

# 小型化・低コスト化を目指した実験用スターリングエンジンの開発

## Development of a Compact and Low Cost Stirling engine for Experiments

正 平田 宏一（海技研）

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

In order to develop a compact and low cost Stirling engine, an experimental Stirling engine which has simple 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. This paper describes the outline of the prototype engine and the performance test. Based on the performance, which has not reached the target performance at all, we discuss the difficulties to develop compact, low cost and high performance Stirling engines.

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は高熱効率性、燃料の多様性及び低公害性等の優れた特徴を有する外燃機関であるが、未だ民生レベルでの実用域に達していないのが実状である。スターリングエンジンの実用化を阻む問題点として、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 50 W の実験用スターリングエンジンの開発を進めている<sup>(1)-(3)</sup>。本報では、実験用エンジンの開発状況並びに実験結果について述べ、スターリングエンジンの小型化・低コスト化について考察する。

### 2. スターリングエンジンの小型化と低コスト化

スターリングエンジンを小型化する方法として、作動空間を有効に利用できる構造とすること、エンジンの定格回転数を高めることなどがあげられる。一方、小型化により高温部と低温部との距離が短くなると、シリンダ壁を伝わる熱伝導による損失が大きくなるため、高い効率は望めなくなる。また、エンジン回転数を高めるためには、作動ガスの往復流に起因する熱交換器内の圧力損失を低減する必要がある。そのためには、熱交換器内流路の簡略化や再生器挿入量の低減等を施す必要があり、熱交換器全体の伝熱性能が低下し、熱効率の低下につながる。

一方、スターリングエンジンを低コスト化する方法として、簡単な構造を有する熱交換器や低い加工精度であっても適切に作動するピストン駆動機構を採用すること等があげられる。さらに、作動ガス圧力を低くして耐圧容器に必要とされる強度を低くすること、シール装置や潤滑装置を簡略化すること等の方法も考えられる。

以上より、スターリングエンジンの小型化・低コスト化を図ることは、必然的に熱効率の低下をもたらすものと考えられる。以下に述べる実験用エンジンは、高い熱効率を求めず、上述のような小型化・低コスト化と出力性能の兼ね合いを検討するために開発しているエンジンである。

### 3. 実験用スターリングエンジンの開発

現在までに開発されてきた高性能スターリングエンジンの多くは、数 kW ~ 数十 kW 程度の出力である。本報で述べる実験用エンジンは、約 10 cm<sup>3</sup> という極めて小さいパワーピストン行程容積を持ち、目標出力を 50 W としている。図 1 に実験用エンジンの構造、表 1 にエンジン仕様並びに目標性能を示す。本エンジンは、作動空間を有効に利用するため、再生器をディスプレイサに内蔵し、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。ディスプレイサの上部及び下部にそれぞれ簡易的なヒータ及びクーラを配置した。これにより、シリンダ周りを小型化できるが、同時に小型でありながらも十分な伝熱性能を有する熱交換器の開発が必要となる。また、ピストン駆動機構には、バランス性に優れ、高い回転数での運転に適していると考えられたロンピック機構を採用した。さらに、発電機及びフライホイールをクランクケースに連結した圧力容器に内蔵した。これにより、作動ガス圧力と大気圧とのシールを省略でき、機械損失の大幅な低減が可能になる。

小型スターリングエンジンに適した熱交換器形式を検討するため、実験用エンジンではいくつかの異なる構造・寸

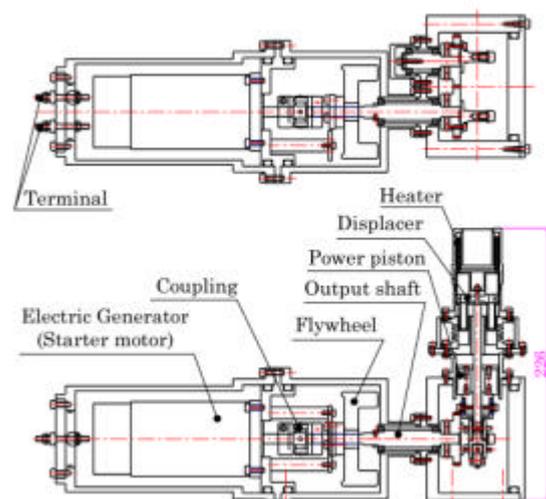


Fig. 1. Schematic view of the experimental engine

Table 1. Specifications and target performance

Bore x Stroke	36x10 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

法の熱交換器を試作した。図 1 に示した熱交換器はその一つであり、ヒータ内管、クーラ内管及び外管を組立式とすることによって、構造の簡単化を試みている。

図 2(a)に示すロンピック機構は、理想的に組み立てられた場合、両ピストンが厳正直線運動を行う。しかし、構成部品の加工精度が十分でない場合、適切な直線運動を実現できない。そこで、図 2(b)に示すジョイントを持つパワーピストンを試作した。

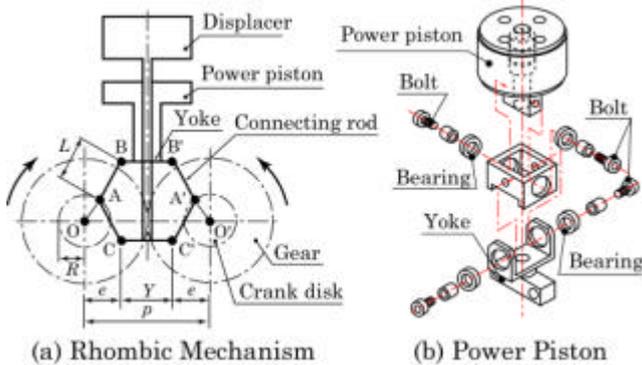


Fig. 2. Piston Drive Mechanism

#### 4. エンジン性能及び考察

様々な改良を進めた後、設計時のほぼ上限の実験条件において実験用エンジンの性能試験を行った。図 3 は、作動ガスにヘリウムを使用し、平均圧力  $P_m$  を 0.95 MPa、ヒータ壁温度  $T_w$  を 650 とした場合、エンジン回転数に対する出力及び機械損失の実験結果を示している。これより、最高軸出力は、エンジン回転数が約 1100 rpm で 8 W 程度であり、これは目標軸出力の 50 W に全く至らない結果である。主な原因は、エンジン回転数が設計時の回転数の 4000 rpm に比べてかなり低いことである。実験における作動空間の圧力測定により、熱交換器での大きな圧力損失は確認されなかった。したがって、エンジン回転数を高めるためには機械損失の低減が不可欠であると言える。本実験用エンジンにおいて、機械損失増大の主原因は、図 2 に示したピストン駆動機構が高圧条件下で適切に機能しなかったことがあげられる。加工精度を含めたロンピック機構の特性を解析的に調べることは難しく、今後のさらなる実験的検討が必要であると考えている。

図 4 は同実験におけるエンジン回転数と各効率との関係

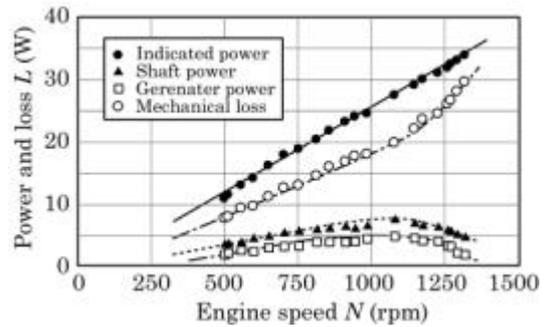


Fig. 3. Engine Performance

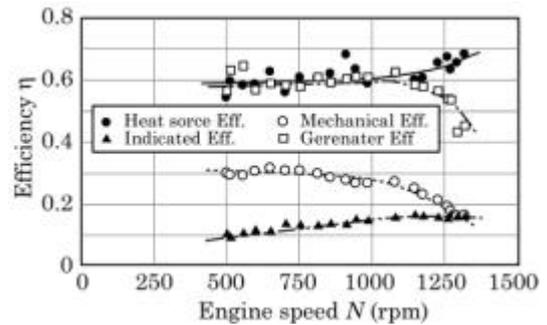


Fig. 4. Efficiency

を示している。これより、熱源効率 (= 有効熱入力 / 全入熱量) 及び発電機効率 (= 発電出力 / 軸出力) が約 60% であるのに対し、図示効率 (= 図示出力 / 有効熱入力) 及び機械効率 (= 軸出力 / 図示出力) は 10 ~ 30% とかなり低いことがわかる。図示効率を向上させるためには、シリンダ壁の熱伝導の低下が必要不可欠である。また、熱交換器の伝熱量が不足し、作動空間に適切な温度差を維持できなかったことも図示効率が低下した要因であると考えられる。

#### 5. あとがき

以上、スターリングエンジンの小型化及び低コスト化について検討し、小型化・低コスト化を目指した実験用エンジンについて述べた。現状では、簡略化した熱交換器やピストン駆動機構の性能が十分ではなく、目標性能に至っていない。スターリングエンジンの小型化・低コスト化を目指し場合、従来の高性能エンジンと同様の要素技術を利用することは、極めて難しいことを実感した。小型・低コストでしかも高性能なスターリングエンジンの実現のためには、新たな要素技術が必要であると考えている。

#### 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 2 名, 50 W 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), 日本機械学会第 4 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, (2000), p.23-26.
- (3) 平田宏一, 50 W 級小型スターリングエンジンの性能特性 (その 3, ロンピック機構に関する考察と性能試験), 日本機械学会第 5 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, (2001), p.19-22.