

# 伸張結晶化による空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化

Prolonging the lifetime of pneumatic rubber artificial muscle by strain-induced crystallization

精密工学専攻 小島 明寛  
Akihiro Kojima

## 1. 緒言

近年の少子高齢化により労働人口が減少して、労働者一人当たりの負担が増大している。厚生労働省[1]によると、団塊の世代が60歳に達した2007年以降、労働人口は減少傾向にある。また、高齢者の生活支援そのものに必要な労働力も、2013年には171万人、2025年には253万人に達すると想定されている。

労働力不足に対するアプローチとして、労働効率の改善がある。現在、労働の自動化・機械化による効率改善が盛んに行われている。しかし、農業・製造業・介護の分野は、作業効率やスペース不足等の理由から自動化・機械化が困難な作業が存在し、労働力不足により一人あたりの作業量が増加している。そのため、労働負荷の軽減及び労働効率の改善のために身体装着型アシスト装置の研究開発が盛んに行われている。従来のモータやシリンダのようなアクチュエータは重厚長大で剛性が高く、大きな力を出力するなど人間ができない作業を実現するのが主な役割であった。しかし、上記の身体装着型アシスト装置では、柔軟、軽量、小型といったような人間親和性の高いアクチュエータが求められている。

近年では人間親和性の高いアクチュエータとしてソフトアクチュエータの研究開発が盛んに行われている。ソフトアクチュエータ駆動原理などにより様々なタイプが開発されているが[2][3]、その中でも空気圧ゴム人工筋肉は、すでに製品化された例があるなど[4]、出力密度の高さや安定した動作から、最も実用的なソフトアクチュエータの一つである。空気圧ゴム人工筋肉は、ゴムなどの弾性構造体に空気等の作動流体を注入して動力を得るアクチュエータである。

その中で著者らは、高出力、高変位な空気圧ゴム人工筋肉として、軸方向繊維強化型人工筋肉を開発した。本人工筋肉は原理的にゴムの大変形を利用しており、収縮特性に優れる一方で疲労寿命が短く、実用化に向けた課題となっていた。

本研究ではこのような背景から、収縮特性に優れた軸方向繊維強化型人工筋肉の実用化に向けて、長寿命化に取り組んだ。

## 2. 軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズム

### 2.1 軸方向繊維強化型人工筋肉の構造

図1に軸方向繊維強化型人工筋肉の構造を示す。軸方向繊維強化型人工筋肉は内層ゴムチューブを軸方向にひきそえた補強繊維で覆い、さらにその上を外層ゴムで覆った構造となっている。人工筋肉のゴム材料としては、低圧で駆動できるように柔軟で伸びが大きい天然ゴム(NR)が使用されている。補強繊維としては、高張力、耐熱性、寸法安定性、耐薬

品性などの特性を持つアラミド繊維やカーボン繊維が使用されている。軸方向繊維強化型人工筋肉に空気圧を印加すると、軸方向にひきそえた補強繊維の拘束により半径方向にのみ膨張して軸方向には収縮する。その際の収縮力をアクチュエータの出力として使用することができる。

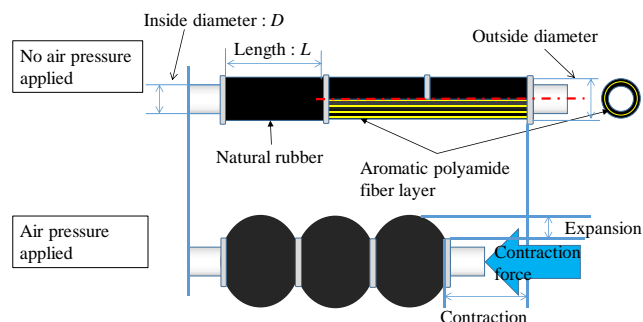


Fig.1 Configuration of the straight-fiber-type artificial muscle.

### 2.2 収縮特性

形状(内径:10 [mm], 外径:14 [mm], 長さ:180 [mm])を揃えた際の軸方向繊維強化型人工筋肉と McKibben 型人工筋肉の自然長での印加圧力と収縮力の比較(図2)を示す[5]。ここで図2の収縮力は、人工筋肉の長さを初期長さに固定して、空気圧を印加した際の発生力を測定した等尺性収縮によるものである。図から、同一圧力では軸方向繊維強化型人工筋肉の方が、収縮力が大きく、McKibben 型が最大で約500 [N]に対して、軸方向繊維強化型は最大で約2,000 [N]と4倍程度の収縮力となった。これから同一形状では軸方向繊維強化型の方が大きな出力を得られることがわかる。また、同一出力では軸方向繊維強化型の方がより低圧で出力することができる。軸方向繊維強化型では内筒にかかる空気圧の全体で収縮力に寄与するため高出力及び高変位となると考えられる。

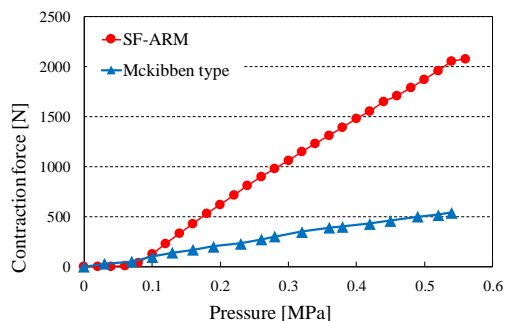


Fig.2 Relationship between pressure and contraction force.

### 2.3 破壊メカニズム

軸方向繊維強化型人工筋肉の故障モードとしては、ゴムの

大変形部の破壊(図 3)や繊維の破壊, ゴムの劣化による破壊及び製造上の不具合などによるものがあり, その中でも大変形, 繰返し動作に起因するゴムの破壊が最も頻度が高くなっている.



Fig.3 Failure mode of straight-fiber-type artificial muscle.

### 3. $L/D$ 比の変更による寿命, 収縮特性への影響評価

#### 3.1 有限要素法による変形解析

前述のように軸方向繊維強化型人工筋肉は, 半径方向に補強繊維が入っていないため, 空気圧を印加した際にゴムに大きなひずみがかかり, その部分から破壊する. 膨張時のゴム材料のひずみを把握するため, また,  $L/D$  比を変更することでゴム材料にかかるひずみへの影響を確認するために, 有限要素法による変形解析を行った.

解析ソフトウェアとして, ANSYS 15.0 を使用した. 解析の対象とする軸方向繊維強化型人工筋肉のモデルは, 内層ゴムチューブ内径 10 [mm], 厚さ 1 [mm], 補強繊維, 外層ゴムチューブ内径 12 [mm], 厚さ 1 [mm]とした. 内層ゴムチューブの内面から均等に圧力を印加して, その際の収縮率及びゴムのひずみを算出した(図 4). 図 4 は青からオレンジになるにつれてひずみが大きくなっている. これから中央付近が最もひずみが大きくなることがわかる. 図 5 は人工筋肉の内径  $D$  と稼動部長さ  $L$  のアスペクト比  $L/D$  を 2 から 8 まで変更した際の収縮率とゴムにかかる最大ひずみの解析結果である. 図より収縮率が大きくなるにつれてゴムのひずみも大きくなることがわかる. 一方で, アスペクト比が小さくなると最大収縮率及びゴムに発生するひずみが小さく長寿命化が期待できるが, その分収縮特性については低下する. 収縮特性を向上させるためにはアスペクト比を大きくする必要はあるが, その分ゴム材料にかかるひずみが大きくなり, 寿命が短くなる.

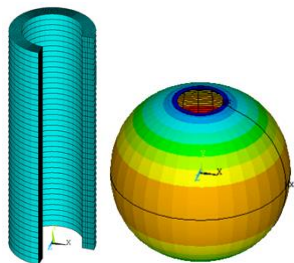


Fig.4 FEM result of straight-fiber-type artificial muscle.

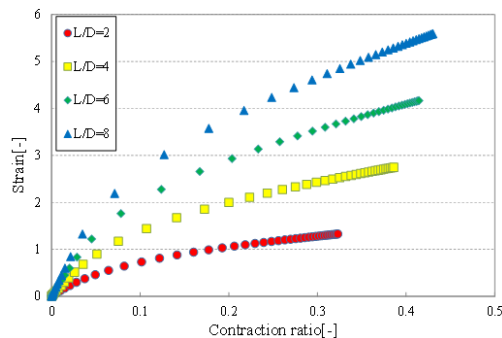


Fig.5 Relation between contraction and rubber strain.

#### 3.2 $L/D$ 比の変更による寿命評価

3.1 節の解析結果から, アスペクト比を小さくすることで, ゴムにかかるひずみを低減できることがわかった. そこで, 実際にアスペクト比を変更した軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し, 疲労寿命の測定を行った. まず, 軸方向繊維強化型人工筋肉の長さ  $L$  及びチューブ径  $D$  とした際のアスペクト比  $(L/D)$  2 から 9 に対応する軸方向繊維強化型人工筋肉を 16 種作製した(表 1). 次に, 作製した軸方向繊維強化型人工筋肉を繰返し加圧し, 破壊に至るまで耐久試験を実施した. 予め測定した軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮率((無印加時全長-膨張時全長)/無印加時全長)が 20 [%]になる圧力を 10 [s]周期で印加して, 破壊までの繰返し伸縮の回数を測定した. また, 収縮率 20 [%]時の最大膨張径(外径)を測定して, 無加圧時の外径との比を最大膨張率とした. この最大膨張率は外面ゴム表面の周方向最大伸びに相当する. 本試験では, ゴムチューブ以外での破壊を避けるため無負荷で試験を実施した. 図 6 に破壊に至る繰返し加圧回数に対する周方向最大伸びの結果を示す. グラフより疲労寿命の対数と膨張率には線形的な関係性が得られた. そのため, 任意の軸方向繊維強化型人工筋肉の形状と使用状態から予測可能な膨張率を用いて, 疲労寿命の予測ができると言える. また, アスペクト比を小さくすることでゴムの伸びを抑えることができ寿命を向上させることができる. また,  $L=43$  及び  $D=25$  の人工筋肉の繰返し伸縮回数が 12.7 [万回]と最も長寿命であった.

Table1 Specifications of the samples.

No.	Inside diameter [mm]	Outside diameter [mm]	Length [mm]	$L/D$
1	10	16	87	9
2	10	16	79	8
3	10	16	77	8
4	10	16	75	8
5	15	21	87	6
6	15	21	90	6
7	15	21	58	5
8	15	21	57	4
9	20	26	51	3
10	20	26	62	3
11	20	26	48	2
12	20	26	90	5
13	20	26	89	4
14	25	31	84	3
15	25	31	79	3
16	25	31	42	2

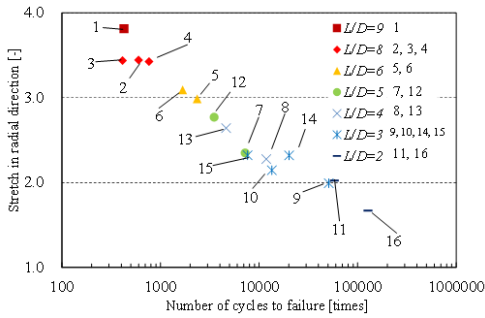


Fig. 6 Fatigue life of straight-fiber-type artificial muscle.

### 3.3 L/D比の変更による収縮特性の評価

3.3 節では、軸方向繊維強化型人工筋肉の疲労寿命を延ばすために内径及び稼動部長さを変更した結果、内径が大きく稼動部長さが短いほど(アスペクト比が小さいほど)、ゴムにかかるひずみを低減することができるため、長寿命であることを確認した。一方で、アスペクト比が小さくなると、軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性が低下することが予測される。以上から、アスペクト比変更による軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性への影響を確認するために、軸方向繊維強化型人工筋肉の等尺性収縮力の測定を行った。図7に内径を25 [mm]に固定して、稼動部長さを30から60 [mm]に変化させた際の等尺性収縮力の測定結果を示す。同一内径では稼動部長さが長い方が(アスペクト比が大きい)等尺性収縮力が大きいという結果となった。稼動部長さが長くなることで円筒部の受圧面積が大きくなり、その結果出力も大きくなったと考えられる。

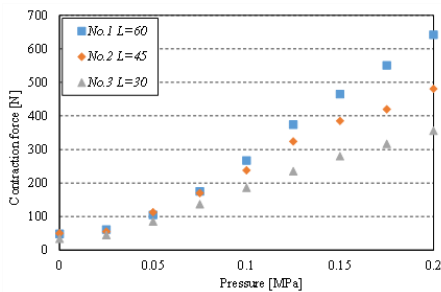


Fig. 7 Comparison of pressure and contraction force.

## 4. 与圧印加による長寿命化

### 4.1 伸張結晶層による亀裂進展の阻害

高分子の破壊プロセスは、外部荷重による局所的な分子鎖の切断(亀裂の発生)、亀裂の成長、最終的な破断、となっている。亀裂の発生、成長のどちらかを抑制することができれば、長寿命化を図ることができると考えられる。本章では図8に示すようにゴムの伸張結晶化特性に着目し、結晶層により亀裂の成長を阻害し、軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化検討をした。

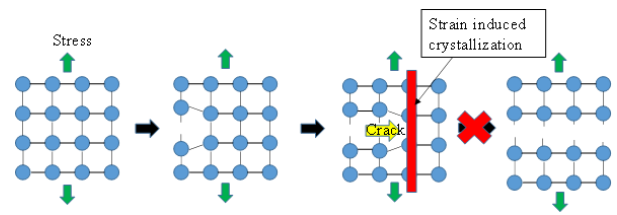


Fig. 8 Crack extension inhibition model.

### 4.2 与圧印加による人工筋肉の寿命評価

伸張結晶化による軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化効果を確認するために耐久性試験を実施した。伸張結晶性のあるNRと伸張結晶性のないSBRで作製した軸方向繊維強化型人工筋肉を用い、伸張結晶性の有無による疲労寿命への影響の確認を行った。耐久性試験は、予め最低収縮率及び最高収縮率となる圧力を測定し、その圧力を6秒周期で印加し、軸方向繊維強化型人工筋肉が破壊するまでの伸縮回数を測定した。ここで、本試験における破壊とは亀裂の発生、成長などにより、6秒周期で所定の伸縮動作ができなくなる状態をさす。表2に試験サンプルの詳細を示す。内径20 [mm]、外径24 [mm]、長さ80 [mm]の軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し、収縮率を0-20 [%]及び2.5-22.5 [%]の範囲で稼動させて、破壊するまでの繰返し伸縮回数を測定した。試験結果を図9に示す。試験は各5回行い、平均値、最大値及び最小値を示した。図より収縮率0-20 [%]での耐久性はNRとSBRに大きな差は見られないが、収縮率2.5-22.5 [%]ではNRの方が大幅に長寿命であった。これは伸張結晶化により亀裂先端に結晶層が形成され、亀裂の成長が抑制されたものであると考える。

Table 2 Sample specification.

No.	1	2	3	4
Rubber	NR	NR	SBR	SBR
Inside diameter [mm]	20	20	20	20
Outside diameter [mm]	24	24	24	24
Length [mm]	80	80	80	80
Aspect ratio [-]	4	4	4	4
Contraction range [%]	0-20	2.5-22.5	0-20	2.5-22.5
Max applied pressure [MPa]	0.19	0.20	0.15	0.16
Min applied pressure [MPa]	0	0.04	0	0.03

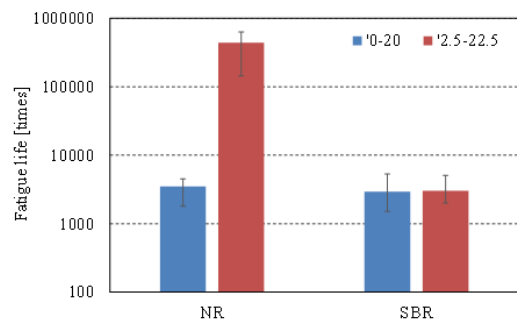


Fig. 9 Results of fatigue life test.

## 5. 長寿命かつ高出力を目指したくびれ型人工筋肉の提案

### 5.1 くびれ型人工筋肉

4章から、ゴムに常に一定以上のひずみがかかる状態を維

持することで人工筋肉の長寿命化を図ることがわかっている。これまででは、ひずみを維持するために伸長時(空気圧排出時)でも空気圧を0としない方法(与圧印加)で稼働させていた。しかし、本方式では、伸長時にも圧力が印加されて人工筋肉が半径方向に膨張した形状となっており収縮力の低下が見られた。

そこで、伸張結晶化による長寿命化効果を維持しつつ、収縮力を低下させないくびれ型人工筋肉の提案を行う。図 10 にくびれ型人工筋肉の概要を示す。くびれ型人工筋肉は通常の形状の人工筋肉に口径の大きなターミナルを取り付けることで端部を拡張し、中央がくびれた形状としている。これに空気圧を印加することで中央部が膨張して、フラットな形状となる。さらに空気圧を印加することで通常の人工筋肉と同様に半径方向に膨張して、軸方向に収縮する。

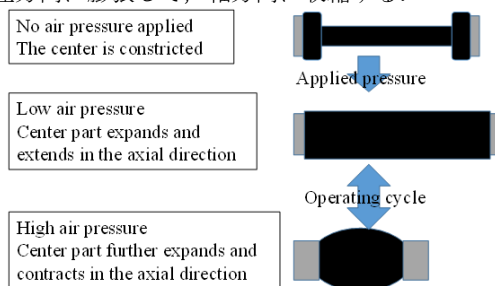


Fig.10 Artificial muscle overview.

## 5.2 くびれ型人工筋肉の寿命評価

耐久性試験は、予めフラット形状となる圧力及び収縮率 20 [%]となる圧力を測定して、その圧力を 6 秒周期で印加し、人工筋肉が破壊するまでの繰返し回数を測定した。試験サンプルを表 3 に示す。内径 10 [mm], 外径 16 [mm], 長さ 55 [mm] の人工筋肉を作製し、収縮率を 0-20 [%]の範囲で稼働させて、破壊するまでの回数を測定した。試験結果を図 11 に示す。比較として与圧を印加した場合の耐久性試験結果を示す。試験結果からくびれ型人工筋肉でも与圧を印加することで長寿命化を図ることができている。

Table 3 Sample specification

No.	1	2	3	4
Rubber	NR	NR	NR	NR
Terminal size [mm]	10	10	20	20
Pre pressure	×	○	×	○
Inside diameter [mm]	11			
Outside diameter [mm]	16			
Length [mm]	55			
Aspect ratio [-]	5			
Contraction range [%]	0-20	2.5-22.5	0-20	0-20

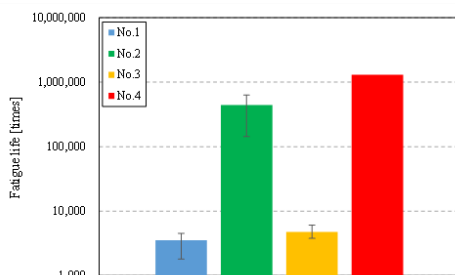


Fig.11 Results of fatigue life test.

## 5.3 くびれ型人工筋肉の収縮力測定

本節ではくびれ人工筋肉の等尺性収縮力の測定を行った。試験サンプルは 5.2 節の表 3 と同様である。試験結果を図 12 に示す。試験結果から、No.1 と No.3 は同等であり、No.2 は低く、No.4 は高かった。No.1 及び No.3 は通常の内径 10 [mm] の人工筋肉の収縮力であり、No.2 は与圧を印加することで半径方向に膨張し収縮力が低下している。また、No.4 は口径の大きなターミナルを取り付けることで見かけ上内径が大きくなっているため半径方向の受圧面積が増加して、収縮力が増加したものであると考える。

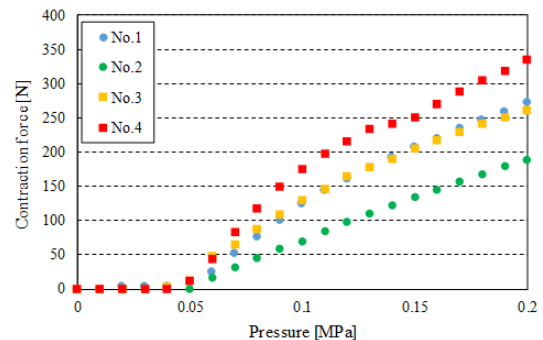


Fig.12 Results of isometric contraction force measurement.

## 6. 結言

本論文では、空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化を目指して、L/D 比の検討、伸張結晶化の検討及びくびれ型人工筋肉の提案を行った。その結果、これまでの 100 倍程度の長寿命化を図ることができた。今後は本成果を人工筋肉の様々なアプリケーションに適用していく予定である。

## 7. 参考文献

- [1] 平成 23 年版 労働経済の分析—世代ごとにみた働き方と雇用管理の動向—, 第 1 章 労働経済の推移と特徴, 第 1 節 雇用、失業の動向, 厚生労働省労働経済白書 <http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/11/>
- [2] CMC 出版, “実用化に向けたソフトアクチュエータの開発と応用・制御技術” (2017), pp.1-7.
- [3] 山野美咲, 小川尚希, 橋本稔, 高埜緑, 平井利博, “収縮型 PVC ゲルアクチュエータの構造と駆動特性”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.7(2009), pp.718-724.
- [4] Wakimoto, S., Suzumori, K. and Takeda, J., Flexible artificial muscle by bundle of McKibben fiber actuators, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (2011), pp.457-462.
- [5] Nakamura, T., Experimental comparison McKibben type artificial muscles and straight fibers type artificial muscles, SPIE int. conf. Smart structures, Devices and Systems III, 2006, pp.641424.