

スターリングエンジンのシール性能について

Performance of Seal Device for a Stirling Engine

正 平田宏一（船舶技研）

Koichi HIRATA, Ship Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo

In the case of a displacer type Stirling engine, there are piston rings of a displacer piston and power piston, and the rod seal as internal seal devices. The piston ring of the power piston and the rod seal must have a high performance of the gas leakage, because the seal characteristics affect to the engine performance strongly. On the other hand, the gas flow through the piston ring of the displacer piston is a little, because there is a small pressure difference between the above and below spaces of the piston ring. Then, it is considered that the seal characteristics affect to the engine performance only a little. However, several problems happen on its endurance characteristics sometimes, because its working temperature is higher than that of the other seal devices. So, effects of the seal characteristics of the piston ring must be investigated in detail.

This paper shows experimental results with a 100 W displacer type Stirling engine for the effects to the engine performance from the seal characteristics of the piston ring using the displacer piston. As the results, the seal characteristics affect to the working gas temperature, the indicated power, the thermal efficiency and the pressure loss in the heat exchangers.

Key words: Stirling Engine, Displacer Piston, Piston Ring, Engine Performance

1. まえがき

スターリングエンジンに用いられるシール装置には、エンジン内の作動ガスと大気圧との間をシールする外部シールと作動空間内の各空間を仕切る内部シールとがある。一般に、ディスプレーサ形スターリングエンジンの内部シールには、ディスプレーサ及びパワーピストンに設けられるピストンリング並びにディスプレーサロッドに設けられるロッドシールがある。パワーピストンのピストンリングやロッドシールからのガス漏れは、エンジン性能に大きく影響を及ぼすため、これらのシール装置にはガス漏れが極めて少ないことが要求される⁽¹⁾。一方、ディスプレーサの上下の空間での圧力差は小さく、そこでのガス漏れ量は少ないため、ディスプレーサにおけるピストンリングからのガス漏れがエンジン性能に及ぼす影響は、比較的小さいものと考えられる。しかし、ディスプレーサのピストンリングは、他のシール装置と比べて、一般に作動部の温度が高く、その耐久性が問題となるため、そのガス漏れ特性がエンジン性能に及ぼす影響を詳細に調べる必要がある。

本報では、100 W 級ディスプレーサ形スターリングエンジンを用いて、ディスプレーサにおけるピストンリングのガス漏れ特性がエンジン性能に及ぼす影響について実験的検討を行う。

2. 供試エンジン及び実験方法

2.1 供試エンジン 図1に供試エンジンの構造、表1に主なエンジン仕様を示す。供試エンジンは、アニュラ型再生器をディスプレーサピストンの内部に挿入し、内管が移動する特殊なバヨネット式熱交換器を採用する

ことで、構造の簡単化・小型化を実現した出力 100 W 程度の形エンジンである^{(1),(2)}。運転時には、作動空間内及びバッファ空間内に作動ガスを加圧して封入する。ま

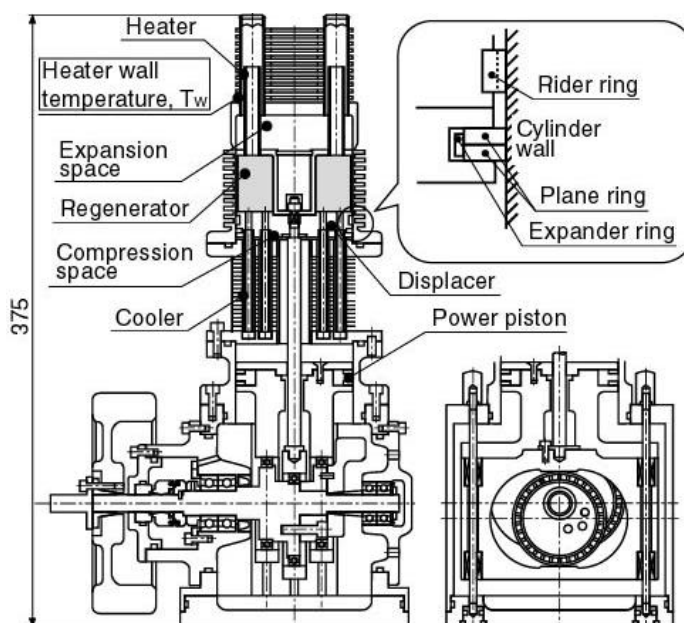


Fig. 1 Schematic view of prototype engine

Table 1 Outline of specifications and target performance

Engine type	Improved Gamma-type
Working gas	Helium / Nitrogen
Maximum pressure	1.1 MPa
Heater wall temperature	750°C (max.)
Compression space gas temp.	40°C (Water cooling) 70°C (Air cooling)
Rated engine speed	1000 rpm
Bore x Stroke	72 x 20 mm
Output power	100 W
Net thermal efficiency	20 %

Table 2 Specifications of piston ring (DP)

	Type A	Type B	Type C	Type D
Plane ring				
Number	2	1	1	0
Width	1.25 mm	2.5 mm	2.5 mm	-----
Clearance of step	1 mm	1 mm	3 mm	-----
Expander ring				
Number	1	1	1	0
Equivalent diameter	0.9 mm	1.1 mm	1.4 mm	3.0 mm

Table 3 Experimental conditions

Heat source	Electric heater (~1 kW)
Heater wall temp.	500 °C (±5 °C)
Working gas	Helium / Nitrogen
Mean pressure	0.8, 0.6, 0.4 MPa
Cooling type	Water cooling
Cooling water flux	2.5 L/min
Cooling water inlet temp.	23 °C (±0.5 °C)
Engine speed	1000 rpm

た、供試エンジンは、バッファ空間とクランク室とを兼用している、いわゆるクランク室加圧型と呼ばれる形式である。

2.2 ピストンリング 図1に示すように、供試エンジンのディスプレイサには、ピストンの直線運動を支持するためのライダーリングとシールを目的としたピストンリングとがそれぞれ1段ずつ装着されている。本実験において、ディスプレイサのピストンリングに、表2に示す4種類の形式を用いる。Type A は2本のプレーンリングの内側にエキスパンダリングを配置した形式、Type B は合い口隙間を1 mm としたプレーンリング1本とエキスパンダリングとを組合せた形式、そしてType C は、合い口隙間を3 mm としたプレーンリング1本とエキスパンダリングとを組合せた形式である。これらのピストンリングにおいて、エキスパンダリングは全て同一のものを使用し、プレーンリングの材質はPTFE(四ふっ化エチレン樹脂)を主成分としている。また、Type D はライダーリングのみを装着し、ピストンリングを装着していない形式である。表2に示す等価直径 d_{leak} は、ガスの漏れがノズル内の等エントロピ流れであると仮定し、実機を用いた静的なガス漏れ試験により求めている。

2.3 実験方法 表3に実験条件を示す。加熱源には、容量1 kWの電気ヒータを用い、図1に示すヒータ管下部の壁温 T_w が500 一定となるように電気ヒータへの入熱量 Q_{total} を調節する。また、エンジン回転数が設定値(1000 rpm)になるように、出力軸に接続された直流発電機の負荷を調整する。冷却熱源には、流量を2.5 L/min一定とした水道水(23 ±0.5)を使用している。作動ガスにはヘリウム及び窒素を用い、作動空間内平均圧力は0.4、0.6及び0.8 MPaの3通りとし、ディスプレイサに上述のガス漏れ特性が異なる4種類のピス

トンリングを取り付け、そこでのガス漏れがエンジン性能に及ぼす影響を調べる実験を行う。

3. 実験結果及び考察

図2は、エンジン回転数を1000 rpmとし、ヒータ管壁温 T_w を500 とした場合、等価直径 d_{leak} に対する膨張空間内ガス温度 T_E 及び入熱量 Q_{total} と関係を示す。これより、入熱量 Q_{total} は、等価直径 d_{leak} が増加するに従って上昇しているものの、膨張空間内ガス温度 T_E は、作動圧力及び作動ガスの種類にほとんど依存せず、等価直径 d_{leak} が増加するに従って低下していることがわかる。これは、等価直径 d_{leak} が増加することで、熱交換器内を通過する作動ガスの流量が減少し、ヒータ及びクーラで十分な伝熱が行われないこと、さらに圧縮空間から膨張空間へ流れる低温の作動ガスが増大することが原因であると考えられる。一般に、スターリングエンジンは、材料の耐熱性からヒータ管壁温に制限を受けることが多い。すなわち、ヒータ管壁温が上限温度に保たれた状態で、作動ガスを有効に加熱するには、ディスプレイサに、高いシール性能を有するピストンリングを装着する必要があることがわかる。

図3は、エンジン回転数を1000 rpmとし、ヒータ管

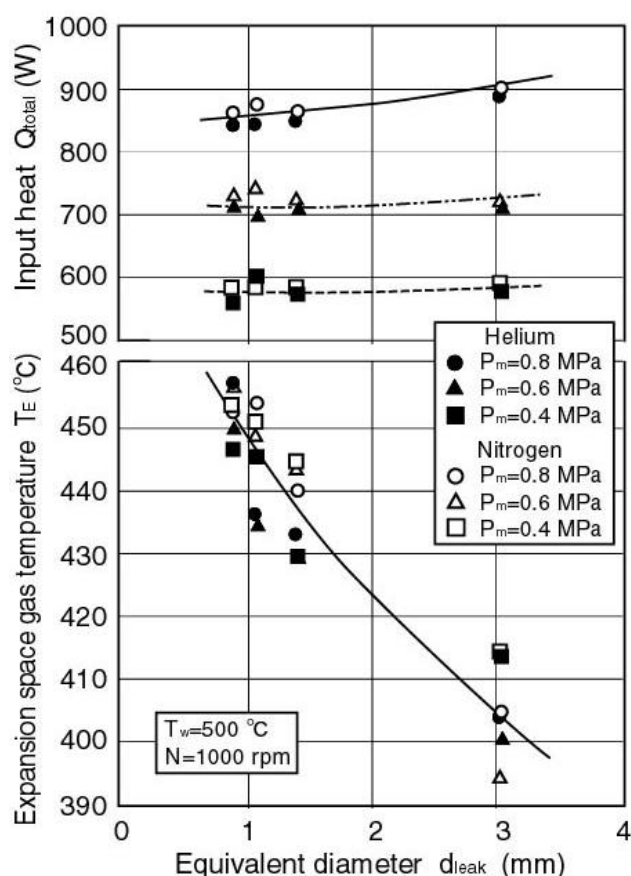


Fig. 2 Expansion space gas temperature and input heat as a function of equivalent diameter

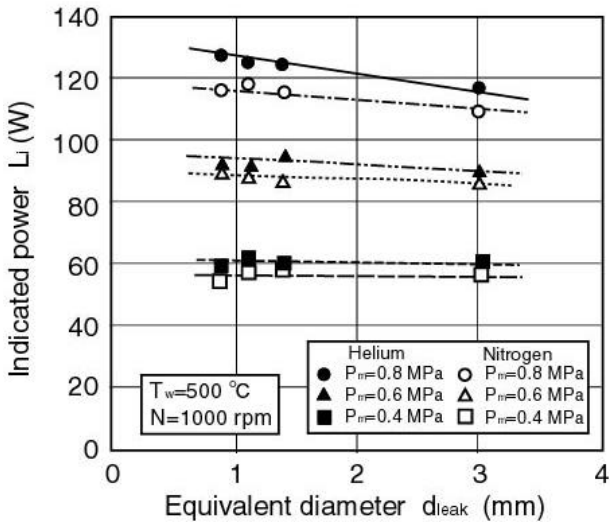


Fig. 3 Indicated power as a function of equivalent diameter

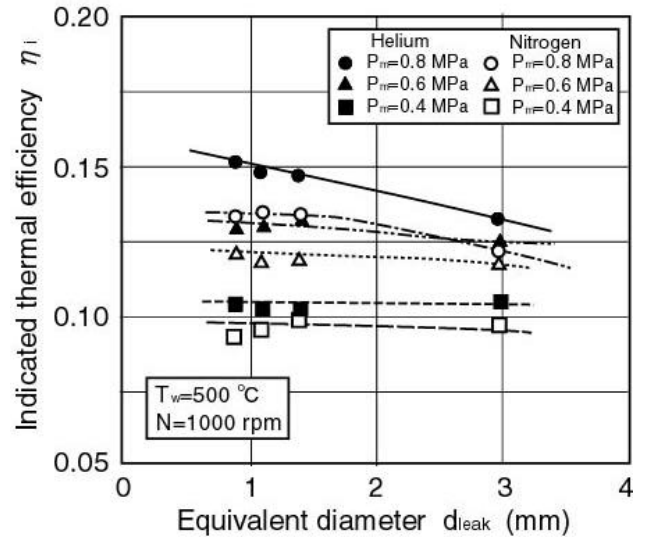


Fig. 5 Indicated efficiency as a function of equivalent diameter

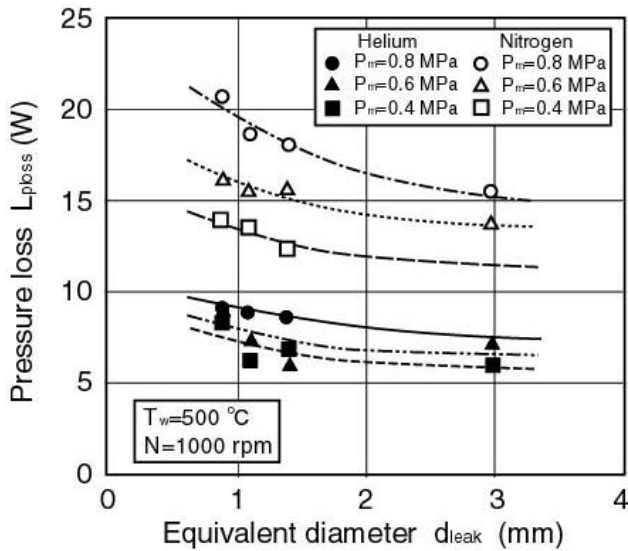


Fig. 4 Pressure loss as a function of equivalent diameter

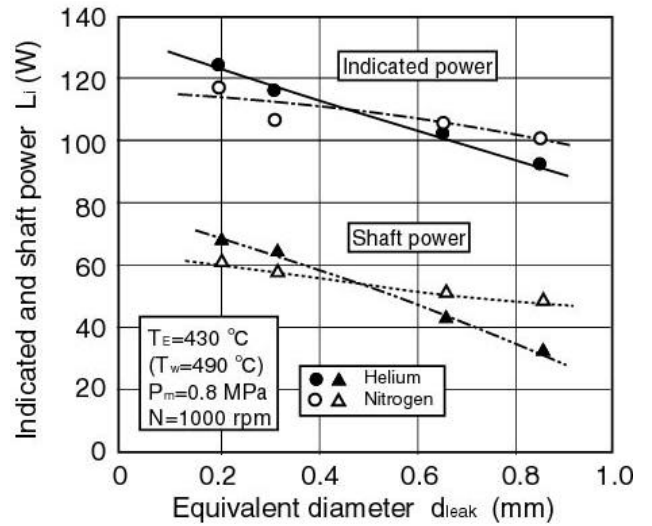


Fig. 6 Indicated and shaft power as a function of equivalent diameter (Power piston)

壁温 T_w を 500 とした場合、等価直径 d_{leak} に対する図示出力 L_i の関係を示す。これより、図示出力 L_i は、等価直径 d_{leak} が増加するに従って、わずかに低下していることがわかる。これは、図 2 に示したように d_{leak} の増大に伴い、膨張空間内ガス温度 T_E が低下していることに起因している。また、図示出力 L_i は、作動ガス圧が高いほどガス漏れの影響を大きく受けていることがわかる。これは、作動ガス圧の変化によって、熱交換器内を通過する作動ガスの質量流量が増減し、熱交換器の伝熱特性に影響を及ぼしているためであると考えられる。

図 4 は等価直径 d_{leak} に対する圧力損失 L_{ploss} の関係を示す。ここで、圧力損失 L_{ploss} は、膨張空間内ガス圧力 P_E 、圧縮空間内ガス圧力 P_C 、膨張空間の容積変化 dV_E 及びエンジン回転数 n (rps)を用いて、次式で求めている。

$$L_{ploss} = \oint (P_E - P_C) dV_E \cdot n \quad (1)$$

図 4 より、圧力損失 L_{ploss} は、等価直径 d_{leak} の増大に伴い低下しており、作動ガスに窒素を用いた場合の方がヘリウムを用いた場合よりその低下が顕著である。ディスプレイサにおけるピストンリングからのガス漏れ量は、熱交換器の圧力損失とピストンリングのガス漏れ特性との大小関係によって決定し、熱交換器内を通過するガスの流量に影響を及ぼしている。したがって、分子量が大きい窒素が、その影響を強く受けているものと考えられる。これにより、図 3 に示すように、作動ガスにヘリウムを用いた場合の図示出力 L_i は、窒素を用いた場合と比べて、等価直径 d_{leak} の影響が大きいものと考えられる。

図 5 は、等価直径 d_{leak} に対する図示熱効率 η_i ($=L_i/Q_{total}$)の関係を示す。これより、図示熱効率 η_i は、等価直径 d_{leak} が増加するに従ってわずかに低下していることがわかる。これは、等価直径 d_{leak} の増大に伴い図

示出力が低下するとともに、ヒータ管壁温を一定に保つための入熱量 Q_{total} が増大するためである。

次に、上述の結果とパワーピストンに設けられるピストンリングのガス漏れ特性がエンジン性能に及ぼす影響との比較を行う。図 6 は、パワーピストンのピストンリングのガス漏れ量を変化させた場合、パワーピストンの等価直径 d_{leak} に対する図示出力 L_i 及び軸出力 L_s の関係を示す⁽¹⁾。これより、エンジンの出力特性は、パワーピストンにおける等価直径の依存性が大きく、作動ガスにヘリウムを用いた方が大きく影響を受けることがわかる。これは、パワーピストンにおけるガス漏れが作動空間の圧力振幅に直接影響し、分子量が小さいヘリウムはその影響が大きいためであると考えられる。また、図 6 と図 3 とを比べると、ディスプレイサにおけるピストンリングのガス漏れ特性が出力特性に及ぼす影響は、パワーピストンのそれよりも小さいことがわかる。

4. あとがき

上述のように、ディスプレイサにおけるピストンリングのガス漏れ特性がエンジン性能に及ぼす影響について実験により調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) ディスプレースピストンのピストンリングからのガス漏れは、出力特性及び熱効率に影響を及ぼす。こ

れは、主に膨張空間内ガス温度の変化に起因すると考えられる。

- (2) ディスプレースにおけるピストンリングのシール性能は、熱交換器内を通過する作動ガスの流量に影響を及ぼし、圧力損失に大きな影響を与える。
- (3) ディスプレースにおけるピストンリングのガス漏れ特性が出力特性に及ぼす影響は、パワーピストンのそれよりも小さい。

本実験により、ディスプレイサにおけるピストンリングからのガス漏れは、膨張空間内ガス温度に大きく影響を及ぼすことが確認された。本報では定性的なガス漏れ特性の評価に至らなかったが、今後の課題として、エンジンの詳細設計に用いることを目的とした、ピストンリングからのガス漏れ特性を考慮した解析モデルの構築が不可欠であると考えている。

文 献

- (1) 平田宏一・ほか 2 名, 小型発電機用スターリングエンジンの開発に関する基礎研究(第 2 報 シミュレーション計算によるエンジンの性能予測法), 機論, 64-621, B(1998), 1608-1615.
- (2) 平田宏一・ほか 3 名, 小型発電機用スターリングエンジンの開発に関する基礎研究(第 1 報 エンジンの設計・試作並びに性能特性), 機論, 64-621, B(1998), 1600-1607.