

# エアシリンダ型人工筋肉の提案とその出力特性の測定

Proposal of air cylinder type artificial muscle  
and measurement of its output characteristics

○学 三宅 悠暉 (金沢大) 正 平光 立拓 (金沢大)  
正 関 啓明 (金沢大) 正 辻 徳生 (金沢大)

Yuuki Miyake, Kanazawa University, y.miyake618@stu.kanazawa-u.ac.jp

Tatsuhiko Hiramitsu, Kanazawa University

Hiroaki Seki, Kanazawa University

Tokuo Tsuji, Kanazawa University

This paper presents air cylinder type artificial muscle and measurement of its output characteristics. First, the characteristics of conventional air cylinders are listed and some issues are discussed. To solve these problems, we propose a small diameter flexible air cylinder that can be placed and operated in a bent position. However, a small diameter flexible air cylinder is difficult to control because of its small output and large variation in output. The output characteristics of a small diameter flexible air cylinder and an artificial muscle made of a bundle of small diameter flexible air cylinders are measured. The results are compared with those of conventional air cylinders and discussed.

**Key Words:** Soft Robot, Soft Actuator, Artificial Muscle, Air cylinder

## 1 緒言

本研究では軽量で比較的高速に作動しモータのような減速機構が不要なエアシリンダに着目した。エアシリンダは工場内の生産設備などに多く使用されている。生産設備においては、金属製で高剛性・精密につくられているエアシリンダが適する場面は非常に多い。一方では、エアシリンダを用いた介護者の負担を軽減することを目的としたパワーアシストスーツの研究も行われている [1]。しかし、ヒトの身体にフィットさせ円滑に動作させるためには、様々な部品を組み合わせる必要がある。加えて、エアシリンダはストロークを長くするとそれに伴ってエアシリンダ自体が大型化してしまう。大型化に伴い、ヒトの身体という限られたスペースにエアシリンダを配置するために適切な配置の検討が必要になる。また、従来のエアシリンダの多くは金属製かつ精密につくられているため、専門知識を有した技術者が整備をする必要がある。

そこで、本研究では曲げた状態で配置・動作ができ、柔軟性・粗雑につくられる柔軟エアシリンダを提案する。既に、文献 [2] により、ロッド型柔軟エアシリンダが提案されているが、シリンダの湾曲によって出力が大きく低下するという問題点がある。文献 [2] は、上述の課題に対しロッドを有しない柔軟エアシリンダについて検討を行っている。本研究においては、湾曲に伴う出力低下を抑えた細径柔軟エアシリンダの提案を行う。さらに、曲げ剛性低減と出力向上を両立させるため細径柔軟シリンダを束ねたエアシリンダ型人工筋肉の提案を行う。図 1 にエアシリンダ型人工筋肉を示す。エアシリンダ型人工筋肉はシリンダ部に柔軟性のあるチューブを使用する。また、ロッドには紐を用いることによりエアシリンダ自体に柔軟性をもたせている。エアシリンダの素材を柔軟物にした場合における出力特性・ステップ応答特性を測定し、曲げた状態において動作可能か確認を行う。



Fig.1 An air cylinder type artificial muscle

## 2 細径柔軟エアシリンダ

### 2.1 構造と動作原理

細径柔軟エアシリンダの構造とピストン・紐シール部の構造を図 2 に示す。柔軟性をもたせるため、シリンダ部分に柔軟チューブ (ニチアス株式会社, 材質: ナフロン<sup>®</sup>, 内外径: 5 mm, 6 mm, 最小曲げ半径: 35 mm) を用い、ロッド部分に紐 (ハヤミ工業株式会社, 材質: ポリエステル, 線径: 1.00 mm) を使用した。また、ピストンは PLA 樹脂部品 (図中白色) とフッ素ゴムワッシャ (株式会社廣瀬計器, 内外径: 3.0 mm, 5.0 mm, 厚み: 1.0 mm, 硬度: 80° (デュロメータタイプ A)) 2 枚から構成されている。なお、ピストンとロッドは接着剤で固定している。紐シール部は、紐との摩擦抵抗を低減するために PTFE チューブ (中興化成工業株式会社, 内外径: 1 mm, 3 mm, 長さ: 4 mm) の内側にロッドを通すことによって空気圧をシールしている。なお、取り扱いしやすいようウレタンチューブ (内外径: 3 mm, 6 mm) の内部に挿入し接着を行った。フィッティングはプラスチックフィルムを熱溶着することによって製作される。圧力印加用チューブ、紐シール部、シリンダの 3 つの部品が挿入できるよう、熱溶着を一部避けるように行っている。3 つの部品をフィッティングに挿入する際は、エア漏れ防止と摩擦力向上のため熱収縮チューブを被せた上で接着剤を塗布している。動作原理は、圧力印加をすることによりピストンワッシャがシリンダ径方向に変形する。シリンダの径方向の変形はワッシャと比較して小さいためワッシャがシリンダに密着しシールを保つことができる。よって、印加圧力に応じた出力を得ることができる。

### 2.2 印加圧力-出力特性

図 3 に曲率半径  $r_a = 100$  mm と曲率を有しない場合 (曲率半径  $r_a = \infty$ ) の 2 パターンにおける、細径柔軟エアシリンダの印加圧力に対する静的な出力の関係を示す。測定は計 3 回行い、それらの平均をプロットする。また、各測定の出力の最大最小値をエラーバーとして示す。図中の記号は曲率半径が無限度と 100 mm の位置を示し、点線は摩擦がないと仮定したときの理論値を示す。図 3 より、曲率半径  $r_a = 100$  mm と  $\infty$  の 2 パターンとも印加圧力に対して出力が比例して増加していることがわかる。また、実験値と理論値の出力を比較すると、両者に大きな差が見られない。よって、シリンダとピストン、紐シール部の摩擦損失が小さいと考えられる。曲率半径  $r_a = 100$  mm と  $\infty$  を比較すると、わずかながら曲率半径  $r_a = 100$  mm の出力が小さいことがわかる。シリンダの湾曲に伴って、シリンダとピストンの

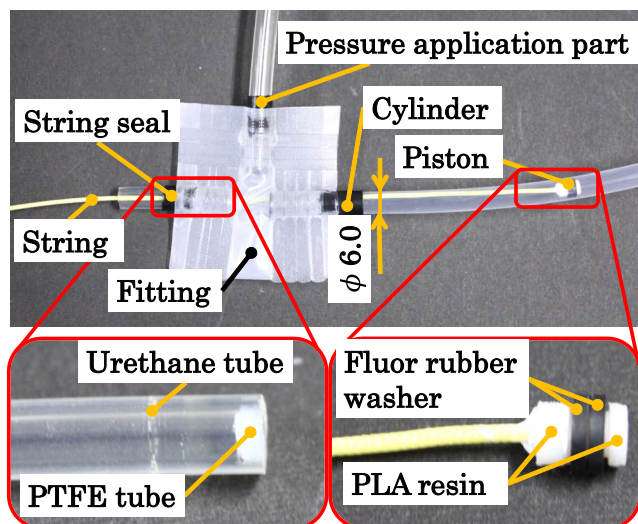


Fig.2 A Small diameter flexible air cylinder

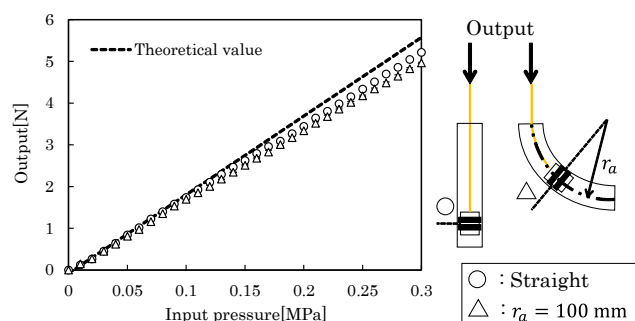


Fig.3 Output of a small diameter flexible air cylinder

摩擦損失が増加し、出力が小さくなったと考えられる。上述より、湾曲した際の出力低下が小さいという利点はあるものの、印加圧力  $P = 300 \text{ kPa}$  に対して出力が  $F = 5 \text{ N}$  と小さいという課題がある。シリンダ内径を大きくすることによって印加圧力に対する出力は増加するが、曲げ剛性が高くなり柔軟ではなくなってしまう。そこで、細径柔軟エアシリンダを束ねた構造のエアシリンダ型人工筋肉について検討する。

### 3 エアシリンダ型人工筋肉

#### 3.1 構造と動作原理

試作したエアシリンダ型人工筋肉を図1に示す。構造は、上述の細径柔軟エアシリンダを最密となるように  $n=7$  本配置したものである。フィッティングの内部構造を図5に示す。内部は2つの部品(図中:赤,白色部品)に分かれており、それぞれ紐シール部(赤色)とシリンダシール部(白色)である。紐シール部は7個のピストンから伸びる紐が通る PTFE チューブ(中興化成工業株式会社, 内外径:  $1 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ mm}$ , 長さ:  $4 \text{ mm}$ )を PLA 樹脂部品に圧入している。シリンダシール部は7本のナフロン®チューブ(ニチアス株式会社, 内外径:  $5 \text{ mm}$ ,  $6 \text{ mm}$ , 最小曲げ半径:  $35 \text{ mm}$ )を挿入できる PLA 樹脂部品を使用する。また、紐シール部に圧力印加用のチューブを挿入の後、接着している。シリンダシール部は2つの PLA 樹脂部品から構成されており、目地剤(セメダイン株式会社, シリコン系シーリング材 8060 プロ)を充填するための空間を設けるような構造である。紐シール部とシリンダシール部の端面に上述のねじ剤を塗布し、部品を覆うように熱収縮チューブ(モノタロウ, 材質: ポリオレフィン樹脂, 内径: 収縮前  $31.5 \pm 1.0 \text{ mm}$ , 収縮後  $15 \text{ mm}$ )を被せる。動作原理は上述の細径柔軟エアシリンダと同じではあるが、それらを束ねたことによって紐(ロッド)が7本出てしまうが、7本の紐を先端で結ぶことによって7本の細径柔軟エアシリンダの出力をまとめる。

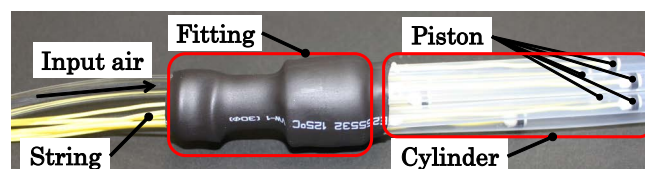


Fig.4 Construction of artificial muscle

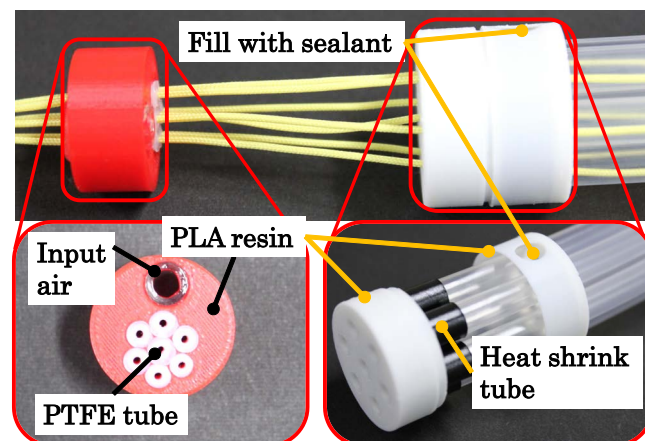


Fig.5 Internal structure of the fitting

#### 3.2 印加圧力-出力特性

図6に曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  と曲率を有しない場合(曲率半径  $r_a = \infty$ )の2パターンにおける、細径柔軟エアシリンダの印加圧力に対する静的な出力の関係を示す。測定は計5回行い、それらの平均をプロットする。また、各測定出力の最大最小値をエラーバーとして示す。図6より、曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  と  $\infty$  の2パターンとも印加圧力に対して出力が比例して増加していることがわかる。また、細径柔軟エアシリンダを  $n=7$  本束ねたことによって印加圧力  $P = 300 \text{ kPa}$  における細径柔軟エアシリンダの出力と比較し曲率半径  $r_a = \infty$  の時は5.6倍、曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  の時は5.5倍に増加していることがわかる。しかし、束ねた本数  $n=7$  倍に出力が増加していないのは、紐シール部からのエア漏れによってピストンにかかる圧力が印加圧力よりも小さくなったためだと考えられる。曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  と  $\infty$  を比較すると、わずかではあるが曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  の出力が小さいことがわかる。細径柔軟エアシリンダの出力と同様にシリンダの湾曲に伴って、シリンダとピストンの摩擦損失が増加し、出力が小さくなったと考えられる。これらの結果より、細径柔軟エアシリンダを  $n$  本束ねた場合においても、出力がおおよそ  $n$  倍になることがわかった。よって、細径柔軟エアシリンダを束ねることによって曲げ剛性を抑えつつも、出力が増加することを確認した。

#### 3.3 応答性

エアシリンダ型人工筋肉に圧力を印加した時の応答性がどの程度であるか測定を行う。本実験では、エアシリンダ型人工筋肉が真っすぐな状態と一部分が湾曲した状態の2パターンの測定を行う。特に、湾曲した部分では出力が低下するため応答性がどの程度減少するか確認を行う。本実験では電磁弁のオン・オフをステップ入力とし、エアシリンダ型人工筋肉の圧力とピストン移動距離のステップ応答を確認する。

##### 3.3.1 実験方法

使用する実験装置を側面から見たものを図7に示す。エアシリンダ型人工筋肉のフィッティングとシリンダ末端は実験装置に固定する。ロッドにはプーリを介し、地面と垂直になるように垂らし、先端に錘を接続する。空圧機器の構成は、コンプレッサ(圧縮空気入り口)→圧力調節器→電磁弁(SMC, 型番: SY113-5L-M3)→圧力計→エアシリンダ型人工筋肉の順に接続する。

エアシリンダ型人工筋肉には電磁弁のオン・オフをステップ入力とし、圧力センサで印加圧力を測定する。また、錘の移動距離



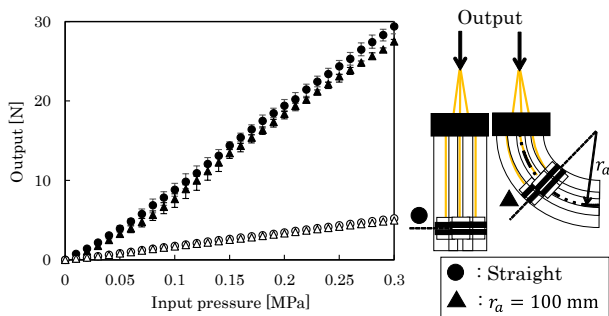


Fig.6 Output of an air cylinder type artificial muscle

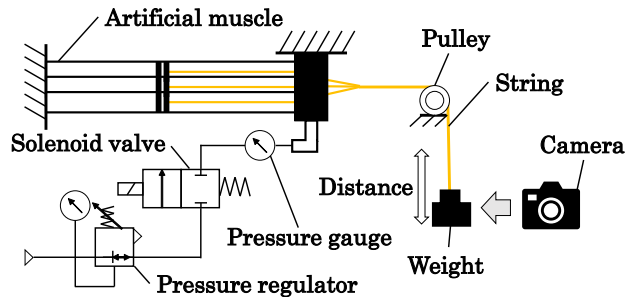


Fig.7 Experimental device of step response

を画像処理で測定する。なお、エアシリンダ型人工筋肉には電磁弁を解放した時、圧力計において  $P_t = 220 \text{ kPa}$  となるように圧力調節器で調節を行う。錘は  $1000 \text{ g}$  のものを使用する。

本実験では、エアシリンダ型人工筋肉のシリンダが真っすぐな状態(経路 A)と一部分に曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  の湾曲を設けた状態(経路 B)の2パターンの測定を行う。経路 A の長さ  $L_A = 330 \text{ mm}$  とする。経路 B は湾曲部の長さ  $L_{B1} = 157 \text{ mm}$  と湾曲していない箇所長さ  $L_{B2} = 173 \text{ mm}$  の合計長さ  $L_{B1} + L_{B2} = L_B = 330 \text{ mm}$  とする。

### 3.3.2 実験結果・考察

図 8 に経路 A と経路 B における印加圧力のステップ応答を示す。また、図 9 に経路 A と経路 B における錘の移動距離のステップ応答を示す。なお、測定は経路 A、経路 B ともに 10 回行い、それらの平均をプロットする。また、各測定の印加圧力、錘の移動距離の標準偏差をエラーバーとして示す。図 8 より、経路 A、経路 B ともにステップ入力から  $0.5 \text{ s}$  経過した後、目標圧力  $P_t = 220 \text{ kPa}$  に達している。ステップ入力をオフにしたときの応答は経路 A、経路 B ともに  $0.2 \text{ s}$  で下がりきっている。立ち上がる時の目標圧力  $P_t$  の  $60\%$  付近で印加圧力が減少している箇所が確認できる。図 9 より、目標距離に達した時と図 8 の圧力減少の箇所が同一であるとわかる。よって、エアシリンダ型人工筋肉のピストンが急に停止することが、立ち上がり途中の圧力減少に影響すると考えられる。ピストンが急に停止すると、シリンダ内の体積膨張が停止する。そして、印加した空気の流れがなくなり紐シール部からのエア漏れが急速に起こることによって圧力が減少すると考えられる。図 8 の経路 A と経路 B を比較すると、わずかではあるが経路 B が経路 A に対して立ち上がりが遅れている。しかし、遅れ時間は  $0.1 \text{ s}$  であり湾曲を設けた場合でも立ち上がりには大きく影響しないと考えられる。図 9 の経路 A と経路 B を比較すると、目標距離  $D_t = 330 \text{ mm}$  に立ち上がるまで経路 B が経路 A に対してわずかではあるが遅れている。印加圧力のステップ応答と同様に、経路 A と経路 B に大きな差はなく湾曲による影響は少ないと考えられる。図 9 のステップ入力をオフにしたときの応答は  $0.5 \text{ s}$  で初期位置に戻っていることがわかる。図 8 より立下りの際に印加圧力が瞬時に大気圧に戻っているため錘の位置も瞬時に戻ったと考えられる。以上の結果より、湾曲をもうけた経路と真っすぐな経路の動的な特性には大きな差がないことがわかった。また、経路 A、経路 B どちらにおいても立ち上がり、立ち下がり良好であることを確認した。

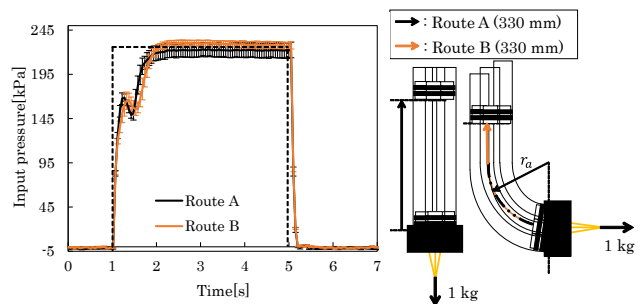


Fig.8 Step response of input pressure

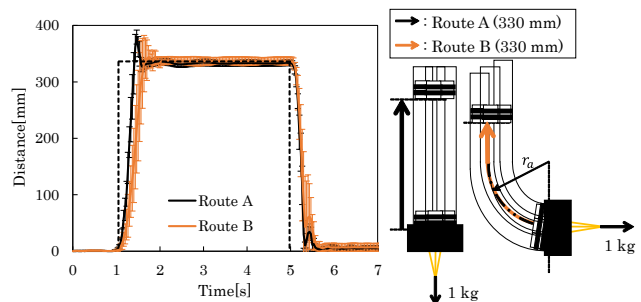


Fig.9 Step response of distance

## 4 結言

従来の高剛性・精密につくられるエアシリンダは、ストロークを長くするとそれに伴ってエアシリンダ自体が大型化してしまう。大型化に伴って、限られたスペースにエアシリンダを配置するために、適切な配置方法の検討が必要になるという課題がある。よって、本研究は曲げた状態で配置・動作可能な柔軟エアシリンダを提案した。まず、細径柔軟エアシリンダを提案し、試作を行った。印加圧力-出力特性より湾曲に伴う出力低下が小さいことがわかった。しかし、細径柔軟エアシリンダ 1 本では印加圧力  $P = 300 \text{ kPa}$  における出力が  $5 \text{ N}$  と小さいため、それらを  $n=7$  本束ねた構造のエアシリンダ型人工筋肉を提案した。印加圧力-出力特性より、細径柔軟エアシリンダと比較して、出力が曲率半径  $r_a = \infty$  の時は  $5.6$  倍、 $r_a = 100 \text{ mm}$  の時は  $5.5$  倍に増加することがわかった。また、曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  に湾曲させた場合において曲率半径  $r_a = \infty$  と比較し出力の低下が小さいことがわかった。また、ステップ応答より、ストローク  $S = 300 \text{ mm}$ 、印加圧力  $P = 220 \text{ kPa}$ 、シリンダが真っすぐな状態の経路 A の立ち上がり時間が  $0.5 \text{ s}$  であることがわかった。また、曲率半径  $r_a = 100 \text{ mm}$  を有した経路 B においても立ち上がり時間は  $0.6 \text{ s}$  となり、シリンダが真っすぐな経路 A と比較して  $0.1 \text{ s}$  遅くなることわかった。これらの結果より、湾曲した場合でも、出力が大きく低下することがないことと、立ち上がり時間も大幅に遅くなることはないことがわかった。上記の結果より、エアシリンダ型人工筋肉は曲げた状態でも配置・動作ができることを確認した。

## 参考文献

- [1] 山本圭治郎, 石井峰雄, 兵頭和人, 高橋勝美, 松尾崇, “エアシリンダ式パワーアシストスーツの開発”, *Dynamics and Design Conference*, Vol. 2012, No. 1, pp. 610-1 – 610-10, 2012.
- [2] 赤木徹也, 堂田周治郎, “ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの開発とその応用”, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 73, No. 731, pp. 2108-2114, 2007.