特 集 ロボットとその周辺技術

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Development of New Sensor and Sensing Technique by Electrolytic Polymerization
with Utilizing A magnetic Field and MCF Rubber on Robotics島田 邦雄^{*1}

Kunio SHIMADA

Ordinary electrolytic polymerization has involved plastic-type polymer solutions. Rubber, especially natural rubber, has not been focused on until recently owing to the fact that electrolytic polymerization has only a very small effect on rubber. However, when the C=C bonds of natural rubber is focused on, the same electrolytic polymerization is applicable to be enlarged on the natural rubber if a magnetic field and a filler are aided. With the application of a magnetic field and a magnetic responsive fluid such as magnetic compound fluid (MCF) as a filler, the effect of electrolytic polymerization on NR-latex such as plastic-type polymer solutions is enhanced. The present new method of vulcanization of MCF rubber is effective enough that it is widely used in haptic sensors in robotics as well as in engineering applications. In the present report, we introduce its mechanism and the electric and dynamic characteristics as well as Piezo effect.

Keywords: sensor; electrolytic polymerization; magnetic field; magnetic cluster; natural rubber; magnetic compound fluid (MCF); Piezo effect; Robotics; magnetic fluid; isoprene; filler; doping; electrical resistivity.

(2016 年 12 月 15 日受付)

1 緒言

ロボット工学や計測工学などには多くのセンサが活躍している。触覚センサについて見てみると、その多くは、センサに対して力が垂直である場合のセンシングが殆どであり、センサに対して力が平行である場合のせん断力については、ピエゾ素子や歪ゲージ等を組み合わせるなどの方法が殆どである。しかしながら、これらは構造が複雑である他に、強度的に弱いと共に大量生産に不向きである。また、本来センシングするものが n 個である場合、 m 個のセンサを用意する時に $n = m$ とするという考えが計測工学の基本的考え方である。そのため複数のセンサをロボット等に搭載しなければならず、より複雑な構成となる。仮に、一つのセンサで複数のセンシングが出来るとすれば、 $n \neq m$ でもセンシングできるという考え方を確立しなければならないと共に、そうしたセンサを提案することは有意義ともなる。これについて島田は、機能性流体の立場から、磁場に反応する流体である MCF

(Magnetic Compound Fluid (磁気混合流体))を開発し、これをシリコンオイルゴムや天然ゴムなどのゴムと混合させることにより、五覚(触覚、圧覚、痛覚、温覚、冷覚)を有し、かつ伸張性と弾力性に富む MCF ゴムを開発してきた。MCF ゴムは 1 枚のゴムで、垂直力のみならず、せん断力や温度を同時に計測でき、 $n \neq m$ のセンシングが可能である。当初は、シリコンオイルゴムを用いた MCF ゴムの開発が行われ [1]-[8]、次に、ゴムを加圧した時に電気が流れるという触覚においてさらに高感度とするため、天然ゴムを用いて、0.01 N 以下の垂直力でも高感度に感知することに成功した [9]-[14]。この高感度が、垂直力のみならずせん断力をもセンシングできることに繋がる。そこで、柔らかさの評価や、紙や人間の肌や衣服や果実などの肌触りの評価が必要とされる各種分野におけるセンサの可能性も示された。一方で、MCF ゴムの実用化に向けた耐久性として特性の経年変化が避けえない [15]という工業的生産的要求が重要である。そこで、天然ゴムのイソプレンにおける炭素 C の二重結合に着目し、電解重合法により半永久的な経年変化を回避する手法を見出すことにも成功した [16]。この電解重合法による MCF ゴムは、自己起電圧(いわゆるピエゾ効果)を有することが判明しており、無電源型ロボットの実現を

連絡先: 島田 邦雄, 〒960-1296 福島市金谷川 1, 福島大学共生システム理工学類

e-mail: shimadaku@sss.fukushima-u.ac.jp

^{*1} 福島大学

も可能にする。それ以外に、ドーパントの種類を多様に選定することで、ゴムとしてのキャパシタ、ゴムとしての太陽電池など、これまでにない多くの新しい素子が開発できる可能性も有する。本研究では、この新しい電解重合法による MCF ゴムについて、原理から応用例まで概説する[17-19]。

2 磁場援用電解重合法による作成手法 [17-19]

本来、電解重合は高分子溶液で見られるものである。その多くはプラスチックである。これに対して高分子のもう一つの素材としてゴムが挙げられる。前者では白川先生らのノーベル賞にも冠されているように導電性プラスチックが有名であるが、これと同じ電解重合法でのゴムについては、脚光を浴びていないのが現状である。導電性プラスチックに習って導電性ゴムと称したいところではあるが、導電性プラスチックと同じ範疇に入るものではない。一つの理由として、導電性ゴムは一般的に炭素粉やフェライト粉等をゴムに混合し高温加圧下で作成する、いわゆるドライ法によるもので作成された感圧導電性ゴムが現在流布しているからである。では、なぜ電解重合によるゴムが現在まで確立されていないかという、それは炭素の C の二重

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、これが起こり得るゴムは限定されるからで、また、出来たとしても後の Fig. 3 に示すように薄くて凹凸の激しい表面となるばかりか伸縮性に富み工業的に使用するには不向きだからである。また、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。島田は 2015 年に天然ゴム(NR-latex)で電解重合法によりゴム化することを突き止めた。以下に、電解重合法による MCF ゴム作成手法について概説する [16]。

上述したように、ゴムにおいて C の二重結合に着目する。すなわち、導電性プラスチックと同じ考え方で、C のアルカンによるポリマにより C の共役結合が出来ることに着目する。この共役結合において σ 結合より π 結合の方が弱いので電子が動きやすく、それ故、電気が流れることになる。勿論、キャリアを増やしてあげることににより、つまり、ドーピングによって導電性を格段に高めてあげる手法も重要である。しかしながら、NR-latex から成る MCF ゴムの場合、Fig. 2 に示すように、特別なドーピングによらなくても導電率を非常に大きくすることが出来る。これは、MCF が磁性流体 (MF) と金属粒子 (例えば μm オーダの Ni 粒子) の混合から成り、それを NR-latex に混ぜた時点で MCF が、ドーパント以外の方法で電気特性を高めるフィラの役目を持つと見なせることによる。Fig. 2 は、従来のドライ法による作成法と本研究による新作成法における MCF ゴムの表面に対向した電極を力零で当てて触れたのみの、すなわち、垂直力が零である時の電気抵抗率の経年変化を示したものである。一方、ゴムの立場からすると耐候性は C の二重結合での架橋の分裂に関与する。電解重合された C の二重結合での架橋は分裂されにくいため、ゴムの適用から見た場合の耐候性にも本手法は十分答え得る。

液体状の MCF ゴムを金属板の間に挟み込み、金属板の外側から永久磁石などで磁場を印加する。その後、金属板に一定の直流電圧を一定時間印加する。島田による従来の MCF 触覚ゴムの作成手法では、電場を印加せず、永久磁石で金属板を挟んだ状態で一定の温度 47°C の乾燥機に一定時間保持するだけの、いわゆるドライ法であった。この従来の手法だと、MCF (Ni 粉 (123, (株) 山石金属製) : 12 g, 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) : 3 g, 風船天然ゴム (NR-latex, (有) ハイラテック製) :

Fig. 1 Model of electrolytic polymerization and solidification of the MCF rubber by the present new method.

結合の構成に要因があるからである。つまり、C の二

12 g) 中の金属粉である Ni 粉 (1 μm オーダの樹枝状粒子) と MF 中のマグネタイト粒子 (10 nm オーダの Fe_3O_4) から成る磁気クラスタがゴム中に分散されているのみであり、ゴムと磁気クラスタの界面は、 Fe_3O_4 粒子に被覆されているオレイン酸による疎水結合でのみ成立していることから、MCF 触覚ゴムに外力が印加された時にゴムが変形し易い。これが大きなクリープ変化を生ずることにも繋がる。しかしながら、この柔軟なゴムの変形が、せん断力に対する触覚の高感性を生むことにもなり、このことから、柔軟なゴムの変形と触覚の高感性は相反する関係になる。これに対して、本研究における新作成法は、Fig. 1 に示すように、MCF ゴムに電場を印加することによって、NR-latex におけるポリイソプレン同士の C の二重結合を配位重合し (Fig. 1 の B)、さらに長い二重結合の主鎖による重合体を形成させる。ここで、新作成法は一種の電気分解反応を利用したものと同価であるから、金属板の種類の設定が必要である。島田によると、ステンレスの場合、正極に電着するゴムの表面が平坦で、かつ電着厚さが大きく銅害の影響を出来るだけ小さくすることが判明している。その際、硫黄 S をゴムに投入した場合、C の二重結合に架橋が起きる (Fig. 1 の C)。一方、 Fe_3O_4 粒子におけるオレイン酸のカルボキシル基がラジカル重合することからオレイン酸も C への架橋に貢献し (Fig. 1 の D)、結果、網目状の架橋が形成される。通常、ゴムの架橋は S のみにて行うのが一般的であるが、本研究では、MCF を混合しているため、S とオレイン酸の両方で架橋することになる。電場のみで磁場を印加しないときは、二重結合の主鎖は長い重合体を

Fig. 2 The secular changes in electric resistance between the electrodes opposing each other with no normal force applied to the vulcanized MCF rubber utilizing NR-latex.

Fig. 3 Changes in voltage, electric current, and thickness of MCF rubber over time during the period of vulcanization.

形成するのみでランダムに形成している。そこでこれに磁場を印加すると、 Fe_3O_4 粒子は Ni 粒子より 100 倍以上小さいことから、MCF の磁気クラスタは Fe_3O_4 粒子が Ni 粒子の回りに多く凝集した状態で存在し (Fig. 1 の E)、Ni 粒子は MCF ゴム中では一番大きく強磁性体であることから、磁力線方向に対して整列し、強固な磁気クラスタが磁力線方向に配向するようになる。以上から、磁気クラスタの回りに天然ゴムの架橋が形成され、C の共役結合は磁気クラスタと同じ方向に配向することになるので、C の共役結合における長い主鎖は磁力線方向に配列することになる。そこで、MCF 触覚ゴムのゴム厚方向に電気を印加すると、電子は主鎖に沿って流れるので、ゴム厚方向に電気が良く流れることになり、Fig. 2 に示すように金属の導電体のようなレベルまで導電率を達成することができる。すなわち、超高感度のセンシングに繋がる。これに対して、ゴム厚方向と垂直な方向には電気は流れにくい。ここで、金属板間に印加する電圧により、電気エネルギーが MCF ゴムに熱エネルギーとして蓄えられるので、MCF ゴムの温度が上昇する。天然ゴムの熱重合による架橋反応の推奨温度は約 47°C であるが、これを越えるように印加電圧・電流を調整すると、印加する磁場強度によって異なるが、 $50\sim 90^\circ\text{C}$ 付近にまで達するので熱重合が生ずる。したがって、新作成法は従来の作成法と違って恒温乾燥を要しない。

Fig. 2 から、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分かる。すなわち、本研究による

新作成法は、MCF ゴムの特性の経年変化を解決することが出来、殆ど劣化しないことが分かる。また、新作成法では電気抵抗率が $10^2 \Omega\text{m}$ オーダを実現でき、これは、天然ゴムが $10^{16} \Omega\text{m}$ 、合成ゴムが $10^{10} \sim 10^{15} \Omega\text{m}$ の絶縁体であることと比較してかなりの導電性を高める手法でもある。と同時に、新作成法はドーピングしなくとも、導電性プラスチックの場合に $10^2 \Omega\text{m}$ オーダである ASF_5 のドーピングによるポリフェニレンの導電性プラスチックと同レベルを実現する。

ここで、電極近傍ではアニオン重合 (Fig. 1 の A)、カチオン重合 (Fig. 1 の F) が起こっている。アニオン重合により正極にゴム化が生じるため、正極の表面がゴムで覆われる。一方、負極ではゴムが生じない。電場を印加した瞬間からゴムが生成されるので、短時間でゴムを得たい場合は、電極間距離内に全てゴムが生成されない状態で電場印加を止め正極を蒸留水等で洗浄し、正極の表面に付着したゴムを剥がし取れば宜しい。但し、後の Fig. 4 に示すように、電解重合時間によって特性が変化することを考慮しておく必要がある。

このように、電解重合された MCF ゴムは、電極内部を含めて性質上 3 層から構成される。この 3 層をうまく利用してやると、PNP 型あるいは NPN 型半導体と同じように電流の流れる方向を制御するゴム電気素子を作ることができる。

以上のラジカル重合によりゴムと磁気クラスターの界面は強固に固定される。また、ラジカル重合と熱重合によりゴムは固化する。これにより、ゴム厚が Fig. 3 に示すように増大する。Fig. 3 は電極間隔を 1mm に固定した時のものであるので、ゴム厚が電極間距離に達すると一定の大きさとなる。この時点でゴム化が停止する。つまり、最初電圧 (図では 6V) を印加することにより電解重合と熱重合によりゴム化が始まり、その分に応じて導電率が増加してくるので電流が増加していく。ゴム化が電極間隔全て達成されると、それ以上はゴム化しなくなってゴムは一定状態に落ち着くので電流は一定値 (図では 2.7A) になり、電圧は一定値になるように変化する。また、磁気クラスターは磁力線方向に強固に配列することから、MCF やゴムの密度は大きくなる。以上から、MCF 触覚ゴムは従来の作成法によるそれより強固になり、Fig. 2 に示すように、導電性が飛躍的に向上し、経年変化もなくなり半永久的に安定したゴムセンサとなる。ここで、天然ゴムの特徴である柔軟性・弾力性は全く失われない。

最後に、前述した MCF ゴムにおける電解重合の仕

組みは化学分析により解明されてきてはいるが未だ未解明な部分が多く、下記に述べるような違いがあることに注意点する必要がある。NR-latex は $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ オーダの粒子分布を有する球形粒子から成り立っているが、その極性はアニオンであるため、負極に引かれラテックス粒子の凝集体が生成される。NR-latex のみの場合はそれがためのゴム化であって、電解重合によるラジカル重合とは本質的には異なる。これが、前述した NR-latex のみの電圧印加は電解重合という範疇に入らずに、かつ、工業的に利用しにくいという理由に繋がる。これに対して MCF ゴムなる NR-latex の場合には、NR-latex のみである場合には炭化水素のアノードにおける酸化は不可能であったのが、水系であることから水分子からヒドロキシルラジカルが生成し、また、アニオンのラテックス粒子とオレイン酸のカルボキシル基によりアノードにおいて活性種が生成することにより、前述したような MCF ゴムにおける電解重合が可能となる。

3 MCF ゴムの特性 [17-19]

3.1 電気特性

ロボットへの応用としては、前述したようにセンサに対して垂直力、あるいはせん断力を印加した時のセンサの電気抵抗率の変化を見ることが必要である。前者の測定装置を NFE、後者のそれを SFE とすると、Fig. 4(a) は、電極を MCF ゴムに対して 180 度対象的に対向させて配置した時の電気抵抗率の垂直力に対する変化を示したものである。この電極の配置は、Fig. 2 でも同様である。導電性高分子の分野でよく行われている薄い材料における電気抵抗率の測定には、4 探針法などの針を同一表面上に接触させる表面抵抗の場合と、材料を周囲に巻いた形状の 2 つの離れた電極間における測定での体積抵抗の場合が主に採用される。MCF ゴムの場合は、Fig. 5 に示すように磁気クラスターにより構成されているので、電極の形状や配置により電気抵抗率特性が変化する。したがって、ロボットに MCF ゴムを搭載した時の形態として、垂直力の場合は対向する電極配置、せん断力の場合は対向するが距離を維持した電極配置を扱う。また、Fig. 4(b) は初期の押し付け力を設定しておく。電解重合時間が長いほど、垂直力に対する電気抵抗率が小さくなって電気が流れやすくなり、せん断力に対するゴム中を流れる電流が定量的

には小さいが変化が大きいので感度が大きくなる。

電解重合の際の磁場強度による影響は、Fig. 6 に示

Fig. 4 Changes of electrical characteristics with each duration of vulcanization of MCF rubber made by the new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

Fig. 5 Photograph of cross-section of the MCF rubber made by the present new method magnified by a microscope.

すように、磁場強度が大きいと感度が良くなるという訳でもない。これは、Fig. 7 に示す MCF ゴムの金属粒子濃度 (Ni と Fe_3O_4) の場合でも同様である。これは、電解重合における磁場強度と MCF の濃度に最適値が存在することを意味している。しかしながら、一般に、磁場強度が小さいと MCF ゴムの磁場援用による成長は激しくなる傾向にある。

次に、Fig. 8 にそれぞれ成分の違いによる影響を示す。Ni+NR-latex が一般的によく用いられているゴムに金属粉を混入した場合に相当する。ただ単に金属粉を混入するよりも、磁性流体も投入した方が感度が増すことが分かる。これは、Fig. 1 で説明したように、オレイン酸のカルボキシル基によるラジカル重合が関与しているものである。

Fig. 6 Effect of magnetic field strength on the electrical characteristics of MCF rubber made by the new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

ところで、従来市販されている感圧導電性ゴムとの優位性について興味があると思われる。Fig. 9 に種々

のゴムの市販感圧導電性ゴム (PSECR) との比較を示す。

(a)

(b)

Fig. 7 Effect of mass concentration of particles of MCF on the electrical characteristics of the MCF rubber made by the new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

(a)

(b)

Fig. 8 Effect of ingredients of MCF rubber on the electrical characteristics of MCF rubber made by the new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

(a)

(b)

Fig. 9 Electric characteristics of other PSECRs compared with that of the MCF rubber made by the present new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

MCF ゴムの方が圧倒的に感度が良いことが自明である。

3.2 力学特性

Fig. 10 に MCF ゴムの引張特性を示す。図中は、電解重合のみを施した場合と、それを施さない場合も示す。電解重合を施すことにより、柔らかくなることが分かる。

ところで、MCF ゴムに限った話ではないが、フィラをゴムに混合すると Mullins 効果（いわゆるストレスソフトニング効果）が生ずる。MCF ゴムの場合にも同様で、Fig. 11 に示すように、その効果が電気特性の場合、ヒステリシスを生ずることになる。したがって、応用の際にはこのことを頭に入れておく必要がある。

Fig. 10 Relation between strain and stress of MCF rubber by tensile testing machine; “mag.” means magnetic field and “elec.” electric field.

Fig. 11 Electrical resistivity to the repeated pressing transverse force. MCF rubber involves Mullins effect in NFE responses.

4 ピエゾ素子 [17-19]

MCF ゴムの応用例は何とんでもなくピエゾ素子であろう。NR-latex は 60~70% のまでラテックス粒子の濃度を高めており、それ以外は水やプロテイン等の複合物である。その水分子のイオン分極が MCF ゴム中に存在しており、MCF ゴムが圧縮されると Fig. 12(a) に示すようにイオン同士が近づくため自発的に電圧が生じる、いわゆるピエゾ効果を持つようになる。ロボットの場合には、この電圧を利用して、かつ MCF ゴムがセンサにもなっていることから、MCF ゴムのみでセンシングが可能になる。また、Fig. 12(b) に示すようにせん断力に対しても起電圧の変化を得ることができ、せん断力に対して明確な 1 対 1 の対応関係を実現できる。図中には電極の配置による違いや KI によるドーピングを用いた場合も示してある。ドーピングするとピエゾ効果が大きくなる。

(a)

(b)

Fig. 12 Piezo effect of the MCF rubber on the electrical characteristics of the MCF rubber made by the new method: (a) in the case of NFE; (b) in the case of SFE.

5 結言

磁場援用電解重合法の新しい作成手法による MCF ゴムは、ロボットにおいては触覚センサ、特にピエゾ素子として十分に活用できるものである。その他に、ドーパントや金属粒子、電極の種類を変えることにより、もっと様々な複合材料や素子を作ることができる。そういった意味で、幅広い応用分野へ展開できる可能性を秘めている。しかしながら、この技術は生まれたばかりであり、これからますますの工学的発展を期待して止まない。

謝辞

本文に掲載したグラフ及び図は参考文献 [17-19] によっている。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 (C) No. JP 15K05886 の援助を受けている。ここに付記し謝意を表する。

参考文献

- [1] K. Shimada, S. Shuchi, S and H. Kanno, Magnetic rubber having magnetic clusters composed of meatl particles, *J. Intell. Mat. Sys. Struct.*, Vol. 16, pp. 15-20, 2005.
- [2] Y. Zheng, and K. Shimada, Basic study on trial production of haptic sensor utilizing MCF (magnetic compound fluid) electric conductive rubber, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 7, No. 3, pp. 234-239, 2007.
- [3] K. Shimada and Y. Zheng, Development of MCF rubber with temperature and electric senses for an elemnt material in haptic robot sensor, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 73, No.735, Ser. B, pp. 2269-2274, 2007.
- [4] Y. Zheng and K. Shimada, Development of improved MCF rubber on MCF touch sensor, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 8, No. 4, pp. 392-395, 2008.
- [5] K. Shimada and Y. Zheng, Basic study on tensile characteristics of MCF (magnetic compound fluid) rubber, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 74, No. 747, Ser. B, pp. 2287-2294, 2008.
- [6] K. Shimada and Y. Zheng, Study on electric conductivity under tensile condition of MCF rubber for haptic robot sensor, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 74, No. 744, Ser. B, pp. 1748-1754, 2008.
- [7] Y. Zheng and K. Shimada, Study on a haptic sensor using MCF (magnetic compound fluid) electric conductive rubber, *J. Solid Mech. Mat. Eng.*, Vol. 2, No. 6, pp. 748-755, 2008.
- [8] Y. Zheng, K. Shimada and Y. Ido, Research on a haptic sensor made using MCF conductive rubber, *J. Phys., Condensed Matter*, Vol. 20, 204148, 2008.
- [9] K. Shimada and T. Hayasaka, Principle and characteristics of high sensitive haptic MCF rubber perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 288-294, 2012.
- [10] K. Shimada and T. Hayasaka, Investigation of applicability of high sensitive haptic MCF rubber perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 295-301, 2012.
- [11] K. Shimada, A. Kumagai and T. Hayasaka, Material dynamics and tribological characteristics inner high sensitive haptic MCF rubber perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 302-307, 2012.
- [12] K. Shimada, T. Ohtsuka and T. Hayasaka, The effect of fingerprint on shear haptic sensing of high sensitive haptic MCF rubber sensor perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 308-314, 2012.
- [13] K. Shimada, A. Kumagai and T. Hayasaka, Application of high sensitive haptic MCF rubber perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid to sensor on robot - in case of walk and pushup -, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 315-322, 2012.
- [14] K. Shimada, A. Kumagai and T. Hayasaka, Application of high sensitive haptic MCF rubber perceptible to shear force as well as normal force utilizing intelligent fluid to sensor on robot - in case of thrust, rotation and bending elbow -, *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 322-331, 2012.
- [15] K. Shimada and Y. Zheng, Study on deterioration characteristics of MCF rubber, *Proc. of JSEM 2014 Annual Conf. Epx. Mech.*, No. 14, pp. 401-402, 2014.
- [16] K. Shimada, Study of new making technique of MCF haptic rubber, *Proc. of JSEM 2015 Annual Conf. Epx. Mech.*, No. 15, J2220104, 2015.
- [17] K. Shimada and N. Saga, Mechanical enhancement of sensitivity in natural rubber using electrolytic polymerization aided by a magnetic field and MCF for application in haptic sensors, *Snsors*, Vol. 16, No. 9, 1521, 2016.
- [18] K. Shimada and N. 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 J. Mech.*, Vol. 6, No. 10, pp. 357-378, 2016.
- [19] K. Shimada and N. 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 J. Mech.*, Vol. 6, No. 10, pp. 379-395, 2016.