

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13711

研究課題名（和文）自己修復可能な人工筋肉アクチュエータの微視的な破壊メカニズム解明と長寿命化

研究課題名（英文）Research on life extension and breaking mechanism for self-repairable artificial muscle

研究代表者

戸森 央貴（Tomori, Hiroki）

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30783881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化を目指し、アプローチとして人工筋肉の構造改善と修復機能の追加を提案した。はじめに人工筋肉を破損するまで駆動し、破損原因を調査した。この結果を基に人工筋肉の構造を改善し、繊維材料にアラミド繊維を適用したところ寿命が大きく改善した。続いてゴム部の破損に対応するため、熱可塑性エラストマに着目した。そして熱可塑性エラストマの試験片を用いた耐久試験により、定期的な熱処理が破断までの寿命を延ばすことが明らかになった。最終段階として熱可塑性エラストマを用いた人工筋肉の開発に着手し、型による熱成型を提案、試行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工筋肉は軽量、柔軟であり人に対して安全なアクチュエータとして注目されており、医療、介護分野をはじめとして人の近くでの運用が期待されている。そのようなアクチュエータは安全性が特に重要であることから、社会実装に向けて耐久性や寿命に関する調査は必須である。さらに熱可塑性エラストマを使用した人工筋肉は修復効果を狙っていたが、他にも熱により再度加工可能である利点が見つかった。これにより従来の使い捨てからリサイクル性の向上が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed to improve the structure of pneumatic artificial muscles and add repair functions, aiming to extend the lifetime of artificial muscles. First, the artificial muscle was driven until it was damaged, and the cause of the damage was investigated. Based on this observation result, the structure of the artificial muscle was improved, and when aramid fiber was applied to the fiber material, the lifetime was improved. Next, we focused on thermoplastic elastomers in order to deal with damage to the rubber part. Endurance tests using test pieces of thermoplastic elastomers have revealed that heat treatment extends the lifetime to fracture. As the final step, we started the development of artificial muscle using thermoplastic elastomer, and proposed and tried thermoforming with a mold.

研究分野：ロボット工学

キーワード：人工筋肉 空気圧 熱可塑性エラストマ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

人間に対して柔軟で安全性の高いアクチュエータとしてソフトアクチュエータへの関心が高まっているが、ゴムやゲルなどを利用しているために耐久性に課題が残されている。本研究ではソフトアクチュエータの中でも出力に優れる空気圧ゴム人工筋肉を取り扱うが、本アクチュエータも繰り返し駆動による破壊が発生する。これに対し破壊のメカニズムを明らかにしたり耐久性を向上させたりする試みはほとんど見られず、基本的には使い捨てという考え方が強い。しかし、人工筋肉の使用中に破損が生じた場合、予期せぬ事故につながる恐れがある。そこで空気圧ゴム人工筋肉の繰り返し耐久性に関して調査を行い、使用に伴う特性の変化や構造の劣化を明らかにする必要があると考える。さらに本人工筋肉に修復機能を付加することで定期的なメンテナンスを可能にし、長寿命化につなげる。これにより本アクチュエータの破損を予測し、補修する運用が可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、空気圧ゴム人工筋肉の駆動に伴う破損を調査し、耐久性や破損原因を明らかにする。そして熱可塑性エラストマを用いた修復機能を有する空気圧駆動の人工筋肉を開発し、修復原理の確立を目指す。さらにこれらの情報を基にメンテナンス時期の決定と自己修復をおこなう、本アクチュエータの長寿命化を図る。

3. 研究の方法

(1) はじめに本人工筋肉の破損原因を実験的に調査する。今回は繰り返し駆動による破損を調査するため、試験装置により空気圧印加と排圧を繰り返し、破損までの駆動回数を記録する。基本的に本人工筋肉の破損は空気の漏れを伴うため、人工筋肉内の圧力をセンサで計測することで破損の監視を行う。

(2) 繰り返し駆動試験で破損した人工筋肉を分解し、破損原因を調査・分類する。修復機能はゴム部分を対象としており、破損のきっかけがゴム部分の損傷によらないものは別のアプローチが必要となる。そのためゴム部分の損傷に起因しない破損原因を抽出し、構造の改善によって解決する。

(3) 本人工筋肉のチャンバーを構成するゴム材料に修復機能を付加するため、材料の選択と修復原理の確立を目指す。選択した材料から試験片を作成し、試験機により繰り返し引張試験を実施する。本人工筋肉は自然長以上伸長せず、収縮時に径方向の膨張を伴うため、円筒部のゴム材料は周方向に引き伸ばされる。これを基に試験片の引張量などの実験パラメータを決定し、人工筋肉の繰り返し駆動を模した試験を実施する。

(4) 繰り返しの引張試験により損傷した試験片に対する修復プロセスを試行する。材料として熱可塑性エラストマ (TPE) を選定しているため、加熱による修復プロセスを目指す。修復プロセスを施した試験片で引張試験を実施し、適切な加熱方式や温度などを探りつつ修復効果を確認する。

(5) 修復効果を確認したのち、TPE を用いての人工筋肉の開発を行う。現行の方法では天然ゴムラテックスを用いたディップ成型を採用しているが、ペレット状で提供される TPE では同様の成型手法を適用できない。そのため人工筋肉の成型手法を新たに確立する必要がある。

4. 研究成果

(1) 本研究課題への着手に当たり、従来の人工筋肉 (図1) の繰り返し駆動による破損を調査した。実験に用いた人工筋肉は炭素繊維を用いており、外力として 58.8N の引っ張り力を軸方向に与え、35% の収縮率となるよう印加圧力を調整した。

実験の結果を表1に示す。9例中8例の試験では繊維の破断 (図2) が金属リングの部分で生じている。炭素繊維は引張には強い強度を示すものの、共有結合のため折れに弱い。そのため膨張時にリング部で折り曲げられた繊維が徐々に破断したと考える。本実験は金属リングの太さを 1.0mm と 3.0mm で実施しており、

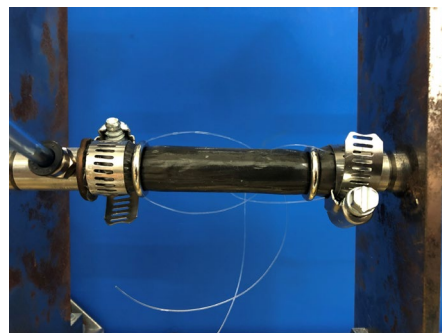


図1 炭素繊維を用いた人工筋肉 (有効部長さ 60mm、外形 14mm、肉厚 2mm、重量 0.074kg)

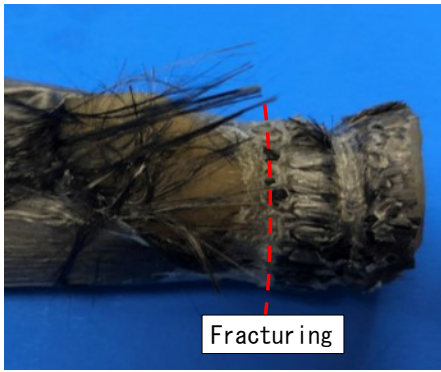


図2 炭素繊維の破断



図3 アラミド繊維を用いた人工筋肉

繊維の曲げ半径が小さくなる 1.0mm の金属リングで寿命が短いことも明らかになった。

この繊維の破断はゴムの修復機能では対応できないため、引張強度があり折れにも強いアラミド繊維を採用することで解決を図った。図3にアラミド繊維を適用した人工筋肉を示し、表2に本人工筋肉を用いて同様の試験を行った結果を示す。結果より、アラミド繊維の採用により繊維の破断は発生せず、寿命が大幅に改善している。破損の原因としては相対的に繊維の剥離やゴム部の小さい穴による破損が増えていることがわかる。繊維の剥離は接着用ゴム液の採用で改善できると考え、ゴムの小さい穴に対しては修復機能により対処しようと考えた。

(2) 本人工筋肉の繰り返し駆動によって、周方向に引っ張られるゴム部には疲労が蓄積し亀裂が生じる。そこで、人工筋肉のゴムチューブをTPEで作製し、加熱したSEPSで欠陥を修復することを目指した。ただし、大きな亀裂はTPEの流動で塞ぐことが難しいと考え、マクロな欠陥が生じる前に熱処理でメンテナンスを行うこととした。本研究ではTPEの中でも柔軟性に富み加硫ゴムのような特性を持つスチレン系熱可塑性エラストマのSEPSを採用する。はじめにSEPSペレット(図4左)から短冊状のサンプル(図4右)を作製し、図5の装置で繰り返し引張試験を行った。本試験では熱処理を施さずに試験片が破断するまで継続した実験と、3000サイクルごとに熱処理を施しての実験をそれぞれ5例ずつ実施した。熱処理では160℃のホットプレート上で5分間加熱している。

試験結果を図6に示す。試験結果より、熱処理を施した試験片の寿命が向上していることが明らかになった。ここで、当初想定していたような微視的な欠陥の発生とその修復がなされていたのか、光干渉断層計や顕微鏡による観察を試みたがそのような欠陥を発見するには至らなかった。欠陥は試験片全体で発生するのではなく、試験片全体の中からその兆候を発見することは困難であると考えられる。一方で、試験片に対して行った引張試験では破損につながるとされる兆候

表1 炭素繊維を用いた人工筋肉の耐久試験結果

Sample No.	Thickness of rings [mm]	Lifetime	Cause of failure
1	1.0	111	Fracturing of carbon fibers
2	1.0	171	Fracturing of carbon fibers
3	1.0	201	Fracturing of carbon fibers
4	1.0	601	Fracturing of carbon fibers
5	3.0	563	Fracturing of carbon fibers
6	3.0	991	Fracturing of carbon fibers
7	3.0	5933	Fracturing of carbon fibers
8	3.0	1900	Fracturing of carbon fibers
9	3.0	3260	Slipped carbon fibers

表2 アラミド繊維を用いた人工筋肉と炭素繊維を用いた人工筋肉の耐久試験比較

Sample No.	Fiber	Lifetime	Cause of failure
1	Carbon	563	Fracturing of carbon fibers
2	Carbon	991	Fracturing of carbon fibers
3	Carbon	5933	Fracturing of carbon fibers
4	Carbon	1900	Fracturing of carbon fibers
5	Carbon	3260	Slipped carbon fibers
6	Aramid	12490	Small hole at center
7	Aramid	11390	Small hole at center
8	Aramid	4181	Slipped carbon fibers
9	Aramid	4977	Slipped carbon fibers
10	Aramid	8977	Small hole at center
11	Aramid	4502	Cut by edge of the terminal part

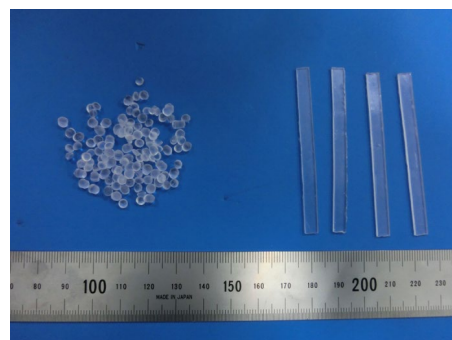


図4 SEPSペレット(左)と短冊状試験片(右)

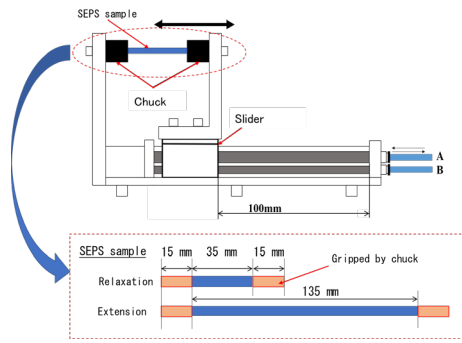


図 5 SEPS 試験片の耐久試験装置

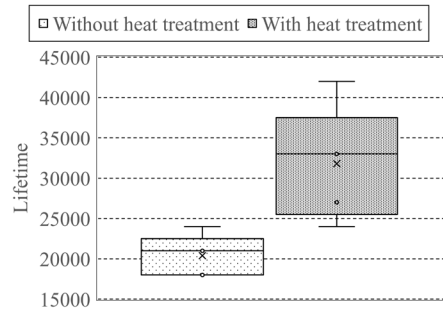


図 6 SEPS 試験片の耐久試験結果

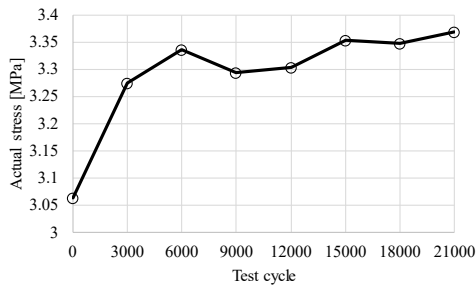


図 7 引張サイクルに伴う応力変化
(熱処理なし)

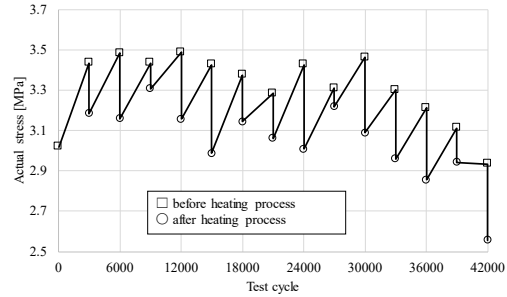


図 8 引張サイクルに伴う応力変化
(熱処理あり)

を確認した。各サンプルの耐久試験中 3000 サイクルごとに引張試験を実施し、公称ひずみ 500%までの応力値を調査した。図 7 は熱処理をなかった試験片の応力であり、サイクル数の増加とともに応力の増加が見られた。これに対し熱処理を行った試験片では、熱処理を行うことで応力の減少が見られた (図 8)。この結果から、繰り返しの引っ張りによって SEPS 分子鎖の配向が進み、柔軟性が失われたことで欠陥の発生につながったと考えている。さらに熱処理は分子鎖の配向を緩和し、柔軟性を取り戻した SEPS の寿命は向上したと結論付けた。

続いて、SEPS の加熱方式の改善を目指した。現行の方式ではホットプレートに触れた SEPS に不要な変形が生じる恐れがあり、外部からの加熱のため加熱むらもある。そこで SEPS に炭素粒子を混合し、マイクロ波による過熱を提案した。予備実験により、SEPS に対して質量比 1%のカーボンブラックを混合することで、寿命への影響を抑えつつマイクロ波の吸収が可能であることを明らかにした。続いてこの材料で作製



図 9 カーボンブラック混合 SEPS 試験片

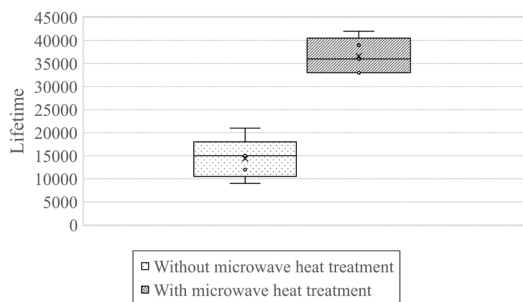


図 10 カーボンブラック混合 SEPS 試験片の耐久試験結果

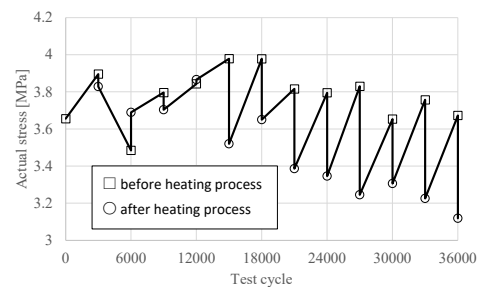


図 11 引張サイクルに伴う応力変化
(マイクロ波による熱処理あり)

した試験片 (図 9) を用いた耐久試験を同様に実施した。ただし、熱処理はマイクロ波発生器を

利用し、160°Cで5分間の加熱を行った。試験結果（図10）より、マイクロ波による熱処理を施した試験片の寿命が延びていることがわかる。また、応力変化はホットプレートによる熱処理と同様の傾向を示し、マイクロ波による熱処理は同じく効果があることを明らかにした。

(3) 熱処理でゴムの破損までの寿命が延びたことを受け、カーボンブラック混合 SEPS を用いた人工筋肉の開発を行った。現行の天然ラテックス液では芯材にゴム液を塗布してチューブを作成するディップ成型を採用しているが、ペレットで提供される SEPS では型による熱成型を提案し試作した。本手法ではペレット状 SEPS をカーボンブラックと共にニーダーで混練し、ホットプレス機でシート状に成型することから始める。この時の加工温度は200°Cとし、プレス前に5分間 SEPS を加熱する。そしてプレス圧は3MPa、プレス時間は5分、冷却時間は5分である。本手法により厚さ0.3mm、0.6mmのシート状 SEPS を作成し、それぞれ人工筋肉の構成素材として用いられる。

0.6mm 厚のシートはアラミド繊維と合わせてプレスすることで複合材料シートとなる（図12）。この時、人工筋肉の信頼性向上のため、繊維と SEPS をなじませる必要があり、プレス前に240°Cの余熱を行っている。この温度が高すぎるとシート表面にクレータが発生し人工筋肉の故障原因となる。これは SEPS からガスが発生したためではないかと推測している。続いて図13に示すように、SEPS シートと複合材料シートを型に配置し、加熱することで人工筋肉を作製する（図14）。本人工筋肉は現行の人工筋肉と同様の収縮特性を示したが、単純な耐久性の面では半分ほどの駆動回数で破損した。

(4) 今後の課題としては人工筋肉の構造を損なわずに加熱による修復を行うことである。現段階では人工筋肉に取り付けられた金属リングや両端のターミナル部品などがマイクロ波による過熱の障害となっている。さらに、チューブの両端は金属カシメによる圧迫を受けており、加熱時にその部分の SEPS が他に逃げターミナルが外れることが予想される。一方で、SEPS の利点として繰り返し加工可能な点があり、修復だけでなくリサイクル性、環境性でも差別化が図れるのではないかと期待する。

本研究成果は国際学会の IECON2019、学術論文誌 Advanced Robotics において発表されている。ロボット分野で用いられることの多い人工筋肉を材料からアプローチする研究は多くないため、材料分野での発表やコラボレーションも視野に入れている。

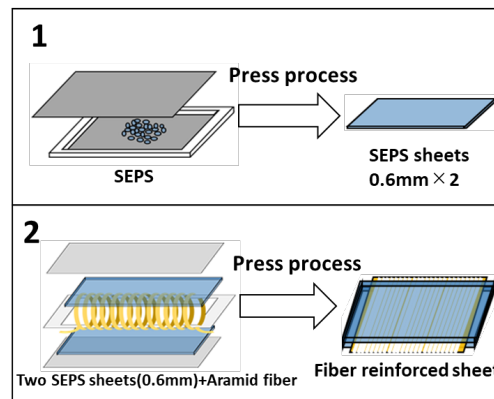


図12 SEPS とアラミド繊維の複合材料シート作製

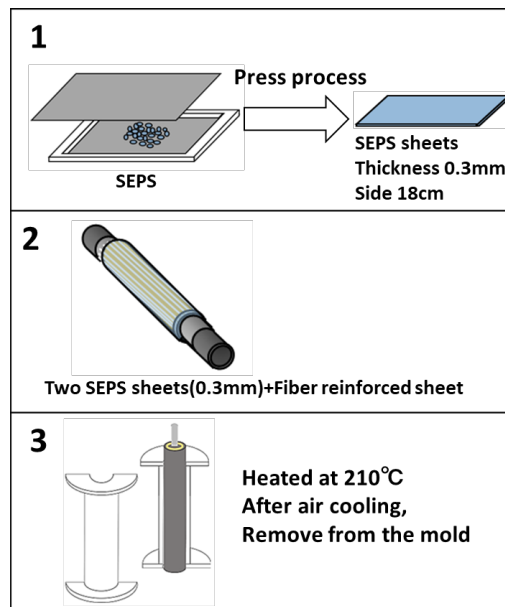


図13 SEPS シートの人工筋肉への加工



図14 カーボンブラック混合 SEPS を用いた人工筋肉

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomori Hiroki, Sasama Takuma, Ando Shingo	4. 巻 34
2. 論文標題 Recovery from fatigue of pneumatic artificial muscle using a thermoplastic elastomer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1522 ~ 1529
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2020.1824808	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H. Tomori, Y. Sato, S. Ando
2. 発表標題 Cyclic Failure Testing of Straight-Fiber Pneumatic Artificial Muscles for Optimizing Durability
3. 学会等名 the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei SATO, Hiroki TOMORI
2. 発表標題 Study on fatigue life of pneumatic rubber artificial muscle
3. 学会等名 The 6th International Conference on Smart Systems Engineering 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤真吾, 戸森央貴
2. 発表標題 空気圧ゴム人工筋肉の繰り返し耐久性向上に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018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
---------	---------