

ハーメティック形マイクロスターリングエンジンの設計 試作

Design and Trial Production of a Hermetic-type Micro Stirling Engine

正 川田 正國 (海技研)

正 平田 宏一 (海技研)

Koichi HIRATA and Masakuni KAWADA, National Maritime Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo

Key words: Stirling Engine, External Combustion Engine and Pressure Vessel

1. まえがき

19世紀初頭に発明されて以来、多くの形式のスターリングエンジンが研究・開発されてきた。昨今では、排熱利用やバイオマス利用など、環境調和型動力源の一つとして注目を浴びている。一方、スターリングエンジンの実用化を阻む問題点として、内燃機関と比べて小型化・高出力化が難しいことがあげられる。本報では、スターリングエンジンの小型化・高出力化を実現する一つの手法として、作動ガスの高圧化に着目する。そして、模型エンジンと同等の簡単な構造を有する小型スターリングエンジンを圧力容器構造とすることで、小型・高出力エンジンの開発を試みるとともに、高圧機器設計における課題について考察する。

2. スターリングエンジンの高出力化

スターリングエンジンの出力向上方法として、(i) 作動ガス圧力を高める、(ii) 膨脹空間と圧縮空間との温度比を高める、(iii) 行程容積を大きくする、(iv) エンジン回転数を高めることがあげられる。本報で開発するエンジンは、エンジンの小型化を目指しているため、行程容積を大きくすることは適切ではない。また、膨脹空間の温度を高めることは、熱伝導損失の増大や部材の耐熱性といった観点から使用できる材料に制限を受ける。一方、作動ガス圧力を高めることは、エンジンの小型化・高出力化に極めて有効であると考えられる。さらに、エンジン全体を圧力容器構造とすることにより、ヘリウム等の低分子量ガスを容易に利用できるようになる。したがって、作動ガスを空気としたエンジンと比べて、圧力損失の低減が見込まれ、エンジン回転数の増加も期待できる。

スターリングエンジンの高圧化の問題としては、高温条件で使用されるヒータ部の耐熱・耐圧設計や構造部材の変形による機械損失の増加等が考えられる。以下、これらの点を踏まえて、実験用エンジンの設計を進める。

3. ハーメティック形マイクロスターリングエンジンの設計

3.1 基本構造 図1に実験用エンジンの構造、表1に主なエンジン仕様及び目標性能を示す。同図に示すように、本実験用エンジンは、形の模型エンジンに類似した構造を持ち、エンジン全体を圧力容器に内蔵した構造となっている。また、発電機を圧力容器に内蔵したハーメティック形式を採用することで、小型エンジンの機械損失増大の主要因となりうる動的な外部シールを不要としている。発電機には市販の直流モータを使用し、始動時のモータリングにも流用される。

3.2 等温モデルによる性能試算 エンジンの強度設計においてはエンジン内最高圧力 P_{max} 及び最大ピストン荷重 F_{max} の見積もりが重要となる。強度設計時には、平均圧力 P_m を 10 MPa とした等温モデルによって計算し、 $P_{max}=12$ MPa、 $F_{max}=208$ N が得られた。これらの結果に基づき、各部材や軸受の寸法を決定している。一方、定格運転条件である $P_m=8$ MPa とした場合、 $P_{max}=10$ MPa となり、エンジン回転数 2000

rpm において、25.7 W の図示出力が得られる。模型レベルのエンジンの機械損失は、各部品の加工精度や組立精度の影響を大きく受けるため、正確に見積もることは極めて難しいが、大気圧模型エンジンの機械効率が 30~50 % 程度であること¹⁾を考え、目標軸出力を約 10 W に設定した。

3.3 圧力容器構造及び耐圧設計 アルミニウム合金製 (A2017) の本体ケース、上下のフランジ並びに発電機ケースの寸法は、圧力容器構造規格²⁾に準じて肉厚を決定した。

加圧時の変形や組立精度を考えると、クランク機構を本体ケース上部のフランジに固定することが望ましい。しかし、容器寸法の制約から、下部のフランジに固定する構造となっている。これにより、容器自身の変形量の極小化及び各部品の高い加工精度が要求される。

フランジを固定するねじの寸法及び本数は、内圧によってフランジに作用するモーメント及びねじにかかる軸力を考慮して決定した。フランジをボルト・ナットで固定する場合、上記の圧力容器構造規格に準じることで、ねじの寸法及び本数を決定することができる。しかし、本実験用エンジンのように、フランジを植え込みボルトで本体ケースに固定する場合、A2017 製のめねじの強度不足が問題となりうる。そこで、油圧プレスを用いてねじの破壊試験を行った。その結果、A2017 製のめねじ (M6、深さ 6 mm) は約 24 kN の垂直荷重で破壊することが確認できた。これらの試験結果に基づき、ねじの長さ等の詳細な寸法を決定した。

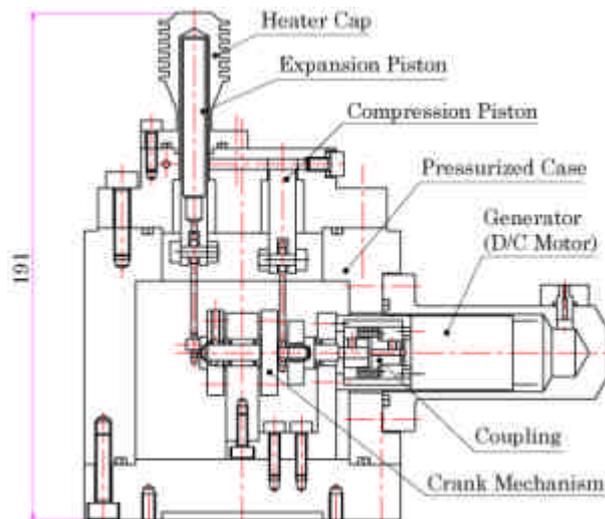


Fig. 1, Structure of the Hermetic Micro Stirling Engine

Table 1, Specifications and Target Performance

Engine Type	Alpha type
Swept Volume (Both Pistons) (Bore x Stroke)	0.47 cm ³ (10mm x 6 mm)
Working Gas	Helium
Rated Mean Pressure	8 MPa (max. 10 MPa)
Heater Wall Temperature	750 deg C (max.)
Exp./Comp. Temperature	500 deg C / 40 deg C
Rated Engine Speed	2000 rpm
Target Power	10 W

3.4 熱交換器 本実験用エンジンのヒータは、従来から模型エンジンで使われている加熱キャップ式を採用している（図 2）。側壁の肉厚は、SUS304 の許容引張り応力（15.7 N/mm²@750）を用いた材料力学的な計算により、最小肉厚を求め、伝熱促進のために設けたフィンが強め輪（強度部材）として機能するものと考えた。また、通常の圧力容器では、内圧による応力集中を緩和するため、内面上部を球面状とするのが一般的である。しかし、本実験用エンジンでは、内径が 11 mm と小さく、球面加工が極めて困難であったため、120° のテーパ形状としている。設計時には応力集中についての詳細な検討が難しかったため、同部品の強度については部品試作後の耐圧試験により評価している。

図 2 に示すように、加熱キャップは低温部にいくに従い肉厚が薄くなるテーパ形状をしている。これは、高温部の耐圧強度を保つと同時に、部材内を伝わる熱伝導損失を低減するための形状である。すなわち、薄肉部が設定温度を超えると強度不足となるため、加熱キャップ下部に十分な冷却が必要となる。そこで本体ケース上部のフランジに冷却水を流す構造としている。なお、従来の模型エンジンと同様、加熱キャップの壁面に再生器の機能を期待し、積層金網等の再生器は挿入していない。

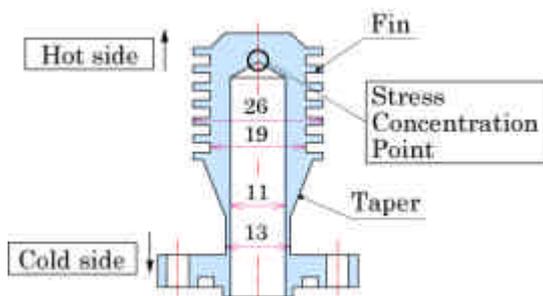


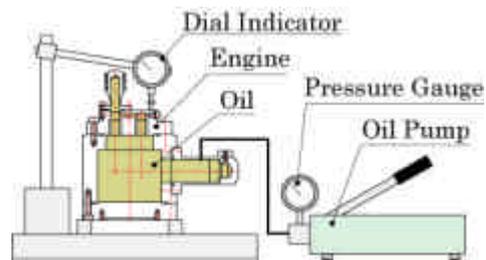
Fig.2, Structure of the Heater Cap

3.5 ピストンシール及びピストン駆動機構 シリンダ摺動部にはカーボン含有 PTFE を用い、膨脹ピストンにはステンレス鋼、圧縮側ピストンにはアルミニウム合金を用いている。シリンダ内面は 10.0 mm のリーマ加工を施し、ピストンとシリンダとの隙間が常温で 0.015 mm 程度になるようにピストン外径を仕上げる。

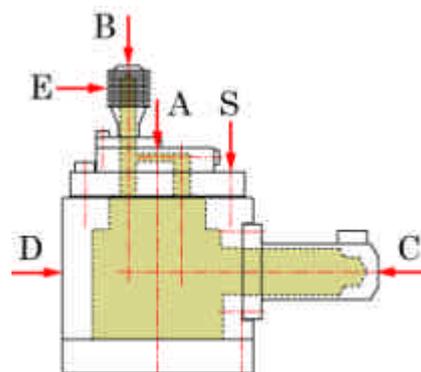
ピストン駆動機構には、単クランク機構を用いている。大気圧運転の模型エンジンと比べて、軸受に約 100 倍もの荷重がかかるため、各部の軸受は、寿命計算を含めた強度計算を行い、性能試験に支障のない程度の運転（約 200 時間）が可能と判断されたものを選択している。

4. 実験用エンジンの耐圧試験

エンジン試作後、油圧試験による各部材の変形量を測定した。図 3(a) に示すように、油圧ポンプにより内部を加圧し、ダイヤルゲージによって、同図(b) に示す位置の変形量を調べた。図 4 に試験結果を示す。10 MPa までの加圧試験により、各圧力容器部材及びねじは十分な強度を有していることが確認できた。また、シリンダ方向の変形量（測定位置 A, B）は最大 0.1 mm 程度である。すなわち、加圧時に熱交換器部とクランク機構部の位置関係が変化することとなり、無効容積の増大によるエンジン性能の低下が生じうる。しかし、横方向の変形量（測定位置 C, D, E）は比較的小さく、加圧に



(a) Construction



(b) Measuring Points

Fig.3, Oil-Pressure Test

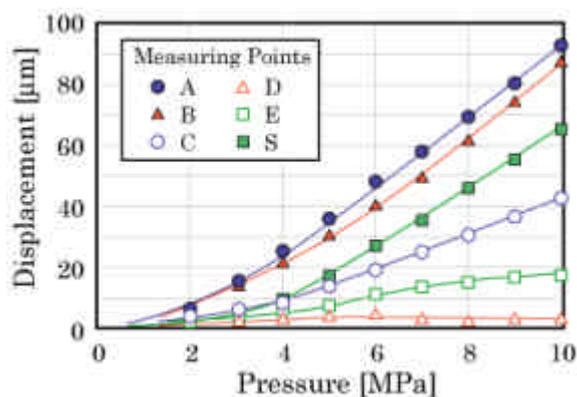


Fig.4, Results of Oil-Pressure Test

よるシリンダとクランク機構のねじれ等は少ないと予想され、加圧による機械損失の増加は少ないものと判断している。

5. あとがき

本報では、エンジンの小型化・高出力化を目指してハーメティック形マイクロスターリングエンジンを設計した。現在、強度面での要素試験を行っており、高压条件での自立運転には至っていない。本エンジンは模型レベルの構造であるが、今後の運転試験等を通じて、耐圧設計の基礎データを得ることができるものと考えており、小型・高出力な実用スターリングエンジンを開発するための設計資料となりうる技術蓄積を進めていきたいと考えている。また、エンジンのさらなる小型化のためには、圧力容器をクランク機構に合わせた複雑な形状とする必要があるが、その耐圧設計は容易ではない。詳細な耐圧設計には、3次元 FEM 解析等を用いた詳細な検討や要素レベルの耐圧試験が必要不可欠である。

文献

- (1) 岩本ほか, 模型スターリングエンジン (第 2 版), 山海堂(2003), p.100-101.
- (2) 斎藤ほか, 圧力容器構造規格による計算例集, 産業図書(1995).