

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ
Title(English)	Hose-free Pneumatic Actuator Using Reversible Chemical Reaction
著者(和文)	鈴森 康一, 和田 晃
Authors(English)	Koichi SUZUMORI, Akira WADA
出典(和文)	日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 48, No. 1, pp. 21–25
Citation(English)	JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY, Vol. 48, No. 1, pp. 21–25
発行日 / Pub. date	2017, 1

気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ

著者紹介



すず もり こう いち
鈴 森 康 一

東京工業大学
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1
E-mail: suzumori@mes.titech.ac.jp

1990年横浜国立大学大学院博士課程修了、株式会社東芝を経て、2001年岡山大学教授、2014年東京工業大学教授、現在に至る。アクチュエータ、ソフトメカニズムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会正会員、日本機械学会フェロー、日本ロボット学会フェロー、工学博士。



わ だ あきら
和 田 晃

東京工業大学
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1
E-mail: wada.a.ah@m.titech.ac.jp

2014年岡山大学大学院修士課程修了、2014年10月に東京工業大学博士課程に転入学、現在に至る。空圧アクチュエータ、小型空圧源の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、日本ロボット学会、IEEE等の会員。

1. はじめに

風船に空気を入れると膨れる。この単純な原理を利用したのが空圧ラバーアクチュエータである。このアクチュエータの動力は風船で言えば風船内部の空気圧であり、この圧力が高いほど大きな力を出せる。

このアクチュエータを動かすためには以下5つの機能が必要である。

- 圧縮空気を作る「コンプレッサ」
- 圧縮空気の流量を維持する「タンク」
- 圧縮空気の圧力を調整する「レギュレータ」
- 圧縮空気の流れを切り替える「バルブ」
- 圧縮空気をアクチュエータに届ける「空圧配管」

これらが大型かつ大重量になるため空圧アクチュエータは一般には持ち運びが難しい。

この問題を解決するために、まずaの「コンプレッサ」を小型化する研究が行われてきた。これまでの圧縮空気を作る主流な方法はメカニカルな機構によって空気を容積圧縮することである。機構は複雑な構造で小型化が難しく、材質は金属等の剛体で構成されて重くなりがちである。この機構を動か

すために電磁モータを用いる場合は、アクチュエータを動かすためにアクチュエータを動かすといった効率の悪い形となる。この方法では結論として、実用的に空圧アクチュエータを動かす場合、コンプレッサは空圧アクチュエータよりも大型かつ大重量になる場合が多い。そこで、これまでにメカニカルな機構を用いずに容積圧縮する方法が提案されてきた。ドライアイスを溶かす方法¹⁾、金属に含ませた水素を使う方法²⁾、過酸化水素水を分解してガスを発生させる方法³⁾、化学反応によってガスを発生させる方法⁴⁾等である。これらの方法は複雑なメカニカル構造は必要ないため小型化に優れている。さらにaの機能以外にもb, c, dの機能を含むものがあり、aを小型化するだけでなく空圧アクチュエータのシステム全体を小型化する工夫がなされてきた。これが実現すれば、そのシステムをアクチュエータに直付けする、または中に入れ込むことが可能になりeが不要になる。空圧アクチュエータの中は圧縮空気が入るだけであり、この無駄なスペースを有効利用していけばよい。しかしながら、上記の先行研究の問題点として、取り扱いの面倒な材料を用いていること、b, c, dの機能が著しく低いこと、ガスを発生させるために材料を常に供給する必要があり駆動時間を長くする場合にはその量が多くなり重くなることがある。

以上のような背景から、筆者らは水の電気分解によってガスを発生させる方法に着目し、研究を行ってきた。特長は液体から気体に変化する状態変化とその逆の変化を電気により制御でき、発生するガス量を正確に制御できることである。この反応は上記の先行研究と比較して、使用する材料の取り扱いが面倒ではなく、b, c, dの機能が優れており、搭載する材料の量は駆動時間が増えても変わらないため軽量になる。

2. 水の電気分解／合成反応

2.1 原 理

水の電気分解のような化学反応によるガス発生と
言えば、水酸化ナトリウム等の電解液に金属を沈め

て行なう方法が広く知られている。しかしながら、可逆反応は必ずしも容易ではなく、電極腐食や金属等の析出も起こり得る。そこで著者らは「固体高分子形燃料電池 (PEFC)」による電気分解に着目した⁵⁾。これは電解液の代わりに電解質膜を使用しており、その電解質膜の表と裏には白金等が付着している多孔質触媒層とメッシュ電極を形成している (図1)。これを水 (純水) につけて、電極を電池につなげば電気分解が行なわれる (図2)。電解液の代わりに電解質膜を用いているため、水は電解質膜と白金の両方にくっついている状態すなわち三相界面で化学反応が起こる。その後電極に抵抗や充電されていないコンデンサをつなげれば逆向きに電流が流れる。このとき発生させたガスは電極表面で吸収されて水に戻り、系全体としては燃料電池として働く。この反応を化学式で表すと以下となる。



このように単位電子あたりに発生する水素と酸素のモル数が決まっている。この式から 1g の水から

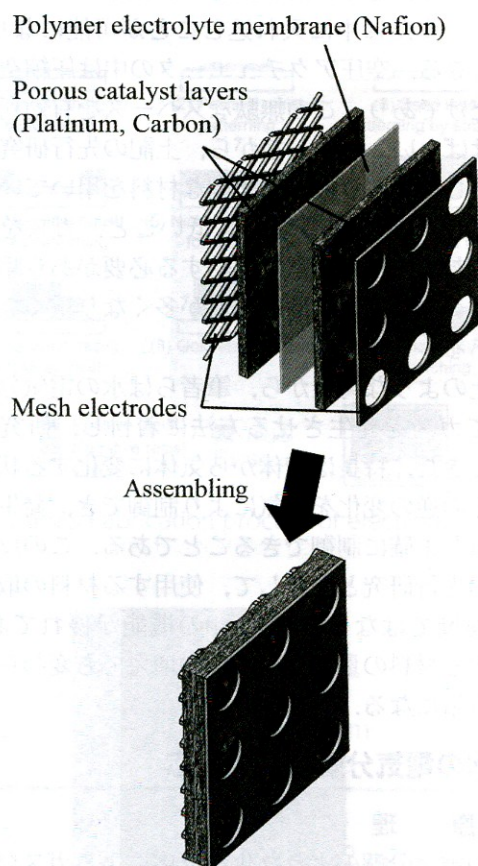


図1 固体高分子形燃料電池 (PEFC) の構造

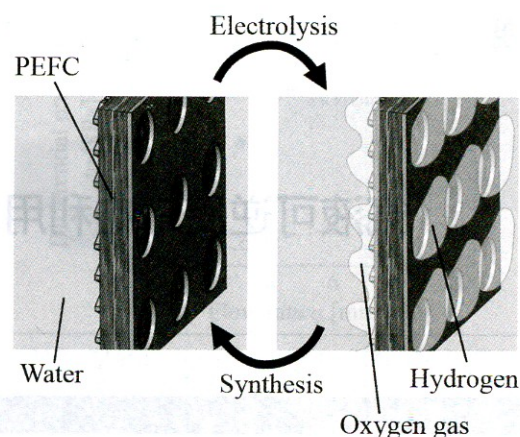


図2 PEFCにおける気体発生と吸収の様子

は標準状態で1.2lの水素と0.6lの酸素を発生させることができる。ことがわかる。

2.2 発生圧力の理論式

ガス圧源の性能として必要なのは発生圧力と流量である。これについては式(4)で導ける⁵⁾。この式で着目したいのは、発生圧力 p とアクチュエータ内部の空気室体積 V 、電流 i である。発生圧力は空気室体積が小さいほど、また電流が大きいくほど高くなる。流量については圧力が一定の場合に電流に比例する。

$$p = \frac{3}{4} \cdot \frac{RT}{V \cdot e \cdot N_A} \int i dt \quad (4)$$

流れた電流から求められる圧力の理論値とその実験値を比較したのが図3であり、それらが一致するためこの式は妥当性があるとわかる。図3では

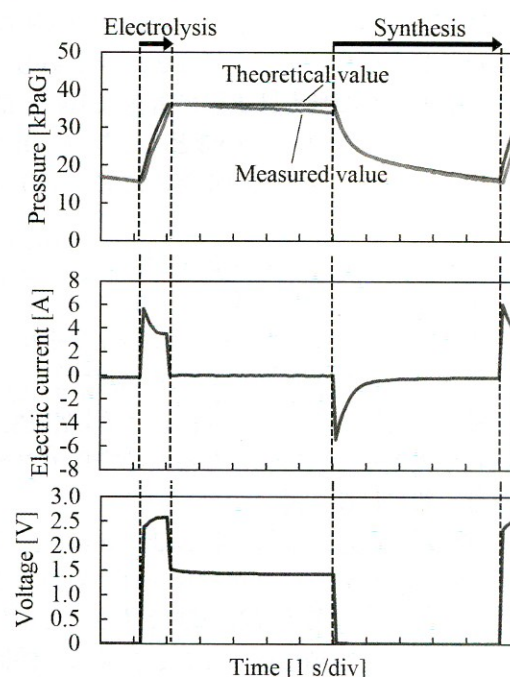


図3 発生圧力の理論値と実験値の比較 (図上)。そのときの電流と電圧 (図中央と下)

30kPaG付近で実験を行っているが500kPaG付近でもこの原理が有効であることは確認されており、空圧アクチュエータを十分駆動できるポテンシャルを持っていることがわかっている。また、図3においてガス吸収が遅いが、35kPaGから25kPaGに下降するときは非常に速い。この特性から、圧力を大気圧まで下げずにある程度圧力が残った状態で運転させれば、比較的速く往復運動ができる。

2.3 エネルギー回生

この原理で水素と酸素から水を生成するとき、PEFCは電気を発生する。その電気エネルギーを二次電池に回収してつぎの電気分解の電力として利用すれば省エネルギーになる。そこで実験を行なったところ、結果として20%の省エネルギー化に成功している⁶⁾。

3. 空圧アクチュエータへの搭載

まず始めにFlexible microactuator⁷⁾と呼ばれる空圧アクチュエータの内部にこのPEFCを配置し、提案した原理が可能か検証した⁸⁾。ここで課題となったのはPEFCの重ね合わせる方法とその硬さである。

従来のPEFCの重ね合わせ方法はメッシュ電極の外側から7mm程度の厚さのアクリル板で両側からボルトとナットで締め付けて電解質膜と多孔質触媒層、メッシュ電極を密着させる(図4)。この締め付けが弱いとPEFCに流れる電流が少なくなり、気体発生速度が低下する。しかしながら、このアクリル板が大きいので排除した。締め付け力は弱い全体を押し付けず4辺のみ固定してコンパクトにした。締め付け力が弱い場合、気体発生速度は約10分の1になるがまずこの方法で駆動させた(図5)。

アクチュエータの応答性を考えると、PEFCをできるだけ多く空圧アクチュエータ内の空気室に配置した方が気体発生量も多くなり、圧力は上がり易くなる。しかしながら、従来のPEFCは硬いため、空圧アクチュエータ内部に敷き詰めた際にアクチュエータ自身の柔軟性がなくなるといった問題がある(図6)。そこで現在、柔軟なPEFCの開発を専門家

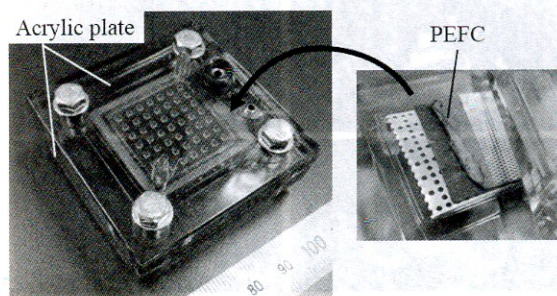


図4 従来のPEFC固定方法

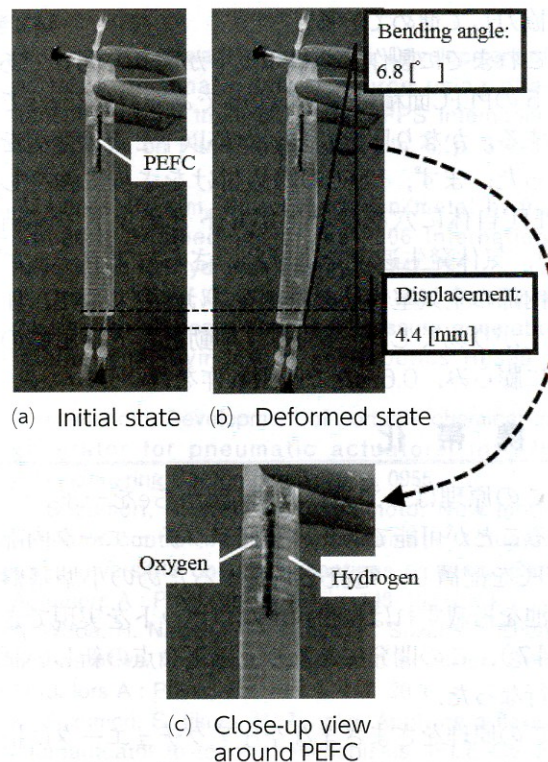
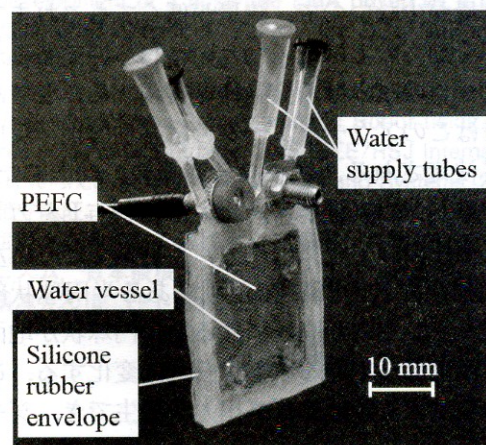
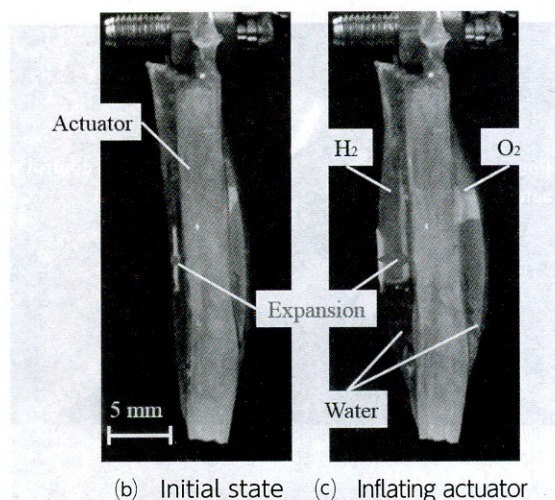


図5 PEFCをコンパクトにしてアクチュエータに搭載した例⁸⁾



(a) Overview of the actuator



(b) Initial state (c) Inflating actuator

図6 PEFCの面積比率を大きくした例⁶⁾

と協力して進めている。

これまでに製作したロボットが図5と図6である。図5のPEFC面積は $24 \times 12 \text{ mm}$ であり、 0.2 mm/s で伸張する。かなり駆動が遅いため以下2点の変更を行った。まず、PEFCの締め付けをさらに強くして(PEFC自体に穴を開けてボルトとナットで締結する)、気体発生速度を上げた。さらにアクチュエータ内部の空気室体積をできるだけ小さくして、圧力を上がり易くした(図6)。挙動としては風船のように膨らみ、 0.6 mm/s で膨張動作を行なう。

4. 携 帯 化

この原理は1で述べた機能aからeを一まとめにすることが可能である。空圧アクチュエータ内部にPEFCを配置し、電流を制御するための小型基盤と電池を搭載すれば携帯可能なロボットを実現できる(図7)。この開発にあたり、以下2点の新しい試みも行なった。

この原理をさまざまな空圧アクチュエータに搭載してその知見を得たかったため、低圧で駆動する空圧アクチュエータに搭載した。駆動圧に達するまでのガス量が少ないので、流量が低くてもこれまでよりも速く動くのではないかといいねいである。

もう一つの試みは瞬発動作を実現することである。現状ではこのアクチュエータの応答性は化学反応によって決定される。さらなる応答性の向上のため、今回は「タンク」機能をロボットに付与し、ガスを溜めて高圧にして一気に出力する機構を作り込んだ。その機構が図8のPEFCの下側にある半円球状部分である。タンク内が高圧になると半円球状が地面の向きに凹になっている状態から凸に変化する。この座屈現象により瞬間的に高出力を発生でき、ジャンプが可能となる。

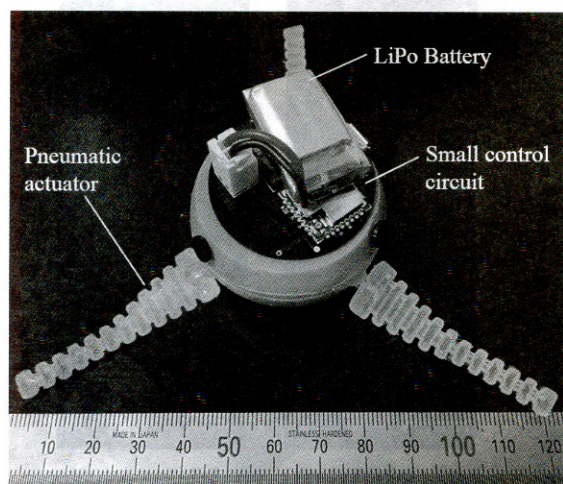


図7 携帯ロボットの概観⁹⁾

低圧で駆動するアクチュエータの駆動を図9に示す。このとき搭載したPEFCの製作が悪かったため気体発生速度が落ちていたが、数十秒で上げ下げでき、かなり実用的なタスクもできるのではないかと考えている。

座屈現象を利用したジャンプの様子を図10に示す。この動作を図7のロボットで実現したかったが内部のPEFCの問題により現状ではまだ実現できていない。この写真は図7のロボットからアクチュエータと小型基盤、電池を取り外し、空圧配管をつなげて圧縮空気で動かしたときのものである。このように原理的にはジャンプが可能である。

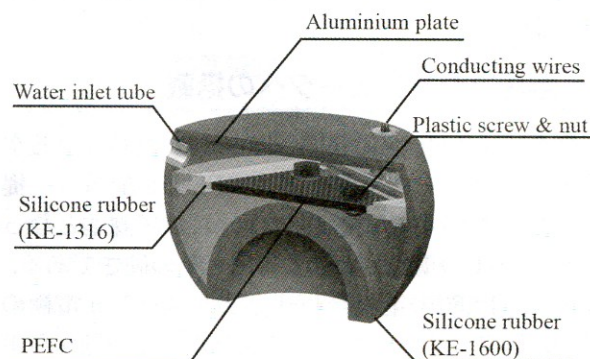


図8 ロボットの内部構造⁹⁾

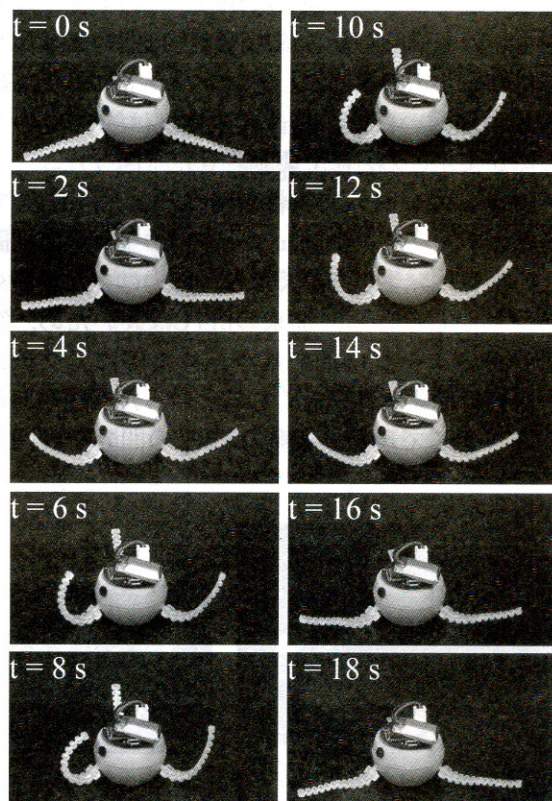


図9 アクチュエータ駆動時の様子⁹⁾

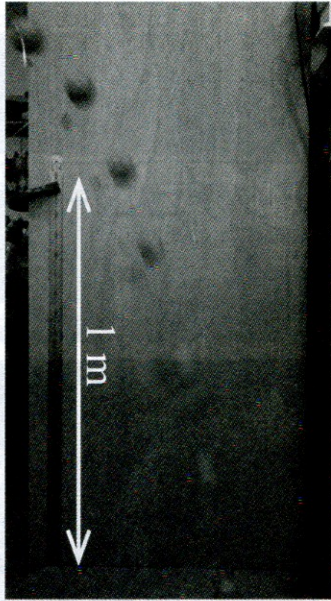


図10 瞬発力を利用したジャンプ¹⁰⁾

5. おわりに

PEFCによる水の電気分解／合成反応の基本原理の確認と基礎特性の計測を行ないモデル化に成功している。その特性を考慮して空圧アクチュエータにPEFCを内蔵して駆動させ、携帯化に成功した。今後はMcKibben型人工筋肉にこの原理を適用して駆動させる予定である。また、PEFCの性能を落とさない重ね合わせ方法を確立して安定した動作を実現できるようにする。

謝辞

本研究の一部は、挑戦的萌芽研究(24656171)ならびに科研基盤(A)(26249028)によって実施した。

参考文献

- 1) H. Wu, A. Kitagawa, H. Tsukagoshi, Development of a portable pneumatic power source using phase transition at the triple point, 6th JFPS International Symposium on Fluid Power 2005, No. 6, p. 310-315, 2005.
- 2) G. Lloyd, K. Kim, Smart hydrogen/metal hydride actuator, Proceedings of the 2006 International Association for Hydrogen Energy, p. 247-255.
- 3) C. Onal, X. Chen, G. Whitesides, D. Rus, Soft mobile robots with on-board chemical pressure generation, International Symposium on Robotics Research (2011).
- 4) T. Yamamoto, Development of portable chemical gas generator for pneumatic actuators, in: 22nd Bioengineering Conference, 2010, p. 0955.
- 5) K. Suzumori, A. Wada, S. Wakimoto, New mobile pressure control system for pneumatic actuators, using reversible chemical reactions of water, Sens. Actuators A : Phys. Vol. A 201, p. 148-153, 2013.
- 6) A. Wada, H. Nabae, T. Kitamori, K. Suzumori, Energy regenerative hose-free pneumatic actuator, Sens. Actuators A : Phys., Vol. 249, p. 1-7, 2016.
- 7) K. Suzumori, S. Ikura, H. Tanaka, Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms, IEEE Control Syst., Vol. 12, No. 1, p. 21-27, 1992.
- 8) A. Wada, H. Kametani, K. Suzumori, S. Wakimoto, Development of a hose-free FMA driven by a built-in gas/liquid chemical reactor, Int. J. of Automation Technology Vol. 10, No. 4, 2016.
- 9) T. Kitamori, A. Wada, H. Nabae, K. Suzumori, Untethered Three-Arm Pneumatic Robot using Hose-free Pneumatic Actuator, 2016 IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems, 2016.
- 10) 北守隆旺, 和田晃, 難波江裕之, 鈴森康一: 球殻の座屈現象を利用した跳躍および投擲が可能なソフトメカニズム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2P1-13b6, 2016.

(原稿受付: 2016年10月10日)