

実験用多段式スターリングエンジンの基本性能

Basic Performance of a Multi-cylinder Stirling Engine for Experiment

正 平田 宏一（海技研） 正 川田 正國

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

We have researched a multi-cylinder Stirling engine for a waste heat recovery system. The multi-cylinder Stirling engine has a possibility to achieve higher efficiency than a single-cylinder engine. In this report, we present the basic performance of a prototype of the multi-cylinder engine. The prototype engine consists of three engine units that have different piston stroke for each unit to getting the optimal thermal condition. Also it has unique components, such as a heater made from a block of aluminum alloy and an assembling cooler. As the result of the previous operating test, it is confirmed that the shaft power of the prototype engine is bigger than the sum of shaft power of each engine units.

Key words: Stirling Engine, Fish Robot, Underwater Vehicle, Thermal Actuator

1. まえがき

排熱やバイオマスなどのエネルギーを有効に利用することは、昨今の環境問題及びエネルギー問題の解決手段として期待されている。スターリングエンジンは様々な熱源を利用できるという特徴を持つことから、それらの有効活用方法として適していると考えられる。しかし、一般に工場等からの排熱は化石燃料の燃焼と比べて温度が低い。そのような観点から、前報¹⁾では、行程容積を適切に調整したスターリングエンジンを多段に配置することで排熱のエネルギーを有効に利用するエンジン形式を提案した。本報では、試作した実験用多段式スターリングエンジンについて概説し、初期の運転試験結果について報告する。

2. 多段式スターリングエンジンの概要

図1は著者らが提案している多段式スターリングエンジンの概念図である。同図において、3台のエンジンが直列に配置され、排熱はNo.1からNo.2, No.3の方向に順番に流れる。各エンジンで熱エネルギーを回収するため、排熱の温度は徐々に低下する。このようなエンジン形式にする

ことで、エンジン全体として多くの温度落差を利用できるため、1段で構成されたスターリングエンジンより、排熱エネルギーを有効に利用できる。多段式スターリングエンジンにおいては、それぞれのエンジンの動作温度並びに出力レベルが異なるため、ディスプレイサ及びパワーピストンの行程容積を適切に設定する必要がある¹⁾。

3. 実験用多段式スターリングエンジン

3.1 基本構造 図2及び図3に試作した実験用多段式スターリングエンジンの構造並びに外観、表1に主な仕様及び目標性能を示す。各ピストンの行程容積が異なる3台のエンジンはクランクケースの上に設置されており、それぞれのクランクシャフトはカップリングにより連結されている。それぞれのエンジンは、製作と実験を容易にするため、作動ガスを空気、平均圧力を大気圧とした形エンジンである。3台のエンジンは、それぞれ適切な出力性能を得るために、ディスプレイサ及びパワーピストンのストロークが異なっているが、シリンダや熱交換器等の主要部品は全て同一形状の部品を使用している。目標出力は、表1に示

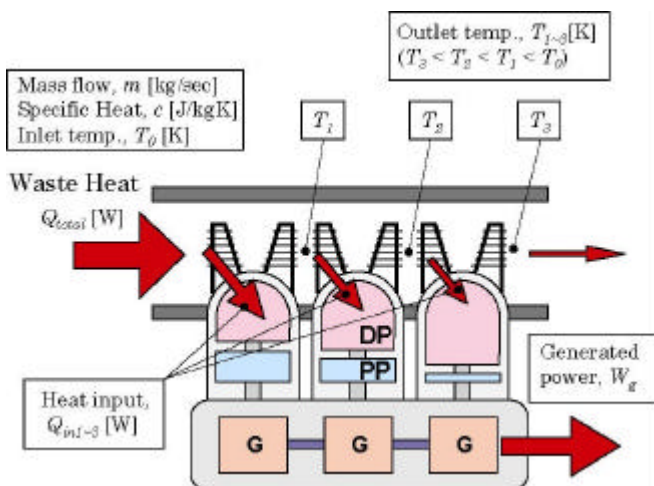


Figure 1, Concept of Multi-cylinder Stirling Engine

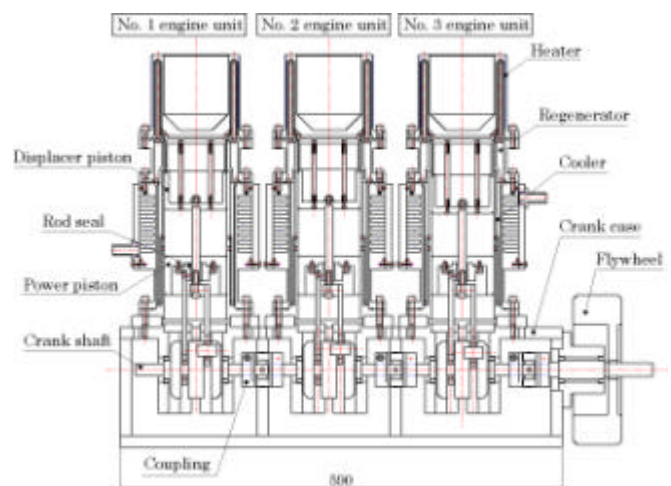


Figure 2, Schematic View of the Prototype Stirling Engine



Figure 3, Photograph of Prototype Stirling Engine

Table 1, Specifications of Prototype Engine

Engine Unit No.	No. 1	No. 2	No. 3
Engine Type	Beta-type		
Working Gas	Air		
Mean Pressure	Atmospheric Pressure (101.3 kPa)		
Piston Phase Angle	90 deg		
Expansion Space Gas Temp. (Design)	270 degC	190 degC	110 degC
Compression Space Gas Temp. (Design)	60 degC	50 degC	40 degC
Displacer Piston Piston Dia. x Stroke	84 x 52 mm	84 x 54 mm	84 x 46 mm
Power Piston Piston Dia. x Stroke	84 x 48 mm	84 x 44 mm	84 x 46 mm
Target Engine Speed	1100 rpm		
Target Power	43 W	33 W	20 W
Total Target Power	96 W		

す通り，96 W / 1100 rpm である。

3.2 エンジンの構成要素 試作エンジンには特殊な熱交換器やピストン駆動機構等を採用している。図 4 に熱交換器部の構造を示す。ヒータは，アルミニウム合金製のヒータヘッドに 20 本の銅パイプを挿入したバヨネット式熱交換器である（図 5）。再生器マトリクスには，ロール状の黄銅製金網を使用している。また，再生器ハウジングには熱伝導性の低い材料を使用する必要があるが，本エンジンでは機械加工の制限により，アルミニウム合金を用いている。これは熱伝導損失増大の要因となっているのは明らかである。クーラは，シリンダ外周部に設置され，3 重のアルミニウム合金製部品で構成されている。図 6 に示すように，クーラ内管には縦方向に伝熱促進のためのフィンが取り付けられている。

ピストン駆動機構には，スコッチ・ヨーク機構を採用している。ヨーク板の側部に PTFE 製の板材を取り付け，横方向のガイドにしている。

ディスプレイサとパワーピストンはステンレス鋼製であり，アルミニウム合金製のシリンダとの直径隙間は 0.03 ~

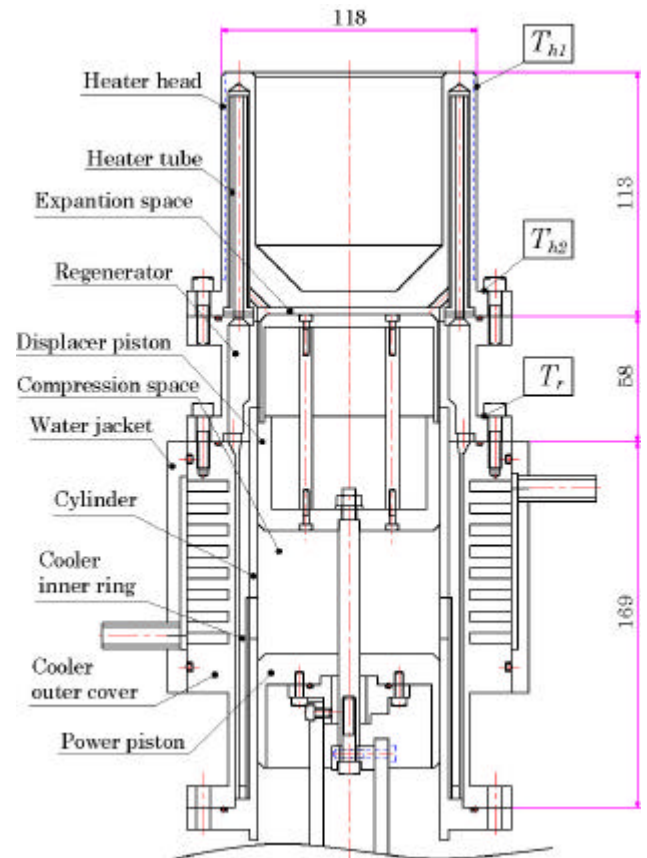


Figure 4, Configuration Layout of Heat Exchanger

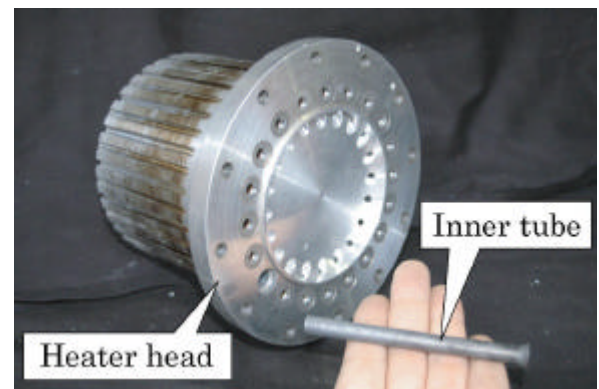


Figure 5, Photograph of Heater

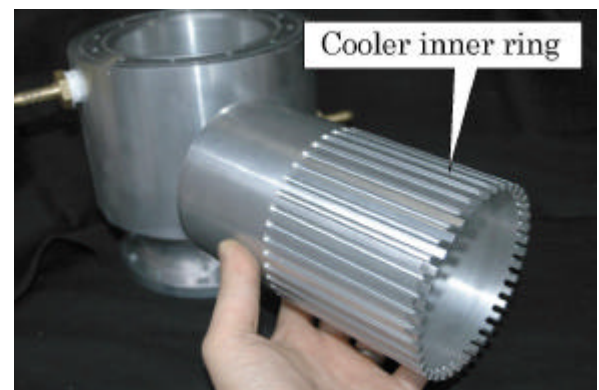


Figure 6, Photograph of Cooler Inner Ring

0.05 mm に調整している。ピストンリングはなく，金属同士の摺り合わせ構造としている（図 7）。運転時には，摺動

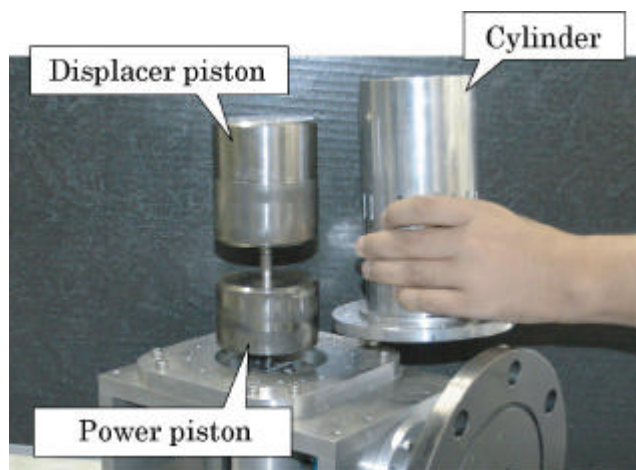


Figure 7, Photograph of Piston and Cylinder

面にモリブデングリースを薄く塗布している。

4. 試験方法並びに試験結果

4.1 試験方法 多段式スターリングエンジンの基本性能を調べるため、4 台のエンジンを試作した。そのうち 3 台は表 1 に示した No.1 ~ No.3 のピストンストロークで製作した。さらに、もう 1 台の予備エンジンは No.3 と同じ寸法で製作した。

初期の運転試験においては作動ガス温度の測定は行わず、ヒータ付近の壁温だけを測定した。それぞれのエンジンにおける測定位置は、図 4 に示す T_{h1} 、 T_{h2} 及び T_r の 3 箇所である。エンジンの加熱源には 1 kW のシース電熱線を使用した。電熱線をヒータヘッドの外側に巻き付け、その周囲を断熱材で覆っている。軸トルクは出力軸に取り付けたプーリに摩擦ブレーキを与え、その力をばね秤によって測定し、非接触式回転計により測定されるエンジン回転数を乗じて軸出力を求めた。

4.2 エンジン単体の運転結果 図 8 にそれぞれのエンジンを単体で運転した場合のエンジン回転数に対する軸出力の

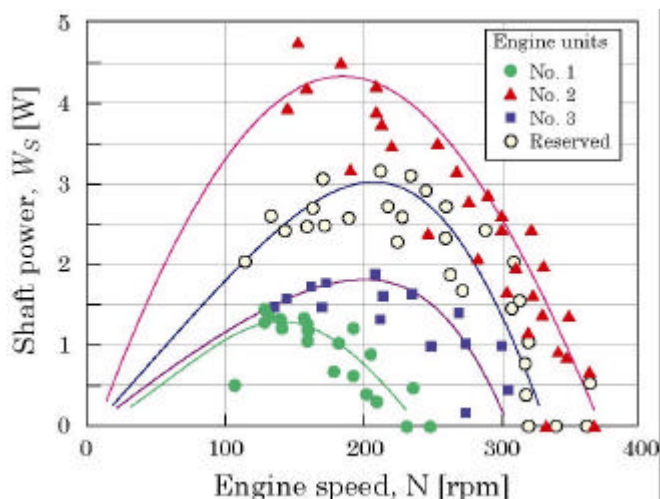


Figure 8, Test Results of Each Engine Units

測定結果を示す。これより、No.1 エンジンの最高軸出力はエンジン回転数 130 rpm において 1.5 W であった。そのときの温度は $T_{h1}=330$, $T_{h2}=250$, $T_r=55$ であった。また、No.2 エンジンの最高軸出力はエンジン回転数 160 rpm において 4.7 W であった。そのときの温度は $T_{h1}=340$, $T_{h2}=280$, $T_r=50$ であった。これらのエンジンでは、電気ヒータによって十分な加熱ができず、またピストン駆動機構の機械損失が大きかったため、安定した運転が得られなかった。そのため、これらの結果は非定常な状態の測定結果である。

No.3 エンジンの最高軸出力はエンジン回転数 210 rpm において 1.8 W であった。そのときの温度は $T_{h1}=390$, $T_{h2}=250$, $T_r=80$ であった。No.3 と同一寸法の予備エンジンの最高軸出力はエンジン回転数 210 rpm において 3.2 W であった。そのときの温度は $T_{h1}=390$, $T_{h2}=270$, $T_r=60$ であった。

それぞれのエンジン単体の性能は、目標性能に全く至っていない。これは、ピストン・シリンダ部並びにスコッチ・ヨーク機構での機械損失が大きかったためであると考えられる。性能向上のためには、機械損失を低減し、エンジン回転数を高めることが必要である。

4.3 多段式エンジンの運転結果 以上の試験結果から、比較的安定した運転が可能である No.2、No.3 及び予備エンジンの 3 台を使って多段式スターリングエンジンを組み立てた。図 9 にエンジン回転数に対する軸出力の測定結果を示す。同図には、No.3 及び予備エンジンの 2 台を組み立てた際の測定結果も併記している。これより、3 台のエンジンを組み立てた場合、最高軸出力は 210 rpm において 13.5 W であった。これは、エンジン単体で運転した際の軸出力の合計より、40%程度も大きい値である。同様に、2 台のエンジンを組み立てた場合も、それぞれのエンジン単体を運転した際の軸出力の合計より、50%以上も大きくなっている。これは、多段式スターリングエンジンにおいては、

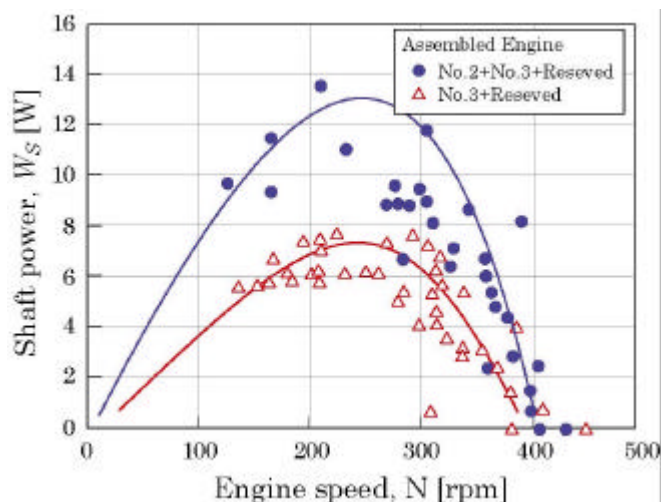


Figure 9, Test Results of Prototype Engine

エンジン全体のトルク変動が小さくなるため、結果として機械損失が低減したためであると考えられる。

以上の運転試験においては、加熱源に電熱線を用いているため、第2章で述べたようなエンジンの多段化がエネルギーの有効利用に効果があることを実証するには至らなかった。今後、各エンジンの改良・調整を行い、安定した出力特性が得られるようにして、実証試験を進めていきたいと考えている。

5. 多段式スターリングエンジンの技術課題

以上、大気圧空気で作動する多段式スターリングエンジンを試作し、電熱線を加熱源とした簡易的な運転試験を行った。現在までに確認されている多段式スターリングエンジンの技術課題を以下にまとめる。

排熱を加熱源とした運転実験並びに測定を行っていないため、エンジンを多段化することによるエネルギー有効利用の効果が実証されていない。

多段式スターリングエンジンは各段の温度レベルを適切な設定する必要があるが、上記の運転試験においては熱交換器の構造上、作動ガス温度を測定していない。また、熱交換器の伝熱性能が正確に評価されていないため、作動ガス温度を見積もることができない。

エンジン設計時に機械損失を評価することが難しく、エンジン回転数の予測が難しい。特に、多段化した場合のトルク変動並びに回転数の予測はエンジンの最適設計に極めて重要であり、今後の検討課題である。

試作エンジンは、機構部での機械損失が大きい。ヨーク側部に取り付けた PTFE 製ガイドが適切に働いていないと考えられるため、往復運動部の改良が必要である。また、金属製摺り合わせピストン・シリンダの摩擦特性が安定していない。

アルミニウム合金製の再生器ハウジングにおける熱伝導損失が大きく、膨張空間と圧縮空間に適切な温度差が

与えられていない。

エンジン性能を詳細に評価するためには、作動ガス温度並びに作動ガス圧力の測定が必要不可欠である。

6. あとがき

本報では、実験用多段式スターリングエンジンについて概説し、エンジン単体並びに多段化した際の運転試験結果について報告した。その結果、目標性能には全く至らなかったものの、エンジンを多段化することにより、性能向上の可能性あることを確認できた。

多段式スターリングエンジンの設計の難しさは、各エンジンの最適条件を見出すことである。最適条件を予測するためには、高精度な性能予測シミュレーションが必要不可欠であるが、現状では、熱交換器の伝熱性能を含めた各作動ガス温度を適切に見積もることはできていない。また、機械損失の予測が難しく、エンジン回転数の予測ができていない。これらの性能解析とともに実験的研究を進めていく必要があると考えている。

最後に、本研究において実験用多段式スターリングエンジンの設計・製作並びにデータ収集に携わった、当時法政大学大学院から研修生として来所していた高田康夫氏並びにその指導教員である御法川学先生に感謝の意を表します。また、本研究の一部は、平成17年度から開始された（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究「港湾内の環境保全を目指した内航船舶用排熱回収システムの開発」に引き継がれて、新たな実証用排熱利用スターリングエンジンの開発を進めていることを述べておく。

文 献

- (1) 高田康夫，御法川学，平田宏一，川田正國，多種熱源を利用可能なスターリングエンジンに関する研究，日本機械学会第8回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集，p. 912（2004年10月）。