

令和 4 年 8 月 31 日現在

機関番号：32641

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21948

研究課題名（和文）力学的異方性を伴う短繊維-ゴム複合材料による革新的ソフトアクチュエーション

研究課題名（英文）An innovative pneumatic soft actuator using staple fibers

研究代表者

中村 太郎（Nakamura, Taro）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：50315644

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）：短繊維を一方向のみに配向させた強度異方性を有する「短繊維異方性ゴムシート」の作製手法の確立し、ゴムの膨張を積極的に活用した短繊維補強型人工筋肉を開発した。まず、短繊維を配向する手法として、引き抜き法、遠心法、巻き付け法を提案し、それぞれの手法に関してゴムシートによる強度異方性を検討した。その結果、巻き付け法による手法が他の手法に比べて強度異方性が高いことが分かった。さらに、繊維密度による共同異方性に関して検討した。その結果、繊維密度の高さは強度異方性に大きな影響を与えることが分かった。最後にこれらのシートを用いて収縮型と伸長型的人工筋肉を作成し、短繊維によるアクチュエータの開発手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の筋肉のように柔軟軽量で大きな出力が期待できる空気圧ソフトアクチュエータを安価で安定的に製造するために、母材(ゴム)内において短い繊維を一方向に配向させた構造を持つゴムシートの作成手法を確立した。さらに本ゴムシートを用いて短繊維型ソフトアクチュエータを作成し、実験によりその有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：We developed a short-fiber rubber sheet with mechanical anisotropy by orienting short fibers in only one direction. Furthermore, a short-fiber reinforced soft actuator was developed using this rubber sheet.

First, the "wrapping method" was proposed as a method to orient the short fibers. Anisotropic stiffness of the rubber sheet was experimentally investigated. As a result, it was confirmed that the performance was sufficient for application to soft actuators.

Furthermore, contraction and extension type soft actuators were developed using these sheets, and their usefulness was demonstrated by experiments.

研究分野：ロボティクス・設計工学

キーワード：空気圧ゴム人工筋肉 短繊維 強度異方性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流体圧で駆動するソフトアクチュエータは高出力、高コンプライアンス性を有するため、人のフィジカルインタラクションデバイス(アシスト・リハビリテーション・トレーニング等)のアクチュエータとしての応用が検討されている。

一般的に、このようなソフトアクチュエータは、繊維などの高剛性材料による拘束を施すことで膨張方向に異方性を生じさせ変位や力を取り出している。しかし、現在プロトタイプとして作製されているこのようなアクチュエータのファブリケーションでは、ゴム材料とその膨張方向を拘束する材料が別に加工作り立られている。したがって、そのため、本アクチュエータの実用化を考慮に入れた場合、作業工程が多く製造の効率的な量産化・自動化が困難であることやアクチュエータの品質にばらつきが生じるなどの課題が存在する。

2. 研究の目的

本研究では、ソフトアクチュエータの安定的な量産化・自動化のため、異方性を持つゴムを効率的に作製可能な手法の確立する。とくに本提案では、短繊維強化ゴムに着目した。短繊維強化ゴムとは短繊維を含むゴム材料のことであり、短繊維の配向に異方性を持たせることで、ゴム単体で異方性を発現でき、押し出し加工等でゴムと短繊維の混合物を一度に加工できる。

短繊維強化材料については繊維強化プラスチックにおいて実績があるものの、ソフトアクチュエータのようなゴムの大変形を伴う駆動部に適用可能かどうかについては明らかにされていない。また、短繊維を一方向に配向させるような技術についても過去に検討された例はない。そこで本研究では、「短繊維」を列理方向のみに配向させた強度異方性を有する「短繊維異方性ゴムシート」の作製手法の確立し、ゴムの膨張を積極的に活用した革新的な高出力型空気圧ゴム人工筋肉アクチュエータ「短繊維補強型高出力ゴム人工筋肉」を開発する。

3. 研究方法

本章では、3種類のゴム材料によって作成された短繊維型ゴム人工筋肉の製作・実験方法について以下の点に着目して記述する。

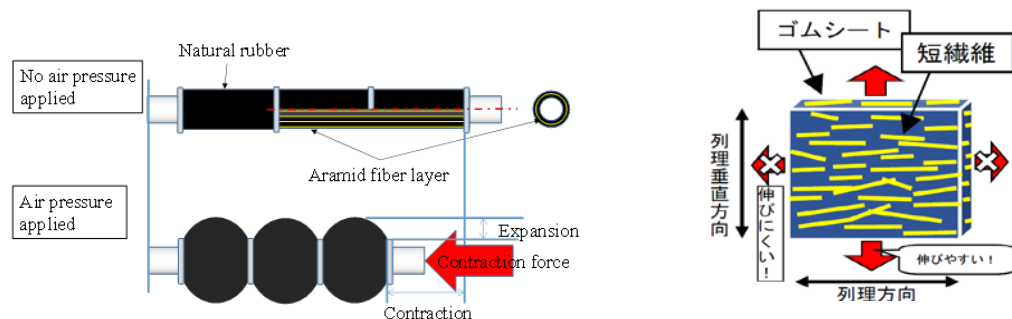
- ①適用されるゴム材料の種類とその概要
- ②各ゴム材料における制作方法
- ③板状ゴム材料の短繊維強化ゴムシートの異方性評価における基礎特性実験の方法
- ④③に基づいた各人工筋肉の作成方法と基礎特性実験の方法

3.1 空気圧ゴム人工筋肉の収縮原理と概要

図1に示すように軸方向繊維強化型人工筋肉は繊維を軸方向のみに配列し、ゴムチューブに封入したものである。空気圧をチューブ内に印加すると繊維の拘束により直径方向に膨張し軸方向には収縮する。

図2(a)に短繊維強化型人工筋肉の概要をしめす。軸方向に配列した短繊維をゴムチューブに組み込むことで通常の軸方向繊維強化型人工筋肉と同様にゴムに異方性が発現し直径方向に膨張し軸方向に収縮する。短繊維強化型人工筋肉は押し出し加工により作製できるため効率的な製造が可能である。

このような人工筋肉の構成には、図2(b)のようにある繊維強化されたゴム板上において繊維の配向方向(列理方向)とその垂直の方向(列理垂直方向)のそれぞれの軸に対する引張試験において、弾性率が大きな差が生じることが求められる。したがって、本実験では、各制作方法の違いによるゴムシートの引っ張り実験と人工筋肉に加工した後の収縮特性について検討する。



(a)人工筋肉の概略図







(b)ゴムシートの配向について

図1 軸方向繊維強化型人工筋肉



図 2 短繊維強化型人工筋肉

表 1 短繊維強化ゴムの作製方法

サンプル(試料名)	A	B	C
ゴム	ラテックス	天然ゴム(固体)	天然ゴム(固体)
繊維	アラミド	炭素繊維	アラミド
繊維長 [mm]	30	3	1-2
繊維濃度 [phr]	5	2	12
ゴムシート作製方法	「引き抜き法」 1.ラテックス内の繊維を配向させる 2.シートを乾燥させる	「遠心法」 1.ゴムをトルエンに溶かす 2.炭素繊維を混ぜる 3.ゴムを振ることで配向させる 4.シートを乾燥させる 5.加熱(140°C×30 min)	「巻き付け法」 1.繊維とゴムを混ぜる 2.オープンロールにより配向させる 3.加熱する (150°C × 20 min)
ゴムシートの外観			
人工筋肉作成方法	1.内径 10 mm の芯にラテックスを塗り乾燥させ芯となるゴムチューブを作成する 2.アラミド繊維をゴム内に配向させる 3.繊維層の外側にラテックスを塗布して乾燥させ、外側のゴムチューブとする	1.芯となるゴムチューブを作製する 2.ゴムチューブに短繊維強化ゴムシートを巻き付け加硫する 3.通常のゴムシートを巻き付け加硫する	1.芯材にシートを巻き付ける 2.加硫する
人工筋肉の外観			

3.2 短繊維強化ゴムシートの異方性評価

本実験では短繊維強化ゴムと短繊維強化型人工筋肉を作製する方法について表 1 のように 3 種類の作成方法を検討した。

表 1 に示された各手順にしたがって作製されたゴムシートの異方性を評価するために、繊維の配向方向(列理方向)と直角方向(列理垂直方向)の引張試験を行った(図 3)。引張試験には、試験速度 50 mm/min の autograph AG-1(SHIMADZU Corp. Japan)を用い、試験片は幅、厚さ、長さがそれぞれ 10,2,30 mm の帯状とした。

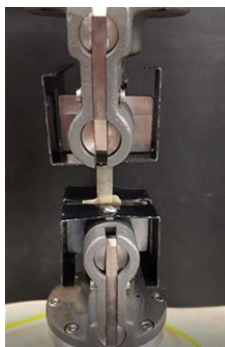


図 3 引張試験装置

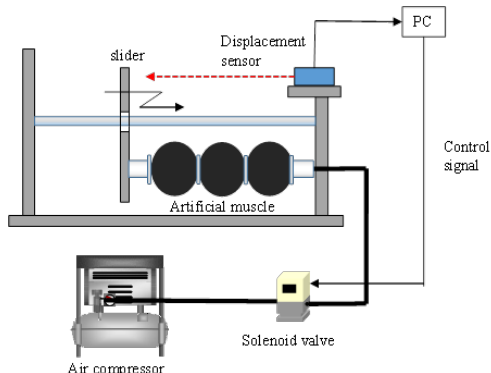


図 4 収縮試験装置概要

3.3 短繊維強化ゴム人工筋肉の収縮率評価

表 1 に示す手順により作成された人工筋肉の端部をターミナルにより固定し、0.01MPa 刻みで空気圧を加えた。収縮率((自然長-空気圧をかけたときの長さ)/自然長)を測定した(図 4)。

4. 研究成果

4.1 短繊維強化ゴムシートの異方性評価

表 1 に示した 3 つの製造方法についてゴムシートの引張試験を行った結果を図 5(a)~(c)に示す。また弾性率の計算結果を表 2 に示す。図 5 より、いずれのゴムシートも繊維配向方向に垂直な方向と平行な方向で応力-歪み特性が異なる異方性を示していることが分かる。図 5 (a)、(c)において、平行方向の応力は垂直方向の応力の約 1.5 倍、破断歪みは約 0.2 倍となった。これは、繊維の補強効果による応力の増大と、延伸方向のゴム含有量の減少による破断歪みの減少によるものと考えられる。この結果は、表 2 に示された比較により支持される。さらに、図 5 (b) については、他の試料に比べて大きな差が生じなかった。これは混合繊維の量が他の試料にくらべて少なく、縦方向の繊維によって物性が阻害されなかったためと推察できる。

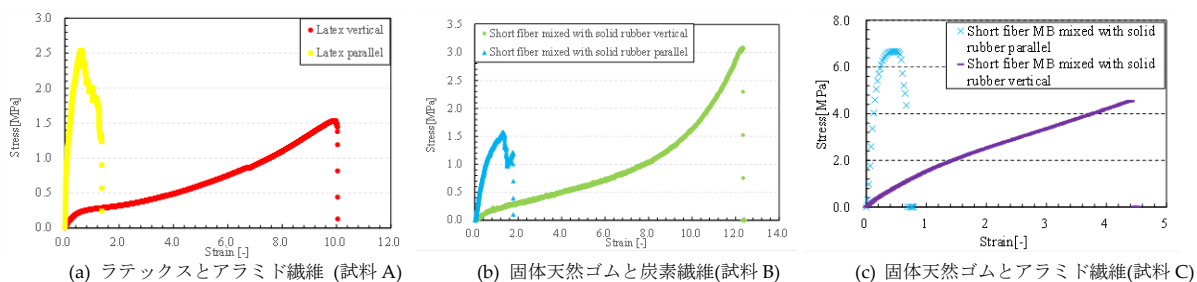


図 5 各試料での応力ひずみ線図

表 2 弾性率の比較

試料	A	B	C	繊維無し
繊維に直角(列理垂直) [MPa]	0.2	0.2	1.1	0.75
繊維に平行(列理) [MPa]	3.1	1.3	14	0.75

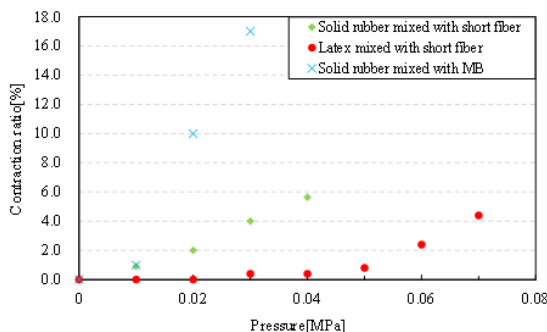


図 6 収縮率の比較

4.2 短繊維強化ゴム人工筋肉の収縮率評価

図 6 に表 1 の 3 つの製造方法のそれぞれを用いた人工筋肉の収縮率の測定結果を示す。図 6 より、すべての短繊維型人工筋肉は、チューブへの圧力印加に応じて収縮したことが分かる。それぞれの最大収縮量は、アラミド短繊維を混合したラテックスでは約 5%、炭素短繊維を混合した固体天然ゴムでは約 6%、アラミド短繊維を混合した固体天然ゴムでは約 17%となった。これは混合繊維の量、繊維の配向度、繊維径と長さの比の影響による。

本実験では条件を製作の都合上、条件を一定にそろえることが難しかったため、本結果から各パラメータが収縮率に与える影響を十分に議論することはできないが、繊維濃度の比が人工筋肉の収縮に影響を与えている可能性がある。第 5 章より繊維濃度に関するパラメータの影響についても検討する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Akihiro Kojima, Manabu Okui, Taro Nakamura
2. 発表標題 Development of pneumatic soft actuator using high strain elastic material with stress anisotropy by short fibers
3. 学会等名 1st International Electronic Conference on Actuator Technology:Materials, Devices and Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kunisada, M. Okui, K. Fujitani, F. Ito, T. Nakamura
2. 発表標題 Development of anisotropic short fiber-oriented rubber and its application to extension actuators
3. 学会等名 48th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (to be present at) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國定大真, 藤谷希一, 伊藤文臣, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 短繊維補強空気圧式ゴム人工筋肉の開発 炭素繊維を使用した繊維濃度の引張特性への影響の評価
3. 学会等名 システムインテグレーション部門講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國定大真, 藤谷希一, 伊藤文臣, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 引き伸ばし法による短繊維人工筋肉の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アクチュエータ	発明者 中村太郎 奥井学 小島明寛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2019-082238	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

中央大学 中村研究室 HP http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/index.html

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
---------	---------