研究論文

気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータの製作*

加藤 友規**, 本多 駿太**, 程 明昭**
櫻木 一樹**, 大野 学***Fabrication of a Miniature Rubber Muscle Actuator Driven
by Gas-Liquid Phase ChangeTomonori KATO, Shunta HONDA, Mingzhao CHENG,
Kazuki SAKURAGI, Manabu ONO

The ultimate goal of this research is to develop an artificial micro muscle in which a tiny compressor is installed. Pneumatic actuators, such as pneumatic artificial rubber muscle (PARM) or rubber bellows, have been widely used in many industrial and research fields, since they have merits such as being compact and lightweight. However, the size of the compressor driving the actuator is relatively large. In order to solve this problem, the authors have been researching soft actuators driven by the gas-liquid phase change (GLPC) of fluorocarbon. Fluorocarbon ($C_5F_{11}NO$) is a substance that has a relatively low boiling point (50 [°C]) and a low heat of evaporation (104.65 [kJ/kg], whereas that of water is 2,260 [kJ/kg]). In this research, PARM driving experiments utilizing the GLPC were conducted, and a PI control system was built to test step response and frequency response of actuator. The frequency response up to 4.0 [Hz] was clarified and the corner frequency of approximately 1.5 [Hz] was confirmed.

Key words : Pneumatics, Pneumatic artificial rubber muscle, Gas-liquid phase change, Pressure control

1. 緒 言

空気圧駆動のロボットに使用される空気圧アクチュエータの一種である空気圧ゴム人工筋 (Pneumatic artificial rubber muscle, 以下PARM) は、筋肉の収縮原理を模したものであり、Fig. 1に示すように空気圧をPARM内部に供給し、圧力を上昇させることで径方向に膨張し、軸方向に収縮して変位を生じる。PARMは軽量でやわらかく、同径のエアシリンダと比較して数倍の引っ張り力を発揮できる (軽量高出力) という特徴や防爆性や姿勢保持の点で優れており、柔軟な接触動作が要求される対人間用ロボットなど、パワーアシスト機器やマニピュレータへの適用の研究が進められている¹⁾²⁾。しかし問題点として、PARMの駆動源として使用されるコンプレッサは大型で、Fig. 2に示すように周辺装置等を組み合わせると装置全体の小型化が困難になることが挙げられる。空気圧アクチュエータが直面するこの問題の解決策として、コンプレッサを使用しない気液相変化により駆動

されるアクチュエータに関する研究が進められているが³⁾、気液相変化を用いてPARMを駆動する際は、0.3 [MPa gauge] 以上の圧力発生に約200秒の時間を必要としており、圧力応答性の改善が課題となっていた⁴⁾。

そこで、著者らは応答性の改善⁵⁾を目的とし、本論文では気液相変化により駆動されるアクチュエータについて、特に力制御に注目した。まず、PARMの一般的な特性を測定し、次に気液相変化による圧力発生を確認して、PARMの駆動実験を行った。さらにPI制御系を適用し内圧制御を

Fig. 1 Pneumatic artificial rubber muscle

Fig. 2 Pneumatic system

*平成27年6月3日原稿受付

**福岡工業大学大学院工学研究科

(所在地：福岡県福岡市東区和白東3-30-1)

(E-mail: t-kato@fit.ac.jp)

***東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科

(所在地：東京都品川区東大井1-10-40)

行った。最後に気液相変化により駆動されるPARMの動特性を把握するため周波数応答実験を行い、性能を検証した。

2. 主な記号

A_F	: 力の振幅	[N]
A_p	: 圧力の振幅	[Pa]
E	: 電圧	[V]
f	: 周波数	[Hz]
F	: 力	[N]
G	: ゲイン	[dB]
P	: 圧力	[Pa]
P_{ref}	: 目標圧力	[Pa]
$\dot{P}$	: 圧力微分値	[Pa/s]
R	: 抵抗	[Ω]
t	: 時間	[s]
V	: 体積	[cm ³]
W	: 消費電力量	[J]
$\dot{W}$	: 消費電力	[W]
ε	: 収縮率	[—]
θ	: 液温	[°C]
$\angle\phi_F$	: 力の位相	[°]
$\angle\phi_p$	: 圧力の位相	[°]

3. 気液相変化アクチュエータ

3.1 気液相変化の概要

気液相変化の概要をFig. 3に示す。気液相変化とは、気体から液体、液体から気体へと物質を相変化させる現象である。液体は、熱を与えられると沸騰が始まり、気体に変化する。その際に、体積が膨張し、容器内に圧力を発生させる。加熱を停止すると熱が奪われ凝縮し液体に戻る。その際に体積が収縮し、圧力が下降する。

3.2 気液相変化アクチュエータの概要

気液相変化アクチュエータの概要図をFig. 4に示す。気液相変化アクチュエータとは液相が気相へ変化する際、体積が膨張する現象を利用したアクチュエータである。装置に取り付けた自作のコンスタンタン製のヒータ（材料：TOKYO WIRE WORKS LTD, $\phi 0.231$ [mm], 単位長さあたりの抵抗値16.02 [Ω /m])に電力を与えることで、加熱された液体が膨張した後、沸騰し気体へ変化する。その際に体積が膨張し発生する圧力によってアクチュエータが駆動する。また、装置から熱を取り除くと、変化していた気体は液体に戻り体積は収縮する。気液相変化を用いたアクチュエータは、コンプレッサレスのためPARMの長所を生かしたまま、装置全体の小型化が可能となる。

3.3 作動流体

本研究では作動流体にフッ化炭素 ($C_5F_{11}NO$) を用いた。水とフッ化炭素の比較をTable 1に示す。フッ化炭素は沸点が大気圧下において50 [°C] と低く、蒸発熱が104.65 [kJ/

kg] と水の22分の1程度しかないため、僅かな熱エネルギーの供給・放出で相変化する。熱膨張率は、20 [°C] において0.00154 [°C⁻¹] であり、水の約7倍である。また、毒性がなく不燃性で安全である。

4. PARMの静特性実験

本章では、PARMのモデル化を行う。PARMを錘を取り付けた状態で駆動させ、その時のPARMの静特性を測定する実験を行った。本研究で使用したPARM (FESTO MXAM-5-AA) はFig. 1に示したものである。このPARMの各寸法は自然長100 [mm], 外径6.76 [mm], 内径4.76 [mm] である。実験装置をFig. 5に示す。PARMはポテンシオメータ付きの低摩擦レールに取り付けられ、先端にプーリを介して錘を取り付けた。

Fig. 3 Gas-liquid phase change

Fig. 4 Gas-liquid phase change system

Table 1 Characteristics of working fluid

Working fluid (Chemical formula)	Boiling point (1 atm) [°C]	Heat of vaporization [kJ/kg]	Coefficient of thermal expansion [°C ⁻¹]
Fluorocarbon ($C_5F_{11}NO$)	50	104.65	0.00154
Water (H_2O)	100	2,257	0.00021

Fig. 5 Experimental apparatus

錘の質量を0.5 [kg] ($F=4.9$ [N]), 2 [kg] ($F=19.6$ [N]), 3 [kg] ($F=29.4$ [N]) とし, PARMの内圧 P を $0 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0$ [MPa gauge] と変化させ, その際PARMの変位をポテンシオメータで測定し, PARMの内圧と収縮率の関係を求めた.

実験結果をFig. 6に示す. 外力 F と PARMの収縮率 ε と内圧 P の関係は補正係数を用いた(1)式で表すことができる⁶⁾.

$$F = P(a_1\varepsilon + a_0) - (b_1\varepsilon + b_0) \quad (1)$$

実験結果より上式の各係数を最小二乗近似を用いて, $a_1 = 23042$, $a_0 = 103$, $b_1 = 15269$, $b_0 = -10.1$ と求めた.

同様にFig. 5の実験装置を使用し, 錘の質量を0.5 [kg] ($F=4.9$ [N]), 2 [kg] ($F=19.6$ [N]) とした場合のPARMの収縮率 ε と体積 V の関係を測定した. 測定結果をFig. 7に示す. PARMの収縮率と体積の関係は, PARMに加えられる荷重によらないことが過去の研究で報告されており⁷⁾, 最小二乗近似により(2)式で近似することとした.

$$V = -69.08\varepsilon^2 + 24.08\varepsilon + 1.75 \quad (2)$$

以上は一般的なPARMの静特性のモデル化であり, 本論文の次章以降で本章の全ての結果を利用するわけではないが, 本論文で使用するPARMを駆動するには, 0.2 [MPa gauge] から0.4 [MPa gauge] 程度の内圧力を発生すればよいことがわかる.

5. 気液相変化によるPARM駆動実験

5.1 圧力発生実験 (オープンループ)

気液相変化による圧力の発生の様子を観察するため, 固定容器を用いて圧力発生実験を行った. 今回の目標圧力は

Fig. 6 Static characteristics of PARM

Fig. 7 Volume change of PARM

PARMの駆動に使用する0.35 [MPa gauge] である. 実験装置をFig. 8に示す. 本章における実験では, 30 [cm] の固定容器 (円筒部 材質: アクリル, 高さ: 42.4 [mm], 内径: 30 [mm], 側面積: 3,996.1 [mm²]; 上下面 材質: アルミ, 上下総面積: 1,413.7 [mm²]) に, 前述のフッ化炭素を満タンに充填した. 作動流体は装置下部のコンスタンタン製のヒータ (抵抗値3.7 [Ω]) に電力を与えることにより加熱され沸騰する. また, 装置上部には圧力センサ (SMC PSE510-R06) を取り付けた.

実験においてはオープンループにて, ヒータに電力を331 [W] (電圧35 [V], 電流9.46 [A]) 与えることで, 固定容器内の圧力を大気圧状態から上昇させる実験を行った. 圧力の上昇過程をFig. 9に示す. この実験結果より, 気液相変化による圧力の発生を確認した.

5.2 PARM駆動実験 (オープンループ)

気液相変化を用いてPARMの内圧を0.3 [MPa gauge] から0.35 [MPa gauge] まで変動させる実験を行った. 実験装置をFig. 10に示す. PARMは固定容器の上部に取り付け, さらにPARMの上部には力を測定するロードセル (TCLZ-50NA) を取り付けた. また, 作動流体は固定容器とPARM内部を満たすように充填した. 前節と同様に, 実験は電力を331 [W] (抵抗3.7 [Ω], 電圧35 [V], 電流9.46 [A]) とした. この実験では, 一度固定容器内圧力が0.35 [MPa gauge] に達した後にヒータへの電力供給を遮断し, 0.3 [MPa gauge] まで降下させた. その後, ふたたび0.3 [MPa gauge] から電力を供給し, 0.35 [MPa gauge] まで容器内圧力を上昇させ, 0.35 [MPa gauge] に達した際に電力を遮断し圧力を降下させ, この時の固定容器内の圧力を測定した.

測定された固定容器内の圧力値と算出した圧力微分値を示した実験結果をFig. 11に示す. 固定容器内圧力が0.3 [MPa gauge] から0.35 [MPa gauge] まで上昇するのに要した時間は0.21 [s], 下降に要した時間は2.3 [s] であった. また, 電力供給を開始した直後の容器内圧力の圧力微分値は0.54 [MPa/s], 電力遮断後は-0.11 [MPa/s] であることを確認した. この圧力微分値より, PARM駆動のロボットシステムを1~2 [Hz] 程度の動特性で動かせる可能性を示した.

Fig. 8 Experimental device

Fig. 9 Experimental result (time-pressure)

Fig. 10 Experimental device with load cell

Fig. 11 Experimental results

6. PARMの駆動実験 (フィードバック制御)

6.1 装置構成と実験方法

Fig. 10の装置を対象に内圧制御実験を行った。本実験では、PI制御系を構成し、各ゲイン値を比例ゲイン400 [V/Pa]、積分ゲイン3 [V/(Pa·s)] とし、目標圧力 P_{ref} は0.3→0.35→0.3 [MPa gauge] とした。また作動流体は20 [cm] から34 [cm] (満タン) まで2 [cm] 刻みで実験を行った。全体の装置構成をFig. 12、ブロック線図をFig. 13に示す。DSP (MTT s-BOX) を用いて制御信号 (電圧0～10 [V]) をアンプの役割である電源に与え、ヒータには0～35 [V] の電圧が印加される。ヒータの熱により容器内の作動流体が加熱され、気液相変化が発生する。気液相変化により発生した圧力を圧力センサ (SMC PSE510-R06)

により計測し、DSPへ圧力センサの信号を送ることで圧力フィードバックを行った。データロガーを用いて記録した値は、圧力 P 、ヒータの電圧 E 、PARMの出力 F 、液温 θ である。

6.2 実験結果

各液量に対する圧力上昇と下降の時定数をFig. 14に示す。この結果では30 [cm] の場合の圧力上昇と下降の時定数が最も小さいといえる。30 [cm] の場合の実験結果 (圧力 P 、電圧 V 、出力 F 、液温 θ) をFig. 15に示す。目標圧力0.35 [MPa gauge] に上昇する際の時定数は0.12 [s] となった。この時、空冷による損失分を補償し、沸騰状態 (95 [°C] 以上) を維持するために定常的に必要な電圧は約15 [V] であった。その後、目標圧力0.3 [MPa gauge] に下降する際の時定数は0.32 [s] となった。このことから圧力の上昇と下降に関して、従来よりも応答性と制御性が共に向上した制御方法を実現したといえる。同じ圧力0.3 [MPa gauge] を維持するために、実験開始直後と50 [s] 以降を比較して、50 [s] 以降で電圧が下がっているのは液温が上昇したためだと考えられる。また、0.35 [MPa gauge] に維持している時のPARMの出力は26.4 [N] であった。

6.3 消費電力量

気液相変化を用いてPARMを駆動させた際に電圧 E を測定し、そこから消費電力量 W を(3)式を用いて求めた。

Fig. 12 Experimental configuration

Fig. 13 Block diagram

Fig. 14 Experimental result (volume-time constant)

Fig. 15 Experimental results

$$W = \int \frac{E^2}{R} dt \quad (3)$$

電圧 E と消費電力 $\dot{W}$, 消費電力量 W をFig. 16に示す. 70秒間の消費電力量は4.39 [kJ]と求められた.

Fig. 16 Power consumption

7. 周波数応答実験

7.1 実験条件

本章では, 気液相変化により駆動されるPARMの動特性を把握するため, 前章と同様にFig. 12の実験装置を用いて周波数応答実験を行った. この時, 比例ゲインは $K_p=1,200$

[V/Pa], 積分ゲインは $K_i=1.8$ [V/(Pa·s)]とし, 目標圧力 P_{ref} は式(4)のように定義した.

$$P_{ref} = 0.325 + 0.025 \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

周波数は0.1 [Hz] から40 [Hz] までとし, 圧力と力の応答を記録した.

7.2 実験結果

目標圧力 P_{ref} を入力値とし, 圧力 P を出力値として, ゲインと位相を求め, ボード線図を作成した. その結果をFig. 17に示す. 位相は30 [Hz] の時 -85.7 [°] となり一次遅れ系の収束位相 -90 [°]より大きくなるため, システムは30 [Hz] まで概ね, 折点周波数15 [Hz] の一次遅れ系で近似できる. 周波数15 [Hz] の場合の実験結果をFig. 18に示す.

7.3 圧力と力の相関性

周波数15 [Hz] の場合の圧力と力の関係をFig. 19に示す. 各周波数の場合の圧力の振幅 A_p , 力の振幅 A_F , 圧力の位相 $\angle\phi_p$, 力の位相 $\angle\phi_F$ を測定し, 圧力・力・周波数の関係を求めた. その結果をFig. 20に示す. このグラフより, 圧力と力の振幅比は一定ではない. また40 [Hz] の際に力の位相は圧力の位相より約15 [°] 遅れている. これは, PARMの粘弾性⁸⁾が原因ではないかと考えられるが, 詳細

Fig. 17 Bode diagram

Fig. 18 Experimental result for $f=1.5$ [Hz]

Fig. 19 Relationship between pressure and force for $f=1.5$ [Hz]

Fig. 20 Relationship between pressure and force (frequency domain)

は今後の研究課題である。今後、力制御を行う時には何らかの位相の補償が必要であると考えられる。

8. 結 言

本論文では、気液相変化により駆動される高応答なアクチュエータの力制御を実現することを目的とし、装置の製作および制御系を適用し、PARMの駆動実験を行い、性能を検証した。

まず、PARMの静特性を求め、内圧・収縮率・力の関係式と収縮率・体積の関係式を得た。次に、気液相変化を用いた圧力発生実験を行い、気液相変化による圧力の発生を確認した。

その後、圧力のPI制御系を構成し、PARMの内圧を気液相変化により制御する実験を行った。ステップ応答実験の

目標圧力は $0.3 \rightarrow 0.35 \rightarrow 0.3$ [MPa gauge]であり、内圧を変動させた際の圧力、電圧、PARM出力、液温を測定した。目標圧力 0.35 [MPa gauge]に上昇する際の時定数は 0.12 [s]、目標圧力 0.3 [MPa gauge]に下降する際の時定数は 0.32 [s]となった。また、PARMの出力は制御を行うことで、約 26.4 [N]の保持に成功した。この内圧制御を行った場合の消費電力量は 4.39 [kJ]と求められた。

さらに、周波数応答実験を行い、圧力・力・周波数の関係を求めた。これらの結果より、気液相変化により駆動されるPARMは、数ヘルツの動特性を要するロボットアームや鉗子などの制御に十分適用できる可能性が示された。

参 考 文 献

- 1) 則次俊郎：空気圧アクチュエータ，日本ロボット学会誌，Vol. 15, No. 3, 355/359 (1997)
- 2) Kenji Kawashima, Takahiro Sasaki, Toshiyuki Miyata, Naohiro Nakamura, Masato Sekiguchi and Toshiharu Kagawa: Development of Robot Using Pneumatic Artificial Rubber Muscles to Operate Construction Machinery, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 16, No. 1, 8/15 (2004)
- 3) 松田信一，大野学，泉俊之，加藤重雄：金属ベローズ型気液相変化アクチュエータ（内視鏡下外科手術用処置具への利用），精密工学会誌，Vol. 71, No. 6, 723/728 (2005)
- 4) 吉澤達哉，加藤友規，大野学，加藤重雄：気液相変化駆動式ゴム人工筋アクチュエータの基礎特性，日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集，67/68 (2010)
- 5) 本多駿太，加藤友規，程明昭，小笠原利樹，大野学：気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータの製作，春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，97/99 (2014)
- 6) 藤本真作，小野敏郎，逢坂一正，趙子磊：空気圧ゴム人工筋のモデリングと拮抗駆動型システムの制御系設計，日本機械学会論文集（C編），73巻730号，1777/1785 (2007)
- 7) 香川利春，藤田壽憲，山中孝司：人工筋アクチュエータの非線形モデル，計測自動制御学会論文集，Vol. 29, No. 10, 1241/1243 (1993)
- 8) 加藤友規，大野学，東知明，只野耕太郎，川嶋健嗣，香川利春：ゴムベローズを用いた高減衰空気圧ゴム人工筋の提案と特性解析，日本フルードパワーシステム学会論文集，42巻6号，114/119 (2011)