

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：51501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14703

研究課題名（和文）形状記憶ゲルの温度制御による超形状・剛性可変把持機構を有するロボットハンドの創成

研究課題名（英文）Creation of a robot hand with super-shape and rigid variable gripping mechanism by temperature control of shape memory gel

研究代表者

和田 真人（Wada, Masato）

鶴岡工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：10803752

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットハンドへ実装を考え、結晶性モノマーを組成に組み入れたアクリルアミド系のハイドロゲルを選定した。ゲルの温度による力学特性変化を、扱いやすい温度帯で発現させるため結晶性モノマーをステアリルアクリレート（SA）とラウリルアクリレート（LA）2種類を用いて調製を行った。板状のゲルにて力学試験や温度特性を調査しロボットハンドの加温システムに適したゲルの組成割合を決定し、ロボットハンドへの応用が可能であることを確認した。三次元造形技術を用いて汎用装置によるゲルの造形を実現した。造形精度に関して三次元測定技術を検討し測定を行った。形状記憶ゲルの温度特性においてゲル表面の接着力に関する知見も見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療や災害などにおけるロボット活用は必至であり、様々な産業分野での技術開発が行われている。なかでも、高精度な制御を必要とせず、複雑形状の対象物に柔軟性をもって対応可能であるソフトマテリアルを活用したロボットが求められている。本研究では、形状記憶ゲルの特性を活かした簡便な機構の新しいロボットハンドの開発を行った。このロボットハンドが完成することで安価かつ柔軟性を持った、対象物を選ばないソフトロボットハンドとして、医療、災害、工業の分野での活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：Considering implementation on a robot hand, we selected an acrylamide-based hydrogel that incorporates crystalline monomers into its composition. Two types of crystalline monomers, stearyl acrylate (SA) and lauryl acrylate (LA), were used to express the changes in mechanical properties due to the temperature of the gel in a temperature range that is easy to handle. We determined the composition ratio of the gel suitable for the heating system of the robot hand by investigating the mechanical test and temperature characteristics with the plate-shaped gel, and confirmed that it is possible to apply it to the robot hand. Using 3D modeling technology, we realized gel modeling with a general-purpose device. Three-dimensional measurement technology was examined and measured for molding accuracy. We also found out the knowledge about the adhesive strength of the gel surface in the temperature characteristics of the shape memory gel.

研究分野：ソフトロボティクス、ソフトメカニクス

キーワード：ソフトロボティクス ソフトメカニクス ハイドロゲル

1. 研究開始当初の背景

ソフトマテリアルは、生物模倣応用、ソフトロボットへの応用を目指した研究において、摩擦研究に広く用いられており、本研究においても、その経験が活かされるのではないかと考えられる。ソフトメカニクス等の低摩擦材料開発を目指した研究として、高分子ハイドロゲルの応用研究を進めてきた。例えば、電場を印加することにより、ゲル内部の水が表面に移動し、潤滑層を形成し、摩擦が低下することがわかり、電場によってゲルの摩擦を制御する方法を確立した。また、応募者らのグループでは、レーザー加工機によりゲルを切断した場合、表面粗さが増加し、見かけの接触面積が低下し、摩擦力が低下するという結果も得ており、この技術も今後、ソフトメカニクス等の部品への応用が期待できる。また、申請者は、ゲルの摩擦制御に関する研究を進めてきた経験があり、本研究の学術的な特色は、摩擦現象という物理現象を、結晶化にて制御しようという基礎的な研究であることに加えて、さらにその研究から得られた結果をソフトメカニクスへ応用することにある、基礎から応用を見据えた総合的な学問の構築につながるのではないかとこの点である。

2. 研究の目的

本研究では、形状記憶ゲルが用いられ温度制御（サーマルスイッチング機構）による超形状・剛性可変把持機構を有するロボットハンドを開発することが、本研究の目的である。形状記憶ゲルの三次元造形技術を確立し、ロボットハンド把持部の開発を行い、最終的には人協働ロボットへの装着を実施し実機としての試作を行う。

3. 研究の方法

- (1) ロボットハンドへ実装を考え、結晶性モノマーを組成に組み入れたアクリルアミド系のハイドロゲルを選定する。ゲルの温度による力学特性変化を、扱いやすい温度帯で発現させるため結晶性モノマーをステアリアルアクリレート (SA) とラウリルアクリレート (LA) 2種類を用いて調製を行う。
- (2) 板状のゲルにて力学試験や温度特性を調査しロボットハンドの加温システムに適したゲルの組成割合を決定し、ロボットハンドへの応用が可能であるか調査する。
- (3) 三次元造形技術を用いて汎用装置によるゲルの造形を実施し、造形精度に関して三次元測定技術を検討し測定を行う。
- (4) ロボットハンド把持部の開発を行い、人協働ロボットへの装着を実施し実機としての試作を行う。

4. 研究成果

形状記憶ゲルの力学的特性

(1) 図1に温度変化による摩擦特性を示す。横軸は試験片に対する垂直荷重を示し、縦軸は表面の動摩擦係数を示している。また、電圧値は高いほど試験片が高温になることを示す。グラフより、温度が高いほど動摩擦係数が増加しており、荷重が高い程摩擦係数が増加する傾向が見られた。また測定子を試験片から持ち上げる際、垂直方向に粘着する現象が見られ、高温になるほど強い粘着性を示した。

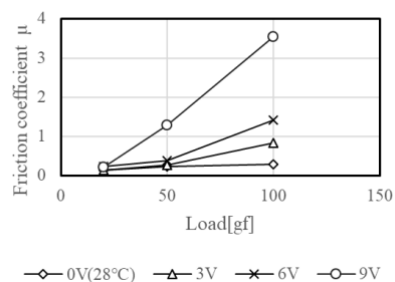


図1 Friction coefficient with temperature change

(2) DMAAm と LA のモノマー比を変化させた際の粘着力について、摩擦試験により調査した。試験片はモノマー比 DMAAm : LA = 1 : 1, 1 : 2, 2 : 1 の三種類で実施した。図2に示す結果から、LA の割合が高い程粘着力が増加し、それに伴い摩擦係数が高くなっていることが分かる。DMAAm と LA は共重合しており、LA は長い側鎖を持つことから、LA の割合が高い程側鎖の本数が増加し、分子間力が向上して粘着力が増したと考えられる。

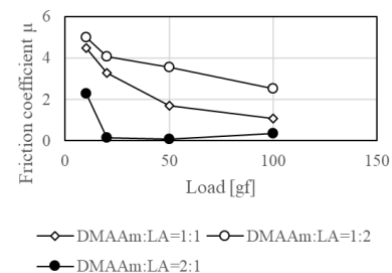


図2 Friction coefficient with monomer ratio change

(3) 粘着力の温度特性を調査するため、図3に示す装置を製作しペルチェ素子を用いて電圧を段階的に変化させることで温度を制御した。実験結果を図4に示す。縦軸が粘着力（ピール強度 N/10mm）、横軸が温度となる。結果を見ると 30~40 °C付近で急激に粘着力が増加し、それ

以降は変化がほとんど確認されず，最大ピール強度は約 2.3 N/10mm となった．一般的なセロハンテープのピール強度は約 3.9 N/10mm であるため，40 °C以上に加熱した SMG では，セロハンテープの約 60%の粘着力となった．

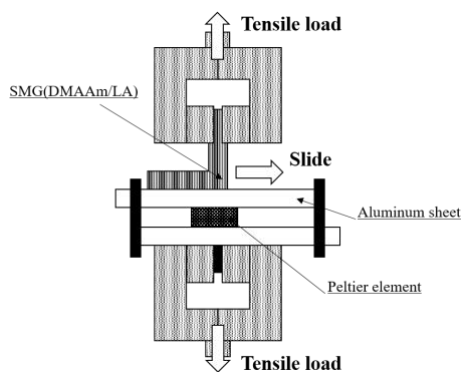


図3 Adhesion test with change temperature

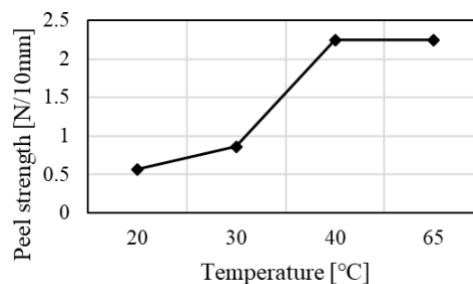


図4 Peel strength with temperature change

形状記憶ゲルの三次元造形

(4) 3D プリンターの基本設定は一般的な紫外線硬化材料のものに則るが，一層あたりの厚さ（以下，レイヤー）は 0.1, 0.05 mm，紫外線照射時間は 45, 30, 20, 15, 10 秒と変更して造形を行った．また，造形時間の短縮を目的に SMG 組成における TPO の添加量を 0.01, 0.05, 0.1, 0.3 mol と増加させ造形を行った．レイヤーは，数値を大きくすることで造形速度が速くなる半面，積層痕が現れるなど造形精度は低下する．これは，造形物や目的などによって選択できることが望ましい．紫外線照射時間はあくまで一層あたりであるため，5 秒の差であっても造形全体では数十分の差に繋がり得る．造形データは，1 辺が 15 mm の立方体と，それをくり抜いたような，柱部の太さ 3 mm の中空構造体とした．レイヤーを 0.05 mm，紫外線照射時間を 20 秒に設定し，TPO を 0.05, 0.1 mol 添加したとき造形に成功した．また，3 次元造形 SMG を精製水に 72 時間以上浸したところ，中空構造体が一部白濁した．TPO を 0.05 mol 添加した造形直後の造形物を図 5 に，膨潤後の造形物を図 6 に示す．

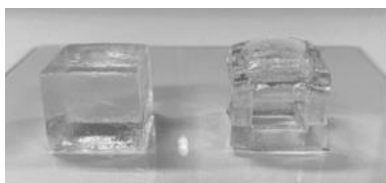


図5 TPO : 0.05 mol (Before swelling)



図6 TPO : 0.05 mol (After swelling)

(6) 図7に圧縮試験の SS カーブを示す．成形加工 SMG の圧縮応力と 2 次照射 SMG は 14 MPa 以上であり破断が見られなかったが，3 次元造形 SMG は 10 MPa ほどで破断した．また，ひずみ 2% までを直線近似しヤング率を算出したところ，いずれの試料も 0.03 ~0.04 MPa と同様の値を示した．SMG の応用先に人肌を模したロボット把持部が挙げられ，人肌の圧縮破断応力は 6.8~10 MPa，ヤング率は 0.03~0.14 MPa とされている(14)．そして，今回のゲルはいずれもこの要求を満たしていることが確認された．しかし，圧縮破断応力について 3 次元造形 SMG だけが低下したことから，内部の網目構造の構築が異なることが示唆された．

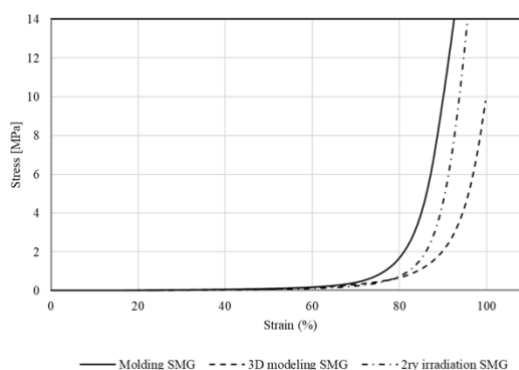


図7 Compression test results

(7) 測定結果を図8に示す。成形加工 SMG は網目サイズが 3~10 nm に渡って分布している。3次元造形 SMG には2つのピークが見られるが、ゲルの網目サイズは 1~200 nm の範囲と報告されているため⁽¹⁵⁾、120~130 nm 付近のピークを網目サイズ、3000 nm 付近のピークは内部に残留した TPO 及びその結晶を捉えたものと判断した。一方、2次照射 SMG は、20~30 nm 付近にピークが確認された。今回、どのゲルも架橋剤の量は同じであるため化学的な網目は同様であると考えられる。よって、網目構造の成長度や物理的な絡み合いに差異が生じていると考えられる。以上より、3次元造形 SMG は網目構造が十分に構築されていないことが明らかになったほか、内部に残留した TPO が応力集中を生じたことも原因となり圧縮破断応力が低下したと考えられる。また、成形加工 SMG と2次照射 SMG にも網目サイズの相違が見られるため、2次照射時間の増加を検討すべきである。

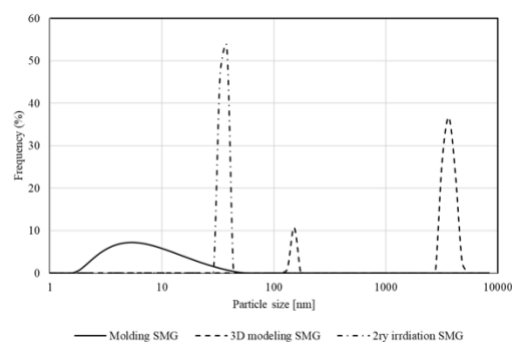


図7 Mesh size results

<引用文献>

- (1) Cabinet Office, Society 5.0, Science, Technology and Innovations, (2018), https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/, (accessed 2022-1-12)
- (2) Y. Osada, A. Matsuda, Shape memory in hydrogels, Nature, Vol. 376, No. 6537, (1995), pp. 219
- (3) Brief knowledge of burns, JSBI, Vol. 66, (2011), <http://www.jsbi-burn.org/ippan/chishiki/preventive.html>, (accessed 2022-1-12)
- (4) R. Sato, N. Domon, Development of large UV Cure Box,(2019)
- (5) JISC, Testing methods of pressure-sensitive adhesive tapes and sheets, JIS Z 0237, (2009)
- (6) Z. Miyagi, A Method for Evaluating Adhesion and Adhesion Properties and Its Reliability: A Case Study of the Development of a Peel Test Method, J. Jpn. Soc. Colour Mater., 88 [9], 321-325, (2015)
- (7) Y. Saito, Fundamentals of Thermal Analysis for Materials Science, (1994), pp. 105-172
- (8) Ping Yuan Hsu, et al., Direct evidence of phospholipids in gecko footprints and spatula-substrate contact interface detected using surface-sensitive spectroscopy, J. R. Soc. Interface (2012) 9, pp. 657-664

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 本間飛翔, 宍戸道明, 和田真人
2. 発表標題 形状記憶ゲルの粘着力を用いた把持装置の開発
3. 学会等名 設計工学会東北支部45周年記念研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤出, 高橋武彦, 飯塚博, 宍戸道明, 和田真人
2. 発表標題 高強度ゲルによるRHSカーボンとの複合材料化と摩擦・摩耗特性
3. 学会等名 設計工学会東北支部45周年記念研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間 飛翔（鶴岡高専）, 奥田 司（千葉大）, 高山 広翔（新潟大）, 和田 真人（鶴岡高専）
2. 発表標題 ソフトマテリアルを用いたロボットハンド把持部の検討
3. 学会等名 日本機械学会 東北学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤 浩輔（鶴岡高専）, 佐藤 出, 和田 真人, 古川 英光（山形大）
2. 発表標題 LCD方式による光造形3Dプリンタを用いたハイドロゲル3次元造形技術の検討
3. 学会等名 日本機械学会 東北学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 出（鶴岡高専），石井 克幸（新 潟大），神田 伸也（東京農工大），高橋 武彦（三 和油脂株（株）），飯塚 博（山形大） 宍戸 道 明（鶴岡高専），和田 真人
2. 発表標題 高強度ゲルを用いた初殻焼成多孔質炭素材料 の応用
3. 学会等名 日本機械学会 東北学生会 第 51 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 *K. AKIYAMA 1), K. SAITO1), and M. WADA1)
2. 発表標題 Investigation of 3D Modeling Technology and Improvement of Accuracy of ICN Gel
3. 学会等名 第1回高専研究国際シンポジウム（KRIS 2023）（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------