

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	2
3	細径 MPA の開発	3
3.1	風船作製	3
3.1.1	作製手順	3
3.1.2	問題点の改善	5
3.2	内径 5 mm の人工筋肉の作製	6
3.3	内径 3 mm の人工筋肉の作製	8
3.3.1	作製方法 1	8
3.3.2	作製方法 2	8
3.3.3	作製方法 3	9
3.3.4	作製方法 4	10
3.3.5	作製方法 5	11
4	評価実験	12
4.1	収縮率	12
4.1.1	内径 5 mm の測定	12
4.1.2	内径 3 mm の測定	12
5	結言	13
6	謝辞	14

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．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，様々な応用がされている．人工筋肉の中でも，細径人工筋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 [?]. しかし，現状においては人工筋肉の細径化に課題があり，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．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 [?], 内径 3 mm 以下の人工筋肉の作成はスリーブとゴムチューブの作成が困難な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 [?] 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, 3 mm の人工筋肉の作製について説明する．最後に 4 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，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．

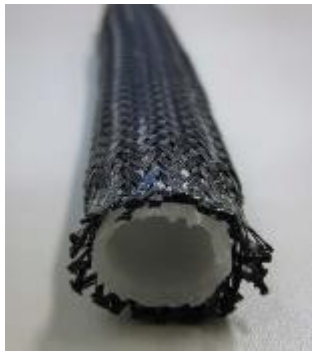
2 空気圧人工筋肉

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 (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。しかし図 1 に示すような従来の直径が数 10 mm の MPA は、さらなる高集積化や小動物型や昆虫型などの非常に小さなロボットへの応用を考慮した場合、そのサイズは大きすぎる。

2.2 軸方向繊維強化型人工筋肉

本研究で開発する超細径空圧筋のベースとなる、軸方向繊維強化型人工筋肉の動作原理を図 1 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 [?].



(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 [?]

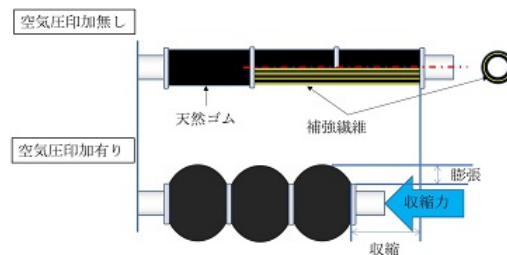


図 2: 軸方向繊維強化型人工筋肉の仕組み [?]

3 細径MPAの開発

3.1 風船作製

中西研究室では液体ゴム(前加硫ラテックス)を用いて細径MPAを作製したことがないので、研究の第1歩として風船作製を行った。

3.1.1 作製手順

図3に作製に必要な物品、図4に作製手順、図5に作製した風船を示す。必要な物品は以下の通りである。

- 鉄棒(内径5 mm, 3 mm)
- 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

以下、作製手順である。

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(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)
3. 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)
4. 凝固液に約5秒浸して取り出す
5. 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
6. 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)

以上が本研究で用いる風船の作製手順である。



図 3: 使用器具

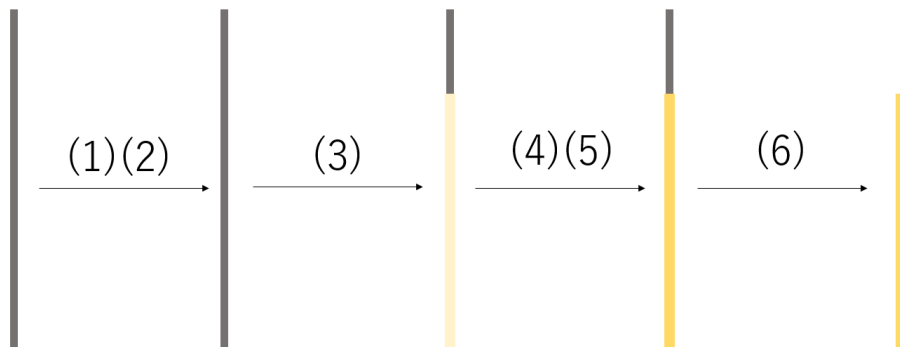


図 4: 風船の作製手順



図 5: 作製した風船

3.1.2 問題点の改善

上記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以下の方法を行った．まずゴム膜が硬すぎて膨張させることにかかる印加圧力が多く破裂が起きやすい問題に対して，ゴムと水の比率を変化させることで解決を行った．初めはREGITEX 液体ゴム (前加硫ラテックス) の原液のみで作製を行っていた．原液で作製を行うとゴム膜が硬すぎて図5のように破裂してしまった．そこで実際に売られている風船と同じ比率のゴム 60: 水 40 での作製，ゴム膜が形成されるギリギリの比率を調べるためにゴム 40: 水 60 での作製を行った．ゴム 60: 水 40 の割合で作製したゴム風船は図6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．一方でゴム 40: 水 60 の割合で作製したゴム風船はギリギリゴム膜を形成することができるが空圧を印加するとすぐに膨張が始まり，図7のように破裂が生じてしまった．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行った．図4を見れば分かるように鉄棒を液体ゴムに浸す時に1回で行っており，上下で液体ゴムに浸っている時間に差が生じてしまっていた．そこで上と下2回に分けることで解決をした．作製手順を以下と図8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 (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)
3. 鉄棒を液体ゴムに約5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)
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 (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)



図 6: ゴム 60: 水 40



図 7: ゴム 40: 水 60

3.2 内径 5 mm の人工筋肉の作製

超細径人工筋肉開発の開発に先立ち、まずは内径 5 mm の細径空圧筋の作製を行った。作製するにあたって糸を止めるための器具を開発した。開発した器具の写真を図 9, 10 使用方法について図 10 に示す。開発した器具は図 9 のように鉄棒を刺す穴の周りに 8 つの穴が空いている。中央の穴は鉄棒より少し広い 5.3 mm, 糸を通す穴は 1 mm で設計している。使用方法としては図 10 のように鉄棒に器具をはめナイロン糸を通す仕組みになっている。

図 11 に作製に必要な物品、図 12, 13 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)
- 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



図 8: 開発した器具

- ドライヤー Panasonic EH-Ne13
- 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 0.4 mm

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PPXを少し塗り、固定する)
2. ナイロン糸を器具に通す

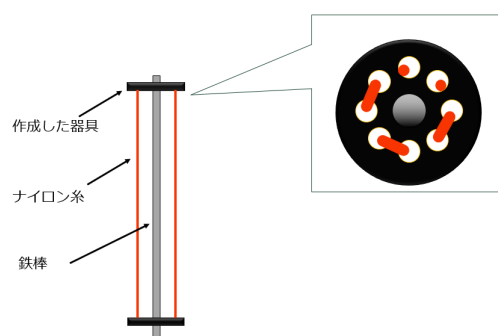


図 9: 使用方法

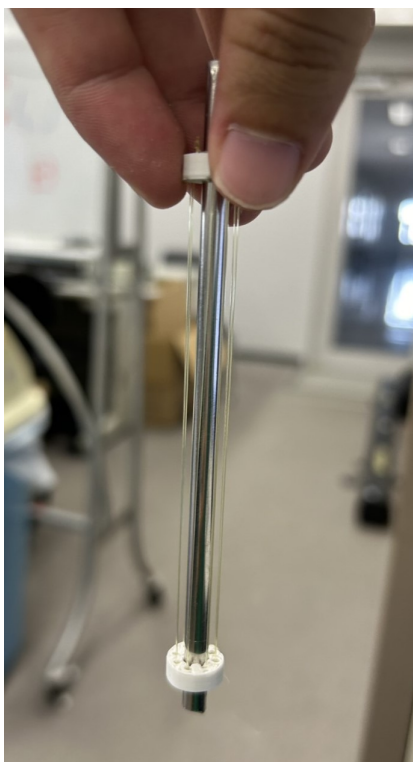


図 10: 使用方法

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. ドライヤーで凝固液の水滴がなくなるまで乾かす
7. 凝固液に約5秒浸して取り出す
8. 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
9. 3時間程部屋で乾かしたら鉄棒からゴム膜をとる

以上が本研究で作製した内径5 mmの作製手順である．作製した内径5 mmの人工筋肉を図14に示す．

3.3 内径3 mmの人工筋肉の作製

中間発表までの研究によって、内径5 mmの人工筋肉の作製に成功した(図14)．そこでさらに細い内径3 mmの人工筋肉の開発に取り組んだ．開発においては、中間発表までの研究に確立した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．

3.3.1 作製方法1

作製方法1では中間発表の時と同様、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．作製手順を図15、作製した人工筋肉を図16に示す．内径が小さくなったことで図16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、図17のように空圧印加時に破裂しやすくなってしまった．

3.3.2 作製方法2

作製方法3では糸同士の間隔が一定になるように図18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19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20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。

3.3.3 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21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
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 22 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。

3.3.4 作製方法 4

糸を入れてないときは層ができてなかったのですが、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と考えた。図 23 に作製に必要な物品、図 24 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

以下、作成手順である

1. 糸を図 25 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
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。また今回からオープンを使用して乾燥を行った。図 26 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。

3.3.5 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27, 28に示す。

作製方法を以下に示す。

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. 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29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。

4 評価実験

4.1 収縮率

作製した内径 5 mm, 3 mm の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 30 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 5 mm, 3 mm)
- オイルレス エアーコンプレッサー 39 L

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

4.1.1 内径 5 mm の測定

図 31, 32 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．

4.1.2 内径 3 mm の測定

図 33, 34 に今回作製した内径 3 mm の人工筋肉を示す．上記の方法で空圧を印加すると 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．

5 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。その結果、細径な空圧筋においては、糸を内包するほどのゴム厚はむしろ膨張を妨げ、また必要な印加圧力が高まることで破裂を引き起こす結果となった。一方で作製方法 5 では、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。このことから細径化していくには、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ひだ状に作製していくことが有効だと考えられる。

6 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