

# 論文内容要旨 (和文)

平成27年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 山田 直也



論 文 題 目 高分子ゲルの摩擦表面の顕微鏡観察とソフトロボットへの応用

高分子ゲルは、高分子鎖が化学的、物理的に架橋した3次元の網目構造に溶媒を保持することができる材料である。その構造や物質保持性能、低摩擦性などゲル特有の性質に生体材料との類似性が見られることから生体模倣材料としての利用が期待されている。近年に至るまで、特徴的な化学構造や架橋点の導入による刺激応答性、自己修復性の付与や機械強度の向上がなされてきた。一方で付加製造 (Additive Manufacturing, AM) と言われる材料を積層造形する手法を用いて自由形状のゲルを作製することが可能となった。また、3次元自由造形の開発によってゲルデバイスの開発が加速されると考えられる。一部の高分子ゲルが低い摩擦係数を示すことはこれまで明らかにされており、系統的な研究がなされてきたが、摩擦界面の観察を試みた例は少ない。本論文ではボールオンディスク型の摩擦測定器と光学顕微鏡を組み合わせることによって、ゲル-ガラス間の摩擦測定と摩擦界面観察を可能にした。また、低摩擦性、柔軟性をもつ高分子ゲルを用いた輸送システム、生体模倣ロボットを開発する。

本論文は、下記の5章より構成されており、要旨は以下の通りである。

第1章では、緒言として高分子ゲルについての基礎的な紹介と、ゲルの摩擦に関する研究、摩擦表面の観察に関する研究、高分子ゲルの応用例を解説するとともに、本研究に至った背景と目的を述べた。

第2章では、高強度低摩擦を持つ高分子ゲルについて、その高強度メカニズムや力学物性を紹介するとともにゲルの作製方法について記述した。また高強度ゲルの3次元自由造形の方法を解説し、その造形実験について記述した。

第3章では、ゲルの摩擦表面の観察と摩擦測定を行う装置の開発を行った。ボールオンディスク型の摩擦測定装置を倒立顕微鏡のステージ上に配置して、摩擦面の観察と摩擦測定を同時的に行うことを可能にした。測定子ホルダに組み込まれた光源から出る光が、ガラス球 (測定子)、ハイドロゲル、透明な移動ステージを透過して顕微鏡カメラで摩擦面を観察することができる。ゲル-ガラス球の観察においてゲル表面に水が豊富に存在しない場合、ガラス球との摩擦接触面が確認された。このときの摩擦測定の結果から、最大の静止摩擦係数を示した時にゲルが大きく変形していることが示唆された。また、測定子をゲルとしてガラスステージ上で摩擦させることで、ゲルが大変形を起こしながら摩擦する様子が観察された。

第4章では、高強度ゲルを用いて柔軟なソフトロボットの開発を行った。ハイドロゲルは3次元網目構造の中に水を含む柔軟性のある材料であり、生体軟組織と類似する特性をもつ。そのような特性を利用して生物のもつ柔軟性を模倣した人工クラゲの開発、高強度ゲルの低摩擦性を利用した液体輸送ポンプの開発を行い、その評価方法について検討した。

第5章では、本論文を総括し、今後の検討課題について述べた。

# 論文内容要旨 (英文)

平成27年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 山田 直也



論文題目 The development of microscopic observation system for hydrogel friction interface and the hydrogel soft robot application

The inborn characteristic of polymer gels, holding solvent in the three dimensional polymer network, bestow beneficial functions such as low frictional property and stimulation responsibilities on gels. The development of many types high functionalized gels and the three dimensional free-form method show promise as one of the ideal materials for biomimetic soft robot. Polymer gels having high strength and low frictional surface are expected as a living body-like joint. To date, the frictional properties of hydrogels have been studied experimentally and their unique nature is being uncovered. Our group have focused on ball-on-disk method to investigate the friction behavior. However, there were few researches about the direct observation of frictional interface between a polymer gel and an opposite material. In addition, despite gels have high functions, it is not easy to find the soft robotics application of gels. Inhere, we designed the microscopic observation system for the friction of soft materials. A specially arranged measuring system was combined with inverted microscope to provide the observation and the measurement simultaneously. Both of a glass ball and a moving glass stage were employed and the microscope camera was thereby able to take the moving picture of frictional interface imaged by the refractive index differences between a soda-lime glass ball, transparent hydrogels and air. The results indicated that the local deformation by adhesion cause the frictional coefficient increase. Apart from this, the concept of soft robot, jelly fish like robot and liquid transport pump were proposed for the application use.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 元年 7月 30日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 古川 英光

副査 伊藤 浩志

副査 野々村 美宗

副査 堀田 純一

副査 村澤 剛



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名 機械システム工学専攻	氏名 山田 直也
論文題目	高分子ゲルの摩擦表面の顕微鏡観察とソフトロボットへの応用	
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日 令和 元年 7月 23日～ 令和 元年 7月 30日
論文公聴会	令和 元年 7月 30日	場 所 工学部 11号館 503教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日 令和 元年 7月 30日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

高分子ゲルは低い摩擦係数 ( $\sim 10^{-4}$ ) を示す場合があり、機械要素への応用が期待されている。また、その柔軟性からソフトロボットへの応用研究が進められている。本論文では機械分野で用いられるボールオンディスク型の摩擦測定装置と光学顕微鏡によるイメージング装置を組み合わせたシステムを新たに開発し、ゲル-ガラス間の摩擦測定と摩擦界面観察とを同時に行うオリジナルの観測方法について研究した。さらにゲルのソフトロボットへの応用を検討した。

第1章では、高強度ゲルの合成、ゲルの低摩擦化技術、ゲルの3Dプリンティング、ゲルに関するソフトロボットの研究動向などから、本研究に至った学術的背景と目的が述べられている。第2章では、高強度低摩ゲルの合成法、ゲルの3Dプリンティングの方法、また本研究で用いられている実験方法について述べられている。第3章では、ボールオンディスク型の摩擦測定装置を倒立型光学顕微鏡のステージ上に配置して、摩擦測定と摩擦面の光学観察を同時に行う装置を初めて開発した。測定子ホルダに組み込まれた光源から出る光が、測定子とヒドロゲル、さらに透明な移動ステージを透過し、それをカメラで捉えることで、摩擦面を観察できる。これにより摩擦界面で滑りが起き始める現象を観察し、ゲル-ガラス球の摩擦においてゲル表面に水が豊富に存在しない場合の摩擦試験や、測定子をゲルとしてガラスステージ上で摩擦させる実験において変形を起こしながら摩擦する様子が直接観察された。この実験結果からゲルの摩擦係数にはゲルの変形が影響していることが示された。第4章では、高強度ゲルの機械要素・ソフトロボットへの新たな応用例として、低摩擦ゲルリングの開発と、クラゲの柔軟性と生物が付着しない表面をゲルで模倣したクラゲ型ソフトロボットの開発を行った。第5章では、本論文を総括し、今後の検討課題について述べて結論とした。

本論文に関係する第一著者論文は国際論文誌に1報は掲載済み、1報はアクセプトされている。また、国際学会では5回発表し、そのうち1回で優秀ポスター賞に選ばれている。以上、研究の新規性、学位論文の内容や体裁、内容公開状況等について本学の審査基準から総合的に判断した結果、学位論文として十分に認められるものであり、学位論文審査を合格と判断した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文の内容を要約した口頭発表および質疑応答によって実施した。研究テーマおよび研究方法は、当該分野の博士論文として適切なものであり、学術的背景、実験結果、結論は関連分野の博士論文として十分なレベルに達していると判断された。口頭発表および質疑応答では、専門知識、スキル、考察力を有していると判断された。以上から、課程博士として十分な資質が認められ、最終試験を合格と判定した。