

スターリングエンジンのディスプレイサピストン表面に 担持された蓄熱材が熱効率に及ぼす影響*

位田 晴良^{*1}, 寺本 梨湖^{*2}

Effect on thermal efficiency of heat storage material on the surface of Stirling engine displacer pistons

Haruyoshi IDA^{*1}, and Riko TERAMOTO

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

In Stirling engines, in order to improve thermal efficiency, it is necessary to increase the amount of heat transfer through regenerators. Previous research has found that engine speed reduction improves thermal efficiency. However, it was theorized that the regenerator heat storage capacity is insufficient because there are limitations to the improvement in thermal efficiency that can be achieved by engine speed reduction. Therefore, the purpose of this study is to improve the thermal efficiency and to confirm engine speed change when the thermal efficiency is maximized through increased regenerator heat storage capacity in Stirling engines. To this end, engine performance testing was performed using an experimental Stirling engine and adding heat storage material to the regenerator. The results showed no confirmed engine speed change, but did confirm improved thermal efficiency. Furthermore, it was shown that the thermal conductivity of the heat storage material used in the regenerator significantly affects thermal efficiency.

Key Words : Stirling Engine, Regenerator, Displacer Piston, Heat Storage Material, Thermal Conductivity

1. 緒 言

スターリングエンジンは外燃機関であるため、熱源として化石燃料のほか、各種バイオマスエネルギーや太陽熱、廃熱が利用できる。また、スターリングエンジンの理論熱効率は、熱機関の中で最も優れた性能を有するとされるカルノーサイクルのものに等しい。しかし、現実のスターリングエンジンにおける作動流体は、理論サイクルとはかなり異なった挙動を示し、その熱効率はカルノーサイクルの熱効率に比べて劣る。スターリングエンジンにおいて、高い熱効率を得るためには再生器効率を高くする必要がある。再生器効率は作動流体が再生器を通過する際の熱の授受に関係し、再生器における再熱損失が減少すると再生器効率は増大する⁽¹⁾。また、作動流体は再生器内を高い流速で移動するため、一般に短時間で熱の授受が可能となる蓄熱材が求められる。

これまでの研究より、スターリングエンジンにおける再生器の効果および熱効率はエンジン回転速度、即ち作動流体の流速に影響を受けることがわかっている。また、熱の授受を有利にすると考えられる回転速度低下に伴い、熱効率向上は確認したものの、この場合の熱効率向上には限度があることから再生器の蓄熱量が不足しているという推測がされた⁽²⁾。したがって本研究では、再生器の蓄熱量を増大させることによって熱効率を増大させるとともに、その最大値を発生する際のエンジン回転速度が低速側に推移することを確認するため、スターリングエンジンの性能試験を行う。

* 原稿受付 2020年5月29日

^{*1} 工学部 機械工学科

^{*2} スズキ株式会社 (〒432-8611 静岡県浜松市南区高塚町 300)

E-mail: h-ida@fukui-ut.ac.jp

2. 実験方法

2.1 性能試験

本研究では、実験用スターリングエンジンにおける再生器の蓄熱量増大および回転速度（作動流体の流速）の変更を伴う性能試験を行う。ただし、スターリングエンジンは供給熱量の変更に対するエンジン回転速度の応答が緩慢であり、この方法による回転速度の調整は困難である。したがって、供給熱量を一定とし、エンジンへの負荷を変更することにより回転速度を調整する。負荷は動力計を用いて変更し、各エンジン回転速度における熱効率を求める。

実験用スターリングエンジンの回転速度変更に用いる負荷装置の概観を Fig.1 に示す。出力軸に接続したフライホイール外周に金属製ワイヤが摩擦ブレーキとして作用することにより負荷を加える。負荷の計量は、下方からの張力を測定可能な電子天秤を用い、ワイヤに接続した錘の重量と電子天秤に表示される張力の差から負荷トルクを求める。

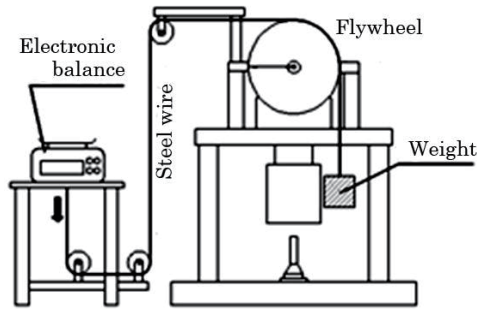


Fig.1 Schematic of load device

2.2 実験用スターリングエンジン

再生器を備えたスターリングエンジンの場合、Fig.2 に示すように作動流体は再生器を通過するが、精密なピストンリングが必要なことや無効容積が増えるなどの問題がある。本研究では Fig.3 に示す実験用スターリングエンジンを使用した。このエンジンも Fig.2 と同様に、2シリンダディスプレイサ型と呼ばれ⁽¹⁾、全作動空間の容積を変え発生圧力による力を受けるパワーピストンと、高温側（膨張室）と低温側（圧縮室）との作動空間の容積比を変えるためのディスプレイサピストンを有している。しかし、本実験用スターリングエンジンでは、前述のような再生器を備えることによる問題を避けるため、独立した再生器を設けず、作動流体はディスプレイサピストンとシリンダ壁との間に設けた隙間を移動するようにしている。その際にディスプレイサピストン表面が再生器として機能することを狙い、Fig.4 に示すようにディスプレイサピストン表面への格子状の溝加工により表面積を拡大し、作動流体に対して授受する熱量の増加を図っている⁽³⁾。供試エンジンの諸元を Table 1 に示す。

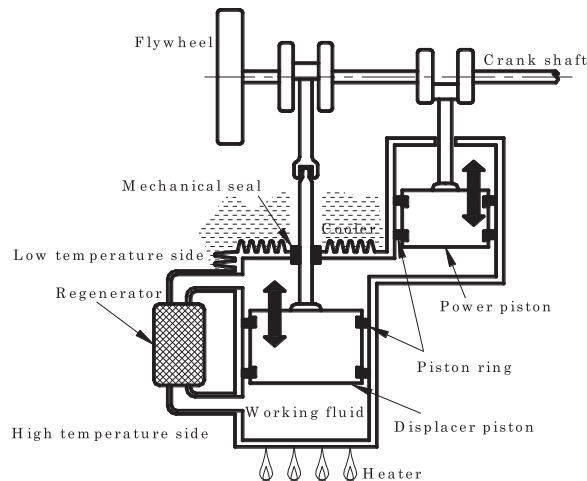


Fig.2 Schematic of Stirling engine with regenerator

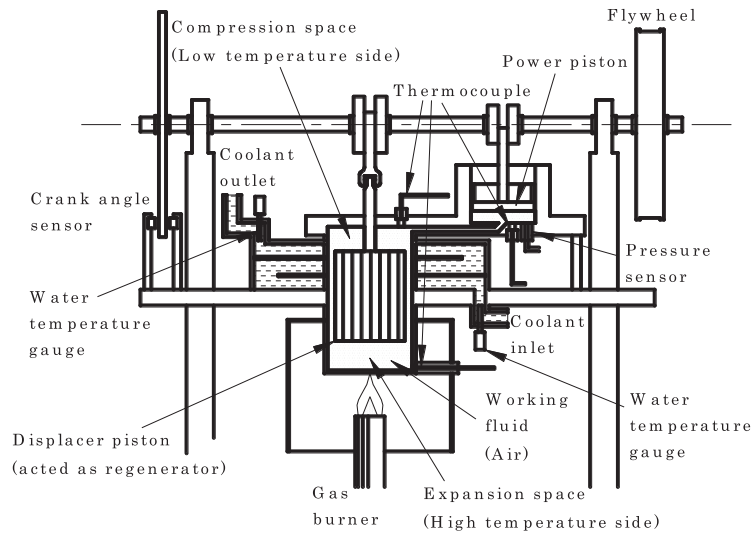


Fig.3 Schematic of experimental Stirling engine

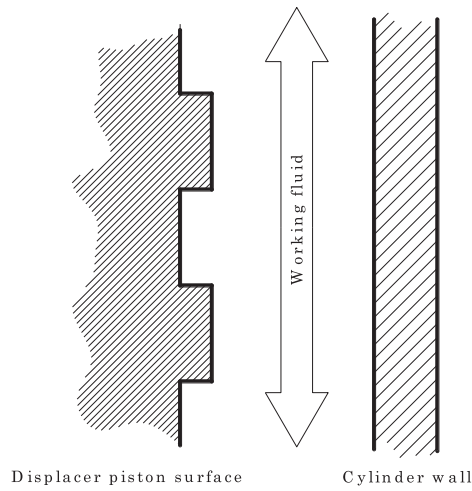


Fig.4 Grooving on displacer piston surface

Table 1 Specification of experimental Stirling engine

Power cylinder	Diameter	53mm
	Stroke	38 mm
	Crank radius	19mm
	Connecting rod length	111 mm
	Compression ratio	13.38
Displacer cylinder	Diameter	80 mm
	Stroke	50 mm
	Crank radius	25mm
	Connecting rod length	107 mm
Working fluid	Air (Unpressurized)	
Heat source	Bunsen burner (Propane gas)	
Cooling source	Water	

2.3 蓄熱材

エンジン回転速度の低下に伴い、再生器において授受される熱量が増大する場合、再生器の蓄熱量を増加することにより、熱効率は上昇することが考えられる。したがって、再生器の蓄熱量を増加させる目的として蓄熱材を追加する。さらに蓄熱量の違いによるエンジン性能の比較を目的として、比熱の異なる蓄熱材に変更し性能試験を実施する。

供試エンジンはアルミニウム合金製ディスプレーサピストンを備え、前述(2.2節)のとおり、その側面に溝(幅3mm, 深さ2mm)を設け再生器としている。このディスプレーサピストン表面に蓄熱材を追加する。溝部分に配置可能な蓄熱材として直径1.6mm, 全長143mmの金属線を選定し、42本配置することにした。

また、入手の容易さから金属線の材質は銅, アルミニウム, ステンレス(SUS304)とし、これらを変更して性能試験を行う。蓄熱材の性質をTable 2に示す。蓄熱材の追加による再生器の蓄熱量の変化は、用いる金属線の比熱に影響されるといえるが、金属線の熱伝導率も再生器の性能に影響することが考えられる。Table 2に示すとおり、比熱はアルミニウム, また、熱伝導率は銅が最も高い。なお、各蓄熱材追加時、比重の違いによりディスプレーサピストンの質量に差異が発生することを避けるため、ピストン内部の錘を増減して質量の調節を行う。ディスプレーサピストンに追加される蓄熱材の様子をFig.5に示す。

Table 2 Properties of metal wires used as heat storage material⁽⁴⁾

Material	Specific heat capacity [J/kg · K]	Thermal conductivity [W/m · K]	Specific gravity
Copper	385	386	8.96
Aluminum	900	204	2.7
Stainless steel (SUS304)	502	16	7.82

(at 1atm, 293K)



Fig.5 Heat storage material added on surface of displacer piston

3. 実験結果および考察

3.1 エンジン回転速度と正味熱効率の関係

エンジンへの負荷を変更して得られたエンジン回転速度と正味熱効率の関係をFig.6, 蓄熱材の違いによる正味熱効率の最大値およびその際のエンジン回転速度をTable 3に示す。これらより供試エンジンの正味熱効率は極め

て低いことがわかり、これに伴い再生器の性能も低いといえるが、蓄熱材の追加による正味熱効率の向上は確認でき、蓄熱量増大の効果であると考えられる。また、蓄熱量の増大を施しても正味熱効率の最大値を発生するエンジン回転速度に明らかな変化は見られない。

一方、蓄熱材の材質による正味熱効率の比較をすると、比熱が高く蓄熱量が最も大きいアルミニウム使用時および熱伝導率が最も高い銅使用時よりもステンレス使用時の正味熱効率を上回っている。スターリングエンジンは、高温側と低温側の温度差が大きいほど熱効率は上昇する。即ちステンレスと比較して銅およびアルミニウムは熱伝導率が高いことから、温度差の拡大に対して不利に作用する可能性が考えられる。

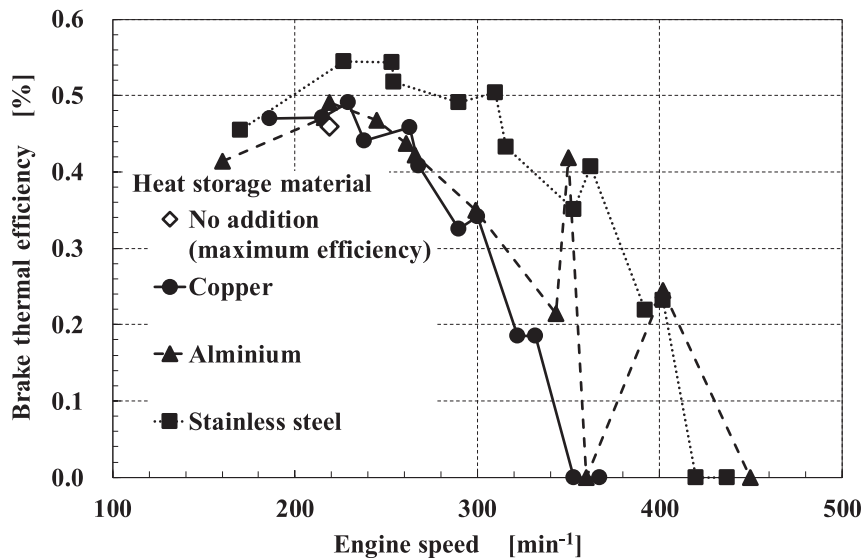


Fig. 6 Relationship between engine speed and brake thermal efficiency measured with addition of heat storage materials

Table 3 Comparison of brake thermal efficiency between difference in heat storage materials

Heat storage material	No addition	Copper	Aluminium	Stainless steel
Maximum brake thermal efficiency [%]	0.46	0.49	0.49	0.54
Engine speed [min ⁻¹]	219	229	219	227

3.2 エンジン回転速度と理論熱効率の関係

スターリングエンジンの理論熱効率は高温室と低温室の作動流体の温度より算出され、この温度差の拡大に伴い理論熱効率は増大することになる。したがって、理論熱効率は、高温室と低温室の温度差、即ち再生器の性能を示すことになる。エンジン回転速度の変更に対し、作動流体の実測温度を用いた理論熱効率の関係を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 より、正味熱効率 (3.1 節) に対して理論熱効率は高く、作動流体の温度条件が正味熱効率に反映されていないといえる。これは、理論熱効率は再生器における再熱損失が無いものとして算出されているが、実際に再生器で再生される熱量は僅少であり、高温室と低温室の温度の維持は、概ね高熱源と低熱源に依存していることが考えられる。即ち正味熱効率が極めて低いのは、供給熱量の大半が再生器に蓄熱されることなく素通りし、低温室より放熱されるためであると考えられる。

蓄熱材の違いによる比較をすると、理論熱効率が最も低くなるのは銅使用時であることから、他の蓄熱材使用時よりも高温室と低温室の温度差が小さいことがわかる。これは前述 (3.1 節) のとおり銅の熱伝導率が高いことが原因であると考えられる。

一方、アルミニウム使用時とステンレス使用時の理論熱効率はほぼ同等であるが、これは正味熱効率の傾向と異なっており原因の調査が必要である。また、これらと比較するとエンジン回転速度が低下した場合にアルミニウム使用時の理論熱効率が下回る。これは、比熱の高いアルミニウムを用いて蓄熱量を増加させたものの、エン

ジン回転数の範囲によっては熱伝導率の影響が顕著になることが考えられる。しかし、蓄熱材として用いる金属線の全長（作動流体の流れ方向の距離）や配置方向を変更した場合、理論熱効率の推移、即ち高温側と低温側の温度勾配は現状と異なる可能性がある。

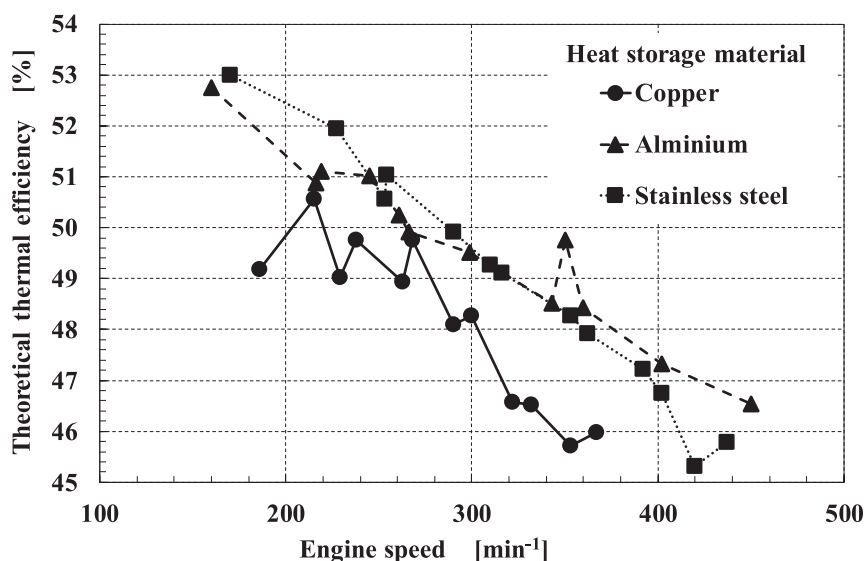


Fig.7 Relationship between engine speed and theoretical thermal efficiency calculated based on actual temperatures

4. 結 言

ディスプレイサピストン表面を再生器として機能させるスターリングエンジンにおいて、再生器の蓄熱量を増大させ、エンジン回転速度低下時における熱効率の向上を確認するために、3種類の異なる金属を蓄熱材として再生器に追加し性能試験を行った。

その結果、再生器の蓄熱量増大による熱効率の向上を確認した。しかし、熱効率の最大値を発生する際のエンジン回転速度への影響は確認できなかった。また、再生器の蓄熱材として用いる材質の熱伝導率が熱効率に対して著しく影響を及ぼすといえ、追加した蓄熱材を有効に機能させるためには、再生器において作動流体の流れ方向への熱伝導を減ずる蓄熱材の配置を検討する必要がある。

文 献

- (1) 山下巖, 濱口和洋, 香川澄, 平田宏一, 百瀬豊, スターリングエンジンの理論と設計 (1999), pp.3-4, pp.37-42, 山海堂.
- (2) 加藤諒馬, 新宮聖也, 中島武士, 松宮祐哉, “スターリングエンジンの回転速度と熱効率の関係”, 平成 30 年度福井工業大学卒業論文 (2019)
- (3) 水島一祐, 位田晴良, “スターリング機関の性能および熱効率の向上”, 福井工業大学研究紀要第 33 号 (2003), pp.127-134.
- (4) Q&A キット Version 4.51, 各種物質の性質: 金属 (固体) の性質, 株式会社八光電機, <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm> (参照日 2020 年 2 月 29 日).

(2020 年 9 月 10 日受理)