

液体ピストン蒸気エンジン

A liquid-piston steam engine

機正 ○八東 真一 (デンソー) 機正 福田 健太郎 (デンソー)
機正 新山 泰徳 (デンソー) 機正 萩原 康正 (デンソー)
機正 西沢 一敏 (デンソー) 機正 鹿園 直毅 (東大生研)

Shinichi Yatsuzuka, Kentaro Fukuda, Yasunori Niiyama, Yasumasa Hagiwara, and Kazutoshi Nishizawa, DENSO CORPORATION, 500-1, Minamiyama Komenoki-cho, Nissin-shi, Aichi
Naoki Shikazono, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo

A novel liquid-piston steam engine which attains high efficiency in the low-temperature region at $<300^{\circ}\text{C}$, as well as high reliability and low cost has been developed. Sintered metal was employed in the heating section to obtain high evaporation rate. The proposed engine achieved a thermal efficiency of 12.7% which was approximately 40% of the Carnot efficiency working at a heating temperature of 270°C and a cooling temperature of 80°C . The liquid piston steam engine can be expected as a promising energy conversion device for waste heat below 300°C .

Key Words: A liquid-piston steam engine, Sintered metal, Waste heat regeneration

1. はじめに

化石燃料、太陽光、バイオマス等の1次エネルギーは、最終的に産業、運輸、民生部門で利用されるが、その過半は熱として捨てられている。排熱のうち、機械摩擦や発電機の発熱などは再利用が難しいが、排気ガスや冷却水熱などの比較的再生しやすい形態で捨てられている熱も多い。これらのエネルギーを外燃機関などで再生し、動力や電気に変換することは非常に重要である。

一方、化石燃料の枯渇や地球温暖化などの問題を背景に、エネルギー利用効率を高めるための技術改良が進められている。日本は、コージェネレーションやハイブリッド車等、省エネルギー技術が最も進んだ国の一つであるが、排気ガスや冷却水熱等として捨てられている熱のうち、 300°C 以下という外燃機関の効率が大きく低下する温度域の総量は、1次エネルギーの10%にも上る。

従来の外燃機関であるスターリングエンジン、熱音響エンジン⁽¹⁾、ランキンサイクル⁽²⁾と呼ばれる蒸気エンジンは、 300°C 以下の低温の領域で効率が大きく低下する。一方、高温熱源を利用すると、タービンやピストンが高温に曝されてしまうため、信頼性を向上させるため非常に高価な材料や高度な部品加工を余儀なくされる。

そこで、本研究では 300°C 以下の温度領域での効率が高く、かつ信頼性が高く低コストの液体ピストン蒸気エンジンを提案する。液体ピストン蒸気エンジンは、湿り蒸気でも駆動することができるため、膨張前に過熱蒸気とする必要がなく温度差が小さくても効率高い。また、固体ピストンと蒸気の間液体ピストンが介在するため、固体ピストンの温度が環境温度に近く、熱による変形などがほとんどないため信頼性が高い。さらにスターリングエンジンやランキンサイクルは可動部が2ヶ所あるのに対し、液体ピストン蒸気エンジンは可動部が1ヶ所しかなく、シンプルな構成により高信頼性と低コストを両立できる。

本研究では、加熱温度 270°C 、冷却温度 80°C における液体ピストン蒸気エンジンの原理実証を目的に、実証実験を行い、出力および熱効率を評価する。

2. 液体ピストン蒸気エンジンの構成と動作原理

図1に、液体ピストン蒸気エンジンの構成を示す。水を沸騰させるための加熱部、凝縮させるための冷却部、水、仕事を取り出すための固体ピストンから構成される。

この動作の詳細を図1と図2を用いて説明する。水は固体ピストンと同期して往復動することから、液体ピストンと呼んでいる。水が加熱部に入ると沸騰して圧力が上昇し、相変化によって生ずる体積の増加によって液面は下方に押し下げられる。液体ピストンの液面が加熱部にある時は、冷却部は水で満たされているため加熱部の沸騰だけが生じる。液面が加熱部より下になった後も液の蒸発が続くため高い圧力が維持され、引き続きピストンは押し下げられる。

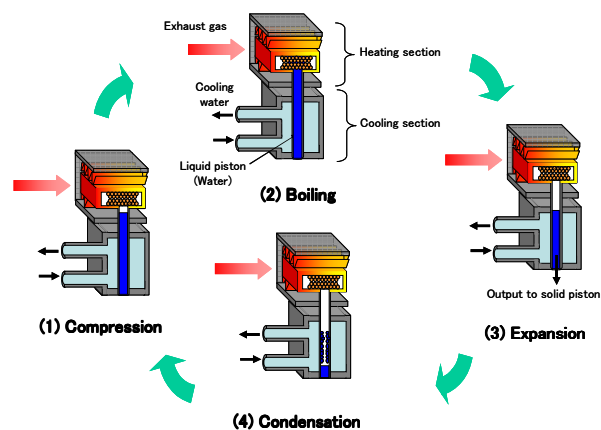


Fig.1 Structure and operation of the liquid-piston steam engine

液面が冷却部まで下ると、冷却部と蒸気との接触面積が増大し、凝縮過程に入る。液体ピストンが図1の下死点付近まで下ると、加熱部には蒸気しかいないため冷却部の凝縮だけが生じる。液体ピストンが下死点を過ぎると、慣性によって液体ピストンは押し戻され、空間内は圧縮される。なお、図2は、蒸発圧力が5MPa、凝縮圧力が0.1MPaの場合のサイクル線図である。

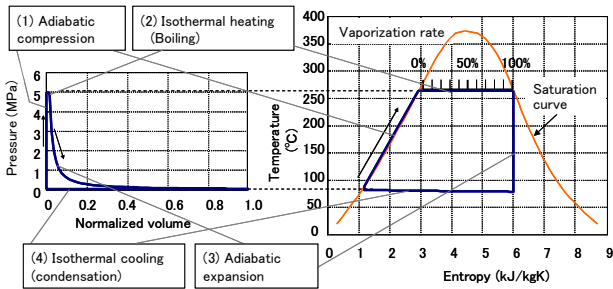


Fig.2 Cycle diagram of the liquid-piston steam engine

3. 実験による評価

加熱部の影響を評価するために、焼結金属タイプの加熱部と、焼結金属のっていない中空タイプの加熱部を試作した。焼結金属タイプの流路の代表寸法は、水力直径で約 20 μm である。中空タイプの加熱部の水力直径は 200 μm である。図 3 と図 4 に、加熱部の構造と実験装置の構成を示す。実験装置の主な構成要素は、加熱部、冷却部、液体ピストンの水、膨張機である。計測した圧力とピストン位置および電気ヒータへの入力から、エンジン出力および熱効率を算出した。算出式を以下に示す。

$$W = \int P A_p dx \quad (1)$$

$$\eta = W / Q_e \quad (2)$$

ここで、 W は図示仕事、 P は圧力、 X はピストン位置、 A_p はピストン断面積、 Q_e は電気ヒータ入力である。

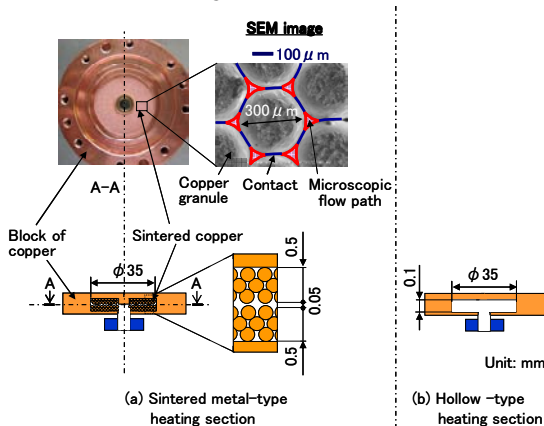


Fig.3 Structures of the heating sections

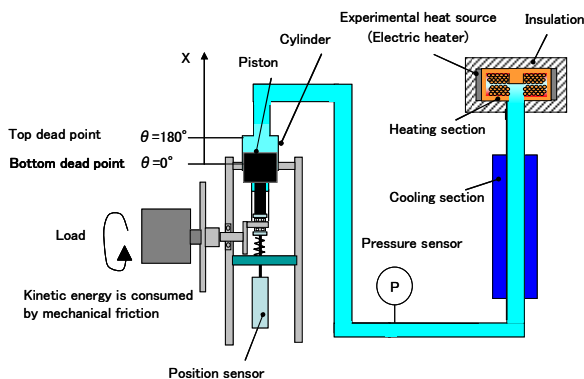


Fig.4 Experimental setup

動作温度と熱効率の関係を図 5 に示す。焼結金属の方が、どの温度でも中空タイプよりも効率が高く、動作温度

272 $^{\circ}\text{C}$ で効率 12.7%が得られた。これは、同温度のカルノー効率の約 40%となる。同温度条件において変換効率が 10%に満たない熱電素子⁽⁴⁾や熱音響エンジンをはるかに上回る性能を実現した。この時のサイクル線図を図 6 に示す。比較のため、ほぼ同じ動作温度の中空タイプのサイクル線図も示す。焼結金属の方が加熱部での気化率が高い⁽³⁾ため、効率が高い。また、圧力-容積線図の膨張過程において断熱膨張の線よりも傾きが小さいこと、温度-エントロピー線図において気化率が高まる際に右肩下がりになっていることから、焼結金属の温度が低下して沸点が下がり、液体ピストンが加熱部から出た後に残った水が遅れて沸騰していると考えられる。このことから、加熱部の熱交換性能を向上させることで、さらなる効率向上が期待できる。

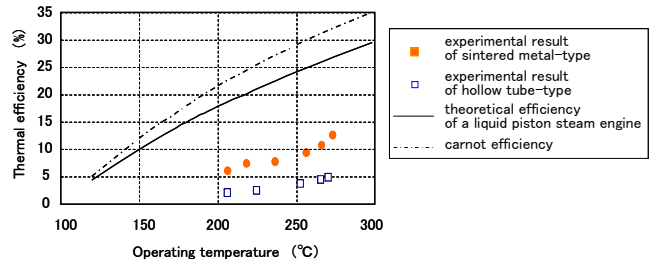


Fig.5 Relationship between the operating temperatures and the thermal efficiency

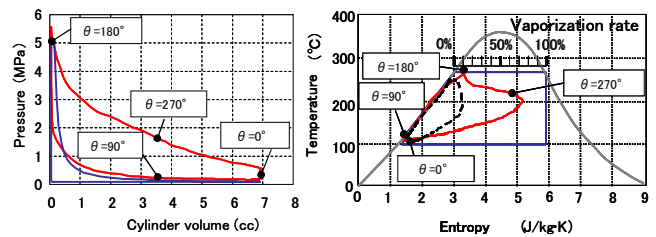


Fig.6 Cycle diagram

5. まとめ

温度領域が 300 $^{\circ}\text{C}$ 以下の低温でも、高効率、高信頼性、低コストを両立した液体ピストン蒸気エンジンを提案し、実験により実証した。焼結金属加熱部を用いることで、加熱温度 270 $^{\circ}\text{C}$ 、冷却温度 90 $^{\circ}\text{C}$ で、図示仕事で定義した熱効率 12.7%が得られた、これは同温度のカルノー効率の約 40%であり、熱電変換や熱音響サイクルを遥かに凌駕する値である。本液体ピストン蒸気エンジンは、300 $^{\circ}\text{C}$ 以下の廃熱の有効利用が期待できる。

参考文献

- (1) S.Backhaus&G.W.Swift, Nature, Vol. 399 (1999), pp. 335-338
- (2)Saitoh, T., Yamada, N., & Wakashima S., Solar Rankine cycle system using scroll expander. Journal of Environment and Engineering. (2007), Vol.2, pp.708-719
- (3)G. P. Peterson and C. S. Chang, Two-phase Heat Dissipation Utilizing Porous channels of High Conductivity Material, ASME Journal of Heat Transfer, Vol.120 , pp.243-252
- (4) Rhyee JS, Lee KH, Lee SM, Cho E, Kim SI, Lee E, Kwon YS, Shim JH, Kotliar G. Peierls distortion as a route to high thermoelectric performance in In(4)Se(3- δ)crystals. Nature 459, 965-968 (2009).