

液体ピストン蒸気エンジン 加熱部の沸騰熱伝達機構の研究

A liquid-piston steam engine On Heat Transfer Mechanism of a Heating Section

機正	*守本 剛	(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	八束 真一	(デンソー)
機正	西沢 一敏	(デンソー)		鈴木 幸和	(日本自動車部品 総合研究所)
	頼永 宗男	(日本自動車部品 総合研究所)	機正	鹿園 直毅	(東大生研)

Tsuyoshi Morimoto¹, Kentaro Fukuda¹, Yasunori Niiyama¹, Shinichi Yatsuzuka¹
Kazutoshi Nishizawa¹, Muneo Yorinaga², Yukikazu Suzuki² and Naoki Shikazono³

¹DENSO CORPORATION Corporate R&D Dept.2,

500-1, Minamiyama Komenoki-cho, Nissin-shi, Aichi-ken 470-0111

²NIPPON SOKEN, 14 Iwaya, Shimohasumi-cho, Nishio-shi, Aichi-ken 445-0012

³The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

A novel liquid-piston steam engine which attains high efficiency in the low-temperature region at <math><300\text{ }^\circ\text{C}</math>, as well as high reliability and low cost has been developed. It is required to improve boiling heat transfer performance to increase efficiency of the liquid piston steam engine. To investigate heat transfer mechanism of heating process, a thin-film Pt temperature sensor is developed, and local wall temperatures in the heating section are measured.

Key Words : A liquid piston steam engine, Boiling, Temperature measurement, Pt sensor

1. 緒言

化石燃料、太陽光、バイオマス等の1次エネルギーを、産業、運輸、民生等で利用する際に、最終的にエネルギーは熱として捨てられている。そのうち、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の割合は大きい。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が求められている。

一方、化石燃料の枯渇や地球温暖化などを背景に、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た結果、近年では低温で廃棄される熱量が増大している。コージェネレーションやハイブリッド車などの先端技術によって最もエネルギー利用効率が高い国のひとつである日本を例にとると、 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で、化石燃料などの1次エネルギーの10%ものエネルギーが排気ガスや冷却水熱などの熱として捨てられている。従来の外燃機関であるスターリングエンジンや蒸気エンジンは、 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加工が必要となる。そこで、本研究では、 300°C 以下の温度領域での効率が高く、高信頼性で低コストな液体ピストン蒸気エンジンを対象とする。

液体ピストン蒸気エンジンの高効率化には、沸騰伝熱性能の向上が必要である。本研究では、加熱部内の水の沸騰現象を把握し、沸騰伝熱性能向上の指針を得ることを目的とする。具体的には、加熱部内において水が沸騰する際の金属表面温度を白金薄膜温度センサにより計測し、温度変化から熱流束を求めることに取り組んだ結果について報告する。

2. 液体ピストン蒸気エンジンの特徴

図1に、液体ピストン蒸気エンジンの構成を示す。作動流

体は水である。水を気化させるための加熱部、凝縮させるための冷却部、液体（水）ピストン、仕事を取り出すための固体ピストンからなる。

この動作の詳細を図1および図2のサイクル線図を用いて説明する。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へ押し下げられる。液面が加熱部より下になった後も、加熱部内に残された液の蒸発が続くため高い圧力が維持され、さらにピストンは押し下げられる。液面が冷却部まで下がると、冷却部と蒸気との接触面積が増大し、凝縮過程に入る。液体ピストンが下死点を過ぎると、慣性に蓄積されたエネルギー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。水は固体ピストンと同期して往復動することから、液体ピストンと呼ぶ。液体ピストンが加熱部にある時は、冷却部は水で満たされているため凝縮は生じず加熱部の沸騰だけが生じる。逆に液体ピストンが図1の下死点付近まで下がると、加熱部には蒸気しかないため冷却部の凝縮だけが生じる。なお、図1のサイクル線図は沸騰する圧力を5MPa、凝縮する圧力を0.1MPaとして書いた例である。

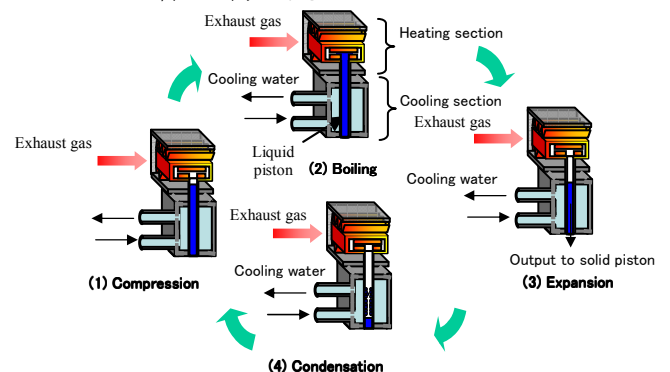


Fig.1 Structure and operation of a liquid piston steam engine

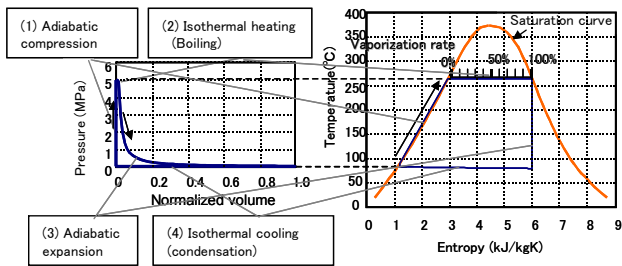


Fig.2 Cycle diagram

3. 実験装置及び実験条件

3.1 実験装置 製作した白金薄膜温度センサにより加熱部壁面の温度計測を行った. 実験機の構成を図3に示す. 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, ピストン位置から PV 出力を求めた.

3.2 白金薄膜温度センサ 図4に示すように, 温度分解能 0.1°C , 時間応答性 1ms の白金薄膜温度センサ 9 個を加熱部壁面に形成して実験を実施した. 本センサは 1mm 角の計測点の中に幅 $20\mu\text{m}$ の白金がパターンニングされている.

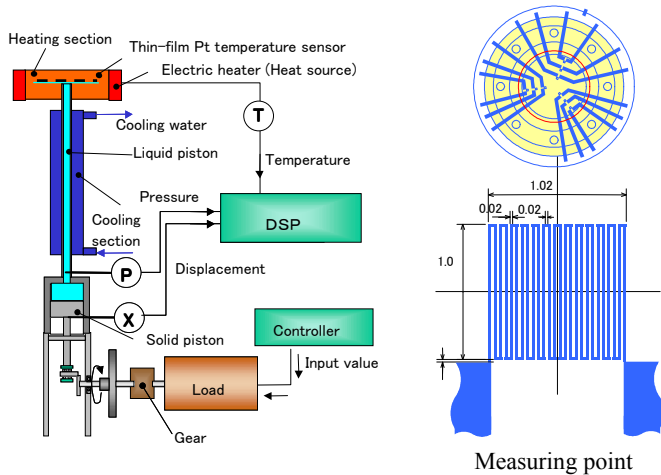


Fig.3 Experimental setup

Fig.4 Thin-film Pt temperature sensor

3.3 実験方法 本実験ではバンドヒータで加熱部を 200°C まで加熱し, 負荷により駆動周波数を 1Hz に制御して液体ピストン蒸気エンジンを動作させた. この時の動作圧力は 1.0MPa , 動作温度は 180°C である.

4. 実験結果及び考察

図5に PV 線図を示す. 液体ピストンが加熱部に入った後, 沸騰して圧力が 1.0MPa まで上昇し, 0.1MPa まで膨張する様子が観察される. 図5に白金薄膜温度センサで測定した温度, 液体ピストン圧力, 固体ピストン位置の時間変化を示す. 沸騰行程に着目した拡大図を見ると, ①の時間域では加熱部内に液体ピストンが入り加熱部表面の温度が急激に低下した後回復し, ②では沸騰熱流束とバンドヒータからの熱供給量がほぼ等しくなり温度変化が緩やかになる様子が観察される. また, 液体ピストン圧力を見ると, ②では圧力が水の飽和水蒸気圧の 1MPa 近くまで上昇し維持されていることがわかる. 時間域②における高い熱流束によって多量の蒸気が発生していると考えられる.

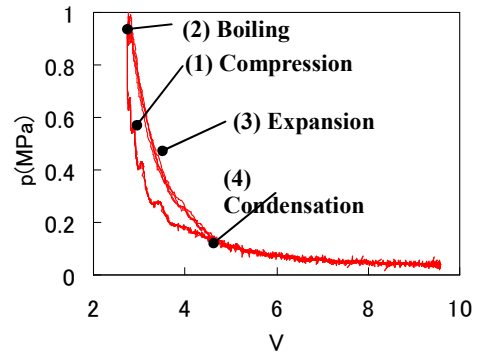


Fig.5 P-V diagram

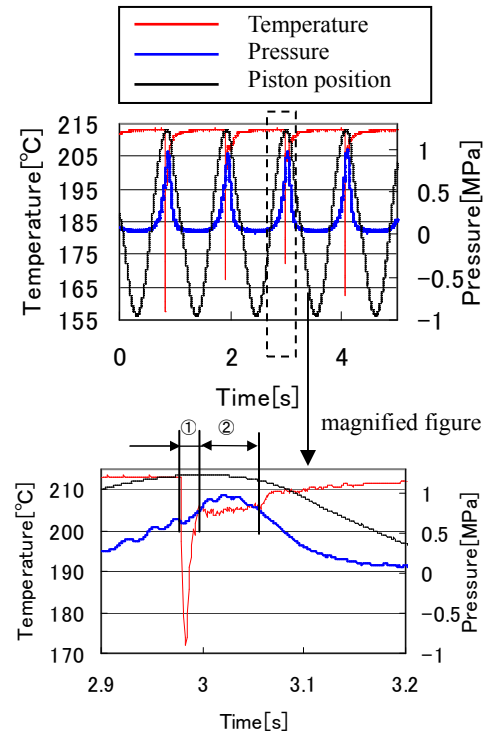


Fig.6 Time variations of pressure, temperature and piston position

5. 沸騰熱流束算出

計測した加熱部表面温度変化を用いて, 加熱部の非定常熱伝導解析により沸騰熱流束を算出したところ, ピストン位置が上死点を通過した後に沸騰熱流束の上昇が観察された. これは膨張行程において加熱部内部に残った液膜が沸騰しているためと考えられる. また, 時間経過と共に加熱部内に残った液膜が薄くなるため熱伝達率が増加し, 熱流束が上昇すると考えられる.

6. 結言

液体ピストン蒸気エンジン加熱部の温度変化を白金薄膜温度センサを用いて計測した. 熱流束の算出結果から加熱部内に残った液膜が薄くなる過程で熱流束が上昇していると考えられる. 今後, 今回得た知見を液体ピストン蒸気エンジン加熱部の沸騰伝熱性能を向上による液体ピストン蒸気エンジンの高効率化に活かす.

参考文献

- (1) エネルギー基本戦略に関する調査報告書, (財)エネルギー総合工学研究所
- (2) 内燃機関講義, 長尾不二夫 p51
- (3) 伝熱工学資料 (改定第4版) p139-p140, 日本機械学会