研究論文

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*奥井 学**, 名倉 裕貴**, 飯川 伸吾**
山田 泰之**, 中村 太郎**Proposal of Portable Pneumatic Power Source Using Chemical Reaction of
Sodium Bicarbonate and Citric Acid with Small Sized Pressure BoosterManabu OKUI, Yuki NAGURA, Shingo IIKAWA,
Yasuyuki YAMADA, Taro NAKAMURA

This paper is concerned with portable pneumatic power source using chemical reaction of sodium bicarbonate and citric acid. Carbon dioxide generated in the chemical reaction is used as the compressed air. Both sodium bicarbonate and citric acid are inexpensive, nontoxic, and readily available. This paper is organized as follows. Firstly, the characteristics of the chemical reaction is surveyed and the appropriate pneumatic power source system is discussed. Secondly, a pressure booster that can achieve a stable air generation system without external power is described. Thirdly, the experiment using the prototype system is conducted to confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words : Pneumatic power source, Chemical reaction, Pump

1. 緒 言

空気圧駆動システムは様々な分野で用いられている。近年では特に、柔軟な動作が可能かつ、軽量で高出力という特性に着目した研究が多くなされている^{1),2)}。これらの装置の駆動には主にエンジンや大型モータ駆動のコンプレッサにより生成される圧縮空気が利用されるが、これらの大型／高重量の空気圧源は装置のモバイル化の障壁となっている。携帯型空気圧源によりシステムのモバイル化が可能となれば、空気圧システムの用途が大きく広がると考える。

そのため、これまでに多くの携帯空気圧源が開発されている。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³⁾。本方式はバッテリー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エネルギー効率に課題があり、また高圧印加時に圧縮空気の吐出流量が小さいという点も問題である。一方、ガスの燃焼⁴⁾や燃料電池の放電／充電⁵⁾を利用した空気圧アクチュエータの駆動方法も開発されているが、安定的に十分な圧力の圧縮空気を生成することは実現していない。また、空気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、数MPaの高

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にはタンクが大型化してしまう。これらを顧みて、北川らはドライアイスの3重点を利用した空気圧源を開発している⁶⁾。本方式は0.42MPaの気体を安定的に放出できることが確認されているが、ドライアイスを使用していることから常温下で圧縮空気のエネルギーを貯蔵することができないなどの課題が存在する。

本研究ではこれらの課題を解決するために、炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応により発生する二酸化炭素を利用する方法に着目した。炭酸水素ナトリウムと酸の反応の空気圧源としての利用はこれまでも検討されており、動力を用いずに0.7MPa以上の高圧が発生可能という特性が確認されている^{7),8)}。しかし、いずれも発生最大圧力の測定などにとどまり実際の空気圧システムを駆動するといった検討は行われていない。そこで本報では、本化学反応の空気圧源としての特性についてより詳細に調査し、化学反応を利用した空気圧源の構成について検討する。また外部動力を用いずに反応を安定的に制御する小型増圧ポンプについて述べ、最後に試作した空気圧源による空気圧人工筋肉の駆動実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

2. 空気圧源の構成

2.1 化学反応の基本理

式(1)に示すように、炭酸水素ナトリウムとクエン酸、水を混合することで二酸化炭素が発生することは広く知られ

*平成28年10月20日 原稿受付

**中央大学

(所在地：東京都文京区春日1-13-27)

(E-mail: nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

ている。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（化学式： $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ）の混合物は無毒であり、一般的な下水に廃棄することが可能であるだけでなく、飲料用水としても利用可能である。

2.2 発生圧力と発生気体量

提案する化学反応を利用した空気圧源は、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。すなわち軽量かつ小型であることが求められる。また、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という点も重要である。そのため、発生可能な最大圧力と混合物質量あたりの発生積算流量を実験により調査した。

実験装置をFig. 1に示す。装置は500mLのボトルおよび測定用空圧回路から成る。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いる。ボトルAは内部に外部磁力により可動する機構を持ち、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、その後2方弁を開放し流量を測定する。流量計はSMC製PFMB7201-02-A-M、圧力計はPISCO製SEU11-6UAを使用した。実験は25℃の屋内で行い、標準状態気体体積の算出は大気圧を0.1013MPaとみなし計算した。実験は3回行い、その平均値を測定値とした。

実験に使用した物質の分量をTable 1に、測定結果をTable 2に示す。結果より、本手法は空気圧システムの駆動に十分な圧力が発生可能なことが確認できた。また、発生気体の積算流量は654NLであり、これは1 molの気体の体積を22.4NLとした場合の理論値である672NLとほぼ一致している。これは長さ180mmの軸方向繊維強化型人工筋肉⁷⁾を0.3MPaの印加圧力で約14回駆動可能な気体量であり、携帯空気圧源として使用に耐えうるだけの流量を発生可能であると考えられる。

Table 1 Experimental condition

Sodium bicarbonate	25.2g (0.3mol)
Citric acid	192g (0.1mol)
Water	300mL

Table 2 Experimental result

Measured integrated flow	654NL
Measured pressure	1.1MPa

Fig. 1 Gas generating experimental setup

2.3 水の分量と反応速度の関係

水を溶媒とした化学反応において、水の分量が反応速度に影響することが広く知られている。安定した圧力と流量を供給可能な空気圧源開発のため、気体の発生スピードと水の分量の影響について実験により調べた。

実験装置はFig. 1と同様のものを使用した。実験では、バルブは常に開放状態にして置き、密閉容器内にクエン酸96g、炭酸水素ナトリウム126gの混合粉末と水を分離して封入し、外部から磁力操作により混合した。混合開始から180秒間の積算流量を測定した。水量は10mLから100mLまで5mLごとに変化させ測定した。

測定結果のうち、代表的なものをFig. 2に示す。本結果から、水の分量が25mLの時に最も反応速度が速いことが分かった。また、水量が25mL以上の場合は反応速度は濃度が高いほど早く、水量が25mL以下では濃度が高いほど反応速度が低下することが分かった。そのため、本化学反応を空気圧源として使用する場合には、クエン酸と炭酸水素ナトリウムの濃度を上記実験条件での水の分量が25mLの濃度、すなわち水1Lあたりそれぞれの物質を2mol、6mol混合することが望ましいことが確認できた。

Fig. 2 Integrated flow rate of the chemical reaction

2.4 反応を継続させる手法

本化学反応は1 MPa以上の圧縮空気が発生することが可能であるため、必要な空気量分の物質をあらかじめ混合しておく場合には空気圧源内部の圧力が1 MPa以上になる可能性がある。容器内圧が1 MPa以上となる場合、タンクに

高い耐圧性が必要となるためタンクの高重量化を招く。そのため、発生圧力を適度に保つために、クエン酸と炭酸水素ナトリウムを必要に応じて混合することが必要だと考える。加えて、水の分量は反応速度に影響を与えるため、それぞれの物質を23で述べた混合比で反応させることが望ましい。

クエン酸と炭酸水素ナトリウムを継続的に混合する手法として、Fig. 3(a)に示す2物質を混合した粉体をスクリー搬送機などで水に投入する粉体投入方式が考えられる。このような構成においては、水に投入する粉体量を制御することで容器内を任意の圧力に調整可能であるが、装置全体を高圧のタンク内に密封する必要がある、構造が複雑化する。同様の理由から、どちらか一方の物質の水溶液に、もう一方の物質を粉体状態で投入する方式も課題が存在すると言える。

システムを簡素化するために、Fig. 3(b)のような液体注入方式が考えられる。本方式は空気圧発生タンクにあらかじめ粉体または液体を封入しておき、水溶液や水を注入する方式である。この方式の場合、圧力の高い容器内に液体を送り込むためのポンプなどの増圧装置が必要であるが、システム全体を容器内に入れる必要がなくシステムの簡素化が期待できる。また、反応物質の注入量もバルブの開け閉めなどにより容易に制御が可能である。

他にも反応を継続させる手法は考えられるが、本研究ではFig. 3(b)の構成を前提に考察を進める。この構成は、水と炭酸水素ナトリウムがあらかじめ封入された容器に、クエン酸を注入する方式である。クエン酸濃度は、ポンプの駆動量を最小限にするために飽和水溶液となる38mol/Lとする。また水・クエン酸・炭酸水素ナトリウムを23で求めた最適な分量比とするために、圧力発生容器には127mol/Lの炭酸水素ナトリウム水溶液を、クエン酸と炭酸水素ナトリウムのモル比が1:3となる分量だけ封入しておく。実際には炭酸水素ナトリウムの溶解度は1.1mol/Lのため、ほとんどの炭酸水素ナトリウムは解け切らずに個体として残る。本構成により、常にクエン酸と炭酸水素ナトリウムの飽和水溶液が混合され安定的な反応が可能となる。加えて混合が進むにつれ、クエン酸・炭酸水素ナトリウム・水の分量比が23で求めた最適な比に近づいていき、最終的には23の比とすることが可能である。

Fig. 3 Comparison of structure

3. 増圧装置

前章で提案した方式を採用する場合、クエン酸飽和水溶液を送る増圧装置が必要となる。本章では、新たなエネルギー源を必要とせずにラバークチュエータの排気で駆動する増圧装置について述べる。

3.1 構造

空気圧ラバークチュエータは、ある印可圧力以下では動作しない特性を持つ。例としてFig. 5に軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性⁷⁾を示す。人工筋肉は約0.125MPaまでは収縮しないことがわかる。本研究ではこのラバークチュエータが収縮し始める圧力を基底圧力と呼び、この基底圧力を利用した増圧装置を提案する。

増圧装置の動作原理図をFig. 4に示す。本装置は軸方向繊維強化ゴムチューブと単動空気圧シリンダ、ターミナルおよびチェック弁から成る。軸方向繊維強化ゴムチューブはFig. 6に示す構造となっており、空気圧を印加した際に軸方向が炭素繊維で拘束されているため、径方向にのみ膨張し長手方向には収縮する。シリンダ内に流体が入った状態で軸方向繊維強化ゴムチューブに圧力を印加することでシリンダが押しされ、軸方向繊維強化ゴムチューブに印加した圧力よりも高い圧力を吐出する。

本増圧装置を利用した空気圧源のシステム全体図をFig. 7に示す。システムはラバークチュエータ、2方弁、3方弁、レギュレータ、リリースバルブ、増圧装置、クエン酸水溶液の入ったボトルA、重層と水の入ったボトルBから成る。まず、Fig. 7に示すように3方弁は開き、2方弁は開放状態としておき、ボトルBからの圧力によりラバークチュエータを駆動する。次に3方弁と2方弁を同時に切り替え、アクチュエータの排気圧力により増圧装置を駆動しボトルAのクエン酸水溶液がボトルBに注入される。これらの2つの状態を繰り返すことでラバークチュエータの駆動と増圧装置によるクエン酸の注入が交互に行われる。

3.2 特性

本節では、増圧装置の特性を物理モデルから考察する。装置の各パラメータをTable 3に示す。各パラメータは

Fig. 4 Schematic of the pressure booster

Fig. 5 Applied pressure and shrinkage of rubber actuator

Fig. 6 Principle of straight fiber artificial muscle

Fig. 7 Continuous air generation system

Fig. 4と対応している。なお本モデルでは、ばねは押しばねを前提としたが、本増圧装置の駆動原理上ばねを有していないシリンダや引きばねを有するシリンダについても同様の動作が可能である。

軸方向繊維チューブのシリンダを押す力を F_m 、シリンダ内のバネ力を F_k とする。すると、力のつり合いより式(2)が成り立つ。

$$F_m + F_k + P_3(A - a) = P_2 A \quad (2)$$

F_k は次の式(3)により定義される。

$$F_k = k(l - \Delta L) \quad (3)$$

また、人工筋肉の収縮による力 F_m は、軸方向繊維強化型人工筋肉の力学的平行モデル⁹⁾により式(4)のように表せる。 G_1, G_2, G_3 は人工筋の仕様と収縮量から定まる定数である。

$$F_m(\Delta L, P_3) = \{P_3 G_3(\Delta L) - G_1(\Delta L)\} / G_2(\Delta L) \quad (4)$$

式(2)-(4)より、吐出圧力は式(5)のように表せる。

$$P_2 = \{P_3 G_3(\Delta L) - G_1(\Delta L)\} G_2(\Delta L)^{-1} A^{-1} + k A^{-1} (l - \Delta L) + P_3 A^{-1} (A - a) \quad (5)$$

式(5)を用いて、本ポンプの吐出流量と吐出圧力の関係を図示したものがFig. 8である。グラフの描画には、Table 4, 5に示すパラメータを用いた。Fig. 8より、ポンプへの供給

圧力に対して吐出圧力が大きく、高い増圧率を有していることがわかる。また、本ポンプは吐出圧力が高まるほど吐出流量が下がることがわかった。

Table 3 Parameters of pressure booster

D	Diameter of tube [mm]
L	Length of tube [mm]
ΔL	Shrinkage of tube [mm]
l	Maximum shrinkage of tube [mm]
A	Piston area of cylinder [mm ²]
a	Cross sectional area of cylinder rod [mm ²]
P_0	Atmospheric pressure [MPa]
P_1	Pressure of inflow [MPa]
P_2	Pressure of outflow [MPa]
P_3	Pressure of pressure booster [MPa]
k	Spring constant [N/mm]

Fig. 8 Discharging amount and pressure

3.3 プロトタイプ

制作したプロトタイプの外観をFig. 9に、仕様をTable 4に示す。シリンダはSMC製単動シリンダCJPB10-10を用いた。軸方向繊維強化チューブはNRゴムとマイクロカーボン繊維で構成され、内径10mm、外形13mm、長さ45mmである。

3.4 特性実験

試作した増圧装置の、最大流量吐出時における吐出圧力を測定し、理論値との比較を行う。実験環境をFig. 10に示す。ポンプへの流入液体の圧力を一定とし、増圧ポンプを繰り返し駆動させ、ポンプの吐出流量が最大でなくなった時点での容器内圧力を圧力計で測定した。なお、ポンプ

Table 4 Specification of the pressure booster

Size	210mm×20mm×30mm
Weight	122g
Discharge amount of cylinder	0.78mL
Spring constant of cylinder	0.49N/mm

Fig. 9 Image of pressure booster

が最大吐出流量を吐出しているかどうかは、シリンダロッドとシリンダが衝突する音によって判断した。流入液体の圧力は0.1MPaから0.2MPaまで0.025MPaずつ変化させた。増圧ポンプの駆動にはラバーアクチュエータの排気は使用せず、別途用意した空気圧源から0.1, 0.15, 0.2MPaの3通りの圧力を加えて実験を行った。実験結果をFig. 11に示す。図中の理論値は、式(5)を用いて最大吐出量での吐出圧力を算出したものである。測定値は理論値をやや下回っているものの、32で導出したモデルが本増圧装置の特性を表していることが確認できた。また、理論値との差については、増圧装置に用いたウレタンチューブの弾性変形が主な要因であると考えられる。

Fig. 10 Experimental set up

Fig. 11 Characteristics of pressure booster

4. 人工筋肉駆動実験

4.1 実験条件

提案システムの有効性を確かめるため、人工筋肉駆動実験を行った。実験装置をFig. 12に示す。なお、システム構成はFig. 7と同様である。実験装置の設定および使用した

物質の分量をTable 5に示す。実験では、3方弁と2方弁を周期10s, デューティ比50%のパルス信号で同時に駆動した。本操作により人工筋肉と増圧装置が交互に駆動され、増圧装置が駆動されるごとにクエン酸飽和水溶液がボトルBに注入される。また、実験開始直後から人工筋肉の駆動及びクエン酸水溶液の注入が開始するように、ボトルAを0.15MPa, ボトルBを0.35MPaにあらかじめ加圧した。なお、本実験で使用したクエン酸および炭酸水素ナトリウムの分量は、6.72NLの二酸化炭素を発生可能な物質質量であり、これは本実験で使用する人工筋肉を44回駆動することが可能である。

Fig. 12 Experimental setup

Table 5 Experimental conditions

Amount of citric acid in bottle A	192g
Water in bottle A	26mL
Sodium bicarbonate	25.2g
Water in bottle B	24mL
Volume of bottle A	0.5L
Volume of bottle B	0.5L
Volume of artificial muscle (pressurized)	0.15L
Mass of weight	1.7kg
Driving pressure of artificial muscle	0.225MPa

4.2 結果と考察

実験の様子をFig. 13に示す。人工筋肉と増圧装置が交互に加圧されている様子が確認できる。なお、人工筋肉は1サイクル毎に重りを15mm持ち上げることを確認した。Fig. 14はボトルB内の圧力について、本実験の結果と、増圧システムを用いずにボトルBにあらかじめ充填された圧力のみにより人工筋肉を駆動させた場合との比較である。比較結果からわかるように、増圧システムを用いない場合の人工筋肉駆動回数が6回であるのに対し、提案システムは23回の駆動が可能であり、提案手法により人工筋肉を0.225MPaの印加圧力で17回駆動させるだけの圧縮空気が生成されたことが確認できた。本実験において気体発生に使用したクエン酸、水、炭酸水素ナトリウムの総質量は94.4gであるため、人工筋肉を一回駆動させるために、約5.6gの

反応物質が必要といえる。これは、15kgの反応物質を使用したとすると約268回の駆動が可能であり、たとえば30sに一回人工筋肉を駆動させる作業を想定した際に、134min使用可能となり十分使用に耐える時間と考える。

Fig. 15はボトルA内圧力および増圧装置駆動圧力である。ボトルA内の圧力が人工筋肉駆動圧力を下回ると同時に、増圧装置への供給圧力も低下し、ボトルA内圧力の上昇が鈍化することが確認できる。これは、ボトルA内に注入されるクエン酸飽和水溶液の量が増圧装置の駆動圧力の低下に伴い減少するからである。

本実験で人工筋肉を駆動できた回数は23回であり、41で算出した44回に対し少ない回数であった。要因はクエン酸と炭酸水素ナトリウムが完全に反応していないことと考える。これは、実験終了後にボトルを振った際にボトルA内圧力が再び人工筋肉駆動圧力以上に上昇したことから確認できた。

Fig. 13 Image of experiment

Fig. 14 Pressure in bottle A

Fig. 15 Pressure to pressure booster and in bottle B

5. 結 言

化学反応を利用した圧縮空気生成手法と、増圧装置により化学反応を継続させるシステムを提案した。また試作機による実験を行い、提案システムの動作を確認した。

今回行った実験は、小型のアクチュエータで評価を行っており、実際のシステムの消費空気量よりも小さい。今後は増圧ポンプを大型化する、振動を加えて化学反応を促進するなどの手法により流量増加が期待できる。

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) C. T. Loh, H. Tsukagoshi, "Pneumatic Big-hand Gripper with Slip-in Tip Aimed for the Transfer Support of the Human Body", IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), 475-481 (2014)
- 2) D. Sasaki, T. Noritsugu and M. Takaiwa, "Development of Active Support Splint driven by Pneumatic Soft Actuator (ASSIST)", IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, 520-525 (2005)
- 3) 則次俊郎, 韓建海, 高岩昌弘, "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, p. 83-90 (2002)
- 4) 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", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2964-2968 (2013)
- 5) 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), 122-127 (2013)
- 6) 北川能, 呉海帆, 塚越秀行, 朴聖煥, "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, p. 16-22, (2003)
- 7) 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 緒方裕彦, 越智康平, 東森充, 金子真, "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講演論文集, 1P1-5 (2011)
- 8) 山本孝之, 鈴木康一, 山田嘉昭, 脇元修一, 武藤明徳, "化学反応による空圧アクチュエータ用携帯ガス圧源の開発", 日本機械学会第22回バイオエンジニアリング学会講演論文集, 111 (2010)
- 9) T. Nakamura, D. Tanaka, H. Maeda, "Joint stiffness and

position control of artificial muscle manipulator using
instantaneous loads using a mechanical equilibrium

model,” Advanced Robotics, vol. 25, pp. 387-406 (2011)