

研究成果報告書

所属機関
中央大学理工学部

職名
助教

氏名
奥井 学

研究テーマ

燃焼と相変化の二段階利用によるジメチルエーテルのエネルギー効率向上

研究報告

1. 研究の背景と目的

1-1. 研究背景

高齢社会・人口減少社会においては、高齢者自身の健康寿命の延伸と、労働負担の軽減による労働効率の向上が重要である。アシストスーツと呼ばれる装着型動作支援装置は、これら2つの課題にアプローチできるため研究開発が盛んである。装着型装置の中でも空気圧人工筋肉駆動の装置は出力重量比の高さや、柔軟性による自然で安全な動作支援が可能なる点から注目を集めている。しかし空気圧人工筋肉はこれらの長所を有する一方で、駆動に据え置き型コンプレッサが必要であり、使用環境が限定されるという短所がある。本課題が解決できれば、空気圧人工筋肉駆動の装着型動作支援装置の社会実装が飛躍的に進むと確信する。

1-2. 研究目的

ジメチルエーテル（DME）から相変化と燃焼の二段階でエネルギーを取り出しエネルギー効率を向上させ、空気圧人工筋肉駆動装着型装置をモバイル化することが目的である。DMEの相変化とは、DMEが液体から気体に変化する際の蒸気圧を利用して空気圧人工筋肉を駆動させる方法である。また、DMEの燃焼とはDMEを燃焼させ、その際の気体膨脹で空気圧アクチュエータを駆動させる方法である。DMEは飽和蒸気圧が0.6 MPaと空気圧人工筋肉の駆動に十分である一方で、1MPaに満たないため液化して保存・携帯が容易である。また燃焼時に黒煙が発生せず、大気汚染の原因となる微粒子の排出量も少ない。

2. 研究成果および考察

2-1. DMEの相変化と燃焼の二段階利用

DMEの二段階利用システムの概要を図1に示す。空気圧アクチュエータとして空気圧人工筋肉を用い、一定周期で加減圧を繰り返すシステムとする。以下に二段階利用システムについて説明する。

- ① DMEの相変化を用いて空気圧人工筋肉を駆動する。
- ② アクチュエータ駆動後にその排気となるDMEを回収し、別の空気圧人工筋肉に充填する。
- ③ 容器内で点火プラグにより火花を飛ばすことでDMEを着火させ、燃焼によりエネルギーを得る。

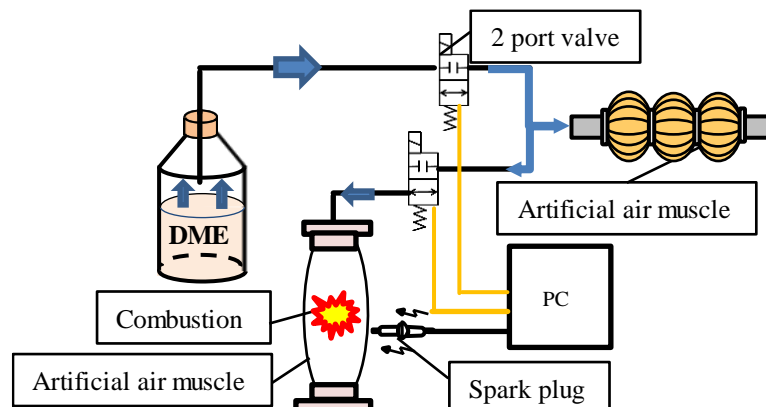


図1 Outline of the two-stage application system of DME phase change and combustion

2-2. システムのモデル化

DME の気液相変化と燃焼による仕事をそれぞれ理論的に求め比較する。標準状態(温度 298 K, 大気圧 0.1 MPa)の液体 DME が 1 mol の気体 DME に相変化したときの仕事を求める。本章で用いるパラメータを Table1 に、相変化時の P-V 線図を図 2 に示す。気液相変化時の圧力は常に飽和蒸気圧 P_{SVP} であり、体積は膨張していくので定圧変化とみなせる。気化した DME が 1 mol に到達したとき体積 V_1 となる。その後、断熱変化と仮定すると 圧力は 大気圧 P_2 まで減少し、体積は V_2 まで膨張する。このとき P_2 が大気圧と仮定すると全仕事 W_{PCD} は P-V 線図の斜線部の面積であるため式(1)より 28.0 MJ となる。

$$W_{PCD} = P_{SVP} \times V_1 + \int_1^2 P dv \quad (1)$$

次に、標準状態(温度 298 K, 大気圧 0.1 MPa)において 1 mol の混合気体が完全燃焼したときの仕事を求める。混合気体が燃焼すると圧力が急激に上昇する。このとき体積 V_1 が変化しないと仮定すると定積変化である。最大圧力 P_{com} に達したあと、断熱変化と仮定すると圧力は P_2 まで減少し、体積は V_3 まで膨張する。 P_2 が大気圧であったとき、燃焼による仕事 W_{COM} は P-V 線図の斜線部の面積であるため式(2)により 63.2 MJ と算出できる。

$$W_{COM} = \int_1^3 P dv \quad (2)$$

3.1 で算出した気液相変化による仕事と 3.2 で算出した燃焼による仕事を比較する。気液相変化による仕事は 28.0 MJ , 燃焼による仕事は 63.2 MJ であった。これらを比較すると式(3)より気液相変化のみを用いた手法と比較して効率 P は 3.04 倍の仕事が得られることが分かった。これにより気液相変化と燃焼による二段階利用システムにより空気圧源の質量当たりの発生エネルギーは劇的に改善できると考える。

$$P = (W_{PCD} + W_{COM}) / W_{PCD} \quad (3)$$

表 1 Parameters of pneumatic source

Saturated vapor pressure of DME	P_{svp}
Atmospheric pressure	P_{atm}
Max pressure when DME burned	P_{com}
1mol standard gas volume	V_1
Max volume when DME burned	V_2
Max volume when DME phase change	V_3
Work of DME phase change	W_{PCD}
Work of DME combustion	W_{COM}

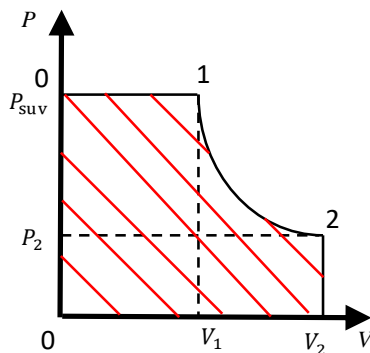


図 2 P-V diagram of DME phase change

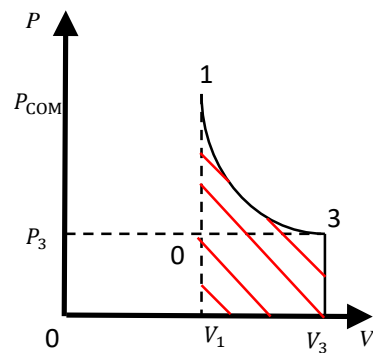


図 3 P-V diagram of DME combustion

2-3. 燃焼時圧力測定実験

本実験では DME の二段階利用で駆動するアクチュエータ製作に向けてその初期検討として半密閉下で DME と空気の混合気体を燃焼し、その圧力を測定して比較する。実験装置の概要を図 4 に示す。混合気体貯蔵タンク、圧力計(妙徳製デジタル圧力センサ MPS-R33RC-NGAT),レギュレータ(PISCO 製

RVUM6-6), 2ポートバルブ(PISCO製 MVP62), スパークプラグ(平野技研工業製スパーク), 半密閉容器から構成されている. 混合気体貯蔵タンクにはあらかじめ DME と空気を混合した混合気体を貯蔵している. この混合気体は圧力計, レギュレータ, 2ポートバルブの順に経由し, 半密閉容器内に噴射させ, 滞留させる. その半密閉容器内にスパークプラグにより火花を発生させ, 混合気体に着火する. 混合気体燃焼時の圧力を圧力センサによって測定する. また, 密閉下で混合気体を燃焼させると容器内の圧力が急上昇し危険であるため, 半密閉容器の上方には $1.0 \times 1.3 \text{ cm}$ の穴を設けた. なお本燃焼実験は室温 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ の屋内で各濃度 3 回ずつ実施した.

混合気体燃焼時の圧力を Fig. 7 に, 圧力の最大値を Fig. 8 に示す. Fig. 8 のエラーバーは標準偏差である. 混合気体を滞留させたとき燃焼可能な範囲があることがわかった. また燃焼可能な範囲において着火に伴う圧力上昇が確認できた. DME モル比 7% で最も圧力上昇が大きかった. 理論空燃比が DME モル比 6.7% であることを考慮すると, 空気と DME が過不足なく反応するとき燃焼時に最も大きな圧力が発生すると考える.

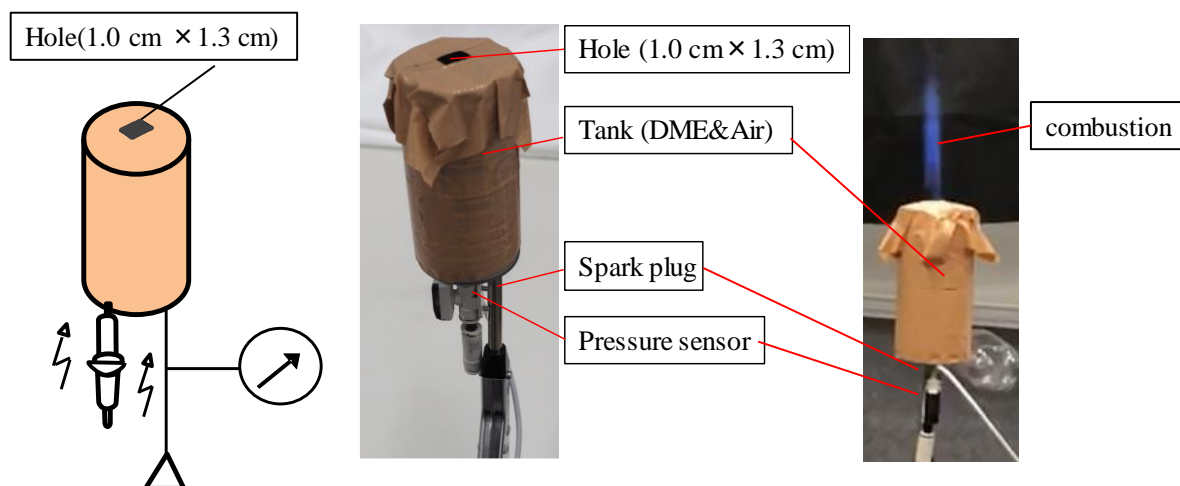


図 4 The experimental set up

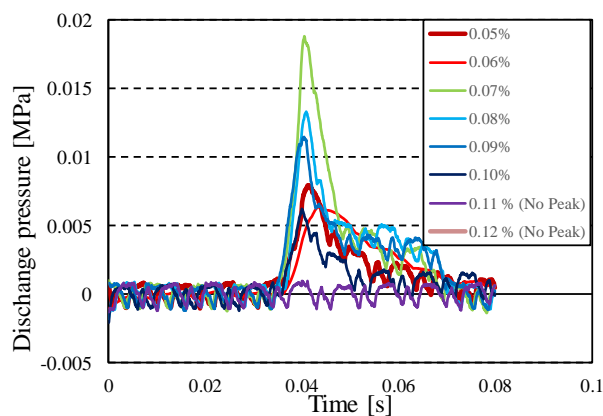


図 5. Pressure in combustion

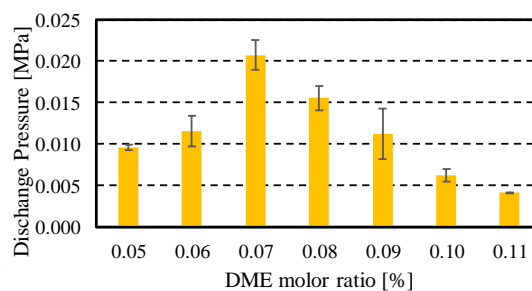


図 6 Bar graph pressure in combustion

3. 将来展望

二段階利用システムを開発し, エネルギー効率の向上について実験的に確認する.

4. 研究発表

- R. Enjo, M. Okui, and T. Nakamura, "Pneumatic Source Proposal for Improving Portability and Responsiveness of Artificial Muscle via Dimethyl Ether Phase Change and Combustion," in Proc. 11th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2021, pp169-174. (2021.10)

以上.