

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：12608  
研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）  
研究期間：2018～2022  
課題番号：18H05465  
研究課題名（和文）ソフトロボット学の総括

研究課題名（英文）Science of Soft Robot

研究代表者

鈴森 康一（Suzumori, Koichi）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00333451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 181,800,000円

研究成果の概要（和文）：本領域では「やわらかさ」を目指す新興学術の種を融合し、出会うはずのなかった研究者を出合わせる。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だし、「やわらかさ」に立脚する学術領域「ソフトロボット学」を切り拓いた。  
具体的には、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、種々のソフトロボットの要素技術を実現し、それらに基づいたソフトロボットを実現するとともに、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有史以来、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。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勃興してきた。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た。本領域では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し、「やわらかさ」に立脚する学術領域「ソフトロボット学」の第一歩を切り拓いた。

研究成果の概要（英文）：In this field, we fuse the seeds of emerging academics aiming for "softness" and bring together researchers who would never have met. This has created a major academic trend based on a value system that is the exact opposite of conventional science and technology, and has pioneered the academic field of soft robotics, which is based on "softness."

Specifically, in addition to mechanical engineering, electrical and electronic engineering, and information science, which have been the core of conventional robotics, we have strongly involved material science and biology to realize various elemental technologies for soft robots, and have realized soft robots based on these technologies. In addition, he has created a new academic trend in the form of soft robotics, which can be said to be the opposite of conventional values.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス ソフトメカニズム ソフトアクチュエータ ソフトマテリアル ソフトコンピューティング バイオメカニズム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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。

### 2. 研究の目的

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。

### 3. 研究の方法

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。

#### 4. 研究成果

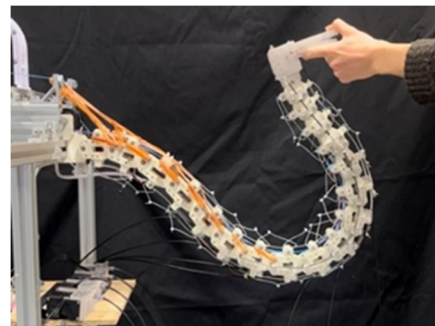
ロボティクス，機械工学，電気・電子工学，情報科学，材料科学，生物学，動物学にわたる異分野融合の強力な推進により，しなやかな身体，しなやかな動き，しなやかな知能に関する，ソフトロボットを構成する要素研究が数多く生まれた．また，これらを融合しソフトロボットへ総合する手法の研究成果として，現時点における「ソフトロボット学」を体系化し，和文，欧文のそれぞれのテキストとしてまとめ上げた．

【しなやかな身体】に関しては，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」の主要な構成方法を明らかにすることができた．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．これにより，下記の成果が生まれた．

- 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せられたロボットの設計・製作手法の体系化(例：右図，ダチョウ規範ミニピュレータ)



- 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実現

【しなやかな動き】に関しては，高機能高分子材料を基盤とした各種の新しいアクチュエータ，センサ，機能デバイス，メカニズムを創り出し，柔軟材料の変形に立脚した新しい動きの機構を構築した．具体的には，

- 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や薄膜ソフトセンサ(例：右図，アスリート用のウェアラブル筋電計測デバイス)



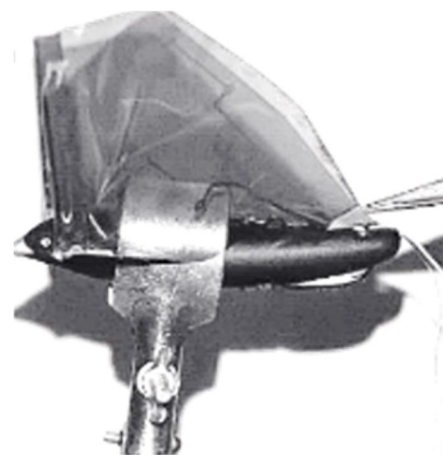
- イオン交換膜変形を利用したソフトアクチュエータの新しい造形技術確立

- 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，柔剛兼備なウロコ状機構，自己修復機能を実現する血管メカニズムが開発できた．

【しなやかな知能】に関しては，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研究を進めた．これにより，下記の成果が生まれた．

- 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(例：右図，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)



- 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

【ソフトロボットの体系化】に関しては、ソフトロボット設計学，ソフトロボット物質学，ソフトロボット情報学，という3本の柱から現時点における現時点における「ソフトロボット学」を体系化し，世界標準を目指したテキストとして，和文，欧文にそれぞれまとめ上げた．(参照：右図)



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Cacucciolo Vito, Nabae Hiroyuki, Suzumori Koichi, Shea Herbert	4. 巻 6
2. 論文標題 Electrically-Driven Soft Fluidic Actuators Combining Stretchable Pumps With Thin McKibben Muscles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobt.2019.00146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴森康一, 望山洋, 清水正弘, 田中博人, 福田憲二郎, ほか	4. 巻 122(1205)
2. 論文標題 ソフトロボット学特集	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 4-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jsmemag.122.1205_4	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴森康一, 新山龍馬, 前田真吾	4. 巻 7
2. 論文標題 新学術領域「ソフトロボット学」の概要	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 月刊ソフトマター	6. 最初と最後の頁 10-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴森康一, 新山龍馬, 田原健二, 細田耕, 梅館拓也, 中嶋浩平	4. 巻 37(1)
2. 論文標題 ソフトロボット学特集	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 2-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.37.53	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft actuators/robots pioneering E-kagen world
3. 学会等名 The international Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Paficicem2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft robotics and material sciences: An adaptive way leading to a smart society and future
3. 学会等名 The 5th International Conference on Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft Robotics leading to E-Kagen technology
3. 学会等名 “Soft Material Robotic Systems” (SPP 2100) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft Robotics Leading to E-kagen Science and Technology
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Future soft actuator based on E-kagen engineering
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Toward practical application of soft robots
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 MEXT KAKENHI Project on Soft Robots in Japan
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft Robotics as E-kagen Science
3. 学会等名 Robotics: Science and Systems (RSS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Suzumori
2. 発表標題 Soft Robotics as E-kagen Science
3. 学会等名 The IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木康一
2. 発表標題 ソフトロボット学
3. 学会等名 日本機械学会2019年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鈴木 康一	4. 発行年 2021年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 208
3. 書名 いいかげんなロボット	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Science of Soft Robots <a href="https://softrobot.jp/">https://softrobot.jp/</a> Science of Soft Robots <a href="https://softrobot.jp/">https://softrobot.jp/</a> ソフトロボット学 <a href="http://softrobot.jp/">http://softrobot.jp/</a> ソフトロボット学 <a href="http://softrobot.jp/">http://softrobot.jp/</a>
--



## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	新山 龍馬  (Ryuma Niiyama)  (00734592)	明治大学・理工学部・専任講師    (32682)	
研究分担者	清水 正宏  (Masahiro Shimizu)  (50447140)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授    (14401)	
研究分担者	田中 博人  (Hirotō Tanaka)  (80624725)	東京工業大学・工学院・准教授    (12608)	
研究分担者	福田 憲二郎  (Kenjiro Fukuda)  (40613766)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員    (82401)	
研究分担者	多田 隈 建二郎  (Kenjiro Tadakuma)  (30508833)	東北大学・タフ・サイバーフィジカルAI研究センター・准教授    (11301)	
研究分担者	中嶋 浩平  (Kohei Nakajima)  (10740251)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授    (12601)	
研究分担者	前田 真吾  (Shingo Maeda)  (40424808)	東京工業大学・工学院・教授    (12608)	
研究分担者	伊藤 浩史  (Hirofumi Ito)  (20512627)	九州大学・芸術工学研究院・准教授    (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	難波江 裕之  (Hiroyuki Nabae)  (90757171)	東京工業大学・工学院・助教    (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計7件

国際研究集会 AIM 2019 Workshop on “Towards Soft Robotics for Biomimetics and Applications: Emerging Sensors, Actuators, and Methods”	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Robosoft 2019 Workshop on “Toward the nature of information processing in soft machines”	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 IEEE MHS2019, Symposium on Soft Robotics	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Living Machines 2019 Workshop: Science of Soft Robots	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 3rd International Workshop on Science of Soft Robots	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 2nd International Workshop on Science of Soft Robots (Invitational)	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 1st International Workshop on Science of Soft Robots	開催年 2018年～2018年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------