

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656177

研究課題名(和文)ゲルロボットの自己複製に関する研究

研究課題名(英文)A study on self reproduction of gel robot

研究代表者

橋本 周司 (Hashimoto, Shuji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60063806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：正と負に帯電した2種類のゲル部品を水中に分散させ、水中攪拌下で確率的に出会わせ、静電相互作用により自動的に組み上げる自己組織化の実験的研究を行い、ゲルロボットの自己複製の見通しを得た。

まず、ゲル表面にシリカ微粒子を塗布することにより接着性能が向上することを確認するとともに、pHによって接着を制御できることを確認した。次に、ゲル部品の組み立てでは特に、1) 接着方向に選択性を持たせるために、特定の面のみ接着させること。および、2) 部品同士を正確な位置で接着させるために、接着面に幾何学形状を導入し、凹凸を利用して噛み合わせることを検討し、部品の選択的接着による自己組み立てに成功した。

研究成果の概要(英文)：We performed experimental study for self-assembly of gel parts charged positively and negatively in water under stirring and got promising results toward gel-robot that have an ability of self-reproduction.

First, we confirmed that the adhesion performance is improved by applying the silica particles on the surface of the gel, and that it is possible to control the adhesion by pH. Next, in order to get the selectivity in parts connections, 1) we introduced a selective charging of parts surfaces to realize the adhesive direction control. And 2) we introduced a geometrical shape on the adhesive surface, and engaged using its regularities in order to adhere in an accurate position.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・高分子・繊維材料

キーワード：ソフトメカニクス 自己組織化 構造・機能材料 ケミカルロボット ゲルロボット

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでソフトでウェットな材料で構成されるポリマーゲルを用いた化学ロボットの研究開発を行ってきた。刺激応答性の高分子ゲルは特定分子や、光や pH、温度などの物理化学変化によりその構造を変化させることを利用して、従来のロボットでは困難である生物のような柔軟な動作を実現している。ゲルロボットはエネルギー効率性や無騒音性などが期待できるが、製造には、部品ゲルごとに鋳型を設計し、部品を組み立てる必要がある。もしゲル部品が自律的に組み上がる自己複製が実現できれば、ゲルロボットの実現性が高まるばかりでなく、生産方式の革命的な変革にもつながることが期待できる。

2. 研究の目的

これまで過去の自己複製に関する研究では、生物学における複製と情報工学におけるソフトウェア的な自己複製が多く研究されている。本研究ではゲルを身体とする化学ロボットの実現を目指し、異なる部品ゲルの組み合わせの自己複製を実現することを研究目的とする。このような仕組みを実現するために、まずは構造物の自動組立に関する研究を行う。もし、構造物を自動で組み立てる技術があれば、部品を組み立てる手間や、鋳型設計の手間を省くことが期待できる。近年、部品の自己組立に関する研究が報告されている。このような技術はマイクロ・ナノスケールのデバイス作製の効率化への応用などが考えられる。特に流体中での自動組立は、効率よくできることが報告されている。もし、このような自動組立を高分子ゲルの組立において実現することができれば、新たなゲルロボットの組立て方法を実現することができる。さらにこの方法を元に、自己複製の工学的な方法論に展開することができるであろう。

3. 研究の方法

本研究では、複数の高分子ゲル部品を自動的に組み上げる手法を提案する。正と負に帯電した2種類のゲル部品を複数用意し、これらを水中攪拌下で確率的に出会わせ、部品間の静電相互作用により組み立てる(図1)。正負に帯電した2種類のゲル部品は、イオン性モノマーをラジカル重合法によりゲル化することで作製する。

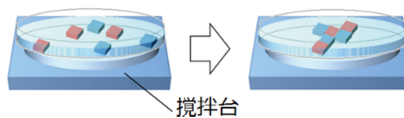


図1 ゲル部品自動組立の概要図

イオン性ゲルとは、主鎖に解離基を持っている高分子ゲルであり、特定の条件の時に電離する。解離基である-COOHを持ったアニオン性ゲルと-NH₂を持ったカチオン性ゲルの接着力はpHによって変化し、pH7において最大の接着力を示すことが報告されている。我々は、帯電表面にシリカ微粒子を塗布することにより接着性能が向上することを確認するとともに、pHによる接着制御についても確認した。

本研究では、弱酸アニオン性モノマーのアクリル酸(AAc)(pKa = 4.25)及び弱塩基カチオン性モノマーのジメチルアミノプロピルアクリルアミド(DMAPAA)(pKa = 10.35)を使用する。これらのモノマーは特定のpHで電離する。pHを調整したゲルは、各々正と負に帯電し、それらは静電相互作用により接着する。

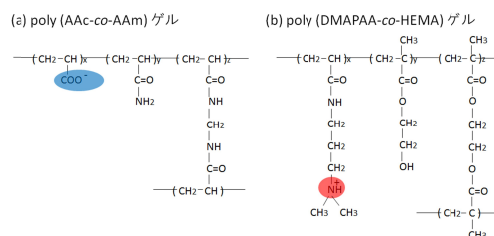


図2 (a)Poly(AAc-co-AAm) ゲル (b)Poly(DMAPAA-co-HEMA)ゲルの構造式

図2は、電離した時のアクリル酸 - アクリル

ルアミド共重合ゲル（以下 Poly(AAc-co-AAm)ゲル）及びジメチルアミノプロピルアクリルアミド-2-ヒドロキシエチルメタクリレート共重合ゲル（以下 Poly(DMAPAA-co-HEMA)ゲル）の化学構造式を示す。さらに図3にこれらのゲルの接着の模式図を示す。

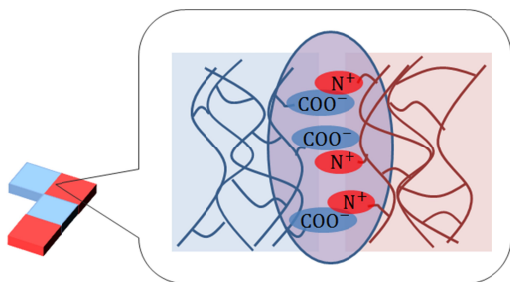


図3 ゲルの接着の模式図

2種類の正負に帯電したゲル部品を水中で撹拌することで、部品同士を静電相互作用により接着させ、組み立てる（図3）。また、複雑な構造物組立を実現するために、本研究では2つの要素に着目した。1つ目に、接着方向に選択性を持たせるために、特定の面のみ接着させることにした。2つ目に、部品同士を正確な位置で接着させるために、部品接着面に幾何学形状を導入し、凹凸を利用して噛み合わせることを検討した。

以上のように、静電相互作用により接着するゲルを使用し、部品に接着面や形状の工夫をすることで複雑な構造物組立の実現を目指す。図4に提案手法の概要図を示す。

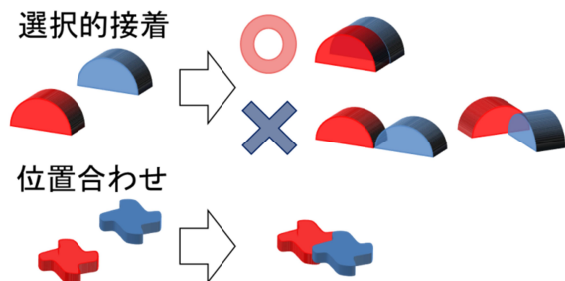


図4. 提案手法

ゲル部品を複数用意し、水中撹拌下に置く。具体的には、ゲル部品と水の入ったシャーレ

を振動台の上に置き 500 rpm で撹拌する。シャーレの床面には、ゲル部品との摩擦を軽減させるためにナフロンシートを敷く。部品の接着が完了した時点で撹拌を停止する。

4. 研究成果

水中撹拌下での直方体ゲルの接着実験の様子を図5に示す。poly(AAc-co-AAm)ゲル（青色）及び poly(DMAPAA-co-HEMA)ゲル（赤色）を6個使用し実験を行った。水は、部品の高さ（およそ 5 mm）まで注いだ。接着している隣同士のゲル部品が異なる色であることから、反対電荷を持つゲル部品同士が接着していることが分かる。つまり、撹拌下で静電相互作用により部品を組み立てられることが確認できた。

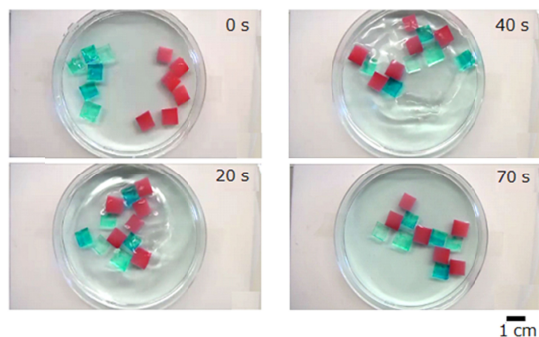


図5 直方体ゲルの自動組立

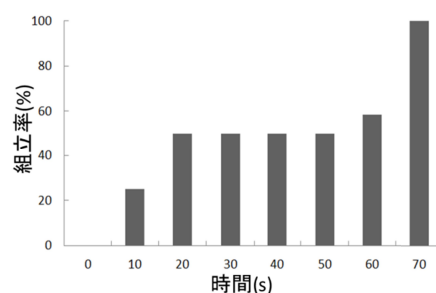


図6 直方体ゲルの自動組立

図6に時間に対する部品の組立率を示す。組立率は、接着している最大の部品数を、全部品数で割ったものと定義した。撹拌を始めてから20秒後から50秒後の間、組立率は50%のままであるが、70秒後にはシャーレ内の全ての部品が接着し、組立率は100%になった。

水中攪拌下での半楕円柱ゲルの接着実験の様子を図7に示す。poly(AAc-co-AAm)ゲル及びpoly(DMAPAA-co-HEMA)ゲル共に6個ずつ使用し実験を行った。水は、部品の高さ(およそ5 mm)まで注いだ。

半楕円柱ゲル部品を使用することで、部品が一直線に連なり接着する様子が確認できた。部品の形状を工夫することで、前後左右に限らず接着の方向に選択性を持たせることが可能であると考えられる。

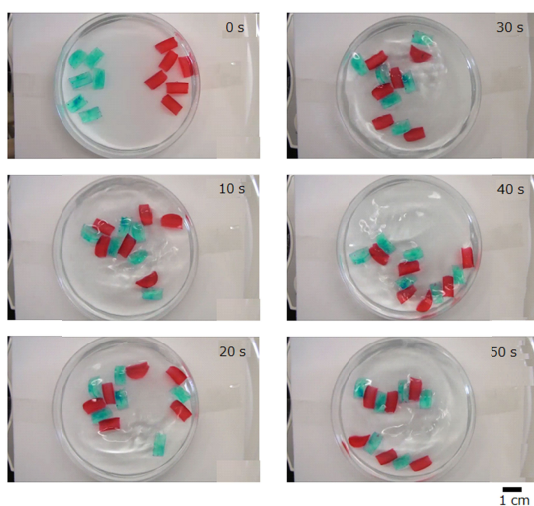


図7 半楕円柱ゲルの自動組立

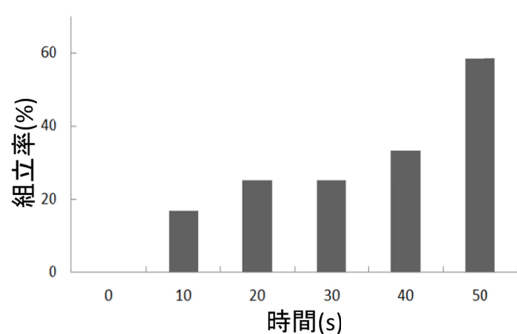


図8 半楕円柱ゲル自動組立の組立率

図8に時間に対する部品の組立率を示す。50秒後には60%の部品が組み立てられた。50秒経過した後も攪拌を続けたが、これ以上の組立率は得られなかった。本実験において使用したシャーレの直径がおよそ75 mmであるのに対し、部品の幅は7 mmであるので、組立率は最大で70%である。上記のことから、部品の大きさやシャーレの大きさが実験結

果に影響することが分かる。また、図7の20秒時の写真から、攪拌の途中で部品が横に倒れている様子が確認できる。この点に関しては、さらなる形状の検討が必要である。更に、接着実験後の部品は前後方向に一直線に接着しているが、左右方向の位置合わせはできていない。水中攪拌下での幾何学形状ゲルの接着実験の様子を図9に示す。poly(AAc-co-AAm)ゲル及びpoly(DMAPAA-co-HEMA)ゲル共に6個ずつ使用し実験を行った。水は、部品の高さ(およそ2 mm)まで注いだ。

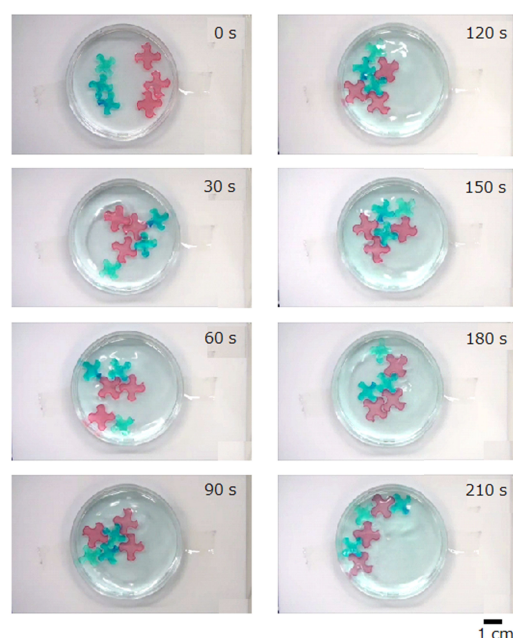


図9 幾何学形状ゲルの自動組立

部に円型を採用することで、位置合わせが可能であることが確認できた。攪拌中に、同じ色のゲル部品同士が噛み合っている様子が見られるが、同じ色のゲルの間には静電引力がないため結合は非常に弱く接着が保持されているわけではない。さらに、違う色のゲル部品同士が、噛み合っていない位置でも接着している部分がある。このことから、静電引力による接着力が非常に強いことが考えられる。よって、噛み合った時に接着するように、ゲルの組成を調整することが必要である。

2 種類のイオン性モノマーを使用しゲル部品を作製することで、攪拌した水中での静電相互作用による接着現象を確認した。また、複雑な構造物の組立に向けて、選択的な接着及び位置合わせの方法を提案した。選択的な接着に関しては、部品の特定の面のみ接着するような半楕円柱型のゲル部品を作製し、選択的な接着の様子を確認した。位置合わせに関しては、幾何学形状ゲル部品を作製し、接着面の噛み合わせを利用した位置合わせが部分的に出来ていることを確認した。

今後は、部品の形状や組成を検討し、組立の精度を上げたいと考えている。また、シャーレ内の部品の数や専有面積が実験結果にどのような影響を及ぼすか調べることによって、効率のよい組立方法の条件を検討する。さらに本研究を継続発展し、自己複製する鋳型ゲルを設計し、自己複製するゲルの条件について検討したいと考えている。

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 2件)

H. Abe, Y. Hara, S. Maeda, S. Hashimoto, "Adhesion of Gels by Silica Particle", J. Phys. Chem. B, 査読有, 118, pp. 2518-2522, 2014.

H. Abe, Y. Hara, S. Maeda, S. Hashimoto, "Surface modification method for adhesion of gels", Chem. Lett., 査読有, 43, pp. 243-245, 2013.

[学会発表](計 2件)

S. Katayama, S. Maeda, Y. Hara, S. Hashimoto, "A self-assembling method for polymer gel components", IEEE Int. conf. of Robotics and Biomimetics, pp. 79-84, Dec. 12-14, Shenzhen, China, 2013.

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," The 31th annual conference of the robotics society of Japan, Sep. 4-6, Tokyo, DVD-Proc., RSJ2013AC2E1-05, 2013.

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 周司 (HASHIMOTO SHUJI)

早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：60063806

(2)研究分担者

前田 真吾 (MAEDA SHINGO)
芝浦工業大学・工学部・助教
研究者番号：40424808