

領域略称名：ソフトロボット学  
領域番号：8003

令和2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）」  
に係る中間評価報告書

「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2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	研究領域の目的及び概要	5
4	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	7
5	研究の進展状況及び主な成果	9
6	研究発表の状況	14
7	研究組織の連携体制	19
8	若手研究者の育成に関する取組状況	20
9	研究費の使用状況・計画	21
10	今後の研究領域の推進方策	22
11	総括班評価者による評価	24

**研究組織** (令和2年6月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、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 ソフトロボットの総括	平成30年度 ～ 令和4年度	鈴森 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	東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師	2
A01 計	18H05467 生物の自己変化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	5
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	4
A02 計	18H05469 弾性グラディエントナノ薄膜を利用した自由変形可能な太陽電池の創成	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・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	鈴森 康一	東京工業大学・工学院・教授	3
A02 計	18H05471 超柔軟素材を用いた分岐・伸展位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・特任准教授	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	芝浦工業大学・機械機能工学科・准教授	4
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	3
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、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	東京大学・大学院工学系研究 科・講師	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・准教授	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・助教	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	京都大学・白眉センター・助教	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・准教授	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	理化学研究所・生命機能科学研究センター・チームリーダー	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	東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師	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	葎田 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
公募研究 計 16 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、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 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

従来、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、近年、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年でいろいろな分野で勃発している。

これは偶然ではない。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いる。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」を位置付けている。

ソフトロボットへの関心はこの10年で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でも大型予算を使ったソフトロボットに関するプロジェクトが行われている。

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」の創成を目指している。

#### 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。本領域では、出会うはずのなかったこれら研究者を出合わせ、「やわらかさ」を目指す新興学術の種を融合する。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出す。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」の創成を目指している。

従来のロボット学の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たい。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う。

#### 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、それらを積極的に活用する。

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いる。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」としてまとめ上げるために、(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ている。

(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」の体系化を行う。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う。

## 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う。

- ・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ている。

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ている。

【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ことが期待できる。【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。

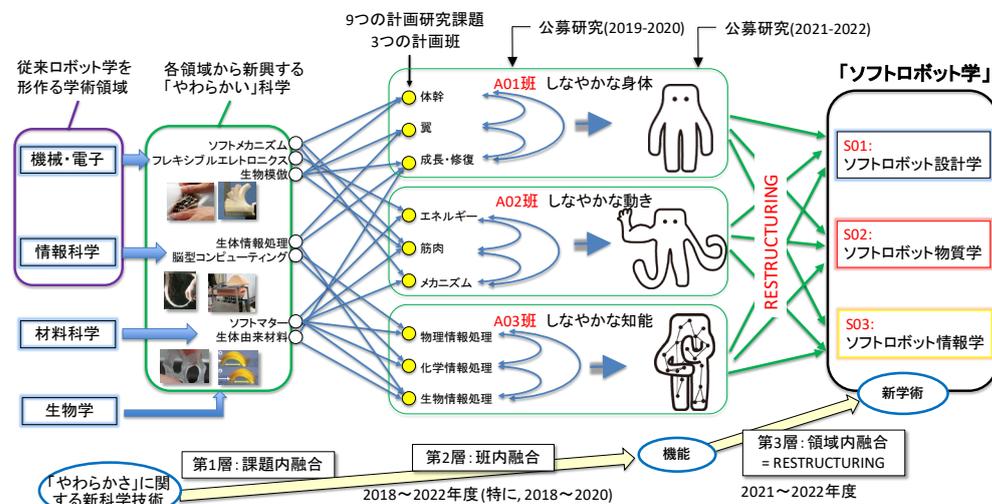


図1：全体構想(「三層構造」による異分野融合推進)

## 4 審査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。

### 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)

本領域研究では、公募研究に2つのことを期待している。

一つは、ソフトロボット学を創り出す「原動力」としての役割である。これは、本領域の推進施策の一つである「ボトムアップエンジン/トップダウンステアリング」のボトムアップエンジンに相当する。ソフトロボット学推進の原動力は、様々な分野で勃興する「やわらかさ」に関する新しい学術の芽である。計画研究は、機械、電気、物質、情報、生物、といった幅広い分野から新鋭の研究者を選びすぐって構成しているが、必ずしも全網羅できている訳ではない。特に、生物、材料の分野にはまだ多くの可能性を持った研究者や学術の芽が多くある。計画研究ではカバーしきれていない「新しい学術の芽」を取り入れたい。

もう一つの期待は、ソフトロボット学の「成果の活用」を指向する研究者たちの参入である。これはソフトロボット学が学術的意義のみならず、実用的意義も持った科学である点に注目するからである。ソフトロボット学の成果は、産業界のみならず、介護・福祉・医療といった様々な分野で実用的価値の創造につながる大きな可能性を持っており、これこそがソフトロボット学が目指す大きな目標となり、学術を牽引する大きな力となりうる。このような観点から、各分野の課題を把握し、ソフトロボット学の成果を活用してこれら課題に取り組んでいく研究者の参加を期待している。

この2つの期待と上記(留意事項)での指摘を踏まえ、公募研究の位置づけと募集方法について学術調査官も交えた議論を行い、既存の3つの研究班「A01:しなやかな身体」、「A02:しなやかな動き」、「A03:しなやかな知能」とは独立した、公募研究課題のみからなる研究班「B01:やわらか科学の芽」、「B02:社会展開」(それぞれ、上記2つの期待に対応する)を設ける異例の公募方法をとることにした。本領域では異分野融合を強く志向した体制設計を行ったため、計画研究課題からなる既存の研究班 A01, A02, A03 班はそれ自体が極めて学際的な内容となっている。このため、公募研究として応募を考える研究者にとってはほどこの研究班に応募したらよいのか判断しづらいからである。

これは一見計画班と公募班の融合を妨げる体制と見えるかもしれないが、実際は全く逆で、極めて効果的に機能している。

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計画研究課題の内容やそれとの共同研究可能性について情報を提供する窓口を領域のホームページ上に設け、問い合わせ者に対して公平に相談対応を行った。また、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。

公募研究が始まって1年間経った今振り返ると、この工夫は極めてうまく機能している。一例をあげると、機能性ソフトポリマーに関する「新しい学術の芽」をもって採択された新竹氏(電通大)は、柔軟物の駆動に関する計画研究課題の前田氏(芝浦工大)と連携して stretchable pump(伸展可能なポンプ)の共同研究を進め、その成果は早くも Nature に掲載された。また、看護学の「社会ニーズ」の知見を有する宮川氏(慶応大)は「身体とベットマットの力学干渉と褥瘡マット」という課題をもって領域に参加した。領域では、この課題は A02 班「しなやかな動き」に共通する本質的課題という共通認識に達し、現在 A02 班の共通研究課題として研究班内で研究者とディスカッション及び研究を始めている。

### 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)

本指摘についてはわれわれも同様の認識を持っており、さっそく、OPERA との連携、および計算力学系

の強化を行い、対応した。

### 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)との連携を進めた。具体的には、2019年3月20日に第1回合同シンポジウム(於、TKP ガーデンシティ Premium 神保町)(図2)、2019年9月12日に第2回合同シンポジウム(於、山形大学)を実施した。また、第3回合同シンポジウムを2020年3月4日(於、東京)で計画していたが新型コロナウイルスのため延期している。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、講演、パネルディスカッション、ポスタセッション等を行い、極めて有用な情報交換、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、継続的な情報交換が始まったほか、一部は共同研究の開始に至っている。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、人材育成に関する連携も始まっている。



図2：第1回合同シンポジウムの様子

### 計算力学系の強化

本参考意見もわれわれの認識と合致しており、公募研究課題公募時ならびに審査時において、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公示した。その結果、ソフトロボットの力学を専門とする平井氏(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班の前田氏の研究グループではスポンジの変形・力学の研究を進めているが、2年目より統計力学、非線形力学を専門とする博士研究員を研究協力者として新たに採用した。A02班の藤枝氏(東工大)のグループではバイオアクチュエータのモデリングについてイタリアの聖アンナ大学院大学と共同研究を開始した。また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。

このように、計算力学系についても、人的面でも組織面でも大きく強化され、また、その活動が領域全体で共有できるように、workshopの開催やslack等を通じた密な情報交換を行う体制を構築した。

### 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)

本領域の考え方の核となっているコンセプトを評価いただいたことは、このコンセプトに沿った領域活動を自信をもって推進することができ、大変心強く、有難い。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)。従来の科学技術が認めてこなかったあいまいさ、いいかげんさを認めることで、いいかげんに結果を得る、というこの言葉を、日本発のkey wordとして広めたい。また、ソフトロボット学が持つ実用的価値の可能性もあらためて認識しており、社会的なインパクトにつながるよう、情報発信や産業界との連携可能性についても検討していきたい。

## 5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか、(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) 研究の進展状況

研究推進、領域運営とも、当初の計画通り(一部は当初の計画以上に)順調に進んでいる。これまでの約2年の領域活動により、本領域は、海外の大型プロジェクトと並び、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世界的にも位置付けられるようになった。以下、研究項目ごとにまとめる。(なお、B01,B02班として公募した公募研究課題については、前述 4.①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ているので、ここでもA01,A02,A03に含めて記載する)。

### X00 総括班

本領域では特に異分野融合の推進を重視しており、そのための効果的な活動体制確立を中間評価時までの主要な目標としていた。現在、当初計画した以上の活発で効果的な活動を行っている。

総括班研究代表者(=領域代表者)を中心に、当初計画した分担に基づき、総括班の研究分担者間の連絡を密にしながら本領域の効果的な運営支援に取り組んできた。総括班会議を2か月に1度の頻度で定期的開催するとともに、オンラインのチームチャットプラットフォーム Slack を通じて日常的に総括班内で密な連絡を取り合っている。COVID-19による会合自粛の際もオンラインで計画通り密な連携体制が構築できている。以下、活動項目ごとに概略を述べる。

- **領域内連携**：学生も含めた領域の関係者全員が参加する領域会議(1泊2日)を年2回の頻度で開催。また、東工大と阪大に共同研究拠点を設置、整備し、専任の技術員の配置、設備使用講習会開催、予約・遠隔モニタリングシステム整備、等、効率的な管理運営を実施している。また、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。
- **領域外連携**：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」や新学術領域「発動分子学」等、関連するプロジェクトとの合同シンポジウムの企画、開催を実施。日本機械学会、日本ロボット学会等の関連学会とも、特集号刊行、シンポジウム共催などの連携を行った。
- **国際連携**：国際ワークショップの開催、国際学会の共催、海外セミナー企画、国際学会でのワークショップ開催、等を行った。また、海外のソフトロボット研究機関と協力提携体制を構築した。
- **人材育成**：独自のスーパー若手人材育成計画に沿って、若手研究者/博士課程学生の在外研究を支援した。また、クラフトワークショップを開催し、領域内での若手研究者の勉強の機会を作った。また、IEEEと協力して、ソフトロボットに関する summer school を企画している。
- **広報活動**：ウェブサイト運営。パンフレット作製を行った。また、アウトリーチ活動として市民向け講座を開催した。

### 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。剛体からなる従来のロボットシステムを拡張し、ソフトネス(柔軟性)を取り込むために、工学(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る。ここでは、微視的な分子・細胞レベルではなく、巨視的な多細胞システムあるいは個体のレベルでの振る舞いに注目する。特に、動物の機能解剖学や生物ロコモーションの解析にロボットを積極的に利用する。動物の身体を深く理解し、やわらかさの利点を明らかにするとともに、工学と生物学の双方に貢献する学術研究を目指す。ソフトロボット設計学構築のための、領域の期間内での達成目標は下記の通りである。

- 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

中間評価報告の段階では、以上に述べた期間全体の達成目標のうち、やわらかい機構の振る舞いを定量的に扱うためのモデル化や計測手法の開発が進展した。具体的には、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が実現した。また、多孔質構造を与えたエラストマーや、生きた筋肉細胞などの柔軟材料の基礎特性に関するデータが得られている。さらに、多数の関節を持った超冗長マニピュレータの力学シミュレーションや試作を開始しており、設計学の構築やその実証に向けて研究は順調に進展している。これらの融合的な研究活動では、試料の準備から実験まで、工学者と生物学者との密接な連携が鍵であった。

公募班との連携によって、柔軟材料の新しい選択肢として土中で分解する生分解性材料や、高圧に耐えるエラストマーについても実験的に基礎特性が明らかになりつつある。また、生きた細胞を用いたバイオハイブリッドデバイスの研究が、公募班との連携によって予想以上に進展している。

## **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」ということである。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ている。これまで機械に使われたことのないスマートマテリアルによるしなやかな動きを作り出す「ソフトロボット物質学」の構築を目指す。領域の期間内での達成目標は下記の通りである。

- 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

中間評価報告の段階では、以上に述べた期間全体の達成目標のうち、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、等の技術開発が進展した。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不可欠であった。

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ている。この議論を通じて、各研究計画が実社会にどのように展開されるのか、従来技術の現状と課題といった視点の醸成に良い影響を及ぼしている。

## **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極めて複雑な挙動を示す。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す。具体的には、以下の各項を目標としている。

- フレキシブルセンサと物理リザーバ計算の融合により、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

A03 最大の特色は、公募班も含め、多種多様な分野の研究者が集まっているところにある。それらは例えば、非線形物理、材料科学、生物学、ロボティクス、感性工学などである。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」を共通軸に設定した。

中間評価報告の段階では、柔軟材料を基盤とした計算の基礎と、生体の内部で見られる情報処理基盤としての化学反応やタンパク質の動態の解明が進展した。柔軟材料による情報処理の前提となるセンサの埋め込みのために、新たなフレキシブルセンサを開発した。柔軟材料の内部で起こる化学反応を利用した化学ロボットの振る舞いの制御方法について基礎実験を行なった。生体の内部で起こっている情報処理の解明については、生物が用いている時計タンパク質の動態の評価、線虫の自己組織化と光を用いた行動制御方法の検討を行った。

## (2) 主な具体的成果

### X00 総括班

各項目の代表的な具体的成果を示す。

- ・ **領域内融合**：東工大と阪大に共同研究拠点を整備し，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，実質的な効率運営を行っている。
- ・ **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4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20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2回開催した（図3上は第1回国際ワークショップ2018年12月）。
- ・ **人材育成**：2019年度に，領域内の公募で採択した，助教1名，博士課程学生1名を海外の2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4回実施．また，関連学協会と市民向けフォーラム等を4件共催し，アウトリーチ活動を実施．（図3下は市民向けイベント「ART×科学=対話」(Geek Love Projectと本学術領域との共催，2019年6月@東京)．



図3：シンポジウム及びイベントの様子

### A01 「しなやかな身体」

計画研究でこれまでに得られた成果は，動物のやわらかさの機能を明らかにするバイオメカニクス研究と，生きた細胞を使ったバイオソフトロボットの開発にまとめられる．公募研究では，計画研究と相補的な関係を持った成果が得られた。

【新山 G】動物の脊柱は筋肉と骨格，その他の軟組織が一体となった特異な構造を持ち，移動ロボットやロボットアームへの利用が想定される．このような連続体を扱う理論的な枠組みを世界に先駆けて発表した[Mochiyama *et al.*, Proc. IEEE MHS 2019]. A02 班との共同研究では，キリンの首の解剖学に基づき，エラストマーや細径空気圧人工筋肉を利用して大型のロボットアームを製作した（図4，論文投稿中）。

【清水 G】生きた細胞を使ったバイオソフトロボットの研究では，企業との共同研究の成果として，3Dバイオプリンタ（図5）を利用して筋細胞等を分布させたゲルを造形する技術を開発した．また，A02 班との分野を超えた連携によって，ナノシート電極を用いた超薄型細胞触覚センサを実現した（論文投稿中）。

【田中 G】動物のロコモーション（移動運動）のバイオメカニクスに関しては，流体と柔軟構造の連成メカニズムの理解に関して重要な成果が得られた．水中・空中いずれのロコモーションでも翼の変形に注目した．水族館との共同プロジェクトによって世界で初めてペンギンの翼運動の詳細な3次元運動解析に成功し，種々の運動の解析が可能になった[Oura *et al.*, SICB 2019]. 関連して，羽ばたき推進機構は特許化を行った．空中のロコモーションでは，ハチドリの風切羽の曲げ剛性計測を世界で初めて行い，紫外線レーザ加工機で切り出した炭素繊維強化樹脂板によって曲げ剛性を模倣した人工柔軟翼を実現した[Kawahara *et al.*, Proc. IEEE MHS 2019].

【公募：森本】生きた組織を用いるバイオソフトロボットの研究として，ソフトフィンガーのための皮膚状組織の形成に成功した[Kawai *et al.*, Proc. IEEE MEMS 2020].

【公募：山本】エラストマーで構成され，油圧によって屈曲するソフトフィンガーについて，高圧に耐える構造や柔軟材料の選定を行い，基礎実験を行った[柴田ら, Robomech 2020 予稿]. 製作には領域の共通機器を利用した。

【公募：新竹】新たな柔軟材料として，土に還る生分解性材料の変形シミュレーションを行い，また，土壌

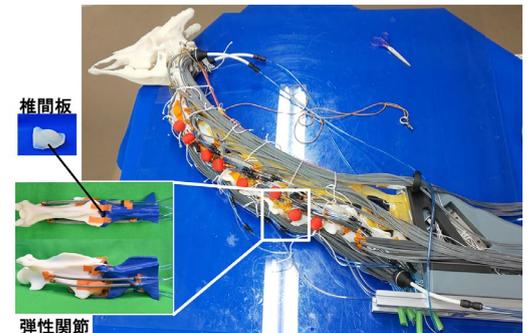


図4：人工筋肉と樹脂製の骨で再構成したキリンの解剖学的構造

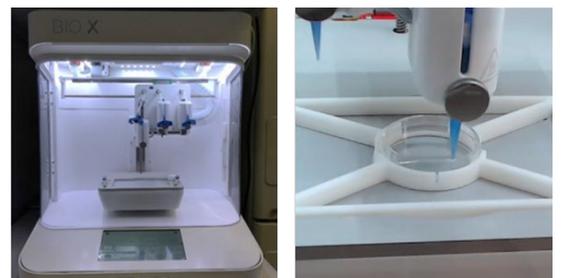


図5：3Dバイオプリンタ BIO-X. 共通機器として，領域内共同研究に活用されている。

中での力学特性の経過を明らかにした[Nagai and Shintake, Proc. IEEE MHS 2019].

【公募:加賀谷】筋骨格系について外骨格の変形を利用した高速な関節運動を実験的に再現する装置を製作した。また、変形と動作の調節を情報処理の観点から解析するため、A03 中嶋 G との共同研究を開始した。

【公募:平井】多孔質エラストマによる力覚センサの形状設計方法について検討した[Hirai and Matsuno *et al.*, Proc. IEEE MHS 2019]. 弾性変形を利用した変形による跳躍の解析を行った[松野ら, RSJ 2019 予稿].

【公募:田中】ミミズの筋組織を使ったやわらかいバルブを実現した[Tanaka *et al.*, Scientific Reports 2019]. また、A03 前田 G との連携によって小型ポンプを試作した。

## A02 「しなやかな動き」

研究計画でこれまでに得られた成果は、柔軟材料を利用した電子デバイス実現とその集積化によるセンシング応用、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方法、伸展・柔剛切替え・柔剛兼備式保護・能動自己修復を行う柔軟メカニズムにまとめられる。

【福田 G】2種類の高分子ナノ薄膜を二層に積層させることで、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[Yamagishi *et al.*, *NPG Asia Mater.*, 2019](図 6)。また、超薄型発電・蓄電デバイスの集積化により、総膜厚 50  $\mu\text{m}$  の世界最薄かつ最高効率を持つ充電デバイスが実現した[Liu *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, 2019] (図 7)。

【鈴木 G】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方法として、3D プリンタによる成型方法 (国際会議論文投稿中) と、折り紙による成型 (特許申請中) の、2種類のアプローチにそれぞれ成功した。また、気液変換型ラバーアクチュエータのための金白金ハイブリットメッキ法開発を開発した。

【多田隈 G】柔軟メカニズムに関して、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[Tadakuma *et al.*, Proc. IEEE MHS2019, Best Paper Award 受賞](図 8)。また、従来にない加圧式の柔剛切替え機構、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。これによって高性能なフレキシブル薄膜トランジスタ型センサの実現が期待される[Arai *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* 2020].

【公募:遠藤】軟体動物のメンダコを規範としたロボットハンドを試作・評価を行なった。膜構造を導入することで把持性能が向上し、また、より低圧で把持を実現することを確認した。さらに、形状最適化を行うことで屈曲耐性が約 2 倍に改善することに成功した。

【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て、これらに電圧印加することにより 1 次元形状変形を示すことを確認した。

【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作成、および外部磁石を用いたマイクロロボット固定の条件検討を行った。ハイドロゲル材料からなる腹部模型を用いて、マイクロロボットを外部磁石によって固定することが可能であることを確かめた。

【公募:宮川】体圧分散・応力軽減が可能なゲルパッドを設計・3Dプリンタによる形成を行い、そのパッドを用いた実際の圧力測定を開始した。これまでに測定値と主観的効果に大きな差がみられることを確認している。また、A02 難波江らとゲルパッドのずれ応力評価についての測定機構構築を行い、3軸測定の評価を開始した。



図 6:アスリート用ウェアラブル筋電計測デバイス

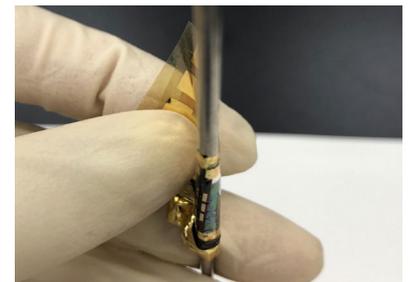


図 7:超薄型発電・蓄電集積デバイス

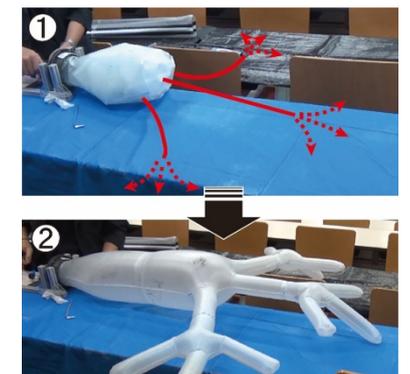


図 8:ヒモムシ吻構造を模した展開機構

### A03 「しなやかな知能」

本研究領域により得られた成果について、以下、計画研究、公募研究の順で記載する。

【中嶋 G】やわらかいマテリアルのダイナミクスとリザーバ計算の組み合わせによりセンサーエミュレーションが可能であることを複数の系で実証した。例えば、株式会社ブリヂストンとの共同研究により、人工筋肉に加えた圧力と抵抗値をリザーバに入力することで長さの推定が高精度で実現できることを示した [R. Sakurai et al., Proc. IEEE Robosoft 2020]。また、班内共同研究として、B01 班中村 G の蠕動運動ロボによる内容物の攪拌過程で、センサの間接的な情報から機械

学習手法を用いて内容物の状態推定が可能であることを示した [K. Wakamatsu et al., Proc. IEEE Robosoft 2020]。また、2 種類のフレキシブルセンサを新たに提案し、短冊状のシリコンが水を介して計算資源となるリザーバを自己組織化する研究や飛翔ロボットの羽自体が自然な形で風向きをエンコードしていることを物理リザーバの観点から明らかにした（論文化に向けて準備中）。また、物理リザーバ計算自体の数理の拡張 [M. Komatsu et al., IJRR 2020; K. Nakajima, JJAP 2020]や、班内外の複数の共同研究を進めている。

【前田 G】ゲルと化学振動が同期した力学振動のダイナミクスを初等関数で表現し、解析しやすいモデルを構築した。若手研究員（理論系）と、研究代表者（実験系）による理論と実験が融合した研究成果である（論文化に向けて準備中）。電極近傍で誘起される電気化学反応と電界がカップルし流体现象が生じる ElectroHydroDynamics (EHD) とメカトロニクスに関する研究を展開した。EHD と柔軟電極を組み合わせた Stretchable Pumps を EPFL の Prof. H. Shea, Prof. D. Florerano, 本領域の公募班の新竹助教と開発し Nature 誌に掲載された(領域内融合研究, 国際共同研究) [V. Caccuciolo et al., Nature 2019]。Ti-Ni-Cu 系 SMA ワイヤを中心とし、その高速伸縮動作と時間応答を精密に測定し、物理シミュレーションと共にその物性を明らかにした。さらに触覚提示アクチュエータへの応用の検討をおこなった。

【伊藤 G】1 つの細胞内の概日時計制御を直接観察することで、体内時計の動態を調べる研究が進んでおり 1 細胞レベルで概日時計が極めて頑健であることが明らかになった。これは微小の体内時計を作成可能であることを示す事実である。概日時計タンパク質の封入については、リポソームより油滴への封入が適切であることがこれまでの取り組みによって明らかになりつつある。他方、線虫のネットワーク制御に関しても大きな進展が見られた。線虫集団のつくる動的なネットワーク構造が湿度や集団密度によって変化しうることを実験で明らかにし、またそれを説明する数理モデルを構築した。また光遺伝学を用いて、線虫集団の行動を制御し、このネットワークを一時的に変容させることにも成功した。これらの結果は本計画班 3 名を責任著者として Nature 系列の雑誌に掲載された [T. Sugi et al., Nature Comm. 2019]。

【公募：榛葉】これまでに神経細胞の軸索に対して選択的に薬理刺激を行うためのマイクロデバイスを開発し、大脳皮質の無髄軸索における伝導にはナトリウムチャネルのうち Nav1.2 チャネルの寄与が大きいことを明らかにした。

【公募：中村】蠕動ポンプユニットのチャンバに印加された入力流量や圧力状態をセンシングすることによって、間接的に混合搬送対象物（スラリー）の混合状態を機械学習によって判定する手法を開発した。さらに実機の蠕動ポンプを用いた混合実験により本手法の有効性を確認した。なお、本研究は A03 中嶋 G との共同研究の成果である [K. Wakamatsu et al., Proc. IEEE Robosoft 2020]。

【公募：古澤】アクチュエータとなる再生筋組織の構築技術を確立し、実際に脳オルガノイドと組み合わせるバイオロボットの試作機を構築するところまで研究が進展している。再生筋組織に対し電気刺激を与える方法について A01 班清水正宏准教授より助言を得た。また、ヒト iPS 細胞から脳オルガノイドを構築する方法については、B01 班榛葉健太助教より助言を得て、研究を進めている。

【公募：葎田】A02 鈴森 G 他との共同研究により、アクチュエータを使用しているヒトにとって、他のアクチュエータよりソフトアクチュエータがヒトの身体に馴染みやすいか、バーチャルリアリティなどのエンターテイメントにソフトアクチュエータならではの感覚が提供できるかといった心理的側面の測定研究を計画している。

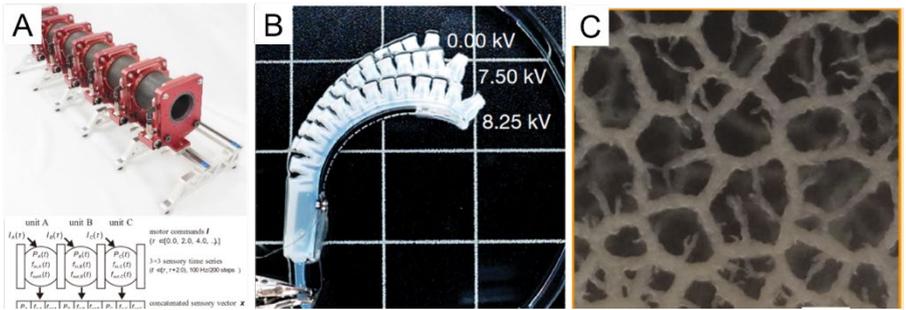


図 9 : A. 蠕動運動ポンプによる攪拌機（上図）と内容物の状態推定モデル模式図（下図） [K. Wakamatsu et al., Proc. IEEE Robosoft 2020]。B. Stretchable Pump の駆動例 [V. Caccuciolo et al., Nature 2019]。C. 線虫の作る動的ネットワーク [T. Sugi et al., Nature Comm. 2019]。

## 6 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、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和2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. T. Nakata, P. Henningsson, 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.
2. \*鈴木 洋之, 鈴木 伸洋, 志垣 俊介, Sim Joongeun, 阿部 里菜, 新田 大史, 山次 亮太郎, “流れによるストレスで生じる植物の生育および分子生物学的応答に基づく水理量推定の可能性”, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 75, pp. 130-137, 2019.
3. \*Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyosh, “High-Speed Humanoid Robot Arm for Badminton Using Pneumatic-Electric Hybrid Actuators”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), pp. 3601–3608, 2019.
4. \*Zhenishbek Zhakypov, Kazuaki Mori, Koh Hosoda and Jamie Paik, “Designing minimal and scalable insect-inspired multi-locomotion millirobots”, *Nature*, 571, pp. 381–386, 2019.
5. \*S. Shigaki, K. Okajima, K. Sanada and D. Kurabayashi, “Experimental Analysis of the Influence of Olfactory Property on Chemical Plume Tracing Performance”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, pp. 2847–2853, 2019.
6. \*S. Shigaki, Y. Shiota, D. Kurabayashi and R. Kanzaki, “Modeling of Adaptive Chemical Plume Tracing Algorithm of Insect using Fuzzy Inference”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28, pp. 72-84, 2019.
7. \*S. Shigaki, S. Haigo, C. H. Reyes, T. Sakurai, R. Kanzaki, R., D. Kurabayashi and H. Sezutsu, “Analysis of the role of wind information for efficient chemical plume tracing based on optogenetic silkworm moth behavior”, *Bioinspiration & biomimetics*, 14, 46006, 2019.
8. \*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.
9. \*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. 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.
2. 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.
3. Rio Mukaide, Masahiro Watanabe, \*Kenjiro Tadakuma, Yu Ozawa, Tomoya Takahashi, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro, “Radial-Layer Jamming Mechanism for String Configuration,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
4. Masahiro Watanabe, \*Kenjiro Tadakuma, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro, “Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
5. Masahito Takakuwa, Soo Won Heo, \*Kenjiro Fukuda, Keisuke Tajima, Sungiun Park, Shinjiro Umezu, and Takao Someya, “Nanograting Structured Ultrathin Substrate for Ultraflexible Organic Photovoltaics”, *Small Methods*, 4, 2020.
6. \*Vito Cacucciolo, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, and Herbert Shea, “Electrically-Driven Soft Fluidic Actuators Combining Stretchable Pumps With Thin McKibben Muscles”, *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 2020.
7. Tetsu, Y., Kido, Y., Hao, M., Takeoka, S., Maruyama, T., and \*Fujie, T., “Graphene/Au Hybrid Antenna Coil Exfoliated with Multi-Stacked Graphene Flakes for Ultra-Thin Biomedical Devices”, *Advanced Electronic Materials*, 6, 1901143, 2019.
8. Yamagishi, K., Nakanishi, T., Mihara, S., Azuma, M., Takeoka, S., Kanosue, K., \*Nagami, T., and \*Fujie, T., “Elastic kirigami patch for electromyographic analysis of the palm muscle during baseball pitching”, *NPG Asia Materials*, 11, 80, 2019.
9. \*T. Horiuchi, and K. Asaka, “245mm-length IPMC catheter with an ellipse-like cross-section”, *Smart Materials and Structures*, 2019.
10. Kilho Yu, Steven Rich, Sunghoon Lee, \*Kenjiro Fukuda, Tomoyuki Yokota, and \*Takao Someya, “Organic Photovoltaics: Toward Self-Powered Wearable Electronics”, *Proceedings of the IEEE*, 107, 2019.
11. Minoru Takagi, Kazunari Yoshida, Hirokuki Hoshino, Riichiro Tadakuma, Yoshiyuki Suzuri, and \*Hidemitsu Furukawa, “Sliding walk with friction control of double-network gel on feet of inchworm robot”, *Frontiers in Mechanical Engineering-Mechatronics*, 2019.
12. Jie Ru, Changsheng Bian, \*Zicai Zhu, Yanjie Wang, Junshi Zhang, Tetsuya Horiuchi, Takushi Sugino, Xiaofeng Liu, Hualing Chen, and Kinji Asaka, “Controllable and durable ionic electroactive polymer actuator based on nanoporous carbon nanotube film electrode”, *Smart Materials and Structures*, 28, 2019.
13. H. Kimura, \*K. Fukuda, H. Jinno, S. Park, M. Saito, I. Osaka, K. Takimiya, \*S. Umezu, and \*T. Someya, “High Operation Stability of Ultraflexible Organic Solar Cells with Ultraviolet-Filtering Substrates”, *Advanced Materials*, 31, 1808033, 2019.
14. Hasebe, A., Suematsu, Y., Takeoka, S., Mazzocchi, T., Vannozzi, L., \*Ricotti, L., and \*Fujie, T., “Biohybrid Actuators Based on Skeletal Muscle-Powered Microgrooved Ultra-Thin Films Consisting of Poly(styreneblock-butadiene-block-styrene)”, *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 5 (11), pp. 5734-5743, 2019.
15. Takahashi, K., \*Fujie, T., Teramoto, R., Takahashi, I., Sato, N., Takeoka, S., and Sawada, K., “Elastomer-based MEMS optical interferometric transducer for highly sensitive surface stress sensing for biomolecular detection”, *MRS Commun.*, 9, pp. 381-

- 389, 2019.
16. 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.
  17. Hatakeyama-Sato, K., Wakamatsu, H., Yamagishi, K., \*Fujie, T., Takeoka, S., Oyaizu, K., and Hiroyuki, N., “Ultra-thin and Stretchable Rechargeable Devices with Organic Polymer Nanosheets Conformable to Skin Surface”, *Small*, 15, 1805296, 2019.
  18. \*Akio Kodaira, Kinji Asaka, Tetsuya Horiuchi, Gen Endo, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “IPMC Monolithic Thin Film Robots Fabricated through a Multi-Layer Casting Process”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), pp. 1335-1342, 2019.
  19. Yamagishi, K., Takeoka, S., and \*Fujie, T., “Printed Nanofilms Mechanically Conforming to Living Bodies”, *Biomater. Sci.*, 7, pp. 520-531, 2019.
  20. Kokubo, N., Arake, M., Yamagishi, K., Morimoto, Y., Takeoka, S., \*Ohta, H., and \*Fujie, T., “Inkjet-Printed Neural Electrodes with Mechanically Gradient Structure”, *ACS Appl. Bio Mater.*, 2, pp. 20-26, 2018.
  21. Someya, D., Arai, S., Takeoka, S., \*Fujie, T., and \*Takeoka, S., “Extracellular pH imaging of a plant leaf with a polyelectrolyte multilayered nanosheet”, *RSC Adv.*, 62, pp. 35651-35657, 2018.
  22. Nishiwaki, K., Aoki, S., Kinoshita, M., Kiyosawa, T., Suematsu, Y., Takeoka, S., and \*Fujie, T., “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.
  23. 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.
  24. Kazunari Yoshida, Hikaru Yahagi, Masato Wada, Toshiki Kameyama, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa and Koshi Adachi, “Enormously Low Frictional Surface on ToughHydrogels Simply Created by Laser-Cutting Process”, *Technologies*, 6(3), pp. 82, 2018.
- 【A03】**
1. \*K. Nakajima, “Physical Reservoir Computing-An Introductory Perspective”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 59: 060501, 2020.
  2. \*T. Nakajima, T. Yamaguchi, S. Wakabayashi, T. Arie, S. Akita, K. Takei, “Transformable pneumatic balloon-type soft robot using attachable shells”, *Adv. Mater. Technol.*, 2020 (in press).
  3. Y. Otsuka, Y. Sato, \*S. Maeda, “Bubble-Free System for Belousov-Zhabotinsky Gels”, *Chemistry Letters*, 2020(Accepted for publication).
  4. \*N. Hashimoto, \*H. Shigemune, A. Minaminosono, S. Maeda, H. Sawada, “Self-assembled 3D actuator using the resilience of an elastomeric material”, *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 152, 1-12, 2020.
  5. Igarashi R\*, Sugi T, Sotoma S, Genjo T, Kumiya Y, Walinda E, Ueno H, Ikeda K, Sumiya H, Tochio H, Yoshinari Y, Harada Y\*, Shirakawa M\*, Tracking the 3D rotational dynamics in nanoscopic biological systems. *J Am Chem Soc*, 142, 16, 7542-7554, 2020.
  6. \*T. Yamaguchi, D. Yamamoto, T. Arie, S. Akita, K. Takei, “Wrist flexible heart pulse sensor integrated with a soft pump and a pneumatic balloon membrane”, *RSC Advances* 10, p. 17353-17358, 2020.
  7. N Kawamoto, H Ito, I T Tokuda, and H Iwasaki, “Damped circadian oscillation in the absence of KaiA in *Synechococcus*”, *Nature communication*, 2020.
  8. \*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.
  9. \*S. Wakabayashi, T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, K. Takei, “Out-of-plane electric whiskers based on nanocarbon strain sensors for multi-directional detection”, *Carbon*, 158, pp. 698-703, 2020.
  10. \*Naoki Hashimoto, \*Hiroki Shigemune, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda and Hideyuki Sawada, “Self-assembled 3D actuator using the resilience of an elastomeric material”, *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 2019.
  11. \*T. Yamaguchi, N. Akashi, K. Nakajima, S. Tsunegi, H. Kubota, and T. Taniguchi, “Synchronization and chaos in a spin torque oscillator with a perpendicularly magnetized free layer”, *Physical Review B*, 100, 2019.
  12. \*T. Haruna, and K. Nakajima, “Optimal short-term memory before the edge of chaos in driven random recurrent networks”, *Physical Review E*, 100, 2019.
  13. \*K. Xu, Y. Lu, T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Highly precise multifunctional thermal management-based flexible sensing sheets”, *ACS Nano*, 13, pp. 14348-14356, 2019.
  14. \*T. Taniguchi, N. Akashi, H. Notsu, M. Kimura, H. Tsukahara, K. Nakajima, “Chaos in nanomagnet via feedback current”, *Physical Review B*, 100, 2019.
  15. 宮戸田顕音, 重宗宏毅, 三輪貴信, \*澤田秀之, “微小振動する形状記憶合金ワイヤを用いた触覚センサ”, *電子情報通信学会論文誌 C*, J102-C (9), pp. 241-248, 2019.
  16. \*Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, and Hideyuki Sawada, “Directional and velocity control of active droplets using a rigid-frame”, *Journal of Royal Society of Chemistry Advances*, 69, pp. 40523-40530, 2019.
  17. I. Kajiwara, N. Hosoya, and S. Maeda, “Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 157, pp. 849-857, 2019.
  18. \*K. Xu, Y. Lu, S. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, “Highly stable kirigami-structured stretchable strain sensors for perdurable wearable electronics”, *Journal of Materials Chemistry C*, 7, pp. 9609-9617, 2019.
  19. \*T. Yamaguchi, T. Kashiwagi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Human-like electronic skin-integrated soft robotic hand”, *Advanced Intelligent Systems*, 1, 1900018, 2019.
  20. \*S. Tsunegi, T. Taniguchi, K. Nakajima, S. Miwa, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and H. Kubota, “Physical reservoir computing based on spin torque oscillator with forced synchronization”, *Applied Physics Letters*, 114, 164101, 2019.
  21. \*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.
  22. Sugi T, Ito H, Nishimura M, and Nagai KH, “C. elegans collectively forms dynamical networks”, *Nature Communications*, 10,

- 683, 2019.
23. A. Minaminosono, H. Shigemune, Y. Okuno, T. Katsumayta, N. Hosoya, and \*S. Maeda, “Deformable Motor Driven by Dielectric Elastomer Actuators and Flexible Mechanism”, *Frontiers in Robotics and AI*, 6, pp. 1-12, 2019.
  24. \*K. Nakajima, and T. Haruna, “Spatiotemporal dynamics driven by the maximization of local information transfer”, *New Journal of Physics*, 21, 13034, 2019.
  25. Y. Morita, T. Matsuo, S. Maeda, M. Oishi, and \*M. Ohshima, “Three dimensional micro displacement measurement with multiple-particle tracking using Digital Holographic Microscopy”, *Applied Optics*, 57, pp. 10541-10547, 2018.
  26. N. Hosoya, M. Masuda, and S. Maeda, “Balloon dielectric elastomer actuator speaker”, *Applied acoustics*, Applied acoustics, 148, pp. 238-245, 2018.
  27. \*S. Tsunegi, T. Taniguchi, S. Miwa, K. Nakajima, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and H. Kubota, “Evaluation of memory capacity of spin torque oscillator for recurrent neural networks”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 120307, 2018.
  28. Y. Okuno, H. Shigemune, Y. Kuwajima, and \*S. Maeda, “Stretchable suction Cup with electroadhesion”, *Advanced Materials Technologies*, 1800304, pp. 1-6, 2018.
  29. Junichi Danjo, Sonoko Danjo, Hideyuki Sawada, Keiji Uchida and Yu Nakamura, “Quantitative Tactile Examination Using Shape Memory Alloy Actuators for the Early Detection of Diabetic Neuropathy”, *Actuators*, 6, pp. 109-127, 2018.

#### 公募研究

1. \*Tilo H. Yang, Jun Shintake, Ryo Kanno, C. Robert Kao, and \*Jun Mizuno, “Low-cost sensor-rich fluidic elastomer actuators embedded with paper electronics”, *Advanced Intelligent Systems*, 2020.
2. Tilo H. Yang, Hikaru Hida, Daiki Ichige, Jun Mizuno, C. Robert Kao, and \*Jun Shintake, “Foldable kirigami paper electronics”, *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*, 2020.
3. \*S. Arai, K. Morita, J. Tsutsumi, M. Tanaka, and T. Hasegawa, “Layered-Herringbone Polymorphs and Alkyl-Chain Ordering in Molecular Bilayer Organic Semiconductors”, *Adv. Funct. Mater.*, 30, 2020.
4. Y. Aishan, \*Y. Yalikul, S. Funano, Y. Shen, and Y. Tanaka, “Accurate rotation of ultra-thin glass chamber for single cell multidirectional observation”, *Applied Physics Express*, 13, 2020.
5. Y. Aishan, \*Y. Yalikul, S. Amaya, Y. Shen, and \*Y. Tanaka, “Thin glass micro-dome structure based microlens fabricated by accurate thermal expansion of microcavities”, *Applied Physics Letters*, 115, 2019.
6. \*Y. Yalikul, N. Ota, B. Guo, T. Tang, Y. Zhou, C. Lei, H. Kobayashi, Y. Hosokawa, M. Li, H. E. Muñoz, D. Di Carlo, K. Goda, and \*Y. Tanaka, “Effects of flow-induced microfluidic chip wall deformation on imaging flow cytometry”, *Cytometry: Part A*, 2019.
7. S. Funano, N. Tanaka, and \*Y. Tanaka, “User-friendly cell patterning methods using a polydimethylsiloxane mold with microchannels”, *Development, Growth & Differentiation*, 2019.
8. 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.
9. \*V. Caccuciolo, J. Shintake, Y. Kuwajima, S. Maeda, D. Floreano, and H. Shea, “Stretchable pumps for soft machines”, *Nature*, 572, pp. 516-519.
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. Shunsuke Shigaki, Masahiro Shimizu, Hiroki Kobayashi, Risa Ishiguro, Takuya Umedachi and Koh Hosoda, “Demonstration of Teleoperated Bumblebee-Quadcopter System for Collision Avoidance”, *The 2020 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft 2020)*, 6 pages, 2020.
2. N. Yamada, S. Shigaki, M. Shimizu, H. Ohashi, T. Umedachi, T. Ogura and K. Hosoda, “Electroantennography Measurement by Printed Electronics Electrode”, *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2020.
3. Akio Kawahara, Masahiro Aizawa, Takeshi Yamasaki, and Hiroto Tanaka, “Fabrication of a Hummingbird-mimetic Flexible Flapping Wings”, *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2019)*, pp. 138-140, 2019.
4. Mitsuru Takeda, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi, “High-speed flexible arm to reduce the effect of spinning ball in table tennis”, *30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 127-131, 2019.
5. Hiromi Mochiyama, “A Basic Idea of Identifying the Stiffness of an Elastic Rod along Its Backbone”, *30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 132-135, 2019.
6. Hiromi Mochiyama, Mitsuhiro Ando, Kenji Misu and Tepei Kuroyanagi, “A Study of Potential Social Impacts of Soft Robots with Organic and Edible Bodies by Observation of an Artwork”, *2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pp. 208-212, 2019.
7. Yuki Nakamura, Izumi Karino, Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo 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.
8. Haruki Cho, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi, “Dynamic Locomotion of Quadruped with Laterally Parallel Leaf Spring Spine”, *International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, pp. 91-98, 2019.

###### 【A02】

1. Yuta YAMANAKA, Sho KATAGIRI, Hiroyuki NABAE, Koichi SUZUMORI, and Gen ENDO, “Development of a Food Handling Soft Robot Hand Considering a High-speed Pick-and-place Task”, *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 87-92, 2020.
2. Hiroyuki Nabae, Asuka Ishiki, Tetsuya Horiuchi, Kinji Asaka, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Frequency Response of Honeycomb Structured IPMC Actuator Fabricated through 3D Printing with Dispersion Liquid”, *30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 88-89, 2019.
3. Hiroyuki Nabae, Akio Kodaira, Tetsuya Horiuchi, Kinji Asaka, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Soft Polymer-Electrolyte-

- Fuel-Cell Tube Realizing Air-Hose-Free Thin McKibben Muscles”, 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 8281-8287, 2019.
4. Jun Ogawa, “Evolutionary Multi-objective Optimization for Evolving Soft Robots in Different Environments”, Bio-inspired Information and Communication Technologies, pp. 112-131, 2019.
  5. Akio Kodaira, Kinji Asaka, Tetsuya Horiuchi, Gen Endo, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “IPMC Monolithic Thin Film Robots Fabricated through a Multi-Layer Casting Process”, the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019), 2019.

#### [A03]

1. S. Wakabayashi, T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Out-of-plane flexible electronic whisker array”, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), 2020.
2. T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Wearable and flexible heart pulse sensor integrated with a soft pump and actuator”, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), 2020.
3. Masato Yamada, Hiroki Shigemune, and Hideyuki Sawada, “Stability Analysis of Self-Folding Sheets on Water Surface”, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2019), pp. 66-68, 2019.
4. K. Inoue, K. Nakajima, and Y. Kuniyoshi, “Soft bodies as input reservoir: role of softness from the viewpoint of reservoir computing”, 30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), pp. 60-65, 2019.
5. N. Akashi, K. Nakajima, and Y. Kuniyoshi, “Unpredictable as dice: analyzing riddled basin structures in a passive dynamic walker”, 30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), pp. 119-123, 2019.
6. M. Komatsu, T. Yaguchi, and K. Nakajima, “Differential Algebraic Method for Direct Evaluation of Computational Capabilities of Physical Reservoirs”, The 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2019), pp. 187-190, 2019.
7. Yuki Nakai, Takanobu Miwa, Hiroki Shigemune, Shuji Hashimoto, and Hideyuki Sawada, “Four-Dimensional Collision Detection via Five-Dimensional Homogeneous Processing”, International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP2019), G042, 2019.
8. 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.
9. T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Electronic skin-integrated soft robotic hand”, 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2019), pp. 543-546, 2019.
10. E. A. Torres, K. Nakajima, and I. S. Godage, “Information Processing Capability of Soft Continuum Arms”, 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 441-447, 2019.
11. Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, Akihiro Imai, Shuji Hashimoto, Shigeki Sugano, and Hideyuki Sawada, “Printed Self-Oscillatory Mechanism Inspired by an Electric Bell”, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 109-110, 2018.
12. Thanh Vo Nhu and Hideyuki Sawada, “Intoning Speech Performance of the Talking Robot for Vietnamese Language Case”, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 160-163, 2018.
13. Chunhao Song, Hiroki Shigemune, and Hideyuki Sawada, “Information Display Around Eyes Using the Vibration of SMA Wires and its Evaluation of Perceived Sensation”, 11th International Conference on Human System Interaction (HSI), pp. 398-403, 2018.

#### 公募研究

1. Y. Ishii, Y. Morimoto, A. Shima, and S. Takeuchi, “Formation of micro-size perfusion channels in mm-thick muscle tissue”, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), pp. 456-458, 2020.
2. M. Kawai, M. Nie, H. Oda, Y. Morimoto, and S. Takeuchi, “3D pocket-shape dermis-equivalent as a skin material for a robotic finger”, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), pp. 340-341, 2020.
3. B. Jo, M. Nie, A. Shima, Y. Morimoto, and S. Takeuchi, “Micro tissue assembly for co-culturing 3D skeletal muscle and adipose tissues”, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), pp. 459-460, 2020.
4. Toshiaki Nagai, and Jun Shintake, “Characterization of bio-degradable materials for soft robotics”, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2019), MP-01, 2019.
5. Shinichi Hirai and Takahiro Matsuno, “Morphological Design of Soft Capacitive Force Sensor”, 30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2019), pp. 141-143, 2019.
6. Kazuya 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. Kenta Shimba, Takahiro Asahina, Koji Sakai, Kiyoshi Kotani, and Yasuhiko Jimbo, “Evaluation of Conduction Properties of Sensory Axons with High-Density Microelectrode Array”, 12th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2019.
8. Yasuaki Ishi, Yusuke Hirata, Yuya Morimoto, Ai Shima, and Shoji Takeuchi, “Centimeter-sized tissue with perfusable channels toward cultured steak”, MicroTAS 2019, pp. 322-323, 2019.
9. 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.
10. 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.
11. Kenta Shimba, Koji Sakai, Kiyoshi Kotani, and Yasuhiko Jimbo, “Microdevice for Evaluating Ion Channel Expression by Axon Targeted Recording to Cultured Neurons”, IEEE EMBC 2019, 2019.
12. Fumika Moriya, Kenta Shimba, Kiyoshi Kotani, and Yasuhiko Jimbo, “Change in Evoked Response of Mature Neuronal Network to Spatial Pattern Stimulation by Immature Neurons”, IEEE EMBC 2019, 2019.
13. Kota Wakamatsu, Daiki Hagiwara, Haruka Adachi, Kyota Ashigaki, Akihiro Iwasaki, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu, and Taro Nakamura, “Packaging of Mixed Materials in Peristaltic Mixer for Solid Propellant Production”, 32nd International Symposium on Space Technology and Science, 2019-a-15, 2019.

14. [Kenta 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

#### 【A01】

1. 田中博人, 飛翔のメカニズムとロボットへの応用, 動物学の百科事典, 編集: 公益社団法人日本動物学会, 丸善出版, 2018年9月28日 702-703

### 公募研究

1. 森本雄矢, 竹内昌治, 第5章7 身体運動を再現するバイオハイブリッドロボット (書籍名: 骨格筋研究を核とした筋スマート社会) CMC リサーチ, 2019年6月14日
2. 田中陽, 第5章6 生物の組織を用いた革新的駆動原理のデバイス開発 (書籍名: 骨格筋研究を核とした筋スマート社会), CMC リサーチ, 2019年6月14日.
3. 田中陽, ミミズの筋肉を利用した化学刺激で動くバルブ (書籍名: 化学), 化学同人, 2019年8月19日.
4. Y. Morimoto, S. Takeuchi Biohybrid robot powered by muscle tissues, (書籍名: Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics), Wiley, 2020年1月7日.

## 産業財産権

### 計画研究

#### 【A01】

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

#### 【A03】

1. 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
2. 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
3. 竹井邦晴, 大阪府立大学, 感圧センサ, 特願 2019-004407, 出願, 平成 31.1.15, 国内
4. 竹井邦晴、リユーニューヤオ, 大阪府立大学, 湿度センサ, 特願 2019-124507, 出願, 令和 1.7.3, 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. IEEE ICRA 2020 Workshop: Beyond Soft Robotics: Pioneer Perspectives and Interdisciplinary Collaboration, Online, 2020/0531
2. 「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
3. 「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
4. IEEE MHS2019, Nagoya, 共催, 2019/12/1-4
5. 「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
6. 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
7. 第二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
8. 3rd International Workshop on Science of Soft Robots, The University of Tokyo, 主催, 2019/7/19
9. Living Machines 2019 Workshop: Science of Soft Robots, Kasugano International Forum in Nara, 共催, 2019/7/9
10. 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
11. Robosoft 2019 Workshop on "Toward the nature of information processing in soft machines", COEX (Seoul, Korea), 2019/4/14.
12. 2nd International Workshop on Science of Soft Robots, Tokyo Institute of Technology/Hakone Prince Hotel, 主催, 2019/4/11-13
13. 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
14. 1st International Workshop on Science of Soft Robots, Tokyo Institute of Technology, 主催, 2018/12/4
15. 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
16. 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. 体験型科学教育イベント「つくばこどもクエスト2020」, つくば市役所, 2020/02/22
2. 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 (アニメシー) をつくろう」, つくばカピオ, 2020/2/14-15
3. 国際ロボット展, 東京ビッグサイト, 2019/12/18-21
4. Keio SFC Open Research Forum, 東京ミッドタウン, 2019/11/22-23
5. 超福祉展, 渋谷ヒカリエ, 2019/9/3-2019/9/9
6. 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
7. 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
8. 地域看護学会, パシフィコ横浜, 2019/8/17-19
9. 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
10. MakerFair Tokyo, 東京ビッグサイト, 2019/8/3-4
11. 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
12. 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
13. 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
14. Dying Robots, Wired Creative Hack Award 2019, 2019/12/9

## 7 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の連携体制を図10に示す。応募時には、X00総括班、計画班(A01, A02, A03)の構成で始まり、2年目から公募班(B01, B02)を加え現領域の体制が構成された。本領域は、X00総括班が各委員会を組織し**トップダウンステアリング**を行いつつ、研究は現場から**ボトムアップエンジン**によって有機的に展開される連携体制を構築している。以下に、融合研究のための3層構成の取り組みを説明する。

第1層「課題内融合」が応募時から既に推進されている。当該領域の特色は、**計画研究課題自体が既に異なる分野の優れた研究者で構成**されていることである。すなわち、本領域では計画研究間の連携を待たずに第1層の連携が行われていることになる。例えば、研究項目A01内の計画研究(新山)では、機械工学、連続体の力学、動物解剖学を専門とする研究者3名が、それぞれロボットの実製作、ロボットモデルの力学シミュレーション、生体試料の提供と解剖学的な意味づけ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共同研究である。連携の中で、超冗長ロボットマニピュレータの実製作に必要な設計パラメータを、ロッド理論に基づく力学シミュレーションから得る枠組みを構築できた。また、通常では入手が困難なキリンやダチョウの生体試料の実計測が可能となり、ロボットの動作実験から動物の解剖学的構造への示唆が得られた。単独の研究室や同じ分野の研究者だけでは難しい連携体制の実例と言える。

第2層「班内融合」では、公募班も交え、班内研究の統合・拡張が推進されている。例えば、公募研究B02班「ソフトロボットの社会展開」として採用された宮川祥子の研究課題「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班と連携して活動を推進している。宮川が医療における現状・課題を医学・看護に深く携わっている立場から情報提供を与え、他の工学系研究者にとって「社会における具体的なニーズ」を知る有用な場として機能している。さらに、宮川の研究遂行に必要な3軸圧力センサについての協力要請を基に、班内での活発な議論を進めている。より具体的にはゲルパッドのせん断応力軽減能力を評価するにあたって、現時点で手に入るセンサ」について、電気電子的な知見から主にA02班福田より情報提供を行った。実際に有望なセンサを開発しているNISSHAに伺い、宮川・福田との3者での共同打ち合わせを行った。A02班難波江の協力の下、センサを用いたゲルパッドのシミュレーションモデルの構築および力学測定実験の計画検討を行った。また、A02班古川がデータ分析に関するアドバイスをを行っている。以上のように、看護学・電気電子・機械工学・材料科学の異分野に属する班内研究者がそれぞれの**専門性を活用した融合研究を進め、社会的ニーズに即した研究開発を進める**、という取り組みが積極的に進められている。

第3層「領域内融合」では、班をまたいだリストラクチャリングによって、分野の再定義、新しい学問の構築を目指している。応募当初は、研究期間の後期の取り組みとして設定したが、**想定以上に迅速に融合研究が進み、既に領域内融合が始まっている**。ソフトEHDポンプ研究において、A03の前田と公募班の新竹助教が共同研究し(領域内融合)、さらにEPFLのProf. H. Shea研究グループと国際共同研究(領域外融合)の成果が2019年度にNature誌に掲載された。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の鈴森・難波江らがProf. H. Shea研究グループ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(領域外融合)。



図10: 連携体制

## 8 若手研究者の育成に係る取組状況

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2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポストドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、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、「**光型人才**」（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ている。以下、具体的な取り組み状況を説明する。

### 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ている。

**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、本領域の研究課題を海外の関連研究機関で共同で進めるための活動費を総括班予算で支援している。毎年3件を目安に領域内で公募し総括班で審査、採択している。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。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)の採択等へつながり、研究成果創出、海外有力関係機関との人的ネットワークの構築が進んでいる。

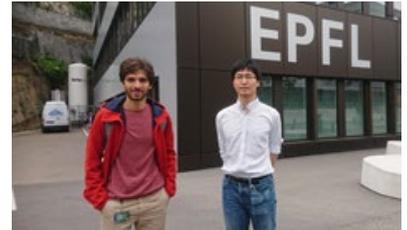


図11：EPFLでの在外研究

**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、人的ネットワークの構築、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。



図12：若手が吠える会

### 若手が吠える会

国内外をそれぞれ代表する2つのロボット関連学会(2020年度日本機械学会 ROBOMECH 講演会、ならびに IEEE ICRA2020)で本領域がシンポジウムとワークショップを主催し、若手研究者(計6名)がシニア研究者や聴衆に対し、自己の研究とソフトロボットの将来展望に関し持論を主張する機会(通称「若手が吠える会」、図12はその一部)を作った。多くのフィードバック(中には厳しい指摘もあり有益であった)を受け、若手人材育成のよい機会となった。COVID19の影響でオンライン開催であったが、前者は約400名(事後公開ビデオアクセス数を加えると約2400名)、後者は1400名(同、約1500名)の聴講者を得た。



図13：マレーシア工科大学若手研究者、学生との研究交流

### 若手研究者間交流

若手研究者、学生間の組織的な国際交流は重要と考えており、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。



図14：Craft workshop

### 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しており、領域として奨励している。これまでに、ソフトロボット製作の手法を教えあうクラフトワークショップ(図14)が開催されており、COVID19終息以降、ソフトロボット数理勉強会、論文の書き方勉強会、が企画されている。

### 具体的成果

領域の活動を始めてまだ2年であるが、既に「スーパー若手研究者育成計画」活動が寄与したと思われるいくつかの例が生まれている。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)。
- ポスト獲得：梅舘(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(東大ポストドク→阪大助教)、志垣(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)、竹井(阪府大准教授→教授)、重宗(早大任期付講師→芝浦工大助教)。

## 9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、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、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 活用状況

**設備等**：領域内での設備備品の効果的な運用を目指し、東京工業大学及び大阪大学に共有設備として集約・設置するとともに、共有設備の運用を担当する技術補佐員を配置している。主な設備として、関東拠点には、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 装置等、また、関西拠点においては、高弾性 3D プリンタ、バイオマテリアル 3D プリンタを設置している。なお、関西拠点においては、バイオマテリアルを用いた実験のために、細胞培養設備、電気生理設備に加えて、遺伝子組み換え実験環境 (P2, P1A) が整備されている。その取扱いに伴う揮発性の薬品を使用することが想定されるが、局所排気装置が整備されており、安全面においても十分な対策が行われている。



図 15：関東拠点（東京工業大学）の様子



図 16：関西拠点（大阪大学）の様子

各装置は、web 上に独自に構築したオンライン予約システムにおいて、予約フォームから各領域メンバーが使用予約を行うシステムを運用している。また前述のシステムの運用に加えて、各装置に関して、技術補佐員との連絡やノウハウの共有を気軽に行うことが可能なように Slack を用いた情報共有の場を用意しているなど、各研究機関の研究者がスムーズに、そして効率よく利用できる環境を整えている。各設備の使用方法については、技術補佐員等による使用者講習会を適宜行うことも行っており、効果的な共有設備の活用を図っている。これまでに、関東拠点では約 240 回もの利用があり、順調に運用が進んでいる。

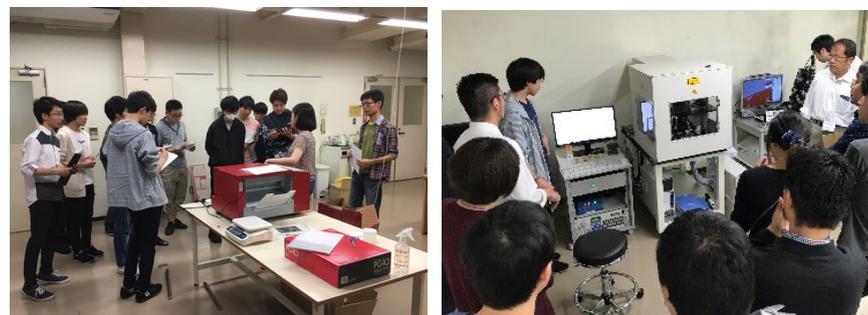


図 17：使用者講習会の様子（関東拠点）

各装置は、web 上に独自に構築したオンライン予約システムにおいて、予約フォームから各領域メンバーが使用予約を行うシステムを運用している。また前述のシステムの運用に加えて、各装置に関して、技術補佐員との連絡やノウハウの共有を気軽に行うことが可能なように Slack を用いた情報共有の場を用意しているなど、各研究機関の研究者がスムーズに、そして効率よく利用できる環境を整えている。各設備の使用方法については、技術補佐員等による使用者講習会を適宜行うことも行っており、効果的な共有設備の活用を図っている。これまでに、関東拠点では約 240 回もの利用があり、順調に運用が進んでいる。

**その他**：若手研究者の育成を目的とした若手海外派遣（2019 年度、スイス連邦工科大学, Max Plank Institute の計 2 件）の援助や海外から研究者を招聘した国際ワークショップの開催（2019 年度までに計 3 回開催）など、領域内外・国内外の交流や研究成果発信にも注力している。

### 今後の計画

高額設備備品の購入は主に初年度に行ったため、今後は、拠点においては設備の維持、また国内外、特に特に海外への研究成果の発信を中心に領域の運営活動を行っていく。具体的には、拠点に関しては予約システムや使用者講習会といった現状の運用システムを今後も適切に維持していくとともに、さらなる共有設備の利用促進を目指し、各研究者による共有設備を用いた研究成果の紹介を行う場を検討している。また、研究成果の発信に関しては、今後海外への成果発信をより積極的に行っていくため、領域の研究者を派遣し、北米・ヨーロッパ・アジアにて、海外セミナーを行う予定である。（今年度は、イギリス及びスイスにて海外セミナーを予定していたが、新型コロナウイルスの流行により延期となった。）

## 10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「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2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

### 基本的な考え方

本領域活動の核の一つは異分野融合にある。種々の学術分野で勃発する「やわらかさ」に関する学術の芽を有機的に融合することで新しい学術「ソフトロボット学」の創成を狙っている。前述の通り異分野融合を推進するしかけとして、第1層「課題内融合」、第2層「班内融合」、第3層「領域内融合」の3段階からなる「三層構造異分野融合推進」施策をとっている。初年度～3年度に第1層と第2層の融合は計画通り進み、優れた研究成果が順調に生まれていることは、「5.研究の進展状況及び主な成果」および「6.研究発表の状況」に記載した通りである。加えて、3つの研究班をまたいだ融合研究も一部始まっており、既に前倒しで第3層の異分野融合「領域内融合」に入りつつある。来年度(2021年度)からの2年間は新しい公募研究も取り入れ、第3層「領域内融合」に突入する。個別の研究の推進はもとより、領域全体をあげて、ソフトロボット学創成に向けた活動を一挙に加速する。

本領域活動のもう一つの核は、「ソフトロボット学」が従来の科学技術とは真逆とも言える価値観に基づいていることにある。従来の科学技術や人工物が「パワー、精度、確実性」を目指し、そのために「硬く、正確で、確実な」価値観・方法論に基いてきたのに対し、ソフトロボット学はいわば生体システムが持つ「しなやか、流動的、適応的」価値観・方法論に立脚している。これは、E-kagen(従来の科学技術が拒絶してきたいいかげんさ(あいまいさ、不確実性)を受け入れることで、良い加減(しなやかさ、適応性)に物事を進めるとして、本領域の計画立案時から一貫してきた考え方である。これまでの2年半の領域活動を経て、E-kagenという言葉とその考え方は、領域の全研究者に共通目標として受け入れられ、また、領域外の一部の研究者(国内外とも)にも浸透、受け入れるようになってきた。

以上2つの考え方は、領域計画時から一貫しており、今後もこれを基盤にして、領域活動を進める。

### RESTRUCTURING

第3層「領域内融合」の具体的な進め方について説明する。

本領域では、計画研究課題自体が異分野の研究者で構成されており、第1層「課題内融合」は当初より日常的に密に行われてきた。第2層「班内融合」では、「A01:しなやかな身体」、「A02:しなやかな動き」、「A03:しなやかな知能」を標榜する3つの研究班に、各計画研究課題と公募研究課題が所属し、定期的な研究会議、個別の課題間共同研究、slack内の各研究班チャンネルでの日常的ディスカッション、等、を通して、密度の濃い融合が進められてきた。このように、第1,2層の融合活動は順調に進み、各研究班は、身体、動き、知能に関する研究成果や知見を蓄積し、それぞれ一つのまとまりを形作りつつある。

この状況を踏まえ、2021年度よりいよいよ第3層「領域内融合」にシフトする。第3層では、これまでの研究成果を一般化、整理し、世界に先駆けて「ソフトロボット学」という新しい学術の形にまとめあげる。本領域では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ソフトロボット学の専門テキストを完成させ、和洋2つの版を同時上梓する、という具体的目標を掲げている。この具体的目標を全研究者が共有し、領域が一体となって目指すことで、大目標である「ソフトロボット学」創成が効果的に達成できると考えている。

領域内での多くの議論を経て、ソフトロボット学を形作る柱(つまり、ソフトロボット学教科書の章立て)として、「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」を立てている。これは、ロボットの機能の視点で構成した3つ研究班(A01 身体、A02 動き、A03 知能)とは異なる。このため restructuring という方法を適用する。例えば、A01 研究班「身体」では、機械・電気、材料、情報、生物、等々様々な専門家が共同で研究を進めているが、第3層融合にあたっては、機械・電

気の専門家は「S01:設計学」、材料の専門家は「S02:物質学」、情報の専門家は「S03:情報学」、分担でテキスト執筆を担当することになる。第1層、第2層でいったんかきまぜた専門性を再度従来の学術分類に戻すプロセスになるが、融合研究を経た研究者は領域参加前とは全く異なり大きく成長しており、ソフトロボット学全体にわたる広い視野と知見から、もともとの専門性の意義を述べることができる。これが第3層の融合の目指す形である。このように2021年度からは、従来の3つの研究班A01,A02,A03の活動に加え、専門テキストの完成を具体的モチベーションとした新しい3つの組織(S01:設計学, S02:物質学, S03:情報学)の活動を並行して進める。

### 公募研究の役割

第2期の公募課題にも第1期と同様に、領域活動の原動力としての「やわらか科学の芽」とモチベーションとしての「社会ニーズ」を領域に持ち込み、領域内で融合する役割を期待する。公募研究の潜在能力を十分に生かすために「ボトムアップエンジン/トップダウンステアリング」の考え方に基づいて運営する。さらに加えて2期目の公募研究には、各研究者のベースの専門的知見の提供を期待している。すなわち、専門テキストの作成には各分野の専門知見が必要であり、その提供を期待している。

### 国際的なネットワークの構築

ソフトロボット学の国際コミュニティにおいて我が国の存在感を一層高めるとともに、本領域研究者の人的ネットワーク形成の一助になることを目指し、総括班国際連携担当を中心に多くの企画を実施しており今後もさらに加速する。主な取り組みとして、国際ワークショップと海外セミナーがある。前者では海外の有力研究者を招聘し国内外の研究者を交えて議論を行う。既に3回開催しており今後も年に1~2回程度の頻度で実施する。後者は、本領域の研究者が海外に出向き現地の研究機関と共同で行うセミナーで、本領域の研究活動のPRが主目的である。毎年1~2回開催する計画である。(今年度は6月にエジンバラ大学とスイス連邦工科大学ローザンヌ校に、本領域の研究者約10名を派遣する計画であったが、COVID-19の影響で延期となっている)。今後、北米とアジア各国でも毎年開催する。また、国内外の関連学協会と連携し、シンポジウムやワークショップを頻繁に開催しており、今後とも積極的に推進する。

### その他、主な方策

【関連学術団体との連携】OPERA(前述)のほか、新学術領域「発動分子学」、日本ロボット学会ソフトロボット専門委員会(SIG)、IEEE Robotics & Automation Soc.との連携(情報交換や企画共催)を引き続き推進する。特に、新学術領域「発動分子学」と本領域は、アプローチは正反対だが目的がかなり近いことから今後もさらに連携を重視したい。COVID-19の影響で延期している2つの新学術領域による合同シンポジウムを早い時期に行いたい。

【大学との教育連携】引き続き、スーパー若手人材育成計画に沿って人材育成を進める。本年度より本領域の研究者7名を講師とする講義「Soft robotics」が東京工業大学で正式な大学院の授業科目として開講されるようになった。ソフトロボット学の専門講義は諸外国を見てもまだほとんどなく、今後この流れを他大学にも広げ、我が国の人材育成に貢献するとともに、ソフトロボット学体系化に活用したい。

【産業界との連携】ソフトロボット学は実用的価値を持っており、本領域の成果が産業界や医療・介護等、実社会に貢献しうる大きな可能性を持っている。社会への展開は重要な使命と認識しており、産業界への情報発信を引き続き進めるとともに、産業界と連携し実用化を目指した「産学連携シンポジウム」を実施する。

Class 1 June 26	Introduction to soft robotics Prof. Koichi Suzumori, Tokyo Tech.		
Class 2 July 8, Wed.	Elastic body design Prof. Ryuma Niyama, The Univ. of Tokyo		
Class 3 June 10	Flexible electronics Prof. Kenjiro Fukuda, Riken		
Class 4 June 17	Information processing in soft robotics Prof. Kohei Nakajima, The Univ. of Tokyo		
Class 5 June 24	Applications of soft robots Prof. Gen Endo, Tokyo Tech.		
Class 6 June 31	Physics of soft bodies Prof. Shinichi Hirai, Ritsumeikan Univ.		
Class 7 Aug 7	3D printing of soft materials Prof. Hidemitsu Furukawa, Yamagata Univ.		

図 18：東工大での大学院講義「ソフトロボット学」2020年度開講

## 11 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。

### 西出宏之先生(早稲田大学 理工学術院総合研究所)

鈴森領域代表の強いリーダーシップと包含力のもと、3計画班と公募班が融合して「ソフトロボット学」の開拓に向け進展している。特に、専門を異にする若手研究者間の新鮮な挑戦も多くあり、シンポジウムでの発表・討論からも新しい学際領域の予感を印象づけられる。ここでは化学・有機高分子材料屋の視点からのコメントとして3点を挙げる。

第1は、単に変形するだけでよいのか？（使えるものか？）へのより強い説得力である。入力・トリガーとなるエネルギー（電力などでは印加電圧、電流密度など）がプラクティカルか？機械動作との変換効率は何%？（近い将来に大幅改善するとしても、その範囲内にあるか？）持続的なエネルギー源の供給の仕方？（2次電池や生物化学エネルギーなどエネルギー源との組み合わせの開拓）、それらへの定量的な値での応答は、より幅広い同調者と研究者の裾野となろう。

第2は、新しい学術「ロボット学」である。単に、設計・物質・生物・情報の融合で良いのか？第4の科学 AI は、我々が慣れ親しみ信じる演繹法（deductive）の限界とインフォーマティクス帰納法（induction）の勃興を警鐘している。「機能が先か、形態が先か？」の議論を根本的に見直す一つの切掛けともなり得るのではないか。

第3は、「海洋マイクロプラスチック汚染」で、世界的な課題であり、一つの根本に有機材料プラスチックなどソフトマテリアルの負の側面を抉り出している恐れがある。ソフトロボット作動で不可避な摩擦による屑粉など、先手を打っての提言は歓迎されるであろう。

遡れば、ソフトロボットは我が国が先導して提示していたテーマであり、周回遅れではなく、むしろ先頭ランナーとして世界にアピールできる力強さを本領域の活動より手答えもって感じ、大いに期待している。（以上は2019年10月阪大での公開シンポジウム・領域会議などを通したもの。今日さらに、ポスト・コロナ、アフター・コロナの切り口も期待される。）

### 樋口俊郎先生(東京大学名誉教授)

本新学術領域は、金属を主な構造体とした従来のロボット技術に対して、柔らかい構造を特徴とするロボット技術を“ソフトロボット学”として体系化することを目指した研究プロジェクトであり、ロボット学の新しい一領域を生みだし、ロボット学の範囲を大きく広げることが期待できる。このような動きは欧米でも既に始まっているが、わが国には、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など、ソフトロボット学に関する世界トップレベルの研究者が多数いる点が強みで、彼らが集結した本プロジェクトは、世界を先導してソフトロボット学を作り上げてゆく可能性を十分に持っている。

本プロジェクトの特徴としてあげられるのが、種々の学術の積極的な融合である。従来のロボット工学が、主として、機械工学、電気工学、情報工学から構成されるのに対し、本プロジェクトでは、機能性有機材料や生体由来材料などの材料科学や、動物学や細胞学など、広い範囲にわたる研究者やその最新研究成果を取り込み、極めて学際的な研究活動が行われている。

領域全体会議には総括班評価者として出席しているが、領域の運営は組織的にうまく機能しているように見える。若く、活発な研究者が多いのがこの領域の大きな特徴である。既にNature等の有力雑誌において本プロジェクトで生まれた成果が発表されていることから、個々の研究者の研究活動レベルは非常に高いと思われる。これら若く活発な研究者を領域代表がうまくまとめ、互いに協力して世界をリードする新しい学術領域を作っていくとす一体感を創り出すことに成功している点は高く評価できる。公募課題と計画研究課題のマッチングプロセスなどの具体的な施策も効果的で、領域内の共同研究を行いやすい下地が形成され、さらなる分野融合を加速している。

ソフトロボット学は、今後の高齢化社会を支える新しい科学としての実用面でも大きな可能性を持った分野である。この点に関しても、高いポテンシャルを秘めた基礎研究と学術研究のプロジェクトにおいて不足しがちな社会応用のニーズをバランス良く領域に取り組むことに成功している。この研究成果が、実社会に展開することを強く期待している。

### 中垣俊之先生(北海道大学 生命科学院)

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醸成している）との相乗的な成果であると思われる。これまでの、活動を見る限り、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、当初の予定にはなかった新しい融合研究が芽生えてくるのではないかと期待させられる。今後は、この点にも注目していきたい。

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、単なるリズムとパターンから、情報処理あるいは知能的なるものへと飛躍する概念装置として A03-1 の physical reservoir computing 理論が機能していることである。この A03 班の構成は、領域全体を縦方向に引き伸ばす力を潜めていると思われる。今後、これが新しい領域を開くような「ものの見方」を確立し、領域全体を横に広げながら縦に貫く柱となることを期待している。

### **染谷隆夫先生(東京大学 工学系研究科)**

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います。電気電子に専門性を有する私から見て、これまでの研究活動で特に特筆すべき成果は有機太陽電池と蓄電デバイスを集積化させた世界最軽量かつ最高効率の充電システムを実現したことにあります。従来のソフトロボット用アクチュエータやセンサを動かす際に大きなボトルネックとなっていた硬くて大きいバッテリーの問題をこの成果によって克服する可能性が示されました。このような電源を他の研究者がソフトロボット表面に装着することが可能となり、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など、領域全体に貢献しうる端的な成果であると言えます。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、時代を担う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います。海外との共同研究も積極的に推し進めており、世界的にも先進的な取り組みになると期待できます。今後は第 3 層の異分野融合、すべての計画班や公募班を restructuring した融合研究を加速させることで、より学際的研究活動としての成果が生み出されると期待しております。

### **津田一郎先生(中部大学 創発学術院)**

本新学術領域研究は将来有望な多くの方向性を持っており、鈴森総括のリーダーシップのもと、すでに多くの研究成果を得ている。審査意見に対して誠実に対応し、計画班と公募班が有機的に統合されるように公募班をうまく組み入れている。

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ーバー計算機になりうるという発見があり、リザーバー計算機自体が時空パターン学習において普遍性を有するためにこの物理的リザーバー計算機の汎用性が国際的に注目を集めている。

これに留まらず、本領域ではロボットに必要な要素技術を物理的に柔らかいソフトマテリアルに置き換えて、センサー、アクチュエーター、コントローラーなどにおいて生物の運動や内在するリズムの解析を取り入れながら新しい要素技術を開発している。さらにこういった要素技術を、例えば生物組織の長期安定的な培養や手のひらの細かい筋活動計測などに結びつけるなど確実な応用可能性を示している。これらはすでに国際的に高く評価され、本研究のさらなる発展がプロジェクト後半期にも大いに期待される。

神経系を持つ動物やヒトでは、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、現在の脳科学においても近年急速に発展してきたニューラルネットの学習機能を備えた AI 分野においても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、本領域の発展はこの問題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。

本領域では国際共同研究も活発に行われているので、ソフトロボット学という新領域が国際的な広がりを持ち始めている。現在、国内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すれば、なお一層国際的なイニシアティブが取れると期待される。