T01 模型飛行機用スターリングエンジンの性能特性

Performance Characteristics of Stirling Engine for Model Aircraft

秋吉 保洋 (防衛大) 小平 大輔 (防衛大)

正 松口 淳 (防衛大) 正 香川 澄 (防衛大)

高山 秀雄

Yasuhiro Akiyoshi, National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686

Daisuke Odaira, National Defense Academy

Atsushi MATSUGUCHI, National Defense Academy

Noboru KAGAWA, National Defense Academy

Hideo Takayama

1 はじめに

スターリングエンジンは、作動流体を外部より加熱、冷却することにより得られる圧力変動を利用して動力を得るエンジンである。スターリングエンジンは外燃機関（連続燃焼）であり、爆発による燃焼行程が伴わないため、静粛性が非常に高い。また、理論的に高い熱効率を持ち、多種類の燃料や熱源を利用できるため、化石燃料を使用しない動力源として利用することから、近年の環境問題にも大きく貢献できる。

災害時等には、航空写真等、上空から得られる情報は非常に有用である。しかし、この用途にしばしば利用されるヘリコプター等の飛行機は、その騒音が問題になることが多い。この場合、静粛性、低燃費という特性を有するスターリングエンジンを搭載した無人機を使用することは非常に有用であると考えられる。しかしながら、スターリングエンジンには熱交換器が必要である^①。その分エンジン質量が重くなってしまうため、飛行機に搭載するためには小型・軽量化する必要がある。

スターリングエンジンの中でもβ型スターリングエンジンは小型化に適していて、多くの模型スターリングエンジンに採用されている。また、実用型エンジンとしても数 kW 以下の小出力エンジンに採用されている。

2000 年、著者の 1 人である高山はβ型スターリングエンジンβ 15・2000 を搭載した模型飛行機を開発し、その試験飛行に成功した^②。本研究ではβ 15・2000 の基本性能の測定、得られた測定結果等を基に、回転数と軸出力の関係、温度と軸出力の関係を調べる。

2 実験装置

Fig. 1 に本研究に使用するスターリングエンジンβ 15・2000 の断面図を示す。Table. 1 に本エンジンの主要な諸元を示す。

Fig. 1 β 15・2000

Table. 1 Specification of β 15・2000 Engine

基本形式	β 形式 ディスプレーサタイプ
全 長	196mm (バーナーを含まず)
最大直径	φ 57mm
行程容積	15260mm ³
シリンダ直径	φ 36mm (パワーピストン、ディスプレーサ共)
ストローク	15mm
位 相 角	63℃
作動空間	大気圧

本エンジンはプロペラシャフトとシリンダの軸心を一直線に配し、1 個のシリンダで賄うことができるβ方式のエンジンである。パワーピストンからクランク、クランクからディスプレーサの駆動は、エンジンの全長を短縮するためにスコッチヨーク機構による。

3 測定方法

本報告では、エンジンに取り付けたプロペラの回転数、ヒーターヘッド部の温度、燃料流量を測定した。今回使用した燃料は市販の液化ブタンカセットボンベである。

回転数の測定には非接触形回転計を用いた。非接触形回転計から発した光を正確に受光させるために、プロペラのスピナー部に円盤を取り付け、そこに反射テープを張り付けて受光部にした。

ヒーターヘッド部の温度は、燃焼室の排気口から熱電対を挿入し、ヒーターヘッドに接触させて測定した。また、燃料消費量の測定については、プロペラの回転数を安定させ、ヒーターヘッド温度の測定を行ったのち、燃料を送るチューブをエンジン本体から取り外し、水中においてメスシリンダーに 10 秒間入れ、捕集した量を測定した。

軸出力については測定によって得られた回転数から次式の推定法⁽³⁾を用いる。

$$p = P \times D^4 \times N^3 \times 735.5 / 1.4 \times 10^{17} \cdots (1)$$

ここで、 p は出力 (W)、 P はプロペラのピッチ (in)、 D はプロペラ直径 (in)、 N はプロペラ回転数 (rpm) である。

4 結 果

Fig. 2 に回転数とヒーターヘッド温度の関係を示す。図より、ヒーターヘッド温度を上昇させるにつれて回転数が上昇し軸出力が増加していることがわかる。

Fig.2 Heater-head temperature v.s. engine speed

Fig. 3 に測定した回転数毎の軸出力と、シュミットサイクルを用いて計算し図示出力を示す。図示出力を求めるにあたって使用したシュミットサイクルの計算条件を Table. 2 に示す。図より、回転数が増加するにあたり、軸出力が増加していることが判明する。測定時における最大回転数は 2700rpm であった。この最大回転数は、高山⁽²⁾が測定した最大回転数と同等である。この実際の測定出力とシュミットサイクルによる図示出力を比較すると、測定出力と図示出力では、その傾向が同様であり、このエンジンの軸出力は理想サイクル出力の約 40%程度であることがわかる。

測定出力と図示出力の差の原因は、ヒーターヘッド部、バーナー部からの熱伝導損失、再生器損失、および、シリンダー・ディスプレイサ部、クランクケース内の摩擦等の機械損失であると推定できる。したがって、断熱方法や再生器の改良、空気予熱器の追加によって、軸出力は改善可能と考えられるが、エンジン質量増加の原因ともなる。軸出力増加と質量のバランスについては、今後の課題となろう。

Fig.3 Relation with engine speed and output and indicated powers

Table.2 Calculation condition for Schmidt cycle

ディスプレイサ容積	15.26cm ³
パワーピストン容積	15.26cm ³
再生器容積	0.034cm ³
低温部温度	45°C
位相角度	63°
作動空間圧力	0.1MPa

Fig. 4 に回転数と熱効率、軸出力の関係を示す。熱効率を求める際に用いた式を以下に示す。

$$\eta = \{W_{out} / (C \times H_d)\} \times 100$$

ここで η は熱効率 (%), C は燃料消費量 (Nm³/s), H_d は低発

熱量 (kJ/Nm³)、 W_{out} は軸出力(W)である。

本測定に使用した燃料はブタンであり、その低位発熱量として 118577kJ/Nm³を用いた。図から回転数が増えるにつれ、熱効率、軸出力が共に増加していることがわかる。

Fig.4 Thermal efficiency and output power

5 おわりに

β 15_2000 の基本性能の測定を行った結果、軸出力、熱効率等のデータが得られた。模型エンジンは一般的に出力が小さいため、精密な性能測定が非常に難しいと言われているが、今後、様々なデータを得られるようにエンジン計測システムを構築していく。

今後の研究予定を以下に示す。

- (1) エンジンの回転数を安定させ、燃料流量やトルク等、エンジンの性能データを収集できる測定環境の整備
- (2) 回転数、ヒーターヘッド温度、低温部のいずれかを一定にし、エンジン性能の測定

さらに、エンジンの性能の向上要素を探求していき、それらを β 15_2000 に採用していきたい。

参考文献

- (1) 山下・他 4 名、山海堂、スターリングエンジンの理論と設計、1999、4-12
- (2) 高山、第 5 回スターリングサイクルシンポジウム講演文集、2001、10. 26、89-90
- (3) G. Abbott、PROPELLERS、1986、132-133