

令和6年度

卒業研究報告書

題 目

超細径空気圧人工筋肉の
開発に関する研究

Research on the Development of
Ultra-Fine Pneumatic Artificial Muscles

SDGs目標番号: 9

学生氏名 (学籍番号)

高橋和希 (D2019)

指導教員

中西大輔

電子制御工学科

概要

McKibben 型人工筋肉 (McKibben Pneumatic actuator) は圧縮空気を印加することで収縮し、自身の軸方向への張力を発生させるアクチュエータである。近年では直径数 mm の細径 MPA が注目されており、小さな筋肉のみならず集積化によって複雑な筋肉の再現が可能であることから筋骨格系ロボットや生物模倣ロボットへの応用が盛んである。現在市販されている細径 MPA は直径が 3 mm 程度のものが最も径が小さいが、一方でさらなる高集積化や小動物型や昆虫型などの非常に小型なロボットへの応用を考える上では、さらに細径な人工筋肉の開発が求められている。そこで本研究では比較的構造が簡単な軸方向繊維強化型人工筋肉に着目し、さらに細径な超細径空気圧人工筋肉の開発を目指す。それに向けて本論文では液体ラテックスを用いた風船作製のノウハウを基に、内径 5 mm, 3 mm の細径な軸方向繊維強化型人工筋肉の作製方法の開発を行った。さらに収縮率や発揮張力を実験を通じて確認した。

Abstract

The McKibben pneumatic actuator (MPA) is an actuator that contracts when compressed air is applied to it, generating tension in its own axial direction. Recently, thin MPAs with a diameter of a few millimeters have been attracting attention, and their application to musculoskeletal and bio-mimetic robots has been popular because they can reproduce not only small muscles but also complex muscles by integration. The application of MPAs to musculoskeletal and biomimetic robots is flourishing. The smallest diameter MPAs currently available on the market are those with a diameter of about 3 mm. On the other hand, the development of even smaller diameter artificial muscles is required for further integration and application to very small robots such as small animals and insects. In this study, we focus on axial fiber-reinforced artificial muscles, which have a relatively simple structure, and aim to develop even thinner ultra-thin pneumatic artificial muscles. This paper describes the development of a liquid lathe. In this paper, we develop a method to fabricate axial fiber-reinforced artificial muscles with inner diameters of 5 mm and 3 mm, based on our expertise in balloon fabrication using liquid latex. The shrinkage rate and exerted tension were confirmed through experiments.

目次

1	緒言	1
2	空気圧人工筋肉	2
2.1	McKibben 型空気圧人工筋肉アクチュエータ (MPA)	2
2.2	軸方向繊維強化型人工筋肉	3
3	内径 5mm の細径軸方向繊維強化型空圧筋の開発	4
3.1	液体ラテックスについて	4
3.2	細径ゴムの試作	4
3.2.1	作製手順	4
3.2.2	問題点の改善	6
3.3	内径 5 mm の人工筋肉の作製	8
3.3.1	収縮率	9
4	内径 3 mm の細径軸方向繊維強化型空圧筋の開発	12
4.1	作製方法 1	12
4.2	作製方法 2	13
4.3	作製方法 3	14
4.4	作製方法 4	16
4.5	作製方法 5	17
5	評価実験	19
5.1	収縮率	19
5.1.1	内径 3 mm の測定	19
5.2	発揮張力	19
6	考察	21
7	結言	22

1 緒言

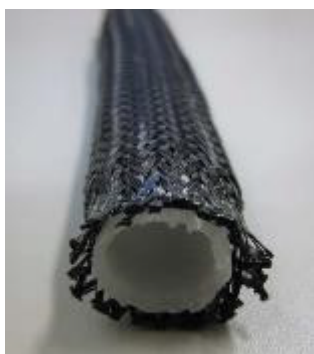
近年、ロボティクスや医療分野において、柔軟性を持つアクチュエータの重要性が増している [1]. 特に、従来の硬いアクチュエータに代わる柔軟な人工筋肉は、より自然な動作や安全性の向上が期待されており、様々な応用が提案されてる. 人工筋肉の中でも、特に細径人工筋肉はパワーアシストスーツや筋骨格ロボットにおいて重要な役割を果たす [2]. 細径化を進めると進めると、さらなる高集積化や小動物型や昆虫型などの非常に小型なロボットへの応用ができると考えられる [3]. しかし、現状においては人工筋肉の細径化には収縮性能などの課題があり、これらの解決に向けたさらなる研究が必要とされている. また中西研究室でも McKibben 型人工筋肉の細径化に成功しているが [4], 内径 3 mm 以下のナイロンメッシュが市販されていないためこれ以上の細径化は難しいと考えられる. そこで本研究では、構造が簡単である軸方向繊維強化型人工筋肉 [4] に注目する. よって従来よりもさらに細径な空圧筋の開発を目的とする.

本論文の構成は以下の通りである. まず 2 章では従来の McKibben 型空気圧人工筋肉について述べてから、今回使用する軸方向繊維強化型人工筋肉について説明する. 次に 3 章では研究の第 1 歩として行った風船作製について述べたあと、内径 5 mm の人工筋肉の作製について説明する. 4 章では内径 3 mm の人工筋肉の作製について説明する. 5 章では作製した人工筋肉の評価実験について述べたのち、6 章で細径するにあたって適切な作製方法、糸の配置について述べる. 最後に結言ではまとめと今後の予定について述べる.

2 空気圧人工筋肉

2.1 McKibben 型空気圧人工筋肉アクチュエータ (MPA)

MPA はシリコンゴムチューブをナイロンメッシュで覆うことで構成されており (図1(a)), 両端に栓をするシンプルな構造である. これに圧縮した空気を印加することでシリコンゴムチューブが膨張しメッシュによる自身の軸方向への張力が発生するアクチュエータである [5](図1(b)). 高出力かつ素材自体も軽量で, 物理的柔軟性による高い弾性力を持つという利点があり, 筋肉の代用として生物を模したロボットやリハビリなどに用いられる. 図1に示すような直径が数10 mm のものが一般的であるが, 近年では直径数 mm 程度の細径タイプの MPA も普及している [6]. 細径化することで集積することが可能となり複雑な筋肉などにも応用がされている. しかしさらなる高集積化, 小動物や昆虫型などの小型なロボットへの応用を考える上ではより細径な人工筋肉の開発が求められている. しかし, 現在細径 MPA は最も細いもので 3 mm (韓国サムスン電子グループ) であり, また自作する場合でもナイロンメッシュは 3mm 程度のものが最細である. またメッシュの製作には製紐機 (ブレードー) と呼ばれる特殊な機械が必要であり, 研究室で内製することは困難である. すなわち, McKibben 方式でこれ以上細径な空圧筋を作ることは困難である.



(a) MPA 断面図



(b) MPA 外観および動作の様子

図 1: McKibben 型空気圧人工筋 (MPA) の構成および外観 [?]

2.2 軸方向繊維強化型人工筋肉

そこで本研究では McKibben タイプではなく、軸方向遷移強化型の空圧筋 [?] に着目する。軸方向繊維強化型人工筋肉の動作原理を図 2 に示す。この人工筋肉は、ゴムチューブ内に拘束繊維を内包する構造で、拘束繊維とゴムチューブとの摩擦を抑え長寿命を実現する。空気圧が供給されると、内圧が半径方向にのみ伝達され、軸方向への効率的な収縮を引き起こす。さらに、チューブに外挿されたリングの数を調整することで、ゴムチューブの膨張を抑制しつつ必要な収縮力を発揮できる [?] McKibben タイプに比べ比較的構造が簡単であり市販されているナイロンメッシュの細さに細径化が左右されないためこの方式での研究を行った。

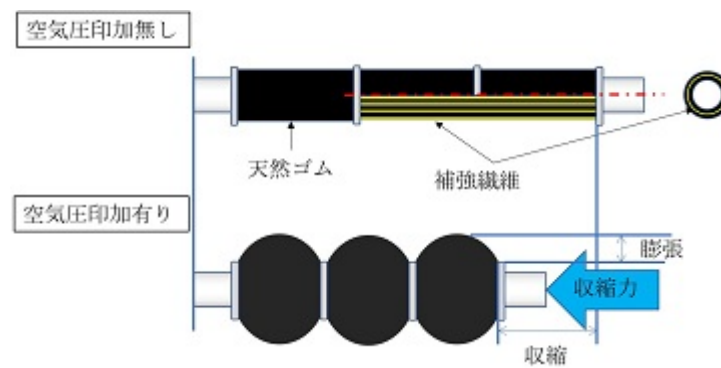


図 2: 軸方向繊維強化型人工筋肉の仕組み [?]

3 内径5mmの細径軸方向繊維強化型空圧筋の開発

本研究では液体ラテックスを用いたゴム風船の作成方法をベースに、軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉を開発する。本章ではまず細径なゴム風船を作成し、液体ラテックスの扱いに関するノウハウを得る。それを踏まえて、内径5mmの細径軸方向繊維強化型空圧筋の開発を行う。

3.1 液体ラテックスについて

ラテックスは、天然ゴムの一種で、主にゴムの木から得られる液体のこと示す。ラテックスは乳白色の液体であり、そのままでは非常に粘度が高く、様々な成分が含まれている。ラテックスは、製品化される際に加工され、ゴム製品や医療用の手袋などに使用されている。今回使用する前加硫ラテックス (REGITEX, PC-518) は薄い商品 (風船, 手袋, サックなど) 作製に向いている。使用方法としては、成形したい金型をPC-518液の中にドブ漬け、タレが出来ないようにゆっくり引き上げる。そのまま放置或いは熱風により乾燥させる以降、本稿において特に断らない限り液体ラテックス (液体ゴム) とは「前加硫ラテックス (REGITEX, PC-518)」を、凝固液とは「凝固液 (有限会社 ハイラテック, PC-518用)」を指すものとする。また液体ラテックスおよび凝固液の乾燥には時間がかかるため、これを短縮するためにドライヤー (図3) を用いた。これについても、以降特に断らない限りドライヤーとは「Panasonic EH-Ne13」を指すものとする。

3.2 細径ゴムの試作

液体ラテックスの扱いに関するノウハウを得るために、一般的なゴム風船の作製方法 [?] を参考に、細径なゴム風船を試作した。ゴム風船を作成する際には白熱電球状のガラス製の型を用いて、その表面に薄く液体ゴムを纏わせることで薄いゴム膜を形成する。その手法を踏まえて、直径が5mmの鉄製の細棒にゴムを纏わせることで細径なゴム風船を作成することを試みた。

3.2.1 作製手順

図3に作製に必要な物品、図4に作製手順を示す。必要な物品は以下の通りである。

- 鉄棒 (内径 5 mm, 3 mm)
- 液体ラテックス (液体ゴム)
- 凝固液
- ドライヤー Panasonic EH-Ne13
- ポリメスシリンダー (直径 25 mm 容量 50 ml)

以下、作製手順である。

1. ポリメスシリンダーにそれぞれ液体ゴム，凝固液を 50 ml 注ぐ
2. 鉄棒を凝固液に約 5 秒浸して取り出す
3. 取り出した鉄棒を凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす (水滴が残っているとゴムがダメになってしまいゴム厚に偏りが生じ，破裂が起きやすくなるのでよく乾かす)
4. 鉄棒を液体ゴムに約 10 秒浸して取り出す (容器に鉄棒が触れるとゴムの外膜が剥がれるので注意する)
5. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
6. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
7. 3 時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる (部屋で放置しすぎるとゴムが硬くなりすぎて鉄棒から取り外すときに割れたり，穴が空きやすくなるので注意する)

以上の手順で作成した細径ゴム風船を図 5 に示す。細径ゴム風船の試作を行うことで，凝固液の適切な乾かし方，液体ゴムに浸す時間について確認することができた。

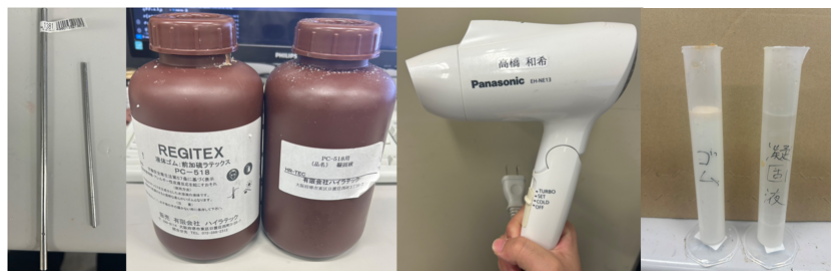


図 3: 使用器具

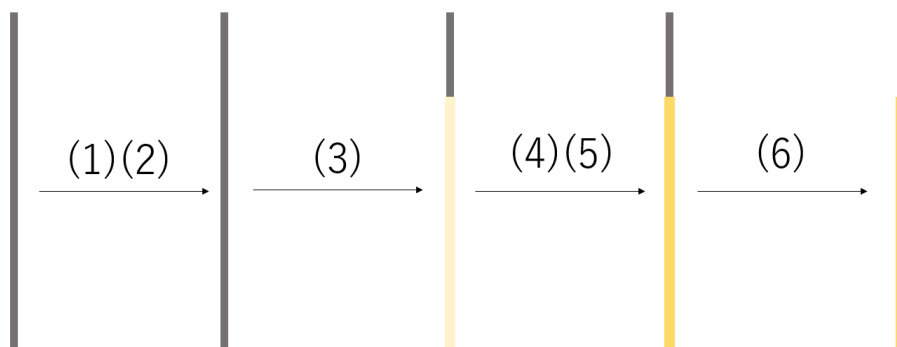


図 4: 風船の作製手順

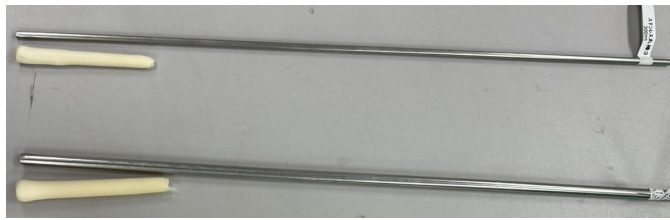


図 5: 作製した風船



図 6: ゴム原液



図 7: ゴム 60: 水 40

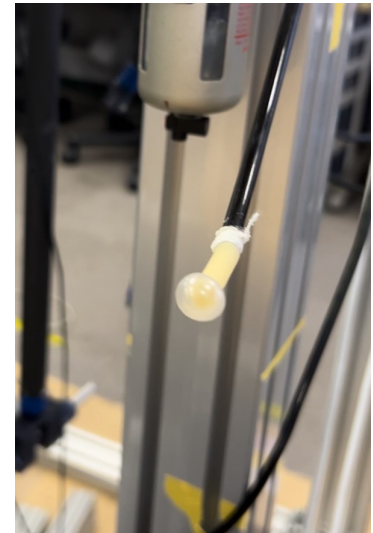


図 8: ゴム 40: 水 60

3.2.2 問題点の改善

前項の作製方法で風船を作製するとゴム膜が硬すぎる，ゴム膜の上下で厚さにムラができる問題が生じた．この問題を解決するためにそれぞれ以下のような対策をとった．まずゴム膜が硬すぎるために膨張させることに必要な印加圧力高く，破裂が起きやすい問題に対して，液体ゴムを水で割ることで粘度を下げ，膜厚を薄くすることで解決を試みた．前述の通り，液体ゴムの原液を用いて細径風船を作成した場合，ゴム膜が厚く硬いために破裂してしまった(図6)．そこで一般的なゴム風船作製方法を参考にゴム 60: 水 40 の割合で混ぜたものを用いて細径ゴムの作製を行ったところ^[1]，図7のように破裂をすることなく膨張することが確認できた．また実験的にさらに薄めたゴム 40: 水 60 での割合で混ぜたもので細径ゴム風船の作成を行ったところ，かろうじてゴム膜を形成することができたが，非常に薄いために空圧を印加するとすぐに膨張が始まり，図8のように破裂が生じてしまった．これらの結果を踏まえて，特に断らない限り以降，作成に用いる液体ゴムはゴム 60: 水 40 の割合で割ったものを用いることとする．

次にゴムの上下で厚さに差が出ている問題に対して作製方法の変更で解決を試みた。図4を見れば分かるように鉄棒は一度だけ一方向から液体ゴムに浸されている。時間の経過によって液体ゴムは下へ垂れるため、棒の下側部分と中程部分とでは、下側部分の方が厚くなる。そこで1度液体ゴムに漬けたのち、上下をひっくり返してもう1度ゴムに漬けることでこれを解決した。作製手順を以下と図9に示す。

1. まず初めに鉄棒を凝固液に約5秒浸して取り出す
2. 取り出した鉄棒を凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
3. 鉄棒を液体ゴムに約5秒浸して取り出す
4. ドライヤーで凝固液の水滴がなくなるまで乾かす
5. 鉄棒を液体ゴムに約5秒浸して取り出す
6. 凝固液に約5秒浸して取り出す
7. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
8. 3時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

作製した細径ゴム風船を図10に示す。図10のように上下でゴム厚にムラができることなく作製することができた。

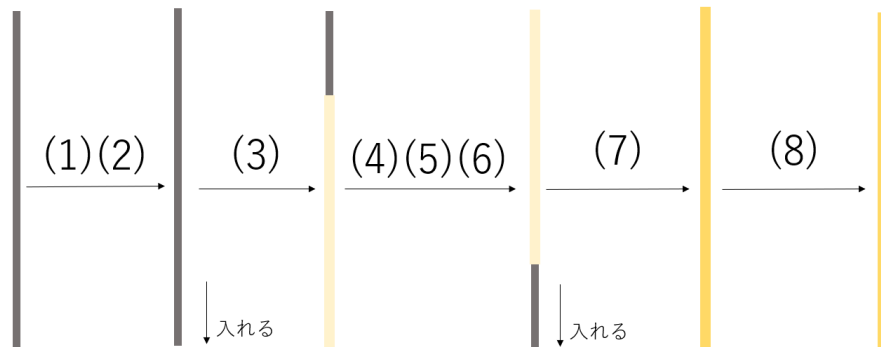


図 9: 液体ゴムに上下2回に分けて浸す



図 10: 細径ゴム風船



図 11: 開発した器具

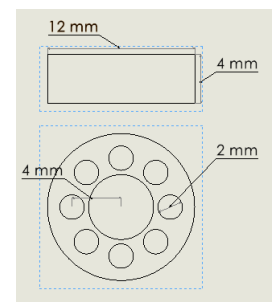


図 12: 開発した器具

3.3 内径 5 mm の人工筋肉の作製

前章で細径ゴム風船を作成したノウハウに基づいて、内径 5 mm の軸方向繊維強化型細径空圧筋の作製を行った。軸方向繊維強化型の空圧筋を作成するためには、ゴム膜の内部に繊維（糸）を内包させる必要がある。そこで型である鉄棒の周りに糸を配置するための器具を開発した。開発した器具の写真を図 11, 12 に示す。使用方法としては図 14, 15 のように、鉄棒に器具をはめ、糸を通す仕組みになっている。

今回は縦糸として 3 号のナイロン製釣り糸を用いた。図 16 に作製手順を示す。なおここで接着剤とは PPX（セメダイン社、CA-522）を指す。なお以降特に断らない限り接着剤とはこれを指すものとする。

- 鉄棒 (内径 5 mm)
- REGITEX 液体ゴム (前加硫ラテックス) メーカー: 有限会社 ハイラテック
- PC-518 用 凝固液
- ドライヤー Panasonic EH-Ne13
- ポリメスシリンダー (PC-518, 凝固液用)
- 道糸ナイロン 3 号 200 m
- PPX (瞬間接着剤) メーカー: セメダイン 品番: CA-522
- PE ライン 0.04 mm

作製手順を以下に示す。

1. まず初めに上記に述べた器具を鉄棒に取り付ける (固定できない場合は接着剤を少し塗り, 固定する)
2. ナイロン糸 (3号) を器具に通す
3. 凝固液に約5秒浸して取り出す
4. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
5. 液体ゴムに約5秒浸して取り出す
6. 凝固液に約5秒浸して取り出す
7. ドライヤーで凝固液の水滴がなくなるまで乾かす
8. 液体ゴムに約5秒浸して取り出す
9. 凝固液に約5秒浸して取り出す
10. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
11. 3時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

上記手順で作成した作成した空圧筋を図17に示す. 作製した繊維内包ゴム被膜を空圧筋として動作させるために図18のようにOリング5mm, M3ネジ, PEライン0.4mm, シリコンゴムチューブ外形5mmを使用して作製を行った. 作製手順を以下に示す.

1. 送気用のポリウレタンチューブを約5cm切る
2. 作製した空圧筋をポリウレタンチューブに約1cm差し込む
3. 重なった部分をPEラインで結び, 強く締結する
4. 締結下部分に接着剤を塗布し糸が緩まないようにする
5. Oリングを任意の数はめ込む
6. M3ネジを他方に挿入して同様にPEラインで締結し, 接着剤を塗布することで完成する

3.3.1 収縮率

作製した内径5mm人工筋肉の収縮率の測定を行った. 収縮率は

$$\frac{(\text{収縮後の長さ}) - (\text{収縮前の長さ})}{\text{収縮後の長さ}} \times 100$$

で計算を行った. 図13に測定するにあたって必要な部品を示す. 必要な物品は以下の通りである.

- 作製した人工筋肉 (内径5mm, 3mm)

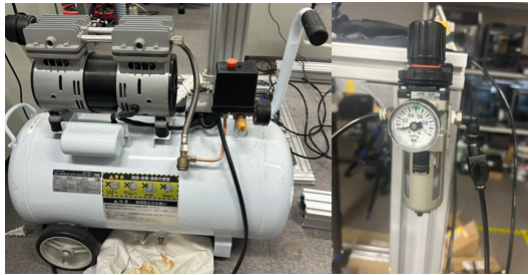


図 13: 使用方法

- オイルレス エアーコンプレッサー 39 L
- フィルターレギュレーター AW30-02BG

測定方法を以下に示す.

1. 膨張する前の人工筋肉の長さを測定する
2. 人工筋肉をエアーコンプレッサーに取り付ける
3. 人工筋肉の膨張を確認しながらノズルを回し, 破裂しないギリギリまで膨張させる
4. 膨張した状態を保ちその状態を測定する

図 19 に今回作製した内径 5 mm の人工筋肉を示す. 上記の方法で空圧を印加すると 0.02Mpa が膨張の最大となった. 空圧印加前の長さは 75 mm, 空圧印加後の長さは 68 mm で収縮率を求める式に代入すると

$$\frac{(68\text{mm}) - (75\text{mm})}{68\text{mm}} \times 100$$

となり収縮率が 10.7 % となることが確認できた.

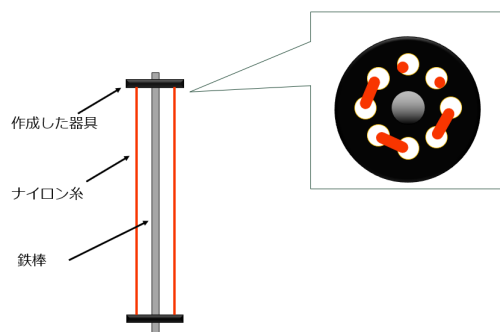


図 14: 使用方法

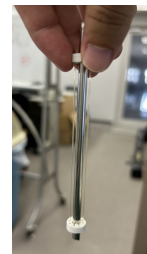


図 15: 使用方法

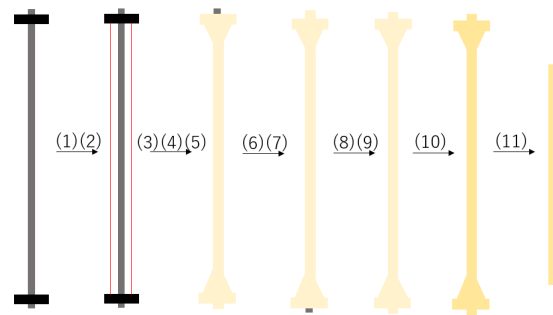


図 16: 作製手順



図 17: 作製した空圧筋



図 18: 作製した空圧筋



(a) 空圧印加前



(b) 空圧印加後

図 19: 内径 5 mm の人工筋肉

4 内径 3 mm の細径軸方向繊維強化型空圧筋の開発

前章では、ゴム風船の作製方法を応用することで内径 5 mm の人工筋肉の作製に成功した。そこで本章ではさらに細い内径 3 mm の人工筋肉の開発に取り組む。開発においては、前章での手法をベースに試行錯誤を行い、最終的に作製手順 5 にて作製に成功した。以下に各手法の概略と、その過程で生じた問題点について述べる。作製するにあたって新しく開発した器具を図 20 に示す。

また空圧筋として動作させるための器具を作製した (図 21)。作製手順を以下に示す。

1. 送気用のポリウレタンチューブを約 5 cm 切る
2. 作製した空圧筋を図 21 に約 1 cm 差し込む
3. 重なった部分を PE ラインで結び、強く締結する
4. 締結下部分に接着剤を塗布し糸が緩まないようにする
5. O リングを任意の数はめ込む
6. 図 21 を他方に挿入して同様に PE ラインで締結し、接着剤を塗布する
7. ポリウレタンチューブを図 21 にはめ、接着剤を塗布し完成する

4.1 作製方法 1

作製方法 1 では前章と同様、鉄棒の周りに糸を張り液体ゴムに漬けることで作製を行った。作製した人工筋肉を図 22, 23 に示す。内径が小さくなったことで図 22 から見て取れるように経糸同士の間隔が狭くなり、互いにくっついてしまう現象が生じた。これによりゴム膜の幅に偏りが生じ、空圧印加時に破裂しやすくなってしまった。

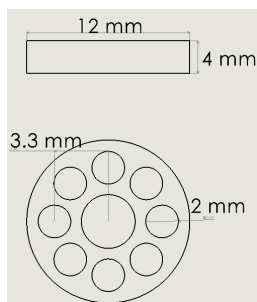


図 20: 開発した器具



図 21: 開発した器具

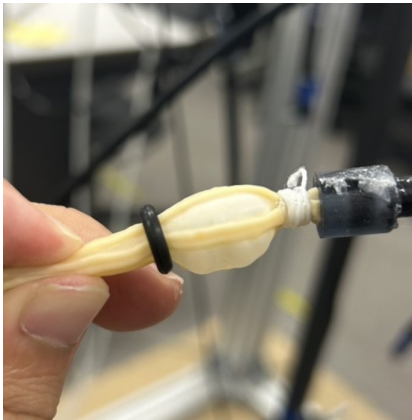


図 22: 作製方法 1

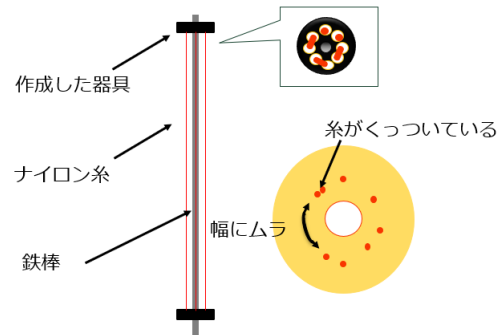


図 23: 作製方法 1

4.2 作製方法 2

作製方法 2 では糸同士の間隔が一定になるように図 24 のように鉄棒と縦糸の間隔を近づけて作製を行った。作製手順を以下と図 25 に示す。

1. まず初めに器具を取り付ける
2. ナイロン糸を器具に通す
3. PE ラインを使いナイロン糸を鉄棒に押し付ける
4. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
5. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
6. 液体ゴムに約 5 秒浸して取り出す
7. ドライヤーで凝固液の水滴がなくなるまで乾かす
8. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
9. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
10. 3 時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

縦糸がくっつく現象は解決したものの、ゴム部内面に隙間がなくなった結果、図 26, 27 のように内面側から縦糸が抜けてしまう問題が新たに発生し、軸方向への膨張を抑制することができなかった。

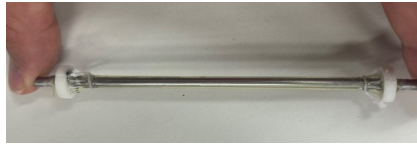


図 24: 作製方法 2

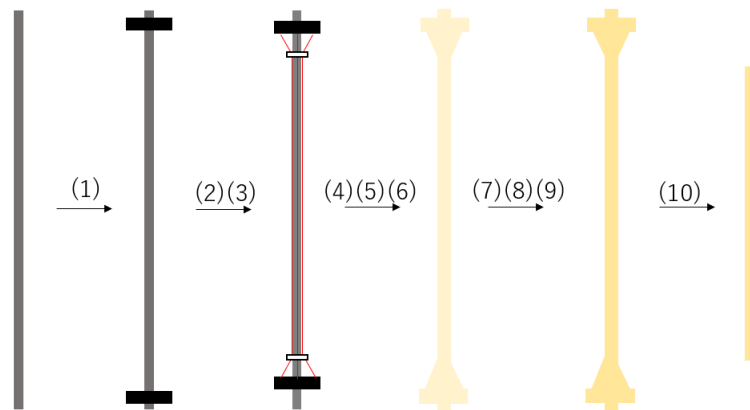


図 25: 作製手順

4.3 作製方法 3

作製方法3では糸が簡単に取りれなくなるように鉄棒にゴム膜を作り、その上に糸を押し付けて固定し作製を行った。作製手順を以下と図28に示す。

1. 凝固液に約5秒浸して取り出す
2. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
3. 液体ゴムに約2秒浸して取り出す
4. 凝固液に約5秒浸して取り出す



図 26: 作製方法 2

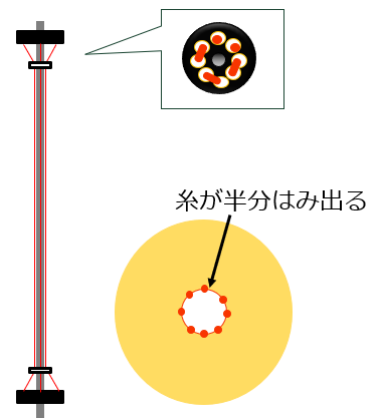


図 27: 作製方法 2

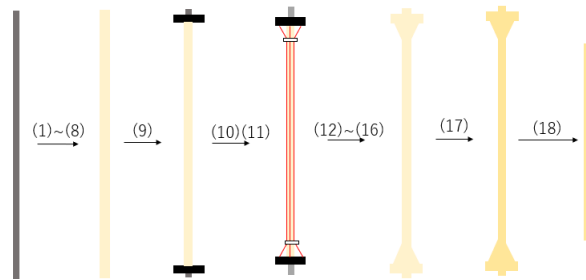


図 28: 作製手順

5. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
6. 液体ゴムに約2秒浸して取り出す
7. 凝固液に約5秒浸して取り出す
8. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
9. 器具を取り付ける
10. ナイロン糸を器具に通す
11. PEラインを使いナイロン糸をゴム膜に押し付ける
12. 凝固液に約5秒浸して取り出す
13. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
14. 液体ゴムに約5秒浸して取り出す
15. ドライヤーで凝固液の水滴がなくなるまで乾かす
16. 凝固液に約5秒浸して取り出す
17. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
18. 3時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

内面側から糸が抜ける問題は改善したものの糸がある場所で図29のようにゴム膜が2つの層に分かれてしまい、強度が低下し破裂が生じてしまった。

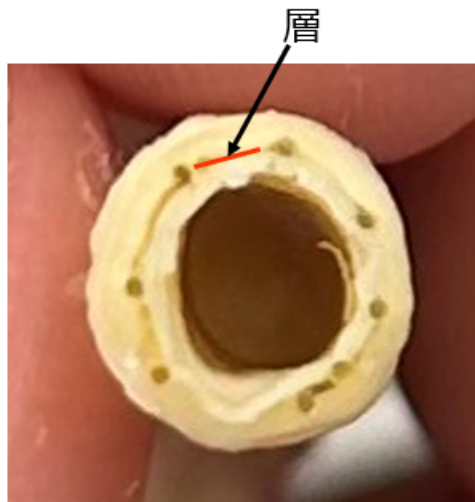


図 29: 作製方法 3

4.4 作製方法 4

糸を入れてないときは層ができなかったのので、糸にゴムをコーティングすれば糸がある場所に層ができなかったと考えた。図 30 に糸にゴムをコーティングする方法を示す。必要な物品は以下の通りである。

- REGITEX 液体ゴム (前加硫ラテックス) メーカー: 有限会社 ハイラテック
- PC-518 用 凝固液
- 作製した器具
- アーマード F+pro 0.06 号
- 綿 手縫い糸
- オープントースター CF-AC121
- 作製した器具

以下、作成手順である

1. 糸を図 30 のように巻きつける
2. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
3. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
4. 液体ゴムに約 10 秒浸して取り出す
5. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す

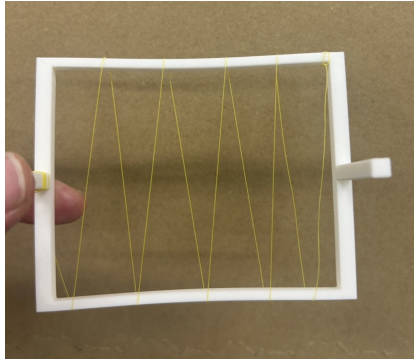


図 30: コーティング方法

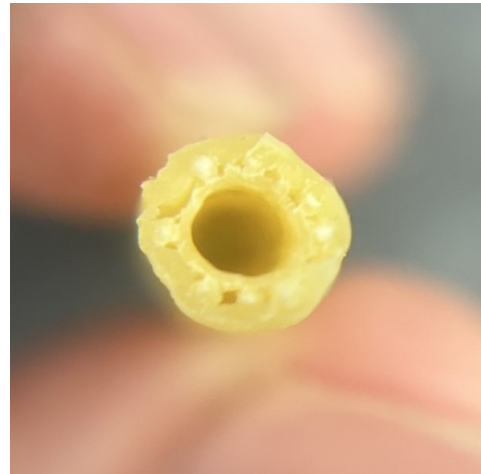


図 31: 作製方法 4

6. オープントースターで 80 度で 10 分乾かす

この方法で作製した糸を用いて作製方法 3 と同様な方法で作製を行った。また今回からオーブンを使用して乾燥を行った。図 31 からみて分かるように糸をゴムでコーティングしても層ができる現象は改善されなかった。

4.5 作製方法 5

作製方法 5 ではゴムが 2 層になる問題を回避するために、作製方法 1 と同様 1 度にゴム膜を形成する方法に戻した。また糸がくっつく問題を回避するために、縦糸にテンションをかけるネジを用いた器具を開発した。開発した器具の使用方法を図 32 に示す。

作製方法を以下と図 33 に示す。

1. 器具を鉄棒に取り付ける
2. 器具に糸を通しネジを回すことで糸にテンションをかける
3. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
4. 凝固液の水滴がなくなるまでドライヤーで乾かす
5. 液体ゴムに約 10 秒浸して取り出す
6. 凝固液に約 5 秒浸して取り出す
7. 取り出した鉄棒をゴム膜の外側のいろが白色から肌色になるまでドライヤーで乾かす
8. 3 時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

作製方法 4 ではオーブンで乾かすことによりゴム膜を硬くしていたが、硬くなることによって膨張が起きにくくなっていたので部屋でゆっくりと乾燥させる方式に戻した。作製した人工筋肉は図 34, 35 のように糸のくっつきおよび 2 層化の問題は生じなかった。また印加圧力によって空圧筋として動作することが確認した。

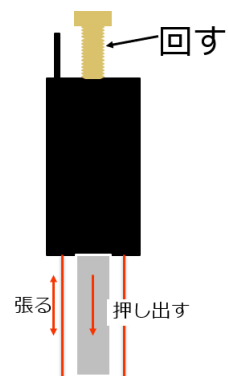


図 32: 使用方法

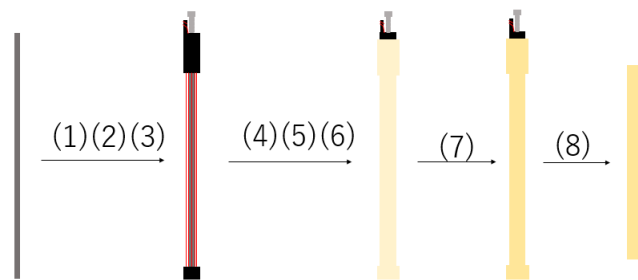


図 33: 使用方法



図 34: 断面



図 35: 糸の配置

5 評価実験

5.1 収縮率

5.1.1 内径 3 mm の測定

図 36 に今回作製した内径 3 mm の人工筋肉を示す．測定方法は内径 5 mm の測定と同様な方法で行った．空圧を印加すると 0.06Mpa が膨張の最大となった．空圧印加前の長さは 54 mm，空圧印加後の長さは 49 mm で収縮率を求める式に代入すると

$$\frac{(49\text{mm}) - (54\text{mm})}{49\text{mm}} \times 100$$

となり収縮率が 9.3 % となることが確認できた．



(a) 空圧印加前



(b) 空圧印加後

図 36: 内径 3 mm の人工筋肉

5.2 発揮張力

図 37, 38 のような装置を使い発揮張力の測定を行った．またケブラーラインを通すために人工筋肉の先に図 39 を取り付けた．穴の直径は 3 mm ほど空いている．測定に必要な物品は以下の通りである．

- 作製した人工筋肉
- 万力
- S 字フック
- 電子天秤 I 2000

測定手順を以下に示す．

1. 作製した人工筋肉にケブラーラインを通す

2. S字フックを取り付け電子天秤につなぐ
3. 糸にテンションがかかる位置で万力で人工筋肉を固定する
4. 電子天秤に電源をつけ, 0点合わせをする
5. 膨張の最大まで印加し, その時点での値を読み取る

上記の手順で測定を行うと0.07Mpa印加した際に膨張が最大となり, その時点での電子天秤の値は138.4 gとなった図40. このことから今回作製した人工筋肉が138.4 gまで持ち上げ可能な特性を有していることが確認できた. . .

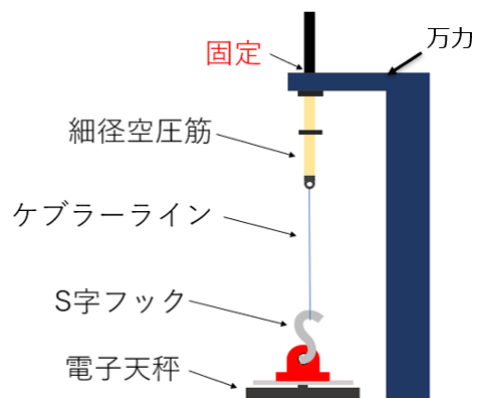


図 37: 測定装置のイメージ

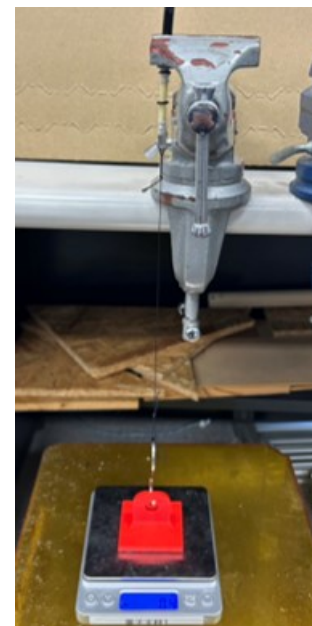


図 38: 測定装置



図 39: 開発した器具



図 40: 電子天秤の値

6 考察

一般的な軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉においては、ゴムの膜厚は均一であり、その内部に縦糸が配置されていることが一般的である。本研究でも、なるべくゴム厚が均一になるよう、また糸がゴム膜の中に収まるよう作製方法を模索していった(図 41(a))。一般的な軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉においては、ゴムの膜厚は均一であり、その内部に縦糸が配置されていることが一般的である。本研究でも、なるべくゴム厚が均一になるよう、また糸がゴム膜の中に収まるよう作製方法を模索引き起こす結果となった。一方で、空圧筋として動作を確認した作成方法 5 で作製した空圧筋(図 41(a))においては、糸はゴム膜の中央には配置されておらず、糸と糸の間に薄いゴム膜を張るような構成となった。このことにより、膨張がスムーズに行われ、空圧筋が高い柔軟性を持ちながらも、必要な強度を確保することができた。よって、今後より細径な空圧筋を開発する上ではゴム膜の厚さと糸配置のバランスを取ることが重要であり、(図 41(b)) のようにひだ状に作っていくことが有効であると考えられる。



(a) 作成方法 4



(b) 作成方法 5

図 41: 作成した細径空圧筋の断面

7 結言

本研究では、超細径空気圧人工筋肉の開発を目的として、内径 5 mm と内径 3 mm の軸方向繊維強化型人工筋肉の開発し、評価実験を通じて収縮率、発揮張力を通じて超細径空気圧人工筋肉の適切な作製方法、断面について考察をした。本稿ではまずゴム風船の作製を通じて適切な凝固液の乾かし方、液体ゴムに浸す時間について確認した。次に内径 5 mm の人工筋肉の開発をし、作製方法の確立を行った。その後内径 3 mm の人工筋肉の開発を行い細径化を行う際の適切な作製方法、糸の配置、断面について検討した。最後に評価実験を行い内径 3 mm の人工筋肉の収縮率、発揮張力について確認した。

今後はより細径な軸方向繊維強化型人工筋肉を目指すとともに性能の向上に取り組む予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの助言、提案、活発な議論をしていただいた中西大輔先生に心から感謝申し上げます。また、様々なご助言やご協力をいただきました中西研究室の皆様に、心から感謝いたします

参考文献

参考文献

- [1] Helmut Hauser. Soft robotics: An introduction to the special issue. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 43, No. 3, pp. 28–29, 2023.
- [2] 鈴森康一. 細径人工筋が切り拓くソフトロボティクス. 計測と制御, Vol. 56, No. 4, pp. 243–247, 2017.
- [3] Mahmoud Elsamanty, Mohamed A. Hassaan, Mostafa Orban, Kai Guo, Hongbo Yang, Saber Abdrabbo, and Mohamed Selmy. Soft pneumatic muscles: Revolutionizing human assistive devices with geometric design and intelligent control. *Micromachines*, Vol. 14, No. 7, 2023.
- [4] 中西大輔, 長谷川侑大, 浪花啓右, 杉本靖博. 細径空圧筋を用いた羽状筋および外骨格生物模倣ロボットの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2024, pp. 2A1–L08, 2024.
- [5] Daoxiong Gong and Jianjun Yu. Design and control of the mckibben artificial muscles actuated humanoid manipulator. In Adrian Olaru, editor, *Rehabilitation of the Human Bone-Muscle System*, chapter 3. IntechOpen, Rijeka, 2022.
- [6] Jonathan P. King, Luis E. Valle, Nishant Pol, and Yong-Lae Park. Design, modeling, and control of pneumatic artificial muscles with integrated soft sensing. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4985–4990, 2017.