

教育用小型スターリングエンジンの設計と試作

黄 樹 偉, 吉 岡 力*

(平成18年9月20日受理)

Building a Prototype of Small Stirling Engines for Educational Purposes

Shuwei HUANG and Tsutomu YOSHIOKA

(Received September 20, 2006)

A prototype of small Stirling engines with the beta configuration has been built for educational purposes. This engine can be used to demonstrate energy conversion from heat energy to mechanical energy, and can also serve as a heat engine for measuring the thermal efficiency of heat engines or the like. Results of test runs show that the engine can run steadily at speeds up to about 800 rpm when heated by an alcohol lamp, and up to approximately 1400 rpm by a gas burner. Details on the engine design and the results of test runs as well as some problems found during the test runs are reported.

Keyword : Prototype, Small Stirling Engine, Educational Purpose, Beta Configuration, Test Run, Engine Design

教育用の小型 β 型スターリングエンジンの設計試作を行った。このエンジンは、熱エネルギーから機械エネルギーへのエネルギー変換の実演や、熱効率計測に用いられる熱機関などとして使うことができる。エンジンの試運転結果から、アルコールランプによる加熱では約800rpmまで、ガスバーナーによる加熱では約1400rpmまで安定運転できることがわかった。本文ではエンジン設計の詳細、試運転の結果、および試運転で明らかになったいくつかの問題点について報告する。

* 広島国際学院大学大学院工学研究科修士課程院生

1. はじめに

世界経済の発展に伴い、化石燃料、とりわけ石油資源が加速的に減少していく。石油がなくなったあとのエネルギー問題を考えることは、かなり現実的なこととなりつつある。実際、石油がなくならなくても、単に近年のように供給不足気味だけでも、価格が高騰し、既に一般市民の生活にまで深刻な影響を及ぼしはじめている。世界的レベルで見れば、この問題はより深刻である。このような状況下で、石油または他の化石燃料を必要としない動力の発生装置としてスターリングエンジンは自然に注目を集めている。

また、スターリングエンジンは、再生可能なバイオマス燃料、究極のクリーンエネルギーである太陽熱、および大量に排出されるゴミ焼却熱などを熱源として利用できるため、余分な二酸化炭素を排出せず地球環境にやさしいことも重要視されている。

このように話題性に富んだスターリングエンジンは授業や工学実験に取り入れれば、授業の活性化につながるものと思われる⁽¹⁾。また、知識性の面でも、スターリングサイクルにおける、加熱、膨張、冷却、圧縮といった変化過程も、熱工学で学んだこれらの概念を充実させることができる。さらに、加熱器、冷却器、熱再生器の働きも、伝熱工学やエネルギー変換工学などにおいても興味深い。クランク機構を始めとする種々の動力取り出し機構も、機械的にも面白いと思われる。従って、熱工学関連授業または実験のときに、このエンジンを熱エネルギーから機械エネルギーへのエネルギー変換の実演に用いることや、熱効率計測に用いられる熱機関とすることができる。本研究では、このような教育用エンジンを開発することを目標に、基本仕様の決定、動作の確認、およびエンジン性能に及ぼす基礎的要素の把握のための試作機を製作した。本文では、この試作機の設計、製作と試運転結果を報告する。

2. 試作エンジンの仕様

スターリングエンジンを実用化するに際し、高出力化と高熱効率化が必要不可欠である。このため、ヘリウムや水素ガスの使用、作動ガスの高圧化、これに伴う密封技術、および熱交換器の性能向上などの方法・要素技術が必要となる。これらの要素技術を熱工学実験用エンジンである程度調べることができるため、試作機を次のような仕様とした。

- (1) エンジン形式を β 型とした。 β 型がコンパクトなだけでなく、いままで製作してきた数台のエンジンの中で β 型の耐久性が最も優れたことも考慮された。エンジンの3D設計図を図1に示す。
- (2) 密封方法をクランクケース密封式とした。空気以外のガスを作動ガスとして用いる場合、エンジンの密封が必要となる。 β 型エンジンのパワーピストンでは、通常のピストンリングによる密封のほか、ディスプレイサロッドのロッドシールも必要であるので、ピストンによる作動ガスの完全密封は高度な密封技術が必要となる。これを避けるため、ピストンのガス漏れが多少起きても、クランクケースの密封によりさらなる漏れを抑えることができる。
- (3) 熱再生器とディスプレイサーを一体化とした。これにより、エンジン部品点数を減らし、エンジン構造の簡素化を図った。エンジンの構造を図2に示す。
- (4) 作動ガスの平均圧力を0.1MPaとした。当初の設計では、これを0.2MPaとしたが、クランク軸系のねじり剛性が不足していることが判明したので、安全性を確保するため設計を変更した。
- (5) ディスプレーサとパワーピストンのクランク位相角を74°とした。エンジンの最適位相角は、

エンジン各部の容積や死容積の大きさなどにより異なる。エンジン出力をシュミットモデル^{(2), (3)}に基づいて計算した結果, クランク位相角が74°近傍では図示出力が最大となるので, 位相角を74°とした。

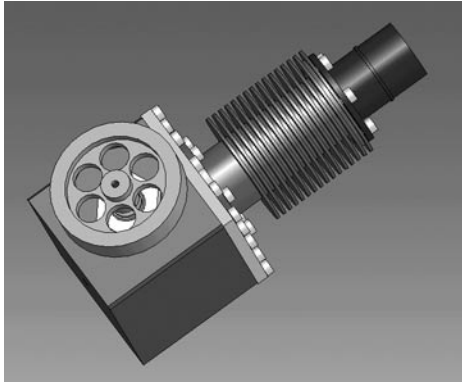


図1 試作エンジンの3D設計図

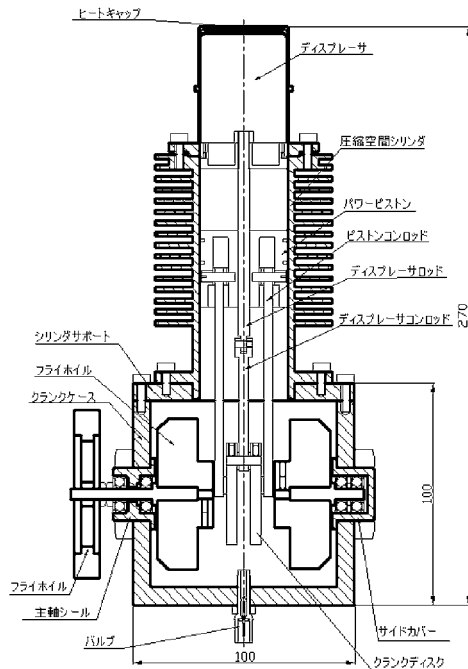


図2 試作エンジンの構造

(6) エンジンの加熱形式をアルコールランプ加熱とした。工学実験時の利便性を考慮してアルコールランプ加熱とした。この加熱形式から, 加熱部温度を500℃と見積もった。より高出力や高回転速度が必要なきにはガスバーナーによる加熱もできるように, 加熱部の材料や強度では, 約600℃ほどもっと高い温度にも耐えられるように設計した。

その他のエンジン仕様の詳細は表1に示す。

表1 エンジンの仕様

エンジン形式	β型
ディスプレーサ径×ストローク	39×30 mm
ディスプレーサ行程容積	35.8 cc
パワーピストン径×ストローク	40×15 mm
パワーピストン行程容積	18.8 cc
全無効容積	4.85 cc
クランク位相角	74°
圧縮比	1.60
加熱形式	アルコールランプ
冷却形式	自然冷却
加熱部温度	500 °C
冷却部温度	50 °C
パンプ平均圧力	0.1 MPa
エンジン回転数	1000 rpm
図示出力	18.3 W

3. エンジンの性能計算

エンジンの性能計算は主にエンジン出力とP-V線図について行った。本研究で設計試作する小型エンジンは、模型レベルのものに近いもので、ガス漏れや摩擦の正確な評価が困難なため、性能計算に複雑なモデルを用いずに単純なシュミットモデル^{(2), (3)}を用いた。計算結果は図3に示す。各行程容積と無効容積は実際のエンジン構造から算出したもので、エンジン回転数は現在まで作ってきた模型レベルのエンジンの実績⁽¹⁾に基づき、1000rpmとしている。

機械効率については、小型エンジンであるため、エンジン各部の調整や、密封の具合によりかなり大きく変化し正確に見積もることが困難なため、目安として40%とした。その結果、図示出力が約18.3Wで、正味出力が約7.3Wとなった。

膨張空間、圧縮空間と全作動空間の容積変化並びにガス圧力変化の計算結果を図4に示す。図中、クランク角度はディスプレイサーピストンの上死点を基準としている。図4の計算結果から得られたp-V線図を図5に示す。

図4から、ディスプレイサーピストンとパワーピストンのクランク位相角が74°のときに、最大圧力はクランク軸角度が130°の時に達することと、膨張空間容積（図4中のV Expansion）と圧縮空間容積（同図中のV Compression）の位相差は約150°であることがわかった。



図3 エンジンの性能計算

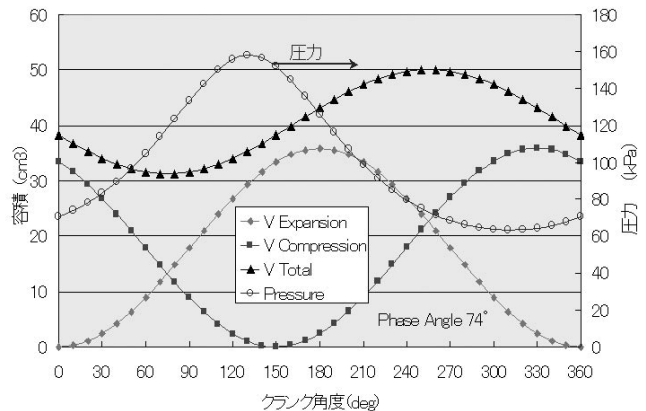


図4 作動空間各部の容積変化と圧力変化

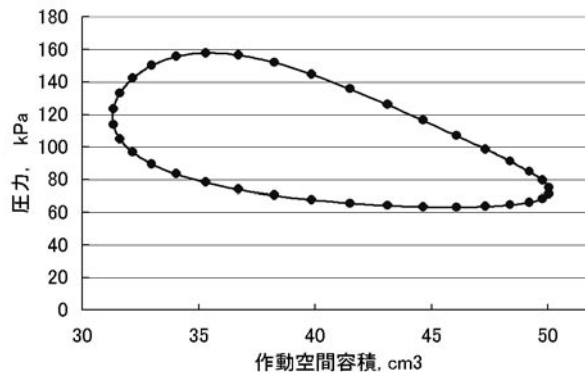


図5 エンジン作動空間のp-V線図

4. エンジン主要部の設計製作

製作したエンジンの外観を図6に示す。エンジン主要部を図7に示す。

- (1) **ヒートキャップ** エンジン構造簡素化のため、専用の加熱器を設けていないので、ヒートキャップは加熱器と膨張空間のシリンダーとして兼用される。加熱器としては、熱抵抗を減らすため、壁面の厚さをできるだけ薄くする必要があるが、膨張空間のシリンダーとして、高温強度と高い剛性が求められる。この相反する要求を満たすため、ヒートキャップの中間にリング状の突起を設けた。また、加熱部から膨張空間シリンダーの軸方向に沿って冷却部への伝熱量を小さくするためヒートキャップを長くしたうえ、さらに、ヒートキャップと冷却部との結合部に断熱性の高いガスケットを用いた。

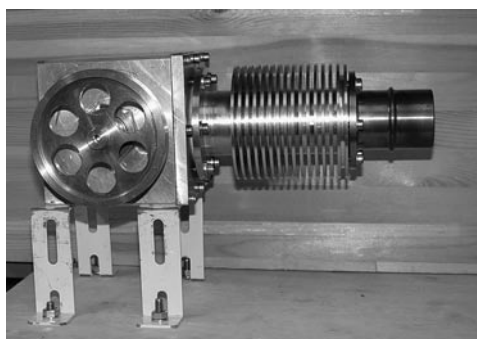
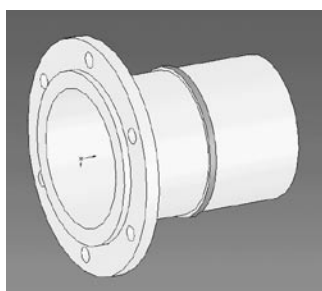
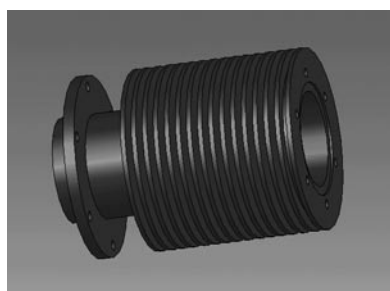


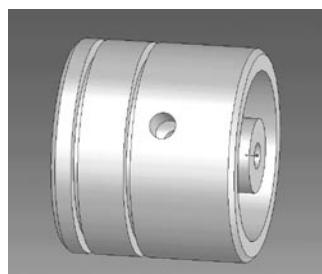
図6 製作したスターリングエンジンの外観



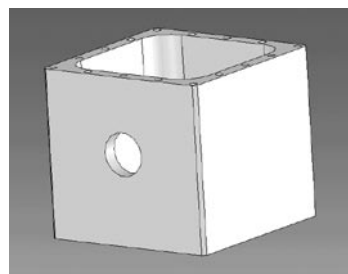
(a) ヒートキャップ



(b) 圧縮空間シリンダー



(c) パワーピストン



(d) クランクケース

図7 エンジンの主要部

- (2) **圧縮空間シリンダ** 専用の冷却器を設けていないので、アルミ製の圧縮空間シリンダは同時に冷却器として使われる。冷却能力を上げるために高さ 17mm の冷却フィンを16枚付けた。これでシリンダ表面温度が 50℃、環境温度が30℃の時に、その冷却能力は約 200W 程度と見積もった。
- (3) **ディスプレイサ** 既述のように、エンジン構造の簡素化と無効容積減少のため、ディスプレイサと熱再生器を一体化とした。ディスプレイサの往復運動による慣性力を減らすため、現在では中空円柱構造としている。中空円柱の肉厚を薄くすることにより軸方向の伝熱を減すとともに軽量化を計っている。熱再生は主に中空円柱の表面により行われている。中空部に金網の積層などを充填すれば、熱再生効果を変化させることができる。
- (4) **ピストン** ピストンは真鍮製で、シリンダとの間の密封のため、2つのピストンリングを用いた。また、ピストンの中心軸にはディスプレイサロッドが通るので、ロッドシールはリップシールでは構造的に困難なため、シール機構を用いずにロッドと穴の高精度加工により密封を確保している。
- (5) **クランク軸** パワーピストンとディスプレイサ間の位相差を変えやすくするため、クランク軸は組み立て式とした。クランクピンは、直径 5 mm の円柱とし、クランクアームは直径が 46 mm の円盤にクランクピンと主軸を取り付ける穴を空けることで形成した。
- (6) **クランクケース** 設備関係で鋳造によるクランクケースの製作ができないので、密封を確保するため、円柱状のアルミを用いてフライス加工により製作した。

5. エンジンの試運

試作したエンジンの性能を確認するため、次のような試運転を行った。

加熱形式について、アルコールランプによる加熱で30分以上の自力安定運転が確認できたので、最低目標である自力運転が達成された。しかしながら、アルコールランプによる加熱の温度は低く約 330℃までにしか達せず、このため回転速度も設計値の 1000 rpm より低く約 650~800 rpm のみであった。これはヒートキャップの直径が 41 mm ほど大きいことに対し、用いたアルコールランプの火力が不足しているためと考えられる。

エンジン性能をより詳細に把握するため、加熱方式をガスバーナーとして、図 8 に示す 5 箇所の温度と無負荷時のエンジン回転数との関係を調べた。計測結果は図 9 に示している。計測点 T1 は温度が最も高い点で、加熱部温度を代表し、図 9 中に TH として表している。T2 点は膨張空間と圧縮空間の間に位置し、その温度は熱再生器の代表温度として考えることができる。また、T3 から T5 までは圧縮空間のシリンダ壁面に位置するので、その平均温度を TL とし冷却器空間温度を代表するものとして考えることができる。

図 9 から、加熱部温度 TH が、約 320℃ から 450℃ まで増大するにつれて、エンジン回転数が 700 rpm から 1400 rpm まで上昇することがわかった。この間、冷却部の温度変化が小さく、約 50~60℃の間に小幅に変動したことがわかった。このことは冷却部の冷却能力が十分であることを示唆している。

また、エンジン出力について、このエンジンに適用できる動力計が製作できていないので、未計測となった。

6. まとめ

教育用小型エンジンを開発するため、エンジンの基本的な仕様と動作確認およびエンジン性能に及ぼす基礎的な要素を把握するための試作機を製作することができた。所定のアルコールランプ加熱により運転できる性能はほぼ達成できたものの、回転速度が予定より幾分低くなった。加熱方式をガスバーナーに変更すれば、約800~1400 rpmの回転速度で安定連続運転できることが確認された。

一方、クランク軸は構造上の欠点によりねじり剛性が低く、平均圧力を0.2MPaにしたとき、圧縮力によりねじり振動が大きく、最終的にクランクピンのセットねじが失効となった。作動ガスを高圧化するため、クランク軸の設計を大きく変える必要がある。

また、クランク主軸（出力端）を密封するため、かなり大きな摩擦損失となっているように思われるので、密封を現在のOリングからメカニカルシールに変えることを検討する必要がある。

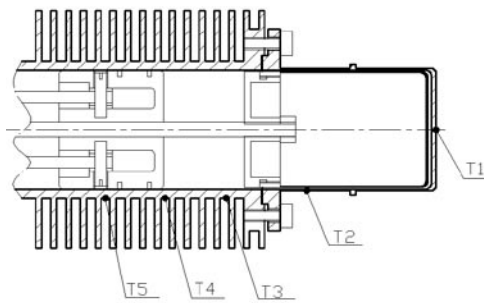


図8 温度の計測点

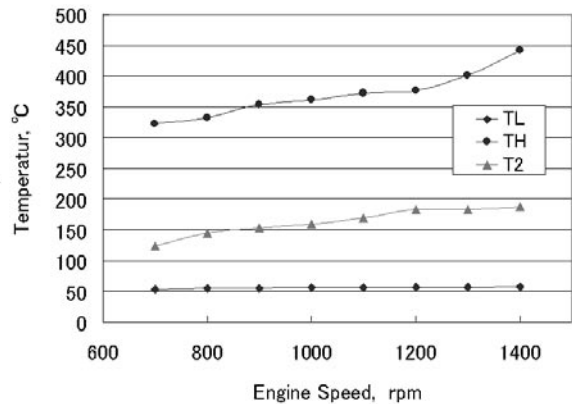


図9 エンジンの回転数と各部の温度の関係

謝辞

本研究の実施に際し、平成18年度文部科学省「私立大学教育研究高度化推進特別補助」と平成18年度サタケ技術振興財団「工学部機械工学科学術研究助成金」を受けた。エンジンの設計試作では、黄研究室2004年度卒業の学生諸君からの協力を得た。また、エンジン部品の製作は本学機械実習工場のスタッフの皆さんから大きな協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

1. 黄, スターリングエンジンの設計製作を通してのものづくり教育, 工学教育, Vol.54, No.2, pp.37-44, 2006
2. 濱口・平田・松尾・戸田, 模型スターリングエンジン (第2版), 山海堂, 2000年
3. 山下・濱口・香川・平田・百瀬共著, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, 1999年