

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820087

研究課題名(和文) ソフトロボティクスへの応用を目指した高分子アクチュエータのコンプライアンス制御

研究課題名(英文) Development of a novel variable-stiffness ionic conductive polymer actuator for soft robotics

研究代表者

菊地 邦友 (KIKUCHI, Kunitomo)

和歌山大学・システム工学部・助教

研究者番号：20588058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年注目されている柔らかいロボット技術の確立に向けて、イオン導電性高分子金属接合体(Ionic Polymer-Metal composite)アクチュエータの形状維持できないという課題を克服するために、コンプライアンス制御可能なIPMCの創成を目的に研究を行った。温度により剛性が変化する形状記憶ポリマーとIPMCの一体化を行った結果、一体型IPMCも剛性を可変とすることができ、形状維持が可能となることを検証した。また、形状記憶ポリマーの温度制御に自己制御機能を有する正温度係数ヒータを活用することを提案し、温度によりコンプライアンス制御可能なIPMCの基礎的検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed and developed a novel variable-stiffness ionic polymer-metal composite (IPMC) actuator for soft robotics in order to maintain IPMC deformation without its back relaxation.

A shape memory polymer (SMP) was used as a variable stiffness material by heating. From a result of experimental productions, IPMCs with SMP were able to maintain their deformation at room temperature. Also, a positive temperature coefficient (PTC) heater was used as a self-controlled heating material for heating SMP and it was confirmed that PTC heater was useful to realize the variable-stiffness IPMC. Driving characteristics of the proposed IPMC was simulated by a 2D finite element analysis. Simulated results seemed qualitatively correct because their tendencies agreed with those of measurement results of the prototype IPMC with SMP.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：ソフトロボティクス ヒーター 特性評価 機能性高分子 剛性制御 数値解析 イオン導電性高分子 形状記憶ポリマー 正温度係数

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、柔らかい材料を積極的に利用し、新たな機能を発現させるソフトロボティクスの研究が行われている。その要素技術の一つである高分子アクチュエータ・センサのうち、電気刺激によって体積や形状を変えることのできる電気活性高分子 (Electroactive Polymer: EAP) は、大きな動的ひずみや応力を示す電気刺激応答性があり、軽量、成形が容易といった実用上重要な特徴を持ち、低コストであることから、世界的に最近盛んに研究開発されている。

(2) イオン導電性高分子アクチュエータや電子導電性高分子に代表される導電性 EAP は、電気的に誘導されたイオンや分子の移動による体積や形状の変化を生じ、低電圧駆動(1~2V)で大変形が得られ、空气中駆動可能な素子も報告されている。また、フッ素系樹脂など人体適合性の高い素材による作製が可能であるため、MEMS、医療・福祉機器などのアクチュエータとしての利用が期待されている。加えて、外部からの刺激に応じて、応答を示すセンサ特性も有している。

(3) しかしながら、導電性 EAP の多くは、材料の柔軟さのため、高負荷駆動が困難であったり、変形後の形状維持ができないと言った解決すべき課題が多くある。

(4) 上述の高分子アクチュエータ・センサ技術の欠点を克服し、有用なソフトロボティクス技術が確立されれば、革新的な異分野融合型デバイスの創製が期待でき、新たな学問分野、産業領域を創出する可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、ソフトロボティクス技術の確立における重要な要素であるアクチュエータ・センサ材料として、電圧駆動可能で、軽量、低消費電力、動作安定性が高い導電性 EAP の一種であるイオン導電性高分子金属接合体 (Ionic Polymer-Metal Composite: IPMC) を研究対象とした。

IPMC は、世界中で研究が進められている EAP ではあるが、材料の柔らかさによる形状維持の困難さ、揺れ戻り(応力緩和)といわれる変形量の減少といった解決すべき課題が多数報告されている。

このため、本研究の目的は、異分野融合型次世代デバイスの創生を目指し、IPMC 自体の柔らかさの制御や変位の維持が可能となるよう、コンプライアンス制御可能な高分子アクチュエータの基本的な作製技術を確立し、実用的な IPMC 応用デバイス作製、ソフトロボティクスへの応用の基礎的検討を行うことである。特に、それぞれの構成要素において、高分子材料を活用することを検討した。

3. 研究の方法

(1) コンプライアンス制御可能な IPMC アクチュエータ構造の検討

コンプライアンス制御可能な IPMC は、機

械的特性を熱により変化させることのできる低融点金属や形状記憶高分子の剛性制御層と、加熱するためのヒータ層と IPMC の 3 種類の組み合わせる構造が考えられる。この際、剛性制御層の厚みや形状、ヒータ層の特性を検討し、IPMC アクチュエータが変形を維持するような設計を行う必要がある。このため、剛性制御層として、形状記憶ポリマー (Shape Memory Polymer: SMP) の活用を検討し、コンプライアンス制御可能な IPMC アクチュエータの試作を行った。また、ヒータ層には、一定温度により発熱が抑制される自己温度制御機能を有する、炭素材料を高分子材料内部に分散させた正温度係数 (Positive Temperature Coefficient: PTC) ヒータの活用を検討した。

加えて、提案するアクチュエータ構造の設計を行うため、同構造の有限要素解析を行い、評価した。具体的には、伝熱解析によりヒータ特性を検討し、剛性制御層のコンプライアンス制御可能な温度分布を検討する。加えて、剛性制御層の機械特性を元に、伝熱・構造・電気的アクチュエータ動作に必要な連成解析モデルを構築し、創製を目指すアクチュエータの動作解析を行った。

(2) イオン導電性高分子アクチュエータの作製・加工方法の検討

IPMC の基材となるイオン導電性高分子は、市販されている平板膜が利用されており、使用可能な膜厚も限定されている。また、その加工もカッターなど機械的に加工されることが一般的であり、自由な形状への加工は難しい。また、本研究が創製を目指すコンプライアンス制御可能な IPMC の作製には、剛性制御層、およびヒータ層を接合させた IPMC の作製プロセスを確立する必要がある。

このため、これら材料を密着させ、アクチュエータとして機能させるための作製技術の確立が重要である。例えば、密着性向上においては、表面改質が有効と考えられることから、イオン導電性高分子の加工・表面改質に対しプラズマプロセスの応用が有効であると考えられる。このため、イオンビーム加工による IPMC 動作特性への影響を評価した。具体的には、ソフトロボティクスへの IPMC への応用例として、同技術により 1 枚のシートからソフトグリッパを作製し、特性評価を行った。

(3) 遷移金属カチオンやイオン液体を用いた IPMC アクチュエータの性能向上手法の検討

IPMC は、内部の可動イオンであるカウンターイオンの種類によって、その動作特性を大きく変化することが知られている。このカウンターイオンの交換は、一般に水溶液を用いて行われるが、交換方法により大きく特性が異なることが分かってきた。IPMC をデバイスに搭載する際には、動作特性の優れたもので

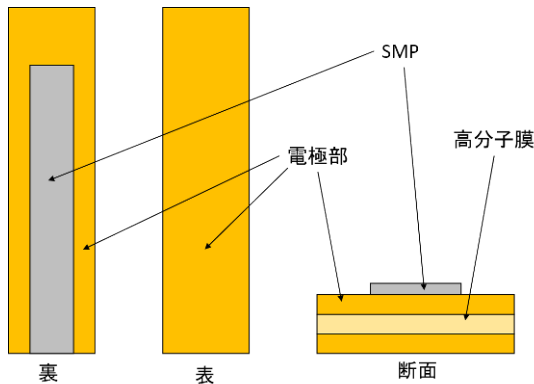


図1 試作したコンプライアンス制御可能な IPMC の構造

ある必要がある。特に、本研究の対象であるコンプライアンス制御可能な IPMC においては、複合素材となり剛性が高まるため、変位特性の向上は重要である。このため、すぐれた動作特性が期待できるイオンサイズの大きいイオン液体を用いてイオン交換することを検討した。また、遷移金属カチオンである銅(Cu²⁺)イオンを用いることにより、駆動特性が大きく向上することも知られている。このため、人体に存在する鉄(Fe²⁺, Fe³⁺)イオンを用いた IPMC の特性評価も行った。

4. 研究成果

(1) コンプライアンス制御可能な IPMC アクチュエータ構造の検討

本研究の目標であるコンプライアンス制御可能な IPMC の構造例を図 1 に示す。これを試作、評価するため、まず、Nafion® N-117 (DuPont) に対し、無電解金めっきを 5 回行い、IPMC を作製した。その後、SMP ビーズ (MM4520, SMP テクノロジーズ) を、140°C、10MPa で 10 分間熱成形し、SMP シートを得た。これらを、140°C、1MPa 以下、10 分間の条件で熱接着させた。これらにより作製した SMP 一体型 IPMC は図 2 の通りとなり、提案手法により作製できることがわかった。

次に、試作した SMP 一体型 IPMC において、形状維持が可能かを確認した。今回使用した

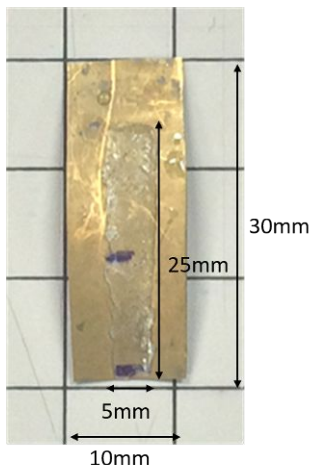


図2 試作した SMP 一体型 IPMC

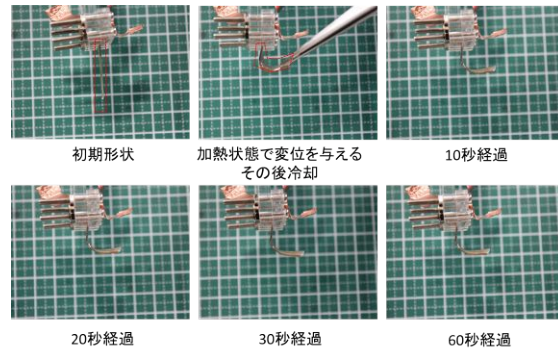


図3 SMP 一体型 IPMC の形状維持の例

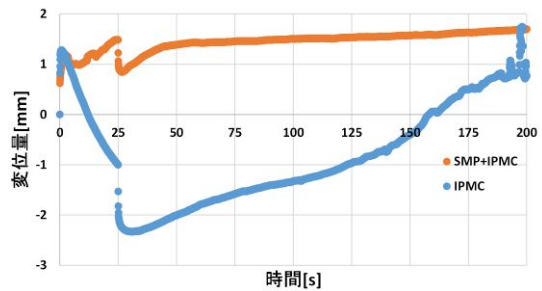


図4 SMP 一体型 IPMC の電圧印加による変位量の時間変化(室温: 24.8°C)

SMP のガラス転移(Tg)温度は 45°C であるので、ホットガンにより加熱し、外部から変形を加えながら冷却し、形状固定状況を確認した。その結果、図 3 に示すように、外部から印加された IPMC の変形を維持して、形状が固定できることが確認できた。

また、十分に水で膨潤させた SMP 一体型 IPMC を、空气中で Tg 温度まで加熱した後、自然冷却しながら 3V を 25 秒間印加して駆動させたところ、図 4 の変位量変化となった。なお、図中の比較対象とした IPMC への印加電圧は、1V である。この結果、SMP 一体型 IPMC は、従来の IPMC と異なり、揺れ戻りを示さず、変形を維持できることを確認した。

次に、SMP を加熱するための PTC ヒータの検討を行った。今回は基礎検討をするため、図 5 に示すような構造により、PTC-SMP 一体型 IPMC を試作した。PTC には 7282 (DuPont) を、電極用の銀ペーストには 5064H (DuPont) を用いた。試作結果は図 6 の通りである。



図5 PTC-SMP 一体型 IPMC の構造



図6 PTC-SMP 一体型 IPMC の試作例

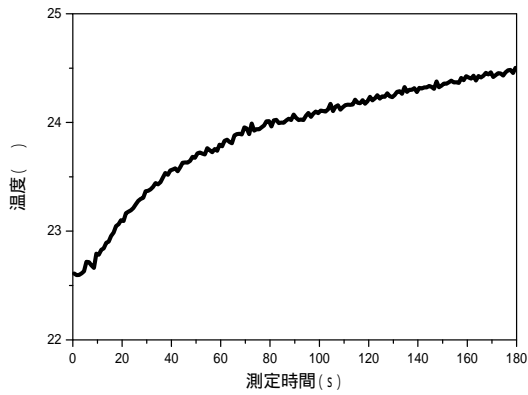


図 7 PTC-SMP 一体型 IPMC 表面の温度変化

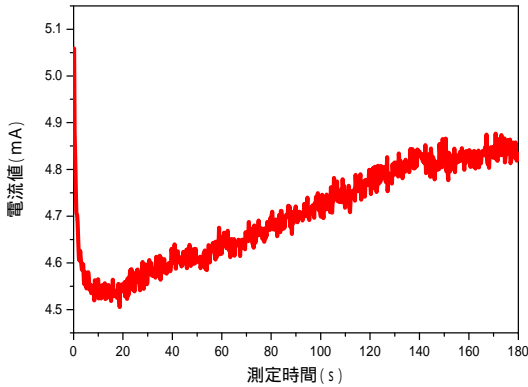


図 8 PTC ヒータ部の電流変化

試作した PTC-SMP 一体型 IPMC の PTC ヒータ部に対し、1V を印加した際のサンプル表面温度および PTC ヒータ部に流れる電流の時間変化を測定した。それぞれを図 7 および図 8 に示す。この結果、温度の上昇を確認した、しかしながら、シミュレーション結果から、最大電流値が 1A となるように寸法を設定したが、作製時の溶媒蒸発により、設定寸法通りにならなかったため、抵抗値が大きくなった。このため、目標温度への上昇には至らなかったが、高分子材料を用いたソフトロボティクス技術の確立のための基礎として、PTC ヒータの有用性を確認することができた。

また、表 1 の寸法の PTC-SMP 一体型 IPMC の駆動特性を 2 次元モデルにおいて、有限要素解析した。解析モデルの構造と支配方程式

表 1 PTC-SMP 一体型 IPMC 解析モデルの寸法

	縦[μm]	横[mm]	奥行き[mm]
SMP	430	30	10
PTC	70	30	10
IPMC	204	30	10

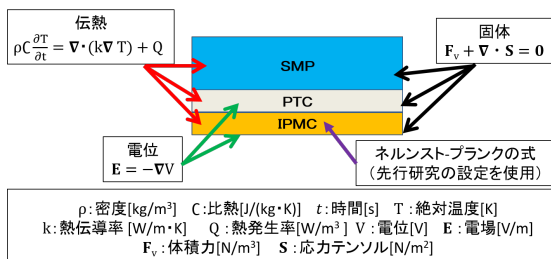


図 9 PTC-SMP 一体型 IPMC 解析モデル

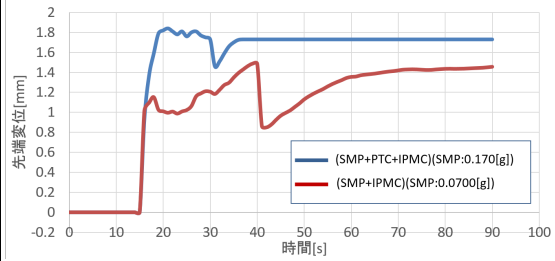


図 10 PTC-SMP 一体型 IPMC の動作解析結果と試作した SMP 一体型 IPMC の変位特性評価結果との比較

の設定は図 9 の通りである。

今回の解析は、Comsol Multiphysics®を用いて、電気、伝熱、構造の連成解析とした。手順は、はじめに、PTC ヒータ部に 1V を 15 秒間加熱する。その後、PTC ヒータへの電圧印加をやめ、IPMC を 2V で 25 秒駆動させる。次に、IPMC への電圧印加を停止し、自然冷却させながら変位量を解析した。

この結果、図 10 に示すように、試作した SMP 一体型 IPMC の変位特性評価結果との比較したところ、実測値を満足する変位の変化傾向を得ることができた。このため、構築した有限要素モデルは妥当であると評価できる。今後さらに精度よくシミュレーションできるように、物性値等を最適化するとともに、複雑な形状を有するモデルへの適用を行う。

(2) イオン導電性高分子アクチュエータの作製・加工方法の検討

イオンビーム加工による IPMC 動作特性への影響を評価した。IPMC の作製では、めっき工程が非常に重要であるため、表 2 の条件によりぬれ性評価を行った。イオンビーム加工装置には、EIS-220G1 (ELIONIX) を用いた。

表 2 ぬれ性評価時のイオンビーム加工条件

イオン交換膜	使用ガス	加速電圧 [V]	イオン電流密度 [mA/cm²]	流量 [sccm]	時間 [min]
Nafion®N117	—	—	—	—	—
Nafion®N117	アルゴン	200	0.25	1.10	60
Nafion®N117	アルゴン	400	0.25	1.10	60
Nafion®N117	アルゴン	800	0.25	1.10	60

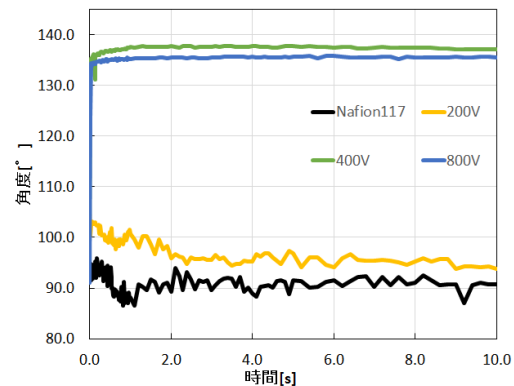


図 11 Nafion®膜のぬれ性に対するイオンビーム加速電圧の影響

表3 ソフトグリッパ加工条件

イオン交換膜	使用ガス	加速電圧 [V]	イオン電流密度 [mA/cm ²]	流量 [sccm]	時間 [min]
Nafion®1110	アルゴン	200	0.25	1.10	30
Nafion®1110	アルゴン	200	0.25	1.10	60
Nafion®1110	アルゴン	200	0.25	1.10	90
Nafion®117	—	—	—	—	—
Nafion®117	アルゴン	200	0.25	1.10	60

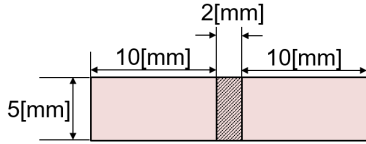


図12 ソフトグリッパの寸法

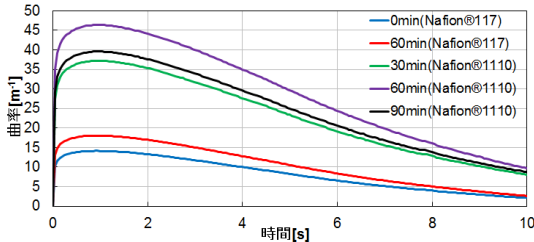


図13 試作したグリッパの変形量

この結果、図11に示すように、低加速電圧で加工した方が、ぬれ性への影響が小さいことがわかった。このため、加速電圧を200Vとして、表3の加工条件により、図12に示す1枚のシートからなるソフトグリッパを作製した。試作したグリッパを水中にて3.5V印加して変位量を評価した結果、図3の通りとなった。膜厚が厚く、加工時間が長くなった場合に一番変形することがわかった。これは、変形時に寄与しない部分を加工により有効に除去できたことによると考えられる。

また、ソフトロボティクスの実現のためには、樹脂材料を3Dプリンティング技術により成形することも有用である。このため、ABS樹脂とIPMCを組み合わせた逆作動型グリッパの検討を行った。これにより、従来のIPMCだけでは、把持力を維持できないが、複合材料の弾性により把持力の向上も期待でき、コンプライアンス制御へも応用可能であると考えられる。例えば、図14に示すようなグリッパがその一例である。このグリッパにより、直径1mm、質量3mgの金属球を把持可能であることも確認できた。このことから、3D

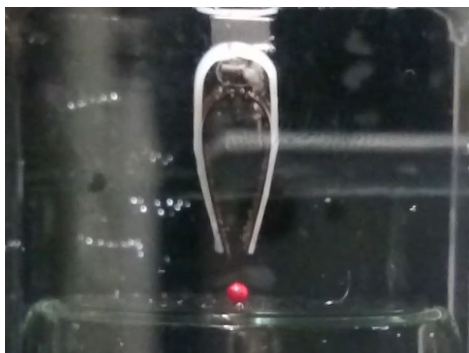


図14 ABSを用いた逆作動型IPMCグリッパの試作例

プリンタに使用するABSフィラメント、SMPフィラメント、およびNafion®フィラメントの作製を試みた。しかしながら、ABSフィラメント作製時に、気泡がフィラメント中に混入するなどしても、高品質のフィラメント作製には至らなかった。今後解決すべき最重要課題であるが、本加工法はコンプライアンス制御可能なIPMCの作製に有望な手法であると思われる。

(3) 遷移金属カチオンやイオン液体を用いたIPMCアクチュエータの性能向上手法の検討

本研究の対象であるコンプライアンス制御可能なIPMCでは、複合素材となり剛性が高まるため、変位特性の向上が必要である。このため、駆動特性が大きく向上することも知られている銅(Cu²⁺)イオンと同じ遷移金属カチオンである鉄(Fe²⁺, Fe³⁺)イオンを用いたIPMCの特性評価を行った。IPMCのサイズは、2.0mm x 15mmである。

図15に、イオン交換時の濃度を変化させた鉄(Fe²⁺)イオンでイオン交換したIPMCの変位特性評価結果を示す。この結果、従来使用されているナトリウム(Na⁺)イオンよりも変位量がおおよそ2-3倍大きくなることが確認された。また、揺れ戻りも小さかった。銅イオンでも同様の傾向が報告されているが、その原理はよくわかっていない。今後は変位が増加したメカニズムの解明が必要である。

また、イオン交換時の濃度によって、動作特性が変化する傾向を得た。この結果は、イオン液体を用いた場合でも見られた。

本研究では、異分野融合型次世代デバイスの創生を目指し、IPMC自体の柔らかさの制御や変位の維持が可能となるよう、コンプライアンス制御可能な高分子アクチュエータの基本的な作製技術の検討、確立を行った。

この結果、SMPによる剛性制御手法、PTCヒータによる加熱手法の有用性を確認し、変形量維持が可能であることを示した。

また、IPMCの動作特性向上のためのイオンビームによる加工技術の検討、使用するイオン種の検討を行った結果、加工おける最適条件が存在することを示した。

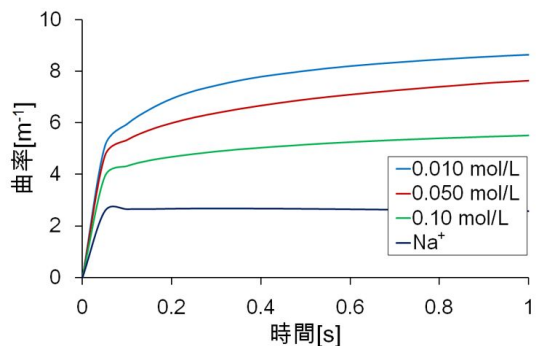


図15 鉄(Fe²⁺)イオンでイオン交換したIPMCの変位特性に対する濃度依存性

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 19 件)

田中聡志, 菊地邦友, 森岡大地, 石原大地, “熱制御により剛性制御可能なイオン導電性高分子アクチュエータの開発”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 1A14, 2016 年 3 月 10 日.

三木優, 菊地邦友, 森岡大地, 石原大地, “二種類のカチオンを含有したイオン導電性高分子アクチュエータの動作特性評価”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 1A21, 2016 年 3 月 10 日.

則岡泰典, 菊地邦友, 森岡大地, 石原大地, “イオン導電性高分子アクチュエータを用いた逆作動型ソフトグリッパの開発”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 1P21, 2016 年 3 月 10 日.

万戸善久, 菊地邦友, 森岡大地, “温度制御により形状維持可能なイオン導電性高分子アクチュエータの有限要素法解析”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 2A23, 2016 年 3 月 10 日.

松波恭平, 菊地邦友, 森岡大地, 石原大地, “金属イオンを含んだイオン導電性高分子金属接合体センサの動作特性”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 2P12, 2016 年 3 月 10 日.

森将人, 菊地邦友, 森岡大地, “遷移金属イオンをカウンターイオンとするイオン導電性高分子アクチュエータの動作特性評価”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市), 2P24, 2016 年 3 月 10 日.

森岡大地, 菊地邦友, 土谷茂樹, “イオン液体を用いたイオン導電性高分子アクチュエータの動作特性評価”, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2015), 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市熱田区), 1H2-1, 2015 年 12 月 14 日.

石原大地, 菊地邦友, 松波恭平, 森岡大地, “カウンターイオンの異なるイオン導電性高分子金属接合体センサの動作特性評価”, 第 16 回計測自動制御学会シ

ステムインテグレーション部門講演会(SI2015), 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市熱田区), 1H2-2, 2015 年 12 月 14 日.

D. Ishihara, K. Kikuchi, D. Morioka, K. Yokoi, “Development of a Prototype of Variable Stiffness Ion Conductive Polymer actuator with a Shape Memory Polymer”, The 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference 2015 (CCC&SICE2015), July 30, 2015, Intercontinental Hangzhou Hotel, Hangzhou, China, ThC04-2.

森岡大地, 菊地邦友, 中川雄貴, 石原大地, “微細加工技術により加工した 1 枚のイオン導電性高分子アクチュエータを用いたソフトグリッパの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 in Kyoto (ROBOMECH2015), 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市左京区), 2A2-A05, 2015 年 5 月 19 日.

中川雄貴, 菊地邦友, 幹浩文, 森岡大地, 土谷茂樹, “イオン導電性高分子金属接合体を使用したソフトグリッパの開発”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会, 京都大学 桂キャンパス (京都府京都市西京区), 4P24, 2015 年 3 月 14 日.

横井和哉, 菊地邦友, 幹浩文, 森岡大地, 土谷茂樹, “形状記憶ポリマー一体型イオン導電性高分子アクチュエータの開発”, 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会, 京都大学 桂キャンパス (京都府京都市西京区), 6P22, 2015 年 3 月 14 日.

[その他]

ホームページ等

http://wakarid.center.wakayama-u.ac.jp/ProfileRefMain_2102.html

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~kikuchi/>

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~kikuchi/Lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊地 邦友 (KIKUCHI, Kunitomo)

和歌山大学・システム工学部・助教

研究者番号: 20588058