圧縮空気生成手法の携帯性評価に基づく ハイブリッド型携帯空気圧源の開発

奥井 学^{*1} 名倉 裕貴^{*2} 山田 泰之^{*2} 中村 太郎^{*2}

Development of Hybrid Pneumatic Power Source based on Gas Compressing Methods Evaluation

Manabu Okui^{*1}, Yuki Nagura^{*2}, Yasuyuki Yamada^{*2} and Taro Nakamura^{*2}

This paper proposes a novel hybrid pneumatic power source for a development of a portable pneumatic source. The hybrid source achieves light weight system by combination of multiple pneumatic sources. This paper is divided as follows. Firstly, the mobility of various pneumatic sources are evaluated by experiments. Evaluated methods are a small compressor driven by battery, tank, phase change of material, and chemical reaction. From the results, it was clarified that there is no best method since each method have advantages and disadvantages. Secondly, hybrid pneumatic source is proposed utilizing the result. Finally, a prototype is developed and the effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments.

Key Words: Portable Pneumatic Source, Wearable Robot, Chemical Reaction, Phase Change of Material

1. 緒 言

空気圧駆動システムは、柔軟な動作が可能かつ軽量で高出力という特性を持ち、アシスト装置 [1]~[4] や柔軟駆動ロボット [5] [6] に多く利用されている。こういった装置の駆動には主にエンジンや大型モータのコンプレッサにより生成される圧縮空気を利用されるが、これらの大型／高重量の空圧源は装置のモバイル化の障壁となっている。携帯可能な空圧源により装置のモバイル化が可能となれば、装置の適用可能範囲が大きく広がり、さらに価値を高められると考えられる。

一方で、これまでも多くの携帯空圧源が開発されている。例えば、その一つが小型のコンプレッサをバッテリーで駆動する方法である [7]。本方式は電池を電源としモータの駆動により圧縮空気を生成する。しかし、電気エネルギーから圧縮空気を生成するため、高圧吐出時には重量に対して生成できる圧縮空気の流量が小さいという問題がある。排気圧の回生によるコンプレッサの効率改善手法 [8] も提案されており、エネルギー効率の改善効果は確認されているが、回生のための装置を付加する必要があり、空気圧源全体としては重量が増加してしまう。コンプレッサを用いない手法も試みられており、北川・塚越らはドラ

イアイスの3重点を利用した空圧源を開発している [9]。本方式では動力を必要とせず、無騒音で安定して 0.42 [MPa] の圧力の気体を放出できることが確認されている。しかし、本方式はドライアイスを使用していることから、常温下では装置の非使用時にもドライアイスの気化が進むため圧縮空気のエネルギーを貯蔵することができない、ドライアイス容器が過度に冷却され凍傷の恐れがある、などの課題が存在する。新たな手法として化学反応を利用した手法 [10] [11] も提案されており、0.7 [MPa] 以上の高圧が発生可能なことが確認されているが、物質の混合方法や安定した空気圧供給などに課題が存在する。そのほかにもガスの燃焼 [12] や燃料電池の放電／充電 [13]、チャンバー内に充填した液体の気液相変化を利用した駆動方法 [14] も開発されているが、これらはシリコンなどで構成されるソフトロボットの駆動を目的としている。そのため、空気圧シリンダや空気圧人工筋肉などの既存のアクチュエータの駆動に十分な圧力と流量を安定的に供給することには適さない。また、空圧源の代わりにタンクに圧縮空気をためる手法も考えられるが、高圧貯蔵では容器の耐圧性向上のためタンクが重くなり、低圧貯蔵では十分な圧縮空気量を確保するためタンクが大型化してしまう。

このように、圧縮空気生成手法には様々な方法が存在し、それぞれの手法が異なる特徴を持つ。Wehner らは空気圧駆動ソフトロボットの駆動という観点で複数の圧縮空気生成手法の性能について比較評価を行っている [15]。この中で、コンプレッサのバッテリー駆動が最も質量に対して発生できる圧縮空気量が多いという結果が得られているが、本比較は駆動圧力が 0~0.2 [MPa]

原稿受付 2017 年 7 月 5 日

^{*1}中央大学大学院

^{*2}中央大学

^{*1}Graduate School of Chuo University

^{*2}Chuo University

■ 本論文は新規性（要素分野）で評価されました。

のソフトロボット駆動のためのものであり、通常の空気圧アクチュエータの駆動圧力である 0~0.7 [MPa] 程度の評価は行われていない。

本研究では既存の空気圧システムの駆動に十分な圧力である 0.7 [MPa] を発生できる携帯可能な小型空圧源の開発を目標とし、はじめに携帯性という観点で複数の圧縮空気発生手法の評価を行う。次いで、その評価結果を踏まえたハイブリッド空気圧源を提案し、その構成と動作について述べる。最後に試作機による動作実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

2. 圧縮空気生成手法の評価

2.1 評価基準

本章では、圧縮空気生成手法の携帯性について評価し、携帯空気圧源開発の検討材料とする。まず、携帯空気圧源は空気圧システムの駆動に十分な圧力を発生可能かどうかが重要である。同時に、携帯空気圧源は身に着けながら移動が可能であり、できるだけ使用者に負担を与えないことが望ましい。すなわち軽量であることが求められる。

ここで、空気圧源の質量について考える。空気圧源の質量は圧縮空気を生成するエネルギーを持つ部分と、その他の付随システムに大別できる。例えばコンプレッサのバッテリー駆動の場合、バッテリーは前者に、コンプレッサは後者に分類できる。携帯性という観点では、質量当たりの発生空気量が多いことが望ましい。そのため空気圧源の発生総流量を、圧縮空気を生成するエネルギーを持つ部分の質量で除した値を、流量密度 [NL/g] とよぶこととし、携帯性評価指標とする。

一方で、発生総流量を付随システムも含めた装置全体の質量で除した値を指標とすることも考えられる。しかし、付随システムの質量は発生総流量に対して変化しない。そのため、比較のためには発生総流量をある特定の値に限定する必要がある。発生総流量の異なる空気圧源同士を比較することができない。これより、発生総流量の大きさに寄らない流量密度 [NL/g] を指標とした。ただし、付随システムの質量についても、実用上の影響は大きいので測定を行う。以上より、携帯性評価は発生可能最大圧力 [MPa] と流量密度 [NL/g] により行う。

2.2 評価対象

測定対象とする圧縮空気生成手法について述べる。対象とした手法は、空気圧シリンダなどの既存のアクチュエータを問題なく駆動でき、かつ入手が容易な手法を選定した。以下にそれぞれの手法について述べる。

・小型コンプレッサのバッテリーによる駆動

小型のコンプレッサをバッテリーで駆動する方法である。主にモータによりピストンやペローズを押し気体を圧縮することで圧力を高める。連続的に圧縮空気を送り出すことが可能である。

・空気タンク

耐圧タンクに空気を充填する。タンクに空気を充填すれば、繰り返し利用できる。高圧を充填すればより多くの圧縮空気を充填可能だが、高圧に耐える容器は一般的に高重量である。また、高圧ガス保安法 [9] により 1 [MPa] 以上の高圧の気体を扱うには充填量や取扱に制限が生じるため、実用下での圧力は 1 [MPa] 以下に制限される。

・化学反応 (クエン酸と重曹の混合)

クエン酸と炭酸水素ナトリウム、水を混合することで発生する二酸化炭素を利用する (この反応を以下、化学反応とよぶ)。式 (1) に反応式を示す。これらの物質は一般的に清掃用に利用されており、安価で保存が容易、かつ簡易に入手および廃棄が可能である。また本反応により生成される二酸化炭素、水、クエン酸三ナトリウムは無毒であり、これらの混合物は飲料用水としても利用可能である。

・ドライアイスの昇華 (物質の相変化)

ドライアイスの昇華により発生する二酸化炭素を利用する。ドライアイスは日常よく冷却剤として使用される身近な物質であり、二酸化炭素はアンモニア製造など化学工業の副産物として生成される。このドライアイスを密封容器に入れて加熱するとその一部が炭酸ガスとして昇華するため圧力が次第に上昇する。この固体から気体への相変化を利用する。

・液化二酸化炭素の気液相変化 (物質の相変化)

常温、高圧下において液体状態で存在する二酸化炭素の相変化を利用する。基本原理はドライアイスの昇華と同様である。気体放出に伴う温度低下の影響を受けにくく、安定した圧力供給が可能であるが、蒸気圧が約 6 [MPa] (20°C) と高く、容器の耐圧性が求められる。一般的には肉厚の鉄製容器に少量が封入され、自転車の携帯型空気入れなどに用いられる。

・ジメチルエーテルの気液相変化 (物質の相変化)

エアダスターなどに広く用いられる DME (ジメチルエーテル) の液体から気体への相変化を利用する。これらの気体は常温大気圧下で気体であるが、蒸気圧が 0.5 [MPa] 程度と比較的低圧であるため、軽量の缶容器などで保存が可能である。

2.3 測定方法

それぞれの圧縮空気発生手法の特性を実験により分析する。Fig. 1 に実験装置を示す。初めに圧力センサを用いて空気圧源の供給可能圧力を測定する。次に二方弁を開け、放出される気体の総流量を測定し、圧縮空気を生成するエネルギーを有する部分の質量で除すことで、流量密度を算出する。実験は室温 25 度の室内で行い、標準状態気体体積の算出時の大気圧は 1.013 [MPa] とした。また、測定はそれぞれ 3 回行い、その平均値を測定値とした。圧力センサは日本ピスコ製 SEU11-6UA を使用した。流量計は測定気体が空気または二酸化炭素の場合には SMC 製熱式流量計 PFMB7201-02-A-M を使用した。測定気体が上記の気体以外の場合は熱式流量計での流量測定が困難なため、容

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

積式流量計（GL Sciences 製 Gas Flow Meter GF 1010）で測定を行った。本流量計は DA 変換出力がないため、流量表示画面をカメラで撮影し、流量を記録し積算した。空気タンクおよび物質の相変化については、容器に圧縮空気または物質を封入したものを空気圧源とした。コンプレッサのバッテリー駆動、化学反応については次節以降で述べる。

2.4 コンプレッサのバッテリー駆動で圧縮空気生成

実験装置概要を **Fig. 2** に示す。コンプレッサの吐出圧力ごとの性能を評価するため、図中のタンクをあらかじめ 0.2, 0.4 [MPa] に加圧し、測定を行った。コンプレッサから吐き出された空気はタンクに蓄えられ、タンク内圧が設定値以上に達すると 2 ポートバルブが開き、タンクに蓄えられた空気が大気へ開放される。測定は、満充電のバッテリーの容量がなくなるまでに吐き出された流量を測定した。バッテリーは NISSEN 製 24VC100T2 型リチウムイオンバッテリー、コンプレッサは SUQUSE 製 MP-2-C を使用した。本方式では、発生した空気の総流量をバッテリーの質量で除し、それを質量あたりの発生総流量とした。

2.5 化学反応での圧縮空気生成

実験装置を **Fig. 3** に示す。装置はクエン酸、重曹、水の混合機構を有する容積 500 [ml] のボトルである。ボトルの内部には炭酸水素ナトリウムとクエン酸が水と分離された状態で格納さ

れており、外部磁力により可動する機構により密封状態を保ったまま混合を行うことが可能である。実験では、初めに 2 方弁を閉じた状態で磁力操作により混合を行う。次に、混合を促すためボトルを振る。圧力に変化が無くなるまでボトルを振りそのときの圧力を測定し、その後 2 方弁を開放し流量を測定する。

2.6 結果と考察

測定結果を **Table 1** に、測定時に確認した各手法の長所と短所について **Table 2** に示す。発生可能圧力については、コン

Fig. 2 Measurement condition of compressor driven by battery

Table 1 Result of mobility comparing experiment

	Maximum pressure[MPa]	Flow per mass [NL/g]	Flow per mass considering vessel [NL/g]	Mass of additional systems [g]	Break down of additional systems
Small compressor and battery (0.4 MPa)	0.4	0.076	0.076	277	Compressor (MPC-2SQUSE.,Co)
Small compressor and battery (0.2 MPa)	0.2	0.46	0.46		
Tank	More than 1.0 MPa	0.84	0.066	45	Vessel(volume is 1.5 L)
Phase change of dry ice	More than 1.0 MPa (0.42MPa at triple point)	0.48	0.31	24	Vessel (able to contain 500 g dry ice)
Phase change of liquid CO₂	More than 1.0 MPa	0.47	0.12	226(vessel), 237(regulator)	Vessel(able to contain 74 g liquid CO ₂), regulator
Phase change of DME	0.53 (at 25°C)	0.52	0.27	221	Vessel(able to contain 235 g DME)
Chemical reaction	More than 1.0 MPa	0.15	0.0078	20 (vessel) 100 (Water)	Vessel(volume is 1.5 L), Water

Fig. 3 Measurement condition of chemical reaction

Table 2 Advantage and disadvantage

	Advantage	Disadvantage
Small compressor and battery	-Stable movement -Repeatedly usable	-The higher pressure, the lower flow capacity
Tank	-Repeatedly usable	-Large scale -Needs external pneumatic source
Phase change or dry ice	-High flow rate under triple point	-Low flow rate -Vessel becoming too cold may harm the user as it can cause frostbite
Phase change of liquid CO₂	-High flow rate -Stable pressure supply	-Require high pressure resistant vessel
Phase change of DME	-High flow rate	-Pressure decreases at low temperature
Chemical reaction	-Easy to store -Easy to obtain and dispose	-Difficult to generate gas stably

プレスと DME の相変化を除き、空気圧システムの駆動に十分な圧力が発生可能ことが確認できた。また、流量密度はタンクが最も高いが、圧縮空気充てんに必要な体積が大きくなるため、一概に最も優れているとは言い難い。次いで相変化を利用した 3 手法が高く、コンプレッサのバッテリー駆動と化学反応は流量密度が低いことが確認できた。

Fig. 4 Mobility chart of pneumatic sources

また Table 1, 2 より他手法と比較し明らかに携帯性に優れた手法はないことが分かる。Fig. 4 に、各手法の発生可能圧力と流量密度を示す。図中で右上にあるほど携帯空気圧源としての性能が高いといえるが、最も右上に位置する空気タンクは占有体積が大きく、装着して運搬できる空気量が限定される。次点の液化二酸化炭素についても、常温で 6 [MPa] 程度の高圧となるため容器に高い耐圧性が必要となり、容器も考慮した場合の流量密度は大きく低下し、0.12 [NL/g] となる。このように、実用上の流量密度は小さくなり、最適な手法とは言えない。

相変化を利用した 3 手法の流量密度はいずれも同様の流量密度となることが確認できた。また、mol 体積の原理から流量密度の理論値を算出すると、ドライアイスと液化二酸化炭素の場合は 0.56 [NL/g]、DME は 0.53 [NL/g] となり実験値と近い値となった。なお、1 [mol] の物質が 25°C、100 [kPa] の環境下で 24.7 [L] の気体に相当するとして理論値を算出した。二酸化炭素の実験値が理論値よりもやや小さいが、これは圧縮空気生成の課程で空気が冷却されたためと考えられる。また、化学反応やコンプレッサと比較して相変化を用いる手法は流量密度が大きいことが分かる。加えて、容器以外の付随システムがない点も長所である。一方で、相変化に伴う温度低下により、供給圧力が低下する問題がある。これは 3 充填による蓄熱や、フィンの取り付けによる大気との熱交換の促進といった対策が効果的と考えられる。

3. ハイブリッド空気圧源

3.1 概要

2 章での検討結果より、明らかに携帯性の優れた手法は存在しないことが分かる。つまり、それぞれの手法は一長一短の性質を持っている。また、流量密度については圧縮空気生成原理に基づく数値であるため、劇的な改善は困難であると考えられる。そこで本研究では、複数手法を組み合わせることで、それぞれの長所を活かすハイブリッド空気圧源を提案する。

液化二酸化炭素に着目する。液化二酸化炭素方式は、最大供給圧力 0.7 [MPa] を達成できるが、流量密度が他の手法に比べて小さい。そこで、発生流量の多い他の手法と組み合わせ、携帯空気圧源全体の軽量化を図る。発生流量の多い手法として DME をあげる。同じく発生流量の多い手法として、ドライアイスの昇華があるが、ドライアイスは非使用時でも気化が進み、エネルギーの貯蔵が困難であるため、本研究では選択しない。

Fig. 5 System configuration of proposed hybrid pneumatic source

Fig. 6 Movement of hybrid pneumatic system

Fig. 5 に提案する構成を示す。2 ポートバルブで必要圧力によって空圧源 2 種類を選択し、電空比例弁で空気圧式アクチュエータへの圧力供給を行う。ハイブリッド空気圧源の動作を **Fig. 6** に示す。低圧供給時には、低圧側の DME のみから圧力供給を行う。高圧供給時は、**Fig. 6 (a)** のように駆動開始直後は DME から供給を行い、圧力がある程度高まった時点で **Fig. 6 (b)** のように高圧側の電磁バルブを開く。すると、高圧空気圧源から高圧の圧縮気体がアクチュエータに供給される。このとき、高圧空気圧源から供給される気体は、逆止弁により低圧側には流入しない。本動作により、低圧・高圧供給時の双方において高圧空気圧源の使用流量を低減でき、空気圧源の軽量化が可能となる。

軽量化以外にもハイブリッド化の利点は 2 点挙げられる。一つは応答速度の改善である。アクチュエータ駆動に高圧が不要な場合でも、空気供給源の圧力を高めることで応答速度が改善する。もう一つは、圧力供給の安定化である。DME の気液相変化やドライアイスの昇華を利用した手法は高い流量密度を持つが、温度低下により供給流量、供給圧力の低下が起こる。これは流量の大きいアクチュエーションを行ったり、外気温が低い際に生じやすい。これに対し、外部環境に影響されにくい液化二酸化炭素やコンプレッサを組み合わせることで、圧力の安

Table 3 Parameters of hybrid pneumatic source

P_L	Pressure of low pneumatic source [MPa]
P_H	Pressure of high pneumatic source [MPa]
P_{ref}	Threshold pressure [MPa]
W_L	Flow density of low pneumatic source [NL/g]
W_H	Flow density of high pneumatic source [NL/g]
P_i	Target pressure [MPa]
α_i	Consumed total flow [NL]
m_L	Weight of additional systems of low pressure source [g]
m_H	Weight of additional systems of high pressure source [g]
m_h	Weight of additional system for hybrid system [g]

定供給が可能となる。

なお、本章で試作する液化二酸化炭素の相変化と DME の相変化の組み合わせはハイブリッド空気圧源の一例であり、実際の空気圧システムへの適用に際しては用途に応じた最適な組み合わせを模索することが望ましい。

3.2 軽量化の効果

本節では、組み合わせる圧縮空気生成手法から、ハイブリッド化により軽量化できる質量を算出する。本節で用いるパラメータを **Table 3** に示す。携帯空気圧源が一回のエネルギー充電で行う動作の駆動圧 [MPa] と消費流量 [NL] を P_i 、 α_i とし、動作パターンが n とおり存在するとする。すると、単一の圧縮空気生成手法を用いる空気圧源の重量 M_0 は以下のように表わせる。

$$M_0 = \frac{1}{W_H} \sum_{i=0}^n \alpha_i + m_H \quad (2)$$

右辺第一項が圧縮空気を生成するエネルギーを有する部分の質量、第 2 項が付随システムの質量である。

次に、ハイブリッド携帯空気圧源の重量 M_1 を考える。低圧空気圧源の消費空気量は低圧供給時の消費流量と高圧供給時の一部である。また、高圧空気圧源の消費空気量は高圧供給時の一部である。高圧供給時には、はじめ低圧空気圧源からアクチュエータ内圧が P_{ref} となるまで圧力供給を行い、 P_{ref} を超えてから 2 方弁を開放し高圧空気圧源から圧縮空気を供給する。すなわち、 M_1 は式 (3) のように表せる。右辺第一項が低圧空気圧源の圧縮空気を生成するエネルギーを有する部分の質量、右辺第 2 項が高圧空気圧源の圧縮空気を生成するエネルギーを有する部分の質量である。ただし、 $n > k$ 、 $P_{i+1} > P_i$ 、 $P_{k+1} \geq P_{ref} \geq P_k$ 、 $P_H \geq P_i$ 、 $P_L \geq P_{ref}$ とする。

ただし、実際の駆動においては、高圧空気圧源からの圧縮気体が二つのチェック弁とレギュレータ B 間の管路にも充填されることや、2 ポートバルブの動作タイミングによっては二つの空気圧源からの供給が完全に切り分けられないことから高圧空

Fig. 7 Qualitative comparison of proposed method and conventional

気圧源の消費流量がやや大きくなることが予想される。これらの差はアクチュエータ駆動に消費される空気量よりも小さいことが予想されるため、考慮しない。

$$M_1 = \frac{1}{W_L} \left\{ \sum_{i=0}^k \alpha_i + \sum_{i=k}^n \frac{P_{ref}}{P_i} \alpha_i \right\} + \frac{1}{W_H} \left\{ \sum_{i=k}^n \frac{P_i - P_{ref}}{P_i} \alpha_i \right\} + m_L + m_H + m_h \quad (3)$$

以上より、ハイブリッド化により軽量化される質量差 ΔM は以下のように表わせる。

$$\Delta M = \left(\frac{1}{W_H} - \frac{1}{W_L} \right) \sum_{i=0}^k \alpha_i + \sum_{i=k}^n \left\{ \alpha_i \left(\frac{1}{W_H} - \frac{P_{ref}}{W_L P_i} - \frac{P_i - P_{ref}}{W_H P_i} \right) \right\} - m_L - m_h \quad (4)$$

ΔM が正であればハイブリッド化による軽量化が見込め、また ΔM は軽量化された重量を表す。逆に ΔM が負の場合はハイブリッド化により質量が増加する。

Fig. 7 にハイブリッド化の軽量化効果を定性的に示す。ハイブリッド化により付随システムの質量 m_L , m_h の分質量が増加するため、供給すべき圧縮空気量の少ない範囲ではハイブリッド化により質量が増加してしまう。しかし、供給空気量がハイブリッド化による軽量化される質量と m_L , m_h の和が等しくなる供給空気量 Q_M より大きい領域では、軽量化が望める。またその軽量化効果は供給空気量が多いほど大きい。

4. 試作機による実験

4.1 試作機の構成

本章ではハイブリッド空気圧源を試作し、実験によりその実現性と有効性を確認する。**Fig. 8** に試作機の構成を、**Fig. 9** に外観を、**Table 4** にハイブリッド空気圧源の具体的なパラメータを示す。Table 4 の各パラメータを表す文字は Table 3 と同義である。試作機は高圧空気圧源として液化二酸化炭素を、低圧空気圧源として DME を有する。アクチュエータへの供給圧力に応じて 2 方弁を開閉し、高圧空気圧源の消費流量を抑制する。それぞれの空気圧源には気体の逆流防止のためチェックバルブが取り付けられている。レギュレータ A は液化二酸化炭素の高圧を 1 [MPa] 以下に高圧するレギュレータである。レギュレータ B は電磁レギュレータであり、アクチュエータに所望の圧力を供給する。圧力センサ A, B は測定用であり、センサ C は測定および制御用である。アクチュエータは内径 10 [mm]、スト

Fig. 8 Pneumatic circuit of prototype

Fig. 9 Image of the prototype

Table 4 Parameters of prototype

P_L	0.53 MPa (at 25 °C)
P_H	More than 1 MPa
P_{ref}	0.25 MPa
W_L	0.27 NL/g
W_H	0.12 NL/g
m_L	0 g
m_H	237 g (regulator)
m_h	131 g (2 port valve:57g, Pressure sensor:49g, others:25g)

ローク 45 [mm] の空気圧シリンダを用いた。

4.2 基礎実験

試作機を用いて、提案手法により高圧空気圧源の消費流量が削減されているか検証する。試作機により 600 [ml] の容積のボトルに低圧空気圧源である DME から容器内が 0.3 [MPa] となるまで加圧を行い、次に液化二酸化炭素から空気を供給し 0.6 [MPa] まで圧力を上昇させることを考える。

測定にあたり、DME の流量測定は体積式流量計を使用する必要がある、大気圧下の気体流量しか測定できないため、以下の手順で実験を行った。なお、圧縮空気の充てんはゆっくりと行い、ボトル内は等温条件として測定を行った。

1. コンプレッサで圧縮した空気を用いて、ボトルを 0.6 [MPa] に加圧し、ボトルに充てんされた圧縮空気の総流量を測定する。

Fig. 10 Result of basic experiment

- 測定した総流量を用いて、ボトル内圧力と充てん空気量の関係を算出する。算出には、ボトル内圧力と充てん空気量が線形関係であることを用いる。
- 2と同様に高圧空気圧源と低圧空気圧源の消費流量、圧力の関係を算出する。
- Fig. 8中の2方弁とチェックバルブの間に高圧空気圧源の消費流量測定のための流量計を挿入する。ハイブリッド空気圧源により圧力供給実験を行い、その際のボトル内圧力と高圧側空気圧源の消費流量を測定する。

上記手順で算出・測定したそれぞれの値を Fig. 10 に示す。図より、高圧空気圧源の総流量が削減できているのが分かる。したがって、提案するハイブリッド空気圧源が狙い通りの動作をすることが確かめられた。

4.3 制御手法

アクチュエータへの印加圧力が閾値圧力 P_{ref} を上回る場合の制御について述べる。空圧回路の要素については Fig. 8 の構成とする。初めにレギュレータ B の設定圧力を P_i とし、アクチュエータに圧力供給を行う。次に、圧力センサ C で検出した圧力が閾値 P_{ref} を超えたところで2方弁を開放する。すると高圧空気圧源から圧縮気体が流入し、アクチュエータが P_i まで加圧される。閾値 P_{ref} は P_L よりも小さい必要がある。また P_L に近い値になるほど高圧空気圧源の消費流量を削減できるが、アクチュエータの応答遅れなどを招くためアプリケーションに応じて最適な値を設定することが望ましい。

4.4 シリンダ駆動実験

空気圧シリンダの連続駆動により、提案する空気圧源の実践の評価を行う。供給圧力 0.25 [MPa] で2回シリンダを駆動し、その後 0.5 [MPa] で1回駆動する動作を1サイクルとして実験を行った。シリンダの加減圧は2[s]おきに切り替えた。閾値 P_{ref} は 0.25 [MPa] に設定した。各空気圧源の内容量は、液化二酸化炭素が 74 [g]、DME は 235 [g] である。実験は25度の室内で行い、その時のシリンダへの供給圧力と各空気圧源の圧力、シリンダの駆動回数を記録した。また、シリンダに目標圧力を供給できなくなった時点で実験を終了した。

実験の結果、シリンダを1,638回駆動した時点で高圧空気圧源の圧力が0.5 [MPa]を下回ったためシリンダの駆動を停止した。実験前後での空気圧源の消費空気量はそれぞれの空気圧源の質量変化から算出した。液化二酸化炭素は74 [g]、DMEは

Fig. 11 Pressure inside cylinder and 2 port valve state

Fig. 12 Pressure of high and low pneumatic source

Fig. 13 Pressure equilibrium state of pneumatic source

98.7 [g] 減少しており、これはそれぞれ 34.8 [NL]、51.5 [NL] に相当する。

動作1周期でのシリンダ内圧力と2方弁の動作を Fig. 11 に示す。目標圧力が 0.5 [MPa] の場合、シリンダ内圧が閾値である 0.25 [MPa] を超えたタイミングで2方弁を開放していることが確認できる。Fig. 12に、駆動回数1回めから100回めまでの空気圧源の圧力を示す。ただし、液化二酸化炭素の圧力はレギュレータで降圧された圧力である。これより、液化二酸化炭素は安定した供給圧力であるが、DMEは駆動回数が増えるに従い供給圧力が低下することが確認できた。これは気体排出時に気化熱を奪われ温度が低下し、DMEの蒸気圧が低下するためである。Fig. 13に、駆動回数600~700回での空気圧源の圧力を示す。液化二酸化炭素の圧力低下は確認できなかった一方で、DMEは約0.32 [MPa]まで圧力が低下し、また圧力が下げ止まっていることが確認できる。これは、本実験条件下では供給圧力0.32 [MPa]の状態室温から容器に伝達されるエネルギーと、気化熱により失われるエネルギーが平衡状態になったためと考える。

Fig. 14 Mass comparison of conventional and proposed method

4.5 ハイブリッド化による軽量化効果

試作したハイブリッド空気圧源の重量削減効果について考察する。実験の結果より、液化二酸化炭素は 34.8 [NL], DME は 51.5 [NL] 消費され、空気圧源全体では 86.3 [NL] の気体が消費された。

本結果および Table 4 のパラメータを用いて、本シリンダ駆動タスクに対する空気圧源の供給総流量と空気圧源重量の関係を算出し、3 章の Fig. 7 を具体的数値で表したものが Fig. 14 である。実線はハイブリッド空気圧源、点線は高圧空気圧源のみを用いた空気圧源、マーカーは本章の実験結果である。

これより、供給総流量が約 50 [NL] を超えるとハイブリッド化による軽量化効果が表れることが分かる。逆に、必要な供給流量が 50 [NL] に満たない場合はハイブリッド化により逆に重量が増す。ただし、50 [NL] は空気圧システムを駆動するには比較的少ない空気量であり、多くの空気圧駆動システムにおいてハイブリッド化による軽量化が可能となると期待される。

本実験においては高圧空気圧源のみを用いた場合よりも約 100 [g] の軽量化がなされているが、供給量は 86.3 [NL] と小さいため、実際の使用においてはさらに軽量化効果は大きくなる。

4.6 圧力供給の安定化について

2 種類の空気圧源を組み合わせによっては、一方のデメリットをもう一方が補うことが可能である。その一例として、本試作機を用いた圧力供給の安定化について述べる。低圧空気圧源として用いた DME は、短時間に多量の気体を放出すると容器内部の温度が低下し DME の蒸気圧が下がり、供給圧力が低下する。そのため、4.3 節での 0.25 [MPa] でのシリンダ駆動を行う場合において、供給圧力が不足する可能性が考えられる。そこで、供給圧力が低下した場合には 2 ポートバルブを開放し、高圧側空気圧源から圧力供給することを考える。

例えば、DME から圧力供給してから、アクチュエータ内圧が目標圧力に達しない時間が T_{ref} 経過した場合に 2 ポートバルブを開放する制御則などにより、圧力供給の安定化が可能である。本制御則を試験機に適用し、実験した結果を Fig. 15 に示す。なお、本実験では T_{ref} は 0.4 [s] とし、DME はあらかじめ冷却し供給圧力を 0.2 [MPa] 程度まで低下させ行った。結果より、DME の圧力低下に対して高圧側空気圧源からの圧力供給を行い、目標圧力を供給できていることが確認できる。

Fig. 15 Experimental verification of pressure stabilization function

Fig. 16 Response speed comparison of conventional and proposed method

4.7 応答性への影響について

空気圧アクチュエータの駆動では、圧力源とアクチュエータ内の圧力差が気体流量に影響し、アクチュエータの応答速度に大きく影響する。提案するハイブリッド空気圧源は 2 種類の圧力の異なる空気圧源を持つため、低圧供給時には必要に応じて応答性を向上させることが可能である。

試作したハイブリッド空気圧源の応答性向上効果を確認するため、応答速度の比較実験を行った。実験は Fig. 9 の装置を使用した。シリンダへの目標供給圧力を 0.3 [MPa] とし、比較対象として DME のみを用いた場合と、2 方弁を常に開放して液化二酸化炭素からも圧力供給できる場合を比較した。Fig. 16 に実験により測定した圧力の応答を示す。DME の応答の時定数は 0.15 [s]、液化二酸化炭素は 0.11 [s] であり、応答速度に差が生じることが確認できる。これより、高い応答速度が必要な際には、低圧駆動の場合でも高圧側空気圧源から圧力供給することで応答速度が改善できることを確認した。

5. 結 言

携帯可能な空気圧源の開発を目的とし、従来よりも軽量の構成を実現可能なハイブリッド空気圧源を提案した。初めに、既存の圧縮空気生成手法の携帯性比較を行った。比較対象はコンプレッサのバッテリー駆動、タンクへの充電、物質の相変化、ク

エン酸と炭酸水素ナトリウムの化学反応である。その結果から、それぞれの空気圧源の携帯性は一長一短であり、最適といえる手法が存在しないことを示した。次いで、複数の圧縮空気生成手法を組み合わせるハイブリッド空気圧源を提案した。ハイブリッド空気圧源は、高圧が発生可能であるが供給可能流量が少ない空気圧源と、発生圧力は小さいが供給流量が大きい手法を組み合わせ、空気圧源の総重量を削減する手法である。最後にジメチルエーテルの相変化による空気圧源と、液化二酸化炭素の相変化を用いた空気圧源を試作し、実験により提案手法の有効性を示した。提案するハイブリッド空気圧源は従来の空気圧システムへの適用が期待される。今後は実際の空気圧駆動システムロボットへの適用を行い、実用化に向けた課題の抽出を行う。

また、今回の携帯性比較結果から、質量当たりの発生可能な空気量は圧縮空気生成原理から決定されるため、既存手法の携帯性には限界が存在することも分かった。そのため既存手法を改善したとしても空気圧源の性能が劇的に改善することは難しく、今回提案したハイブリッド化や、エネルギー回生などの新たなアプローチが必要であると考えた。

謝 辞 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援により実施された。

参 考 文 献

- [1] Y. Muramatsu, H. Umehara and H. Kobayashi: "Improvement and quantitative performance estimation of the back support muscle suit," Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) 35th Annual International Conference of the IEEE, pp.2844-2849, 2013.
- [2] D. Sasaki, T. Noritsugu and M. Takaiwa: "Development of active support splint driven by pneumatic soft actuator (ASSIST)," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation Barcelona, pp.520-525, 2005.
- [3] H. Inose, S. Mohri, H. Arakawa, M. Okui, Y. Yamada and T. Nakamura: "Semi-Endoskeleton-Type Waist Assist AB-Wear Suit Equipped with Compressive Force Reduction Mechanism", Proc. of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2017), pp.6014-6019, 2017.
- [4] M. Okui, S. Iikawa, Y. Yamada and T. Nakamura: "1st Prototype of a Variable Viscoelastic Joint System with a Clutch Composed of Pneumatic Air Muscle And Magneto Rheological Brake," Proc. of The 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), P0158, 2016.
- [5] Z. Wang, P. Polygerinos, J.T.B. Overvelde, K.C. Galloway, K. Bertoldi and C.J. Walsh: "Interaction Forces of Soft Fiber Reinforced Bending Actuators," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.22, issue 2, pp.717-727, 2017.
- [6] A. Dameitry and H. Tsukagoshi: "Lightweight underactuated pneumatic fingers capable of grasping various objects," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2009-2014, 2016.
- [7] 則次, 韓, 高岩: "電磁石型リニア駆動小型コンプレッサの開発", 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol.33, no.4, pp.83-90, 2002.
- [8] 佐々木, 則次, 高岩, 岩脇: "空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型空気圧供給システムの開発", 日本ロボット学会誌, vol.31, no.7, pp.659-668, 2013.
- [9] 北川, 呉, 塚越, 朴: "三重点における相変化を利用した携帯型空気圧源の開発", 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol.36, no.6, pp.16-22, 2003.
- [10] 奥井, 名倉, 飯川, 山田, 中村: "炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応を用いた小型増圧ポンプを有する携帯型空気圧源の提案", 日本

- フルードパワーシステム学会論文集, vol.48, no.3, pp.17-23, 2017.
- [11] 多田隼建二郎, 多田隼理一郎, 緒方, 越智, 東森, 金子: "爆発的混合反応を活用した高圧気体発生機構", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1P1-5, 2011.
- [12] R.F. Shepherd, A.A. Stokes, J. Freake, J. Barber, P.W. Snyder, A.D. Mazzeo, L. Cademartiri, S.A. Morin and G.M. Whitesides: "Using Explosions to Power a Soft Robot," Angewandte Chemie, vol.52, issue 10, pp.2964-2968, 2013.
- [13] K. Suzumori, A. Wada and S. Wakimoto: "A new mobile pressure control system for pneumatic actuators using reversible chemical reactions of water," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp.122-127, 2013.
- [14] K. Nakahara, K. Narumi, R. Niiyama and Y. Kawahara: "Electric Phase-change Actuator with Inkjet Printed Flexible Circuit for Printable and Integrated Robot Prototyping," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1856-1863, 2017.
- [15] M. Wehner, M.T. Tolley, Y. Menguc, Y. Park, A. Mozeika, Y. Ding, C. Onal, R.F. Shepherd, G.M. Whitesides and R.J. Wood: "Pneumatic Energy Sources for Autonomous and Wearable Soft Robotics," Soft robotics, vol.2, no.00, pp.1-12, 2012.

奥井 学 (Manabu Okui)

2012 年東京工業大学制御システム工学科卒業。2014 年同大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修士。同年日産自動車（株）入社。2016 年より中央大学研究開発機構研究補助員。同年 4 月中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻入学。柔軟アクチュエータによるリハビリ支援装置、人工筋肉と機能性流体を用いたアシスト装置、携帯空気圧源の研究開発に従事。（日本ロボット学会学生会員）

名倉裕貴 (Yuki Nagura)

2017 年中央大学理工学部精密機械工学科卒業。

山田泰之 (Yasuyuki Yamada)

2013 年慶應義塾大学大学院理工学研究科環境開放科学専攻博士課程修了。2013 年東京工業大学大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻 PD 研究員、慶應義塾大学大学院 SDM 研究科附属 SDM 研究所研究員。2014 年日産自動車（株）入社。2015 年中央大学研究開発機構助教を経て、同大学理工学部精密機械工学科助教。メカニズムとデザインエンジニアリングに着目したハードウェアによる全体最適化を目指す。アシスト装置、移動ロボット、自重補償機構の応用、人工筋肉等のソフトロボティクスの研究開発に従事。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）

中村太郎 (Taro Nakamura)

信州大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。1999 年秋田県立大助手。2004 年中央大学理工学部専任講師。2006 年同大学准教授を経て 2013 年より同大学教授。現在に至る。2012-2013 年スイス連邦工科大学ローザンヌ校 Visiting Professor。博士（工学）。文部科学大臣表彰若手科学者賞等受賞。人工筋肉や機能性流体などのスマートアクチュエータの開発と制御、および生物を規範としたバイオリボティクスの開発と応用に従事。（日本ロボット学会正会員）