

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：14701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860037

研究課題名（和文） イオン導電性高分子アクチュエータを用いた異分野融合型マイクロデバイスの基礎の確立

研究課題名（英文） Establishment of Basic Fabrication Techniques for Interdisciplinary Electoro-mechanical Systems with Ionic Conductive Polymer Actuators

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、シリコンや金属材料を用いた従来型 MEMS デバイスとイオン導電性高分子アクチュエータ（イオン導電性高分子金属接合体〈Ionic Polymer-Metal Composite: IPMC〉）を融合した異分野融合型デバイスの作製に必要な要素技術について基礎的検討を行った。検討した要素技術は、イオン導電性高分子の微細加工技術、MEMS 技術を応用した IPMC の電極作製技術、MEMS デバイスと IPMC の接合方法である。また、これらの検討した要素技術の有用性を確認するため、シリコン基板上にカンチレバー型 IPMC の試作を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed a basic fabrication techniques for interdisciplinary electoro-mechanical Systems (MEMS) with ionic polymer conductive polymer actuators. Ionic polymer-metal composite (IPMC) is used as an ionic polymer conductive polymer actuator. In order to confirm the efficiencies of our developed techniques, a prototype of an IPMC of cantilever-type was fabricated on the silicon substrate by using them.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：高分子アクチュエータ，イオン導電性高分子，マイクロマシン，無電解めっき

1. 研究開始当初の背景

(1) 高分子アクチュエータのうち、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、最近盛んに研究されている。

(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。

(3) MEMS (Micro Electro Mechanical Systems: 微小電気機械システム) は、自動車、各種製造機器、情報機器等の小型・高性能・多機能化に貢献し、我が国の産業競争力強化に貢献している。一方、これら技術を発展させ、ライフイノベーション・グリーンイノベーションのための新しいライフスタイルを創出する革新的 MEMS デバイスを創製することが急務とされている。これまで別々に研究されてきた高分子アクチュエータ技術と MEMS 技術の融合が可能となれば、異分野融合型 MEMS の創製が期待できる。

2. 研究の目的

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多く、微小サイズでの加工は難しい。加えて、イオン導電性高分子は一般に水や液体で膨潤し、その寸法が大きく変わるため、MEMS 作製技術で基本となるフォトリソグラフィ技術に代表されるウェットプロセスの適用は困難であった。

本研究では、革新的デバイスとして期待されている異分野融合型次世代デバイスの創生を目指し、シリコンや金属材料を用いた従来型 MEMS デバイスとイオン導電性高分子アクチュエータ (イオン導電性高分子金属接合体 <Ionic Polymer-Metal Composite: IPMC>) を融合したデバイスの作製技術の確立を目的とした。

3. 研究の方法

(1) イオン導電性高分子の微細加工方法の検討:

本研究が目指す異分野融合型 MEMS の作製には、様々な形で MEMS と融合可能な IPMC の作製プロセスを確立する必要がある。IPMC に用いられているイオン導電性高分子として Nafion® (DuPont 製) があるが、この高分子は成形可能な高分子分散溶液や熱成形可能な顆粒として入手可能である。これらを利用して、イオン導電性高分子成形品の微細加工技術を検討する。

(2) MEMS 技術を応用した IPMC の電極作製技術の検討:

高性能な IPMC は無電解めっきにより電極を接合し作製されるが、水や有機溶媒を使用することにより基材であるイオン導電性高分子が膨潤により 10%伸びるなどの課題がある。このため、ウェットプロセスによる電極接合条件を最適化するとともに、スパッタや蒸着といったドライプロセスによる電極接合により電極を成膜し、評価する。

(3) MEMS デバイスと IPMC の接合方法の検討:

本研究ではフッ素系イオン導電性高分子膜を用いるため、基板と IPMC の密着性が悪く、剥離する可能性がある。このため、IPMC と MEMS との接合界面に Si 基板などを陽極酸化して得られる多孔質材料を用いて密着性を向上させ、剥離を防止する手法を検討する。

(4) 反応性イオンエッチングのイオン導電性高分子膜への影響評価:

水や有機溶媒を使用することにより基材であるイオン導電性高分子が膨潤により 10%伸びるなどの課題がある。このため、MEMS 作製技術で代表的なドライプロセスをイオン導電性高分子膜へ適用した際の影響を評価する。

(5) シリコン基板へのカンチレバー型 IPMC の試作:

上記(1)-(4)で検討してきた技術を基に、シリコン基板上へのカンチレバー型 IPMC の試作を行い、検討した手法の有用性を確認する。

4. 研究成果

(1) イオン導電性高分子の微細加工方法の検討:

本研究では、イオン導電性高分子アクチュエータと MEMS との融合技術の基礎の確立を目指しているため、MEMS の標準的な基板材料であるシリコン基板へのイオン導電性高分子の成形を検討した。実験の結果、イオン導電性高分子分散溶液を用いることにより、基板上に薄膜形成が可能であることを確認した。しかしながら、後述する接合方法の検討において解決がなされたが、平坦な基板への薄膜形成においては、膜が剥離するという課題も確認された。

また、酸素プラズマを用いた反応性イオンエッチングを行うことにより、成膜した薄膜を微細加工が可能であることを確認した。

(2) MEMS 技術を応用した IPMC の電極作製技術の検討:

本研究では薄膜 IPMC を作製することになるが、電極接合方法として、蒸着法と無電解

めつき法が考えられる。このため、これら 2 つの方法で接合した金電極を有する IPMC の変位量を比較することで最適な電極接合方法を検討した。

膜厚 20[μm]のイオン導電性高分子に蒸着法と無電解めつき法で電極を接合作製した IPMC サンプルを 2[mm] \times 10[mm]の短冊状に切り出し、イオン交換を行うためにイオン液体の一種である BMI-BF₄ (1-butyl-3-methyl-imidazolium tetrafluoroborate) 混合液 0.5[mol/l]中に 24[h]浸した。その後、サンプルを乾燥させ、空气中駆動時の IPMC の変位量を測定した。振幅 2.0[V]の矩形波電圧印加時の蒸着法で作製した IPMC、および無電解めつき法で作製した IPMC の変位測定結果をそれぞれ図 1、図 2 に示す。

測定結果より、蒸着法を用いて作製した薄膜 IPMC の変位量は 46.5[μm]、吸着還元法を用いて作製した薄膜 IPMC の変位量は 162[μm]であり、吸着還元法によって作製した薄膜 IPMC の方がより大変位が可能であることが分かった。

また、数回繰り返して動作をさせると無電解めつき法により作製した IPMC の金電極には亀裂などはみられないが、蒸着法で作製した金電極に剥離、亀裂が発生した。

無電解めつき法に接合した電極は、膜内部に樹状に成長するために、イオン交換膜との接着力が強く、繰り返しの屈曲動作に対しても金の剥離、亀裂が生じなかったと考えられる。また、イオン交換膜と電極の接着面積を増大させ、電気活性点を増やし、静電容量が大きいことが考えられる。

以上の結果により、無電解めつきによる電極接合は、大きな変位駆動が可能で、耐久性に優れていた IPMC を作製できることが示された。

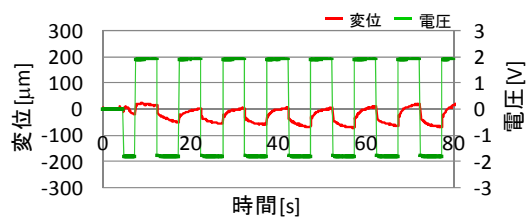


図 1 蒸着法で作製した IPMC の変位量

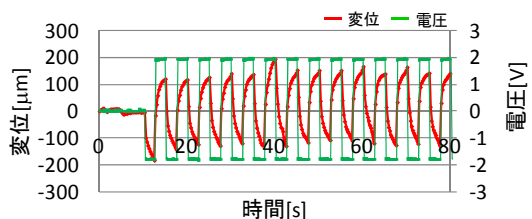


図 2 無電解めつき法で作製した IPMC の変位量

(3) MEMS デバイスと IPMC の接合方法の検討:

イオン導電性高分子膜は、水やエタノールなどの有機溶媒といった液体により膨潤し伸張するために、基板から剥離することが課題となっていた。このため、本研究では、MEMS の標準的な基板材料であるシリコン基板へのイオン導電性高分子の成形を基本とするため、イオン導電性高分子膜を基板上に密着性よく成膜する方法を検討した。

本研究では、分散溶液を用いたイオン導電性高分子膜を成形しているため、多孔質基板の利用することにより、基板と成膜膜との密着性を向上できることを提案した。

陽極酸化処理し多孔質化させたシリコン基板上に成膜したイオン導電性高分子膜の密着性をテープ剥離実験により評価した結果、①陽極酸化電圧が高く、②電圧印加時間が長く、③HF 濃度が高くなるほど、シリコン基板とイオン交換膜の密着性が向上することが分かった。これらの理由として、孔径が大きくなり孔間隔が縮まることでシリコン基板とイオン導電性高分子膜の接着面積が増加し、加えてアンカー効果が向上したことで密着性が向上したと考えられる。

さらに、無電解めつき法による電極接合実験を行った結果、陽極酸化領域では剥離せず密着状態を保っていた。一方、陽極酸化領域以外のイオン導電性高分子膜は剥離した。このことから、シリコン基板とイオン交換膜の密着性の向上するために、陽極酸化が有効であることが確認できた。

(4) 反応性イオンエッチングのイオン導電性高分子膜への影響評価:

水や有機溶媒を使用することにより基材であるイオン導電性高分子が膨潤により 10% 伸びるなどの課題がある。このため、MEMS 作製技術で代表的なドライプロセスをイオン導電性高分子膜へ適用した際の影響を評価した。これは、近年、プラズマ照射によるシリコン樹脂表面の改質により親水性が向上するとの報告がされているためである。

今回、シリコン基板の反応性イオンエッチングで代表的な反応性ガスとして利用されている SF₆、CF₄、CHF₃ の 3 種類のガスを用いて反応性プラズマ照射によるイオン導電性高分子膜への影響を評価した。

この結果、図 3 に示すように、3 種類のプラズマを照射したイオン導電性高分子膜は、無電解めつきにおける金錯体の吸収が不十分となり、金電極の形成ができなくなることが分かった。この現象については、さらなる原因の考察が必要であるが、対策として、プラズマ照射の影響を受けにくい Al 膜などをイオン交換膜上にマスクとして成膜することで改善が可能であることが分かった。

また、照射領域を制御すれば、IPMC のパ



【通常の IPMC】 【SF₆ ガス照射後】

図 3 SF₆ ガスの無電解めっきへの影響

ターン電極作製に大きく寄与する現象であると評価できる。

(5) シリコン基板へのカンチレバー型 IPMC の試作 :

上記 (1)-(4) で検討してきた技術を基に、シリコン基板上へのカンチレバー型 IPMC の試作を行った。試作したカンチレバー型 IPMC の構造を図 4 に示す。また、作製プロセスは図 5 の通りである。

- ①シリコン基板（基板の厚み：200[μm]）に対して陽極酸化処理を施す。
- ②陽極酸化の裏面から、SF₆ ガスと O₂ ガスの混合ガスを用いた RIE エッチングにより、厚み 50[μm]のダイアフラム構造を形成する。
- ③陽極酸化面に、厚み 20[μm]のイオン交換薄膜を成膜する。
- ④イオン交換膜に O₂ ガスを用いた RIE エッチングを行う。エッチング後、SF₆ プラズマを照射し、イオン交換膜側面を変質させる。
- ⑤金錯体水溶液に 12[h] 浸し、金の吸着を行う。その後、シリコン基板を RIE エッチングにより貫通させる。
- ⑥吸着還元法を施して金電極を形成する。

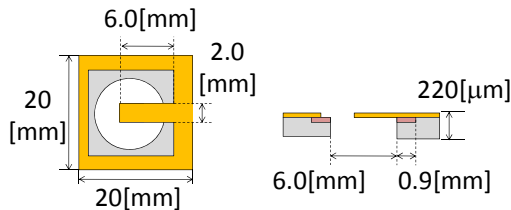
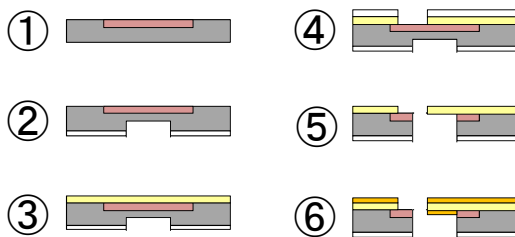


図 4 カンチレバーIPMC の試作構造



■ : Si 基板 □ : 陽極酸化領域 □ : Al 膜
 ■ : イオン交換膜 ■ : 金電極

図 5 試作構造の作製プロセス

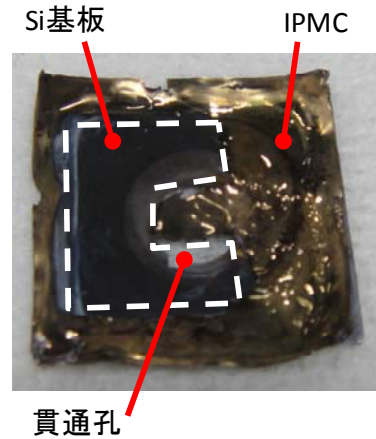


図 6 カンチレバーIPMC の試作結果

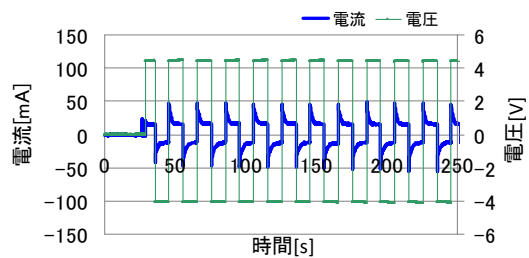
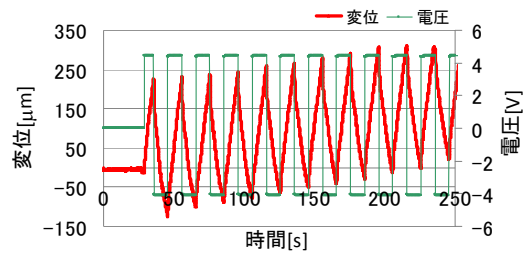


図 7 カンチレバー型 IPMC 駆動結果

試作結果を図 6 に示す。また、試作したカンチレバー型 IPMC の特性を評価するため、まず、BMI-BF₄ 水溶液 0.5[mol/l]中に一昼夜浸し、イオン交換を行った。その後、空気中にて駆動させ、変位量を測定した。この際、印加電圧は振幅 4.0[V]、周波数 100[mHz]の矩形波電圧とした。駆動結果を図 7 に示す。最大変位量は 170 [μm]であり、カンチレバー IPMC の駆動を確認することができた。しかしながら、変位が片側による傾向がみられた。これは、空気中駆動のため、電圧印加状況に対してイオン移動、IPMC の変形が追従できないためと考えられる。

以上の結果から、作製条件の最適化の必要はあるが、検討してきた各要素技術の有用性を確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 谷口 智久, 菊地 邦友, 幹 浩文, 土谷 茂樹, “プラズマ照射によるイオン交換膜の改質を用いたイオン導電性高分子アクチュエータのパターン電極の作製と評価”, 日本機械学会関西支部関西学生会平成 23 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪府吹田市 関西大学千里キャンパス, 2012 年 3 月 15 日
- ② 金 壯憲, 中村 佳寛, 岡本 正臣, 菊地 邦友, 幹 浩文, 土谷 茂樹, 安積 欣志, “IPMC の電気機械特性に与えるイオン交換時の溶媒の影響”, 第 12 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 (SI2011), 京都府京都市 京都大学 吉田キャンパス, 2011 年 12 月 24 日
- ③ 谷口 智久, 清水 一平, 菊地 邦友, 幹 浩文, 土谷 茂樹, 安積 欣志, “IPMC における SF₆ プラズマを用いた電極のパターンめっきの作製と評価”, 第 12 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 (SI2011), 京都府京都市 京都大学 吉田キャンパス, 2011 年 12 月 24 日
- ④ Shigeki Tsuchitani, Masaomi Okamoto, Kunitomo Kikuchi, “Equivalent Circuit and Its Effects on Actuation of Flemion-based IPMC”, 6th World congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio, フランス パリ Cergy-Pontoise, 2011 年 10 月 25 日
- ⑤ Masaomi Okamoto, Shigeki Tsuchitani, Kunitomo Kikuchi, “Electromechanical properties of Flemion-based ionic polymer actuators ion-exchanged with ionic liquids”, EuroEAP 2011: First international conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers & artificial muscles, イタリア ピサ, 2011 年 6 月 9 日
- ⑥ Kunitomo Kikuchi, Shigeki Tsuchitani, Ippei Shimizu, “Formation of a patterned electrode for ion conductive polymer actuator using a plasma treatment method as a MEMS technology”, EuroEAP 2011: First international conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers & artificial muscles, イタリア ピサ, 2011 年 6 月 8 日
- ⑦ 菊地 邦友, 清水 一平, 土谷 茂樹, “多自由度イオン導電性高分子アクチュエータの開発”, ROBOMECH 2011 IN OKAYAMA, 岡山県岡山市 岡山コンベンションセンター,

2011 年 5 月 27 日

- ⑧ Ippei Shimizu, Kunitomo Kikuchi, Shigeki Tsuchitani, “Fabrication of Ionic Polymer-Metal Actuator of Microcantilever Type”, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2010), 宮城県 仙台市東北大学百周年記念会館 川内萩ホール, 2010 年 12 月 21 日
- ⑨ Masaomi Okamoto, Kunitomo Kikuchi, Shigeki Tsuchitani, “Evaluation of Operating Characteristics of Flemion®-based IPMC with Ionic Liquids Operated in Water”, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2010), 宮城県 仙台市東北大学百周年記念会館 川内萩ホール, 2010 年 12 月 21 日
- ⑩ Kunitomo Kikuchi, Shigeki Tsuchitani and Ippei Shimizu, “Fabrication of a Planer-type Ionic Polymer Actuator Fabricated with MEMS Technology”, 2010 MRS Fall Meeting, アメリカ ボストン, 2010 年 11 月 30 日
- ⑪ 岡本 真臣, 土谷 茂樹, 菊地 邦友, “Flemion を用いたイオン液体系 IPMC の動作特性評価”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 愛知県 名古屋市 名古屋工業大学, 2010 年 9 月 24 日

[その他]

ホームページ等

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

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし