

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21950

研究課題名（和文）化学反応に基づく油滴の内部対流を使った自走制御と水上物体搬送への適用

研究課題名（英文）Self-propulsion control of an oil droplet using chemical reaction and the application to in-water object transportation

研究代表者

澤田 秀之（Sawada, Hideyuki）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00308206

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、油滴の自走現象に対して、油滴形状、環境温度・湿度変化、振動印加の3つの物理条件をアクティブに与えることで、その応答性を解析し、自走制御につなげた。これらの物理条件を与えた際の油滴内部に出来るマランゴニ対流の特性及び自走特性を物理シミュレーションとの比較により解析し、考察を行った。自走油滴を流体の動きを利用した新奇なアクチュエータと見做し、これを最適に制御する手法を提案した。マランゴニ対流の境界条件依存性に着目し、油滴形状を物理刺激によりアクティブに変形させることで自走制御をおこなう試みは、これまでになかった新しい成果と言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、自走油滴を流体の動きを利用した新奇なアクチュエータと見做し、これを最適に制御する手法を提案した。ソフトロボティクスの最近の研究において、流体アクチュエータが注目されており、流体の境界条件や腱となる部材を追加して束縛を増やすことで制御を試みる研究成果が報告されている。対流を利用したアクチュエータはソフトロボティクスの分野から見ても革新的であり、また油滴を物理的に変形させて自走制御する研究は、高分子の研究分野においても新奇性が高い。対流の境界条件依存性に着目し、形状を変形することで油滴を制御する試みは、分野の垣根を超えた挑戦的な研究成果といえる。

研究成果の概要（英文）：This research proposed a novel directional control method of self-propelled oil droplets. Oil droplets locomote spontaneously with surfactant action. This self-propulsion is caused by Marangoni convection within the oil droplet due to differences in the surfactant concentration at the droplet surface. We paid attention to the observational facts that self-propelled oil droplets changed their locomotion styles depending on their shapes, and discovered that boomerang-shaped oil droplets performed the straight motion. In this study, we introduced exoskeletons for the directional and velocity control of oil droplets. Through experiments and simulation studies, we further discovered that the stability of the velocity and locomotion direction depended on the particular boomerang shapes, environmental temperature and humidity, and external vibratory stimuli. Our discovery was applied to a transporting robot driven only by the energy obtained from chemical reactions.

研究分野：ロボティクス

キーワード：油滴 マランゴニ対流 化学反応 自走油滴 オレイン酸 界面活性剤 形状記憶合金ワイヤ 水中物体搬送

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

油滴を界面活性剤の水溶液に滴下すると、油滴界面に界面活性剤の濃度差ができ油滴内部にマランゴニ対流が発生する。このマランゴニ対流によって、無水オレイン酸を主成分とする油滴が水溶液内を自走する現象が報告されている。自走のエネルギーは油滴の界面における界面活性剤の濃度差に起因し、この濃度差は油滴内の無水オレイン酸が加水分解反応を起こすことによって保たれる。電気などの外部エネルギーを必要としない化学反応に起因する自律的現象は、ミリ・マイクロスケールにおける有力な物体移動法となり得る。油滴の自走機序は流体力学的現象に基づくものであるが、未だ詳細に解析された報告は見当たらず、またこの原理に基づく油滴の自走制御は前例がない。

2. 研究の目的

本研究では、微細な形状記憶合金 (SMA: Shape memory alloy) ワイヤを用いたアクチュエータを油滴の外骨格として与えることで、油滴の自走方向および速度の動的制御を可能とすることを目的とする。SMA ワイヤ外骨格による油滴の自律的変形は、マランゴニ対流発生時の境界条件を変化させ、これにより油滴の自走制御が可能となる。また、液滴内のマランゴニ対流は、環境温度や湿度の影響により変化する現象も知られている。そこで環境の物理量をアクティブに制御することによる自走状態の制御についても考察を進める。更に油滴の自走制御を応用し、外部からのエネルギー供給を必要とせず、溶液中の物体をスタンドアロンで目的地点まで移動させることを可能とする搬送システムの提案につなげる。

3. 研究の方法

界面活性剤の水溶液中に無水オレイン酸を主成分とする油滴を滴下すると、油滴の周りにランダムにオレイン酸が附着して油滴界面に濃度差が発生し、その内部に表面張力差が生じることでマランゴニ対流が起こる。これにより対流の方向に油滴が自走を始めるが、その際に油滴の形状がブーメラン型となって内部の対流を安定化することが観測された (図1)。そこで、外骨格によって油滴の形状に制約を与えることで、内部の対流と自走方向・速度を動的に制御する手法を提案した。以下の3つの項目について解析と考察を行った。

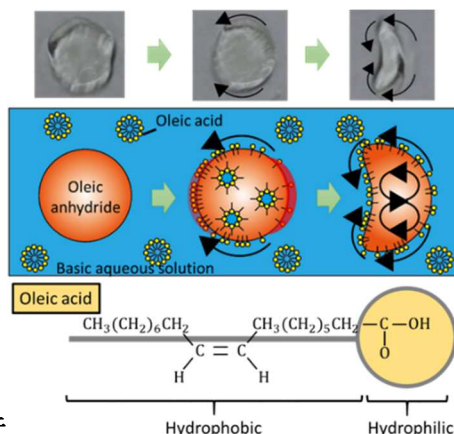


図1 油滴の自走と変形の原理

(項目1) 油滴形状の静的制御法の確立と自走特性の解析

油滴形状を外骨格によって物理的に変化させる手法を提案し、さらに油滴形状と自走特性との関係を、観測実験により明らかにした。ここで作成した外骨格の例を図2に示す。外骨格の内側を、前方と後方の曲率を変えたブーメラン形状にくり抜き、ここに油滴を滴下することで、自走油滴の移動方向ならびに自走速度を計測した。

(項目2) 油滴形状の内部対流に及ぼす影響の検証と自走機序の解明

油滴形状および溶液の物理条件が内部のマランゴニ対流に及ぼす影響について、観測実験ならびに物理シミュレーションにより考察を行った。ブーメラン形状の曲率を変化させると、閉空間にある流体の境界条件が変わり内部対流が変化する。また外部環境として、温度と湿度に着目し、これらの物理条件により液滴の表面張力が変化し、内部対流にも影響が及ぶこととなる。この内部対流の変化をPIV(粒子画像流速測定法)によって可視化した。油滴は水溶液を取り込みながら自走するため、水溶液にトレーサ粒子を混入することで対流の観察が可能になる。内部対流が自走特性に及ぼす影響を調査しながら項目1と統合的に考察を進め、自走メカニズムの解明に繋げた。

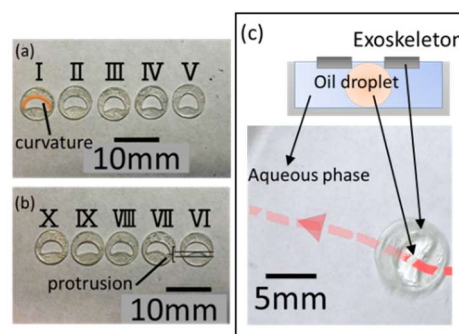


図2 ブーメラン型の外骨格と自走

項目3. SMA ワイヤアクチュエータを外骨格とした自走油滴の動的制御

SMA ワイヤアクチュエータにより外骨格に外力を与えることで、油滴形状を能動的に変化させて自走の動的制御を実現することを目指した。検討項目1,2により、左右が非対称な勾玉形状を与えることで、方向転換が可能となることを見出した。そこで、ブーメランの左右形状をアクティブに変形可能な外骨格を作製し、これにより方向制御が可能となることを示した。

4. 研究成果

本研究では、油滴の自走現象に対して3つの物理条件をアクティブに与えることで、その応答性を解析し、自走制御につなげた。3つの物理条件は、環境温度・湿度変化、振動印加、油滴形状であり、これらを与えた際の油滴内部対流の特性及び自走特性を物理シミュレーションとの比較により解析し、考察を行った。

温度依存性解析においては、湿度を80%に固定して油相の容量を2 μ Lに設定し、283Kと300Kの2つの温度条件での自走速度を計測した。この条件では、油滴は水相に完全に沈み、水相からの蒸発はほとんど起こらない。したがって水相からの水分蒸発によって引き起こされる油滴への影響は無視することができ、温度依存性の考察が可能となる。一方の湿度依存性解析では、温度を300K、油相の体積を8 μ Lに固定し、湿度20%と80%の条件で自走速度を計測し、考察した。温度依存性の実験(N=10)の結果、温度283K、300Kの時の定常速度はそれぞれ、2.34 mm/s (S.D.=0.219 mm/s)、1.56 mm/s (S.D.=0.117 mm/s)であった。湿度依存性の実験(N=10)では、定常速度は湿度20%および80%でそれぞれ1.62 mm/s (S.D.=0.443 mm/s) および1.91 mm/s (S.D.=0.243 mm/s)であった。環境温度が低いほど、また湿度が高いほど、油滴の自走速度は大きくなることが解った。界面活性剤(オレイン酸)の吸着に着目し、Gibbsの自由エネルギー変化式から、相平衡と化学反応の方向を与える式を導出し、油滴の駆動力につながる物理条件から、これらが油滴の自走速度の変化を引き起こすことを明らかにし、また実験結果と一致することを示した。

溶液中に固定した液滴に強制振動を加えると、内部に対流が生じることが解っている。この現象を自走油滴に応用することを試みた。更に、油滴の自走現象に影響を与える、界面活性剤の吸着量の違いを熱力学的観点から考察した。油滴に外部から物理振動を与える手法として、形状記憶合金(SMA)ワイヤを用いた。直径50 μ mのSMAワイヤにパルス電流を流すことで、パルスの周波数と同期した振動が発生することを利用し、図3に示す振動印加デバイスを作製した。SMAワイヤの利点として、細線状の素材であることからデバイスを小型化できることと、水中においても駆動の生成が可能であることが挙げられる。温度25 $^{\circ}$ C、湿度22%、油滴容量10 μ L、水溶液の容量を500 μ Lとした。SMAワイヤは、印可電圧15V、Duty比10%のパルス電圧を与えて振動させた。振動の印可により、内部のマランゴニ対流が変化することを示し、自走制御に利用できることが解った。

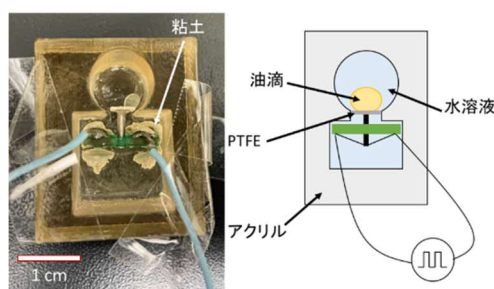


図3 振動印可デバイス

次に、図2に示した、様々な曲率でブーメラン形状に内部をくり抜いた外骨格を作成し、油滴の自走速度と方向について考察を行った。粘性流体内の油滴の運動を表す運動方程式を導出し、油滴の表面張力ならびに駆動力について考察をおこなった。自走油滴の運動は、界面活性剤の拡散とこれに起因して発生する油滴内部のマランゴニ対流によって生じる非線形性の強い現象であるため、理論的に油滴の挙動を導くことは困難である。そのため本研究では、数値流体シミュレーションを用いて油滴の運動を検証した。物理シミュレーションには、流体を粒子によって近似するSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用い、界面活性剤の拡散と流体の運動を、拡散方程式とNavier-Stokes方程式を解くことによって可視化した。

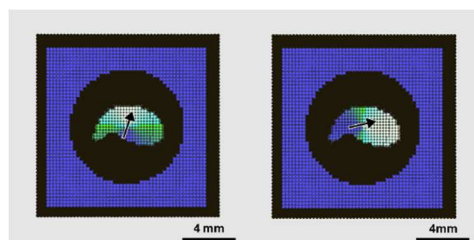


図4 物理シミュレーション結果

これにより、外骨格を与えた油滴はブーメラン形状に変形し、油滴内部に図1に示すマランゴニ対流が発生することで推進力を得て、凸方向へ自走することを示した。更に凸部の前方と後方の曲率差によって、自走速度が変化することも解った。また、シミュレーション結果と実験結果が良好に一致することを示した。

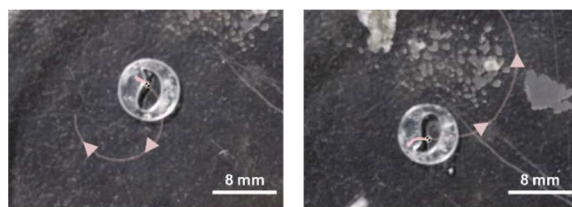


図5 非対称フレームによる自走の結果の例

次に、ブーメラン形状を左右非対称にした実験および物理シミュレーションをおこなった。図4にシミュレーションの結果の例を示すが、フレーム内の色は界面活性剤初期濃度を、矢印は推定される油滴の運動方向を表している。油滴の運動方向は、界面活性剤の濃度分布に大きく影響されることが分かる。一方の実験では、図5のように外骨格フレームの凹部と反対方向に曲がるような運動が観察された。また、フレーム形状の左右を入れ替えると、油滴の曲がる方向が逆になることが分かった。これは図4に示す物理シミュレーション結果と同様である。油滴右部分を流れるマランゴニ対流が大きく形成されると油滴が右に曲がることになる。ブーメラン形状を左右非対称に変形させることで、油滴の方向転換が可能であることを示した。

以上の成果を基に、外骨格を備えた液滴を利用した、化学反応により駆動する物体搬送ロボッ

トを開発した。溶液中で物体を搬送して目的地に届けるには、移動方向の制御が特に重要となる。そこで、溶液中の物体を後方から押すことができる、図 6 に示すカブトムシの角を模した構造体を持つ外骨格を作成した。運搬物は、着色した植物油の液滴とした。開発した搬送ロボットは、図 6(b) に示す様に、平均速度 0.61 mm/s で、距離 6.26 mm を 10 秒間で搬送できることがわかった。

本研究では、自走油滴を流体の動きを利用した新奇なアクチュエータと見做し、これを最適に制御する手法を提案した。マランゴニ対流の境界条件依存性に着目し、油滴形状を物理刺激によりアクティブに変形させることで自走制御をおこなう試みは、これまでにない新しい成果と言える。

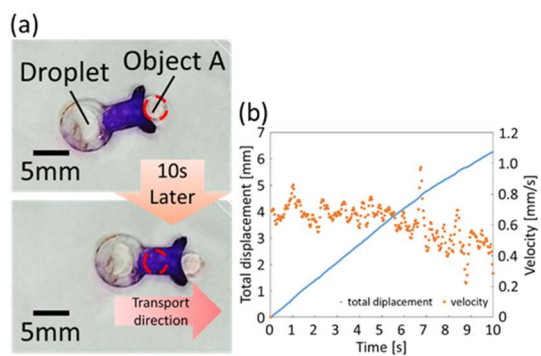


図 6 外骨格装着油滴を活用した物体搬送

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Chen Xiaojie, Ning Kewei, Shigemune Hiroki, Sawada Hideyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 An untethered soft robotic fish using SMA wires and its performance analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 229-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2021.120384	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 Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, Hideyuki Sawada	4. 巻 Pacifichem2021
2. 論文標題 Investigation of the behavior of Marangoni-driven oleic droplet in different humidity,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 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 Maeda Shingo, Shigemune Hiroki, Sawada Hideyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Self-Actuating and Nonelectronic Machines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 249-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0249	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 Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, Hideyuki Sawada	4. 巻 Vol.50, No.3
2. 論文標題 Temperature and Humidity Dependence of Marangoni Convection and Its Effect on the Self-propulsion of an Oil Droplet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 493-496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200842	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 Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, Eiji Iwase, Shuji Hashimoto, Shigeki Sugano, Hideyuki Sawada	4. 巻 3
2. 論文標題 Programming Stepwise Motility into a Sheet of Paper Using Inkjet Printing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 2000153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aisy.202000153	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 Xiaojie Chen, Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada	4. 巻 ICMA2020
2. 論文標題 An Untethered Bionic Robotic Fish Using SMA Actuators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 1768-1773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMA49215.2020.9233798	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 Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Shingo Maeda and Hideyuki Sawada	4. 巻 Issue 69
2. 論文標題 Directional and velocity control of active droplets using a rigid-frame	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Royal Society of Chemistry Advances	6. 最初と最後の頁 40523-40530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA07789H	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 宮戸田顕音, 重宗宏毅, 三輪貴信, 澤田秀之	4. 巻 No.9
2. 論文標題 微小振動する形状記憶合金ワイヤを用いた触覚センサ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 論文誌C J102-C	6. 最初と最後の頁 241-248
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 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 Masato Yamada, Hiroki Shigemune and Hideyuki Sawada	4. 巻 MHS2019
2. 論文標題 Stability Analysis of Self-Folding Sheets on Water Surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science	6. 最初と最後の頁 66-68
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 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 前田真吾, 澤田秀之, 重宗宏毅, 三輪貴信	4. 巻 122
2. 論文標題 運動パターンを創り出すマテリアルと知能の設計	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 30-31
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 重宗宏毅, 前田真吾, 澤田秀之, 三輪貴信	4. 巻 63
2. 論文標題 しなやかさを生む確率情報処理とソフトロボットへの展開	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会誌	6. 最初と最後の頁 512-517
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 Noguchi Mika, Yamada Masato, Sawada Hideyuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Analysis of different self-propulsion types of oil droplets based on electrostatic interaction effects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 18354-18362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2RA02076A	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 坂叡土, 澤田秀之
2. 発表標題 外骨格で形状固定した自走油滴の3次元内部対流シミュレーション
3. 学会等名 ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口実香, 山田賢杜, 澤田秀之
2. 発表標題 静電相互作用を利用した複数自走油滴の挙動制御
3. 学会等名 ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斧田拓海, 澤田秀之
2. 発表標題 揮発性液体を用いた水滴内のマランゴニ対流の生成と制御
3. 学会等名 ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kewei Ning, Hideyuki Sawada
2. 発表標題 A Wireless Soft Robotic Fish for the Natural Swimming Behavior
3. 学会等名 電子材料技術協会 第58回秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩名紘基, 重宗宏毅, 澤田秀之
2. 発表標題 形状記憶合金ワイヤの振動特性の計測
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 A shape-memory alloy wire that generates micro-vibration while sensing force
3. 学会等名 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩名紘基, 澤田秀之
2. 発表標題 形状記憶合金ワイヤの振動現象の解析とアクチュエータ応用について
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 第57回秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊坂勲士, 山田賢杜, 重宗宏毅, 澤田秀之
2. 発表標題 粒子法シミュレーションによるフレーム付き自走油滴の内部対流の考察
3. 学会等名 ROBOMECH 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斧田拓海, 重宗宏毅, 澤田秀之
2. 発表標題 ワインの涙の液滴内部流の可視化によるマランゴニ対流に関する一考察
3. 学会等名 ROBOMECH 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 Soft Actuators and Sensors with the Use of Physical Properties for Robotic Manipulations
3. 学会等名 2nd International Workshop on Active Matter for Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 A Shape-memory Alloy Wire and Its Physical Properties as Soft Actuators and Sensors
3. 学会等名 2nd International Workshop on Science of Soft Robots (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重宗宏毅, 澤田秀之
2. 発表標題 機能的マテリアルとソフトロボットの知能化への展開
3. 学会等名 応用物理学会 秋季学術講演会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田賢杜, 重宗宏毅, 前田真吾, 澤田秀之
2. 発表標題 形状に着目した自走油滴の方向制御
3. 学会等名 ROBOMECH 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮戸田顕音, 澤田秀之
2. 発表標題 触覚の提示・センシングを同時に行うSMAトランスデューサ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 通信講演論文集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科 澤田研究室 http://www.sawada.phys.waseda.ac.jp/ http://www.phys.waseda.ac.jp/wps/faculty/sawada_hideyuki.html</p>
--

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	前田 真吾 (Maeda Shingo) (40424808)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

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	重宗 宏毅 (Shigemune Hiroki) (40822466)	芝浦工業大学・工学部・准教授 (32619)	

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