

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32619

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20985

研究課題名(和文)磁性エラストマと液体金属ネットワークによる3次元完全柔軟グリッドアクチュエータ

研究課題名(英文)3D Flexible Grid Actuator using Magnetic Elastomers and Liquid Metal

研究代表者

安孫子 聡子 (Abiko, Satoko)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：40560660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁性エラストマによるグリッド状の剛性提示を行うアクチュエータの開発を目的とする。本研究では、乳がんや前立腺がん等の触診シミュレータへのへの応用を目指し、エラストマの力学的特性の解析とその応用を試みた。磁性エラストマの剛性を決定する母材の選定を行い、複数の配合率のエラストマを作成し、磁場印加時の剛性変化を計測、解析した。その結果、磁性エラストマによる大きな剛性変化を提示することが可能であった。また、自己修復永久磁石エラストマを作成し、機械的修復性能の評価を行った。永久磁石の特徴を活用することで着磁後のエラストマのほうに大幅に修復性能の向上することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、磁性エラストマを用いた触診および手術シミュレータへの応用を試みた研究である。ここでは、ダイナミックレンジの広い剛性変化の提示が可能なエラストマを作成できた。また、機械的修復能力を有する自己修復機能を有する永久磁石エラストマを作成することができた。これらは将来的に上記シミュレータへと発展していき、若手医師の訓練環境の補助を目指す社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop an actuator that provides grid-like stiffness using magnetic elastomers. The study focuses on applying this actuator in palpation simulators for conditions like breast cancer and prostate cancer, and attempts to analyze the mechanical properties of elastomers and explore their applications. The selection of the base material that determines the stiffness of magnetic elastomers was carried out, and elastomers with various composition ratios were created to measure and analyze the changes in stiffness under the influence of a magnetic field. The results showed that significant stiffness changes can be achieved using magnetic elastomers. Furthermore, self-healing permanent magnet elastomers were created, and their mechanical repair performance was evaluated. It was demonstrated that the elastomers magnetized after cutting exhibited a significant improvement in repair performance by leveraging the characteristics of permanent magnets.

研究分野：ロボット工学

キーワード：磁性エラストマ 自己修復永久磁石エラストマ

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初より、ソフトロボティクスの注目度が高まる中、機能材料と機構・機械・電気の融合による新たな技術革新が期待されている。機能材料の一つに、磁場変化によって機能する磁性エラストマやMR (Magnetorheological) 流体がある。その駆動源は一般に永久磁石または金属コイルを要するため、柔軟性を維持しつつ駆動するシステムとしては、2次元配列アクチュエータアレイの実現にとどまっている。本研究では、3次元の局所剛性変化を可能とする柔軟アクチュエータを創製することに挑戦する。

2. 研究の目的

本研究では、磁性エラストマによるグリッド状の剛性提示を行うアクチュエータの開発を目的とする。磁性エラストマは、シリコン材料に微細な強磁性粒子を混ぜた機能性材料の一つであり、印加磁場により剛性などの力学的特性が変化する。本研究では、乳がんや前立腺がん等の触診シミュレータへの応用を目指し、エラストマの力学的特性の解析とその応用を試みる。また、自己修復可能な永久磁石エラストマの切断手術シミュレータへの応用も検討する。

3. 研究の方法

はじめに、乳がんや前立腺の正常組織と病変部の剛性の違いを調査し、それに対応するダイナミックレンジの広い磁性エラストマの生成を行う。ここでは、母材の選定、歩留まりの高い生成方法を検討する。その後、磁場印加環境下における圧縮試験を実施し、剛性変化を評価する。また、自己修復永久磁石エラストマは、ネオジム粉末を混合したエラストマを磁化することで実現する。同エラストマの複数回の切断実験を行うことで、従来の自己修復エラストマとの修復率の違いを検証する。上記2種のエラストマの触診シミュレータおよび生体組織切断シミュレータへの応用を目指す。液体金属を駆動材料へと利用することを試みたが、駆動に足る出力を獲得できなかった。今後利用方法を再考し、変形予測センサへの展開を目指す。

4. 研究成果

(1) ダイナミックレンジの広い剛性提示可能な磁性エラストマの生成と評価

まず、エラストマを生成するに辺り、その基準となる母材の選定は、無磁場時の磁性ソフトマテリアルの粘弾性に影響を及ぼすため、非常に重要な要素の一つである。そのため、母材には、比較的生体組織に近い弾性を有することが求められる。表1、2に乳房の正常組織および病変部の剛性データおよび前立腺の正常組織および病変部の剛性データを示す。表1に示すように、乳房組織では病変部が正常組織に対して約25倍の硬さを有する。また、表2に示すように、前立腺では病変部が正常組織に対して約2.5倍の硬さを有する。上記の変化率を指標とし、磁性エラストマの母材の選定を行った。複数の母材の選定を行った中で、図1に示す3種類を選定した。

表1 乳房組織のヤング率[1]

| Young's modulus at 20% compressive strain [MPa] | |
|---|-------|
| Normal fat | 0.02 |
| Normal glandula | 0.057 |
| Fibrous tissue | 0.232 |
| Ductal carcinoma in situ | 0.301 |
| Invasive ductal carcinoma | 0.490 |

表2 前立腺組織のヤング率[2]

| Young's modulus [MPa] | |
|-----------------------|--------|
| Normal tissue | 0.0159 |
| Cancer tissue | 0.0404 |

本研究では、これらの値から一番柔らかい組織である前立腺の正常組織のヤング率 0.0159 MPa を基準に、それを下回るヤング率 0.0081 MPa を有する信越シリコン社製のシリコンゲルを上記3種より選定した。

その後、カルボニル鉄を混合し、硬化させることでエラストマの生成を行う。磁性粒子には、均一な粒度分布により、高度な混合物特性が得られる粒子径 5 μm のカルボニル鉄を用

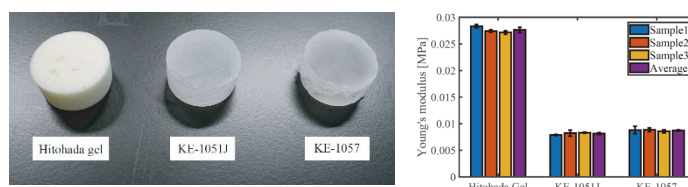


図1 母材の選定とヤング率

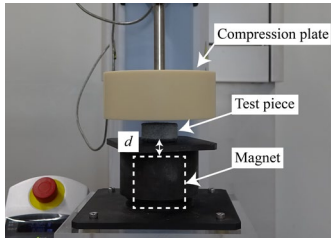


図 2 圧縮試験装置

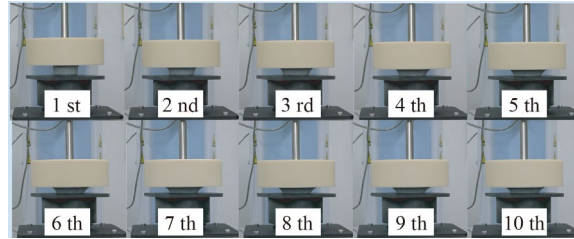


図 3 圧縮試験の様子 (33 vol.%)

いる。鉄粉配合率が高くなるほど磁氣的結合力が強まる一方、無磁場時の弾性率が大きくなるため、結果的に変化幅を最大にする鉄粉配合率の最適値が存在すると考えられる。本研究では、鉄粉配合率を 16 vol.%, 23vol.%, 33vol.% の 3 種類の配合率を用いたエラストマの生成を行った。

作製した磁性ソフトマテリアルのヤング率を調べるため、図2 に示す実験装置を用いて圧縮試験を行った。同図に示すように、試験片下側に永久磁石（マグファイン社製 ND0950, 表面磁束密度 534.4 mT）を設置することで、試験片に磁場を印加する。本研究では、印加磁場の条件を無磁場、試験片と永久磁石の距離 10mm, 15 mm, 20 mm の 4 条件として、圧縮を行った。このとき、磁石間距離に対する試験片下部の上方向への磁場は、それぞれ約 290 mT, 230 mT, 170 mT であった。試験片が 25% のひずみに達するまで 10 mm/min の速度で圧縮し、25% のひずみに達した後、直ちに 10 mm/min の速度で力を取り除き、力とストロークの関係を計測する。

圧縮試験の様子を図3に示す。同図に示すように、磁場印加時での圧縮では、磁気誘導によって磁性ソフトマテリアルの変形が保持される。これは、初期ひずみとして、磁性エラストマのヤング率に大きく影響する。そこで、本研究では初期ひずみとヤング率の関係を計測するため、連続的に 10 回の圧縮を行うこととした。この際、磁気誘導による変形が保持された位置を再度圧縮開始位置とし、ひずみ 25% 位置まで圧縮を行う。なお、圧縮面積の変化は考慮せず、公称面積は一定とした。

ここでは、有意な結果が得られた鉄粉配合率 33 vol.% の場合について述べる。図4に圧縮回数による初期ひずみの変化を示す。同図に示すように、磁気誘導により、圧縮回数を重ねるごとに初期ひずみが増加していく。この初期ひずみの大きさは磁場の強さに依存し、初期ひずみの増加に伴い、力も増加する。計測した力とストロークから、表1と同様にひずみ 20% 時のヤング率を導出した。図5にひずみ 20% 時のヤング率を示す。これらを、目

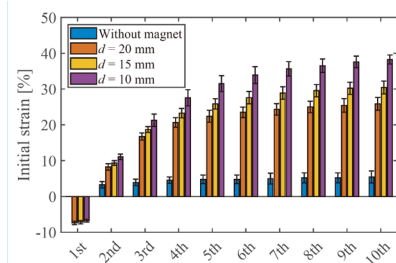


図 4 圧縮回数ごとの初期ひずみ

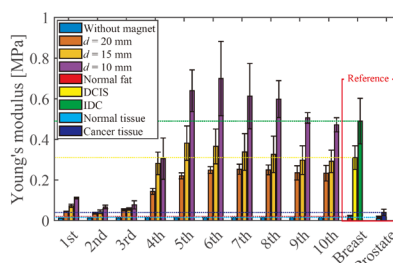


図 5 ヤング率

標とする乳房、前立腺組織の病変部、正常組織と比較すると、作製した磁性ソフトマテリアルの無磁場時のヤング率は、平均 0.015 MPa となり、表1, 2 の一番柔らかい組織である前立腺の正常組織のヤング率を下回っている。また、どの圧縮回数においても前立腺の癌組織のヤング率 0.404 MPa を上回っており、前立腺組織の病変部、正常組織の再現可能性は高いといえる。一方、乳房組織においては、正常組織のヤング率は下回っているものの、病変部においては、圧縮回数によって異なる結果となり、再現可能性は初期ひずみの与え方に依存する。圧縮回数によってヤング率にバラつきが出る原因としては、初期ひずみによる材料の非線形性に起因すると考えられる。

以上の実験結果から、作製した磁性ソフトマテリアルでは、病変部と正常組織の再現可能性はあるものの、触診ごとに磁気誘導による変形の保持が生じ、触診回数によって提示するヤング率にバラつきが生じることが分かった。したがって、触診シミュレータ実現に向けて、定常的なヤング率の提示を可能にするシステムの実装が必要不可欠となってくる。現段階では、一定のストロークまで圧縮すると、その後の初期ひずみは収束していくことを利用し、触診前に一定のストローク値まで圧縮してから訓練を行うことなどを検討している。

(2) 自己修復永久磁石エラストマの生成と評価

自己修復材料はロボットの損傷を自ら修復する手段として、ロボットの皮膚や血管などへの応用が期待されている。自己修復材料の一つとして、自己修復エラストマ(Self-Healing

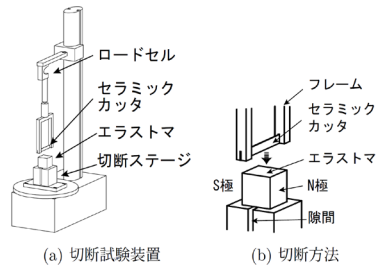


図 6 切断力測定実験

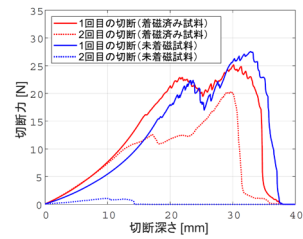


図 7 切断力と切断深さの関係

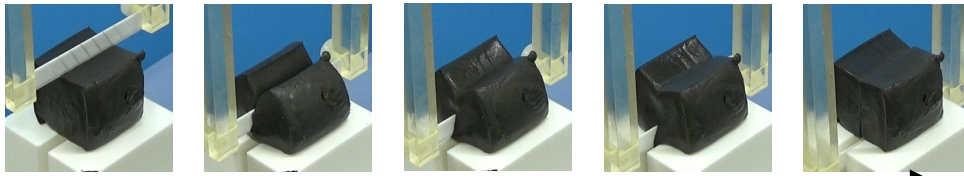


図 8 切断時の様子

表 3 修復性能の比較

| | 1回目 [N] | 2回目 [N] | 修復率 [%] |
|--------|---------|---------|---------|
| 着磁済み試料 | 25.2 | 20.3 | 80.6 |
| 未着磁試料 | 27.6 | 1.1 | 3.9 |

Elastomer)と呼ばれる、切断等の物理的作用に対して化学的な反応により修復する材料がある。この材料は、液体を利用せず、ドライな環境で利用できる利点がある。

しかし、修復には切断面を手で押しつけてやる必要があり、ロボットの皮膚等に应用するには問題があった。そこで、本研究では、この自己修復エラストマに磁粉を加え着磁することで、自ら傷口を押しつけるように引力が働き自ら修復することが可能な自己修復永久磁石エラストマ(SHME, Self-Healing Magnetized Elastomer)を開発することとした。ここでは、同エラストマの切断に対する修復性能を評価した。

磁力の効果を観察するために、一辺が 30mm の立方体形状のエラストマを二つ製作し、着磁したものと着磁しなかったもの二種類に対して、切断実験を実施した。図 6 に切断力測定実験の概略図を示す。下方方向に 0.2~mm/s で押し下げることで切断する。カッタは図 6(b) に示す隙間の中に入るまで下げ、完全に切断する。切断終了後に、隙間のなかにあるカッタを一度フレームから取り外し、エラストマに触れることなくフレーム部を上昇させ、初期位置に戻した後に再度カッタを取り付ける。このようにすることで、切断後に一切の外力与えることなく、エラストマの持つ磁力による切断面同士を引きつける力のみで修復できるかどうかを観察することができる。また、正確に同じ切断箇所を再度切断することが可能である。

一つの試料に対して 2 回切断を行い、1 回目の切断力に対して、2 回目の切断力がどれくらい近いかによって、修復性能を評価する。なお、本実験においては、1 回目の切断の後、5 時間おいてから 2 回目の切断を行うこととした。図 7、表 3 に着磁済み試料と未着磁試料の切断実験時の切断力の結果と修復率を示す。また、図 8 に着磁済み試料の 1 回目の切断時の様子を示す。図 7、表 3 より着磁済み試料のほうが 80%もの修復率を示すことができた。

<参考文献>

- [1] T. A. Krouskop, et al., "Elastic Moduli of Breast and Prostate Tissue Under Compression" Ultrason Imag, vol. 20, pp. 260—274, 1998.
- [2] M. Zhang, et al., "Quantitative characterization of viscoelastic properties of human prostate correlated with histology" Ultrasound in Medicine & Biology, vol. 34, no. 7, pp. 1033—1042, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 菊地陽介, 安孫子聡子, 辻田哲平 |
| 2. 発表標題 病変部と正常組織の弾性変化が再現可能な磁性ソフトマテリアルの検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菊地陽介, 安孫子聡子, 辻田哲平, 坂本裕之, 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 力覚提示材料への応用を目指したMRエラストマの 外部磁場印加時の圧縮試験 |
| 3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 須田祐基, 辻田哲平, 安孫子聡子, 坂本裕之, 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 自己修復永久磁石エラストマの切断に対する修復性能の評価 |
| 3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鷲見知咲, 坂本裕之, 尾崎惇, 安孫子聡子 |
| 2. 発表標題 MRエラストマを用いたサクシオンカップ機構における各種パラメータが吸着力に及ぼす影響《磁気駆動機能材料の最適化設計》 |
| 3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 吉村優那, 岩本悠宏, 井門康司, 坂本裕之 |
| 2. 発表標題 永久磁石エラストマーに作用する磁気力評価 |
| 3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川田陽平, 岩本悠宏, 井門康司, 坂本裕之 |
| 2. 発表標題 永久磁石エラストマーの外部磁場下における動的粘弾性測定 |
| 3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 電磁機能性流体・ソフト材料のダイナミクスと工学応用 |
| 3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 磁性微粒子分散系磁気機能性流体のダイナミクス |
| 3. 学会等名 第1回 日本機械学会 流体工学部門 機能性流体工学研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 安孫子聡子, 辻田哲平, 坂本裕之 |
| 2. 発表標題 ノック式機構と磁性シートによる吸着機構の提案 |
| 3. 学会等名 第38回 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 柔らかい永久磁石を用いたエネルギーハーベスティング |
| 3. 学会等名 名古屋商工会議所 産学連携 クリーンテック技術展 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 川田陽平, 井門康司, 岩本悠宏, 坂本裕之 |
| 2. 発表標題 永久磁石エラストマーの圧縮動的粘弾性特性の評価 |
| 3. 学会等名 第29回 MAGDAコンファレンスin大津 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 大嶋泰雅, 井門康司, 岩本悠宏 |
| 2. 発表標題 楕円体形状の永久磁石エラストマーにおける磁歪効果 |
| 3. 学会等名 第29回 MAGDAコンファレンスin大津 |
| 4. 発表年 2021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 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 分担者 | 辻田 哲平 (Tsujiita Teppei) (40554473) | 防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723) | |
| 研究 分担者 | 岩本 悠宏 (Iwamoto Yuhiro) (30707162) | 名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13903) | |
| 研究 分担者 | 佐藤 大祐 (Sato Daisuke) (40344692) | 東京都市大学・理工学部・准教授 (32678) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|