

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03960

研究課題名(和文) 広波長帯電磁波対応型エネルギーハーベスティングを実現する未来型新MCFゴムセンサ

研究課題名(英文) Futuristic new MCF rubber sensor realizing energy harvesting with wide range of electromagnetic wave length

研究代表者

島田 邦雄 (Shimada, Kunio)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：80251883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：“電波”から“放射線”まで広範囲に渉る波長帯の電磁波に対するMCFゴムセンサの電気特性や材料力学的特性等の解明、及びそれら原因の解明をした。一つには、それに見合うMCFゴムセンサを開発し、放射能下における電気特性や材料力学的特性等の解明や耐放射能、放射能発電の特性解明を行った。二つには、そのセンサを使って、未だ解明していない“X線”や“赤外線・遠赤外線”、“マイクロ波”、“電波”に対するセンサの特性解明を行い、また、太陽電池と放射能発電を組み合わせた発電技術の確立を行った。これにより、エネルギーハーベスティングを実現する未来型の新しいゴムセンサについての技術の確立を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近活発化してきている、環境問題に絡んでのエネルギーハーベスティングの技術開発に対して本研究は新しく提案するものである。すなわち、ある波長の長い“電波”を対象としたスマホなど多くの電磁波の飛び交う世の中において電波を有効活用しようという動きや、同じ電磁波の一種である太陽光や紫外線、放射線なども個別の波長帯において利用する動きがある。これらに対して、MCFゴムセンサでは、“電波”から“放射線”まで広範囲に渉る波長帯の電磁波に対して1つのセンサで反応(発電)することを未来型の新しいゴムセンサとして提案した。このように、限定された波長帯の電磁波利用の技術に対して新しい電磁波利用技術を提案した。

研究成果の概要(英文)：We elucidated the electric and material-dynamic characteristics and its induced reason of the MCF rubber sensor reacted on the electro-magnetic waves on all-around ranges from radio to radioactivity wave. Firstly, we developed the MCF rubber sensor corresponding to the elucidation, and then clarified the electric and material-dynamic characteristics under radioactivity, the radioactive resistance, and the property of radioactive power generation. Secondly, we also clarified the characteristics of the sensor reacted on the “X-ray”, “infrared ray/far infrared ray”, “micro-wave”, and “radio wave” whose properties we have not elucidated until recent, and then established the power generation technology which were combined solar cell and radioactive power. In conclusion, we could establish the technology of future-type novel rubber sensor which had the feasibility of the energy-harvesting.

研究分野：流体工学

キーワード：機能性流体 磁気混合流体 エネルギーハーベスティング 電磁波 ゴム 電解重合 センサ 磁場

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災により被災した福島原子力発電所における第一原発の廃炉作業に絡んで、デブリや瓦礫等の取り出しや解体に対する技術的諸問題に対して様々な立場から取り組んで来ている。その中であって、本申請者が開発した MCF (Magnetic Compound Fluid (磁気混合流体)) ゴムセンサは、ゴムとしての耐放射性や放射能発電の可能性の一端が、東工大とのこれまでの共同研究により判明した。廃炉作業の際には、まずデブリ等を感知する必要があるが、超音波等により物体を検知する非接触式手法と、実際に接触して検知する接触式手法とがあるが、MCF ゴムセンサは後者の手法である。すなわち、触覚センサとして活用するが、廃炉作業ロボットハンドの外皮等に取り付ける際には、手や足など人間の触覚と同じようなセンシングをすると同時に人間の皮膚と同じく伸縮性と弾力性に富むことが必要で、廃炉作業以外の未来のロボットにおいても有効である。これを達成するにはゴムが最適であるが、従来のゴムでは放射能に対し劣化の問題がある。本 MCF ゴムは、従来の加硫法でなく、本申請者がこれまでの科研費で新しく提案した電解重合法によってゴムを固化するものであり、その過程でゴムとしての耐放射性が生じると想定した。また、MCF ゴムに適切なドーパントを混合することにより、ゴムセンサの電気特性が劣化せず、放射能に対して誘起電圧が生じ放射能発電する可能性を見出した。また、これまでの科研費において、本 MCF ゴムは、ピエゾ効果によるセンシングや、バッテリー、太陽電池としての多機能性を有することが判明した。それ故、解体作業ロボットへ搭載するゴムセンサとして有効であることが想定できる。しかしながら、これら放射能下での MCF ゴムの特長の一端を知り得たに過ぎず、電気特性や材料力学的特性等の詳細は不明であり、耐放射能等の物理的解明は未だ不明である。また、放射能と太陽電池やセンシングを組み合わせたゴムの開発は国内外ともに未だ無い。

一方で、環境問題に絡んでエネルギーハーベスティングについての技術開発が最近活発化してきている。これは、スマホなど多くの電磁波の飛び交う世の中において電波を有効活用しようという動きがあるが、電磁波の波長帯を考えた時、 10^2m 以上の波長の長い“電波”を対象としている。一方、MCF ゴムセンサは“可視光”や“紫外線”により発電することが、これまでの科研費において明らかになった。そのため、太陽光や放射線なども同じ電磁波の一種であることから、“電波”から“放射線”まで広範囲に渉る波長帯の電磁波に MCF ゴムセンサが反応（発電）することが想定できる。一方、現在のエネルギーハーベスティングは限られた波長帯の電磁波での技術に過ぎず、広範囲に渉る波長帯の電磁波に反応する素材やセンサは未だ開発されていない。さらに、1つのゴムで広範囲な波長帯の電磁波に反応するゴムの開発研究は国内外においても未だ無い。

そこで、広範囲な波長帯の電磁波に反応するゴムを開発すれば、現在のエネルギーハーベスティングを拡張した展開型エネルギーハーベスティングを実現することができ、また、廃炉作業用ロボットに搭載できる触覚センサとしても提案でき、さらに、新しい応用機器の提案にも繋がるという考えに至った。

2. 研究の目的

こうしたことを踏まえ本研究では、これまでの科研費等で得た知見を活用しながら、MCF ゴムを基本に、原発の廃炉作業のための接触式手法のロボットに搭載できる触覚センサとして活用できるだけでなく、太陽光発電や放射能発電も同時に行うことができ、現在のエネルギーハーベスティングを拡張し広範囲な周波数帯の電磁波に反応する展開型エネルギーハーベスティングを実現する未来型の新しいゴムセンサの技術の確立を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で取り上げる MCF ゴムは、水ベース磁性流体（オレイン酸が被覆された 10nm オーダのマグネタイト粒子 (Fe_3O_4) と $1\mu\text{m}$ オーダの金属粒子（本研究では Ni 粒子を使用）とから成る MCF に天然ゴム(NR-latex)を混合し (MCF ゴム)、例えば 188mT の磁石を電極外側より印加しながら $2.7\text{A} \cdot 6\text{V}$ の電場を印加すると、NR-latex 中のゴム分子（ポリイソプレン）同士が電解重合により架橋するもとによりゴム化するものである。ここで、磁場印加により Fe_3O_4 と Ni 粒子が凝集体を形成し磁気クラスタを形成して磁力線方向に整列し、磁場方向と印加電場方向が同一であることから、ポリイソプレンによる長いゴム分子が磁力線方向に磁気クラスタと同一方向に整列する。これにより、電気や熱はこの配列方向に最も流れ易く、超高感度なセンサを作ることが出来る。この MCF ゴムをさらに発展させた HF (Hybrid Fluid (ハイブリッド流体)) を同様に NR-latex を混合して電解重合することによりゴム化する HF ゴムも開発し、これも採用する。HF は、昨今の磁性流体の絶版に対して磁性流体がなくとも MCF と同等の、あるいはそれ以上の機能を有する新しい磁気応答機能性流体として今回の科研費で新しく開発したものである。HF は、NR-latex 以外にクロロプレンゴム (CR-latex) とシリコンゴムの原液であるシリコンオイル(KF96)を混合しており、ポリビニルアルコール (PVA) による乳化重合によりこれらのゴムを結合させた液体で、そこに磁性流体の成分の代わりとしてマグネタイト粒子と水、ケロシンも混合させている。これら成分の割合を変化させることにより、液体状からゼリー状まで自在に粘性と弾性を変化させることができる特徴を持つ他に、あらゆるジエン系ゴム、非ジエン

系ゴムを混合し、電解重合によりゴム化することができる (HF ゴム)。また、これら成分の分子や粒子が、アクセプタやドープアントの役割を果たし、ドープアント間で電子やホール (正孔) の移動が起きるため、MCF ゴム中に見掛け上 $n \cdot p$ 型半導体としての性質が生じ、かつ、イオン間の電圧 (自己電圧) に依存するピエゾ効果や、電子やホールの移動に依存するピエゾ抵抗も HF ゴムは同時に併せ持つことができる。これら MCF ゴム、HF ゴムを本研究で展開していく。

4. 研究成果

(1) 太陽電池と放射能発電を組み合わせた発電の確立

後述する放射能発電以外にも太陽電池による発電の確立として、図 1, 2 に示すような太陽電池化した MCF ゴムセンサを製作し、電解重合した場合 (Elec.), しない場合 (No-elec.), 磁場印加して電解重合した場合 (mag.), 磁場印加しない場合 (no-mag.), 各成分を使用した種類の違いによる変化を実験的に得た。太陽電池と放射能発電を組み合わせた発電が可能である。

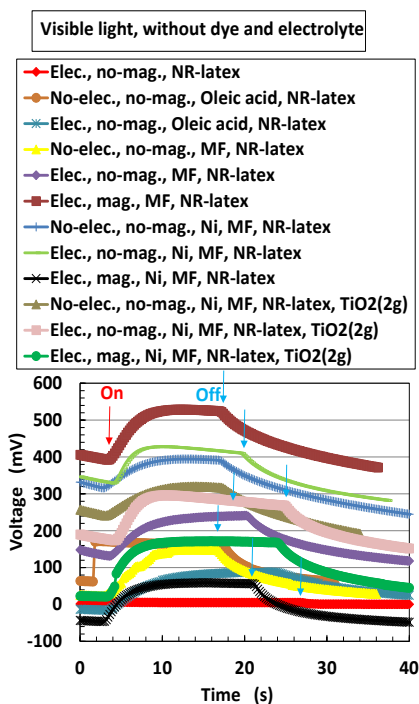


図 1 MCF ゴムセンサの光起電圧

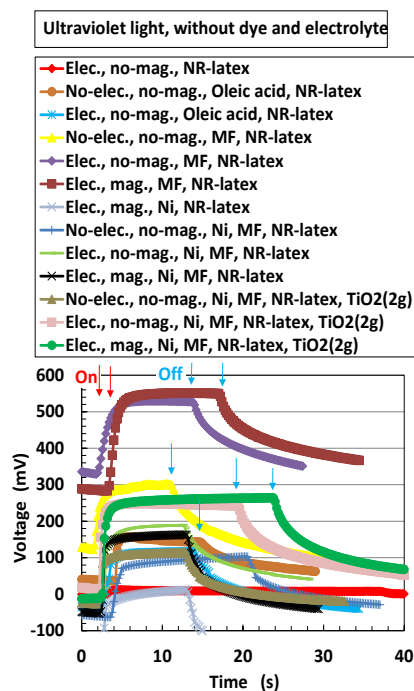


図 2 MCF ゴムセンサの光起電流

(2) 発展型センサの開発

前項(1)に対して、より効率を高めるため、図 3~7 に示すように、人間の皮膚感覚を司る感受器に着目し、その形態を生物学的模倣した HF ゴムセンサを開発した。

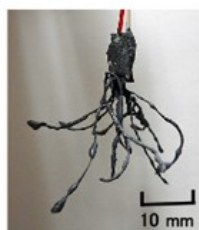


図 3 自由神経終末型 MCF ゴムセンサ (Type A)



図 4 クラウゼ小体型 MCF ゴムセンサ (Type B)



図 5 マイスナー型 MCF ゴムセンサ (Type C)



図 6 パチニ小体型 MCF ゴムセンサ (Type D)



図 7 ルフィニ小体型 MCF ゴムセンサ (Type E)

(3) 展開型エネルギーハーベスティングにおける特性試験と性能評価

広範囲な電磁波周波数帯における実験的検証として、テスラコイルを用いて電磁波を照射した時の自己誘起電圧等の測定を行った。図8, 9にその一例を示す。感受器の形態により起電圧が異なり、最適な感受器を選ぶことが重要であることが分かる。これにより、電磁波発電を確立し、太陽電池と電磁波発電を組み合わせた発電が可能であることが達成された。

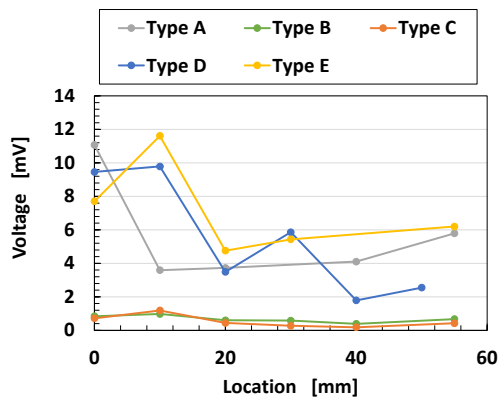


図8 MCF ゴムセンサの電磁波照射起電圧

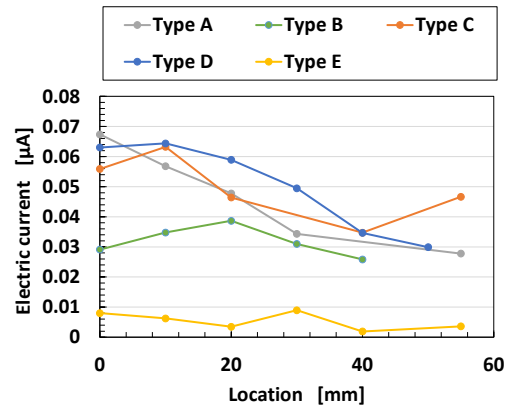


図9 MCF ゴムセンサの電磁波照射起電流

(4) 放射能発電の確立

東工大の先導原子力研究所の⁶⁰Coによるγ線照射実験室を借りて、γ線照射による自己誘起電圧等の測定を行った。図10~14にその一例を示す。電磁波発電と同様に、感受器の形態により起電圧が異なり、最適な感受器を選ぶことが重要であることが分かる。これにより、放射能発電を確立し、太陽電池と電磁波発電、放射能発電を組み合わせた発電が可能であることが達成された。

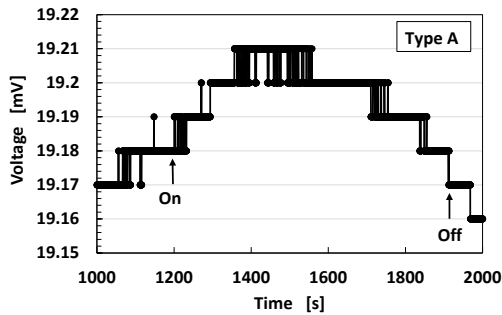


図10 放射線下での電圧変化 (Type A)

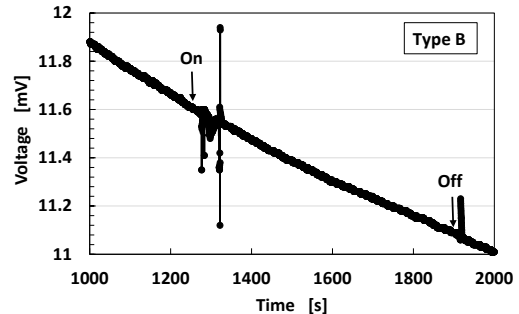


図11 放射線下での電圧変化 (Type B)

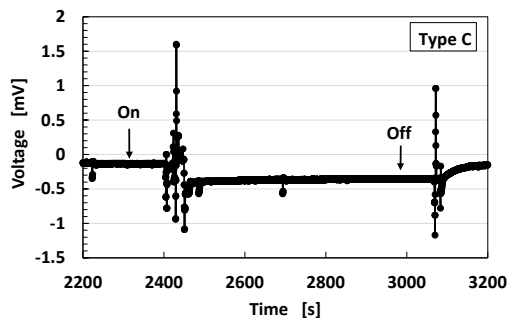


図12 放射線下での電圧変化 (Type C)

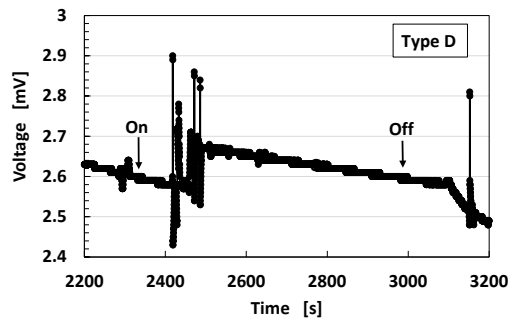


図13 放射線下での電圧変化 (Type D)

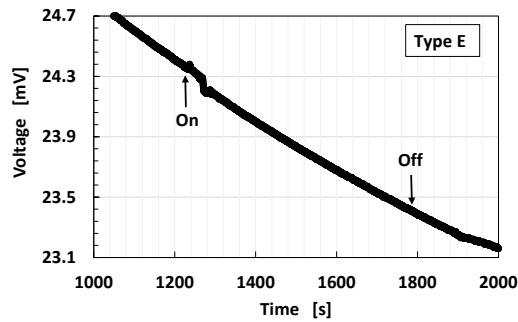


図 14 放射線下での電圧変化 (Type E)

(5) まとめ

“電波”から“放射線”まで広範囲に渉る波長帯の電磁波に対する MCF ゴムセンサの電気特性や材料力学的特性等の解明、及びそれら原因の解明をした。一つには、“電波”から“放射線”まで広範囲に渉る波長帯の電磁波に反応する MCF ゴムセンサを開発し、放射能下における電気特性や材料力学的特性等の解明や耐放射能、放射能発電の特性解明を行った。二つには、そのセンサを使って、未だ解明していない“X線”や“赤外線・遠赤外線”、“マイクロ波”、“電波”に対するセンサの特性解明を行い、また、太陽電池と放射能発電を組み合わせた発電技術の確立を行った。これにより、国内外に向けて展開型エナジーハーベスティングを実現する未来型の新しいゴムセンサを提案することを見据えて、特長や製作技術等の知見について実験的に得、本ゴムセンサについての技術の確立が図られた。

<引用文献>

- ① Kunio SHIMADA, Ryo IKEDA, Hiroshige KIKURA, Hideharu TAKAHASHI, Morphological fabrication of rubber cutaneous receptors embedded in a stretchable skin-mimicking human tissue by the utilization of hybrid fluid, *Sensors*, Vol. 21, No.20, 2021, 6834, <https://doi.org/10.3390/s21206834>
- ② Kunio SHIMADA, Ryo IKEDA, Hiroshige KIKURA, Hideharu TAKAHASHI, Development of novel magnetic responsive intelligent fluid, hybrid fluid (HF), for production of soft and tactile rubber, *World Journal of Mechanics*, Vol. 11, No. 10, 2021, pp.187-203
- ③ Kunio SHIMADA, Morphological fabrication of equilibrium and auditory sensors through electrolytic polymerization on hybrid fluid rubber (HF rubber) for smart materials of robotics, *Sensors*, Vol. 22, No. 14, 2022, 5447, <https://doi.org/10.3390/s22145447>
- ④ Kunio SHIMADA, Artificial tongue embedded with conceptual receptor for rubber gustatory sensor by electrolytic polymerization technique with utilizing hybrid fluid (HF), *Sensors*, Vol. 22, No. 18, 2022, 6979, <https://doi.org/10.3390/s22186979>
- ⑤ Kunio SHIMADA, Morphological configuration of sensory biomedical receptors based on structures integrated by electric circuits and utilizing magnetic-responsive hybrid fluid (HF), *Sensors*, Vol. 22, No. 24, 2022, 9952, <https://doi.org/10.3390/s22249952>
- ⑥ Kunio SHIMADA, Estimation of fast and slow adaptations in the tactile sensation of mechanoreceptors mimicked by hybrid fluid (HF) rubber with equivalent electric circuits and properties, *Sensors*, Vol. 23, No. 3, 2023, 1327, <https://doi.org/10.3390/s23031327>
- ⑦ Kunio SHIMADA, Correlations among firing rates of tactile, thermal, gustatory, olfactory, and auditory sensations mimicked by artificial hybrid fluid (HF) rubber mechanoreceptors, *Sensors*, Vol. 23, No. 10, 2023, 4593, <https://doi.org/10.3390/s23104593>
- ⑧ Kunio SHIMADA, Elucidation of response and electrochemical mechanisms of bio-Inspired rubber sensors with supercapacitor paradigm, *Electronics*, Vol. 12, No. 10, 2023, 2304, <https://doi.org/10.3390/electronics12102304>
- ⑨ Kunio SHIMADA, Photovoltaic sensibility of optical biosensor produced by flexible and stretchable rubber utilized physical paradigm of solar cell, *Optoelectronics Reports*, Vol. 1, No. 1, 2024, 354, <https://doi.org/10.59400/oer.v1i1.354>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 23, No. 10
2. 論文標題 Correlations among firing rates of tactile, thermal, gustatory, olfactory, and auditory sensations mimicked by artificial hybrid fluid (HF) rubber mechanoreceptors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23104593	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 12, No. 10
2. 論文標題 Elucidation of response and electrochemical mechanisms of bio-Inspired rubber sensors with supercapacitor paradigm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 2304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics12102304	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol.1, No.1
2. 論文標題 Photovoltaic sensibility of optical biosensor produced by flexible and stretchable rubber utilized physical paradigm of solar cell	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optoelectronics Reports	6. 最初と最後の頁 354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.59400/oer.v1i1.354	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 22, No. 14
2. 論文標題 Morphological fabrication of equilibrium and auditory sensors through electrolytic polymerization on hybrid fluid rubber (HF rubber) for smart materials of robotics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22145447	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 22, No. 18
2. 論文標題 Artificial tongue embedded with conceptual receptor for rubber gustatory sensor by electrolytic polymerization technique with utilizing hybrid fluid (HF)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22186979	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 Norihiko SAGA, Kunio SHIMADA, Douhaku INAMORI, Naoki SAITOH, Toshiyuki SATOH, Junya NAGASE	4. 巻 Vol. 22, No. 22
2. 論文標題 Smart pneumatic artificial muscle using a bend sensor like a human muscle with a muscle spindle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 8975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22228975	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 22, No. 24
2. 論文標題 Morphological configuration of sensory biomedical receptors based on structures integrated by electric circuits and utilizing magnetic-responsive hybrid fluid (HF)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 9952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22249952	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 Kunio SHIMADA	4. 巻 Vol. 23, No. 3
2. 論文標題 Estimation of fast and slow adaptations in the tactile sensation of mechanoreceptors mimicked by hybrid fluid (HF) rubber with equivalent electric circuits and properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23031327	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 Kunio SHIMADA, Ryo IKEDA, Hiroshige KIKURA, Hideharu TAKAHASHI	4. 巻 Vol.21, No.20
2. 論文標題 Morphological fabrication of rubber cutaneous receptors embedded in a stretchable skin-mimicking human tissue by the utilization of hybrid fluid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21206834	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 Kunio SHIMADA, Ryo IKEDA, Hiroshige KIKURA, Hideharu TAKAHASHI	4. 巻 Vol. 11, No. 10
2. 論文標題 Development of novel magnetic responsive intelligent fluid, hybrid fluid (HF), for production of soft and tactile rubber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 World Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 187-203
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 池田 遼, 島田邦雄, 高橋秀司, 木倉宏成	4. 巻 Vol.2, No.2
2. 論文標題 磁気混合流体ゴムを活用した圧電素子および環境発電技術とその応用に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 223-228
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 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 島田邦雄	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 42
3. 書名 導電性材料の設計, 導電性制御の設計, 導電性制御および最新応用展開	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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