

NIPAM ゲルのアクチュエータ化に向けた 繊維強化に関する研究

Research on fiber reinforcement for actuators of NIPAM gel

○高橋匠*, 戸森央貴**

○Takumi Takahashi*, Hiroki Tomori**

*山形大学, **山形大学大学院

*Yamagata University, **Yamagata University Graduate School

キーワード: N-イソプロピルアクリルアミド (N-isopropylacrylamide), 繊維強化 (Fiber reinforced), 複合材料 (Composite material), アラミド繊維 (Aramid fiber), 温度応答性 (Temperature sensitive)

連絡先: 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 戸森研究室
高橋匠, Tel.: (0238)26-3217 E-mail: tcw25537@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

従来は、工場などで稼働しているギアードモータや油圧アクチュエータのような高剛性なアクチュエータが主流であり、速度や精度が求められてきた。これらは、人との接触が発生しないように区切られた空間で使用されている。それに対して、現在はロボットと人間が近い空間で使用される機会が増加している。このように人間に近い空間で使用されるロボットは従来のアクチュエータと比較し、より高い安全性が必須である。従来のような金属で構成されたロボットでは、物体と衝突した場合、重大な事故につながる危険性が高い。しかし、柔軟材料には本質的な安全性や構造的な柔軟性があると言えることから、物体とロボットの双方の衝撃を和らげ危険性を減らすことが出来る¹⁾。このような背景からソフトアクチュエータが注目されている。ソフトアクチュエータには様々な種類がある。

例として、空気圧ゴム人工筋肉、ゲルアクチュエータ、形状記憶合金などである²⁾³⁾⁴⁾。その中でも体積の変化量が大きいことから温度応答性ゲルである NIPAM ゲルに着目した。このゲルは、反応速度は速くはないが体積の変化量が大きいことからアクチュエータに応用できると考えた⁵⁾。今までも、NIPAM ゲルのアクチュエータ化についての研究はあったが、材料の脆さや反応速度の遅さから研究例が減った。アクチュエータとして利用するためには機構などとの接続が必要となる。そのため、脆さは克服しなければならない課題である。

材料の脆さを改善する手法としては、ミクロなレベルでの強化については既に、ダブルネットワークゲルやナノコンポジットゲルが報告されている⁶⁾⁷⁾。また、マクロなレベルでの強化については繊維強化ゲルが報告されている⁸⁾。しかし、機能性ゲルの繊維強化は報告されていない。そこで、NIPAM ゲルに繊維強化手法を

適用してゲルの強化を図る。

本稿では、NIPAM ゲルの組成比を決定するために架橋剤の添加量を変化させたゲルを作製し、温度応答性と収縮率を調査する。その後、決定した組成比をもとに繊維強化ゲルを試作し、圧縮試験による機械的強度の向上について報告する。

2. NIPAM ゲル

2.1 概要

NIPAM ゲルは、機能性高分子ゲルの中でも外界の温度変化に反応し駆動する温度応答性の高分子ゲルである。約 32℃ 付近において体積相転移現象が起こり、可逆的に膨潤収縮の運動を行う。NIPAM の側鎖にはアミド基とイソプロピル基の 2 種類があり、それぞれ親水性と疎水性である。相転移温度以下ではアミド基に水分子が結合しており、膨潤している。しかし、相転移温度以上では水素結合が切れイソプロピル基が凝集する。これにより水分子が網目構造内から絞り出されるように排出される。この排出された水の分だけゲルが収縮する。

このゲルは、1990 年代～2000 年代初期において、上記のような体積変化が起こることからアクチュエータへの応用研究が行なわれていた。しかし、ゲル材料の機械的強度の低さや応答速度の遅さから次第に研究例が減少した。今日では、ドラッグデリバリーシステムやマイクロバルブでの応用研究が進められているが機械に組み込むことやロボットを構成するアクチュエータとしての研究は少ない⁹⁾¹⁰⁾。

2.2 試薬

本研究では、NIPAM ゲルを作製するため、モノマーとして N-イソプロピルアクリルアミド (N-isopropylacrylamid, NIPAM) を用いた。また、架橋剤に N,N'-メチレンビス (アクリルアミド) (N,N'-Methylenebis(acrylamide), BIS), 重

合開始剤にペルオキシ二硫酸アンモニウム (Ammonium persulfate, APS), 重合促進剤に N,N,N',N'-テトラメチルエチレンジアミン (N,N,N',N'-Tetramethylethylenediamine, TEMED) を用いた。

薬品はすべて和光純薬株式会社製であり、未精製で用いた。

2.3 作製方法

まず、APS 以外の試薬を表 1 に示した組成比で混合し、マグネチックスターラーで溶解するまで攪拌する。その後、冷蔵庫にて約 5℃ まで冷却する。冷却することで APS を加えた際の重合を遅らせ、型に入れる前にゲル化することを防ぐことができる。冷却後、APS を加え溶解するまで攪拌する。その際、攪拌中に溶液の温度が上昇しないように氷でビーカーの周囲を覆い冷却し続ける。その後、溶液をシリコン製の型に流し込み、冷蔵庫内 (5℃) に 24 時間静置することで反応させゲルを作製する。作製したゲルは、純水中に 1 週間浸漬し、24 時間ごとに新しい純水と取り替えることで未反応物質を除去するとともにゲルを膨潤させる。図 1 に作製したゲルを示す。

Table 1 Synthesis conditions of NIPAM gels

Monomer	NIPAM	4.69wt%
Cross-linker	MBAA	0.94wt%
Initiator	APS	0.47wt%
Accelerator	TEMED	0.11wt%
Solvent	Ultra pure water	93.8wt%



Fig. 1 NIPAM gel

3. 温度応答性実験

3.1 サンプルの作製

試薬の組成によってゲルの収縮特性がどのように変化するかを調査するため、今回は架橋剤の添加量を変化させ調査を行った。

本実験では、架橋剤の添加量を3種類(0.47wt%, 0.94wt%, 1.88wt%)で作製し、架橋剤が少ない方からSample1, Sample2, Sample3とした。作製したサンプル形状は、5mm × 5mm × 50mmである。また、Sample1は3個、Sample2は4個、Sample3は2個のサンプルを用いて測定を行う。全てのサンプルにおいて4本ずつ作製したが、膨潤の過程で破壊してしまったためサンプル数が異なっている。

3.2 温度応答性の測定

以下に実験手順を示し、図2に実験装置を示す。まず、シャーレに水を入れ試験片を設置し、室温(23℃)でのサンプルの状態を撮影する。水温を測定しながらヒーターで加熱する。加熱中、30℃~60℃でのサンプルの状態を10℃ごとに撮影する。得られた画像に対して、画像解析アプリを用いて試験片の長さを測定する。

長さの測定ではClick Measureを使用した。撮影した画像をもとに、ゲルの長さと定規1cmの長さをピクセル数で測定する。それらの数値を比較してゲルの長さを算出した。

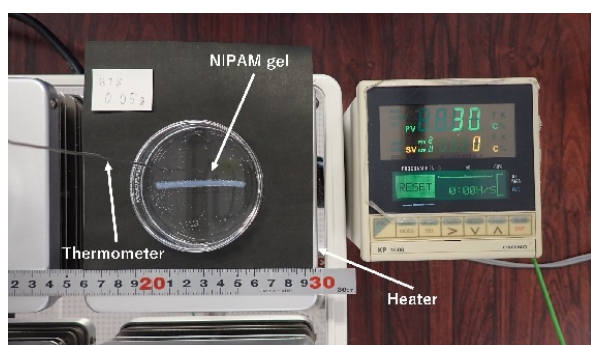


Fig. 2 Environment of Experimental

3.3 実験結果

図3に収縮率のグラフを示す。各サンプルにおいて測定結果のばらつきが小さかったため、平均値を求めグラフにした。グラフより、全サンプルで水温の変動による温度応答性を示すことが確認できた。また、架橋剤が0.94wt%のゲルが最も収縮率が高く、次いで1.88wt%, 0.47wt%の順番となった。

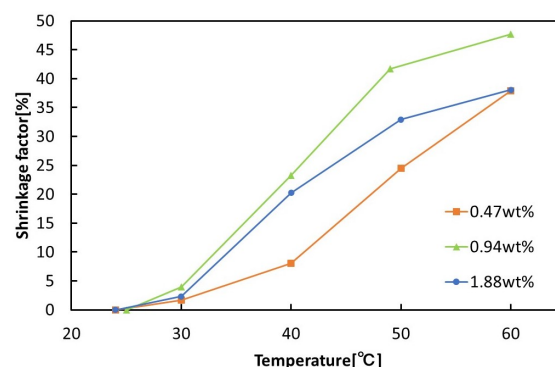


Fig. 3 Result of temperature response experiment

3.4 考察

本実験では架橋剤の添加量と収縮率には相関関係が見られなかった。しかし、一般的なゲルでは架橋剤の量と収縮率には相関がある。相関がみられなかった理由として次のことが考えられる。

まず、ゲル化前の溶液が十分に攪拌されていなかったことである。攪拌が不十分な場合、反応が進まず十分に架橋されないことがある。これにより、架橋剤の添加量が異なる場合でも、実際に架橋されている割合が同程度になることもある。そのため、架橋剤の量と収縮率に相関が見られなかったことが考えられる。

次に、測定誤差による原因が考えられる。今回は写真を撮影し、長さを測定する方法を用いた。このため平面の長さしか測定していない。しかし、実際には横方向の収縮に加えて、捩じれなどを伴い立体的に収縮したサンプルもあっ

た。そのため、実際の長さで測定した長さに差が生じてしまった。このことから、正確な長さを測定できなかったことが考えられる。

これらの理由から、一般的なゲルの傾向とは異なる結果が得られたと考える。ゲル材料は不均一なため平面的に長さを測定するだけでは十分なデータを得ることができないことがわかった。よって、今後の研究において収縮率を測定する際には、長さの測定方法を改めて検討する必要がある。長さではなく体積を測定することにより収縮率を算出することで正確な結果を得られると考える。

また、この結果からゲルの組成のうち、架橋剤を0.94wt%添加すると決定する。

4. 繊維強化ゲル

4.1 概要

材料の強化手法として複合材料が挙げられる。これは、複数の材料を組み合わせることで性能の向上を行うものである。単一のゲルでは機械的強度が低いため、それを補うために機械的強度が優れている繊維を構造内に取り込むことで材料の強化を図る。繊維強化ゲルは高分子鎖にかかる応力を繊維に分散させることで、従来より引張や圧縮への耐久性が向上すると期待している。また、亀裂を進展させずに穴あけ加工を行ったり、機構との接続も容易になると考える。

また、繊維の入れ方による異方性の獲得も期待している。先述したが、本研究では機能性ゲルを使用しており体積変化が起こる。そのため、繊維を入れる方向を工夫することによって異方性を持たせることができると考えている。

4.2 繊維強化ゲルの作製方法

今回、高強度で軽量であるアラミド繊維を用いた。2.3節で作製したゲル化前の溶液に、粉砕機で粉砕した繊維を浸す。次に、繊維の中に含

まれた空気を抜き、重合を阻害しないようにする。その後、溶液が染み込んだ繊維をシリコン製の型に移し、ピンセットで広げる。これを冷蔵庫内(5℃)に24時間静置することで反応させゲルを作製する。以降は2.3節と同様の手順で作製する。繊維は溶媒10mlに対して0.10g入れた。シリコン製の型(30mm×30mm×5mm、板状)で作製したゲルを図4に示す。圧縮試験のためにこれをレーザーカッターで切り出し、直径10mm高さ5mmの円柱状にした。これを図5に示す。

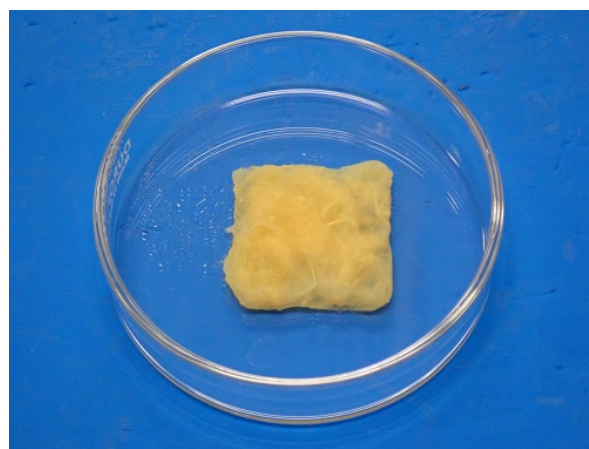


Fig. 4 Fiber reinforced gel

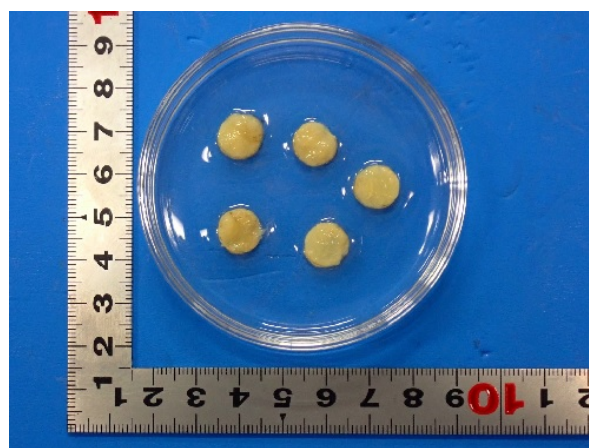


Fig. 5 Sample of compression test

4.3 圧縮試験

圧縮試験は、卓上型引張圧縮試験機(エー・アンド・デイ MCT-2150)を用いて行った。

圧縮試験は圧縮荷重の上限値を 50N に設定し、その範囲内で荷重のかかり方にどのような変化があるかを観察する。クロスヘッド速度は 10[mm/min] で一定とする。また、今回は 4 つの試験片を用意し圧縮試験を行う。試験環境は図 6 に示す。

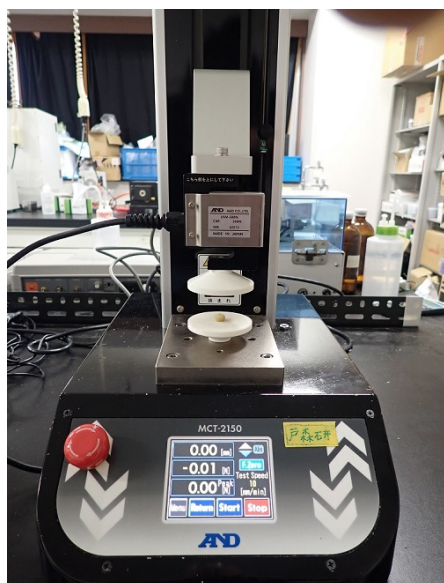


Fig. 6 Environment of compression test

4.4 結果・考察

圧縮試験の結果を図 7 に示す。Sample1～Sample4 は繊維強化を行ったゲルで、Normal が繊維強化を行っていないゲルである。グラフより、Sample1 のみ明確な破断点がみられた。それ以外のゲルでは明確な破断点が読み取れないため、試験中の目視により得た情報を目安として考える。

グラフから繊維強化を行っていないゲルでは 6.9N 付近で破断している。それに対し、繊維強化を行った 4 つのサンプル全てにおいて最大荷重が上回った。サンプルによりばらつきがあるが、最大で 17N 付近まで最大荷重が向上するという結果が得られた。

ゲルは、高分子鎖に力がかかり、耐えきれなくなることで破壊が起こる。繊維を入れることで、素のゲルでは高分子鎖にかかっていた荷重

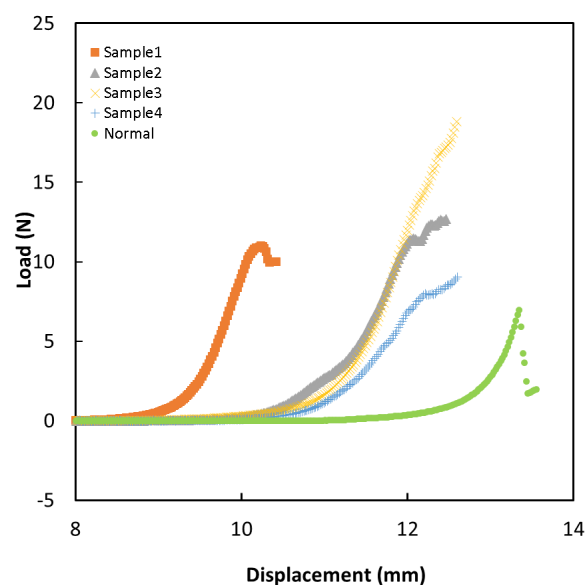


Fig. 7 Result of compression test

を繊維にも分散することで耐荷重が向上したと考えられる。

今回、韌性の高いアラミド繊維で繊維強化を行ったが、母材であるゲルとの接着性は高くないと考えられる。破断した試験片を見ると、繊維がゲルから剥離した様子であった。そのため、ゲルとの接着性を増加させる表面処理や他の繊維を検討することでさらに機械的強度の向上が期待できると考える。

5. 結言

本稿では、架橋剤の添加量による収縮率への影響を調査し組成比を決定した。その後、NIPAM ゲルの繊維強化手法について実験を通してその有効性を検証した。実験の結果、NIPAM ゲルに粉碎したアラミド繊維を加えることにより、最大荷重が増加することが示された。よって、繊維強化を行うことができるといえる。しかし、温度応答性への影響は未検証である。そのため、今後の課題として、繊維を加えることによる体積変化への影響について検証することが挙げられる。また、圧縮試験のみではなく引張試験も行い強度を測定する必要がある。さらに、ゲル

と繊維との接着性についても検討していく。

参考文献

- 1) 岡崎安直, 山本正樹, 小松真弓, 津坂優子, 足達勇治: 空気圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.3, pp.302-310, 2010
- 2) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘: 空気圧ゴム人工筋肉を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.5, pp.640-646, 2006
- 3) 山野美咲, 小川尚希, 橋本稔, 高崎緑, 平井利博: 収縮型 VC ゲルアクチュエータの構造と駆動特性, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.7, pp.718-724, 2009
- 4) 石川敏也, 中田毅: 人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ (運動単位の特性), 日本機械学会論文集, 74 巻, 738 号, pp.125-130, 2008
- 5) 伊田翔平, 富永佳子, 谷本智史, 廣川能嗣: 親水性架橋剤を用いて得られるポリ (N-イソプロピルアクリルアミド) ゲルの感温特性, 高分子論文集, Vol.74, No.3, pp.195-198, 2017
- 6) 中島祐, 田中良巳, 古川英光, 黒川孝幸, グン・チェンピン: 超高強度 Double Network ゲルの創製とその高強度化メカニズム, 高分子論文集, Vol.65, No.12, pp.707-715, 2008
- 7) 原口和敏: ナノコンポジットゲル-その本質と多様な機能-, 高分子論文集, Vol.65, No.10, pp.619-633, 2008
- 8) 高田剛, 日出間るり, 古川英光: 繊維強化による高強度ゲルの開発, 日本機械学会論文集, 78 巻, 791 号, pp.193-197, 2012
- 9) You Han Bae, Teruo Okano, Sung Wan Kim: "On-Off" Thermocontrol of Solute Transport. II . Solute Release from Thermosensitive Hydrogels, Pharmaceutical Research, Vol.8, No.5, pp.624-628, 1991
- 10) 遊佐真一, 立岩英行, 矢澤哲夫: 有機-無機ハイブリッド型感温性バルブ, 高分子論文集, Vol.74, No.3, pp.182-187, 2017