SM7 高性能模型スターリングエンジンに関する実験的研究

Experimental Study of High Performance Model Stirling Engine

○ 野口 貴雄 (防衛大) 正 香川 澄 遠藤 晴巳

Takao NOGUCHI, National Defense Academy, Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka

Noboru KAGAWA, National Defense Academy

Harumi ENDO, National Defense Academy

1. はじめに

模型飛行機にスターリングエンジンを搭載し、これを飛行させることを最終目標として小型スターリングエンジンの性能を向上させることを試みた。この実現化のためにエンジンの出力向上・重量の低減及び小型化が要求される。本報告においては、小型エンジンの出力の向上、及び加熱系統の改良について述べ、航空機用模型エンジンの道を模索する。

2. SD01 スターリングエンジンの開発経緯

1989年に設計・製作された10W級小型スターリングエンジンSD01を使用し本研究を行った⁽¹⁾。このエンジンは β 型スターリングエンジンに分類され、低騒音かつ簡単な取り扱い等の特徴を得るために充填圧力を低く設定して設計されている。作動流体は空気またはヘリウムで、最高圧力0.5MPaで作動するように設計されている。現段階の出力では飛行を実現させるには不十分だが、スターリングエンジンとして安定かつ静粛に運転することが可能である。このエンジンの長さは機構部まで含めると約18cm、重量はおよそ500gである。このエンジンの発展型として、電気モーターと一体化された改良型SD01冷凍機がある⁽²⁾。またSD01エンジンを改良して、ヒートポンプ装置に使用する小さなヴィルミエ機関⁽³⁾も設計・製作されている。

Table 1にSD01の開発時に得られていた実験結果を示す。SD01エンジンはヒーター管の温度が923K、クーラー管の温度が363K、空気圧が0.1MPa、900rpmで約4Wの最高出力を発生させた。また、0.1MPaの時1500rpmの最高回転数を記録した⁽⁴⁾。測定の間、ヒーター管は天然ガスの燃焼ガスによって暖められる。一定の温度条件下ではほぼ一定のエンジン回転数と出力が得られた。

出力を増加させるために、0.5MPaに空気の圧力を増加させた。このとき、機械損失は急激に増加して、自立運転できなかった。この原因としては圧力を増したことでバッファの損失が増加したことによると考えられる。SD01エンジンはコンパクトで軽量となるように設計されているため、パワーピストン後面のピストン背面空間の容積は小さすぎて、この圧力変化を吸収できなかったものと考えられる。

したがって、高い充填圧力で十分な出力を発生させるには十分な容量のクランク室あるいはバッファタンクの設置を必要とする。

Table 1 Specifications of 1989 SD01 engine

Engine type	Displacer type
Working fluid	Air/Helium
Mean engine pressure	0.1 ~ 0.5 MPa
Expansion space temperature	~ 923 K
Compression space temperature	~ 353 K (Air cooling)
Piston speed	~ 3000 rpm
Bore x Stroke	Displacer & Power 45 x 13 mm
Piston Phase angle	60 deg
Heater	Thin tube type (OD:2.5, ID:1.5, L:70 mm) x 35
Cooler	Thin tube type (OD:2.0, ID:1.0, L:40 mm) x 55
Regenerator	Wool / Tubes OD:50, ID:46, L:13 mm Stainless steel

3. SD01 エンジンの特徴

(1)SD01エンジンはシングルアクティングディスプレイサータイプのエンジンである。Fig. 1に断面図を示す。Fig. 1及びFig. 2に示すとおり、ディスプレイサ、パワーピストン及び円筒形カム装置が単一シリンダー内に一直線上に配置されている。ストローク長はカム装置内のカムガイドのストロークによって決まる。

(2)SD01エンジンの熱交換システム

ヒーターは外部に螺旋状のひれがついた35本の小さな管によって構成され、クーラーは55本の小さな管でヒーターと同様に構成されている。再生器はステンレスウール(SUS316)で作られ、シリンダーも含めヒーター管・冷却管等はSUS316で製作されている。

Fig.1 SD01 engine

Fig. 2 Cylindrical cam mechanism of SD01 engine

4. 実験及び改良点

(1) 実験装置

Fig. 3 に示すように当初出力軸を垂直に設置して燃焼させた(Fig. 3(a)). しかし、その後出力軸を水平にして設置し(Fig. 3(b)), 最終的には出力軸を下方に傾けて実験を実施した(Fig. 3(c)). これらの実験の際はプロペラではなく、フライホイールを SD01 に装着して実験をおこなった。

Fig. 3 実験装置の概要

(2) 改良した点

耐久性を考慮しながら機械損失の少ないカム機構に改良するためには、回転によりカムガイドにかかるベクトル及び負荷圧力によって決定されるベアリング付きローラーの圧力角度を減らすことが重要である。カムガイドの摩擦損失は圧力角度が増えるに連れて増加する。アームの往復運動とカムの回転運動との変換による摩擦がカム装置における機械的損失の主な原因であったので、両者が接する箇所の形状を変更し機械的損失を減少させることを試みた。また、カムが回転しその影響で、アームと外壁との間にも摩擦が発生していたので、この箇所も形状を

変更した。具体的には、摩擦が発生する箇所を従来の角張った形状から丸みをおびた形状に変更した。この改良によりカム装置のカムカーブ面とローラー面との間のクリアランスを最適に保つように調整できるようになり、機械損失を減少させることができた。

次に燃焼に関して、模型飛行機に搭載させるために当初は水平に SD01 を設置して燃焼させていた。フライホイールを装着して実験を行ったのでプロペラの送風による冷却効果が期待できなく、加熱部をやや上にして燃焼させた。この方法を採用すると、水平に設置した時よりも高・低温部間における温度の分離が顕著となる。以降、設置方法を水平から斜めに改めて温度差が大きくなるようにして実験した。

5. 模型飛行機に搭載するにあたっての問題点

SD01 エンジン当初地上設置での使用を前提に設計しており、エンジンとして完成されたシステムを模型飛行機に搭載するには寸法・重量の面であまり適していない。また、更に高出力を得るためには高・低温部を効果的に分離する必要がある。重量増加を防ぐために新たな冷却装置を加えることは難しい。効果的に高・低温度を分離するには SD01 に多少の角度をつける方法が有効であることが本研究で判明した。だが、この方法を採用すると軸出力を取り出す際に機械的な問題が新たに発生してしまうことになる。プロペラを SD01 に直接取り付け、運転する場合は、プロペラからの空気の流れにより冷却効果が期待できる。その反面、プロペラの慣性モーメントが少ないので、円滑な回転が得られるのか考慮する必要がある。

6. 終わりに

地上設置を前提とした SD01 エンジンの改良を通して得られた技術・ノウハウを活かし、今後模型飛行機搭載を前提としたスターリングエンジンを設計・試作する。その際、特に重要となるのは小型・高出力のエンジンを設計することである。また、スターリングエンジンのもつ高効率を実現するためには、加熱の仕方に工夫を凝らし熱伝導損失を減らす必要がある。

参考文献

- 1) N. Kagawa, K. Araoka, T. Otaka, Design and Development of a Miniature Stirling Machine, 26th IECEC, ANS, 192-197(1991).
- 2) N. Kagawa, K. Araoka, T. Otaka, Enhanced Design for a Miniature Stirling Machine, SAE Paper No. 929391 (1992).