

2 シリンダ・ダブルアクティング形スターリングエンジンの開発

Development of 2-cylinder Double-Acting Stirling Engine

○ 正 平田 宏一（海技研）

Koichi HIRATA, National Maritime Research Institute, Tokyo

A previous double-acting Stirling engine consists of four cylinders. It has compact engine size and high performance, because overall space in the engine is used effectively. However the engine needs complex and many mechanical parts in a piston drive mechanism, such as a swash plate mechanism. Then we are interested in the configurations of a unique double-acting Stirling engine that consists of two cylinders. In this paper, we discuss about characteristics of the unique engine and show outline of the engine performance with a prototype Stirling engine.

Key words: Stirling Engine, Ceramics, Silicon Carbide and Heat Exchanger

1. まえがき

スターリングエンジンは、作動空間の構成から α 形、 β 形、 γ 形及びダブルアクティング形（以下、DA形と称す）に分類される¹⁾。その中でもDA形はピストン両端の空間を有効に利用できるため、エンジンの小型化・高出力化に適した形式であると言える。従来から開発されてきたDA形スターリングエンジンは、4本のシリンダから構成されるのが一般的であり、エンジン全体の部品数が増加することやピストン駆動機構が複雑になるなどの問題がある。そのような観点から、著者らは、2本のピストン・シリンダから構成される特殊なDA形スターリングエンジンを検討し、実験用エンジンを開発している。本報では、2シリンダ・ダブルアクティング形スターリングエンジンの特徴について述べ、実験用エンジンの性能試験結果の概略について報告する。

2. 新形式ダブルアクティング形エンジンの検討

2.1 スターリングエンジンの形式 スターリングエンジンを作動空間の構成により分類すると、 α 形、 β 形、 γ 形及びDA形に分けられる（図1）。2本のパワーピストンを持つ α 形は、構造上、圧縮比を上げやすく、比較的高出力化がしやすい形式である。ディスプレイサとパワーピストンの両方を持つ β 形及び γ 形は、熱交換器配置の自由度が高いことや、ディスプレイサとパワーピストンの行程容積を任意に変えることで伝熱性能と出力性能のバランスを取りやすいことなどの特徴がある。

一方、4本のシリンダから構成されるDA形は、パワー

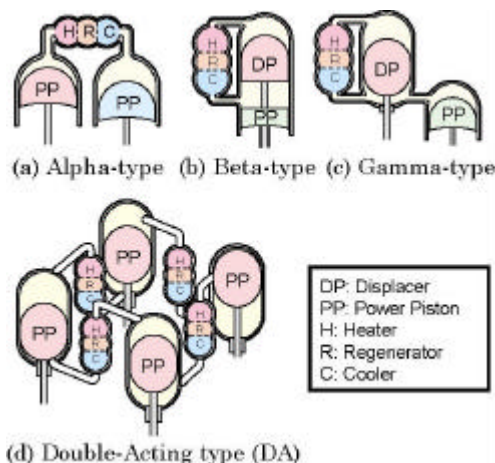


Figure 1, Classification of Stirling Engines

ピストンの両端の空間を作動空間として利用できるため、エンジンの小型化や軽量化において有利である。しかし、隣り合うピストンの上下の空間を利用して一対のエンジンを構成するため、熱交換器配置が難しくなり、しかも、エンジン全体の部品数増加やピストン駆動機構の複雑化などの問題が生じる。

2.2 新形式DA形エンジンの基本構造 以上の検討に基づき、2本のピストン・シリンダから構成されるダブルアクティング形エンジンを検討する。図2はその基本構造を示している。本エンジンは高温ピストンと低温ピストンを有している。各ピストンの上側空間の間に熱交換器を配置し、一対のエンジンを構成し、下側空間の間に熱交換器を配置して、もう一対のエンジンを構成している。このような構成とすることで、従来のDA形エンジンに用いられている斜板機構などの複雑な機構を用いることなく、比較的簡単なピストン駆動機構を利用できる。しかも、従来のDA形と同様、作動空間を有効に利用できる。しかし、一方のシリンダが高温空間を構成するため、耐熱性の高いピストンシールやロッドシールを必要とするなどの問題が生じる。

2.3 新形式DA形エンジンの多段化 排熱等の温度や熱量に制限のある熱源を使用する際、エネルギー回収率を高めるためにスターリングエンジンを多段構成とすることが有効である²⁾。図2に示した2シリンダ・DA形エンジンは、2つのエンジンの空間を利用して多段構成とすることができるのが特徴の一つである。以下、本形式と2段構成とした β 形エンジンとを比較する。

(1) 作動空間周辺の構造

図3は、2段構成の β 形及びDA形を比較したものであ

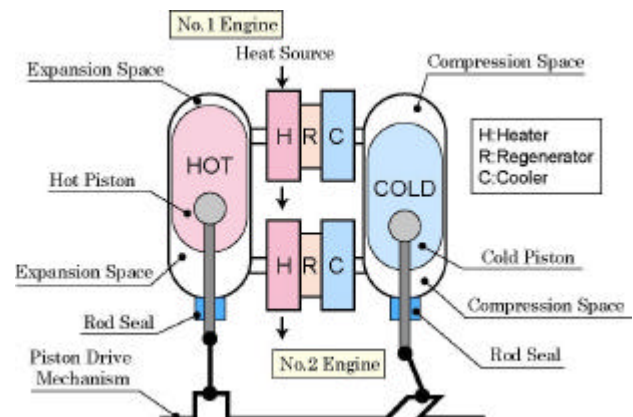


Figure 2, Two-cylinder Double-Acting Stirling Engine

る。β形は1段エンジンと2段エンジンとが左右に分かれているのに対し、DA形では上下に分かれている点が大きく異なっている。エンジンの出力性能に大きく影響を及ぼすパワーピストンのシールやロッドシールの作動温度を考えた場合、β形は高温部での高性能シールを必要としないのに対し、DA形は高温・高性能なピストンシール及びロッドシールを必要とするため、技術的な課題が大きいと言える。また、β形は4つのピストン、DA形は2つのピストンで構成される。したがって、DA形の方が簡単な構造となり、部品点数の面で有利になる。

(2) ピストン駆動機構

図3のイメージ図には、ピストン駆動機構としてスコッチ・ヨーク機構を取り付けている。β形は、各段のエンジンにそれぞれ2つのピストンを持ち、それらに約90°の位相差を設ける必要がある。クランク部にスコッチ・ヨーク機構を用いた場合、パワーピストンとディスプレイサロッドとの位置関係より、1つのパワーピストンに2つのヨークが必要となり、エンジン全体では6つのヨークが必要となる。一方、DA形は、エンジン全体で2つのピストンから構成されるため、ヨークはエンジン全体で2つとなり、クランク周辺部の大幅な構造の簡略化が可能となる。しかし、各ピストンに作用する荷重は、後述する通り、β形と比べて大きくなるため、クランク軸やヨークに用いる軸受は強固なものを必要とする。

(3) ピストン荷重及びトルク変動

図4は、2段構成のβ形及びDA形におけるピストン荷重の計算結果を示している。計算には等温モデルシミュレーション³⁾を用い、次章に述べる実験用スターリングエンジンの大まかな寸法・形状並びに設計時の定格運転条件を計算条件とし、両エンジンともほぼ同一の出力性能になるようにしている。同図より、DA形の最大ピストン荷重はβ形の約1.6倍もの大きさとなっていることがわかる。これは、β形ではピストン荷重が4つのピストンで分担されるのに対し、DA形では2つのピストンで負担するためである。このようなピストン荷重の相違は、クランク部の設計を進める際、十分に留意される必要がある。

図5は、同計算条件におけるトルク変動を示している。

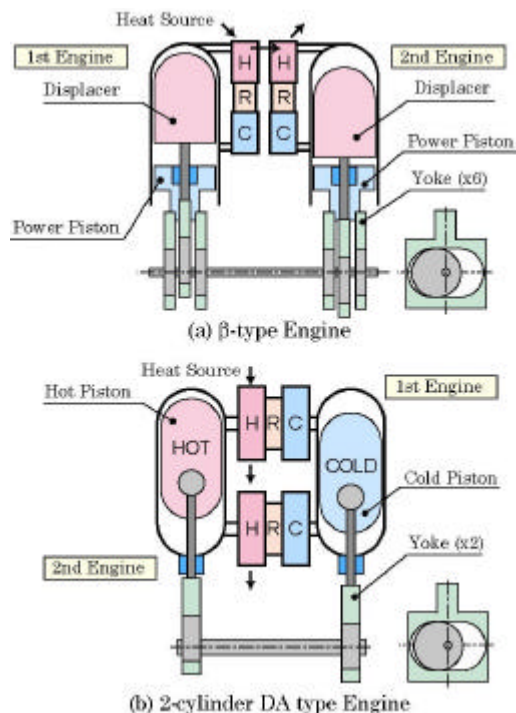
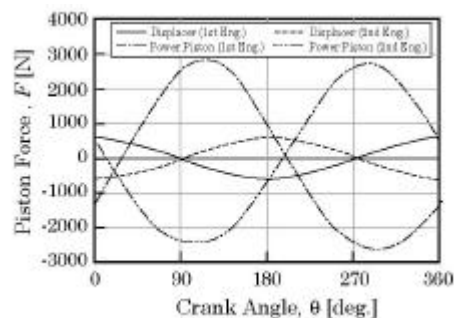
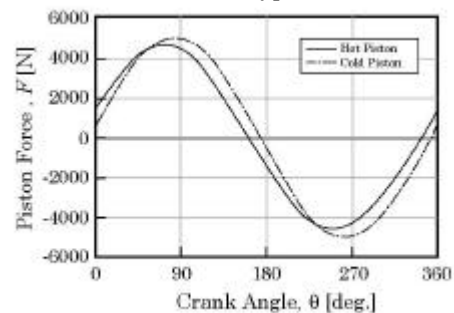


Figure 3, Comparison of β-type and DA-type Engine

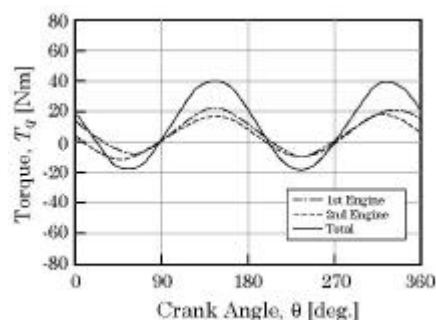


(a) Beta-type

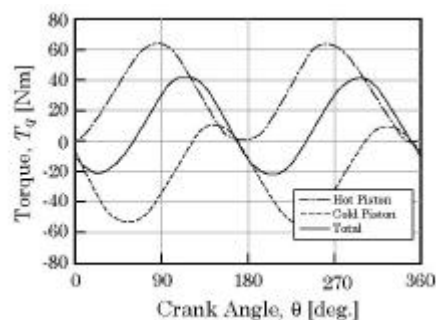


(b) 2-cylinder DA type

Figure 4, Calculated Results of Piston Force



(a) Beta-type



(b) 2-cylinder DA type

Figure 5, Calculated Results of Engine Torque

エンジン全体のトルクにほとんど相違が見られないものの、各ピストンあるいは各段のエンジンのトルク波形は大きく異なることがわかる。β形では比較的均等なトルクが各段のエンジンに作用するのに対し、DA形では高温側ピストンが正のトルクを発生し、低温側ピストンが負のトルクを発生する。このようなトルク変動の特性は、ピストン荷重と同様、クランク部の設計を進める際に留意されなければならない。

3.実験用スターリングエンジン

以上に述べたように、多段構成とした 2 シリンダ・DA 形エンジンは、シリンダ周辺やピストン駆動機構の部品点数を少なくできるという特徴がある。一方、ピストン荷重やトルク変動の増大、あるいは高温シール等に課題がある。これらの特徴や技術課題を明らかにするため、独創的な要素技術を用いた実験用スターリングエンジンを開発している。以下、本実験用エンジンの概要並びに主要な要素技術について述べる。

3.1 基本構造 図 6 及び図 7 に実験用スターリングエンジンの構造と外観、表 1 に主なエンジン仕様を示す。シリンダ構成は、図 2 に示した基本構成と同じであり、高温シリンダと低温シリンダの 2 本で構成され、ピストン上部の空間が 1 段エンジン、ピストン下部の空間が 2 段エンジンを構成している。ピストンの下方には、サイドスラストを低減するための特殊なクランク機構があり、両クランク機構の間にはハーメティック式発電機が取り付けられている。ヒータ、再生器及びクーラは、1 段エンジン、2 段エンジンともに同一形状・寸法のものを使用している。ヒータはステンレス鋼製の伝熱管を用いたシェル・アンド・チューブ式熱交換器、再生器には#150 の積層金網、クーラにはアルミニウム合金製の伝熱管を用いたシェル・アンド・チューブ式熱交換器が用いられている。

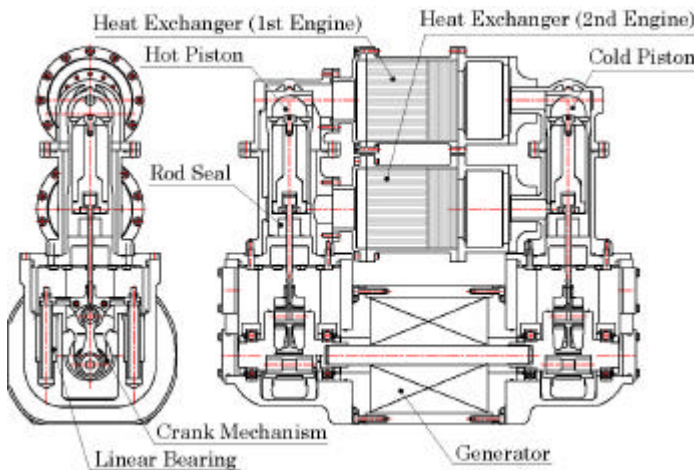


Figure 6, Structure of Prototype Engine



Figure 7, Photograph of Prototype Engine

Table 1, Specifications of Prototype Engine

Engine Type	Two-Cylinder DA type
Hot Piston: Bore x Stroke	55 mm x 30 mm
Cold Piston: Bore x Stroke	55 mm x 30 mm
Mean Pressure	10 MPa (max.)
Working Gas	Nitrogen / Helium
Rated Engine Speed	2000 rpm (design)

3.2 ピストンシール及びロッドシール 上述の通り、2 シリンダ・DA 形エンジンの高温シリンダには、耐熱性の高いピストンシールやロッドシールを必要とする。本実験用エンジンには、2 種類のピストンシールを準備している。一つはカーボン製の分割式ピストンリング、もう一つは RB セラミックスと呼ばれる材料を用いた摺り合わせ式のピストンシールである(図 8)。RB セラミックスは、米ぬかを原料とした硬質多孔性炭素材料であり⁴⁾、高温条件・無潤滑での使用が可能である。しかも摩擦係数が低く、耐摩耗性に優れるという特徴がある。しかし、材料の吸水による膨張率が大きく、寸法精度を確保しにくいなどの問題があり、再現性の高い測定データを得ることができなかった。そのため、以下の運転試験においては、カーボン製ピストンリングを用いている。

また、ロッドシールにおいても、カーボン製の分割式ロッドシールと RB セラミックス製の摺り合わせ式ロッドシールを準備しているが、同様の理由により、以下の運転試験においては、カーボン製ロッドシールを用いている。

3.3 ピストン駆動機構 本実験用エンジンでは、図 9 に示す特殊なクランク機構を用いている。クランク側部に 2 本のロッドを配置し、それぞれに 1 個ずつの直動軸受が配置されている。この機構により、ピストン並びにロッド部でのサイドスラストを低減し、しかも小型なピストン駆動機構を構成している。

3.4 断熱シリンダ構造 本実験用エンジンのもう一つの特徴として、高温シリンダ、ヒータ及び再生器周辺部の断熱構造があげられる。図 10 に示すように、高温シリンダ内は、窒化珪素製の摺動シリンダの外側に断熱材が配置され、さらにその外側に耐圧のための鋳鉄製ケースが取り付けられている。これは、高温シリンダ内の空間や部品の温度が上昇しても、耐圧を受け持つ鋳鉄製ケースの温度を上昇させないための構造である。



Figure 8 , Photograph of RB Ceramics Piston

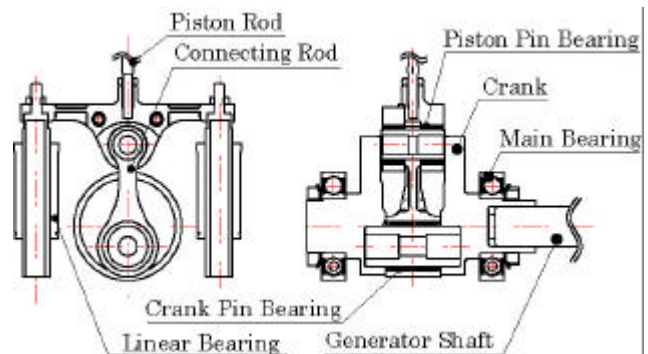


Figure 9, Crank Mechanism of Prototype Engine

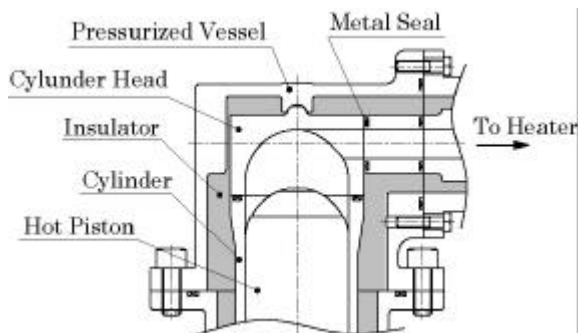


Figure 10, Imaging Figure of Insulated Hot Cylinder

4. 実験用スターリングエンジンの性能特性

以上の実験用スターリングエンジンを試作した後、400～600 程度の高温熱源を用いた運転試験を行っている。現在までに、上記の要素技術の確認や出力特性の測定を進めている。以下、試験結果の一例を紹介する。

図 11～図 13 は、運転試験結果の一例であり、作動ガスを窒素とし、平均ガス圧力 P_m を 4～6 MPa とした場合のエンジン回転数 N に対する各段の膨張空間ガス温度 T_E 、図示出力 W_i 並びに軸出力 W_s を示している。運転条件としては、600 程度の高温熱源を用い、1 段エンジンの膨張空間ガス温度 T_{E1} が 430 になるように調整している。

図 11 より、 T_{E1} を 430 とした場合、2 段エンジンの膨張空間ガス温度 T_{E2} は 350 程度になっていることがわかる。これは設計時の膨張空間ガス温度に概ね等しい結果である。

図 12 より、図示出力は各段のエンジンともにエンジン回転数並びに平均ガス圧力の上昇に伴い、増加していることがわかる。また、2 段エンジンの図示出力は、1 段エンジンの図示出力と比べて 10 %程度大きくなっている。各段のピストンの行程容積はほぼ同一であり、本来であれば、膨張空間ガス温度が高い 1 段エンジンの方が高い出力が得られるはずである。詳細は不明であるが、2 段エンジンが高い出力が得られた要因は、高温シリンダ上部断熱構造の金属製 C リング（図 10 参照）からのガス漏れが発生していたためであると考えている。

図 13 はエンジン回転数 N に対する軸出力 W_s の試験結果であり、 $P_m=6$ MPa、 $N=800$ rpm において、最高軸出力約 210 W が得られていることがわかる。この条件において、各段の図示出力の総和は約 360 W であり、機械損失は約 150 W であると試算される。

5. あとがき

本報では、シリンダ周辺の構造やピストン駆動機構の簡略化が可能な 2 シリンダ・ダブルアクティング形スターリングエンジンについて検討した。さらに、ピストンシールや断熱シリンダ構造等に独創的な要素技術を取り入れた実験用スターリングエンジンを開発し、その運転試験結果の一例を紹介した。現在までの運転試験結果からは、本エンジン形式の優位性は十分に確認されていないが、高温ピストンシールを含む内部シールの性能を向上させることによって、高出力化・高性能化が可能であると考えている。

本報で紹介した 2 シリンダ・ダブルアクティング形スターリングエンジンの検討並びに開発にあたっては、多くの形からの助言や支援、協力をいただいた。関係各位並びに共同開発メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

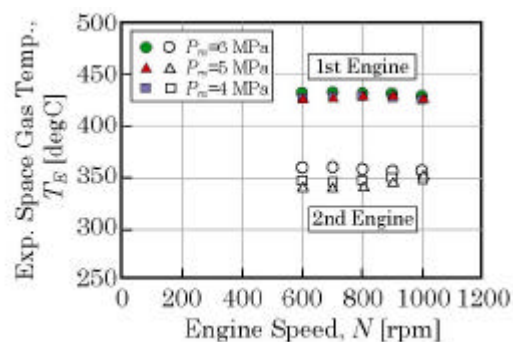
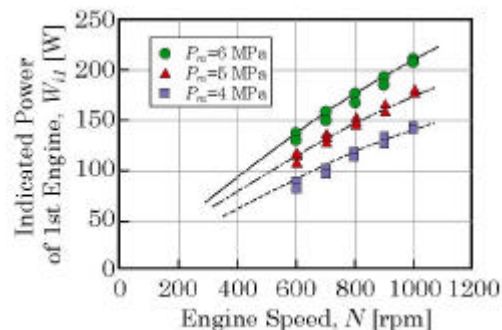
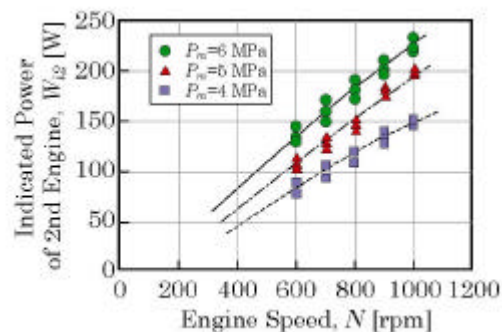


Figure 11, Expansion Space Gas Temperature



(a) 1st Engine



(b) 2nd Engine

Figure 12, Experimental Results of Indicated Power

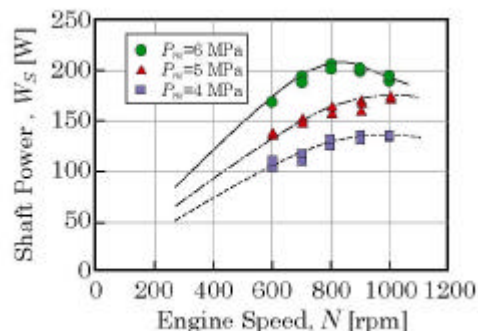


Figure 13, Experimental Results of Shaft Power

文 献

- (1) スターリングエンジンの分類
- (2) 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. 9-12 (2004 年 10 月) .
- (3) シミュレーション
- (4) 堀切川一男, 植物系硬質多孔性炭素材料「RBセラミックス」の開発, 日本機械学会誌, 100 (943), p.663, 1997 .