

# 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉における空気漏れがリップルに与える影響の調査

## Investigation of the effect of air leakage on ripple in straight-fiber-type pneumatic rubber artificial muscle

○瀬野航生\*, 戸森央貴\*\*

○ Kosei Seno\*, Hiroki Tomori\*\*

山形大学

\*Yamagata University

キーワード： 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉 (straight-fiber-type pneumatic rubber artificial muscle), 圧力リップル (pressure ripple), 空気漏れ (air leakage), 空気圧 (pneumatic), 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  
Tel.: (0238)26-3217, E-mail: taw82947@st.yamagata-u.ac.jp

### 1. 諸言

近年の日本において高齢者の人口が総人口に占める割合は年々増加しており、介護ロボットやアシストスーツのような人間の動作をサポートするロボットへの期待が高まっている。しかしモータや油圧シリンダのようなバックドライバビリティが低く高剛性なアクチュエータを使用したロボットが人と接触すると怪我に繋がる可能性が高いため、人と協働するのは困難である<sup>1)</sup>。そこでゴムやゲルなどのような粘弾性特性を有した素材をアクチュエータとしたソフトロボットであればアクチュエータそのものが柔らかく、動作にも柔らかさが現れる。よって人とロボットが接触した場合でも怪我のリスクが軽減されると考えられる。

本研究室ではソフトロボットのアクチュエータとして、軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋

肉 (以下, SF-PAM) の研究を行っている。SF-PAM はゴム製であることから、バックドライバビリティを容易に実現できる。また、空気圧駆動であるため SF-PAM に空気漏れや破裂が発生した場合でも人体や環境に悪影響を及ぼさないアクチュエータである。一方で、高精度な位置制御が困難であることや、応答速度が遅いなどの課題を抱えている。これに対し先行研究では数学モデルを用いたマニピュレータの位置決め制御の改善<sup>2)</sup> や MR ブレーキを用いた振動抑制を図っている<sup>3)</sup>。さらに MR ブレーキを応用して人工筋肉の応答の遅さを補おうという試みが行われている<sup>4)</sup>。

しかし、これ以外にも SF-PAM の空気圧応答に脈動 (以下, 圧力リップル) が現れる場合があり、位置制御や計測の妨げとなっていた。

そこで圧力リップルの原因解明と抑制を目指し、調査を行った。事前調査の結果, SF-PAM

からの微小な空気漏れ(リーク)が圧力リップルに関係しているとの仮説を立てた。したがって本稿では空気漏れの量と圧力リップルの振幅の関係性について述べる。

## 2. SF-PAM

本実験で使用した SF-PAM を Fig.1 に、寸法を Table 1 に示す。ゴムチューブ部分に軸方向と平行になるようにアラミド繊維を内包することにより、空気圧を印加すると径方向は膨張し軸方向は収縮するため Fig.2 のように変形する。また、リングを設けることによって、膨張に伴うアルミ部分との接触による破裂の予防や収縮方向の拘束を行っている。

SF-PAM は軽量で出力密度が高く柔軟であるという特徴を持っている。また、最大収縮率は 30 % を超えており、空気圧ゴム人工筋肉で最も一般的とされる Mckibben 型人工筋肉より優れている<sup>5)</sup>。さらにゴムの柔らかさにより、作動中に荷重がかかった場合に特別な制御を必要とせず衝撃を吸収することが可能である。以上の理由により、SF-PAM はソフトロボットのアクチュエータに適していると考えられる。

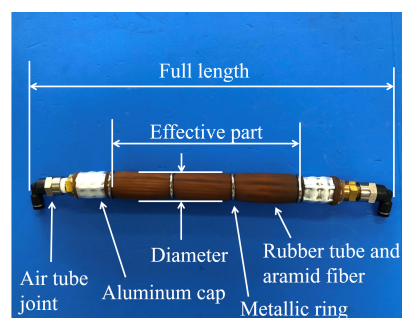


Fig. 1 SF-PAM



Fig. 2 Contracting SF-PAM

と 2 次側圧力との間に差があるとそれに応じて出力の調整を行う。使用している空気圧アクチュエータに空気漏れが発生している場合、2 次側の圧力が不安定になり圧力リップルの発生に繋がると考えられる。

## 3.2 検証

3.1 節の仮説を検証するため、空気漏れがない SF-PAM と空気漏れがある SF-PAM を用いて対照実験を行った。空気漏れがない SF-PAM はゴムチューブの両端にエアチューブを接続できる接手を使用し、SF-PAM を作製する。その後水に沈めて空気圧印加を行い、空気漏れがないことを確認する。空気漏れがある SF-PAM は厚さ 0.85mm のビニールフィルムシートに穴を開け、一方の接手に挿入する。そしてビニールフィルムシートを挿入した方のエアチューブを大気開放することで空気漏れを発生させる。

本実験で使用した実験装置図を Fig.4 に示す。パーソナルコンピュータ(以下、PC)に印加圧力を入力すると DSP(エムアイエス社製、sBOXII)

Table 1 Parameters of the artificial muscle

Name	Figure	Unit
Full length	32.2	[mm]
Diameter	23.4	[mm]
Effective part	16.0	[mm]

## 3. 圧力リップル

### 3.1 発生原因の仮説

本研究室で使用している電磁弁(SMC社製、ITV1050-211L)は内蔵されている圧力センサを利用した圧力補正機能を有しており、目標圧力

を通じて D/A 変換を行い、電磁弁にステップ信号を送信する。SF-PAM に空気圧を印加後、圧力センサ (日本ピスコ社製, SEU11-6UA) で圧力応答を測定し DSP で A/D 変換して PC に記録する。

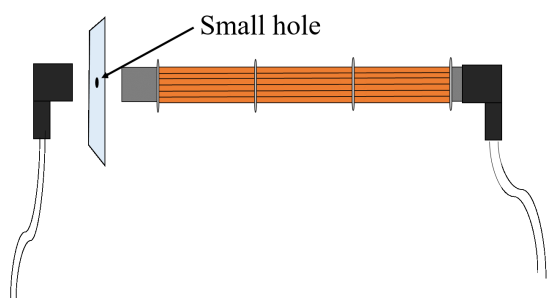


Fig. 3 Inserting film to SF-PAM

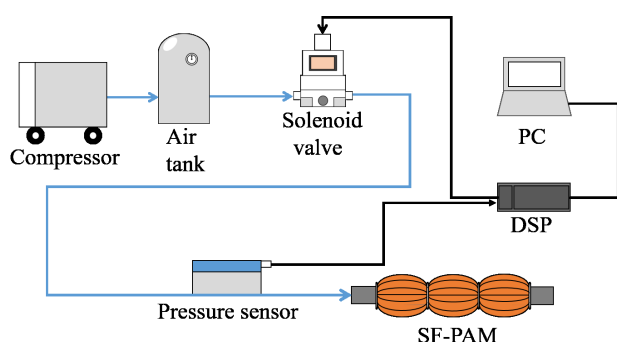


Fig. 4 Experiment diagram

### 3.3 検証結果

空気漏れがない場合の結果を Fig.5 に、空気漏れがある場合の結果を Fig.6 に示す。Fig.6 では圧力リップルが発生しており、空気漏れが圧力リップルに繋がっていることが確認できた。

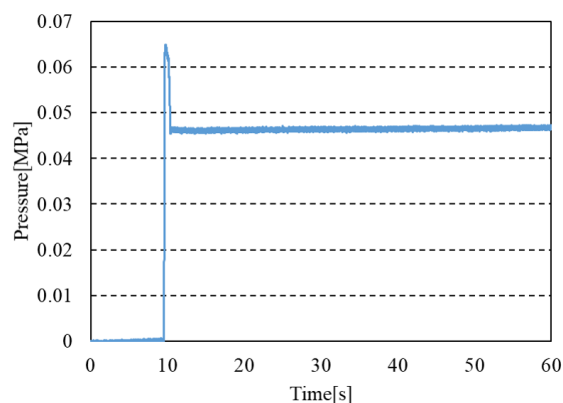


Fig. 5 Output pressure without air leakage

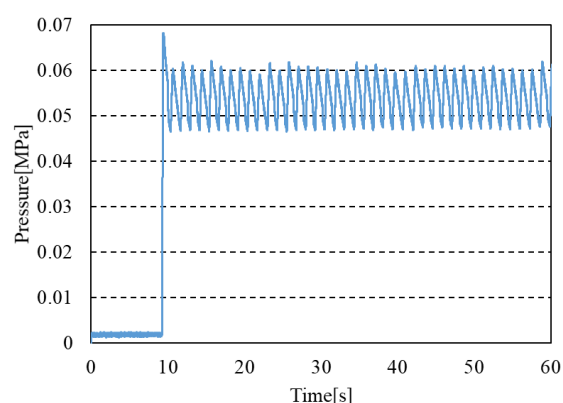


Fig. 6 Output pressure with air leakage

## 4. 空気漏れ量と圧力リップルの関係性

### 4.1 実験方法

前章では空気漏れが圧力リップルの発生に関係していることが判明した。本章では空気漏れの量の調整し、それに伴う圧力リップルの振幅の変化について調査を行った。

本実験で使用した実験装置を Fig.7 に示す。30 s の間ステップ入力を用いて SF-PAM に 0.05 MPa を印加する。ペットボトル内の圧力上昇により噴出した水の重量を測定することで空気漏れの流量を算出する。また、圧力センサで測定した圧力から 10 周期分の圧力リップルの振幅を取得し、平均値を算出する。これを 30 回行ってグラフを作成する。

圧力応答の計測は 3.2 節と同様であり、空気

漏れの調節はフィルムに針を刺す回数の変更により行っている。

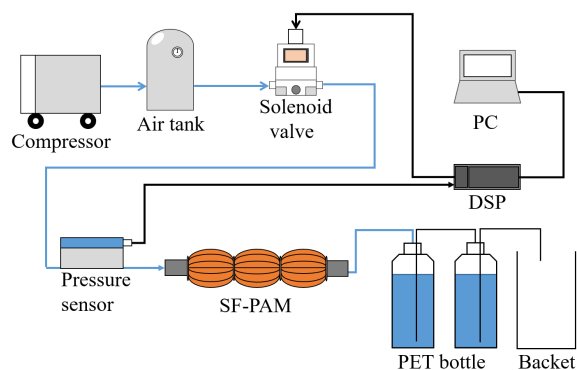


Fig. 7 Experiment diagram

## 4.2 実験結果

Fig.8 に実験結果を示す. 空気漏れがおよそ 0.9L/min になるまでは線形的に振幅が増加し, それ以降は振幅が減少する傾向が確認できた.

また, 空気漏れ量が 0.507L/min の時の圧力応答を Fig.9 に, 1.027L/min の結果を Fig.10, 1.507L/min の結果を Fig.11 に示す. これらの比較により, 圧力リップルの振幅がピークに達するまでは一定の周期のまま振幅のみが増加している. また, ピークを過ぎた後は圧力リップルの周期の減少に伴い振幅が減少していることがわかる. しかし, 1.507L/min では SF-PAM の収縮が起こっていないためアクチュエータとして使用できない. したがって SF-PAM の作製には空気漏れが発生しないように細心の注意を払うべきである.

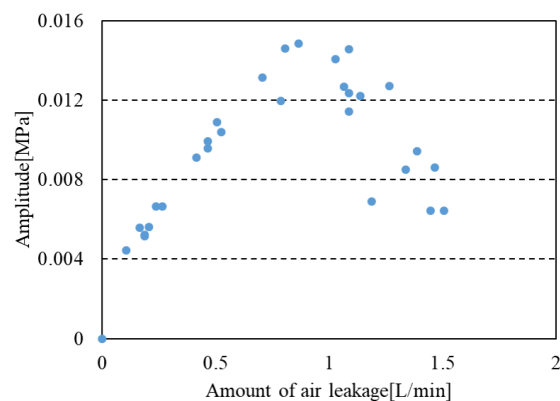


Fig. 8 Relationship between air leakage and pressure ripple

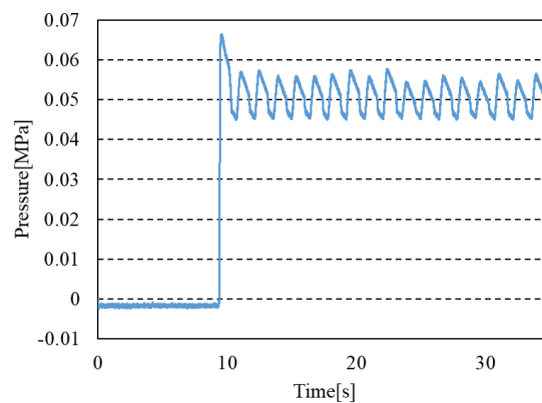


Fig. 9 Pressure ripple with 0.507L/min air leakage

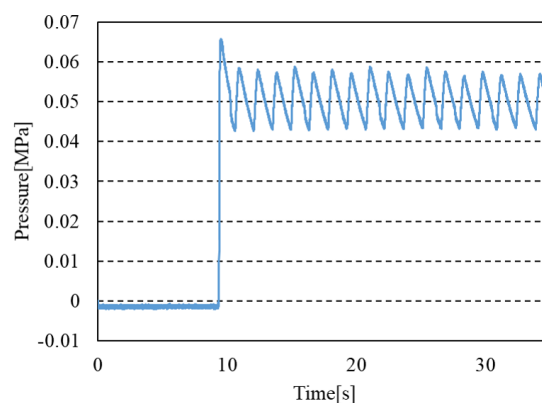


Fig. 10 Pressure ripple with 1.027L/min air leakage

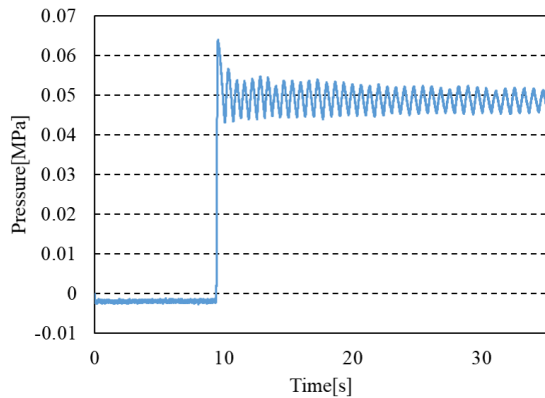


Fig. 11 Pressure ripple with 1.507L/min air leakage

### 4.3 対策

空気漏れが発生し穴を塞ぐのが困難な場合、空気圧システムの圧力リップルの抑制方法として電磁弁の2次側に圧力容器を設置することが有効であると示されている<sup>6)</sup>。

Fig.12 に示すように、使用した実験系に容積が2.2Lの圧力容器(日建社製CT-22)を設け、3.2節と同様の実験条件における圧力応答の調査を行う。

実験結果を Fig.13 に示す。Fig.6 と比較すると実験系全体の容積の増加に伴う応答速度の低下が見られたが、圧力リップルの振幅の減少およびオーバーシュートの改善が確認できた。よって本手法はSF-PAM に対しても有効であり、スピードよりも安全性を重視する介護ロボットに用いるのが適切であると考える。

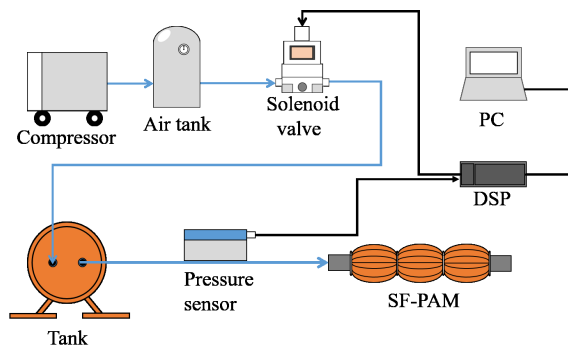


Fig. 12 Experiment diagram with air tank

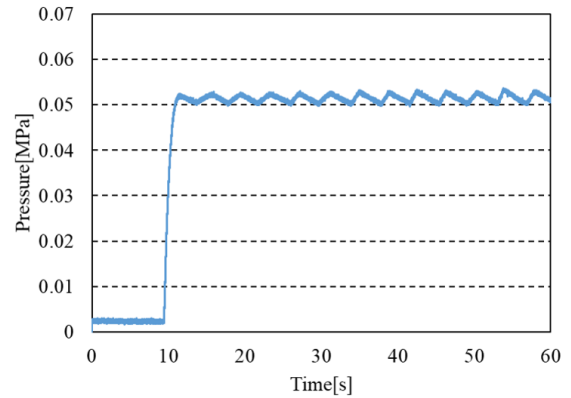


Fig. 13 Output pressure with air tank

## 5. 結言

本稿では電磁弁とSF-PAMを接続した際に発生した圧力リップルの原因について調査を行った。空気漏れが発生していると電磁弁からの圧力応答が不安定となり、SF-PAMの収縮に振動が生じる。したがって空気圧アクチュエータの作製時は空気漏れがないように細心の注意を払う必要がある。また、圧力リップルの低減方法として、応答速度の低下に繋がるものの、電磁弁とSF-PAMの間に圧力容器を設置することも有効であることが分かった。

SF-PAMをアクチュエータとして使用するためには0.05MPaでは不十分であるため、今後は0.2MPaのような高圧力における変化について調査を進める。

## 参考文献

- 1) 辻 俊明, 原 正之:「人間環境と親和性の高いロボットのためのアクチュエータ」特集について, 日本ロボット学会誌, **31-6**, 547 (2013)
- 2) 戸森 央貴, 前田 浩之, 中村 太郎:動特性モデルを考慮に入れた6自由度ゴム人工筋肉マニピュレータの軌道追従制御, 日本機械学会論文集C編, **77-779**, 2742/2755(2011)
- 3) T. Nakamura and Y. Midorikawa and H. tomori:Position and Vibration Control of Variable Rheological Joints Using Artificial Muscles and Magneto-Rheological Brake, International Journal of Humanoid Robotics, **8-1**, 205/222, (2011)

- 4) 戸森 央貴, 永井 豪, 間島 達雄, 中村 太郎: 可変粘弾性関節マニピュレータを用いた粘弾性制御による瞬発力を伴う運動の制御, 計測自動制御学会論文集, **51-6**, 380/389(2015)
- 5) 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**, 407(2007)
- 6) 小山 紀, 片桐 一博, 川島 弘嗣, 香川 利春: 電磁弁直接駆動空気圧レギュレータのリプル低減, 油圧と空気圧, **28-6**, 637/678(1997)