015)、においてバイオミメティクスのセッションを企画。

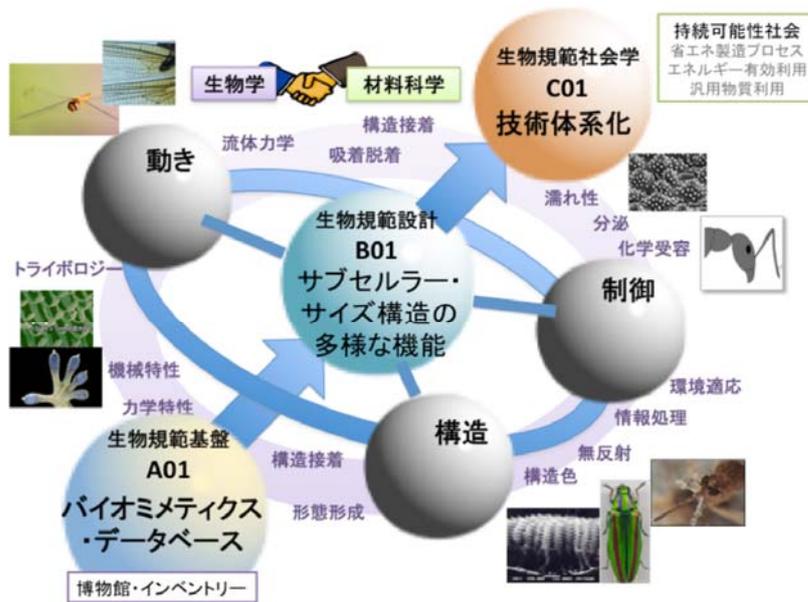
国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 nano tech 2016, nano tech 2017 (東京) に Biomimetics Network Japan ブースを出展。TECHBizEXPO 2014 (名古屋) に出展。

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

<基本的な研究組織>

本領域の目的は、自然史学・生物学と工学の融合により「生物の技術体系」の解明と模倣を行い、環境政策・技術ガバナンスの指針のもとに、異分野における産学連携と「持続可能性」に資する「生物規範工学」を体系化することを通じて、生物と工学に通じた次世代を担う人材育成を行うことにある。総括班と3つの計画研究班（7つの研究項目）は、班間ならびに公募研究班との有機的な連携を図ることで目的を達成する。各研究項目は原則として、生物系と工学系、数理系などの研究者が融合するように課題設定を行う。総括班は研究実施グループ（班長）、内部評価グループ、産学連携グループと事務局で構成し、単なる連絡調整組織ではなく、女性・若手研究者支援、ニュースレターの定期発行、国際シンポジウムや国内会議の企画、国際標準化への対応、関係諸学協会との連携企画、出版企画、アウトリーチ活動の企画などを通じて班間連携を促進する。



<研究項目 A01：生物規範基盤>

国立科学博物館などが収蔵する生物資源インベントリーを基盤とし、分類学的には系統的に収集されてこなかったもののバイオミメティクスにとっては重要な「サブセラー・サイズ構造」に焦点をあて、さらには本研究領域の成果である構造機能相関などを追加・統合した「バイオミメティクス・データベース」を構築するとともに、オントロジー強化型シソーラスや類似画像データ解析などの検索システムを実装することでバイオミメティクス・インフォマティクスとしてのプラットフォーム化を図る。総括班で企画した画像検討会等において、研究計画班ならびに公募研究班による領域内部研究者による検証によって検索システムの最適化を図るとともに、高分子学会バイオミメティクス研究会、ナノテクノロジー・ビジネス推進協議会バイオミメティクス分科会、国際標準化（ISO Biomimetics TC266）国内審議委員会などの学協会、産業界との連携によりプラットフォームとしての検証を行った。

計画研究 B01-2 班においては、ある繊維のナノ・マイクロ構造が昆虫附節の微細毛（セタ）に酷似していることに着想を得て、抗癌剤治療による副作用で指紋を消失した患者の QOL 向上を目指した手袋を繊維メーカーと共同開発している（非公開情報）。「モスアイ構造」や「構造色」については、計画研究 B01-2 班と公募研究班の森本元ならびに桑折道済と連携し、魚類体表構造については、防汚と摩擦の観点から計画研究 B01-1 班、B01-3 班と連携し、集中的にデータを収集した。研究項目 B01-5 を強化するために、鳥類研究者の山崎剛史を計画研究 B01-5 班に移した。計画研究 C01 班と連携して、オントロジーによる機能分解手法を用いたバックキャスト法の体系的分解によって、必要な技術要素の洗い出しをする方法の提案と試行を行った。

<研究項目 B01：生物規範設計>

本研究項目は、5つの計画研究班で構成し、「サブセラー・サイズ効果」を「構造」、「動き」、「制御」

をキーワードとした融合研究の成功例を提示するとともに、研究項目 A01 へ成果をフィードバックすることでバイオミメティクス・データベースの作成に寄与する。さらに、異分野連携の成果を社会的マッチングによって技術体系化を図る研究項目 C01 との検証作業を通じて、研究成果の「持続可能性」社会の実現に向けた寄与を明確にする。

研究項目 B01-1 生物規範界面デザイン

防汚材料や低摩擦材料の開発を目標として、A01 班、B01-3 班、B01-5 班、公募研究班 室崎喬之との連携によって、ウバウオの吸着特性、マダラシミの凹凸表面の摩擦特性、フジツボ幼生の吸着特性などから、防汚性、低摩擦性をもたらす材料表面の設計指針を得ることができた。

研究項目 B01-2 生物規範機能構造・形成プロセス

無反射性と防汚性を併せ持つ光学材料による太陽電池の性能向上を図るために、B01-3 班で開発した温度応答性離漿材料 SLUG で太陽光パネルの表面を処理し着雪防止機能を見出した。公募研究班 高久康春と連携してナノスーツ法による生態観察の普及を行った。

研究項目 B01-3 生物規範階層ダイナミクス

セルフアライメント型エレクトロニクス実装技術の開発を行うにあたり、A01 班との連携により魚類の水中接着構造観察、公募研究班 前田義昌との連携による実装基板の熱特性評価を行った。昆虫の脚の接着性と振動の研究にあたり B01-4 班とクロスボーダーポスドクを雇い、異分野の融合研究を行う若手の教育を行った。

研究項目 B01-4 生物規範環境応答・制御システム

B01-4 班では、蛾とアリとでは複合臭検出機構が異なることを見出しており、それぞれの仕組みを工学へ技術移転して新たなセンサー開発のアルゴリズムを得るために、B01-2 班との連携により数理科学的解析を開始した。B01-1 班、公募研究班 高久康春との連携において、植物表面ならびに内部のナノ・マイクロ構造のナノスーツ法による観察を行った。

研究項目 B01-5 生物規範メカニクス・システム

「生物飛行マクロメカニクス」研究の推進強化を図るために A01 班から鳥類の専門家である山崎剛史を移籍した。公募研究班 田中博人との連携により、柔軟伸縮皺フィルムによる人工翼を使った羽ばたき型飛行ロボットを作製し、翼の柔軟性が飛行の安定性に寄与することを見出した。

<研究項目 C01：生物規範社会学>

研究項目 A01 との共同研究により、ライフスタイルの構造を明示化する手法としてオントロジー工学の応用を検討した。具体的な個々の生活シーンの構造を明示するために、行為を目的とそれを達成するための方式から構成されるものと捉え、生活シーンの中で述べられている行為を目的とその達成方式に分解、あるいは抽象度を上げた概念として抽出し、「行為分解木」として生活シーンを記述することが可能となり、心豊かなライフスタイルを表現する標準語彙の集約（233 語彙）を行うことができた。

さらには、研究項目 A01 で集約したオントロジー工学における機能語彙とバイオ TRIZ データベースにおける改善機能とをリンクさせて、データベースの連携化を諮った。またバイオ TRIZ データベースを活用して研究項目 B01 の研究事例の新たな応用を提示した。

公募研究班の香坂玲と共に社会的インプリケーションに関してイノベーションの観点で研究を行い、「生物模倣技術の最新動向と関連特許・イノベーションの分析～サステナビリティのための生物規範工学の構築と環境経営学との対話に向けて～」と題する共著論文（環境経営学会）を執筆した。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

設備・装置

いくつかの計画研究班において初年度に購入した実験装置のなかで、3D レーザ顕微鏡やデジタルマイクロスコープなどの顕微鏡観察用装置については、領域内における共同研究において利用されている。とりわけ総括班主導において班間連携促進を目的として設定した、研究項目 A01 で構築したデータベースと画像検索システムに基づく“画像検討会”と、新しい生態観察法である“ナノスーツ法 (NanoSuit®法)”の実習普及において、電子顕微鏡とともに効果的に使用された。

人件費・謝金

若手研究者の育成を目的として積極的にPDの採用を行った。平成25年度には、計画研究B01-4班とB01-3班の班間において、異分野連携を推し進め若手育成を図ることを目的としたクロスボーダーポスドクを雇用した。

旅費・その他

総括班においては、領域内における異分野連携の強化と情報共有化を図るために、毎年度3回の全体会議・公開講演会の定期的な開催とニュースレターの発行を行った。さらに、積極的な国際的情報発信を図るために、International Symposium on Engineering Neo-biomimetics シリーズ（シリーズIV 2012年12月10-11日 神戸、シリーズV 2014年2月12-15日 札幌、シリーズVI 2015年10月22-23日 京都、シリーズVII 2017年2月17日 東京）、Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS) シリーズ（2012年から2016年まで名古屋にて毎年開催）、ならびに、2014年10月16日にパリ国立自然史博物館において”Biomimetics meets Museum: French-German-Japan Workshop on Mariage d’ Histoire Naturelle et Nanotechnology”を開催した。さらに、国際標準化ISO TC 266 Biomimeticの国内審議委員会ならびに国際委員会に委員を派遣、2015年10月19-20日には京都において国際委員会を開催した。会議開催に関わる旅費、会場費、出版費、ホームページ維持費などの他、2016年4月19日-6月12日に国立科学博物館で開催した企画展『生き物に学びくらしに活かすー博物館とバイオミメティクス』、2014年から北海道大学総合博物館と共催のバイオミメティクス市民セミナー（毎月開催）、2016年と2017年には東京ビッグサイトで開催された国際ナノテクノロジー総合展・技術会議(nano tech 2016, nano tech 2017にBiomimetics Network Japanとしてブース展示)、などのアウトリーチ活動に予算を計上した。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
24	等温滴定型カロリメーター	GE ヘルスケア・ジャパン (株) iTC200	1	17,698,620 (12,750,600)	17,698,620 (12,750,600)	東北大学 (B01-3)
	3D レーザ顕微鏡	オリンパス LEXT OLS4000	1	9,229,500	9,229,500	東北大学 (現: 千歳科学技術大学) (B01-2)
	分光器ユニット	PTT(株)製 308PV	1	7,140,000	7,140,000	浜松医科大学 (B01-1)
	超深度マルチアングルレンズ	キーエンス社製・VHX-D510他	1	5,985,000	5,985,000	国立科学博物館 (A01)
	分光エリプソメータ	角度可変制御・大型基板 (50x50mm) 対応	1	5,950,000	5,950,000	産総研 (B01-3)
	デジタルマイクロスコープ	キーエンス社製・VHX-2000他	1	5,491,500	5,491,500	国立科学博物館 (A01)
	凍結切片作成装置	CM1850	1	3,000,000	3,000,000	神戸大学 (B01-4)
	動き解析マイクロスコープ	キーエンス製 VW-6000SP1430A	1	2,499,000	2,499,000	新潟大学 (C01)
	バッチ式・高圧ホモジナイザー	カナダ AVESTIN 社製・EmulsiFlexB15	1	2,315,250	2,315,250	北海道大学 (B01-3)
	データベース用ソフトウェア	Enterprise版 AllegroGraphライセンス	1	2,252,250	2,252,250	大阪大学 (A01)
	温調ステージ	INTEC, TS62	1	1,562,400	1,562,400	産総研 (B01-2)
	He-Cd レーザーヘッド	IK431R-D	1	1,299,900	1,299,900	東北大学 (B01-4)
	イメージング分光器	Aperture ratio f/6.5	1	1,298,850	1,298,850	東北大学 (B01-4)
25	直線摺動型摩擦試験器	トライボギア TYPE38	1	2,760,345	2,760,345	工学院大学 (B01-2)
	微小力・微小面積接着強度測定装置製作	偏当り防止タイプ	1	2,350,000	2,350,000	物材機構 (B01-3)
	UV オブジェクトクリーナー	Plus PC 450	1	1,556,100	1,556,100	千歳科技大 (B01-2)
26	モノクロ高速度 CMOS カメラ	DITECT HAS-L2M	1	739,800	739,800	大阪大学 (B01-1)
27	ネオオスミウムコーター	Neoc-Pro	1	2,688,120	2,688,120	東京理科大学 (B01-1)
	上面観測ユニット	A110/210	1	1,242,000	1,242,000	名古屋工業大学 (B01-1)
	データ取得装置	Digidata	1	1,333,000	1,333,000	東大先端科学技術研究センター (B01-4)
28	レーザードップラー振動計	電子技研工業(株)製 V100-S 型	1	1,695,600	1,695,600	東京理科大学 (B01-1)

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成24年度】

・旅費

1. ISMC2013 会議（イタリア、ローマ、2012/09/15～2012/09/19）に参加（千歳⇔ローマの交通費、宿泊費、日当）518,400円 B01-1 班
2. 新学術領域「生物規範工学」発足記念公開講演会（2012年10月、東京）有識者の旅費 500,000円 総括班
3. 生物規範工学全体会議及び公開講演会（2013年3月、札幌）有識者の旅費 400,000円 総括班

・人件費・謝金

1. 技術補助員の雇用 2,200,000円 B01-3 班

・その他

1. 生物規範工学 ウェブサイト制作他 1,400,000円 総括班
2. News Letter 印刷・製本 300,000円 総括班

【平成25年度】

・旅費

1. Joint Symposium of "International Symposium on Neo-Biomimetic Engineering V" and ISNIT 2014（2014年2月、札幌）外国人講演者、有識者の旅費 1,600,000円 総括班
2. SPIE Smart Structures（アメリカ、サンディエゴ、2014/03/8～2014/03/13）に参加（千歳⇔サンディエゴの交通費、宿泊費、日当）360,770円 B01-1 班
3. ゴードン会議 Adhesion（アメリカ、サウスハドリーMA、2013/07/13～2013/07/19）に参加（札幌⇔サウスハドリーの交通費、宿泊費、日当）351,714円 B01-1 班
4. 生物規範工学全体会議・JAMSTEC 合同講演会（2013年7月、沖縄）有識者の旅費 300,000円 総括班

・人件費・謝金

1. ポスドクの雇用 6,307,464円 B01-4 班
2. ポスドク（産総研特別研究員）の雇用 4,813,014円 B01-1 班
3. 研究支援者（北海道大学）の雇用 1,849,301円 B01-1 班
4. 技術補助員の雇用 1,600,000円 B01-3 班

・その他

1. 2014年2月札幌国際シンポジウムでのホームページ制作、要旨集 1,100,000円 総括班
2. 2013年7月沖縄全体会議での会場利用料 450,000円 総括班
3. 生物規範工学 ウェブサイト設定および保守 260,000円 B01-3 班

【平成26年度】

・旅費

1. 生物規範工学全体会議・JAMSTEC 合同講演会（2014年11月、沖縄）有識者の旅費 500,000円 総括班
2. 17th ICMCF satellite symposium 2nd Current Topics on Barnacle Biology（シンガポール、シンガポール、2014/07/6～2014/07/12）に参加（我孫子⇔シンガポールの交通費、宿泊費、日当）319,950円 B01-1 班
3. 生物規範工学全体会議（2014年7月、札幌）有識者の旅費 300,000円 総括班
4. 環境省との合同ワークショップ（2015年3月、札幌）有識者の旅費 300,000円 総括班
5. ゴードン会議 Chemical Oscillations（スペイン、ギローナ、2014/07/13～2014/07/19）に参加（つくば⇔ギローナの交通費、宿泊費、日当）264,510円 B01-1 班

・人件費・謝金

1. ポスドクの雇用 6,307,464円 B01-4 班
2. 特任研究員の雇用（4月～11月） 4,975,474円 B01-2 班
3. ポスドク（産総研特別研究員）の雇用 4,789,588円 B01-1 班
4. 技術補助員の雇用 1,800,000円 B01-3 班
5. 事務補助員の雇用 600,000円 総括班

・その他

1. 生物規範工学 ウェブサイト保守 280,000円 総括班

【平成27年度】

・旅費

1. 環太平洋国際化学会議 2015 (アメリカ、ホノルル) に参加 (新潟⇄ホノルル交通費、宿泊費) 1,534,140円 C01班
2. 生物規範工学全体会議・JAMSTEC 合同講演会 (2016年3月、沖縄) 有識者の旅費 1,000,000円 総括班
3. フィレンツェ大学 (イタリア、フィレンツェ) にて研究打ち合わせ・実験ほか (浜松⇄フィレンツェの旅費、宿泊費) 817,880円 B01-2班
4. 生物規範工学全体会議 (2015年7月、札幌) 有識者の旅費 500,000円 総括班
5. ISOに関する会議 (フランス、パリ、2015/06/6~2015/06/13) に参加 (千歳⇄パリの交通費、宿泊費、日当) 484,957円 B01-1班
6. Engineering Neo-Biomimetics VI and Satellite Workshop at Lake Biwa (2015年10月、京都・滋賀) 有識者の旅費 300,000円 総括班
7. PacifiChem2015 (アメリカ、ホノルル、2015/12/15~2015/12/22) に参加 (札幌⇄ホノルルの交通費、宿泊費、日当) 290,701円 B01-1班
8. SPIE Optics + Photonics (アメリカ、サンディエゴ) 旅費 280,000円 B01-3班
9. Pacificchem2015 (アメリカ、ハワイ) 旅費 200,000円 B01-3班

・人件費・謝金

1. ポスドクの雇用 6,307,464円 B01-4
2. ポスドク (産総研特別研究員) の雇用 4,743,712円 B01-1班
3. 班事務補助員の雇用 3,200,000円 総括班

・その他

1. Engineering Neo-Biomimetics VI and Satellite Workshop at Lake Biwa 要旨集 700,000円 総括班
2. 生物規範工学 ウェブサイト保守 280,000円 B01-3班

【平成28年度】

・旅費

1. ISO-TC266 Biomimetics (ドイツ・ベルリン) 3名旅費 1,200,000円 総括班
2. フィレンツェ大学 (イタリア、フィレンツェ) にて研究打ち合わせ・実験ほか (浜松⇄フィレンツェの旅費、宿泊費) 700,330円 B01-2班
3. 生物規範工学公開講演会・全体会議 (2016年8月、札幌) 有識者の旅費 500,000円 総括班
4. 生物規範工学公開講演会・全体会議 (2016年11月、滋賀) 有識者の旅費 300,000円 総括班
5. ICOMF16, LB16 (フィンランド、ヘルシンキ) 旅費 250,000円 B01-3班
6. IMID2016:16th International Meeting on Information Display (韓国、チェジュ、2016/08/122~2016/08/25) に参加 (つくば⇄チェジュの交通費、宿泊費、日当) 128,136円 B01-1班

・人件費・謝金

1. ポスドクの雇用 6,307,464円 B01-4班
2. 事務補助員の雇用 2,800,000円 総括班
3. ポスドク (産総研特別研究員) の雇用 1,154,967円 B01-1班

・その他

1. 生物規範工学 ウェブサイト保守 280,000円 B01-3班

(3) 最終年度 (平成28年度) の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

該当なし

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

1. 当該学問分野と関連学問分野への波及効果

「生物規範工学」が発足した背景には、産業革命以降、“人間の技術体系”が内包し解決すべき喫緊の課題である資源・エネルギーならびに環境問題を解決し、持続可能性に寄与し得る技術革新が世界的に求められている状況において、古くから知られていた生物模倣技術（バイオミメティクス）の分野に新しい研究潮流が勃興したことがある。ヨーロッパを中心にしたバイオミメティクス・ルネサンスとも称すべき新しい研究潮流は、生物学、とりわけ分類学や形態学、自然史学の発見を契機として、ナノテクノロジー、材料科学、機械工学、建築学、都市工学、情報学、農学、海洋学、環境学、社会学、経済学など様々な分野に速やかに波及し、新しい学術領域としてのバイオミメティクスとなった。そして、各国においては異分野連携促進のための産官学連携コンソーシアムが組織され、産業化における指針となる国際標準化が発効するに至っている。このような世界状況において発足した「生物規範工学」は、バイオミメティクスを基盤として持続可能性に資する技術革新をもたらすためには、生物系自然科学と工学系技術ならびに社会系科学の有機的な連携が不可欠であり、膨大な情報である生物多様性から工学への技術移転を行うためには情報学によるデータ検索と発想支援が有効である、との戦略に基づく領域運営を行った。その結果、我が国初の異分野研究者ネットワークを構築するとともに、生物学のさらなる展開がバイオミメティクスの指導原理をもたらすとの結論に至った。

「生物規範工学」における重要な成果の一つに、蛾の複眼やセミの翅などの生物表面に見られるナノニップル構造が、反射防止・低摩擦・超撥水・防汚性など、複数の優れた機能を有することを明らかにしたことが挙げられる。さらに、数理科学的な解析の結果、ナノニップル構造の規則性が生物種によって大きく異なるにも拘らず、その機能性には大きな差がないことが明らかとなり、“厳密ではない構造がしめす緻密な機能”、即ち、生物機能発現の根幹には“自己組織化構造が有する多機能性とロバストネス（しなやかな強靭さ）”があることを明らかにした。さらに本領域で見出された、“蛾とアリの複合臭検出機構の相違”や“柔軟伸縮皺翼による羽ばたき安定性”も、“自己組織化構造が有する多機能性とロバストネス”の発現であり、これらの発見は、厳密な作り込みをしなくても十分な機能発現があり、さらにはフェイルセーフ機構をも有する材料やシステムが可能であることを示唆するものであり、持続可能性に資する工学指針を示すものである。この考え方は、材料系バイオミメティクスに限ることではなく、生態系バイオミメティクスと称すべき新しい研究トレンドにおいて、持続可能な建築や都市設計にも寄与するものである。

2. 実務・社会への波及効果

「生物規範工学」においては、異分野連携の促進、産官学連携のプラットフォーム構築、バイオミメティクスに関する国際標準化の提案ならびに審議、研究成果のアウトリーチ活動、などを恒常的に推進するために、公益社団法人高分子学会の協力を得てバイオミメティクス研究会を設立し、関連学協会の協力を得ながら国際標準化機構（ISO）への認証と提言を行うこととした。さらに、高分子学会と日本顕微鏡学会との学術交流を目的とした共同セッションをはじめ、日本化学会、日本昆虫学会、日本応用動物昆虫学会、など工学系ならびに生物系の学協会において、バイオミメティクスのセッションを開催するとともに、日本学術会議が主催する国立自然史博物館設立に向けた講演会等にも協力することで、生物学、とりわけ分類学や形態学、自然史学がバイオミメティクス研究をはじめとする異分野連携の中核であり、我が国における更なる展開が国際的リーダーシップにとって不可欠であることを述べてきた。また、国立科学博物館企画展「生き物に学び、くらしに活かす 博物館とバイオミメティクス」を開催し、2016年、2017年の国際ナノテクノロジー総合展・技術会議においては、ナノテクノロジー・ビジネス推進協議会等との連携で“バイオミメティクス・ネットワーク・ジャパン”を展示した。バイオミメティクスの動向は、JST 研究開発戦略センター（CRDS）やNEDOのロードマップにも取り上げられ、特許庁による特許出願技術動向調査や環境省による自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討も行われた。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

計画研究 A01 班

小川貴弘：北海道大学大学院情報科学研究科助教から准教授に昇任

計画研究 B01-1 班

鈴木航佑：産総研特別研究員から神戸大学助教に異動

平井悠司：東北大学助教から千歳科学技術大学講師に異動。日本機械学会優秀講演論文賞、日刊工業新聞社第4回ネイチャー・インダストリー・アワード

黒川孝幸：北海道大学創成科学研究機構特任助教から大学院先端生命科学研究院准教授に異動。26年度、27年度北海道大学研究総長賞・優秀賞

計画研究 B01-2 班

吉岡伸也：大阪大学助教から東京理科大学准教授に異動

石井大佑：名古屋工業大学助教から准教授に昇任。日本顕微鏡学会論文賞、真空・表面科学合同講演会技術賞

高久康春：浜松医科大学特別研究員から助教に着任。平成27年度からは公募研究代表者。第2回ネイチャー・インダストリー・アワード、日本顕微鏡学会第72回学術講演会論文賞、日本比較生理生化学会第32回大会・発表論文会長賞、2016 真空・表面科学合同講演会・技術賞

計画研究 B01-3 班と B01-4 班

椿玲未：平成25年度に班間において異分野連携を推し進め若手育成を図ることを目的としたクロスボーダーポスドクとして採用。平成26年度に海洋研究開発機構に採用。平成27年度から公募研究代表者。

計画研究 B01-4 班

北條賢：ポスドクとして採用され神戸大学の特命助教となり平成28年に関西学院大学理工学部の准教授に異動。日本比較生理生化学会吉田奨励賞

計画研究 B01-5 班

田中博人：千葉大学助教から東京工業大学准教授に異動。公募研究代表者。

室崎喬之：千歳科学技術大学ナノテクプラットフォーム研究員から旭川医科大学助教に異動。公募研究代表者。

計画研究 C01 班

須藤祐子：東北大学環境科学研究科助教から准教授に昇任

公募研究

香坂玲：金沢大学准教授から東北大学教授に異動

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

国武豊喜（九州大学・高等研究院）

本領域は、近年の物理学、化学、情報技術などの著しい発展を踏まえ、従来のバイオミメティクス（生体模倣）を超える新しい工学技術を「生体規範工学」として創出することを目的とした。その成果は生物表面のユニークな特性や昆虫のセンシング、メカニクス・システムなど、新しい研究分野の創成である。また、この領域が次世代産業の中核となることを意識し、産業プラットフォームとしての確立（国際規格ISOへの提案参加）、博物館と協力した生物試料のビッグデータ化（画像認識技術）など従来技術の枠を超えた実績を上げている。資源や環境など地球規模の課題に対応するには、本領域に見られる総合的なアプローチが必須であり、より一層の推進が望ましい。中間評価の際の残念な行き違いにも拘らず、最終的には明確な方向性を達成するに至っている。

赤池学（株式会社 ユニバーサルデザイン総合研究所・所長）

前回審査を受けた改善により、研究項目ごとに評価できる新知見が報告されている。また、そのプロセスで、若手研究者のキャリア形成を促すモデル事例が生まれたことも、本プロジェクトの大きな成果である。課題は、研究対象が広いため、生物規範工学を拡張するためのロジック構築が、総花的なものに陥りやすいことである。そのためには、応用領域を仮想的に構築した上で、基礎研究、応用技術研究、社会実装研究といったフレームで各知見を整理し、有望領域ごとのロジック構築、その民間による評価、を踏まえた「戦略マップ化」が望まれているように思う。報告書のなかで「バイオミメティクス推進協議会」の設立について触れているが、そこでは民間の参画が最も重要である。有望領域に民間研究者の参画を積極的に促すなど、社会実装に向けたセカンドステップにつながっていくことを期待したい。

亀井信一（三菱総研）

資源制約の中でエコで革新的な材料の創製を行うためには、その設計指針としてこれまでとは全く異なる設計哲学が求められている。本研究は、その解を生物の持つ多様な生産プロセス、動作原理、システム制御に求めており、極めて斬新で重要な研究領域といえる。ただし、必然的に分野横断的に幅広い研究分野の研究者の参画が求められるため、求心力を何に置くかが研究マネジメントとして重要な点であった。これに対して、「ロバストネス」という生物特有の緻密で多様、かつ柔軟な構造、機能を指導原理に据えて共通意識を持ってプロジェクトを完遂したことは素直に評価したい。また、概念先行のプロジェクトは、得てしてアカデミアにとどまった研究になりがちであるが、今後の展開も見据えて産業界まで巻き込んで「協議会」を設立し、幅広く活用できるようなプラットフォームの構築まで進められたことは、大いに評価したい。

妹尾堅一郎（NPO 産学連携推進機構・理事長／一橋大学大学院・MBA 客員教授）

この領域の産業的可能性は加速度的に拡大している。その理由は、「生物規範工学」がプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの双方の発想源泉になるからだ。その技術・システムはユニバーサルなものであるが、他方、文化的にはユニークな自然観に関わる。生物規範工学は、実は、西洋的な自然観よりむしろ東アジア的な自然観に近いのではなかろうか。生物規範を深めていくと、技術・システムだけでなく、我々が持っている価値観や思想、文学的・詩的なものまでも含めた議論に展開できそうである。自然の生態系をメタファーとして、産業の生態系、社会の生態系、思考の生態系など、いろいろな生態系を再検討できるのではないか。個体の機能構造的形態だけでなく、生物の多様な個体行動・集合行動や社会形態と運営等に学び、そこから次世代の社会やビジネスのあり方へのヒントが得られそうである。

曾我部正博（名古屋大学・大学院・医学系研究科）

本領域は、従来のバイオミメティクスをサブセルラーレベルに深化させ、生物の構造と機能に関する新しい知の獲得とその応用を目指してきた。その中核を担うB班から、組織構造のゆらぎがシステムのロバストネスやフェイルセーフに寄与する実例、及びその実用化に関する成果が出たことは評価できる。刮目

すべきは、オントロジーを共通鍵概念に据えて、生物規範工学の情報プラットフォーム構築を目指したA班、及びその社会実装を狙ったC班の存在であった。我が国では希有な野心的構想であったが、それが理解されて研究現場に浸透するには時間が足りず、見通しが甘かったと言わざるを得ない。しかし、科学者コミュニティにおける議論や展示啓蒙活動は、生物規範工学の面白さと重要性を周知させ、人々の知的好奇心を刺激し、長い目で我が国の科学技術の発展に大きく寄与したことは間違いない。

友国雅章（独立行政法人国立科学博物館・名誉館員・名誉研究員）

本領域の目的である「生物規範工学の創生」を達成するために何より重要なのは、生物学系と工学系の研究者が協働で研究を進める「異分野連携」の体制を確立することである。しかし、我が国ではこのような研究手法が普及しておらず、本領域でもこのことに関しては手探り状態で活動が開始された。そのため当初は班間、班内の連携が十分とは言えなかったが、中間評価以降はそれが強く意識され、各班の体制が強化されたため、基礎面でも応用面でも目覚ましい成果が得られた。とくに、生物学と工学の両分野に通じた若手研究者を数多く育成できたことは高く評価できる。今後に向けては、A01班の「発想支援型データベース」の強化・活用とB01各班の研究成果の工業化など、本領域の活動で得られた「異分野連携」のノウハウを活かした社会還元を諮るための研究プロジェクトの立案が強く期待される。

平坂雅男（公益社団法人高分子学会・常務理事）

生物学者と工学者のみならず、情報科学、数学、社会学の研究者との融合が促進され、学術融合の困難さを克服した。特筆すべき成果としては、「バイオミメティクス・データベース」の構築と共に発想支援システムが組み込まれたこと、また、サブセルラー・サイズ構造の研究により、生物が保有するロバストネスによる機能安定性を見出し、物理的な解析が進んだことである。一般社会においても、「バイオミメティクス」という言葉が、NHKをはじめとするテレビ番組・報道、そして、書籍を通して広く浸透した。さらに、本領域の研究者に留まらず、博物館、大学、企業、地方経済団体を含めたバイオミメティクス・ネットワークが日本の構築されていることは、本領域の大きな成果であるといえる。

藤崎憲治（京都大学・名誉教授）

本新学術領域は、きわめてチャレンジブルな学術領域であり、そこでは材料工学やナノテクノロジーといった工学分野、自然史学や昆虫学などの生物科学分野、さらには社会科学といった異分野の融合が意図的・積極的に図られ、生物の細胞内部や表面に形成されるサブセルラー・サイズ構造の機能解明とその工学への応用において多くの成果を挙げてきたものと評価される。研究成果の一つとしてそれがしばしば多機能性を有することを解明したことはきわめて重要である。このことは生物が省エネを原理として、その形態を進化させてきたことを意味しており、生物学的にも重要であるばかりでなく、人類の持続可能性社会の実現に寄与し得る技術革新を目指す生物規範工学の更なる発展においても、きわめて有用な規範になるものと思われる。本領域の後継プロジェクトの創生を強く期待するものである。

下澤楯夫（北海道大学・名誉教授）

炭素を主とする極ありふれた元素のみで生存に必要な全ての機能的構造を常温常圧で作りに出す生物の技術を、人間の技術体系に取り込むことで持続可能性の高い社会への転換を目指した本領域の取り組みは、極めて野心的で高く評価する。しかし、数学・物理・化学・生物学に細分化された教育体系で育ち、採択時の審査意見にも無知な中間評価審査は極めて杜撰で、文科省事務方のミスと学術調査官の怠慢には目を瞑って3年目の再審査を課すという間違いを犯した。にも拘わらず本領域の注目すべき成果として、サブセルラー・サイズの構造に依拠する生物の機能を数多く明らかにし、それらの原理の解明と工学技術への転換を幾つも実現した。特に、博物館の社会的役割を収集した標本の単なる見世物小屋ではなく、Study nature not booksの基本に徹した「生物の技術の構造基盤を異分野から利用可能な情報への変換と発信」に設定し直した活動や、浜松医科大学にナノスーツ法の研究拠点が形成されたこと、などを高く評価する。