

領域略称名：ソフトロボット学
領域番号：8003

令和5年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「ソフトロボット学の創成：機電・物質・生体情報の有機的融合」

領域設定期間

平成30年度～令和4年度

令和5年6月

領域代表者 東京工業大学・工学院・教授・鈴木 康一

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	7
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6 研究目的の達成度及び主な成果	11
7 研究発表の状況	16
8 研究組織の連携体制	21
9 研究費の使用状況	22
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

研究組織

(令和5年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	18H05465 ソフトロボット学の総括	平成30年度 ～ 令和4年度	鈴木 康一	東京工業大学・工学院・教授	10
A01 計	18H05466 弾性連続体の動的ふるまいの解明 とバイオメカニクス融合	平成30年度 ～ 令和4年度	新山 龍馬	明治大学・理工学部・講師	5
A01 計	18H05467 生物の自己改変能力を実装するバ イオソフトロボティクス	平成30年度 ～ 令和4年度	清水 正宏	大阪大学・大学院基礎工学 研究科・准教授	2
A01 計	18H05468 微細構造を活用した生物のやわら かい飛翔と遊泳の原理解明と実装	平成30年度 ～ 令和4年度	田中 博人	東京工業大学・工学院・准教 授	3
A02 計	18H05469 微細構造を活用した生物のやわら かい飛翔と遊泳の原理解明と実装	平成30年度 ～ 令和4年度	福田 憲二郎	理化学研究所・開拓研究本 部・染谷薄膜素子研究室・専 任研究員	2
A02 計	18H05470 イオン交換膜が実現するソフトロ ボットのモーションコントロール	平成30年度 ～ 令和4年度	鈴木 康一	東京工業大学・工学院・教授	4
A02 計	18H05471 超柔軟素材を用いた分岐・伸展ト ーラス機構を基軸とするロボット 駆動体の設計と具現化	平成30年度 ～ 令和4年度	多田隈 建二郎	東北大学・大学院情報科学 研究科・准教授	2
A03 計	18H05472 やわらかいダイナミクスとフレキ シブルセンサー技術の融合による 情報処理限界の突破	平成30年度 ～ 令和4年度	中嶋 浩平	東京大学・大学院情報理工 学系研究科・准教授	2
A03 計	18H05473 ストカスティックマシンの創成を 通じたソフトロボティクスの攻究	平成30年度 ～ 令和4年度	前田 真吾	東京工業大学・工学院機械 系・教授	2
A03 計	18H05474 コントローラブルな生物リズム・ パターンの創成	平成30年度 ～ 令和4年度	伊藤 浩史	九州大学・大学院芸術工学 研究院・准教授	2
総括班・総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
B01 公	19H05321 有機半導体単層2分子膜を用いた分子認識センサ機能の開拓	令和元年度 ～ 令和2年度	荒井 俊人	物質・材料研究機構・高分子・バイオ材料研究センター・独立研究者・主任研究員(併任)	1
B01 公	19H05322 骨格筋組織を駆動源とするバイオソフトロボットの創成	令和元年度 ～ 令和2年度	森本 雄矢	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	1
B01 公	19H05323 マイクロデバイスを用いた軸索における伝導調節機構のモデル化	令和元年度 ～ 令和2年度	榛葉 健太	東京大学・大学院工学系研究科・助教	1
B01 公	19H05324 ソフト油圧ロボティクスによるヒューマノイドの手足の実現	令和元年度 ～ 令和2年度	山本 江	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	1
B01 公	19H05326 高強度化学繊維による高耐久柔軟布の開発とソフトロボット機構への応用	令和元年度 ～ 令和2年度	遠藤 玄	東京工業大学・工学院・教授	1
B01 公	19H05328 土に還るロボット：生分解性ソフトアクチュエータの変性機序の解明と設計法の確立	令和元年度 ～ 令和2年度	新竹 純	電気通信大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	1
B01 公	19H05329 PVCゲルを用いた3次元形状制御ソフトアクチュエータの開発	令和元年度 ～ 令和2年度	橋本 稔	信州大学・繊維学部・特任教授	1
B01 公	19H05330 超高速運動の進化から探る外骨格ばねと筋肉のやわらかい統合機構	令和元年度 ～ 令和2年度	加賀谷 勝史	東京大学・情報理工学教育研究センター 次世代知能科学研究部門・特任研究員	1
B01 公	19H05332 低消費電力で大変位・高出力の限界を極める熱刺激型軽量コイルアクチュエータの開発	令和元年度 ～ 令和2年度	林 靖彦	岡山大学・大学院自然科学研究科・教授	1
B01 公	19H05334 蠕動運動による柔らかい駆動に適応した生物的創発性の高い分散型制御系の確立	令和元年度 ～ 令和2年度	中村 太郎	中央大学・理工学部・教授	1
B01 公	19H05336 自律した運動を行う生きたバイオロボットの開発	令和元年度 ～ 令和2年度	古澤 和也	福井工業大学・環境情報学部・教授	1
B01 公	19H05337 ソフトコンタクトの力学と創成	令和元年度 ～ 令和2年度	平井 慎一	立命館大学・理工学部・教授	1

B01 公	19H05338 オジギソウ搭載型植物機能利用スマートマシーン創発	令和元年度 ～ 令和2年度	田中 陽	日本サムスン株式会社・Samsung デバイスソリューションズ研究所・Senior Professional (CL3)	1
B02 公	19H05325 生殖補助医療におけるソフトロボティクスの展開	令和元年度 ～ 令和2年度	池内 真志	東京医科歯科大学・バイオデザイン分野・教授	1
B02 公	19H05327 ソフトロボットが使用者の自己身体感覚を損ねない設計・制御の許容範囲と脳科学的解釈	令和元年度 ～ 令和2年度	葭田 貴子	東京工業大学・工学院・准教授	1
B02 公	19H05333 皮膚創傷の予防・軽減機能を有した3Dゲルパッドを用いたソフト介護機器の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	宮川 祥子	慶応義塾大学・看護医療学部・准教授	1
B01 公	21H00316 ノイズで推進する柔らかいマイクロスイマーの開発	令和3年度 ～ 令和4年度	石川 拓司	東北大学・医工学研究科・教授	1
B01 公	21H00317 MotionHackingにより紐解く昆虫のしなやかな歩行制御戦略	令和3年度 ～ 令和4年度	大脇 大	東北大学・工学系研・准教授	1
B01 公	21H00318 四脚動物の肩部ハンモック構造から切り拓く即時適応的な柔剛調節メカニズム	令和3年度 ～ 令和4年度	福原 洸	東北大学・電気通信研究所・助教	1
B01 公	21H00320 タイ分子制御による高出力繊維アクチュエーターの創製	令和3年度 ～ 令和4年度	上原 宏樹	群馬大学・理工学研究科・教授	1
B01 公	21H00321 高速動作可能な骨格筋組織駆動型バイオソフトロボットの創成	令和3年度 ～ 令和4年度	森本 雄矢	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	1
B01 公	21H00323 感覚機能と運動機能を実現するバイオハイブリッド義手のための神経インタフェース	令和3年度 ～ 令和4年度	八木 透	東京工業大学・工学院機械系・教授	1
B01 公	21H00324 グリーンロボティクス：生分解性ソフトロボット要素の研究開発	令和3年度 ～ 令和4年度	新竹 純	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授	1
B01 公	21H00330 生きた組織の物質構成を変えながら弾性力を計測して『やわらかさ』の仕組みを理解する	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 正太郎	東京女子医科大学・医学部・講師	1

B01 公	21H00332 バイオリボットが自律運動を発現するきっかけの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	古澤 和也	福井工業大学・環境情報学部・教授	1
B01 公	21H00334 自励振動ゲルを用いたソフトマイクロポンプ	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 陽	日本サムスン株式会社・Samsungデバイスソリューションズ研究所・Senior Professional (CL3)	1
B01 公	21H00327 細胞が棒状機材を操作することで作るしなやかなヒレの形態形成原理	令和3年度 ～ 令和4年度	黒田 純平	大阪大学・生命機能研究科・助教	1
B02 公	21H00319 ゲル材料を用いた自己組織化光導波路の成長制御とフレキシブル光接続への展開	令和3年度 ～ 令和4年度	杉原 興浩	宇都宮大学・工学部・教授	1
B02 公	21H00322 光応答性マイクロロボットによる胚移植システムの開発	令和3年度 ～ 令和4年度	池内 真志	東京医科歯科大学・バイオデザイン分野・教授	1
B02 公	21H00329 腸管神経機能を規範とした蠕動運動型柔軟機構の食品／化学系製造プロセスへの社会展開	令和3年度 ～ 令和4年度	中村 太郎	中央大学・理工学部・教授	1
B02 公	21H00331 身体から生えてくる柔らかいアバターロボットに関するインタラクションモデルの設計	令和3年度 ～ 令和4年度	ソン ヨンア	法政大学・デザイン工学部・准教授	1
B02 公	21H00333 ウェットコンタクトの力学と粘滑物ハンドリングへの応用	令和3年度 ～ 令和4年度	平井 慎一	立命館大学・理工学部・教授	1
公募研究 計 32 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	318,890,000 円	245,300,000 円	73,590,000 円
令和元年度	308,230,000 円	237,100,000 円	71,130,000 円
令和 2 年度	308,360,000 円	237,200,000 円	71,160,000 円
令和 3 年度	305,630,000 円	235,100,000 円	70,530,000 円
令和 4 年度	305,370,000 円	234,900,000 円	70,470,000 円
合計	1,546,480,000 円	1,189,600,000 円	356,880,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

学術的背景

これまで科学技術はひたすら「パワー」と「確実性」を追い求めてきたとは言えないだろうか。パワフルで確実な動作を求めて機械も材料も「かたさ」を追求してきた。一方、21世紀に入り、機械・電子、情報処理、材料科学、等、複数の異なった分野で、生体システムが持つ「やわらかさ」を指向する新興学術が同時多発的に生まれてきた。例えば、柔軟に変形する電子回路、状況に応じてフレキシブルに反応する人工知能、時間が経つと自然に戻る生分解性プラスチックである。「かたさ」から「やわらかさ」への変化が、この10数年でいろいろな分野で勃発してきた。

これは偶然ではなく、生体・人間中心へ傾向する科学技術の大きな流れが背景にあると我々は捉えてきた。有史以来、自然の驚異や外敵から身を守り豊かな社会を築くために、パワーと確実性が科学技術の最重要目標となっていた。しかし産業革命とIT革命を経てこれらの目標はある程度達成された現在、持続可能な社会の実現へ人類の目標はシフトしつつある。「かたさ」から「やわらかさ」への大きな変化の象徴的存在として、われわれは「ソフトロボット学」を位置付けてきた。

ソフトロボットへの関心はこの10数年間に世界的に急速に高まってきた。ソフトロボットに関する学術論文数は2010年以降指数関数的に増加している。EUやUSでもソフトロボットに関する大型予算を使ったプロジェクトが行われてきた。

わが国では、古くから「やわらかさ」に関する研究が世界に先んじて進められてきた。例えば、ロボット工学ではソフトアクチュエータや柔軟メカニズム、材料分野では機能性ポリマアクチュエータやハイドロゲル、電子デバイス分野ではフレキシブルエレクトロニクスなど、世界をリードする先駆的な研究が活発に行われてきた。

本研究領域では、「やわらかさ」に関するわが国の強みと勃興する新しい学術の芽を融合し、従来の人工物・機械に関する「堅い」価値観・方法論とは大きく異なる、生体システムの価値観に基づく「しなやかで自立する人工物に関する知の体系」の創成を目指した。

本研究領域の研究目的

わが国には、各分野に「やわらかさ」に関する世界的な研究を進めるトップランナーたちがいる。本領域は、出会うはずのなかったこれら研究者を出会わせ、「やわらかさ」を目指す新興学術の種の融合を進め、それによって、従来の科学技術とは真逆とも言える価値観に立脚した大きな学術の潮流を創りだすことをめざした。従来の人工物・機械に関する「堅い」価値観・方法論とは大きく異なる、生体システムの価値観に基づく「しなやかで自立する人工物に関する知の体系」の創成を目指した。

具体的には、従来のロボット学を中心であった機械工学、電気・電子工学、情報科学に加え、材料科学、生物学を強力に巻き込むことで、従来の価値観とは真逆とも言える新しい学術の潮流を「ソフトロボット学」という形で創り上げることを目指した。新しい学術知見の創出、体系化、人材育成とともに、ソフトロボット学が秘める実用的価値も踏まえ、産業界との連携・実用化をも視野に入れた研究を行ってきた。

革新的・創造的な学術研究である点

第一は、ソフトロボット学が、従来の科学技術の価値観(力、速度、精度、効率、確実性)とは真逆の価値観に立脚している点にある。例えば、力をかけると変形するロボットアーム、同じ入力に対して違った応答をする人工知能、時間とともに形や性質が変化してしまう材料、等「やわらか、しなやか」な技術は、いずれの分野でも従来は「ダメ」な工学・科学技術であった。これに対し、ソフトロボット学では、「あいまい」、「いいかげん(無責任)」といった従来は許容できなかった特性を「適応性」、「いいかげん(良い加減)」とポジティブにとらえ、それらの積極的に活用を目指した。

本領域では E-kagen という言葉でこの考え方を提唱している。「いいかげん(無責任)」を許容、活用することにより、「良い加減」の作用を目指している。従来の「硬い」ロボット学に、それとは真逆とも言える E-kagen の技術と思想を持ち込むことにより、新しいロボット学の一領域を切り拓く大きな可能性を持った研究である点が革新的・創造的である。

第二は、広範囲にわたる強力な異分野融合研究である点である。そのために「三層異分野融合推進」等、

様々な工夫を凝らした特徴ある領域設計を行ってきた。機械・電子工学と情報科学からなる従来のロボット学に、これだけ強力に組織的に材料科学と生物学を巻き込んだ異分野融合研究例はかつてない。ロボット学に関連する学問体系自体の本質的な変革をもたらし、既存のロボット学関連の学問分野では未だ汲みつくされていない膨大な知見が開かれる。

全体構想

様々な学術領域で勃発する「やわらかさ」に関する科学の芽と人材を効果的に融合させ、世界に先んじて「ソフトロボット学」としてまとめるために、(1)三層構造異分野融合推進と(2)ボトムアップエンジン/トップダウンステアリングという施策を行った。

(1)三層構造異分野融合推進：

第1層目は課題内融合である。本領域では各計画研究課題自体を異分野の研究者が連携する形で構想し、異分野融合を強力に目指す研究課題とした。第2層は研究班内の異分野融合である。3つの研究班(A01,A02,A03)にそれぞれ3つの計画研究課題を設置し、ここに公募研究も入れて、それぞれがしなやかな身体、動き、知能を追求する異分野融合研究を推進する体制とした。

上記の第1～2層は初年度から3年目にかけて実施する。後半2年は、restructuringを行い、3つの研究班(A01,A02,A03)の活動と並行して、ソフトロボット設計学(S01)、物質学(S02)、情報学(S03)の組織を形成し、これら3つの「学」を柱とした「ソフトロボット学」の体系化を行った。これを第3層目の異分野融合と呼んでいる。

(2)「ボトムアップエンジン/トップダウンステアリング」：

本領域における研究推進の原動力は、各分野で誕生し急成長する新興学術の知見の融合によって生まれる「研究の芽」である。各研究課題からボトムアップで展開する新しい研究の芽や成果を領域推進の原動力ととらえている。一方、領域の最終目標「ソフトロボット学」の体系化には、この原動力を適切な方向にステアリングする必要がある。これは各研究班、総括班、領域全体会議での議論を踏まえ、領域代表のトップダウンで行った。

領域設定期間終了後に期待される成果

領域設定期間終了後に期待される最大の成果は「ソフトロボット学の創成と体系化」である。以下の3つの柱からなるソフトロボット学の創成と体系化を行った。

- ・ソフトロボット設計学：弾性連続体の大変形に関する動的現象の理解と生体融合
- ・ソフトロボット物質学：高機能高分子材料を基盤とした新センサと新アクチュエータ
- ・ソフトロボット情報学：ハードウェアと一体化した「動ける」人工知能の計算論

この大目標を領域内でわかりやすく共有するために、領域終了時に世界標準となるテキストを和英同時に上梓するという具体的目標を掲げ、これを達成した。

また、これに伴い、下記の成果を領域設定期間終了時に期待される成果として掲げ、研究を進めた。

【個別融合研究成果】わが国には、各分野において「やわらかさ」に関する世界最先端の研究を進める研究者がいる。いままで出会うことのなかったこれら研究者の出会いを生み出し、異分野融合研究体制の整備を進めることにより、「やわらかさ」に関する世界をリードする優れた研究成果が多数生まれる。【人材育成】国際的に活躍する若手研究者を育てる。【国際連携】国際拠点との連携や海外セミナー等の開催を通じて、我が国が中心となって世界をリードする学術ネットワークを作り上げる。【アウトリーチ・実用化】産業界や一般社会でのアウトリーチ活動を通し、その普及と実用化への橋渡しを行う。

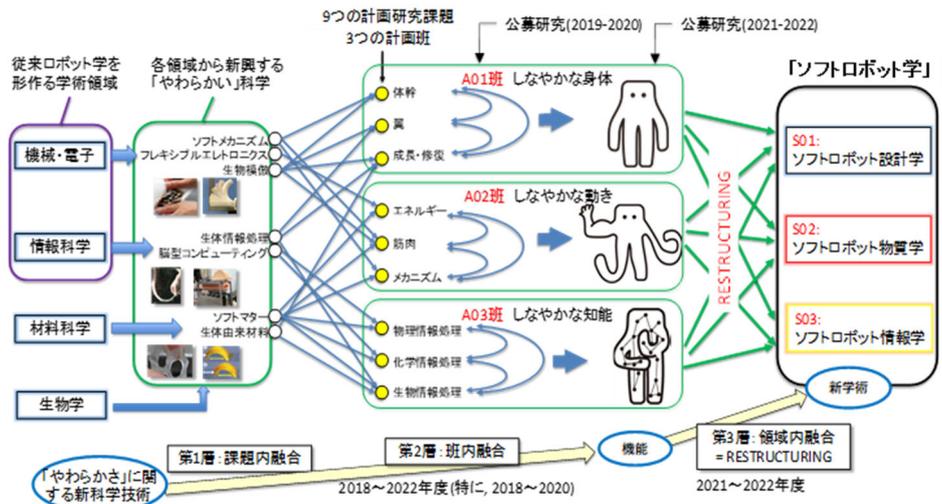


図1：全体構想(「三層構造」による異分野融合推進)

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(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)

- ① **指摘事項 1: 「公募研究を研究領域全体の中で、計画研究と相補的な形で、どう位置付け、連携させ、組み込み、全体として効果を発揮するようにするのか、具体的な計画に係る記述がやや少ないため、公募開始までに明確にしておく必要がある」(留意事項)**

中間報告書に記載の通り指摘点を明確にし、公募の際には、計画研究課題との共同研究を指向する公募研究課題を求める趣旨を明示するとともに、応募者の計画立案を支援するために共同研究可能性について情報を提供する窓口を設けて相談対応を行った。採択後は、領域全体会議においてマッチングセッションを丁寧に行い、各公募研究課題は、研究班項目 A01, A02, A03 のいずれか一つとマッチングさせ、研究班活動に加わることにした。この際、アドバイスをを行う研究班が連携を推進するメンター連携体制を構築した。これは効果的に機能し、計画研究班と公募研究班の多くの連携研究が生まれた。

- ② **指摘事項 2: 「本研究領域では、応用化学や有機材料・有機半導体などの素材系研究者が含まれていない。そのため、軟素材を活用したインテグレーション系である本研究領域が OPERA と統合的に活動すると、(大規模変形の計算力学系などの不足分野もあるが)研究組織として相乗効果が期待できる。」(参考意見)**

OPERA との連携

OPERA(山形大学ソフトマターロボティクスコンソーシアム)との連携を進め、計4回の合同シンポジウムを開催した(①東京, 2019年3月, ②山形大学, 2019年9月, ③オンライン, 2021年3月, ④オンライン, 2021年3月)。いずれもマスコミや一般聴講者を含む大勢の参加者を得て、有用な情報交換、連携を行った。これをきっかけに、機能性ストレッチ基板材料、生体親和ゲル、3Dプリンタに関し、OPERAと本新学術領域の研究者同士で個別に、継続的な情報交換や共同研究の開始につながった。また、本領域の福田氏(理研)が山形大学の客員准教授に就任するなど、人材育成にもつながった。

計算力学系の強化

公募課題公募時ならびに審査時に、計算力学系に関する研究課題を積極的に採択したい趣旨を明示した。その結果、ソフトロボットの力学を専門とする平井(立命館大)が、柔軟物の接触の力学を研究課題として参加することになった。このほか、A03班において、統計力学・非線形力学を専門とするポスドクを研究協力者として新採用した。2019年度からは、A01班の望山氏(筑波大)を中心に領域内に「ソフトロボ数理勉強会」が立ち上がり、ソフトロボットに関心を持つ領域外の数学者(東工大)と連携し、領域内の若手研究者が多数参加している。

- ③ **指摘事項 3: 「しなやか」で「いいかげん」な機械という現代的なコンセプトは、これからの超高齢化・人口減少社会において強く求められる人間親和性の高い自律機械技術の新たなパラダイムとして適切・重要であり、これが具体化されることは社会的にも大きなインパクトが期待できる。(所見)**

このコンセプトについては、日本設計工学会から解説記事「いいかげんなロボット」に対して2018年4月にThe Most Interesting Reading賞を頂くほか、海外では「E-kagen」として認知され始めている(Keynote speech, Robotics: Science and Systems, 2019, Freiburg, ほか)。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

総括班ならびに領域会議で所見について議論する時間を設け、領域参加者全員で今後の研究の進め方を再検討した。

- ④ **概ね順調に進んでおり、論文発表及びハードウェア開発など個々の成果が上がっていることや、研究領域として、公募研究のマッチングや若手研究者の育成、対外発信、連携活動を積極的に行っている点は評価できる。(所見)**

新型コロナウイルス感染症の感染拡大の中、領域内外の会議やシンポジウムをオンラインに切り替えて当初の計画通りの頻度で開催するだけでなく、新施策を以下のように設け、活動のレベルのさらなる向上に努めた。(1)領域内の研究融合を加速促進するために、「詳デ協(詳しく聞きたい/ディスカッションしたい/協働したい)ワークショップ」(2022年, 5回開催)と「オンライン懇談会」(2020年~2022年, 6回)を開

催した。前者では特に注目する5研究課題をとりあげ、専門的、集中的に議論した。後者は、飲食をしながらのオンライン懇親会であるが研究情報交換/議論が進み、複数の融合研究展開に結びついた。(2) 学術専門誌において本領域の特集を行った(Journal of Robotics and Mechatronics, Special Issue on Science of Soft Robots, Apr. 2022). editors ならびに出版社の協力も得て、すべての計画研究課題ならびにほぼすべての公募研究課題について paper または letter(研究紹介)を掲載した。(3) 約5分間の領域の「プロモーションビデオ」を制作し、領域 HP ならびに YouTube で公開した。また、「ポストコロナ未来社会ワークショップ：ソフトロボティクスが革新するニューノーマル」(2020年11月)を一般公開の形で開催した。

⑤ ウェットな系を用いた研究など、研究組織によっては全体計画の中での位置づけがあいまいである。研究組織間の連携が希薄な部分があり、領域全体としてどのようにまとめていくのか方向性が不明瞭である。(所見)

本研究領域では当初より、細胞や生体組織を用いたバイオロボットを、エラストマ等の柔らかい人工材料からなる狭義のソフトロボットからさらに進んだソフトロボットの形態ととらえている。従来の硬いロボットから狭義のソフトロボットへ向かうベクトルは、バイオロボットを経て生き物に向かっている。すなわち、不変で安定した材料や要素からなる従来のロボットに対し、エラストマやゲルなど化学的にも力学的にもやや不安定な材料や要素を導入することで適応性・順応性を実現したものが

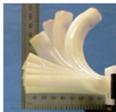
	従来のロボット	ソフトロボット (狭義のソフトロボット)	バイオロボット (広義のソフトロボット)	生き物
				
	不変・安定			変化・適応
構成	金属・高剛性構造 サーボモータ 緻密なプログラム	エラストマ 高分子、ゲル、 生分解性材料 弾性連結体	生きている 細胞、生体組織	細胞 遺伝子
機能	力、速度、精度 効率、確実性	受動的適応・順応	自己修復 自己改変による 適応・順応	恒常性 自己修復・自己改変 増殖 変異・進化

図2: ウェットな系を用いた研究の位置づけ

狭義のソフトロボットであり、細胞や生体組織などさらに不安定な材料を導入することでより高度な適応性・順応性を持つものがバイオロボット(広義のソフトロボット)であり、このベクトルは究極的には生き物につながっている(図2)。この考え方に基づき、ウェットな材料を用いたバイオロボットを次世代のソフトロボットととらえ、本領域の研究対象と位置付けてきた。

この基本的な考え方を、領域会議、総括班会議、上記の「詳デ協ワークショップ」(2022年)、「オンライン懇談会」で、特にウェットな系を扱う清水、伊藤らがリーダーシップを取り、領域における位置づけととりまとめについて、再確認した。その結果、領域内の連携も加速され、筋肉脳オルガノイドロボット(清水・古澤の連携)、ウェット生体物のハンドリング(平井・清水の連携)、ゲルで実現する体内時計(前田・伊藤の連携)といった、新規な連携研究成果が生まれた。例えば、最後の「ゲルで実現する体内時計」は、狭義のソフトロボットとウェットロボットを結びつける適応性・自発性のモデルを示した優れた成果であり、2022年12月の Scientific Reports に掲載されている。

⑥ ソフトロボット学の構築において、どこまでできていて、何ができていないのか、そのために今後何が必要なのかを具体的に示し、研究領域内で共有・連携しながら進めていくことが望まれる。(所見)

ロボティクスは synthesis の学術である。種々の要素技術の開発とともに、それらを総合してシステムとして機能させる方法を体系的にまとめることを目的としている。

これを本領域で当初掲げた具体的な目標に沿って考えると、要素技術に関しては身体・動き・知能とも個々の研究は計画通り進んでいる。中間評価の時点でもまだできていないのは、1) これら要素技術の学術としての体系化と、2) システム化の手法の確立であるというのが領域全体の共通認識である。

前者に関しては、リストラクチャリングに基づく新組織の体系化活動と、世界標準のソフトロボット学のテキスト執筆で具体的な形で実現した。

後者に関しては、「摘便プロジェクト」と「クラゲプロジェクト」と呼ぶ、領域内の研究成果をシステム融合する2つのシステム構築プロジェクトを総括班内に立ち上げ、システム化の手法をまとめ上げた。

⑦ 社会実装も重要ではあるが、新学術領域研究は学理構築を目指す点を踏まえ、各論対応にならないような仕組みが必要という意見があった。(参考意見)

学理構築は、本領域における最大の目標の一つとして発足当初から掲げており、全研究者がその重要性を共有している。あらためて領域内で意見交換を行い、社会実装への期待が学術発展の大きな原動力になりうる一方で、領域活動としては各論対応にならないよう、確認した。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定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、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 研究の達成状況

本領域での研究推進および領域運営では、当初の計画通り、また一部では当初の計画以上の成果を達成した。これまでの領域活動や研究成果により、本領域は、世界的にもソフトロボット研究に関するわが国の最重要施策の一つとして海外の大型プロジェクトと並んで認識されるようになった。以下、研究項目ごとにまとめる。但し、B01,B02 班として公募した公募研究課題については、前述 5-①項で記載した通り、マッチングセッションを通じて A01,A02,A03 の各研究班に取り込んで研究を行ったため、ここでも A01,A02,A03 に含めて記載する。

X00 総括班

異分野融合の強力な推進が本領域の特色となっており、領域代表者を中心に総括班の研究分担者間で密に連携しながら本領域の効果的な運営支援に取り組んだ。これにより、異分野融合の促進に効果的な活動体制を中間評価時まで確立し、その後も領域全体でのソフトロボット開発プロジェクトの企画など融合研究を促進する活発で効果的な運営を行った。また、本領域の成果の発信にも力を入れ、海外セミナーや一般向け展示会を行うとともに、本領域での成果を高度に体系化し、標準テキスト(和文は既刊、英文は7月に出版予定)としてまとめた。

- **領域内連携:** 領域会議を年2回の頻度で開催し、学生も含めた領域関係者全員での議論の場を設けた。また、共同研究拠点を東工大と阪大に設置し、専任の技術員の配置や予約・遠隔モニタリングシステムや設備使用講習会の開催などの環境整備を行い効率的な管理運営を実現した。領域内融合の促進のため、公募計画研究と既存研究班とのマッチングセッションの実施、slackによる領域全体の日常的で密なディスカッション体制を整備した。さらに、領域全体でのソフトロボット開発プロジェクトにより、さらなる異分野融合の機会を設けた。
- **領域外連携:** 関連するプロジェクト(産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)「ソフトマターロボティクス」、新学術領域「発動分子科学」、SIP「センサリッチ柔軟エンドエフェクタ」等)との合同シンポジウムを開催した。日本機械学会や日本ロボット学会等関連学会とも連携し、特集号刊行、シンポジウム共催、書籍の執筆を実施した。
- **国際連携:** 国際学会の共催や国際ワークショップ、海外セミナー、国際学会でのワークショップ等を開催した。また、国外のソフトロボット研究機関と提携し、協力体制を構築した。
- **人材育成:** 若手研究者/学生の在外研究支援をスーパー若手人材育成計画として実施した。また、クラフトワークショップや勉強会などを開催し、領域内の若手研究者の知識・技術向上の機会を作った。
- **広報活動:** ウェブサイト運営、パンフレット/プロモーションビデオ作成、イベント告知等の広報活動を行った。また、市民向け講座や一般向けのロボット展示会をアウトリーチ活動として実施した。

A01「しなやかな身体」

本研究項目の目的は様々な形態のソフトロボットを現実のものとして実現する「ソフトロボットの身体」の構成方法を明らかにすることである。剛体から構成され、変形・変化を起こさない従来のロボットシステムを拡張し柔軟性を取り込むために、機械工学・電子工学と生命現象を力学的に扱うバイオメカニクスの融合を図った。動物の機能解剖学や生物ロコモーションの知見を積極的に利用するとともに、生きた細胞のロボットへの応用にも取り組んだ。

- 変形する柔軟身体を記述するモデル、環境との相互作用を表現するモデルの構築
- ロボットおよび比較する動物の実環境での振る舞い(形態変化や粘弾性等)の計測手法の開発
- 筋肉細胞や生分解性材料を用いた変化するロボットの基盤技術の構築
- やわらかさとかたさが複雑に組み合わさったロボットの設計・製作手法の体系化
- ソフトロボットのための実演に基づく視覚・力学フィードバックによる制御手法の提案

連続体力学を用いてしなやかな身体のモデル化が達成でき、また身体と環境との相互作用について接触や衝突を題材に理解が進んだ。生きた筋肉細胞を用いたロボットに関する基礎研究については、小型移動ロボットの製作や自己修復機能を持ったセンサデバイスを実現することができた。やわらかいばかりでなく、骨のようなかたさを内包したハイブリッド型のソフトロボットの設計論については、ダチョウの首やペンギンの翼などで規範としたロボットの設計を通じて一般化につながる多数の事例が得られた。ソフトロボットの制御手法については、やわらかさとマッチングした周波数や振幅を用いる手法や人間の手応えによる操作をアクチュエータで再現する手法などが提案できた。公募研究による計画研究の補完や、領域内での共同研究によって成果が得られた。

A02「しなやかな動き」

本研究項目の目的はソフトロボットの運動制御について研究し、「しなやかな動きを創り出す」ことである。従来の剛体から構成され自由度の小さい動きを考えていた従来のロボット学に対して、ソフトロボットの動きは柔軟材料の変形に立脚した新しい動きを構築する必要がある。このような新しい動きを構築するために、機械・電子工学の研究者と、物質科学・材料科学の研究者同士の融合を図った研究活動を進めた。

- エネルギー変換（センサ、アクチュエータ）を柔軟材料上で自在に発現させる原理の探求
- 極限のやわらかさ・伸縮性を持つエレクトロニクスの実現
- 高分子材料を利用した生体筋肉と比するパフォーマンスを備えた人工筋肉の実現
- 従来の歯車などの機構とは異なるソフトメカニズムの構築

異なるデバイスを集積化させる技術の確立、高分子ナノ薄膜を基材とする無線給電式筋電計測システム、イオン交換膜変形を利用したソフトアクチュエータの新しい造形技術確立、柔軟生物であるヒモムシの吻構造に基づく伸縮メカニズムの確立、各種柔剛切替機構の具現化と体系化、柔剛兼備なウロコ状機構の確立、および能動的な自己修復機能を実現する血管メカニズム、等の開発ができた。これらの融合的な研究活動では、新しい材料の作成から実験まで、機械・電子工学研究者と材料科学研究者との密接な連携が機能した。

公募班との連携では、柔軟材料の動きを利用した福祉・介護向けデバイスのための計測システムの構築など、特に「ソフトロボットの社会展開」の視点に立った議論を活発に行った。

A03「しなやかな知能」

本研究項目の目標は、やわらかいロボットのための情報処理を探求することである。やわらかいロボットのダイナミクス（動的挙動）は一般に非常に高次元で、過去の履歴を持った複雑な挙動を示す。本研究項目ではこういったやわらかいロボットの複雑なダイナミクスを理解し、やわらかさを積極的に活用した情報処理を実装することを目指した。

- フレキシブルセンサと物理リザーブ計算の融合により、やわらかいダイナミクスを最大限活用することによる既存の計算限界の突破
- 化学反応を利用した自律駆動系とメカトロニクスの融合による制御の新原理の提案
- 体内時計および線虫の集団運動の制御を通じた時空間的なリズムとパターンの形成現象の解明とロボット応用

最大の特色は、公募班も含め、非線形物理、材料科学、生物学、ロボティクス、感性工学など多種多様な分野の研究者が集まっている点にある。コロナの影響により直に会う機会は減ってしまったものの、これらのメンバーで定期的に議論を行い、やわらかい情報処理にとって重要な特性として「自律性」を共通軸に設定し、議論を進めた。

本領域全体で課題としたソフトロボット学の体系化の成果物である Springer より出版予定の教科書に合において、PART III を担当し、そのタイトルも A03 において議論し続けてきた自律性の概念を反映した Autonomous Soft Robots となった。

(2) 主な具体的成果

X00 総括班

- **領域内融合**：共同研究拠点を東工大と阪大に設置し、使用講習会開催、勉強会開催、遠隔モニタリングシステム構築など、効率的な運営システムを構築した。また、融合研究の促進のため領域全体でのロボットシステム開発プロジェクト支援を行い、2つのプロジェクトが遂行された。

- ・ **領域外連携**：国内外の関連学会と連携し、学会誌における特集号を5回企画、講演会やシンポジウムの合同開催等多数（細かいものも入れると30回以上）等を実施した。
- ・ **国際連携**：本学術領域の単独主催の国際ワークショップを5回開催した。
- ・ **人材育成**：領域内の公募で採択した、助教1名、博士課程学生3名を海外の3大学に派遣して領域の研究課題を実施し、国際的に活躍する研究者の育成を目指した。
- ・ **広報担当**：領域単独の公開講座を7回実施。また、関連学協会と市民向けフォーラム等を8件共催し、アウトリーチ活動を実施。また、一般向けに研究成果の展示会「いいかげんなロボット展」を開催した(図3上は一般向け展示会「いいかげんなロボット展」(本学術領域主催、2022年12月@日本科学未来館)。海外でのアウトリーチ活動として、領域の研究者を派遣し、海外セミナーを行った(図3下は海外セミナー(アジア)2023年4月)。



図3：展示会及びの海外セミナー

A01「しなやかな身体」

【新山 G】動物の脊柱に見られるしなやかな弾性連続体の役割に注目し、脊柱の上部にあたる首のバイオメカニクスに着目したダチョウ首型マニピュレータの開発に取り組んだ(図4)。ロボティクスと動物解剖学の協働により筋肉を模した多数のワイヤによるダチョウ首マニピュレータの姿勢制御を実現した。制御の観点からは、シミュレーションモデルにおいて強化学習による運動獲得の実験を行った。社会実装に向けた応用システムの開発として、ダチョウマニピュレータを取り付けた電動車椅子を試作した。

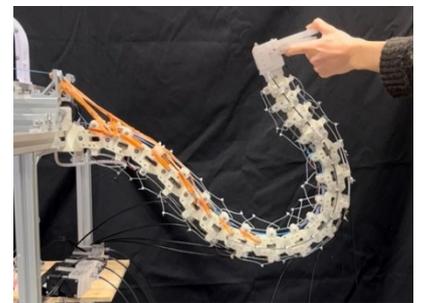


図4 ダチョウ規範マニピュレータ

【清水 G】細胞をロボットのソフトでインテリジェントな部品として直接組みこみ自律分散システムとして実装した。バイオソフトロボットを制御、観察するための技術として、単眼カメラによる汎用的3次元形状計測を提案した。計画研究福田 G との共同研究によって、ナノシート電極を用いた超薄型細胞触覚センサの開発に成功し、そのセンサが自己修復能を有することを確認した(図5)。また、神経細胞により制御される筋細胞ロボットを脳オルガノイドと筋細胞アクチュエータの共培養によって実現した。

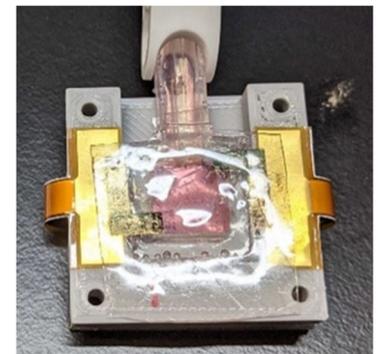


図5：細胞触覚センサ

【田中 G】羽ばたき飛行・遊泳生物のしなやかな飛行・遊泳を実現するE-kagenな流体構造連成メカニズムおよび身体デザインについて多くの知見が得られた。遊泳に関してはペンギンの水槽中での3次元運動の計測手法を確立しペンギンの翼の剛性を調べた。また、ペンギンを規範とした俊敏・高効率な羽ばたき遊泳ロボット機構した。空中飛行については、ハチドリを規範としたタフで推力発生効率の良い柔軟翼を3Dプリント支持構造とエラストマ翼膜で実現した(図6)。さらにペンギンの体毛やサメの鱗を規範とした流体抵抗低減リブレットを柔軟フィルム上に実現した。

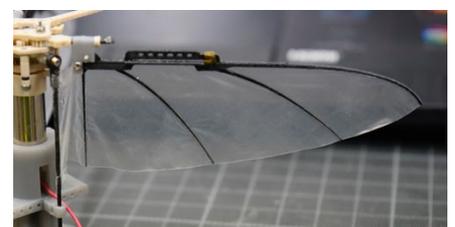


図6：適切な剛性を与えた柔軟翼

【公募：福原】柔剛併せ持つ身体のありようを調べるため、脚と胴体の接続様式、とくに肩甲骨の柔軟性に注目した。柔軟な肩部ハンモック構造を備えた脚ロボットを試作するとともに、シンプルなロボットモデルによるシミュレーションで最適な肩の柔軟性を歩容を変えて検証した。

【公募：森本】バイオソフトロボットの実現を目指して細胞培養で形成される筋組織の収縮と弾性変形する構造を組み合わせ、ミリメートルサイズの二足歩行バイオソフトロボットを実現した。また、複数の培養筋組織を組み合わせることで多自由度バイオアクチュエータを実現した。

【公募：田中】生きた組織のやわらかさを微小なカンチレバーによって計測する技術を開発した。直径

200 μm 程度のスフェロイドの応力-ひずみ関係を計測可能にした。2 型コラーゲンをロックダウンしたスフェロイドを用意して遺伝子発現とやわらかさの関係を明らかにした。

【公募：古澤】バイオロボットとして筋細胞アクチュエータと脳オルガノイドの複合化を計画研究清水 G との共同で行い、蛍光観察によって神経筋接続が確認された。これを化学的に遮断すると筋が弛緩したことから、脳オルガノイドが「生きた電池」のように筋細胞を駆動し続けていることがわかった。

【公募：平井】食品のような表面がウェットな柔軟材料のハンドリングに必要な動的粘弾性・粘着性の計測を行った。同じ材料でも粘着性によって応力-ひずみ特性が変わることが確かめられた。粘弾性材料の動的な変形特性をべき乗則で表現しモデルパラメータの同定を行った。

A02「しなやかな動き」

【福田 G】2 種類の高分子ナノ薄膜を積層させることで、皮膚に貼付して筋電位を計測可能なナノ薄膜状の生体電極を開発し、野球ピッチャーの投球時に生じる手のひらの表面筋電位の変動をリアルタイムに計測することに成功した(図 7)。また、皮膚上および体内埋め込み型センサ用の極薄伸縮性導体を実現し、伸縮性が高く耐久性に優れた次世代生体適合性エレクトロニクスの可能性を実証した。さらに、ソフトロボットとして利用するサイボーグ昆虫研究を進め、超柔軟なフィルム状エレクトロニクスの昆虫への実装方法を確立し、超薄型有機太陽電池を利用した再充電可能なサイボーグ昆虫を確立した(図 8)。

【鈴木 G】イオン交換膜の変形を利用したソフトアクチュエータの立体造形手法として、3D プリンタによる成型方法や、折り紙による成型、水溶性樹脂の利用等の新しい手法を考案し、試作に成功した(図 9)。また、気液変換型ラバーアクチュエータのための Au/Pt 二層電極を開発し、柔軟な電気駆動人工筋肉を実現した。

【多田隈 G】伸展式機構として柔軟生物であるヒモムシの吻構造の展開機能を抽出して内圧により分岐展開を行う機構を考案・具現化した(図 10)。また、加圧式の柔剛切替機構、柔剛兼備なウロコ状機構および傷口を能動的に修復する柔軟血管メカニズムの開発に成功した。

【公募：荒井】有機半導体骨格に導入するアルキル基の長さを精密に制御することで、分子の層形成能を著しく向上できることを明らかにした。

【公募：遠藤】メンダコを規範としたロボットハンドを試作した。膜構造を導入することで把持性能が向上するとともに屈曲耐性が約 2 倍に改善することを示した。

【公募：橋本】PVC ゲルを用いて 3 次元形状変形を可能とするソフトアクチュエータを開発することを目的とし、多数のゲル球と電極球を格子状に配置したアクチュエータを製作し動作を示した。

【公募：林】熱によって収縮する樹脂材料と導電材料を一体化した繊維アクチュエータを開発し、その長さ・力特性を明らかにした。

【公募：池内】カテーテルのプロトタイプを作成し、ハイドロゲル材料からなる腹部模型を用いて外部磁石を用いたマイクロロボット固定に成功した。

【公募：宮川】体圧分散・応力軽減が可能なゲルパッドの 3D プリンタによる形成を行った。さらに A02 難波江らとゲルパッドのずり応力評価についての 3 軸測定に成功した。

【公募：新竹】生分解性柔軟電極を開発し、生分解性ソフトロボット要素として、アクチュエータとセンサを開発することに成功した。

【公募：杉原】ゲル材料を用いて、光ファイバの自己組織化光接続を実証し、軸ズレを与えても接続が維持されることを示した。また、1x2 分岐光接続も作製した。

【公募：上原】エチレン・テトラフルオロエチレン共重合体 (ETFE) の延伸によりアクチュエータ性能



図 7: アスリート用ウェアラブル筋電計測デバイス



図 8: 昆虫への実装



図 9: 折り紙によるソフトアクチュエータの立体造形

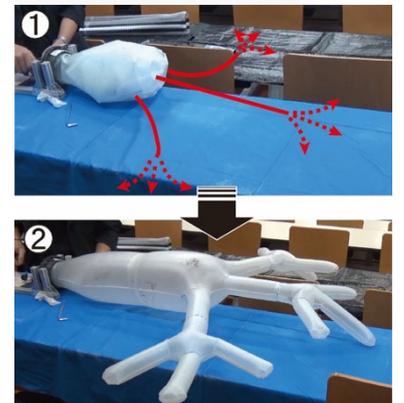


図 10: ヒモムシ吻構造を模した展開機構

を発現すると予想される延伸フィルムを調製し、タイ分子の伸縮に伴う可逆的なラメラ結晶の傾き変化を捉えることができた。

A03 「しなやかな知能」

【中嶋 G】ソフトロボットとフレキシブルセンサを融合することで、これまでのリザーバー計算では実現できなかった情報処理の方式を開発した。例えば、飛翔ロボットの羽にフレキシブルセンサを搭載し、羽のダイナミクスをリザーバーとして活用して風向き推定が可能であることを示した(図 11)。また、リザーバー計算を実現する一つの条件として、入力系列とリザーバーのダイナミクスが一般化同期の関係にあることが挙げられるが、この条件を、入力を入れている身体から媒質を介して遠く外側にある対象に対しても満たすように系を設定することで、計算を空間的に飛ばすことを考案し、実験で示した(図 12)。次に、傘に張り付けられるやわらかいセンサを開発し、水滴の接触による抵抗値の時系列をリザーバーに入れることで、降水量と風速を出力できるシステムを構築した。その他、物理リザーバー計算の下、閉ループ制御で遊泳する魚ロボットの開発や、マッキベン型人工筋肉をリザーバーとして活用し、リアルタイムでの筋肉の長さ推定や分岐の埋め込みなどが実現できることを示した。また、単細胞生物のテトラヒメナが物理リザーバーとして活用できることを示すなど、これまでの物理リザーバー計算の限界を拡張した。

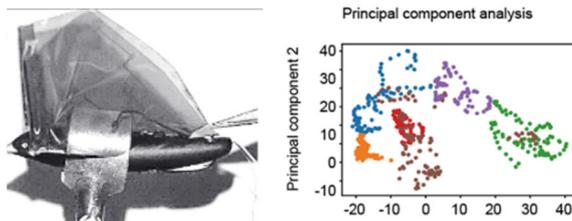


図 11. 飛翔ロボットの羽のダイナミクスを利用した風向き推定

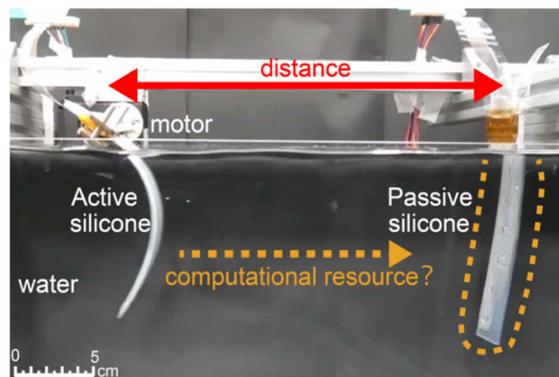


図 12: 媒質を介して計算を離れた場所に飛ばせることを実証。

【前田 G】多様で乱雑な現実の環境に適応して働く情報処理機構の実現を目標に、センシング・演算・アウトプット機能を一体化した柔らかい素材でできたデバイスの開発を目指して研究を行った。主要な成果としては、ElectroHydroDynamics (EHD)を利用したセンサとアクチュエータの二つの役割を持つ EHD デュアルトランスデューサを開発した。また、柔らかい材料のみで構成される演算機構の候補として、振動的化学反応である Belousov-Zhabotinsky (BZ)反応を内部で起こすゲル(BZ ゲル)の利用を考え、演算の実装に必要な基礎数理の解明を行った。また、化学反応と柔らかいボディが共創する機能の例として、BZ ゲルで疑似的な体内時計を作ることができることを示した。

【伊藤 G】リズムやパターン現象を示す生命現象を対象に、コンローラブルな機能を付与することで、既存のロボットの枠を広げる研究を推進した。回転運動する線虫の大量培養によって動的なパターン形成がおこることと、そのパターンが環境の光遺伝学的操作によって制御可能であることを示した。振動する能力をもつイカ色素胞を利用した物理リザーバー計算機として音声認識が可能であることを示した。また生物が自発的に 24 時間周期の自律振動性を獲得するシナリオに関する理論的研究や、周期ゆらぎを低減するための手法に関する理論的提案を行った。これらの研究は生物そのものがやわらかいロボットとして機能することとともに、工学的なアプローチが生物理解に貢献することを示唆している。

【公募：田中】自励振動ゲルで生体と同様自律的に駆動するマイクロポンプや超薄板ガラスに代表されるような独自のフレキシブル材料を開発した。

【公募：黒田】魚類のヒレが持つ薄く特徴的な形状について、ヒレ先端部に存在するコラーゲン繊維の構造体を放射状に規則正しく配置させることでヒレの適切な形態が形成されることを明らかにした。

【公募：大脇】Motion Hacking を用い、ナナフシの歩行を司る脚の筋生理学的モデル、および歩行中の位相応答モデルの抽出を行った。筋への刺激時間と関節トルクに線形な関係を見出すとともに、歩行中の刺激タイミング依存性を明らかにした。

【公募：ソン】必要な時だけ膨らんで身体の上に姿を表すウェアラブルアバタロボットの開発及び評価を行った。展示とワークショップを通じて、より自然で多様な遠隔コミュニケーション及び身体拡張分野に応用できる可能性を示した。

【公募：中村】蠕動運動型ミキシングポンプについて、マルチモーダルなセンシング機能の搭載により、汎化性の高い搬送と混合度推定が可能となった。また本手法を固体ロケット燃料推進薬の模擬材に適用した。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

雑誌論文（査読有）

計画研究

【A01】

1. Y. Shen, and *H. Tanaka, “Experimental analysis of the sweepback angle effect on the thrust generation of a robotic penguin wing”, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 118, No. 2, 2023.
2. N. Harada, and *H. Tanaka, “Kinematic and hydrodynamic analyses of turning manoeuvres in penguins: body banking and wing upstroke generate centripetal force”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 225, No. 24, 2022.
3. K. Nonoyama, M. Shimizu, and T. Umedachi, “Upside-Down Brachiation Robot Using Elastic Energy Stored Through Soft Body Deformation”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, p. 11291 – 11297, 2022.
4. *S. Iyobe, M. Shimizu, and T. Umedachi, “Diverse Behaviors of a Single-Motor-Driven Soft-Bodied Robot Utilizing the Resonant Vibration of 2D Repetitive Slit Patterns”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 992-999, 2022.
5. N. Harada, T. Oura, M. Maeda, Y. Shen, D. M. Kikuchi and *H. Tanaka, “Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 224, No. 21, pp. 1-20, 2021.
6. *K. Tanaka, S. Nishikawa, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi, “Immediate generation of jump-and-hit motions by a pneumatic humanoid robot using a lookup table of learned dynamics”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 5557–5564, 2021.
7. Y. Shen, N. Harada, S. Katagiri, and *H. Tanaka, “Biomimetic Realization of a Robotic Penguin Wing: Design and Thrust Characteristics”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2021, 2020.
8. *S. Shigaki, H. Ohashi, T. Sakurai, M. Shimizu, K. Hosoda, and D. Kurabayashi, “Real-Time Odor Discrimination Using Single Antenna of Insect”, *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, 2020.
9. S. Hamaguchi, T. Kawasetsu, T. Horii, Hisashi Ishihara, R. Niiyama, K. Hosoda, and M. Asada, “Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 4028-4034, 2020.
10. T. Nakata, P. Henningson, H.-T. Lin, and *R.J. Bomphrey, “Recent Progress on the flight of dragonflies and damselflies”, *International Journal of Odonatology*, 23, pp. 41-49, 2019.
11. *H. Tanaka, G. Li, Y. Uchida, M. Nakamura, T. Ikeda, and H. Liu, “Measurement of time-varying kinematics of a dolphin in burst accelerating swimming”, *PLoS ONE*, 14, e0210860, 2019.
12. *T. Umedachi, M. Shimizu, and Y. Kawahara, “Caterpillar-inspired Crawling Robot using Both Compression and Bending Deformations”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, pp. 670-676, 2019.

【A02】

1. Z. Jiang, N. Chen, Z. Yi, J. Zhong, F. Zhang, S. Ji, R. Liao, Y. Wang, H. Li, Z. Liu, Y. Wang, T. Yokota, X. Liu, *K. Fukuda, *X. Chen, and *T. Someya, “A 1.3-micrometre-thick elastic conductor for seamless on-skin and implantable sensors”, *Nature Electronics*, Vol. 5, pp. 784-793, 2022
2. *K. Hirose, I. Sudo, J. Ogawa, Y. Watanabe, M. D. Nahin, I. Shiblee, A. Khosla, M. Kawakami, and H. Furukawa, “Gel Biter: food texture discriminator based on physical reservoir”, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 27, pp. 674-683, 2022.
3. *B. Mazzolai, A. Mondini, W. Del Dottore, L. Margheri, F. Carpi, K. Suzumori, M. Cianchetti, T. Speck, S. K Smoukov, I. Burgert, T. Keplinger, G. De Freitas Siqueira, F. Vanneste, O. Goury, C. Duriez, T. Nanayakkara, B. Vanderborght, J. Brancart, S. Terryn, S. I Rich, R. Liu, K. Fukuda, T. Someya, M. Calisti, C. Laschi, W. Sun, G. Wang, L. Wen, R. Baines, S. K. Patiballa, R. Kramer-Bottiglio, D. Rus, P. Fischer, F. C Simmel, and A. Lendlein, “Roadmap on soft robotics: multifunctionality, adaptability and growth without borders”, *Multifunctional Materials*, Vol. 5, 32001, 2022
4. *R. Liu, Z. L. Wang, *K. Fukuda, and *T. Someya, “Flexible self- charging power sources”, *Nature Reviews Materials*, 7, p.870–886 2022
5. M. Takakuwa, *K. Fukuda, T. Yokota, D. Inoue, D. Hashizume, *S. Umezu, and *T. Someya, “Direct gold bonding for flexible integrated electronics”, *Science Advances*, Vol. 7, eabl6228, 2021
6. J. Zhong, Z. Li, M. Takakuwa, D. Inoue, D. Hashizume, Z. Jiang, Y. Shi, L. Ou, M. O. G. Nayeem, S. Umezu, *K. Fukuda, and *T. Someya, “Smart Face Mask based on an Ultrathin Pressure Sensor for Wireless Monitoring of Breath Conditions”, *Advanced Materials*, 2021.
7. S. I. Rich, S. Lee, *K. Fukuda, and *T. Someya, “Developing the Nondevelopable: Creating Curved-Surface Electronics from Nonstretchable Devices”, *Advanced Materials*, 34, 210668, 2021.
8. M. Saito, E. Kanai, H. Fujita, T. Aso, N. Matsutani, and *T. Fujie, “Flexible induction heater based on the polymeric thin film for local thermotherapy”, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 31, 2102444, 2021.
9. *W. Y. Li, A. Takata, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Shape Recognition of a Tensegrity With Soft Sensor Threads and Artificial Muscles Using a Recurrent Neural Network”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, pp. 6228-6234, 2021
10. *S. I. Rich, Z. Jiang, K. Fukuda, and T. Someya, “Well-rounded devices: the fabrication of electronics on curved surfaces – a review”, *Materials Horizons*, 2021
11. R. Liu, M. Takakuwa, A. Li, D. Inoue, D. Hashizume, K. Yu, S. Umezu, *K. Fukuda, *T. Someya, “An Efficient Ultra - Flexible Photo - Charging System Integrating Organic Photovoltaics and Supercapacitors”, *Adv. Energy Mater.*, 2020.

12. Asuka Ishiki, Hiroyuki Nabae, *Akio Kodaira, Koichi Suzumori, “PF-IPMC: Paper/Fabric Assisted IPMC Actuators for 3D Crafts”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 3, 2020.
13. R. Mukaide, M. Watanabe, *K. Tadakuma, Y. Ozawa, T. Takahashi, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Radial-Layer Jamming Mechanism for String Configuration," IEEE Robotics and Automation Letters, 2020.
14. M. Watanabe, *K. Tadakuma, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement," IEEE Robotics and Automation Letters, 2020.
15. M. Takakuwa, S. W. Heo, *K. Fukuda, K. Tajima, S. Park, S. Umezumi, and T. Someya, “Nanograting Structured Ultrathin Substrate for Ultraflexible Organic Photovoltaics”, Small Methods, 4, 2020.
16. *V. Cacucciolo, H. Nabae, K. Suzumori, and H. Shea, “Electrically-Driven Soft Fluidic Actuators Combining Stretchable Pumps With Thin McKibben Muscles”, Frontiers in Robotics and AI, 6, 2020.
17. Y. Tetsu, Y. Kido, M. Hao, S. Takeoka, T. Maruyama, and *T. Fujie, “Graphene/Au Hybrid Antenna Coil Exfoliated with Multi-Stacked Graphene Flakes for Ultra-Thin Biomedical Devices”, Advanced Electronic Materials, 6, 1901143, 2019.
18. *T. Horiuchi, and K. Asaka, “245mm-length IPMC catheter with an ellipse-like cross-section”, Smart Materials and Structures, 28, 095028, 2019.
19. H. Kimura, *K. Fukuda, H. Jinno, S. Park, M. Saito, I. Osaka, K. Takimiya, *S. Umezumi, and *T. Someya, “High Operation Stability of Ultraflexible Organic Solar Cells with Ultraviolet-Filtering Substrates”, Advanced Materials, 31, 1808033, 2019.
20. Z. Jiang, *K. Fukuda, W. Huang, S. Park, R. Nur, M. O. G. Nayeem, K. Yu, D. Inoue, M. Saito, H. Kimura, T. Yokota, S. Umezumi, D. Hashizume, I. Osaka, K. Takimiya, and T. Someya, “Durable Ultraflexible Organic Photovoltaics with Novel Metal-Oxide-Free Cathode”, Advanced Functional Materials, 29, 1808378, 2019.
21. *A. Kodaira, K. Asaka, T. Horiuchi, G. Endo, H. Nabae, and K. Suzumori, “IPMC Monolithic Thin Film Robots Fabricated through a Multi-Layer Casting Process”, IEEE Robotics and Automation Letters, 4(2), pp. 1335-1342, 2019.
22. N. Kokubo, M. Arake, K. Yamagishi, Y. Morimoto, S. Takeoka, H. *Ohta, and *T. Fujie, “Inkjet-Printed Neural Electrodes with Mechanically Gradient Structure”, ACS Appl. Bio Mater., 2, pp. 20-26, 2018.
23. K. Nishiwaki, S. Aoki, M. Kinoshita, M., Kiyosawa, T., Suematsu, Y., Takeoka, S., and *T. Fujie, “In situ Transplantation of Adipose Tissue-Derived Stem Cells Organized on Porous Polymer Nanosheets for Murine Skin Defects”, J. Biomed. Mater. Res. B, 107, pp. 1363-1371, 2018.
24. S. Park, S. Won Heo, W. Lee, D. Inoue, Z. Jiang, K. Yu, H. Jinno, D. Hashizume, M. Sekino, T. Yokota, *K. Fukuda, K. Tajima, and T. Someya, “Self-powered ultra-flexible electronics via nano-grating-patterned organic photovoltaics”, Nature, 516, pp. 516-521, 2018.

[A03]

1. *Y. Yamada, H. Ito, and S. Maeda, “Artificial temperature-compensated biological clock using temperature-sensitive Belousov-Zhabotinsky gels”, Scientific Reports, Vol. 12, 22436, 2022.
2. *Mitsumasa Nakajima, *Katsuma Inoue, Kenji Tanaka, Yasuo Kuniyoshi, Toshikazu Hashimoto, and *Kohei Nakajima, “Physical deep learning with biologically inspired training method: gradient-free approach for physical hardware”, Nature Communications, Vol. 13, 7847, 2022.
3. Y. Yamada, Y. Otsuka, Z. Mao, and *S. Maeda, “Periodical propagation of torsion in polymer gels”, Scientific Reports, Vol. 12, 16679, 2022.
4. *K. Tanaka, Y. Minami, Y. Tokudome, K. Inoue, Y. Kuniyoshi, and K. Nakajima, “Continuum-body-pose estimation from partial sensor information using recurrent neural networks”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 7, No. 4, pp. 11244-11251, 2022.
5. W. Sun, N. Akashi, Y. Kuniyoshi and *K. Nakajima, “Physics-Informed Recurrent Neural Networks for Soft Pneumatic Actuators”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 7, No. 3, pp. 6862-6869, 2022.
6. *Mika Noguchi, Masato Yamada, and Hideyuki Sawada, “Analysis of different self-propulsion types of oil droplets based on electrostatic interaction effects”, RSC Advances, 29, pp. 18354-18362, 2022.
7. Seiji Wakabayashi, Takayuki Arie, Seiji Akita, *Kohei Nakajima, and *Kuniharu Takei, “A Multitasking Flexible Sensor via Reservoir Computing”, Advanced Materials, 2201663, 2022.
8. A. Wiranata, Y. Ohsugita, A. Minaminosono, Y. Kuwajima, and *S. Maeda, “Electro-mechanical Tensile Test Equipment for Stretchable Conductive Material”, HardwareX, Vol. 11, e00287, 2022
9. Y. Kuwajima, Y. Seki, Y. Yuhei, S. Awaki, S. Kamiyauchi, A. Wiranata, Y. Okuno, H. Shigemune, and *S. Maeda, “Electro-Chemical Dual-Transducer for Fluidic Self-Sensing Actuation”, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 14, pp. 3496-3503, 2022.
10. K. Tanaka, Y. Tokudome, Y. Minami, S. Honda, T. Nakajima, *K. Takei, and *K. Nakajima, “Self-organization of remote reservoirs: transferring computation to spatially distant locations”, Advanced Intelligent Systems, 2100166, 2021
11. Y. Xuan, Y. Lu, S. Honda, T. Arie, S. Akita, and *K. Takei, “Active-matrix-based flexible optical image sensor”, Advanced Materials Technologies, Vol.6, Issue 9, 2100259, 2021.
12. Y. Lu, Y. Fujita, S. Honda, S.-H. Yang, Y. Xuan, K. Xu, T. Arie, S. Akita, and *K. Takei, “Wireless and flexible skin moisture and temperature sensor sheets toward the study of thermoregulator center”, Advanced Healthcare Materials, Vol. 10, 202100103, 2021.
13. *K. Inoue, Y. Kuniyoshi, K. Kagaya, and K. Nakajima, “Skeletonizing the Dynamics of Soft Continuum Body from Video”, Soft Robotics, 9, pp.201-211, 2021
14. A. Wiranata, Y. Ishii, H. Hosoya and *S. Maeda, “Simple and Reliable Fabrication Method for PDMS Dielectric Elastomer Actuators using Carbon Nanotube Powder Electrodes”, Advanced Engineering Materials, Vol. 23, 2001181, 2021
15. Z. Mao, G. Shimamoto, and *S. Maeda, “Conical frustum gel driven by Marangoni effects for no-stator motor”, Colloids and Surfaces A, vol. 608, 125561, 2021.
16. *N. Akashi, T. Yamaguchi, S. Tsunegi, T. Taniguchi, M. Nishida, R. Sakurai, Y. Wakao, and K. Nakajima, “Input-driven bifurcations and information processing capacity in spintronics reservoirs”, Physical Review Research, vol. 2, 43303, 2020.
17. K. Tanaka, S.-H. Yang, Y. Tokudome, Y. Minami, Y. Lu, T. Arie, S. Akita, K. *Takei, and K. *Nakajima, “Flapping-wing

dynamics as a natural detector of wind direction”, *Advanced Intelligent Systems*, 2000174, 2020.

18. *K. Inoue, *K. Nakajima, and *Y. Kuniyoshi, “Designing spontaneous behavioral switching via chaotic itinerancy”, *Science Advances*, vol. 6, No. 46, eabb3989, 2020.
19. *K. Nakajima, “Physical Reservoir Computing-An Introductory Perspective”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 59: 060501, 2020.
20. T. Nakajima, T. Yamaguchi, S. Wakabayashi, T. Arie, S. Akita, *K. Takei, “Transformable pneumatic balloon-type soft robot using attachable shells”, *Adv. Mater. Technol.*, 5, 200020, 2020.
21. N. Kawamoto, H. Ito, I. T. Tokuda, and H. Iwasaki, “Damped circadian oscillation in the absence of KaiA in *Synechococcus*”, *Nature communication*, 2020.
22. *M. Komatsu, T. Yaguchi, and K. Nakajima, “Algebraic approach towards the exploitation of "softness": the input-output equation for morphological computation”, *The International Journal of Robotics Research*, 2020.
23. *M. Yamada, H. Shigemune, S. Maeda, and H. Sawada, “Directional and velocity control of active droplets using a rigid-frame”, *RSC Advances*, 69, pp. 40523-40530, 2019.
24. *K. Nakajima, K. Fujii, M. Negoro, K. Mitarai, and M. Kitagawa, “Boosting computational power through spatial multiplexing in quantum reservoir computing”, *Physical Review Applied*, 11, 34021, 2019.
25. Sugi T, Ito H, Nishimura M, and Nagai KH, “C. elegans collectively forms dynamical networks”, *Nature Communications*, 10, 683, 2019.

公募研究

1. Y. Wang, M. Hayashibe, and *D. Owaki, “Prediction of Whole-body Velocity and Direction from Local Leg Joint Movements in Insect Walking via LSTM Neural Networks”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 9389 – 9396, 2022.
2. *A. Fukuhara, M. Gunji, and Y. Masuda, “Comparative anatomy of quadruped robots and animals: a review”, *Advanced Robotics*, Vol. 36, No. 13, pp. 612-630, 2022
3. *S. Tanaka, K. Takizawa, and *F. Nakamura, “One-step visualization of natural cell activities in non-labeled living spheroids”, *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, 1500, 2022.
4. *T. Matsuno and S. Hirai, “Reducing the Influence of the Contact Area on a Soft Capacitive Force Sensor”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol 6, Issue 3, pp. 5824-5831, 2021.
5. R. Kanno, S. Watanabe, K. Shimizu, and *J. Shintake, “Self-sensing McKibben artificial muscles embedded with dielectric elastomer sensor”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 4, pp. 6274-6280, 2021.
6. Y. Aishan, Y. Yalikul, Y. Shen, Y. Yuan, S. Amaya, T. Okutaki, A. Osaki, S. Maeda, and *Y. Tanaka, “A chemical micropump actuated by self-oscillating polymer gel”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 337, 129769, 2020
7. T. H. Yang, H. Hida, D. Ichige, J. Mizuno, C. R. Kao, and *J. Shintake, “Foldable kirigami paper electronics”, *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*, 2020.
8. *S. Arai, K. Morita, J. Tsutumi, M. Tanaka, and T. Hasegawa, “Layered-Herringbone Polymorphs and Alkyl-Chain Ordering in Molecular Bilayer Organic Semiconductors”, *Adv. Funct. Mater.*, 30, 2020.
9. N. Ota, G. N. Kanda, H. Moriguchi, Y. Aishan, Y. Shen, R. G. Yamada, H. R. Ueda, and *Y. Tanaka, “A microfluidic platform based on robust gas and liquid exchange for long-term culturing of explanted tissues”, *Analytical Sciences*, 35, 2019.
10. *Y. Tanaka, S. Funano, Y. Noguchi, Y. Yalikul, and N. Kamamichi, “A valve powered by earthworm muscle with both electrical and 100% chemical control”, *Scientific Reports*, 9, 2019.

学会発表 (国際学会・査読有)

計画研究

【A01】

1. J. Dang, T. Fujii, and H. Tanaka, “Design of a hummingbird-mimetic flexible wing with elastic passive feathering rotation limitation mechanism”, *International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2022)*, pp. 997-100, 2022.
2. T. Onodera, N. Iwamoto, and T. Umedachi, “In-hand Manipulation Exploiting Bending and Compression Deformations of Caterpillar-Locomotion-Inspired Fingers”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022)*, 2022.
3. K. Hanaoka, M. Shimizu, S. Shigaki, and T. Umedachi, “Measuring Motion of Deformed Surfaces for Soft-bodied Robots/Animals with Multi-colored Markers”, *IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft 2022)*, 2022.
4. R. Morimoto, S. Nishikawa, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi, “Model-Free Reinforcement Learning with Ensemble for a Soft Continuum Robot Arm”, *IEEE International Conference on Soft Robotics (Robosoft)*, 2021.
5. Y. Horii, K. Inoue, S. Nishikawa, K. Nakajima, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi, “Physical reservoir computing in a soft swimming robot”, *ALIFE 2021*, 2021.
6. Y. Nakamura, I. Karino, S. Mori, K. Tanaka, S. Nishikawa, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi, “Control of Pneumatic Cylinders Using Iterative Linear Quadratic Regulator with Deep Local Linear Dynamics for Explosive Motions”, *International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, pp. 125-132, 2019.

【A02】

1. M. Takakuwa, K. Fukuda, T. Yokota, D. Inoue, S. Umezumi, and T. Someya, “Development of the Flexible Conductive Bonding Method Without Any Adhesive for Wiring of Soft Robots”, *2022 MRS Spring Meeting & Exhibit, SB02.06.05*, 2022.
2. W. Y. Li, A. Takata, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Shape Recognition of a Tensegrity With Soft Sensor Threads and Artificial Muscles Using a Recurrent Neural Network”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021.
3. A. Kodaira, H. Nabae, T. Horiuchi, K. Asaka, G. Endo, and K. Suzumori, “Au/Pt Double-Layer Electrodes and Expanding Internal Chamber for Improving Air-Hose-Free Thin McKibben Muscles”, *IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2021)*, 2021.
4. Y. Yamanaka, S. Katagiri, H. Nabae, K. Suzumori, and G. Endo, “Development of a Food Handling Soft Robot Hand Considering a High-speed Pick-and-place Task”, *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 87-

92, 2020.

5. H. Nabae, A. Kodaira, T. Horiuchi, K. Asaka, G. Endo, and K. Suzumori, “Soft Polymer-Electrolyte-Fuel-Cell Tube Realizing Air-Hose-Free Thin McKibben Muscles”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 8281-8287, 2019.
6. A. Kodaira, K. Asaka, T. Horiuchi, G. Endo, H. Nabae, and K. Suzumori, “IPMC Monolithic Thin Film Robots Fabricated through a Multi-Layer Casting Process”, International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019), 2019.

【A03】

1. W. Sun, N. Akashi, Y. Kuniyoshi, and K. Nakajima, “Self-organization of physics-informed mechanisms in recurrent neural networks: a case study in pneumatic artificial muscles”, IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 409-415, 2022.
2. K. Takei, K. Xu, Y. Fujita, Y. Lu, S. Honda, M. Shiomi, T. Arie, and S. Akita, “Wearable multi-functional sensor sheet with feedback alarm system”, 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2021.
3. T. Murakami, A. Minaminosono, A. Wiranata, H. Okabe, H. Shigemune, S. Maeda, “Characteristic evaluation of Dielectric elastomer actuator based on the stretchable electrode density”, IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp.563-566, 2021.
4. T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Wearable and flexible heart pulse sensor integrated with a soft pump and actuator”, IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), 2020.
5. M. Komatsu, T. Yaguchi, and K. Nakajima, “Differential Algebraic Method for Direct Evaluation of Computational Capabilities of Physical Reservoirs”, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2019), pp. 187-190, 2019.
6. T. Kubota, K. Nakajima, and H. Takahashi, “Echo State Property of Neuronal Cell Cultures”, International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2019), pp. 137-148, 2019.
7. E. A. Torres, K. Nakajima, and I. S. Godage, “Information Processing Capability of Soft Continuum Arms”, IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 441-447, 2019.

公募研究

1. T. Matsuno, R. Miyagoshi, K. Shimizu, M. Ishihara, S. Watanabe, J. Shintake, K. Althoefer, and S. Hirai, “Grasping State and Object Estimation of a Flat Shell Gripper by Strain and Proximity Measurement using a Single Capacitance-Based Sensor”, IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 2022.
2. R. Futawatari, H. Terasawa, and O. Sugihara, “Flexible Light-Induced Self-Written Optical Waveguide Using Gel Material”, 12th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME2022), 2022.
3. S. Watanabe, Y. Ikemoto, and J. Shintake, “Active tensegrity structures based on dielectric elastomer actuators”, Proceedings of SPIE, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 2021.
4. Y. Morimoto, S. Miura, and S. Takeuchi, “Formation of contractile skeletal muscle tissue with tendon tissue at both ends”, MicroTAS 2020, pp. 855-856, 2020.
5. M. Kawai, M. Nie, H. Oda, Y. Morimoto, and S. Takeuchi, “3D pocket-shape dermis-equivalent as a skin material for a robotic finger”, IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), pp. 340-341, 2020.
6. K. Furusawa, “Effects of Mechanical Properties and Morphologies of Collagen Hydrogels on Tissue Hierarchical Structures of 3D Engineered Muscle Tissues”, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2019), pp. 69-71, 2019.
7. Y. Tanaka, S. Amaya, D. Ma, Y. Shen, O. Gusev, T. Kikawada and Y. Yalikul, “Biosensing and power generation robots using the anhydrobiotic chironomid for space exploring”, Micro Total Analysis Systems 2019, pp. 239-240, 2019.
8. Y. Tanaka, S. Amaya, W. Nagafuchi, N. Kamamichi and Y. Yalikul, “Ion based pressure driven electric power generator using micro/nano glass porous device”, Micro Total Analysis Systems 2019, pp. 1484-1485, 2019.
9. K. Wakamatsu, D. Hagiwara, H. Adachi, K. Ashigaki, A. Iwasaki, Y. Yamada, H. Habu, and T. Nakamura, “Packaging of Mixed Materials in Peristaltic Mixer for Solid Propellant Production”, 32nd International Symposium on Space Technology and Science, 2019-a-15, 2019.
10. K. Shimba, Koji Sakai, Kiyoshi Kotani, and Yasuhiko Jimbo, “Evaluation of Subtype Specific Ion Channel Functions on Axonal Conduction of Cultured Neurons with Microfabricated Recording Device”, ISSCR Annual Meeting 2019, 2019.

書籍

計画研究

【A02】

1. 古川 英光, 川上 勝 編著, “やわらかものづくりハンドブック”, エヌ・ティー・エス, 2022.
2. 鈴木 康一, 中嶋 浩平, 新山 龍馬, 舛屋 賢 編著, “ソフトロボット学入門 基本構成と柔軟物体の数理” オーム社, 2023.
3. 鈴木 康一, “いいかげんなロボット: ソフトロボットが創るしなやかな未来”, DOJIN 選書, 2021.

【A03】

1. K. Nakajima, and I. Fischer, “Reservoir Computing – Theory, Physical Implementations, and Applications”, Springer Singapore, (書籍 総頁数 458). 2022.

産業財産権

計画研究

【A01】

1. 望山洋, 水川友志, 筑波大学, 柔軟6軸力覚センサ、およびその演算方法, 特願 2022-096347 出願 2022/06/15, 国内
2. 田中博人, 栢菅宏規, 東京工業大学, 羽ばたき動作機構及び羽ばたき動作機構の使用法, 並びに, 羽ばたき動作機構を用いた推進装置, 特願 2018-184512 出願 2018/9/28, 国内

【A02】

1. 多田隼建二郎, 猪股翔平, 渡辺将広, 昆陽雅司, 田所諭, 東北大学, 自己修復機構およびソフトロボット, 特願 2020-090978, 出願 2020年5月25日 国内

2. 多田隈建二郎, 向出陸央, 恩田一生, 渡辺将広, 昆陽雅司, 田所諭, 可変剛性連結体, 特願 2020-090977, 出願 2020年5月25日 国内

【A03】

1. 若尾泰通, 櫻井良, 中嶋浩平, 推定装置、推定方法、推定プログラム、及び学習モデル生成装置, 株式会社ブリヂストン/国立大学法人東京大学, 特願 2020-210737, 出願 2020年12月18日国内
2. 櫻井良, 若尾泰通, 中嶋浩平, 推定装置、推定方法、プログラム、及び学習モデル生成装置, 特願 2019-229782, 出願令和 1.12.19, 国内
3. 竹井邦晴, 大阪府立大学, 歪センサ及びその製造方法, 特願 2019-084233, 出願平成 31.4.25, 国内
公募研究
1. 中村太郎 その他, 中央大学, ポンプユニット, 特願 2019-236321, 出願, 2019/12/26, 国内
2. 中村太郎 その他, 中央大学, ポンプユニット及びポンプ並びに搬送物の特性検出方法, 特願 2019-238223, 出願, 2019/12/27, 国内

シンポジウム

1. Overseas seminar at UTM, マレーシア, 2023/04/07-2023/04/08
2. IEEE RoboSoft 2023 Workshop: SOFT GRIPPERS FROM THE LABS TO THE MARKET, シンガポール, 2023/04/03
3. 第6回ソフトロボット学シンポジウム, 東京大学 本郷キャンパス, 2023/03/13
4. SIP フィジカル空間デジタル信号処理基盤・科研費新学術領域ソフトロボット 合同シンポジウム, ハイブリッド: 立命館東京キャンパス, 2022/7/5
5. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 シンポジウム「“いいかげん”を科学して未来を創るソフトロボット学3」, 札幌コンベンションセンター&オンライン, 2022/6/1
6. 第5回ソフトロボット学シンポジウム, オンライン, 2022/11/1
7. 国際会議 MRS 2022 シンポジウム企画「Symposium SB02—Materials, Power Sources, Sensors, Actuators and Mechanics for Untethered Soft Robots」, ハワイ, 2022/5/8-13
8. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 シンポジウム「“いいかげん”を科学して未来を創るソフトロボット学2」, オンライン, 2021/6/6
9. 第4回ソフトロボット創世シンポジウム (山形大 OPERA × ソフトロボット学 合同), オンライン, 2021/3/15
10. 31st 2020 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2020), オンライン, 2020/12/7
11. 第4回ソフトロボット学シンポジウム, オンライン, 2020/11/20
12. IEEE ICRA 2020 Workshop: Beyond Soft Robotics: Pioneer Perspectives and Interdisciplinary Collaboration, Online, 2020/0531
13. 「異分野融合で“いいかげん”を科学するソフトロボット学」, オンラインライブ, 主催, 2020/5/27
14. 「ソフトロボット学」の体系化に向けて, 東京大学, 共催, 2019/12/09
15. IEEE MHS2019, Nagoya, 共催, 2019/12/1-4
16. 「細胞を創る」研究会 12.0, 愛媛大学城北キャンパス, 共催, 2019/10/17-18
17. 第3回ソフトロボット学シンポジウム (一般公開), 大阪大学豊中キャンパス, 主催, 2019/10/4
18. 第2回ソフトロボット創世シンポジウム, 山形大学米沢キャンパス, 共催, 2019/9/12
19. 3rd International Workshop on Science of Soft Robots, The University of Tokyo, 主催, 2019/7/19
20. Living Machines 2019 Workshop: Science of Soft Robots, Kasugano International Forum in Nara, 共催, 2019/7/9
21. AIM 2019 Workshop on “Towards Soft Robotics for Biomimetics and Applications: Emerging Sensors, Actuators, and Methods”, Hong Kong Science Park, 共催, 2019/7/8
22. Robosoft 2019 Workshop on “Toward the nature of information processing in soft machines”, COEX (Seoul, Korea), 2019/4/14.
23. 2nd International Workshop on Science of Soft Robots, Tokyo Institute of Technology/Hakone Prince Hotel, 主催, 2019/4/11-13
24. 科研費新学術領域「ソフトロボット学」×山形大学 OPERA「ソフトマターロボティクスコンソーシアム」合同シンポジウム, TKP ガーデンシティ PREMIUM, 共催, 2019/3/20
25. 1st International Workshop on Science of Soft Robots, Tokyo Institute of Technology, 主催, 2018/12/4
26. 第2回ソフトロボット学シンポジウム (一般公開), 大阪大学豊中キャンパス, 主催, 2018/9/13
27. 第1回ソフトロボット学シンポジウム (一般公開), 東京工業大学大岡山キャンパス, 主催, 2018/9/19

アウトリーチ活動

1. 日本機械学会講習会「ソフトロボット学入門 -基本構成と柔軟物体の数理-」, オンライン, 2023/1/26
2. いいかげんなロボット展, 日本科学未来館, 2022/12/4
3. 体験型科学教育イベント「つくばこどもクエスチョン 2020」, つくば市役所, 2020/02/22
4. Tsukuba Mini Maker Faire 2020 ジャンプロボット製作 DIY 支援活動「生き物っぽさ(アニマシー)をつくろう」, つくばカピオ, 2020/2/14-15
5. 国際ロボット展, 東京ビッグサイト, 2019/12/18-21
6. Keio SFC Open Research Forum, 東京ミッドタウン, 2019/11/22-23
7. 超福祉展, 渋谷ヒカリエ, 2019/9/3-2019/9/9
8. 日本ロボット学会学術講演会オープンフォーラム, 早稲田大学, 2019/9/3
9. 誘電エラストマーアクチュエータの作製実習, 電気通信大学, 2019/9/3
10. やわらかいロボット, 生物型ロボット, 東進ハイスクール 東進衛星予備校大学学部研究会, 2019/8/10
11. MakerFair Tokyo, 東京ビッグサイト, 2019/8/3-4
12. ソフトロボットに見る バリューチェーンと「いいかげん」のススメ, 東京都「人と科学と現代アート」ステレオタイプを超えてゆけ, 2019/6/15
13. 第31回東大テクノサイエンスカフェ, 東京大学 本郷キャンパス 工学部 8号館, 2019/8/3
14. 我孫子市鳥の博物館テーマトーク, 我孫子市鳥の博物館, 2018/10/20
15. Dying Robots, Wired Creative Hack Award 2019, 2019/12/9

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域における研究組織と連携体制は図1に示した通りである。研究組織は、応募時のX00総括班、計画班(A01, A02, A03)と、2年目以降に加入した公募班(B01, B02)で構成した。X00総括班が**トップダウンステアリングで効率的に組織運営**しつつ、独創的な研究を現場から**ボトムアップ的に創発**した。そのための**有機的な研究融合**を促進するために**3層の連携体制**を構築した。すなわち第1層「課題内融合」、第2層「班内融合」、第3層「領域内融合」である。以下、各層を具体的に説明する。

第1層「課題内融合」は、応募前の組織構成計画の時点から推進した。本領域の特色として、**それぞれの計画研究課題を異分野からの研究者達で構成**した。例えば、研究項目A01内の計画研究(新山)では、ロボティクス、数理工学、動物解剖学を専門とする研究者3名からなり、柔軟ロボットアーム実機製作、連続体アーム数理モデル構築、脊椎動物の解剖と計測を相補的に進めている。これは、領域の発足によって初めて可能になった異分野協同である。この協同により、単なる生物規範ロボット研究の枠を超えて、ロボット規範動物研究が展開されて生物学にも貢献するという、当初計画からは予想できない成果も創発できた。これは、単独の研究室や同じ分野の研究者達だけでは起こり得ない。

第2層「班内融合」では、**公募班も各計画班に合流**し、班内研究と公募研究の融合と新展開を推進した。例えば、公募研究B02班「ソフトロボットの社会展開」として採用されたB02-03「皮膚創傷の予防・軽減機能を有した3Dゲルパッドを用いたソフト介護機器の開発」は、主にA02班と協同した。ここでは、看護学の研究者が提案した社会的ニーズのある介護機器が、計画班の工学研究者の技術によって実現できた。これは**計画研究と公募研究の調和**の好例である。

研究期間の後半から開始した第3層「領域内融合」では、第2層までの成果を踏まえて、領域全体で得られた知見を再構成(リストラクチャリング)して体系化することを目指した。そのために、学術体系に応じた3チーム(S01「ソフトロボット設計学」、S02「ソフトロボット物質学」、S03「ソフトロボット情報学」)で取り組んだ。S01, S02, S03の各チームは、それぞれA01班, A02班, A03班をベースにしつつも、班や研究課題に縛られずに新たに編成した。これらのチームの活動は、各研究課題・各班の研究活動と併行して行った。具体的な活動としては、日本語教科書(「ソフトロボット学入門 基本構成と柔軟物体の数理」、オーム社、2023年1月発行)および英語教科書(「The Science of Soft Robots: Design, Materials and Information Processing」、Springer、2023年発行予定)の執筆・編集を通して、知見の体系化と発表を行った。

さらに第3層「領域内融合」として、研究課題や班を横断して、融合研究の成果の社会実装と発信に取り組んだ。具体的には、車椅子搭載型ダチョウ規範アームや摘便シミュレータデバイスの試作などを行い、一般向け展示(「いいかげんなロボット展」、日本未来科学館、2022年12月)や領域主催の一般公開シンポジウムで展示した。この活動は、上記の3層体制で醸成した研究者間の有機的な連携があつてこそ実現したものである。

領域外との研究連携も推進した。国際共同研究として、A03班の前田と公募班の新竹が、EPFLのProf. H. Shea研究グループと共同研究を実施し、2019年度にNature誌に論文が掲載された。その成果は国内外のメディアで複数紹介された。さらにA02班の鈴木・難波江もProf. H. Sheaと人工筋肉とソフトEHDポンプの融合を実現し、Frontiers Robotics and AIに掲載された。

領域内の連絡にはSlackを活用した。これにより、組織構成や所属機関に縛られない研究者レベルでの活発なやり取りを促進した。また、クラウド共有フォルダの活用によって、効率的な領域運営を行った。班内融合(第2層)と領域内融合(第3層)の運営は、年2回の領域全体会議でトップダウンステアリングしつつ、多数開催する班内会議や班間・各研究者間のSlackおよびZoomを活用した密でカジュアルな連絡で行った。

以上のように、本領域の研究組織は、研究者相互の有機的連携および計画研究と公募研究の調和が、体制としても実作業としても保たれ、効率的に運営された。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

活用状況

設備等：

東京工業大学及び大阪大学において、領域の設備備品を共有設備として集約・設置することで、効果的な運用を図った。共有設備の運用を担当する技術補佐員を配置し、オンラインでの予約システムを構築することで効率的な運用が可能な環境が整備されている。関東拠点（図13）における主な設備としては、ソフトマテリアル3Dプリンタ、バイオマテリアル3Dプリンタ、高精度レーザ加工機及びレーザPIV装置が配備されている。関西拠点（図14）の主な設備は、高弾性3Dプリンタ、バイオマテリアル3Dプリンタとなっている。また、バイオマテリアルを用いた実験を想定し、関西拠点には、細胞培養設備、電気生理設備、そして遺伝子組み換え実験環境（P2, P1A）が整備されている。揮発性の薬品の使用にも対応するため、局所排気装置も設置されており、安全性を十分確保した実験環境が整備されている。



図13：関東拠点（東京工業大学）の様子

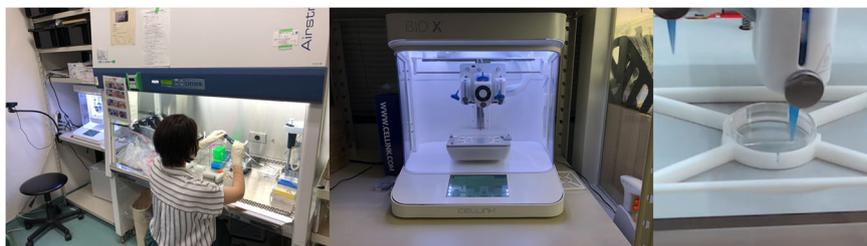


図14：関西拠点（大阪大学）の様子

各拠点に設置されている共通設備は、前述のオンライン予約システムにおいて、予約フォームから、本領域メンバーの使用予約が可能となっている。また本予約システムの整備に加えて、共通設備担当の技術補佐員との連絡や利用者間での情報共有を気軽に行うことが可能なようにSlackを用いたプラットフォームを整備している。これにより、各設備を効率よく利用可能な状態になっており、各領域メンバーの研究推進を強力に後押しする環境を整えている。そして、技術補佐員等による使用者講習会を適宜実施することによって、効果的な共有設備の活用を図っている。これまでに、関東拠点では600回以上の利用があり、順調な運用が実現している。

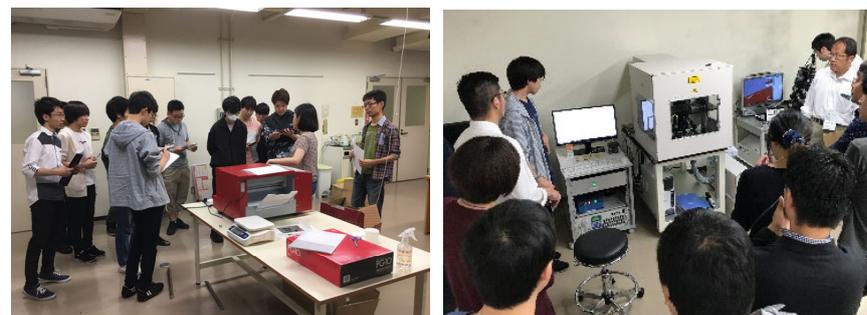


図15：使用者講習会の様子（関東拠点）

領域内共同研究支援：

異分野融合研究を促進するために、研究班を跨いだ融合研究プロジェクトに対して研究支援を行った。具体的には、「摘便プロジェクト」と「クラゲプロジェクト」の2つのプロジェクト（図16左は摘便シミュレータ（摘便プロジェクト）、右はクラゲのシンクロ実験（クラゲプロジェクト））が立ち上がった。それぞれ、領域内の研究成果をシステム融合したロボットシステムを構築するものであり、活発に共同研究が行われた。摘便プロジェクトでは、ヘルスケア情報学、Human-Computer Interaction、材料、メ

カニズム、情報処理、アクチュエータ、センサといった多くの分野の研究者が参加し、積極的な研究開発が行われた。実際に看護師の経験者を招き、試作機の評価も行っている。クラゲプロジェクトでは、柔らかいロボットのモデルとしてのクラゲにおけるリズム現象に関する研究を生物学、ロボット学の観点のみならず、鶴岡市立加茂水族館における一般向け教育、啓蒙活動の一環として取り組んでいる。

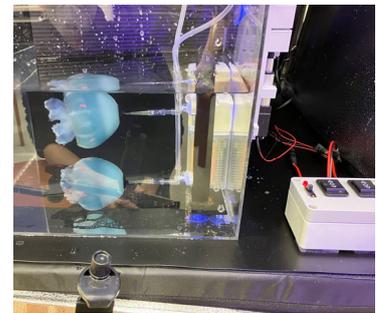
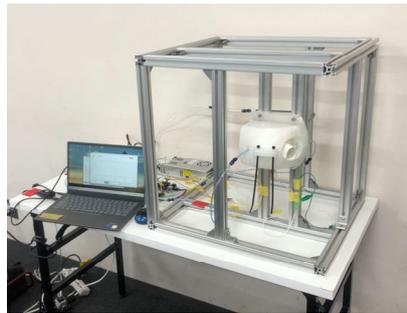


図 16：領域内共同研究支援（左：摘便シミュレータ、右：クラゲプロジェクト）

アウトリーチ活動：

領域全体の成果のアウトリーチ活動に関しても積極的に行っており、本領域の成果であるロボットの動態展示を「いいかげんなロボット展」として一般市民向けに日本科学未来館にて行い 600 名以上の来場者があった。（図 17）加えて、本領域主催の一般公開のシンポジウム（第 6 回ソフトロボット学シンポジウム）においても、本領域の成果物の動態展示を行った。



図 17：展示会の様子（日本科学未来館）

また、本領域での成果の海外への発信にも力を入れており、マレーシア工科大学にて、領域の研究者を派遣しての海外セミナーを行い本領域の成果報告を行うとともに参加者と議論を行った。（図 18）



図 18：海外セミナーの様子

その他：

若手研究者の育成に向けた支援活動として、若手海外派遣の援助を行った（渡航先：スイス連邦工科大学、Max Plank Institute、University of California Santa Barbara 校に対して計 4 件）。また、海外から研究者を招聘し、国際ワークショップを開催するなど、領域内外・国内外の交流や研究成果発信にも力を注いだ。

領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）

総括班：COVID19 の影響により、延期されていた一般向けロボット展示会（東北・九州）を行う。

A02 班イオン交換膜が実現するソフトロボットのモーションコントロール：ソフトロボットの開発を行う。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域は「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択した。

2022年度に東京工業大学国際先駆機構(International Research Frontiers Initiative, IRFI)が立ち上がり、強力な国際連携と未開拓で革新性の高い研究分野を開拓するために、IRFI内にリビングシステムズ材料学研究拠点 Living Systems Materialogy (LiSM : <https://sites.google.com/irfi-lism.com/irfi-lism>) が設置された。学長直下のもと世界トップの研究を推進するために、ソフトマテリアル・化学・分子ロボティクス・ソフトロボティクスが強く融合した研究拠点が設置された。新学術領域ソフトロボット学から、鈴森、前田、田中、藤枝、山田が所属しており、学内に新たな研究組織の発足に繋がった。

継続発展的研究として、鈴森ら(東工大)の2023年度科研費基盤研究(S)「深層生体模倣ロボティクス」が採択され、新たな研究を展開している。ソフトロボット学をケアや看護へ展開する新たな看護デザイン学について宮川(慶應大)を中心に「ケアの見える化」を新たなコンセプトとして工学系研究者らと発足させている。具体的には摘便プロジェクトにおける物理シミュレータ(摘便訓練用ソフトロボット、図19)の看護教育への還元である。2024年度を目途に看護ステーションに物理シミュレータを設置し、看護師の摘便の実践教育ツールへ展開する見通しを得ている。

大学における正式な授業としてソフトロボット学を鈴森、前田(東工大)、平井(立命大)、清水(大阪大学)らが開講している。また福田(理研)台湾国立中興大学において集中講義としてソフトロボット学におけるフレキシブルエレクトロニクスを担当している。

ソフトロボット学に関する書籍(図20)として、「いいかげんなソフトロボット」(化学同人、鈴森康一)、「ソフトロボット学入門」(オーム社、新学術領域ソフトロボット学のメンバーが中心)、「The Science of Soft Robots: Design, Materials and Information Processing」(Springer、新学術領域ソフトロボット学の全メンバー)、「Reservoir Computing: Theory, Physical Implementations, and Applications」(Springer、中嶋浩平 編集)が出版された。特にソフトロボット学入門、The Science of Soft Robotsはソフトロボット学の教科書を日本語、英語で出版しており全世界に向けて発信している。これは本領域の発足時の計画通り、世界標準のソフトロボット学の教科書を出版することを十分に達成している。

本領域のメンバーが3件ベンチャー企業を創業しており(s-muscle, ソラリス, AssistMotion)、さらに3件のベンチャー企業を領域発足後に起業した。(f-Tech, Auror, Prostork)(図21)。ソフトロボット学における技術を活用し、医療、健康、福祉、インフラ検査など分野において社会実装している。

このように融合を基軸として、人材育成、社会実装、組織改革を実現しており、大きな波及効果があったと言える。

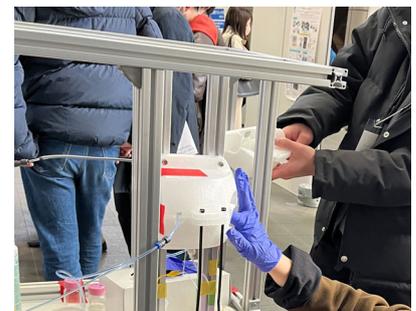
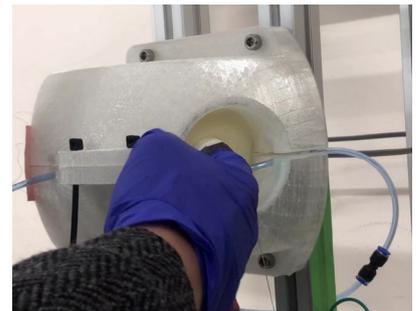


図19：物理シミュレータ(摘便訓練用ソフトロボット)のデモ

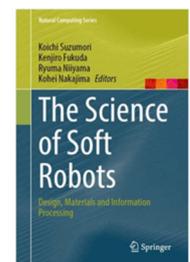
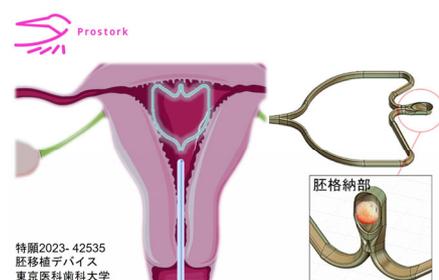


図20：出版したソフトロボット学の教科書



特願2023-42535
胚移植デバイス
東京医科歯科大学

図21：本領域から創業されたベンチャー企業

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和5年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域では領域計画書に記した通り、「**光型人材**」（複数の深い専門性と広い視野を持ち世界をリードして新研究領域を切り拓く研究人材）と呼ぶ若手研究者像を掲げ、総括班内に人材育成担当を設け、「**スーパー若手研究者育成計画**」に沿って複数の施策を実行した。以下、具体的な取り組みを説明する。

国内外武者修行

国内外の研究機関と連携して若手研究者・大学院生の交換派遣を推進した。

若手海外派遣：40歳未満の若手研究者ならびに大学院生を対象に、活動費を総括班予算で支援した。領域内で公募し総括班で審査、採択していた。2019年度は、難波江裕之助教(東工大)がスイス連邦工科大学に約3週間(図11)、山田直輝(阪大院生)がMax Plank Instituteに2か月滞在して在外研究を行った。2022年度は、孫健(東工大院生)がUniversity of California Santa Barbara校に3ヶ月、藤井星空(阪大院生)がMax Plank Instituteに2ヶ月滞在して在外研究を行った。その結果、研究成果の論文掲載、先方の研究者の長期招聘(JSPS外国人特別研究員(戦略的プログラム)の採択等へつながった。

国内留学：領域に参加する研究機関間で院生の人材交換研究を進め、広い見識の涵養、共同研究の推進を進めている。2019年度には、阪大の清水グループの学生(川嶋)は領域内の融合研究を進める東工大の藤枝研に滞在し薄膜シートの研修を行った。

国内外の若手ワークショップ(通称「若手が吠える会」)開催(図12)

ロボティクス分野におけるトップレベルの国際会議であるIEEE ICRA2020において、ソフトロボティクスに関するワークショップ Beyond Soft Robotics が採択され(採択率48/87≒55%)、実施した(COVID-19感染拡大の影響によりオンラインで開催。参加者約400名。事後公開ビデオアクセス数を加えると約2400名.)。この中で、若手研究者の発表の場を設けた(5件の発表を採択)。また、日本国内最大規模の学会である日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会において、2020年より、4年連続でソフトロボティクスに関するワークショップを企画した。この中で、【ソフトロボティクス若手未来を語る講演】を設け、毎年3件の若手招待講演を実施し、若手研究者の活躍の場を設けた。

若手研究者間交流(図13)

若手研究者、学生間の組織的な国際交流を実施した。2019年度はJSTのさくらサイエンスプランを活用して、マレーシア工科大学の若手研究者と学生10数名を招き、芝浦工大、中央大、東大、東工大において、領域の若手研究者、学生との研究交流を実施した。

若手企画による相互勉強会の実施

若手研究者が中心となって実践的なノウハウや知識を相互に教えあう領域内のワークショップが、自主的に複数生まれている。プリントドエレクトロニクスに関するクラフトワークショップ、ソフトロボット数理解勉強会、論文の書き方勉強会等、が企画された。

具体的成果

領域の活動を通して「スーパー若手研究者育成計画」活動が寄与した例が生まれている。主なものを列挙する。いずれも39歳以下の研究者である。

学会賞受賞：令和2年度文部科学省若手研究者賞(新竹)、IEEE/SICE SIYA2019-IROS(難波江)、日本ロボット学会研究奨励賞(渡辺)、The 10th ICFPE Outstanding Paper Award(高桑)。

また、領域活動を通して、多くの研究者が新しいポストを獲得した。以下に主な例を示す。梅館(東大講師→信州大准教授)、田中(東工大テニユアトラック准教授→テニユア取得)、川節(東大ポスドク→阪大助教)、福田(埼玉大学招聘准教授)、藤枝(早大講師→東工大講師→東工大准教授)、竹井(阪府大准教授→阪府大教授→北大教授)、重宗(早大任期付講師→芝浦工大助教→芝浦工大准教授)、清水(阪大准教授→長浜バイオ大教授)、前田(芝浦工大准教授→芝浦工大教授→東工大教授)。

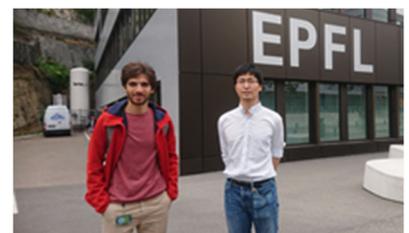


図11：EPFLでの在外研究



図12：若手が吠える会



図13：マレーシア工科大学若手研究者、学生との研究交流

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

染谷隆夫先生(東京大学・工学系研究科・教授)

本新学術領域は「やわらかさ」に立脚し、生物の特長を備えた、生体システムの価値観に基づいた自律する人工物を企図した新しい「ソフトロボット」を構築するという取り組みです。この目標に向けて、機械工学のみならず、電気電子、材料科学、生物学、情報処理など複数の領域からなる研究者が集結し、学問体系化に向けた取り組みを進めてきました。機械・電気・生物・情報など様々な分野の専門性を持つ研究者が本領域に集い、異分野融合研究を推し進めたことでソフトロボット学が目覚ましく発展したと評価できます。一例として特筆すべき例としては、生きた昆虫の行動を阻害せずに超柔軟なエレクトロニクスを体表に貼り付けるために必要なデバイスのヤング率・硬さの相関関係を定量的に明らかにし、この知見を利用して超薄型有機太陽電池を昆虫腹部に貼り付けた再充電可能なサイボーグ昆虫による無線歩行制御を実現したことが挙げられます。電気電子・機械工学・生物学の専門性が有機的に融合されることで、ソフトロボット学の新たな価値を提示することができており、本領域によって示されたソフトロボットの展開を端的に示す一例になったといえます。エネルギー源・アクチュエータ・センサ・ロボットのインテグレーションが進むことで、真に自立駆動を行うソフトロボットが実現し、上記に示されたようなサイボーグ昆虫による災害救助などのタスクや、人に寄り添ったロボットの利用方法など多くの可能性が広がったといえます。領域を構成する多くの研究者が30-40代の若手研究者であり、若い研究者の高いモチベーションを領域代表である鈴森先生が適切にマネジメントしながら着実に成果を生み出しており、総括班の適切なマネジメント体制により目覚ましい成果が挙げられてきました。また領域の枠を超えた国内外の共同研究も期間中に積極的に展開され、それによって世界的にも先進的な成果がいくつも報告されております。以上のように、本新学術領域での成果は異分野横断的な発展性の高い成果であり、ソフトロボット学の発展に寄与した成果は高く評価できます。

中垣俊之先生(北海道大学 生命科学院・教授)

生物のしなやかな機能性を追求するロボット学は、1990頃の特定期領域「自律分散」から、近年の新学術「移動知」など、これまでも複眼的に研究されてきた大きなテーマであるが、本領域「ソフトロボット学の創成」は、いよいよ生体特有のアクチュエータともいべきソフトマテリアルの駆動と制御に焦点を絞り、生体生命科学と電気機械材料工学との双眼鏡で新たな結像を目指すものである。生体運動・行動の観察・実験・解析という手法と工学的なモノづくりとが、双方から積極的に越境する雰囲気醸成されており、特に若手中心の分野勉強会・研究会が活発である。これは公募班の選考がうまくいっていること（40歳前後の有望な若手を広い分野から集めている）と、領域の運営がよく機能していること（計画班メンバーが異分野交流を先導しつつ良い雰囲気を醸成している）との相乗的な成果であると思われる。当初の研究計画は、ほぼ順調に進んでいると思われる。研究期間の後半では、「摘便君」、ヒモムシロボット、身体から生える柔らかいアバタロボット、ダチョウアーム等、当初の予定にはなかった新しい融合研究も芽生えている。

計画班 A03 は、私自身の専門に近く、その活動状況をよりよく見ているので、A03 班の活動を中心にさらにコメントしたい。A03-2 は、ソフトロボティクスの本丸ともいべきゲルロボットの開発を狙い、酸化還元反応や電気刺激に応答するゲル物性に基づく駆動から、しなやかな体づかいを実現している。それは、生物が作り出すリズム運動や蠕動的這行へと繋がっており、A03-3 での生体運動のリズムとパターンの制御解明との比較検討へと見事につながっており有効である。さらに特筆すべきは、A03-1 の physical reservoir computing 理論が、領域全体を包括する概念装置「material intelligence: マテリアルの柔らかさがもたらす情報処理」として機能していることである。

津田一郎先生(中部大学創発学術院院長・教授/北海道大学名誉教授)

本新学術領域研究は鈴森総括のリーダーシップのもと、多くの画期的な研究成果を上げた。それらは、工学（機械工学、電気・電子工学、制御工学）、情報科学、材料科学、生物学の融合研究によってなされた。E-kagen を領域共通概念として、総括班による三層異分野融合推進が成功した。異分野融合は“言うは易し行うは難し”の典型であるが、本領域では課題内融合、班内融合、領域融合を重層的に行うことで異分野融合研究を実現したことは、他の融合研究のお手本になると思われる。計画班員も公募班員も若手研究者が中心となって構成されていたことが成功の大きな要因だろう。また、本領域5年間のうちほぼ3年間が新型コロナ感染症との闘いでもあった。対面での議論が制限される中、オンラインをうまく活用して、難局を乗り切った。

センサーレベルからシステムレベルに到るまで、数多くの世界初の研究成果が得られた。

筋肉脳オルガノイドロボットの試作、ウェット生物体のハンドリング技術の開発、鳥類の翼の弾性計測、ダチョウ頸部の3次元形状と変形に必要な力の計測と試作、多関節の超冗長マニピュレータの試作などを基盤としたソフトロボット設計学の確立、柔軟材料の動きを活用した介護向けデバイスの計測メカニズムの構築、センサ、アクチュエータをソフト材料上で実現させる原理開発、柔らかいエレクトロニクスの開発などを基盤としたソフトロボット運動制御の実現、ゲルで実現する体内時計の研究、線虫の集団運動の光遺伝学による制御方式の確立、化学ロボットを実現するためのソフトアクチュエータの開発、物理リザーブ計算の飛躍的な展開などを基盤としたソフトロボットの柔軟知能機構の開発に見られるように、当初目標をほぼ実現するとともに、期待以上の成果が上がった。ただし、システム化は難問であるので今後の発展に期待したい。

中間評価の時にも述べたように、物理系や化学反応系、さらには高分子などにみられる秩序形成において、その形成過程そのものが計算過程であるという考えが1980年代に提唱され、DNAを含むさまざまな物理化学系の計算モデルが提案された。しかしながら、当時においては物理現象と情報の関係が明らかでなかったためにアイデアの段階で終わっていた。近年、本研究領域の中嶋氏によって生物の柔らかい動きがリザバー計算機になりうるという発見があり、リザバー計算機自体が時空パタン学習において普遍性を有するためにこの物理的リザバー計算機の汎用性が国際的に注目を集めた。本領域研究において、物理リザバー計算は融合研究を行うことで、さまざまな精密計測、自己組織化過程、情報のコーディング過程などに応用できる可能性が広がった。更には、力学系の複雑な分岐構造の埋め込みの実装にも適用可能であると考えられ、今後の発展が期待される。

ヒトを含む神経系を持つ生物では、脳と身体の柔軟なカップリングが知能的な機能発現を可能にするといわれている。しかしながら、脳と身体の柔軟なカップリングとはそもそも何か、いかにしてそれは可能かなど基本的な創発原理が未解明のままである。ソフトロボット学の学問的広がりの一つとして、この脳・身体のソフトカップリングの原理解明があると考えられるが、本領域では筋肉・脳オルガノイドカップリングが研究され成果を上げた。この分野の発展は知能創発機構の解明に必要な機能システム技術を提供すると考えられる。

最後に、本領域で行われているソフトロボット創成シンポジウムの国際会議版をシリーズものとして実施し、国際的なイニシアティブをとることを願っている。

樋口俊郎先生(東京大学・名誉教授)

ソフトロボットは、金属などの硬い材料からなる従来のロボット技術とは異なり、柔らかい構造を主としたロボット技術であり、世界各国で近年盛んに研究が行われている。日本では、ソフトアクチュエータ、機能性ソフト材料、フレキシブルエレクトロニクス、物理コンピューティングなど、ソフトロボットに関連する世界トップレベルの研究が多数行われており、これらの点在している技術をソフトロボット学として体系化することが本領域の目的となっている。

本学術領域の大きな特徴は、多数の分野に展開している関連技術を統合するために、異分野研究の積極的な融合を促す体制を確立していることである。各計画研究は、二分野以上の研究者によって遂行され、研究班も研究分野ではなく機能によって分類されることで、多くの分野の研究者によって構成されるようになっている。このような組織作りにより、融合研究が自然と行われる環境が構築されている。これらの効果は、多くの融合研究の成果が発表されていることによっても裏付けられている。

また、研究班を跨いだ共同研究も推奨されており、基礎研究から社会応用に渡る複数のプロジェクトが企画・実行されている。これらは本学術領域の多様な人員の協同により初めて可能となったものばかりであり、科学的基礎から実応用までの広範囲な研究対象を取り扱っている点も本学術領域の特徴と言える。さらには、本学術領域の成果を活用したスタートアップ企業も複数設立され、学術研究において疎かになりがちな実社会展開も着実に実行されており、今後の展開に期待が持てる。

学問の体系化においても独自の手法を採用している。前述の研究推進における組織体制を体系化の枠組みに流用するのではなく、より体系化に効果的な体制に組み替えた新たな人員構成をとることで、単なる研究成果の集合ではなく完成度の高い知識体系の構築を可能としている。この結果を和文及び英文の標準テキストとしてまとめており、広範囲の分野に及ぶソフトロボット学の体系化とその普及への取り組みは大いに評価できる。

西出宏之先生(早稲田大学・教授)

鈴森領域代表の力強い指差しのもと班員が一体となって運営され、新しい領域に踏み込み学理として創生する組織研究として挙げられた成果は、学術論文を水準高く共同研究成果を含め数多く出版されたこととあわせ極めて大きい。「あいまいさ」を科学として咀嚼し「しなやかな」ロボットを創り出す工学として、設計学・材料学・情報学を融合して体系づけたことは、ソフトロボットの研究活動での世界トップランナーとしての地位を後押しした。同じ材料でもウエット・ドライ系での考え方の違いや位置づけが明示されたことも、分かりやすかった。

若手研究者を惹きつける魅力、また多様な分野を互いに刺激しあって融合する包含力も高く評価できる。着想・成果の発表ではふんだんに動画でのアピールまた触れる成果物と、まさに「これからのサイエンス」のあり方が示され、シンポジウムはじめ参会して新鮮で印象深かった。

社会に展開・実装できるのが、この新学術領域の強みである。カーボンニュートラル、物質・エネルギー収支のトータル評価、さらにはSDGsやWell-Beingなど社会全体を括るアセスメントを睨んで、安全・安心も保証された技術の提示でなければ、もはや研究対象として立ち位置は無い時代になっている。「ソフトロボットは持続的社会にどう貢献するか？」とChatGPTに問いかけたところ次の平易な答えであった。「柔軟で軽い素材から作られており、より少ないエネルギーや資源で製造でき、環境への負荷は低減します。電気駆動だけでなく、空気や水の力でも作動できるので、エネルギー消費は削減できます。また周囲や人との接触時に安全性高く、ケガのリスクを軽減します。」本領域での成果が正に、それらの定量的な実証として広く社会に定着するものと思われる。材料・化学の立場からは、さらに未着手である、ソフトマテリアルの摩耗層、動作機能の自己修復、サーキュラーマテリアルとしての設計、抗菌・抗ウイルス表面、簡易に焼却廃棄できる実例など、次への波及も見てみたい。本領域の研究者の見識と力量によって、まずはホームグラウンドであられる機械工学での位置づけ強化に期待大である。

最後に、組織研究として代表者のもと研究班員が多く時間を割いて注力され実り挙げたことに敬意を表する。