

50 W 級小型スターリングエンジンの性能特性

(その2, 発電機のハーメティック化とその運転結果)

Performance of a 50 W Class Small Stirling Engine (2nd Report, Experiments of a Hermetic Generator Set)

○ 正 平田 宏一 (船舶技研) 小宮 一郎 (東京電機大) 正 山下 巖 (東京電機大)

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

Ichiro KOMIYA and Iwao YAMASHITA, Tokyo Denki University, Tokyo

In order to develop a low cost and small Stirling engine, a gamma-type Stirling engine which has simple moving-tube-type heat exchangers and a Rhombic mechanism has been developed. Its target shaft power is 50 W at the engine speed, 4000 rpm and the mean pressure, 0.8 MPa using helium as the working gas. In the first report [1], we measured the engine performance with atmosphere air with no-load condition and the mechanical loss with high-pressure condition on the motoring test. Therefore, it was confirmed that the friction loss of a rotating rod seal was too strong. In this paper, we develop a hermetic generator set using the prototype engine. It is expected to decrease the mechanical loss, because the rod seal is omitted. Then, the performance is measured with high-pressure condition using helium or nitrogen as the working gas. As the result, it is confirmed that the helium is suitable working gas for the small Stirling engine. Also, many subjects for getting more high power and efficiency are clarified.

Key words: Stirling Engine, Heat Exchanger, Friction, Mechanical Loss and Generator Set

1. まえがき

スターリングエンジンの問題点として、多数の伝熱管を溶接して製作される熱交換器の製造コストが高いこと及びエンジン重量当たりの出力が小さいことがあげられる。著者らは、それらの解決策を見出すことを目的として、目標出力が 50 W の実験用小型スターリングエンジンの開発を進めている。これまでに、大気圧空気における運転試験、実機による機械損失の測定並びにシミュレーションとの比較・検討を行った⁽¹⁾。そして、本エンジンの出力を向上させるためには、熱交換器の高性能化及び機械損失の低減が必須であることが確認された。

本報では、機械損失を低減するため、実験用エンジンの発電機をクランクケースと連結した圧力容器に内蔵する(ハーメティック形式)。さらに、作動ガスにヘリウムと窒素素を使用し、エンジン性能を測定した結果について報告する。

2. 実験用エンジンのハーメティック化

高圧の作動ガスを封入して運転するスターリングエンジンにおいて、軸出力を取り出す場合、一般に大気と作動空間との間のシール(外部シール)が必要となる。前報⁽¹⁾で開発した実験用エンジンは、外部シールとして出力軸にリップシールが取り付けられた。そして、実機による機械損失の測定並びに機械損失を考慮したシミュレーション計算によって、リップシールの摩擦損失が占める割合はかなり大きく、クーロン摩擦損失の 94 % 程度であることがわかった。したがって、外部シールを省略し、機械損失を大幅に低減するためには、発電機をクランクケースと連結した圧力容器内部に配置したハーメティック形式とすることが極

めて有効であると考えられる。

図 1 にハーメティック形式とした実験用エンジンの構造、図 2 に外観、表 1 に目標性能及び主な仕様を示す。本エンジンは、ディスプレイサとパワーピストンとを直線上に配置した γ 形である。再生器をディスプレイサに内蔵することでエンジン内の空間を有効に利用でき、さらにその上部及び下部にそれぞれ簡易的な内管往復動式ヒータ及びクー

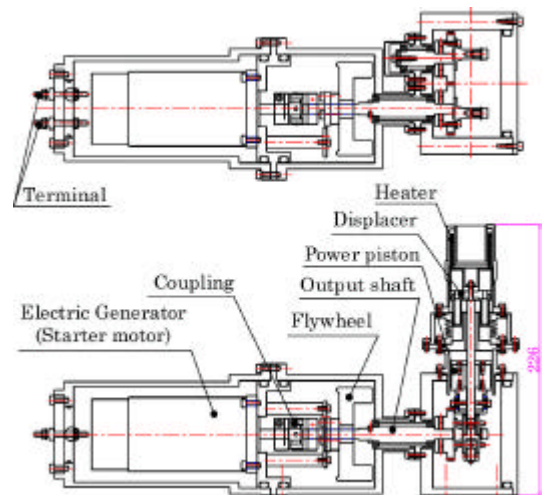


Fig. 1 Schematic view of the experimental engine

Table 1 Specifications and target performance

Bore x Stroke		$\phi 36 \times 10$ mm
Phase angle		90.2 deg
Working gas		Helium / Air
Target shaft power		50 W
Target efficiency		15 %
Heating method		Nichrome wire / Combustion gas
Cooling method		Water cooling
Rated operation	Rated engine speed	4000 rpm (Helium)
	Mean pressure	0.8 MPa
	Expansion space temp.	600 deg C
	Compression space temp.	40 deg C
Design (Limit)	Maximum pressure	1.1 MPa
	Heater wall temp. (max.)	650 ~ 800 deg C

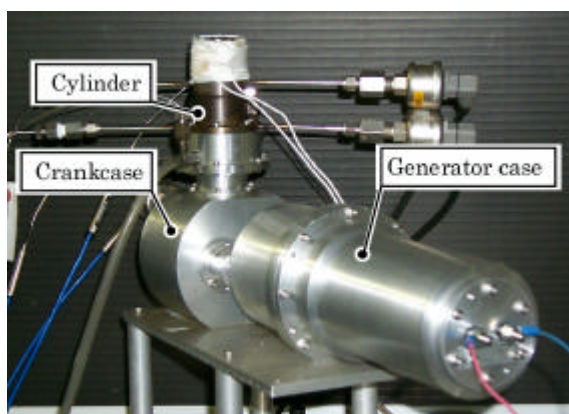


Fig. 2 Photograph of the experimental engine

ラを配置することでエンジンの小型化・低コスト化を図っている。また、ピストン駆動機構には、バランス性に優れたロンピック機構を採用している。

始動用モータを兼ねた発電機及びフライホイールは、クランクケースに連結したアルミニウム合金製の圧力容器に内蔵され、密封される。作動ガスはクランクケース背面から所定の圧力まで封入される。圧力容器の外部には発電機の端子だけを取り出せばよく、リップシール等の動的シールを省略できる。採用した発電機は市販の直流モータ（定格出力 80 W）を流用している。これは高負荷・低回転数域での実験を行うためにかなり大型なものを選定しているが、エンジンが目標性能の通りに機能し、定格運転に限定すれば、かなり小型の発電機を使用することができる。

3．実験用エンジンの性能実験

3.1 実験装置系統 図3に実験装置系統を示す。以下の実験において、加熱源には電熱線を使用し、ヒータ外部の上端の壁温度 T_w が設定温度（600 または 700 ）になるように、電熱線の全入熱量 Q_T を 200～550W 程度の範囲で調整した。冷却はクーラの外周に取り付けたジャケット内部に一定流量（1.0 L/min）の水道水を流した。ガス圧力

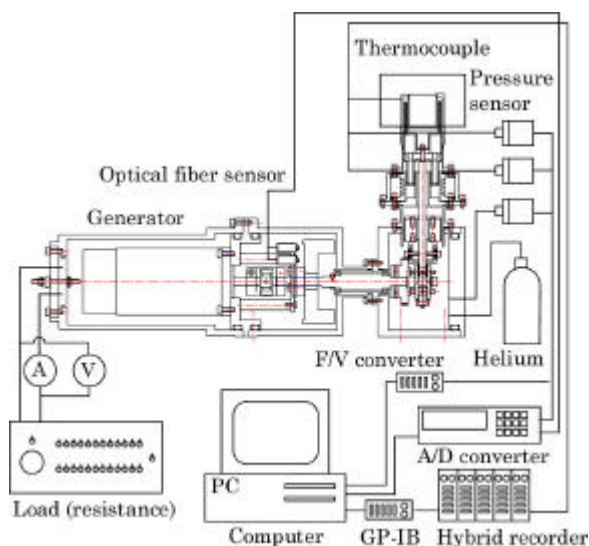


Fig. 3 Measuring system

及びガス温度の測定は、それぞれ膨張空間及び圧縮空間の2個所を測定した。ピストンの上死点信号並びにクランク角度信号は圧力容器内に設置した光ファイバセンサにより検知した。なお、発電機の駆動トルクを測定していないため、軸出力を推定することはできない。

3.2 作動ガスの種類及びガス圧力の影響 ハーメティック化したエンジンが適切に動作するかを確認するため、発電端子に抵抗（負荷）を取り付けずに状態で実験を行った。ヒータ壁温度 T_w を 600 とし、作動ガスには平均ガス圧力 $P_m=0.3 \sim 0.8$ MPa のヘリウム及び窒素を使用した。

図4は、作動空間平均ガス圧力 P_m に対するエンジン回転数 N 、図示仕事 W_i 、図示出力 L_i 、膨張空間ガス温度 T_E 及び圧縮空間ガス温度 T_C の実験結果を示している。これより、作動ガスにヘリウムを用いた場合、測定した圧力範囲において、エンジン回転数 N は 1500～2000 rpm 程度であり、平均ガス圧力 P_m の増加に伴い上昇していることがわかる。一方、窒素を用いた場合、エンジン回転数 N は 600～900 rpm 程度であり、平均ガス圧力 P_m の増加に伴い低下している。また、ヘリウムを用いた場合、図示仕事 W_i 及び図示出力 L_i は、平均圧力 P_m の上昇に伴いほぼ直線的に増加している。一方、窒素を用いた場合、図示仕事 W_i は平均圧力 P_m の上昇に伴いほぼ直線的に増加しているが、図示出力 L_i の上昇はほとんど見られない。ヘリウムを用いた場合の図示仕事 W_i は窒素の 1.2 倍程度であり、図示出力 L_i は窒素の 2～3 倍に達している。

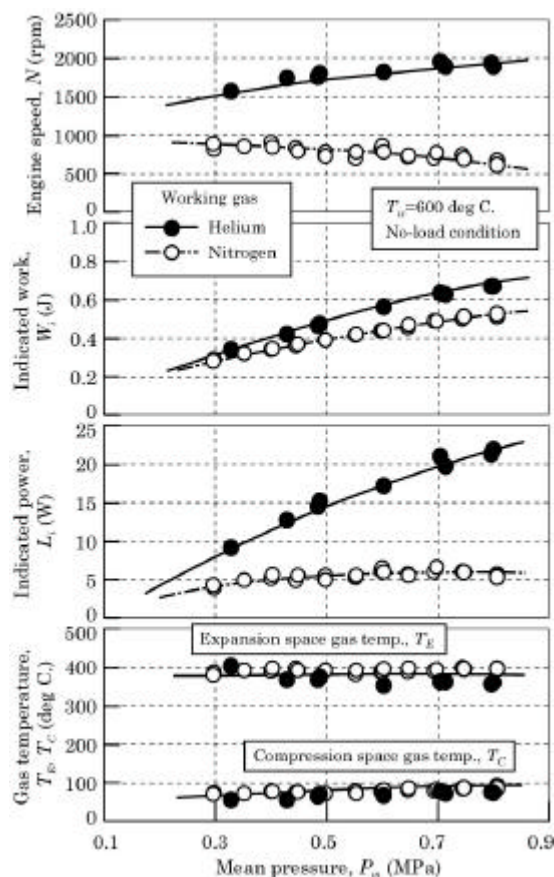


Fig. 4 Experimental results as a function of mean pressure

これらの作動ガスの種類による特性の相違は、熱交換器における圧力損失及び作動ガスの伝熱特性に起因しているものと考えられる。窒素の場合、平均ガス圧力 P_m が圧力損失に及ぼす影響が大きいので、 P_m の増加に伴いエンジン回転数 N が低下したものと考えられる。しかし、本実験において、ガス圧力の測定精度が十分でなかったため、詳細な評価には至らなかった。また、ヘリウムは伝熱性能に優れているため、伝熱面積が比較的小さいヒータ及びクーラによる伝熱量の制限を受けにくい。そのため、平均ガス圧力 P_m 及びエンジン回転数 N が高い範囲であっても適切な熱交換が行われたものと考えられる。これについては、各熱交換器の伝熱計算や詳細な温度測定を含めて、さらに高度な実験と解析が必要である。

また、作動ガスに窒素を用いた場合、比較的圧力が高い範囲において、エンジン回転数の変動が大きく、不安定な運転となった。これは、ピストンシールからのガス漏れが多いため、低回転数域でその影響を大きく受けているためであると考えられる。一般に、同一のエンジン回転数で運転している場合、ヘリウムを用いた方が窒素を用いるよりガス漏れの影響を大きく受けるが、本実験においてはヘリウムを用いた場合のエンジン回転数がかなり高くなったため、その影響が小さかったものと考えられる。

3.3 図示出力及び発電出力 以上より、ハーメティック化した実験用エンジンを加圧した条件で運転する場合、作動ガスにヘリウムを用いることはエンジン出力の向上に極めて有効であることが確認された。以下の実験では、作動ガスに平均ガス圧力 $P_m=0.8$ MPa のヘリウムを使用した。ヒータ壁温度 T_w は 600 及び 700 とし、発電端子に 0.5 ~ 4 k Ω の抵抗を接続し、発電により負荷を与えた。

図 5 は、エンジン回転数 N に対する図示出力 L_i 及び発電出力 L_g の実験結果を示している。これより、図示出力 L_i は、エンジン回転数 N の上昇に伴い、ほぼ直線的に増加していることがわかる。また、 $T_w=600$ とした場合、最大発電出力は $N=1550$ rpm において約 2.0 W であった。それに対して、 $T_w=700$ とした場合、 $N=1880$ rpm において約 4.9 W の最大発電出力が得られており、ヒータ壁温度 T_w

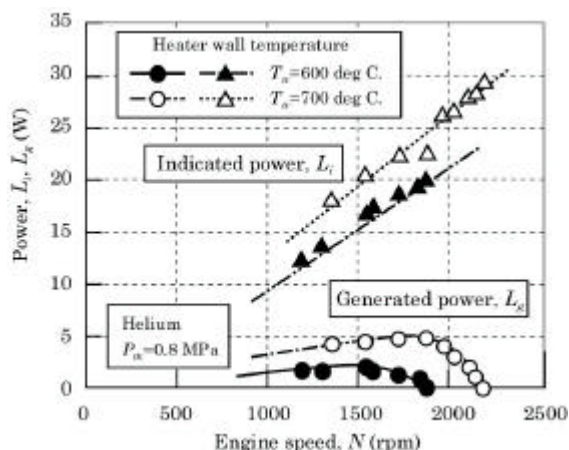


Fig. 5 Power as a function of engine speed

を上昇させることはエンジン回転数の上昇及び出力向上に極めて有効であることがわかった。

また、本実験において、エンジン回転数 N が約 1500 rpm を越えるとエンジンから異音が発生し、さらに約 2000 rpm を越えると急激に増大することが確認された。異音は、ディスプレイサとシリンダ、ロンピック機構に用いている各軸受のはめあい部、あるいはディスプレイサロッドと周囲の部品との接触が原因であると考えられるが、本実験及び実験終了後の分解・点検からはその発生箇所を特定できなかった。いずれにしても、機構部での機械損失が大きいことは明らかであり、今後、ロンピック機構の加工精度や組立精度を含めて詳細に検討する必要がある。

3.4 作動空間内ガス温度 図 6 にエンジン回転数 N と膨張空間ガス温度 T_E 及び圧縮空間ガス温度 T_C の関係を示す。本実験における膨張空間ガス温度 T_E は、 $T_w=600$ において 350 ~ 380 程度、 $T_w=700$ において 420 ~ 450 程度であった。これより、設計時の設定温度である $T_E=600$ を得るためには、ヒータ壁温度 T_w を 800 ~ 900 以上に高める必要があると推測される。しかし、本実験で使用している電熱線では、 $T_w=700$ 程度が限界であり、燃焼ガス加熱とする必要があり得る。すなわち、小型エンジンに適した高性能燃焼器の開発が必要不可欠である。一方、圧縮空間ガス温度 T_C は、 $T_E=700$ 、 $N=2190$ rpm において、約 90 に達している。これは設計時の設定温度である $T_C=50$ と比べてかなり高く、これによる出力低下はかなり大きい。また、実験終了後、エンジンを分解・点検したところ、ディスプレイサのピストンリングの破損が確認された。これは、シリンダ壁温が高くなったためにピストンリング材料 (PTFE) が軟化したことに起因するものと推測される。そして、ピストンリングの破損に伴うシール性能の低下により、膨張空間から圧縮空間へ直接流れる作動ガスが増加し、膨張空間ガス温度と圧縮空間ガス温度との温度差が小さくなったと考えられる。したがって、適切なピストンリング材料の選択とシール性能の維持が必須であると考えられる。

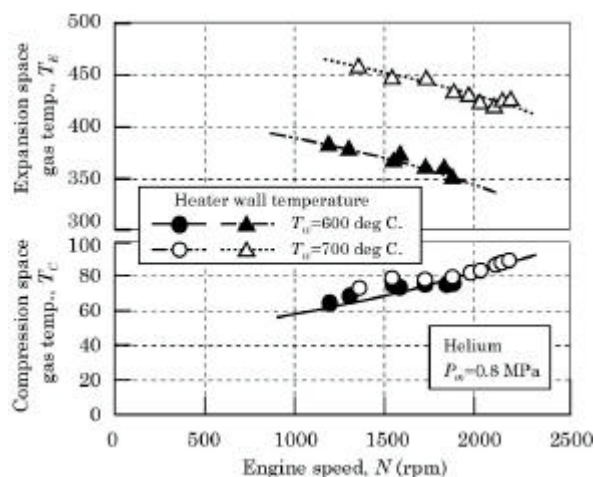


Fig. 6 Gas temperature as a function of engine speed

3.5 各熱量及び熱損失 図7にエンジン回転数 N と電熱線の全入熱量 Q_T 、冷却水の出入口の温度差から求まる有効熱入力 $Q_{in}^{(2)}$ 及び膨張空間図示出力 L_E の関係を示す。これより、それぞれの熱量は、エンジン回転数 N の上昇に伴い、ほぼ直線的に増加していることがわかる。全入熱量 Q_T と有効熱入力 Q_{in} との差は、電熱線から直接大気へ放出する熱損失（ボイラー損失に相当）であり、この熱損失を小さくすることで熱効率の向上が見込まれる。また、エンジン熱入力 Q_{in} と膨張空間図示出力 L_E との差は、主に再生器損失及びシリンダ壁の熱伝導損失である。これらの熱損失を低減することで熱効率及び出力の向上が図られるのは明らかであるが、小型化を目指したエンジンではシリンダを十分に長くすることが難しく、熱伝導損失の低減は極めて困難である。なお、膨張空間図示出力 L_E の実験結果は、別途行ったシミュレーション計算⁽¹⁾の結果より、約20%ほど低い値となっている。今後、圧力等の測定精度や計算における温度設定等を十分に見直す必要があると考えられる。

図8にエンジン回転数 N とバッファ損失 L_B ⁽³⁾ の関係を示す。これより、バッファ損失 L_B は、温度の影響をほとんど受けず、エンジン回転数 N の上昇に伴い増加していることがわかる。著者らが開発を進めてきた100 W級スターリングエンジンの場合⁽³⁾、バッファ損失 L_B は図示出力 L_i の6~7%程度であるのに対し、本エンジンでは L_i の12~14%

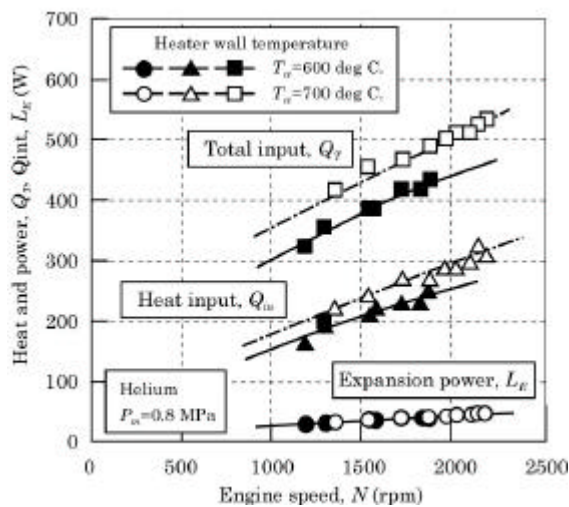


Fig. 7 Heats as a function of engine speed

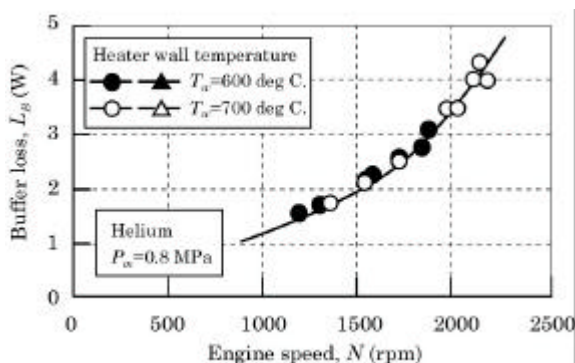


Fig. 8 Buffer loss as a function of engine speed

程度に達した。バッファ損失 L_B はピストンシールの性能に大きく影響を受けるため、3.2 節で述べたように、本エンジンはピストンシールからのガス漏れがかなり多いものと考えられる。

3.6 各熱効率 図9にエンジン回転数 N と図示熱効率 $h_i (=L_i/Q_{in})$ 及び機械効率 h_m と発電機効率 h_g の積 $(=L_g/L_i)$ の関係を示す。図示熱効率 h_i はエンジン回転数 N の上昇に伴い、わずかに増加しており、8~10%であった。この値は100 W級エンジン⁽²⁾の h_i が約20%であるのに比べてかなり小さい。これは本エンジンにおいて熱伝導損失が相対的に大きいためであると考えられる。機械効率 h_m と発電機効率 h_g の積は、エンジン回転数 N が高い範囲で急激に低下している。これは3.3 節に述べた高回転数域における機構部の接触により、機械効率 h_m が低下したためであると考えられる。本実験からは、機械効率 h_m 及び発電機効率 h_g の値を推測できないが、これらの積はかなり低く、エンジンの高性能化のためには、機械損失の低減及び発電機の高性能化が必須であると考えられる。

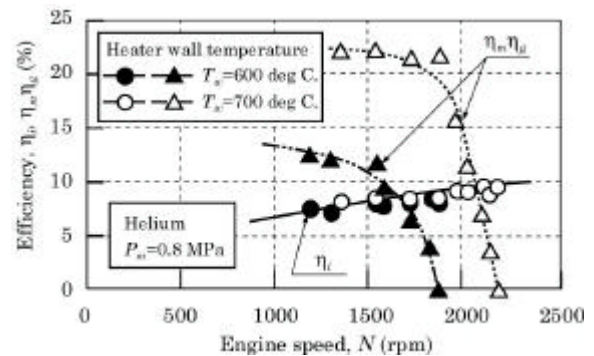


Fig. 9 Efficiencies as a function of engine speed

4. あとがき

本報では、機械損失の低減を目指して、実験用スターリングエンジンのハーメティック化を行い、運転実験を行った。その結果、小型エンジンを加圧した条件下で運転する場合、作動ガスにヘリウムを用いることがエンジン性能の向上に極めて有効であることが確認された。また、目標性能には全く及ばなかったものの、高出力化や高効率化についての課題が明らかになった。

今後、目標軸出力である50 Wを目指して、さらに詳細な実験と解析を進める予定である。

文献

- (1) 平田宏一ほか2名, 50 W小型スターリングエンジンの性能特性(その1 大気圧空気における運転試験結果並びに機械損失の測定), 日本機械学会第3回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, (1999), p.49-52.
- (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, 64-621B, (1998), 1600-1607.
- (3) 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, 64-621B, (1998), 1608-1615.