A01 低温度差小形スターリングエンジンの動作特性

Operating characteristics of a small size Stirling engine driven by a low temperature difference

○青木 昂介 (国土館大) 正 大高 敏男 (国土館大) 川田 斉礼 (昭和電工 (株))

Kousuke AOKI, Kokushikan University, 4-28-1, Setagaya, Setagaya-ku, Tokyo, 154-8515

Toshio OTAKA, Kokushikan University

Naoyuki KAWATA, SHOWA DENKO K.K.

This paper refers to the operating characteristics of a compact Stirling engine capable of recycling waste heat and operating at low temperature differences. Recently, from the perspective of global environmental protection and energy saving, waste heat recovery and its reuse are matters of increasing public concern. However, the required temperature level of recyclable waste heat is rather high, and reuse of waste heat of relatively low temperature of about 200°C emitted from general plants, etc., is technically difficult. For the purpose of recovering and recycling such energy that is wasted unused, a compact Stirling engine capable of operating at low temperature differences has been designed and manufactured on an experimental basis. The basic performance of the prototype has been experimentally verified and evaluated with good results, which are reported in this paper.

Key Words : Stirling engine, Waste heat, Low temperature difference

1. 緒論

近年, CO₂ 排出量の増加が大きな地球環境問題になっている。このことから, 低炭素社会の実現の為にいかに CO₂ 排出量を削減していくかが大きな課題になっている。ごみ焼却排熱や工場廃熱, 地熱温泉熱及び太陽熱など未利用あるいは十分に回収していない熱エネルギーを回収し, 地球温暖化防止やエネルギー資源を節約する必要がある。こうしたエネルギーは, 温度が 100 °C から 200 °C 程度であることが多く, 高効率なエネルギー回収が難しいという課題がある。

ところで, スターリングエンジンは理論効率が低いことから高効率が期待でき, かつ作動流体に地球温暖化に寄与しない物質, 例えば, ヘリウムや窒素, 水素などを作動ガスとして用いることができるため, 地球環境に応じたシステム構築が可能である。また, 工場廃熱のような中低温の廃熱回収の手段として有効である。これまで, 著者らは, 温度差 250 K で動作する液体窒素を低温熱源とする廃熱回収エンジンを開発し⁽¹⁾, その有効性を示している。ところが, 工場廃熱を想定した低温度差で動作する小形の廃熱回収スターリングエンジンはこれまで見当たらない。このような背景から, 著者らは常温から 200K 程度の温度差で駆動する小形スターリングエンジンに関する研究に着手している。本報では, 500W 級小形スターリングエンジン (以後, KSE-5001 という) を設計・試作したのでその概要について述べる。また, 慣らし運転を兼ねた動作確認試験を行ったので, その結果について報告する。

2. 実験装置

2.1 KSE-5001 エンジン概要

本実験で使用する KSE-5001 の概要図を図 1 に示し, 仕様を表 1 に示す。KSE-5001 は同一シリンダにディスプレイサとパワーピストンを配置する β 形である。高温側温度は廃熱回収を想定して 473K に設定した。KSE-5001 では単体性能評価試験の便宜上, 電気ヒータをシリンダヘッド部密着させて温度調整ができるようにしている。入熱量は所定のシリンダヘッド温度における電気ヒータの消費電力を計測することに把握している。また, 低温側温度は 303K とし, 熱交換器は, 恒温循環器を用いて流量と温度を調節して所定の値に調整した冷却水を循環させている。クランクシャフトは, 軸シールを介してケース外へ連通させてトルクメータに接続している。軸出力はトルクメータにより評価出来るようにしている。封入圧力 3MPa, 回転数を 1500min⁻¹ で軸出力 500W の出力が得られる。作動ガスはヘリウムを使用する。再生器はディスプレイサ内部に構成している。図 2 に再生器内部の構造を示す。再生器は, 蓄熱材として銅メッシュを用いている。端部は作動ガスの整流を考慮して SUS メッシュを充填している。また, 熱伝導損失の軽減のために, 開口比を銅メッシュに合わせて孔を開けているベークライトの薄板を内蔵している。SUS メッシュは再生器の上下に内蔵, その内側に銅メッシュ, ベークライトを挟んでいる。

Fig.1 Schematic view of Low-temperature difference Stirling engine

Fig.2 Displacer configuration

Table 1 Design specifications

Expansion	Bore	80.0mm
	Stroke	20.0mm
	Volume	100.5cc
Compression	Bore	80.0mm
	Stroke	20.0mm
	Volume	100.5cc
Rotational rate		1500min ⁻¹
Mean pressure		3MPa (MAX)
Temperature	Heating Side	473K
	Cooling Side	303K
	Temperature ratio	0.6
Regenerator	#100 (Cu matrix)	
	#50 (SUS matrix)	
	Bakelite	
Width Height Depth		233 x 394 x 154mm

2.2 実験装置および測定条件

本実験に用いた計測システムを図3に示す。また、実験装置を図4に示し、ギャップセンサと端子部の図を図5に示す。

Fig.3 Measuring system

Fig.4 Experimental apparatus

Fig.5 Gap-sensor mounting face

エンジンは作動ガスとしてヘリウムを用い、エンジンと真空ポンプを介して接続している。作動空間内部の圧力は、膨張側と圧縮側にセンサを取り付けられるようにしているが、膨張側に関しては、電気ヒータにより高温になるため、今回の実験では

圧縮側のみを計測し、作動空間内部の圧力損失は微小であると仮定し、PV 解析には圧縮空間圧力を代表させて用いることとした。軸出力は、電磁ブレーキを接続したトルクメータに出力軸を接続し、出力軸トルクを計測することにより評価出来るようにしている。トルク計測に関しては冷熱回収エンジンに関する報告⁽²⁾において詳細に述べているのでここでは省略する。エンジンの回転数は、電磁ブレーキに電圧を印加することにより、任意に制御することが可能である。トルクや作動空間内部圧力は、ケース内部のピストンの下死点を検知するために取り付けられているギャップセンサの信号と同期して同時に周期解析装置に収録している。これにより、ピストン位置すなわちクランク軸の回転角度に対するトルク波と圧力波を計測することができる。ギャップセンサの信号は、クランクカバーに取り付けた信号端子により、出力信号を取り出せるようにしている。各部の温度は、熱電対を用い測定している。温度測定箇所は、圧縮空間温度、シリンダヘッド部壁温、冷却水入口温度、出口温度、冷却水貯蔵タンク、室温である。高温側のシリンダには電気ヒータを巻き、さらに断熱材により断熱している。シリンダヘッドはこの電気ヒータにより任意温度に加熱できるようにしている。ヒータに印加する電圧はスライダックにより変えることが可能で電力計にてその電力を計測している。低温側の熱交換器は恒温循環器で温度と流量を調整した冷却水を循環させている。これらの計測データはデータロガーにより収集できるようにしている。

3. 実験結果

3.1 圧力波

図6に封入圧力1.2MPaの実験で得られた膨張空間圧力波について代表として示す。膨張空間圧力波が小刻みに変動しているのは、ノイズによる影響である。実験室が機械工場内にあるために影響を受けたものと考えられる。今後の評価実験ではフィルターの設置などを行う予定である。圧力波は、ノイズによる影響を除けば良好である。ピストンリングやロッドのシール部からの漏れがなく良好に動作していることが示されている。

Fig. 6 Pressure wave

3.2 トルク線図

封入圧力1.2MPa、回転数200min⁻¹のトルク線図を図7に示す。トルク波は1周期の中で大きく変動していることがわかる。また、90°と270°付近で大きくマイナス方向に働いている。これは、軸負荷を大きくし、回転数が低いためである。トルク出力を安定して取り出すためには、フライホイールを取り付ける必要がある。トルク波がマイナス方向に働いているとき、大きく変動している。これはKSE-5001とトルク変換器を接続している軸が水平に付いていなかったことが原因だと思われる。

Fig. 7 Torque curve

3.3 PV線図

図8に封入圧力1.2MPa、回転数200min⁻¹のPV線図を示す。PV線図から、膨張仕事は38.0W、圧縮仕事は16.7W、PV仕事は21.3Wであった⁽²⁾。膨張仕事が少ないのは、電気ヒータによる入熱に不具合があったことが主な原因である。電気ヒータに巻いている断熱材が薄く、断熱が不完全で有り、大きな熱損失があったと考えられる。今後、断熱材を巻き、熱放出を抑える必要がある。また、KSE-5001が暖かいまま封入圧力を1.2MPaにしたため、内部のヘリウム雰囲気ガスメータの1.2MPaより低くなっていることも原因にあげられる。

Fig. 8 1.2-200 PV diagrams

3.4 膨張仕事

膨張仕事を封入圧力について整理し図9に示す。図中の直線は線形近似により求めたものである⁽³⁾。封入圧力が増加するとそれに伴い膨張仕事も増加する。今回は慣らし運転で有り、封入圧力を仕様よりも低くし、回転数も低く設定して運転しているので、膨張仕事もかなり低い値となっているが、動作確認試験としては良好な結果であった。

Fig.9 Indicated expansion work as a function of mean pressure

4. 結論

473K-303K で運転する低温度差スターリングエンジンを設計・試作した。今回の実験では、試運転も兼ねて低圧力での性能評価を行った。エンジンは、良好に機能し、基本動作特性を把握することができ、また、以下の課題が明確になった。

- (1) 実験の結果より、封入圧力 1.2MPa、回転数 200min⁻¹ のとき、膨張仕事 38.0W、圧縮仕事 16.7W、PV 仕事 21.3W になることが把握できた。
- (2) トルク線図では、回転数を少なくするために、フライホイールを設け、適切に配置する必要がある。

今後は、慣らし運転を終了し、仕様に沿った評価を行い、200K の温度差で駆動する 500W 級スターリングエンジンの動作特性と実用性を明らかにしていく。

参考文献

- (1) T.Otaka, M.Ito, Operating Characteristics of a Small Cryogenic Stirling Engine With a Displacer, Proc. the ASME 2011 Power Conference POWER2011, POWER2011-55379, 2011
- (2) Ishikawa,T., Otaka,T., Ito,M., Operating characteristics of a small size Stirling machine as a cryogenic heat engine, The 13th symposium on stirling cycle, (2010), pp.93-94.