

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05886

研究課題名(和文) 磁気混合流体による新しい導電性を有するゴムを使った液体触覚センサの開発研究

研究課題名(英文) Development study of liquid haptic sensor with utilizing new conductive rubber by magnetic compound fluid

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来の触覚センサは、 piezo素子や歪ゲージ等を利用した固体の材質が主である。また、本申請者が提案してきたMCFゴム触覚センサも硬化した固体のゴムである。固体であるが故に、柔らかい物に対してダメージや負荷を与えない接触や、柔軟な変形の実現が難しい。世の中には、これらの場合が要求される触覚の事例が多い。そこで、固体でなく液体状の触覚センサを導入すれば、液体は自由に形を変形させることができることから、非常に柔らかい物に対する触感を容易に捉えることができるばかりでなく、柔軟な変形が実現できる。本研究では、本申請者が提案してきたMCFゴムの技術を活用し、液体触覚センサの開発研究を行った。

研究成果の概要(英文)： Ordinary haptic sensor is primarily made at solid state by utilizing piezo element and strain gauge. Our proposed MCF haptic sensor is also a solidified rubber material. Because of these solidified state, it is difficult to realize the contact with them on a soft object without giving any damage and load and their elastic deformation at the contact. These realizations are necessarily required in society. Therefore, if we adopt a liquid haptic sensor which is not solidified, we can not only obtain the haptic sensibility to a very soft object easily but realize the elastic deformation of the sensor. In the present study, we utilize the having been proposed MCF rubber technique so that we conduct on the development of the liquid haptic sensor.

研究分野：機械工学

キーワード：センサー 磁気混合流体 ゴム 磁場 電解重合 磁気クラスタ 電場

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 触覚を電気信号として捉えるセンサ技術は、医療福祉や工学、食品、服飾など多岐の分野で必要とされている。その中で、非常に柔らかい物を触った時のセンシングは、超高感度であるだけでなく、触る相手にダメージや負荷を掛けないことが要求される。例えば、女性の乳癌を発見のための触診装置（マンモグラフィ）や、ゼリーやプリンなどの柔らかい食品や柔軟な服飾における検査、ロボットの触覚などの場合である。また、ロボットの外皮に触覚センサを搭載した時に、人間の皮膚のように柔軟で伸張性のあることが要求される。

(2) そこで重要なのは、人間の皮膚が持つ五覚（触覚、圧覚、痛覚、温覚、冷覚）が実現できるセンサでなければならないことである。そこで、当該研究者は、MCF ゴムの提案や、触覚に成り得る機能性物質を利用した提案を行い、また、伸張性と弾力性に富み、かつ、五覚が実現可能なMCF ゴムを進化させて、せん断力まで測定できる触覚センサを開発し、ロボットへ応用展開を試みる研究をこれまで行ってきた。この時に用いてきたゴムは、人工ゴムの一種であるシリコンオイルゴムであった。さらに超高感度にするには天然ゴムにする必要があり、この研究についても行ってきた。このように、生物由来の天然ゴムを用いることにより、超高感度かつ伸縮性に富むセンサや、それを搭載した人工皮膚作成が可能にもなる。しかしながら、これまでは、いずれも固体状のMCF ゴムからなるセンサであった。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、柔らかい物に対してダメージや負荷を与えない接触や、柔軟な変形の実現が出来る液体触覚センサを開発し、医療福祉や工学、食品、服飾など多岐の分野で必要とされている新しい触覚技術を提案し、これらの発展に資するものである。こうした研究を通して、センサ技術を必要とする産業界や計測工学に大いに寄与するものである。

(2) 本研究では、上述したような各産業界に対して提案する新しい触覚技術のために、これまでのMCF ゴムの知見を活用し、液体状

のMCF ゴムセンサの開発を行うことを目的とする。これは、国内外ともに今までにないセンサとして液体センサが提案できるものである。液体センサの固体センサに対するメリットは、硬化する手間が省けること、自由に変形することが可能な液体状MCF ゴムセンサを作成できること等のメリットが挙げられる。しかしながら、液体状のMCF ゴムセンサにおける特性の解明と物理的解釈等は未だ不明である。そこで本研究ではまず、液体状のMCF ゴムにおける電気特性について実験的研究を中心に行うことを目的とする。次いで、液体状のMCF ゴムのカプセル化に関する研究を行うことを目的とする。また、この液体触覚MCF ゴムセンサは、電極間を電気が流れることにより、特性が変化する性質を有していることが本研究で判明したので、このメカニズムについても解明することを目的とする。

(3) 従来の触覚センサは、ピエゾ素子や歪ゲージ等を利用した固体の材質が主である。また、当該研究者が提案してきたMCF ゴム触覚センサも硬化した固体のゴムである。固体であるが故に、柔らかい物に対してダメージや負荷を与えない接触や、柔軟な変形の実現が難しい。世の中には、これらの場合が要求される触覚の事例が多いことから、何としてもこれらを実現しなければならない。そこで、固体でなく液体状の触覚センサを導入すれば、液体は自由に形を変形させることが出来ることから、非常に柔らかい物に対する触感を容易に捉えることが出来るばかりでなく、柔軟な変形が実現できる。そこで本研究では、当該研究者が提案してきたMCF ゴム触覚センサを液体状とした「液体触覚センサ」を開発することを研究目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 液体状のMCF ゴムにおける実験

液体状のMCF ゴムを図1に示すように、容器内に入れ、電極を液面より挿入する。使用するMCF ゴムは、Ni 粉 (123, (株)山石金属製)、磁性流体(MF) (M-300, 水ベース磁性流体, シグマハイケミカル(株)製)、風船天然ゴム (NR-LATEX) ((有)ハイラテック製) で、Ni: 60 g, MF: 15g, NR-LATEX: 80g である。この状態に対して、容器の下側から永久磁石を近づけた場合と、永久磁石を容器の底に付

けた状態で電極を液面から容器の底に向かって移動させた場合、永久磁石は用いないで電極を液面から容器の底に向かって移動させた場合の3通りを扱った。この理由は、液体状のMCF ゴム中の微粒子が容器底に長時間後に沈殿するため、容器内で液体状のMCF ゴムの液面から容器の底までは濃度分布があるためである。電極は、図1に示すように、電極の先端がある程度面積があるタイプ（ここでは Old electrode と称する）、電極の先端が鋭利なタイプ（ここでは New electrode と称する）の2種類を用いた。この理由は、永久磁石を用いた場合には容器の底において液体状のMCF ゴム中の微粒子が磁場により凝集か、あるいは、長時間後に沈殿する液体状のMCF ゴム中の微粒子により、ある程度塊上となるサスペンションが形成され、それをある面積を持った電極で押しつぶした場合と、押しつぶさずに鋭利な電極で突き刺す場合とにおける電気特性の違いを見るためである。直流電圧 5V を印加した時の電極間の電流を測定し、温度変化のない条件下で行った。

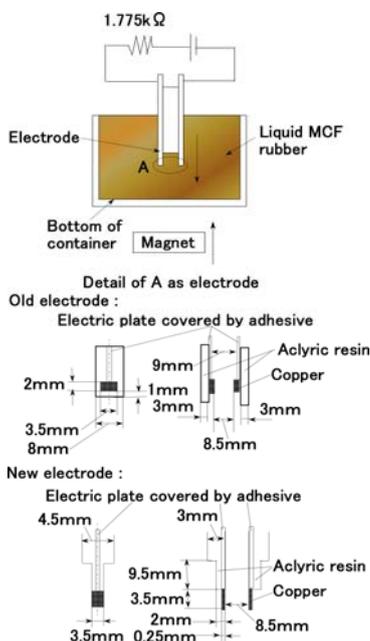


図1 液体MCF ゴムの特性を調べる実験装置概略図

## (2) 液体状のMCF ゴムセンサのカプセル化

固体のMCF 触覚ゴムセンサは、垂直力以外に、せん断力も感知できるが、これは、超高感度MCF ゴム触覚センサが触れる物体に対し平行に接触した時の触覚の原理が、ゴム中を

伝播する電気信号の乱れにあることによる。この原理を液体MCF ゴム触覚センサでも用いる。すなわち、図2に示すように、液体MCF ゴムを弾力性のある被覆体に電極と共に封入しカプセル化する。図には、本研究のために試験的に作成した液体MCF ゴム触覚センサの写真も併せて示す。

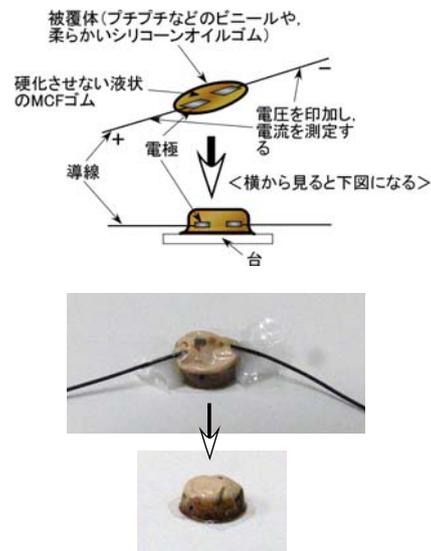


図2 カプセル化した液体MCF ゴム触覚センサの概略図と試作例写真

## (3) 液体触覚ゴムセンサのメカニズム

液体状のMCF ゴムに電極を挿入し、電圧を印加した時の電流特性について前項まで扱ってきたが、これは、MCF ゴムに電解重合を行うことと等値である。一般に、電解重合は高分子溶液で見られるものである。つまり、Cの二重結合が電場印加によってラジカル重合反応を起こし、アルケンがアルカンに変化してモノマがポリマ結合することが電解重合の基本的な流れであるが、ゴムに関してその仕組みが未だ解明されていないのが現状である。そこで、天然ゴム(NR-latex)で電解重合によりゴム化することを明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 液体状のMCF ゴムにおける実験

図3に、電極が近づいた場合の実験結果を示す。容器の底に永久磁石があることにより液体状のMCF ゴム中の微粒子が凝集し、その凝集部分では電気伝導率が大きくなる。一方、永久磁石を用いないで液体状のMCF ゴム中の微粒子が容器底に長時間後に沈殿する場合

は、その沈殿部分での電気伝導率は大きくなるどころか、わずかに小さくなる。このことから、電気伝導率を高めるためには、磁場による凝集力を利用することが有効であることが分かる。また、New electrodeの方がOld electrodeよりも大きな電気伝導率となる。

これは、先端が鋭利な電極では、液体状のMCFゴム中の微粒子が凝集部分や沈殿部分の塊上としてのサスペンション部分を圧縮することなく入っていくためである。この部分をOld electrodeで圧縮していくと、この部分がより塊となり逆に電気抵抗を高めるようになる。これが図4の結果にも関連してくる。

図4に、電極が容器の底にあった時に永久磁石が近づいた場合の実験結果を示す。図中で250 mT付近が容器底の外側面で磁石が近づき得る限界である。磁石が近づいてくると、液体状のMCFゴム中の微粒子の凝集量が多くなるため、電気伝導率は大きくなる。しかしながら、Old electrodeの場合は、電極の先端部分が面積を持っているため、磁石が近づいてくると、この凝集部分が圧迫されてくる。

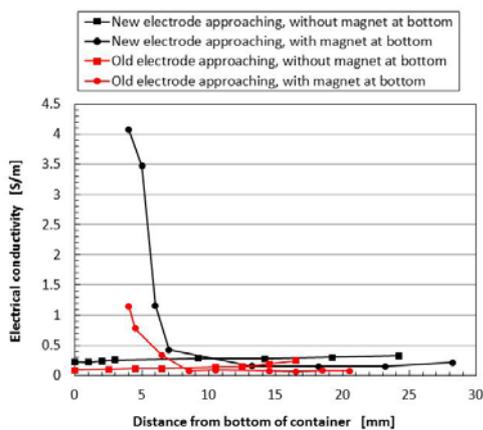


図3 電極が近づく場合の導電性の実験結果

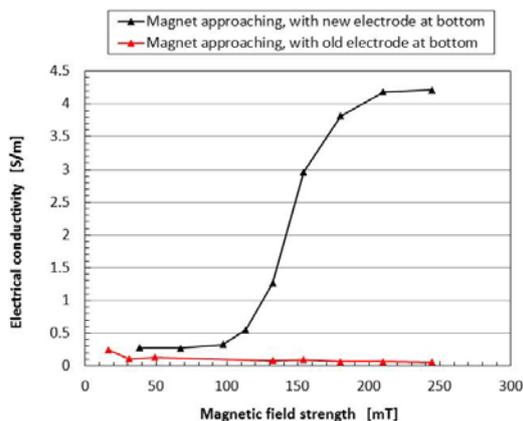


図4 磁石が近づく場合の導電性の実験結果

そのため、図3と同じように、この凝集部分が塊となり逆に電気抵抗を高めるようになる。

### (2) 液体状のMCF ゴムセンサのカプセル化

電極間に電圧を印加すると、液体MCFゴム中を電流が流れ、被覆体に触られる物体が接触するカプセル全体が変形するので、電流も変化する。このようなカプセル化された液体MCF ゴム触覚センサを図5に示すような実験装置に装着し、弾力性の異なる種々の材質の物体を押し付けた時の電流変化（すなわち、垂直力による変化）と、それを撫でた時の電流変化（すなわち、せん断力による変化）を測定し、液体MCF ゴム触覚センサの特性と有効性を確かめた。その結果を図6に示す。従来の感圧導電性ゴムや歪ゲージの組み合わせ等によるセンシングでは、せん断力に対するセンシングは困難であったが、本センサではそれが可能であることが実証できた。

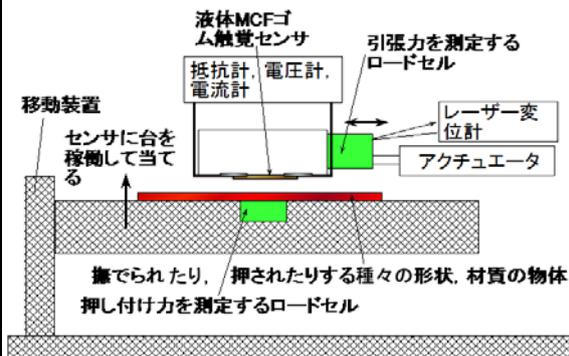


図5 液体MCF ゴム触覚センサの実験装置概略図

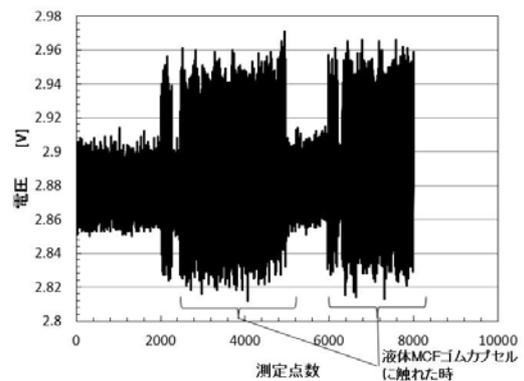


図6 カプセル化液体MCF ゴム触覚センサの電流変化

### (3) 液体触覚ゴムセンサのメカニズム

飛躍的に長時間にわたる経年変化が抑制

されていることが判明した。また、この手法では電気抵抗率が  $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$  オーダを実現でき、導電性プラスチックと同レベルを実現することが分かった。MCF ゴムにおける電解重合の仕組みは、別途、XPS, ラマン分光, XRD, SEM 等の物質化学分析により解明した。これにより、天然ゴム(NR-latex)で電解重合によりゴム化することが明らかになったが、その内部の物理的モデルを図7に示す。

以上から、液体触覚センサのセンシングの場合には、電解重合により NR-latex や MCF に重合変化が生じるため、センサ特性の経時変化が生じるということが判明した。実際に応用活用する場合には、これについて考慮しながら行う必要がある。それ故、図3, 4, 6に示した実験結果は、経時変化による影響を除いた、経時変化が生じる前の実験結果である。

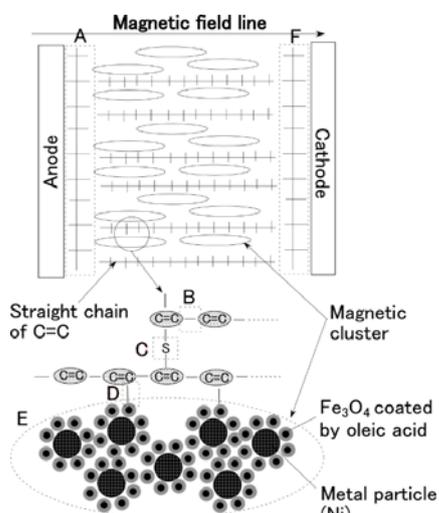


図7 液体触覚 MCF ゴムセンサにおける電気を投入した際の物理的內部モデル

#### (4) まとめ

液体状の MCF ゴムセンサにおける特性の解明と物理的解釈等のために、液体状の MCF ゴムにおける電気特性について実験的研究を行った。その結果、電気伝導率を高めるためには、磁場による凝集力を利用することが有効であることが判明した。また、液体状の MCF ゴム中の微粒子が凝集部分や沈殿部分の塊上としてのサスペンション部分を圧縮すると、これらがより塊となり逆に電気抵抗を高めるようになることも判明した。また、磁場による凝集力でなく、微粒子の沈殿による場合は、電気伝導率は大きくなるどころか、わずかに小さくなることも判明した。

こうした特性を利用しつつ、液体状の MCF ゴムをカプセル化し、触覚における導電特性を調べた。

また、液体触覚センサにおける特性は、電解重合による電気化学変化のため、特性の経時変化が生じるということが判明した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

1. 島田 邦雄, 天然ゴムを用いた電解重合法による新しい超触覚センサと新しい機能材料, 日本ゴム協会誌, Vol. 91, No. 2, 2018, pp. 55-59, 査読無
2. Kunio SHIMADA and Norihiko SAGA, Development of a hybrid piezo natural rubber piezoelectricity and piezoresistivity sensor with magnetic clusters made by electric and magnetic field assistance and filling with magnetic compound fluid, Sensors, Vol. 17, No. 2, 2017, 346; doi:10.3390/s17020346 (ページ数なし), 査読有
3. Kunio SHIMADA, Enhancement of MCF rubber utilizing electric and magnetic fields, and clarification of electrolytic polymerization, Sensors, Vol. 17, No. 4, 2017, 767; doi:10.3390/s17040767 (ページ数なし), 査読有
4. Kunio SHIMADA, Osamu MOCHIZUKI and Yoshihiro KUBOTA, The effect of particles on electrolytically polymerized thin natural MCF rubber for soft sensors installed in artificial skin, Sensors, Vol. 17, No. 4, 2017, 896; doi:10.3390/s17040896 (ページ数なし), 査読有
5. Kunio SHIMADA, Elastic dry-type solar cell rubber with photovoltaics and piezoelectricity for compressive sensing, Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 2017, doi:10.3390/ecsa-4-04890, 査読有
6. 島田 邦雄, ロボットにおける MCF ゴムを利用した磁場援用電解重合法による新しいセンサの開発とセンシング技術, 日本 AEM 学会誌, Vol. 25, No. 1, 2017, pp. 28-35, 2017, 査読無
7. Kunio SHIMADA and Norihiko SAGA, Mechanical enhancement of sensitivity

in natural rubber using electrolytic polymerization aided by a magnetic field and MCF for application in haptic sensors, Sensors, Vol. 16, No. 9, 2016, 1521; doi:10.3390/s16091521 (ページ数なし), 査読有

8. Kunio SHIMADA and Norihiko SAGA, Detailed mechanism and engineering applicability of electrolytic polymerization aided by a magnetic field in natural rubber by mechanical approach for sensing (part 1): The effect of experimental conditions on electrolytic polymerization, World Journal of Mechanics, Vol. 6, No. 10, 2016, pp.357-378, 査読有
9. Kunio SHIMADA and Norihiko SAGA, Detailed mechanism and engineering applicability of electrolytic polymerization aided by a magnetic field in natural rubber by mechanical approach for sensing (part 2): Other and intrinsic effects on MCF rubber property, World Journal of Mechanics, Vol. 6, No. 10, 2016, pp.379-395, 査読有

[学会発表] (計5件)

1. 島田 邦雄, 新しいセンサの開発における電解重合によるゴム化の仕組みのマクロ的解明, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, No. 17-1, J1630204, 2017, 平成 29 年 9 月 3 日~6 日, 埼玉
2. 島田 邦雄, 生物由来の天然ゴムを用いた新しい触覚センサーの開発, 日本流体力学会年会 2016, 177, 2016, 平成 28 年 9 月 26 日~28 日, 名古屋
3. 島田 邦雄, 嵯峨 宣彦, 電解重合による MCF ゴムセンサの電気特性, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, No. 16-2, pp. 2A2-11b2(1)-2A2-11b2(2), 2016, 平成 28 年 6 月 8 日~11 日, 横浜
4. 島田 邦雄, 無電源型触覚センサの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, No. 16-2, pp. 1A2-19a2(1)-1A2-19a2(2), 2016, 平成 28 年 6 月 8 日~11 日, 横浜
5. 島田 邦雄, 天然ゴムを用いた電解重合法による新しい超触覚センサ作成における実験的解明, 日本ゴム協会 2016 年次大研究発表講演会講演要旨 2016, pp.95, 2016, 平成 28 年 5 月 19 日~20 日, 大宮

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 太陽電池  
発明者: 島田 邦雄  
権利者: 福島大学  
種類: 特許  
番号: 特許願 2017-212382  
取得年月日: 平成 29 年 11 月 2 日  
国内外の別: 国内

名称: 機能性ゴムの製造方法, 機能性ゴム及び触覚センサ  
発明者: 島田 邦雄  
権利者: 福島大学  
種類: 特許  
番号: 特許願 2015-178273  
出願年月日: 平成 27 年 9 月 10 日  
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 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