

ワルシャワ型人工筋肉の信頼性向上 および製作コスト低減に関する研究

Study on improvement of reliability and reduction of fabrication cost of Warsaw-type artificial muscle

○五十嵐 凜*, 瀬野 航生*, 戸森 央貴*

○ Rin Igarashi*, Kosei Seno*, Hiroki Tomori*

* 山形大学

*Yamagata University

キーワード： 空気圧人工筋肉 (pneumatic artificial muscle), ワルシャワ型人工筋肉 (Warsaw-type artificial muscle), ソフトアクチュエータ (soft actuator)

連絡先： 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 戸森研究室
戸森 央貴, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tomori@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

本研究室では空気圧人工筋肉を用いたアプリケーションの開発を行っている。空気圧人工筋肉は、一般的な電気モータや空気圧シリンダと比較した際に以下のような点で優れている。

- 可変な粘弾性特性を有し、バックドライバビリティが高い。
- 摺動部がなく密閉されており、防水性・防塵性がある。
- 本体が軽量で、出力密度が高い。

このような特徴から、空気圧人工筋肉は障害物が多い環境や、水滴や塵が多く汚れやすい環境での運用に向いている。また、安全性が求められる協働ロボットや人間が着用する装具への応用が期待されている¹⁾。

本研究室ではこれまで、空気圧人工筋肉を搭載したラ・フランス収穫用ロボットアームや農業用アシストスーツの開発を行ってきた。

本稿で述べる内容は、現在瀬野氏と共同で開発を進めている空気圧人工筋肉を用いたロボットアームユニットに関連したものである。この研究は先に述べたラ・フランス収穫用ロボットアームから発展し、応用先を広げるためのものである。

ロボットアームユニットは人工筋肉によって駆動される回転ジョイントとリンクを持ち、ユニットを複数組み合わせることで一つのロボットアームを構成する (Fig.1)。目的に合わせてロボットアームユニットの出力特性を調整し組み合わせることによって、必要な自由度や出力が得られるようになると思う。

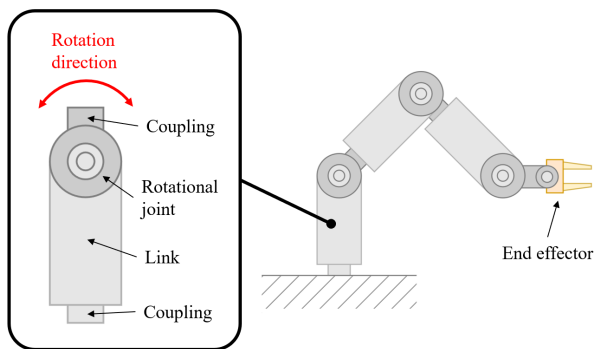


Fig. 1 Robot arm unit concept.

この構想をもとに製作したロボットアームユニットの第1試作機を Fig.2 に示す。アクチュエータは拮抗構造に配置した2本のワルシャワ型人工筋肉であり、それぞれに印加する空気圧を電空レギュレータで調整することでプーリを回転させる。さらに、回転角度を計測するためのエンコーダや、制御や通信を行うためのマイコンと電子回路を搭載する。

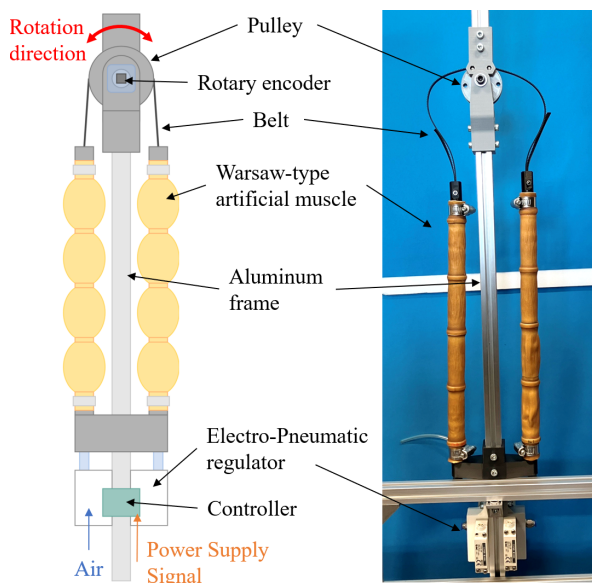


Fig. 2 Components of the robot arm unit and the first prototype.

開発するロボットアームおよびロボットアームユニットは、目的に合わせてカスタマイズできるように、構成する部品の多くを共通化し汎用性を持たせた設計をする。一方で、人工筋肉の長さやプーリ半径など、出力特性（回転角度やトルクなど）に関わる部品は変更に対応でき

なければならない。さらに、同じユニットを複数製作した際に個体差が出ないように留意する必要がある。

ロボットアームユニットの開発に際して、共同研究者の瀬野氏は人工筋肉の理論モデルに基づいた制御と実験を担当しており、著者は主に機械部品や電子回路の設計と製作、動作確認を行っている。

本稿では特に、ロボットアームユニットに搭載するワルシャワ型人工筋肉について述べる。これまで、ワルシャワ型人工筋肉を製作する場合、手作業による工程が多く非常に手間や時間がかかることや、製作者によって品質にばらつきが出てしまうという問題があった。品質の安定化はロボットアームユニットの開発に必要であり、製造工程の省力化が達成できれば今後の研究を加速させることにも寄与するため、従来の製法を見直して一部を自動化することにした。

2. ワルシャワ型人工筋肉の構造と動作原理

ワルシャワ型人工筋肉は1968年頃にポーランドで開発された空気圧人工筋肉であり¹⁾、後に中央大学中村研究室で軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉（Straight-fiber-type Artificial Muscles: SF-ARM）が開発され、安定性や出力が改善された^{2, 3)}。

ワルシャワ型人工筋肉はゴムチューブの軸方向に沿って繊維を挿入した構造である。本研究室では天然ゴムのチューブに繊維シートを巻き付け、さらに天然ゴムでコーティングして製作している (Fig.3)。

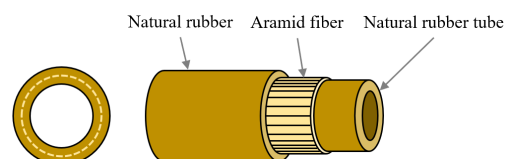


Fig. 3 Structure and cross section of Warsaw-type artificial muscle.

この構造により、ゴムチューブ内に空気圧を印加した場合、軸方向への膨張が制限されている。一方、径方向には膨張することができ、この力を繊維の張力を介して軸方向の収縮力に変換している (Fig.4)。軸方向の収縮力を取り出すことで、外部へ仕事を行うアクチュエータとして人工筋肉を利用することができる。

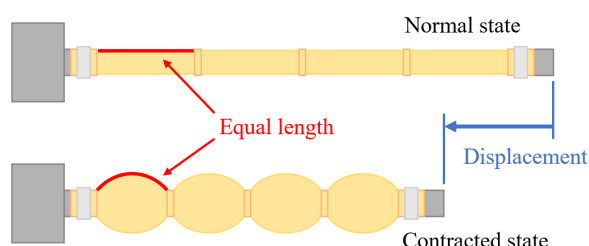


Fig. 4 Mechanism of Warsaw-type artificial muscles.

実際に使用する際には、両端に円柱状のターミナルをホースクランプで固定し、空気が漏れないようにする。片方のターミナルは中空になっているため、空気圧を印加したり排気したりすることができる。また、径方向に過剰に膨張することを防ぐために、一定間隔でリングを挿入する。

3. 人工筋肉の製法

Fig.5 に従来の製法で製作した人工筋肉（以下、従来型）と新しい方法で製作した人工筋肉（以下、新型）の概観を示す。

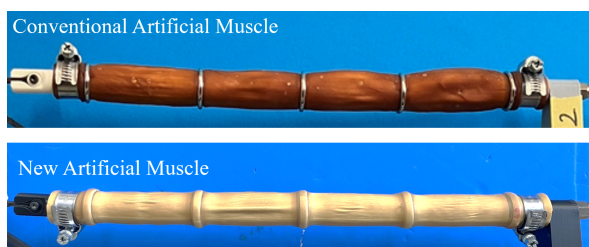


Fig. 5 Overview of conventional and new artificial muscles.

人工筋肉の製作のために用意する材料は次の通りである。ゴム液は2種類使用するが URACOL は接着剤として少量使用し、後述する繊維シートや表面のコーティングには L5000 を使用する。いずれも粘度の高い白色の液体状で、乾燥させることで茶色がかった透明になる。

- 天然ゴムチューブ
- アラミド繊維/ケブラー糸
- URACOL（ゴム液）
- L5000（ゴム液）
- 金属リング
- ターミナル
- ホースクランプ

繊維シートの材料として、従来型の人工筋肉では工業用のアラミド繊維を、新型の人工筋肉ではケブラーミシン糸を使用している (Fig. 6)。アラミド繊維は多数の繊維を束にしたものであり、断面形状は不定である。このため、押しつぶしてシート状にすることで、ある程度広い幅に繊維を分布させることができる。一方ケブラー糸は複数の繊維を撚ったものであり、直径 0.3[mm] と非常に細い。断面形状が安定しているため、機械による自動巻き取りが行いやすい。また、市販のミシン糸であるため工業用の繊維に比べて入手しやすい。

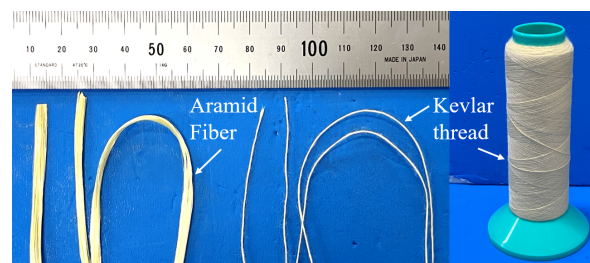


Fig. 6 Aramid fiber and Kevlar thread.

3.1 従来の製法

Fig.7 は従来の人工筋肉の製法を図にしたものである。

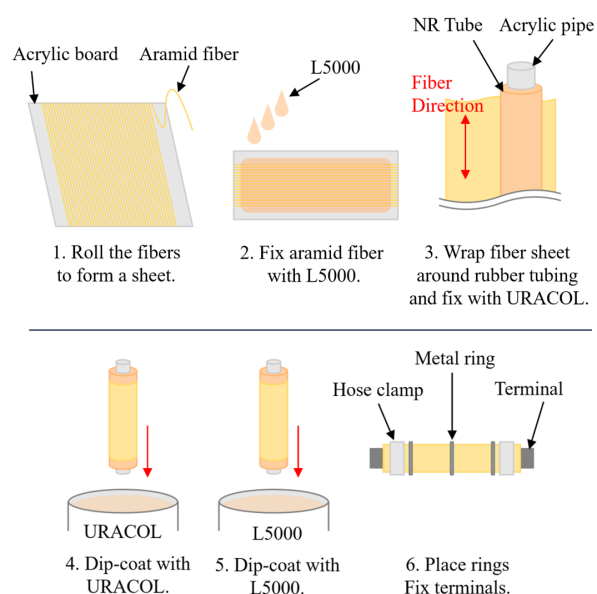


Fig. 7 Manufacturing process of old artificial muscles.

- 1) 板にアラミド繊維を巻き付け、シート状にする。
- 2) L5000 を塗布し、アラミド繊維のシートを固める。
- 3) ゴムチューブを繊維シートで包み、URACOL で接着する。
- 4) URACOL で表面をディップコートする。
- 5) L5000 で表面をディップコートする。
- 6) 金属リングを等間隔に配置し、両端にターミナルを固定する。

3.2 新しい製法

Fig.8 は新型の人工筋肉の製法を図にしたものである。

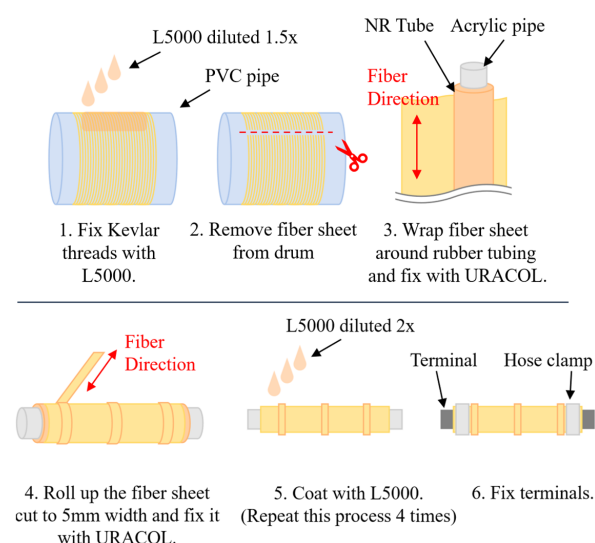


Fig. 8 Manufacturing process of new artificial muscles.

- 1) 機械を用いて回転ドラムにケブラー糸を隙間なく巻き付け、水で 1.5 倍に希釈した L5000 で固める。
- 2) 回転ドラムから繊維シートを取り外す。
- 3) ゴムチューブを繊維シートで包み、URACOL で接着する。
- 4) 従来の金属リングの代わりに 5mm 幅に裁断した繊維シートを等間隔に巻き、URACOL で接着する。
- 5) 水で 2 倍に希釈した L5000 をフローコートする。(4 回繰り返す。)
- 6) 両端にターミナルを固定する。

新しい製法については、従来の製法との変更点を詳しく説明する。

3.2.1 繊維シート製造装置

手順1で示した繊維シートの製法について、従来の方法では手作業に頼っていたため非常に時間のかかる工程であった。そこで、繊維を円筒に自動的に巻く装置を製作した (Fig.9)。装置は旋盤のようなチャックを装着した回転軸と、それに平行に設置した直動機構によって構成される。これらの回転軸や直動機構は、タイミングベルトとプーリーを介してステッピングモータによって駆動される。

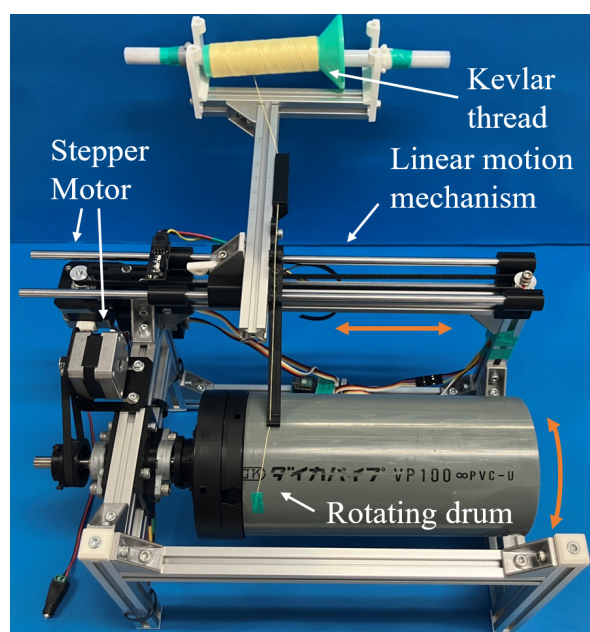


Fig. 9 Kevlar fiber sheet manufacturing machine.

使用する際には回転軸のチャックに塩ビ管を、直動機構にケブラー糸を取り付ける。糸の末端を塩ビ管に固定し、糸の張力を調整する (Fig.10)。スイッチを押すことで糸の巻取りが開始し、設定した巻数に達すると終了する。時間あたりの回転軸の回転量と直動機構の移動量は常に一定の割合となるようにプログラムで同期しているため、適切な比率に設定することで糸が回転方向に均一に並ぶ。

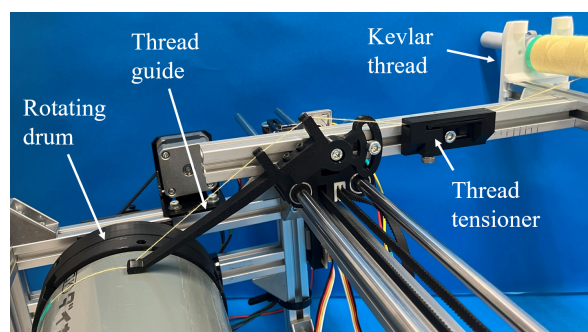


Fig. 10 Kevlar fiber feeder.

巻取りが完了したら質量比で 1.5 倍となるように水で希釈した L5000 を塗布し固める。水で希釈した理由は粘度を下げて扱いやすくするためと、繊維に染み込みやすくするためである。乾燥したら一部を切り開いて塩ビ管から取り外すことで繊維シートが完成する。下の図は糸を巻いて固めたもの (Fig.11) とそれを開いた繊維シート (Fig.12) である。

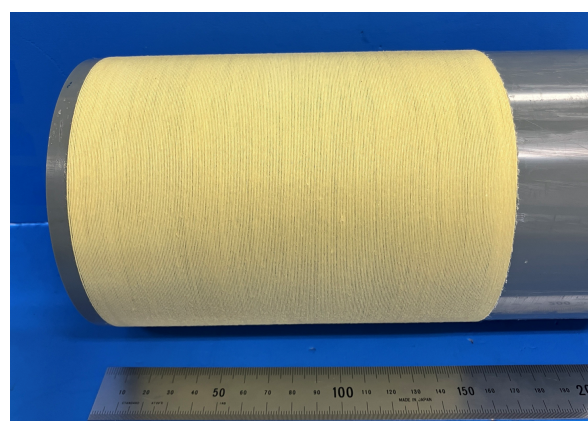


Fig. 11 Kevlar fiber roll.

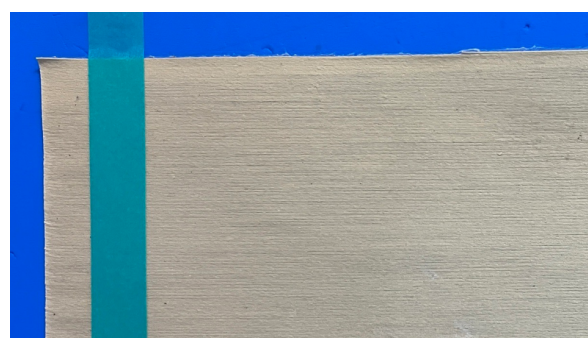


Fig. 12 Kevlar fiber sheet.

3.2.2 繊維リング

リングについて、従来はゴム液が全て固まったあとに金属製のリングを装着していた。金属リングは固定されていないため、一定間隔で装着しても空気を入れて人工筋肉が変形した際にずれてしまうという問題があった。また、人工筋肉の収縮と弛緩を数回繰り返すだけで金属リングが表面に食い込んで凹みができるため、ずれを修正しても凹みの位置に戻ってしまうという問題もある。

そこで、幅 5mm 程度に切った繊維シートをリングの位置に巻き付けて URACOL で接着し金属リングの代わりとした。後の工程で天然ゴムの表層とともに固めてしまうことで、リングのずれを回避できる。従来のリングと本研究で提案するリングを Fig.13 に示す。

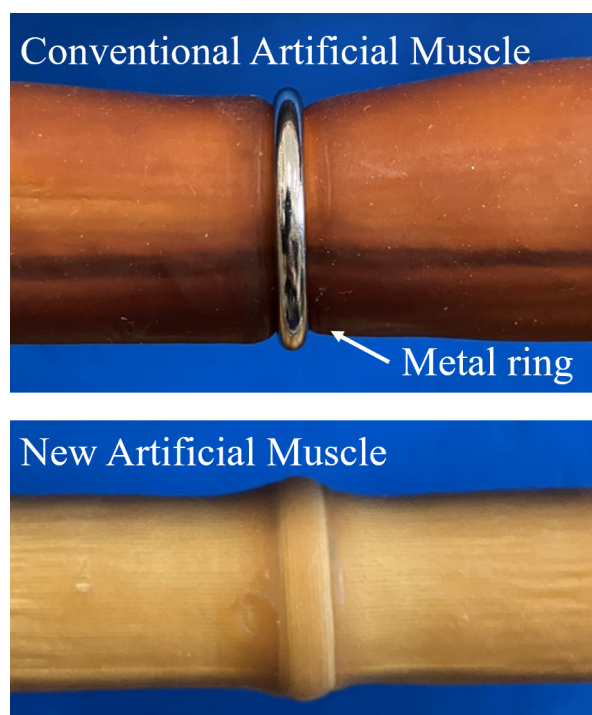


Fig. 13 Ring.

3.2.3 表層のコーティング

表層の L5000 によるコーティングは、繊維シートの保護のために行っている。従来のディップコートでは膜厚が厚く不均一であり、人工筋肉の特性に悪影響を与えていると考えた。また、ディップコートには深い容器が必要であり製作できる人工筋肉の長さに制限があった。

そこで、人工筋肉を水平にして低速回転させた状態で、質量比で 2 倍となるように水で希釈した L5000 を上からかけることを 4 回繰り返した。上からかけることで過剰なゴム液は下に落ちるため薄い膜を形成することが可能である。さらに、繰り返し回数を変化させることより任意の膜厚が得られる。従来の人工筋肉と新型の人工筋肉の断面図を Fig.14 に示す。

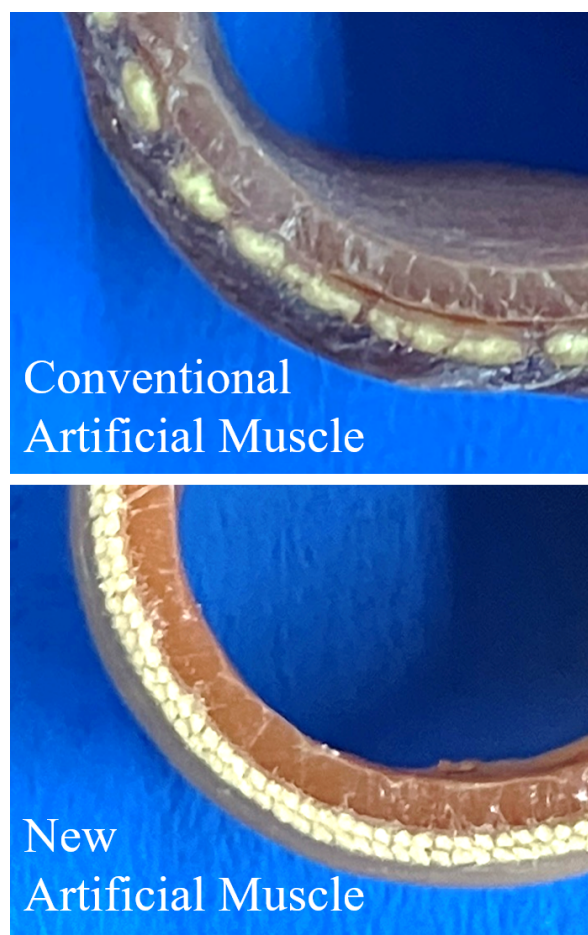


Fig. 14 Cross-sectional view.

4. 特性試験

4.1 試験方法

今回、従来の方法で製作した人工筋肉と新しい製法で製作した人工筋肉をそれぞれ2本ずつ用意した。それぞれの人工筋肉について特性試験を行った。実験装置を Fig.15 に示す。

人工筋肉の自由端に歯付ベルトを取り付け、歯付ベルトの端に錘を取り付けた。ベルトは歯付プーリに掛けられており、歯付プーリには磁気エンコーダが取り付けられている。これにより回転角を測定し、変位量を算出することができる。

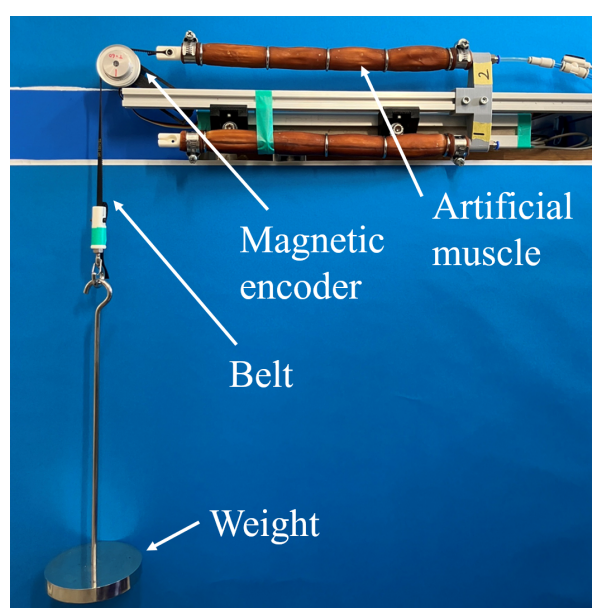


Fig. 15 Property test equipment.

実験のパラメータは次の通りである。

- 10 秒毎に空気圧を 0.01[MPa] 上昇させる。
- 圧力の最小値（開始時）は 0[MPa]、
最大値（終了時）は 0.25[MPa] とする。
- 負荷（錘の質量）は 1,2,4,6,8,10,12[kgf] とする。
- 1 秒毎に印加圧力や変位を記録する。

試験用の人工筋肉はすべて4節になるように製作した (Fig.16)。特性試験の前に自然長を測定した。各部の詳細な寸法を Table. 1 に示す。

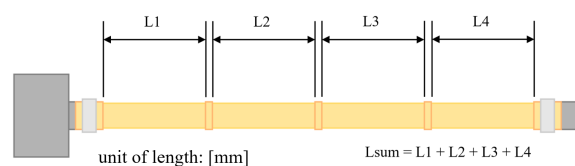


Fig. 16 Conceptual diagram of artificial muscle for property test.

Table 1 Natural length of artificial muscle.

Muscle	L1	L2	L3	L4	Lsum
Conv No1	67	62	61	65	255
Conv No2	68	61	62	68	255
New No1	65	64	64	64	257
New No2	66	66	64	66	262

試験により得られる生データの例を Fig.17 に示す。横軸に時刻、縦軸に変位（人工筋肉の収縮量）をとり、従来型と新型の人工筋肉についてそれぞれ1本ずつ表示している。なお、このときの負荷は 1[kgf] である。

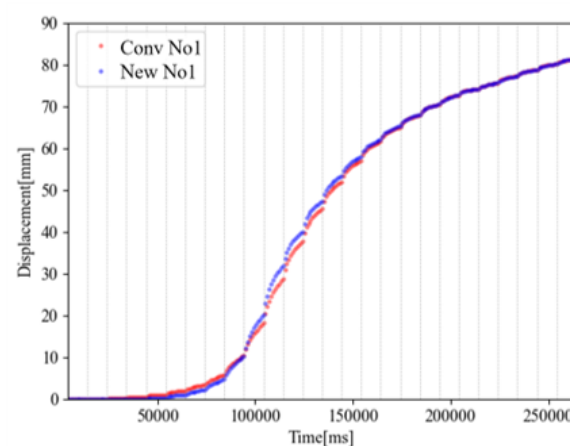


Fig. 17 Property test raw data.

4.2 試験結果および考察

生データから、印加圧力を変化させる直前の変位量を取り出し、その圧力のときの変位として扱った。すなわち、取り出したデータは圧力を変化させてから 10 秒後のものである。

Fig.17 より、10 秒間の待機ではまだ過渡応答と思われる部分もあるが、ロボットアームとして運用することを考えると安定するまで長時間待機することは現実的ではない。このため、今回は 10 秒間として実験を行った。

従来型と新型の人工筋肉について、それぞれ 1 本ずつを代表として Fig.18 に特性試験の結果を示した。グラフは横軸に印加圧力、縦軸に収縮率（自然長にしめる変位量の割合）をとり、負荷ごとにデータをプロットしている。

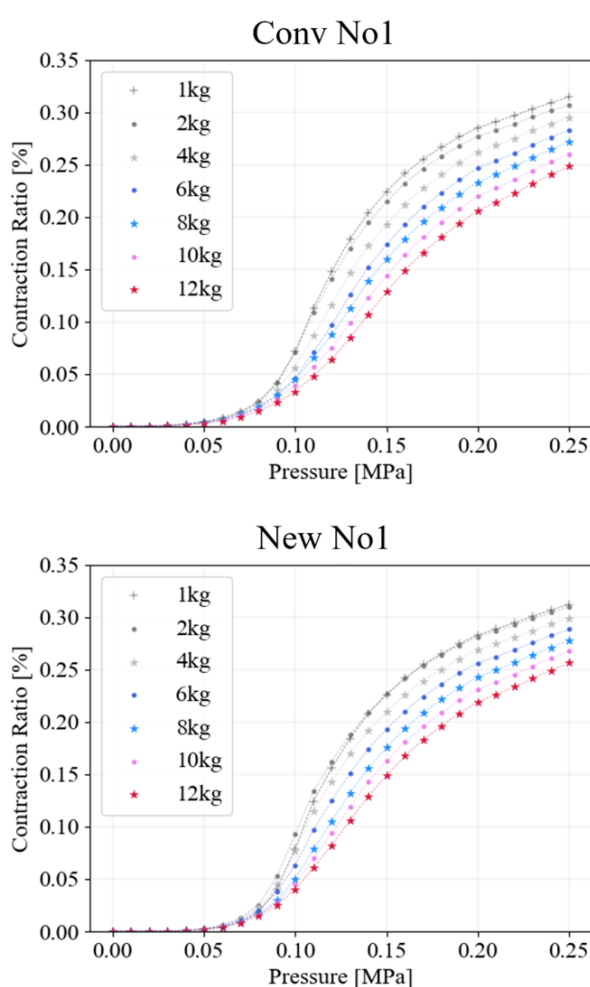


Fig. 18 Pressure-Contraction Ratio Diagram. (Top: Conv No1, Bottom: New No1.)

結果としては、従来型と新型の人工筋肉は大きく特性が変化することはなかった。定性的な評価となるが、新型の人工筋肉については製造工程の省力化や時間短縮が達成できた。このため、従来型の人工筋肉を置き換え可能と考える。

5. 結言

ワルシャワ型人工筋肉について、目標の一つであった製造工程の省力化を達成することができた。今後は複数の人工筋肉を製作し、品質のばらつきを評価していく予定である。

また、繊維シート作製の機械化を行ったことにより、人の手では難しい細い糸の利用が可能となった。今回使用したケブラー糸は工業用のアラミド繊維に比べて入手しやすいが、特殊な素材であるため依然として価格が高い。このため、ケブラー糸を一般的な糸に変更することでさらなる低コスト化が見込める。その際には、強度や出力特性が十分かを評価していく必要がある。

さらに、今回製作した機械の直動機構にゴム液を吐出するノズルを取り付けることで、繊維シートを固める作業についても自動化できると考えているため、これについても検討中である。

参考文献

- 1) 鈴森 康一: アクチュエータ技術から見たソフトロボティクス, 日本ロボット学会誌, **37**-1, 26/29 (2019)
- 2) 中央大学 中村研究室:
高出力型空気圧人工筋肉の開発,
<https://www.mech.chuo-u.ac.jp/nakalab/study/artificialmuscle/artificialmuscle.html>
(2024 年 12 月 9 日参照)
- 3) 中村 太郎: 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉の開発, 日本機械学会誌, **110**-1062, 73 (2007)
- 4) 山田 泰之, 小島 明寛, 奥井 学, 中村 太郎: 軸方向繊維強化型空気圧式ゴム人工筋肉の長寿命高効率化のための形状検討, 計測自動制御学会論文集, **54**-6, 557/563 (2018)