

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18700

研究課題名(和文)生物と無生物界面を接続するウェットロボティクスの接続層の設計論と計測制御

研究課題名(英文) Design and Measurement control of interface layer of Wet robotics between biotic and abiotic

研究代表者

森島 圭祐 (Morishima, Keisuke)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60359114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機械システムと生物を一体化するための設計方針、生物と無生物界面に存在する計測と制御課題を示し、ウェットロボティクスの基盤設計指針を構築することを目的とする。機械部品と生命体との間に「生物層-機械層(無生物層)接続用部品」を配置し、これらの接続層をさらに接続する、界面層の大きく三層構造を考えた。nmから $\mu\text{m}$ 、 $\mu\text{m}$ からcmのスケールをつなぐ、生物的なものと無生物的な人工物が不可分に融合したシステムの試作設計を行い、細胞スケールでは、細胞内部状態計測評価、組織スケールでは、3次元iPS心筋組織の電気機械特性計測評価、個体スケールでは、線虫や昆虫を用いた計測評価をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の生体適合性、熱物性と生物のやわらかさ、恒常性維持に着目し、生物と無生物界面接続のための基盤技術の開発と物質輸送、情報伝達デバイスにつながる設計指針と材料の機能発現と創発、新しい制御手法に向けた知見が得られた。生物である昆虫の体内外と様々な材料、形の人工物を接続することで、生物-無生物を融合したソフトロボットやウエアラブル、生体埋め込みデバイスの設計と生物と機械を融合したシステムの制御手法において新しい知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to present a design rule for integrating mechanical systems and living organisms, the measurement and control issues that exist at the biological and inanimate interfaces, and to establish a basic design architecture for wet robotics. We considered a large, three-layered structure of interface layers, with "biological layer-machine layer (inanimate layer) connecting components" between machine parts and living organisms, and further connecting these connecting layers. Nano to micro and micro to cm scales, connecting biological and inanimate artifacts inseparably fused together. We designed a prototype of the system and evaluated the measurement of the internal state of cells at the cellular scale, the measurement of electromechanical properties of 3D iPS myocardial tissue at the tissue scale, and the measurement of nematodes and insects at the individual scale.

研究分野：生命機械融合

キーワード：生命機械融合 ウェットロボティクス バイオアクチュエータ マイクロロボット 界面 昆虫サイボ  
ーグ 心筋細胞

### 1. 研究開始当初の背景

2003年に申請者である森島らは、心筋細胞を用いたマイクロピラー、マイクロポンプの駆動を報告した。筋細胞が持っている、ATPの形で保持された化学エネルギーを運動エネルギーに変換する機能を直接利用する発想であり、MEMS技術との組み合わせによってはじめて実現された。筋細胞はこの寸法領域における化学エネルギーで駆動するやわらかいアクチュエータとして優秀な性能を有しており、今日でも活発に研究がおこなわれている。本研究では、機械システムと生物を一体化するための設計方針、生物と無生物界面に存在する計測と制御課題を示し、ウェットロボティクスの基盤設計指針を構築する。機械部品と生命体との間に「生物層 - 機械層(無生物層)接続用部品」を配置し、この部品の中で階層的に生物から機械(無生物)を接続していく。部品の中には、その機械接続側には無生物的な接続層、生体側には生物的な接続層を構成し、これらの接続層をさらに接続する、界面層の大きく三層構造を考える。生物と様々な材料、形の人工物を接続するための基盤技術の開発と物質輸送、情報伝達デバイスにつながる設計指針と材料の機能発現と創発を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、やわらかい機械をシステムとして生物と一体化するための基盤設計指針を構築することを目的とする。人工的に製造された機械と、自然界に存在する生命体とを融合させたやわらかいシステムを実現するための設計的アプローチを着想した(Fig. 1)。生物と機械の融合を目指すWet Robotics領域において、本質的な課題と想定されるBiotic-Abiotic Interfaceの状態を計測する。

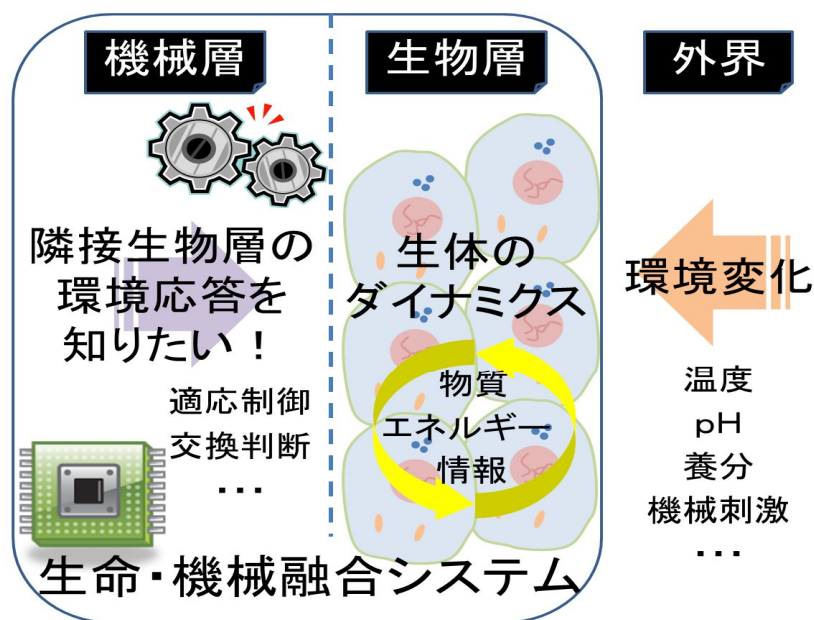


Fig.1 ウェットロボティクスの発想に基づいた、生物 - 無生物界面に存在する計測と制御課題

### 3. 研究の方法

まず、nmから $\mu\text{m}$ 、 $\mu\text{m}$ からcmのスケールをつなぐ、生物的なものと無生物的な人工物とが不可分に融合したシステムの試作設計を行った。「無生物接続層」では、無生物サブシステムと電気的・機械的接続の機能を実現し、主には既存の設計技術を用いて援用することで、昆虫の運動動作を電気的に制御する実験をおこなった。また、細胞スケールにおいては、物質輸送の観点で、単一細胞を微小電極に接触させた状態で観察をおこない、高速熱応答マイクロプローブ法による細胞内部状態計測をおこなった。また、組織スケールにおいては、作製したiPS心筋組織の3次元スフェロイドマイクロ空間に培養し、電気的特性と力学的特性を計測するシステムとして、マイクロ空間における3次元iPS心筋組織の心毒性評価システムの開発をおこなった。さらに、微小生命体モデルとして、線虫を対象とし、線虫をマイクロ物質輸送ロボットとして活用し物質導入を目指したモデルを構築し、評価をおこなった。

### 4. 研究成果

生物と無生物界面を接続するウェットロボティクスのモデルとして、以下の4つの計測、制御

課題に取り組んだ結果、得られた成果の一部を示す。

昆虫であるマダガスカルゴキブリを用いたデバイスの試作、評価 (Fig.2)

単一細胞の熱物性評価 (Fig.3)

iPS 心筋細胞による3次元スフェロイドの電気的、力学的特性評価デバイスの開発 (Fig.4)

マイクロロボットとして活用する線虫モデルの開発

これらの課題を通して、機械システムと生物を一体化するための設計方針、生物と無生物界面に存在する計測と制御課題を示し、ウエットロボティクスの基盤設計指針をマルチスケールにわたって示すことができた。

生体材料として小生命体である昆虫の外骨格、神経節、器官と電気機械構造体や人工材料を接続して運動制御したり、生体情報計測解析、制御実験をおこなった。生物である昆虫の体内外と様々な材料、形の人工物を接続することで、生物 - 無生物を融合したソフトロボットやウエアラブル、生体埋め込みデバイスの設計と生物と機械を融合したシステムの制御手法において新しい知見が得られた。その成果をロボメカ、EMBC、ICRA、MEMS、MicroTAS 国際会議で発表した。

細胞スケールにおいては、生物・無生物界面におけるバイタル計測の必要性に着目し、細胞表面に、MEMS 技術によって形成した微小金属電極を接触させ電流を印加、ヒータとして用いて局所温度分布を発生させ、熱伝導計測に挑戦した。これは生物学の計測で頻繁に用いられる物質特異的な標識に対して、時空間に特異的に標識すると表現することができる。材料の生体適合性、熱物性と生物のやわらかさ、恒常性維持に着目し、生物と無生物界面接続のための基盤技術の開発と物質輸送、情報伝達デバイスにつながる設計指針と材料の機能発現と創発に向けた知見が

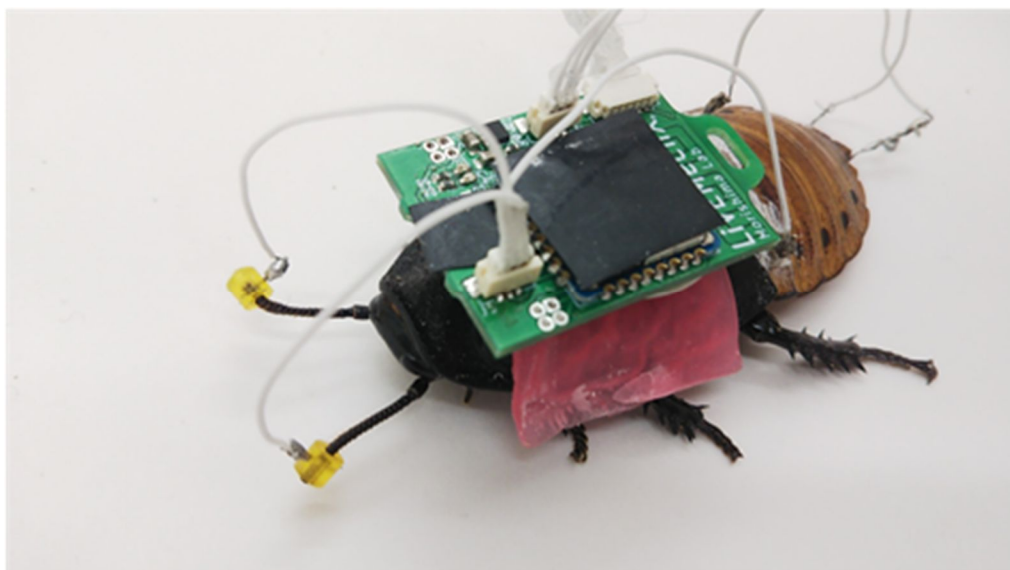


Fig.2 昆虫であるマダガスカルゴキブリを用いたデバイスの試作

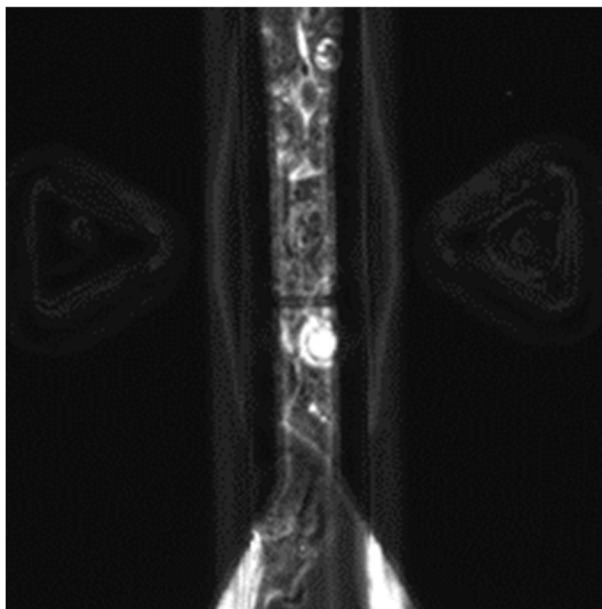


Fig.3 単一細胞の熱物性評価

得られた。その成果により、特許を取得した。

本研究により、生物と人工物の新しいハイブリッド化技術が確立すれば、従来の「バイオメテック」から「細胞や分子を用いたものづくり」へのパラダイムシフトを起こすことが可能である。また、分子-機械・分子-電子間のインターフェース技術が実現すれば、原理的には様々な分子機能を人工システムに取り込むことが可能となる。今後、様々な細胞、分子ロボティクス合成技術により、今回構築する生物 無生物界面設計論に基づいたソフト&ウェットロボットも、現在の人工的なデバイスと同等レベルに大量生産でき、ソフトマシン自体の高機能化も見込める。これまで学術的に融合することがなかった材料界面設計とソフトロボティクスの分野とマイクロナノロボティクス・メカトロニクスの分野を融合した全く新しい学問分野、すなわち、これまでの機械に新しい付加価値が備わったウェットロボティクス&メカトロニクスの分野を開拓し、医療、バイオ、ロボット、IT産業に貢献できる。

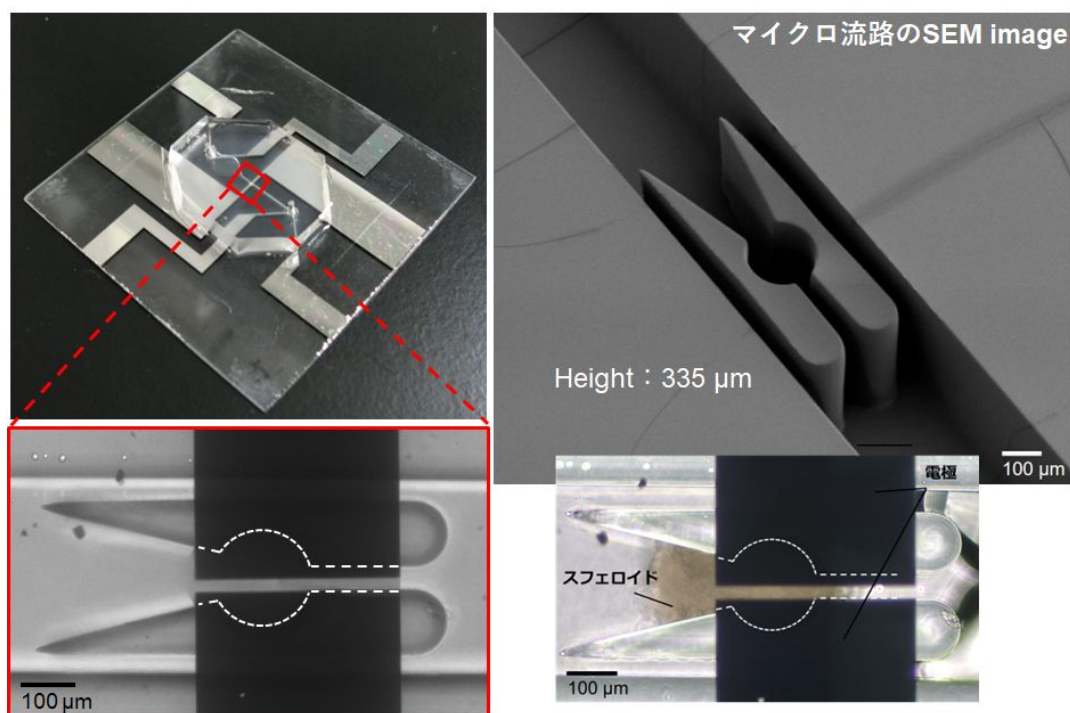


Fig.4 3次元 iPSC 心筋スフェロイドの特性評価デバイス

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ariyanto Mochammad, Refat Chowdhury Mohammad Masum, Yamamoto Kotaro, Morishima Keisuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Feedback control of automatic navigation for cyborg cockroach without external motion capture system	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e26987 ~ e26987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2024.e26987	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 該当する

1. 著者名 Ariyanto Mochammad, Refat Chowdhury Mohammad Masum, Yamamoto Kotaro, Morishima Keisuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Feedback control of automatic navigation for cyborg cockroach without external motion capture system	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e26987 ~ e26987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2024.e26987	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 該当する

1. 著者名 Refat Chowdhury Mohammad Masum, Ariyanto Mochammad, Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental User Interface and Control System of Teleoperated Biobots Explorer between Bangladesh and Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Proceedings of IEEE 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)	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) 10.1109/ICMA54519.2022.9856121	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Refat Chowdhury Mohammad Masum, Ariyanto Mochammad, Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke	4. 巻 2022
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Teleoperated Control of Cyborg Insects between Bangladesh and Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)	6. 最初と最後の頁 2P2 ~ 001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmermd.2022.2P2-001	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 該当する

1. 著者名 Ariyanto Mochammad, Refat Chowdhury Mohammad Masum, Zheng Xiaofeng, Hirao Kazuyoshi, Wang Yingzhe, Morishima Keisuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Teleoperated Locomotion for Biobot between Japan and Bangladesh	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computation	6. 最初と最後の頁 179 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/computation10100179	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 該当する

1. 著者名 Ariyanto Mochammad, Masum Refat C. M., Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Cyborg Cockroaches can be Commanded to Play Soccer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Proceedings of IEEE 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)	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) 10.1109/MHS56725.2022.10091974	査読の有無 有
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 Hirao Kazuyoshi, Ariyanto Mochammad, Fujita Yoshiki, Morishima Keisuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Heat Source Approaching by Cyborg Cockroach Using a New Antennae Electrode Implantation Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Proceedings of IEEE 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)	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) 10.1109/MHS56725.2022.10092120	査読の有無 有
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 HIRAO Kazuyoshi, Nishihara Gaku, Ariyanto Mochammad, Refat Chowdhury Mohammad Masum, Morishima Keisuke	4. 巻 2022
2. 論文標題 Control Method of Cyborg Insect inspired by Biological Behaviors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)	6. 最初と最後の頁 2P2 ~ 004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmermd.2022.2P2-004	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 Ariyanto Mochammad, Refat Chowdhury Mohammad Masum, Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke	4. 巻 4
2. 論文標題 Movement Optimization for a Cyborg Cockroach in a Bounded Space Incorporating Machine Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cyborg and Bionic Systems	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) 10.34133/cbsystems.0012	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 該当する

1. 著者名 Romanazzo S., Uesugi K., Taniguchi A., Forte G., Morishima K.	4. 巻 15
2. 論文標題 Measurement of the Bio-Mechanical Properties of Two Different Feeder Layer Cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Open Biotechnology Journal	6. 最初と最後の頁 12 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2174/1874070702115010012	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 該当する

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 山本 康太郎, Mochammad Ariyanto, C.M.M. Refat, 平尾 和隆, Wang Yingzhe, 森島 圭祐
2. 発表標題 複数の昆虫サイボークを連結した編隊形成と移動制御
3. 学会等名 ロボティクス&メカトロニクス講演会 2023, 名古屋, 2023年 6月
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 康太郎, Mochammad Ariyanto, C.M.M. Refat, Wang Yingzhe, 森島 圭祐
2. 発表標題 物資輸送を目的とする複数の昆虫サイボークの物理的連結と移動制御
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会, 仙台, 2023年 9月
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Chowdhury Mohammad Masum Refat, Mochammad Ariyanto, Kotaro Yamamoto, Antonio Caforio, Keisuke Morishima
2 . 発表標題 Environment-Insect Robot (HEIR) Interaction 3 Machine Learning Model for Cyborg Insects Perception Classification.
3 . 学会等名 41st Annual Conference of the Robotics Society of Japan . Sendai International Center: Miyagi, Japan. (2023/9/12)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Ariyanto, C.M.M. Refat, K. Morishima
2 . 発表標題 Linked Formation with Multiple Cyborg Insects
3 . 学会等名 ICRA2023, U.K., May, 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Ariyanto, C.M.M. Refat, K. Hirao,Wang Yingzhe, K. Morishima
2 . 発表標題 Linkage System for Swarm Control of Cyborg Insects
3 . 学会等名 EMBC2023, Australia, July, 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Ariyanto, C.M.M. Refat,K. Morishima
2 . 発表標題 Multi-Cyborg Insect-Linked Formation for Object Transportation
3 . 学会等名 ICMA2023, China, August, 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年



1. 発表者名 Ariyanto M., Refat C. M. M., and Morishima K.
2. 発表標題 Human Part Recognition for Intelligent Cyborg Insect Using an Extremely Low-Resolution Thermopile Array Sensor
3. 学会等名 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Aug. 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Refat Chowdhury Mohammad Masum, Ariyanto Mochammad, Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke
2. 発表標題 Experimental User Interface and Control System of Teleoperated Biobots Explorer between Bangladesh and Japan
3. 学会等名 IEEE 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ariyanto Mochammad, Masum Refat C. M., Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke
2. 発表標題 Cyborg Cockroaches can be Commanded to Play Soccer
3. 学会等名 IEEE 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirao Kazuyoshi, Ariyanto Mochammad, Fujita Yoshiki, Morishima Keisuke
2. 発表標題 Heat Source Approaching by Cyborg Cockroach Using a New Antennae Electrode Implantation Method
3. 学会等名 IEEE 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平尾 和陸, 西原 岳, モハマド アリヤント, マッサム リファット, 森島 圭祐
2. 発表標題 生物の潜伏性と隔走行性から着想した昆虫サイborgの行動制御則の探索
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Refat Chowdhury Mohammad Masum, Ariyanto Mochammad, Hirao Kazuyoshi, Morishima Keisuke
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Teleoperated Control of Cyborg Insects between Bangladesh and Japan
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森島圭祐
2. 発表標題 自己組織化バイオアクチュエータによって実現する動的再構成可能ウエットロボティクスの創成
3. 学会等名 第34回バイオエンジニアリング講演会シンポジウム OS: メカノアクティブソフトマター 2022/6/25 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森島圭祐
2. 発表標題 マイクロナノ科学の最前線
3. 学会等名 有機機能材料のリソグラフィ加工コンソーシアム 第45回定例会 2022/09/27 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森島圭祐
2. 発表標題 バック・トゥ・ザ・フューチャー続編バイオエンジニアリング_LiVEMechX版
3. 学会等名 第33回バイオフロンティア講演会 2022/12/17 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森島圭祐
2. 発表標題 生物資源が拓くマイクロ知能ロボットとアグリ工学の未来－昆虫筋細胞バイオアクチュエーターから生物サイボーグー
3. 学会等名 インテリジェントアグリ工学フォーラム 3月13日 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森島 圭祐, 八上 雄太, 高島 義之
2. 発表標題 高速熱応答マイクロプローブ法による細胞内部状態計測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P3-J15-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田 剛輝, 平尾 和睦, 梅村 歩, ARIYANTO Mochammad, 森島 圭祐
2. 発表標題 昆虫サイボーグの行動を操作する感覚器官への刺激制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P1-J11-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊 颯,塚本 佳也,赤木 隆美,明石 満,諫田 泰成,森島 圭祐
2. 発表標題 マイクロ空間における3次元iPS心筋組織の心毒性評価システム
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P3-J14-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平尾 和睦, 藤田 剛輝, 梅村 歩, ムハンマド アリヤント, 森島 圭祐
2. 発表標題 昆虫サイボークの自立型熱源誘導制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P3-J11-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅村 歩, 平尾 和睦, 藤田 剛輝, 鄭 暁豊, ムハンマド アリヤント, 森島 圭祐
2. 発表標題 昆虫の群行動習性から探る生物サイボーク群の行動制御則の探索
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P3-J15-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川 友貴, 新保 圭生, 森島 圭祐
2. 発表標題 線虫を利用したマイクロ物質輸送ロボット確立を目指した物質導入評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021 (0), 1P3-J08-, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Morishima
2. 発表標題 Control of Living Machined Wet Robotics -LiVEMechX Integration-
3. 学会等名 IEEE EMBC2021 workshop: Bio-inspired, Bio-mimetic and Bio-hybrid (Cyborg) Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

生命機械融合ウエットロボティクス領域 森島研究室 <a href="http://www-live.mech.eng.osaka-u.ac.jp/">http://www-live.mech.eng.osaka-u.ac.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

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0件

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
---------	---------