

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 9 日現在

機関番号：32619
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2011～2014
課題番号：23686043
研究課題名(和文) マイクロ・ナノシステムと自律駆動ゲルの融合によるケミカルロボティクスの構築

研究課題名(英文) Design of chemical robotics with micro and nano system

研究代表者
前田 真吾 (Maeda, Shingo)
芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40424808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円

研究成果の概要(和文)：化学エネルギーだけで駆動する、化学ロボットに関する基礎研究から応用研究を実施した。化学エネルギーのみで自律的に拍動や蠕動運動を生成するゲルに、マイクロ加工やマイクロ・ナノ加工されたPDMSと組み合わせることで、自律駆動するマイクロポンプの創製に成功した。また、自律駆動ゲルのアセンブリに方法としてシリカナノ微粒子を用いた接着制御方法を見出した。

研究成果の概要(英文)：We designed the chemical robots powered by chemical energy with the object of the basic and applied points. We succeeded in autonomous micro pumps by using the self-actuated gels and micro fabrication technology. And we found the adhesion technology for the assembly methods of the self-actuated gels by using silica nano particles.

研究分野：ソフトアクチュエータ

キーワード：ゲル ソフトアクチュエータ ゲルアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

メカトロニクスをベースとしたアクチュエータやロボットとは異なり、化学エネルギーのみで自律駆動するシステムについて検討した。電気エネルギーを一切使用せず、情報処理系を化学反応の連鎖と高分子ゲルの形態変化を用いることで、新原理の化学ロボットについて提案を行った。

2. 研究の目的

申請者はこれまで、振動化学反応である Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応 [1] のエネルギーで刺激応答性高分子ゲルが自律的に膨潤・収縮するシステムについて研究を行ってきた (自律駆動ゲル)。BZ 反応は、マロン酸などの有機酸が酸化する過程で、金属イオンの価数が振動することが知られている。この金属イオンの価数が還元状態と酸化状態によって高分子鎖の溶解性が BZ 反応は、金属イオンの存在下においてマロン酸などの有機酸の酸化反応である。この酸化反応が進行する中で、金属イオンの酸化還元振動を観測することができる。このような金属イオンを高分子ゲルの主鎖に結合させることで、自律駆動ゲルを合成することができる。高分子ゲルは、鎖状分子が架橋された網目構造持ち、水などの溶媒を含んだ系である。高分子ゲルは、環境変化によって溶媒を吸収したり、排出することで、その体積を大きく変化させることができる。言い換えると、環境変化によって、ゲルの溶解性が変化するということになる。例えば、温度応答性高分子ゲルで知られている Poly-N-isopropylacrylamide (PNIPAAm) ゲルは、33 度付近において、不連続な溶解性の変化を観察することができる。これは PNIPAAm ゲルの体積相転移現象として知られている。自律駆動ゲルの Ru 錯体が還元状態 (Ru^{2+}) の溶解性が、酸化状態 (Ru^{3+}) の溶解性より親水的になる。つまり、自律駆動ゲルの polymer-solvent 相互作用パラメータ (Flory parameter) が変化した結果として、ゲルの体積は酸化状態 (Ru^{3+}) の状態の方が還元状態 (Ru^{2+}) より大きくなる。したがって、等温条件下においてゲルの体積は BZ 反応の金属錯体の酸化還元振動によって、周期的な膨潤・収縮する。このように、自律駆動ゲルは自律的な機能を有したユニークな材料であるが、BZ 反応によって誘起される変位は非常に小さい。1996 年に吉田らによって自律駆動ゲルの変位が約 $10 \mu\text{m}$ であったことが最初に報告された [2]。申請者はゲルを多孔質化することで、ゲルの応答性を改善し、約 $100 \mu\text{m}$ の変位を実現し、蠕動運動の観察に成功した [3]。本研究では、これまで申請者が開発してきた自律駆動ゲルと、マイクロ・ナノテクノロジーと融合することで新しいデバイスの創出を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究の方法として、自律駆動ゲルの基本的性能の向上、デバイス化、の 2 つを柱

として研究を推進した。

4. 研究成果

自律駆動ゲルの基礎物性に関する成果は以下の通りである。

これまで高分子鎖に NIPAAm 鎖を用いてきたが、温度に応答するため適用範囲が制限されていた。例えば、NIPAAm 鎖の場合 28 度付近で体積相転移を起こすため、28 度以上ではゲルの体積振動を計測することが困難であった。そこで、NIPAAm ではなく AAm 鎖にすることで非温度応答性の自律駆動ゲルの創出を行った。NIPAAm 鎖を AAm に変更し合成するだけでは、ゲルの応答性の遅さから変位を得ることができないと予想されたため、AAm ゲルにミクロ相分離構造を導入することを検討した。AAm を主鎖としてミクロ相分離する条件を探索し、合成を行った。結果として、数十マイクロメートルの変位を得ることに成功した。また、NIPAAm 鎖を主鎖としたゲルも、高温領域で数十マイクロメートルの変位を有していることを観察することにも成功した。

ロボットやデバイス化を行う場合、必ずアセンブリが必要となる。そこで、ゲル同士の接着制御に関する研究を実施した。特にシリカ微粒子をバインダーとして用いることで、可逆的にゲルの接着・剥離が可能であることを見出した。これらの方法は本研究課題だけでなく、他の研究にも応用展開が可能であり、面白い結果だと考えられる。

ゲルの応答性を改善する方法として、多孔質構造を導入することを過去に検討した。そこでゲルの構造をエレクトロスプレーによって、繊維構造やグレイン構造を制御する方法を確立し、応答性を大幅に改善できることを見出した。

デバイス化に関する研究は以下の通りである。

自律駆動ゲルをマイクロポンプ化するために、PDMS でマイクロ流路を設計した。ゲルの膨潤する圧力によって、PDMS 膜を押し出し、結果として流体の拍動を実現した。この成果は非常に意義深く、デバイス化可能であることが明らかとなった。自発的に駆動する液滴をマイクロ流路内で方向制御することに成功した。これにより、微小なスケールの物体運搬などに応用できることが分かった。

自律駆動ゲルにマイクロ加工することで、非対称性の床面を用意せずに、全身することが可能であることを示した。これより、自走可能なマイクロゲルロボットの設計が可能であることが明らかとなった。

[引用文献]

[1] A. M. Zhabotinsky, Chaos 1, 379 (1991).

- [2] R. Yoshida, T. Takahashi, T. Yamaguchi and H. Ichijo, *J. Am. Chem. Soc.*, 118, 5134 (1996).
 [3] S. Maeda, Y. Hara, R. Yoshida and S. Hashimoto, *Angew. Chem. Int. Ed.* 47, 6690 (2008).

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)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

1. S. Maeda, T. Kato, H. Kogure, "Thermo responsive hydrogel with porous structure", *Applied Physics Letters*, 106, pp.1719091-1719094, 2015. (査読有)
 2. H. Abe, Y. Hara, S. Maeda, S. Hashimoto, "Adhesion of Gels by silica particle", *J. Phys. Chem. B*, 118, pp.2518-2522, 2014. (査読有)
 3. T. Mikanohara, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "Peristaltic motion of tubular gel driven by acid-autocatalytic reaction", *Advanced Robotics*, 28, pp.457-465, 2014. (査読有)
 4. H. Abe, Y. Hara, S. Maeda, S. Hashimoto, "Surface modification method for adhesion of gels", *Chemistry Letters*, 43, pp.243-245, 2013. (査読有)
 5. S. Maeda, S. Hashimoto, "Volume oscillation of microphase-separated gel", *Macromolecular Chemistry & Physics*, 214, pp. 343-349, 2013. (査読有)
 6. S. Maeda, W. Oda, "Volume oscillation in macro porous gel", *Chemistry Letters*, 41, pp. 1526-1528, 2012. (査読有)
 7. 宮嶋尚哉, 佐々木翔太, 原 雄介, 阪根英人, 吉野雄太, 前田真吾, 桑原哲夫, "アクリル系ヒドロゲル/スメクタイト複合体の熱挙動と細孔特性", *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, 19, 356, pp.30-36, 2012. (査読有)
 8. H. Nakagawa, Y. Hara, S. Maeda, S. Hashimoto "A Pendulum-Like Motion of Nanofiber Gel Actuator Synchronized with External Periodic pH Oscillation", *Polymers*, 3(1), 405-412, 2011. (査読有)
 9. S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto "Design of autonomous gel actuators", *Polymers*, 3(1), 299-313, 2011. (査読有)
 10. S. Maeda, Y. Hara, S. Nakamaru, H. Nakagawa, S. Hashimoto "On Biomimetic, Chapter.12 Chemical Robots", Published by In-Tech, 2011 年 8 月 29 日 (ISBN 978-953-307-271-5), pp.253-273.
 11. Y. Hara, S. Maeda, T. Mikanohara, H. Nakagawa, S. Nakamaru, S. Hashimoto "Smart actuation and sensing systems - Recent advances and future challenges 「Novel Self-oscillating polymer actuators for soft robot」, Published by In-Tech, 2012 年 10 月 17 日 (ISBN 978-953-51-0798-9), pp.311-343
- 〔学会発表〕(計 27 件)
12. R. Okada, T. Kogure, S. Nagasawa, S. Maeda, "Design of self-moving gel driven by chemical energy", *Proc. IEEE ROBIO*, 2014 (in press). (査読有)
 13. A. Takada, S. Nakamura, Y. Yamanishi, S. Hashimura, S. Nagasawa, T. Kogure, S. Maeda, "Design of electrostatic adhesion device using the flexible electrodes", *Proc. IEEE MHS*, 2014(in press). (査読有)
 14. H. Shigemune, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "Design of paper mechatronics: Towards a fully printed robot", *Proc. IEEE IROS*, 2014(in press). (査読有)
 15. A. Suzuki, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "Design and Motion Control of Self-propelled Droplets", *Proc. IEEE MEMS*, pp.310-313, 2014. (査読有)
 16. S. Katayama, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "A self-assembling method for polymer gel components", *Proc. IEEE ROBIO*, pp.79-84, 2013. (査読有)
 17. T. Kato, N. Hosoya, S. Maeda, "A design of self-sustained gel actuator", *URAI*, pp.34-36, 2013. (査読有)
 18. S. Maeda, T. Kato, K. Takahashi, S. Hashimoto, "Active gel locomotion", *Proc. IEEE MHS*, pp.1-4, 2013. (査読有)
 19. K. Takahashi, S. Nagasawa, S. Maeda, "Self-beating gel pump powered by chemical energy", *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4040-4045, 2013. (査読有)
 20. A. Suzuki, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "Capsule gel robot driven by self-propelled oil droplet", *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2180-2185, 2012. (査読有)
 21. S. Maeda, T. Mikanohara, Y. Hara, S. Hashimoto "Peristaltic Gel Pump Driven by Chemical Energy", *Proc. Int. IEEE Robotics and Biomimetics 2011*, pp.1415-1420. (査読有)
 22. T. Mikanohara, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto "Tubular Gel Motility Driven by Chemical Reaction Networks", *Proc. Int. IEEE Robotics and Biomimetics 2011*, pp.2008-2011. (査読有)
 23. 加藤輝一, 細矢直基, 前田真吾 "長軸方向に大変形する自励振動ゲルアクチュエータの設計"第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 2014 年 9 月 5 日(口頭)(査読無)
 24. 高橋恒貴, 長谷川忠大, 山西陽子, 前田真吾 "化学エネルギーで駆動するポンプの設計"第 32 回日本ロボット学会学術講演

- 演会, 2014年9月5日(口頭)(査読無)
25. 田辺圭, 前田真吾, “中空状BZゲルに関する研究”ロボティクス・メカトロニクス2014(ROBOMECE2014), 富山市総合体育館, 2014年5月25日(ポスター).(査読無)
 26. 嶋本剛己, 鈴木彩, 木村敏樹, 山西陽子, 前田真吾, “ゲルモータの設計”ロボティクス・メカトロニクス2013(ROBOMECE2014), 富山市総合体育館, 2014年5月25日(ポスター).(査読無)
 27. 小川拓, 鈴木彩, 木村敏樹, 前田真吾, “界面張力差によって自走する高分子ゲルに関する研究”ロボティクス・メカトロニクス2013(ROBOMECE2014), 富山市総合体育館, 2014年5月25日(ポスター).(査読無)
 28. 重宗宏毅, 前田真吾, 重宗宏毅, 橋本周司 “有機アクチュエータを用いた印刷法による紙ロボットの製作 ペーパーメカトロニクスの提案 ”ロボティクス・メカトロニクス2014(ROBOMECE2014), 富山市総合体育館, 2014年5月25日(ポスター).(査読無)
 29. 岡田怜也, 前田真吾 “自走する高分子ゲルの設計”ロボティクス・メカトロニクス2014(ROBOMECE2014), 富山市総合体育館, 2014年5月25日(ポスター).(査読無)
 30. 加藤輝一, 小暮輝, 前田真吾 “ナノファイバー構造を有する温度応答性高分子ファイバーゲルの設計”日本機械学会マイクロナノ工学シンポジウム, 2013年11月5日(ポスター)(査読無)
 31. 片山翔子, 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “静電相互作用による高分子ゲル部品の自動組立”日本ロボット学会, 首都大学東京, 2013年09月05日(口頭)(査読無)
 32. 鈴木彩, 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “自律運動カプセルゲルロボットの運動解析”ロボティクス・メカトロニクス2013(ROBOMECE2013), つくば国際会議場, 2013年5月22日(ポスター).(査読無)
 33. 鈴木彩, 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “油滴の自発的駆動を用いたカプセルゲルロボット”第30回日本ロボット学会 学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012年9月18日(口頭)(査読無)
 34. 三ヶ野原崇, 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “BS反応とのカップリングによる管状ゲルの蠕動運動”第30回日本ロボット学会 学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012年9月18日(口頭)(査読無)
 35. 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “自律駆動ゲルアクチュエータの設計と機能制御”ロボティクス・メカトロニクス2012(ROBOMECE2012), 2A2-C06, アク

トシティ浜松, 2012年5月29日(ポスター).

36. 中川裕貴, 原雄介, 前田真吾, 橋本周司, “エレクトロスピンング法によるナノファイバー型アクチュエータの作製”平成24年電気学会全国大会, 広島, 2012年3月.(口頭)(査読無)
37. 前田真吾, 原雄介, 橋本周司 “化学ロボットの設計と機能制御”第29回日本ロボット学会 学術講演会, 芝浦工業大学, 2011年09月8日(口頭)(査読無)
38. 三ヶ野原崇士, 前田真吾, 橋本周司 “化学反応ネットワークによって蠕動する機能性ゲル”第29回日本ロボット学会 学術講演会, 芝浦工業大学, 2011年09月8日(口頭)(査読無)
39. 前田真吾, “化学反応で駆動するゲルロボットの設計”, 第5回自己組織化討論会, 川崎グランドホテル, 2011年8月.(Oral)(査読無)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 真吾 (MAEDA, Shingo)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 40424808

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号：