

第 1 章 スターリングエンジンの概要と開発事例

海上技術安全研究所 平田宏一

1.1 はじめに

スターリングエンジンは、高熱効率性、低公害性、使用熱源の多様性などの優れた特徴を持つ外燃機関である。このエンジンは、1816 年にスコットランドの牧師ジェームス・スターリングによって発明されて以来、幾度かの発展と低迷を繰り返しながら高性能化・実用化への挑戦が試みられてきた。そして、省エネルギーや環境汚染が深刻な社会問題となっている現在、スターリングエンジンへの期待が再び高まってきている。本章では、スターリングエンジンを理解するための導入として、本エンジンの構造、作動原理及び形式について解説する^{(1),(2)}。

1.2 スターリングエンジンの構造と特徴

ガソリンエンジンに代表される内燃機関は、燃料をシリンダ内で爆発させてその圧力変化を利用して運転している。それに対して、スターリングエンジンは、気体の温度変化と容積変化の関係を巧みに利用して運転している。以下、スターリングエンジンの作動原理と本エンジンの特徴である再生器について概説する。

1.2.1 スターリングエンジンの構造と作動原理

気体は、熱が与えられて温度が上昇すると膨張し、熱が奪われて温度が低下すると収縮する。この性質を利用すれば、図 1 に示すような加熱・膨張・冷却・圧縮を繰り返すエンジンが実現できる。しかし、このようなサイクルを 1 つのシリンダで構成した場合、シリンダの熱容量が大きいため、高い回転数での運転は望めず、実用的なエンジンは実現しない。図 2 に示すように、スターリングエンジンは、温度差を持つ 2 つのシリンダと約 90° の位相差を持つ 2 つのピストン、加熱器・再生器・冷却器と呼ばれる熱交換器、さらに円滑な連続運転を可能とするためのフライホイールから構成されている。

図 3 は α 形あるいは 2 ピストン形と呼ばれるスターリングエンジンの作動原理を示している。同図(1)→

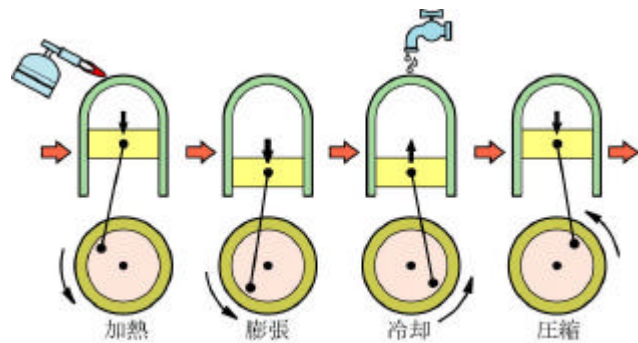


図 1 加熱・冷却と膨張・圧縮

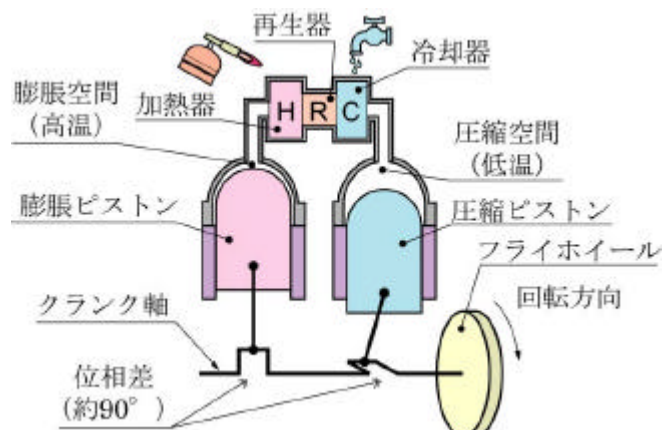


図 2 スターリングエンジンの基本構造 (α 形)

(2)の加熱行程では，高温側ピストンは下向きに，低温側ピストンは上向きに動く。作動ガスは圧縮空間（低温空間）から膨脹空間（高温空間）へ流れ，エンジン内部の圧力は上昇する。(2)→(3)の膨脹行程では，2つのピストンは作動ガスの圧力を受けて，ともに下向きに押し下げられる。このときにエンジンは駆動トルクを得る。(3)→(4)の冷却行程では，フライホイールに蓄えられたエネルギーを利用してクランク軸が回転する。この間，高温側ピストンは上向きに，低温側ピストンは上向きに動く。作動ガスは膨脹空間から圧縮空間に流れ，エンジン内部の圧力が低下する。(4)→(1)の圧縮行程では，作動ガスの圧力とピストン背面の圧力との差を受けて，2つのピストンが上向きに押し上げられる。爆発を利用する内燃機関と異なり，圧縮行程のときにもエンジンは駆動トルクを得る。スターリングエンジンは以上の行程を繰り返して動いている。なお，後述するように，スターリングエンジンにはディスプレイサ形（ β 形， γ 形）と呼ばれるエンジン形式がある。構成はやや異なるが，作動ガスの移動により圧力変化を生じさせ，膨脹・圧縮を繰り返すという原理は全く同じである。

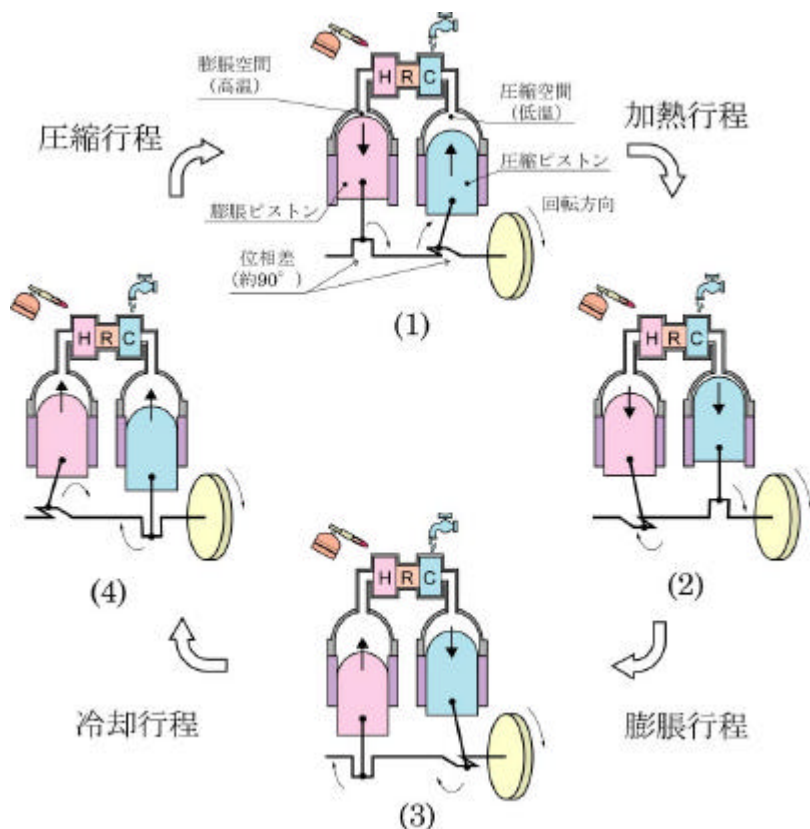


図3 スターリングエンジンの作動原理（ α 形）

1.2.2 再生器の役割と熱効率

エンジン内の作動ガスは，膨脹空間と圧縮空間との間を，加熱器，再生器及び冷却器で構成される熱交換器を介して往復動する。加熱器と冷却器の間に配置される再生器は，スターリングエンジンの熱効率の向上に欠かせない要素部品である。実際のエンジンに使用される代表的な再生器としては，ステンレス鋼製の

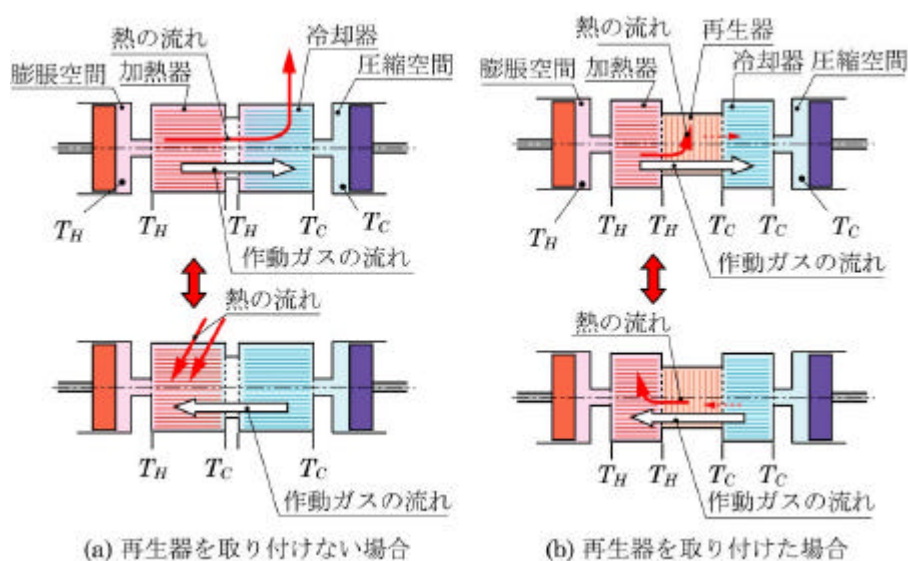


図4 スターリングエンジンの再生器

積層金網等がある。以下，再生器の役割を概念的に説明する。

膨張空間温度を T_H ，圧縮空間温度を T_C に保つための熱交換器を考える。図 4(a)に示すように再生器が挿入されていない場合，作動ガスが加熱器から冷却器の方向に流れる際，加熱器から流出した温度 T_H の作動ガスは，冷却器を通過する間に温度 T_C まで冷やされる。逆に，作動ガスが冷却器から加熱器の方向に流れる場合，冷却器から流出した温度 T_C の作動ガスは，加熱器を通過する間に温度 T_H まで加熱される。すなわち，加熱器及び冷却器では，作動ガスを温度 T_C から温度 T_H まで，あるいは温度 T_H から温度 T_C まで，加熱・冷却するための多大な交換熱量が必要となる。

次に，図 4(b)に示すように，理想的な再生器が挿入されている場合を考える。作動ガスが加熱器から冷却器の方向に流れる場合，温度 T_H の作動ガスの熱量 Q が再生器に蓄えられ，再生器から流出する作動ガス（冷却器入口の作動ガス）は温度 T_C にかかなり近いところまで低下する。したがって，作動ガスの膨脹・圧縮を考えなければ，冷却器の交換熱量がほとんどなくても，圧縮空間は温度 T_C を保つことができる。逆に，作動ガスが冷却器から加熱器の方向に流れる場合，蓄えられた熱量 Q を再利用することで，再生器から流出する作動ガス（加熱器入口の作動ガス）は温度 T_H にかかなり近いところまで上昇する。したがって，加熱器の交換熱量はほとんどいらないことになる。以上のように，再生器を挿入することで熱交換器内を往復動する「熱」を有効利用でき，スターリングエンジンは高い熱効率を実現できる。もちろん，実際のエンジンは膨脹・圧縮を行い，外部に対して仕事をするため，それに必要な加熱器への入熱量及び冷却器からの冷却熱量が必要となる。

1.3 スターリングエンジンの形式と開発事例

自動車用ガソリンエンジンなどの内燃機関はほぼ確立された形式であると言える。それに対して，スターリングエンジンは確立された形式を持たないため，現在でも様々な形式のエンジンが開発されている。以下，作動空間や熱源温度レベル，ピストン駆動機構の有無等に着目し，スターリングエンジンの形式とその特徴について考える。

1.3.1 作動空間による分類

スターリングエンジンを作動空間とシリンダの配置により分類すると，図 5 に示す 4 つの形式に分類される。それらの特徴は以下の通りである。

(1) α 形スターリングエンジン

2 つのパワーピストンで構成される α 形エンジンは，圧縮比（最大容積 / 最小容積）を高めやすく，高出力が得られやすいという特徴がある。また， β 形や γ 形などのディスプレイーサ形エンジンとは異なり，ロッドシールが不要なため，構造の簡単化が可能になる。しかし，2 つのパワ

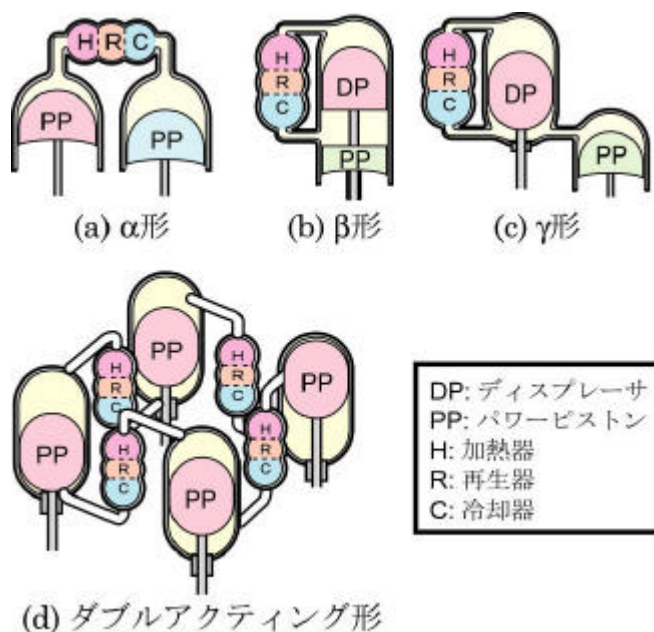


図 5 スターリングエンジンの 4 形式

ーピストンに厳重なシールが必要であり，特に高温部でのシールの選定には細心の注意が必要である。また，構造上，熱交換器を円周上に配置しづらく，熱交換器内の作動ガスの流れを均一にするのが難しい等の問題もある。現在までに開発された高性能な α 形エンジンとしては，7.4節で詳しく紹介されている3 kW 級エンジン NS03T 等がある。

(2) β 形スターリングエンジン

ディスプレイサとパワーピストンとを同一シリンダに配置した β 形エンジンは，エンジンを小型化できるのが最大の特徴である。また，熱交換器を円周上に配置しやすいため，熱交換器内の作動ガスの流れを均一にするのが容易な形式であると言える。原理的には γ 形エンジンと同じあるが， β 形エンジンはディスプレイサとパワーピストンとをオーバーラップできる点が異なり，そのため，作動空間を有効に利用でき，小型・高出力化が可能となる。一方，同軸上の2つのピストンに適切な位相差を与えながら往復運動させるための駆動機構が複雑になる等の問題もある。図6は β 形エンジンの一例であり，海上技術安全研究所（旧船舶技研）と三洋電機で開発された2 kW 級エンジンである。

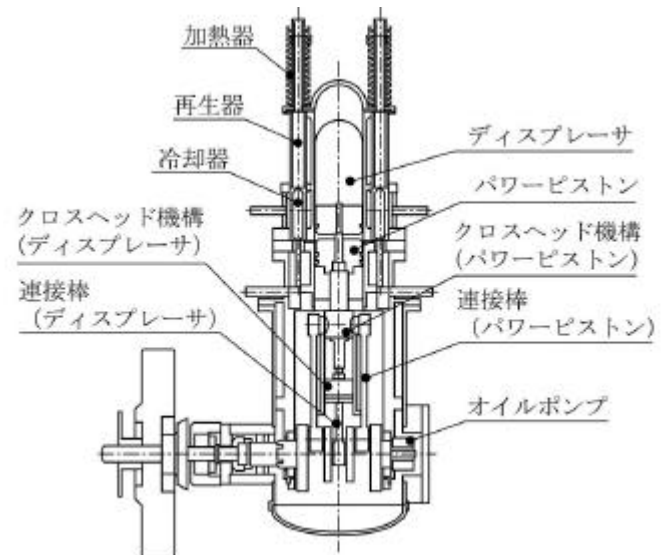


図6 2 kW 級エンジン（ β 形）

(3) γ 形スターリングエンジン

ディスプレイサとパワーピストンとが異なるシリンダに配置された γ 形エンジンは，エンジンの小型化が難しく，構造上，圧縮比を高めにくいため高出力化が難しいという問題がある。そのため，従来の高性能エンジンではほとんど採用されていない形式である。しかし，熱交換器形式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比を自由に設定しやすいこと等の特徴があり，研究用のエンジンで使われることがある。図7に示す100 W 級エンジン Ecoboy-SCM81 は，特殊な熱交換器を採用した γ 形エンジンである。

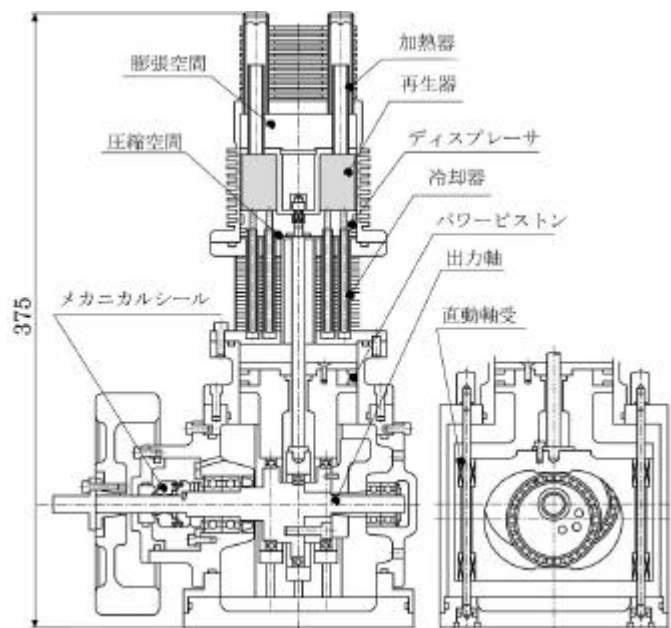


図7 Ecoboy-SCM81（ γ 形）

(4) ダブルアクティング形スターリングエンジン

通常のダブルアクティング形エンジンは4シリンダで構成されている。隣り合うピストンの上面と下面の空間を，熱交換器を介して連結することで，作動空間は通常の α 形エンジンの4基分（8シリンダ分）に相当する。この形式は，エンジンの小型化が可能であり，

高出力エンジンに適している。一方、各ピストンおよびロッドシールに厳重なシールが必要になることや4つのピストンを動かす駆動機構が複雑になる等の問題がある。7.2 節で紹介されている 30 kW 級エンジン NS30A や図 8 に示す STM4-120 エンジン（STM 社）は、斜板機構を用いたダブルアクティング形エンジンである。

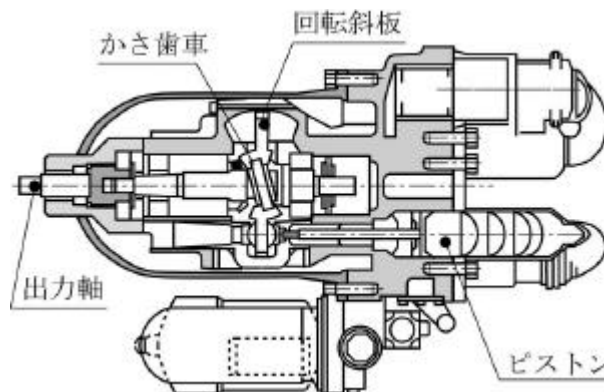


図 8 STM4-120 エンジン
(ダブルアクティング形)

1.3.2 高温差スターリングエンジンと低温差スターリングエンジン

スターリングエンジンは、あらゆる温度レベルの熱源を利用できることが特徴の一つである。スターリングエンジンを熱源の温度レベルで明確に分類することは難しいが、ここでは 1000 程度の燃焼ガスを利用するものを高温差エンジン、200～400 以下の熱源を利用するものを低温差エンジンと呼ぶ。現在までに開発されてきた実用エンジンのほとんどは高効率化を目指した高温差エンジンであった。しかし、最近では、内燃機関や工場の排熱利用並びに太陽熱や地熱等の自然エネルギー利用など、比較的溫度が低い熱源を有効利用する低温差エンジンの用途開発が期待されている。低温差エンジンは、省エネルギーや環境問題の観点から極めて有効であり、しかも構成材料の選択の自由度が増えるため低コスト化が可能である。しかし、一般の高温差エンジンのような高い熱効率が望めないこと、低温の熱源から十分な熱量をエンジン内に取り入れるための大型な熱交換器が必要になることなどの問題もある。

(1) 構造上の相違

ディスプレイサ形エンジンにおける高温差エンジンと低温差エンジンの構造上の相違を考えてみる。図 9 に示すように、通常の高温度差エンジンでは、ディスプレイサの行程容積（ピストン断面積×ストローク）とパワーピストンの行程容積はほぼ同じ程度である。一方、低温差エンジンでは、ディスプレイサの行程容積をパワーピストンの行程容積よりもかなり大きくするのが一般的である。

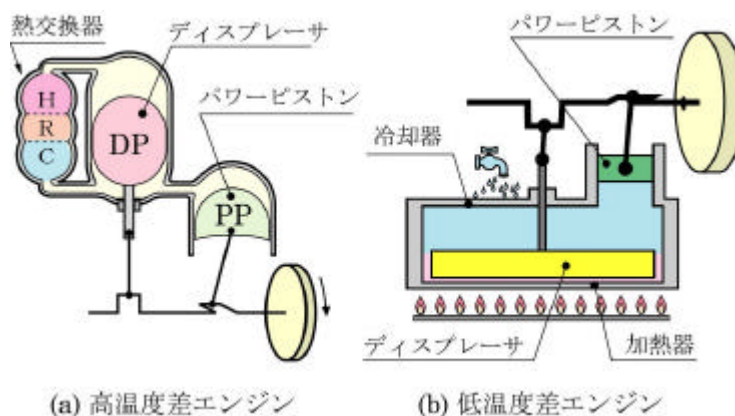


図 9 高温差エンジンと低温差エンジン

ディスプレイサ形エンジンにおいて、ディスプレイサの行程容積は、熱交換器内を流れるガス量に関係するため、「熱源と作動ガスとの交換熱量」に相当する。一方、パワーピストンの行程容積は、エンジン内外の容積変化に関係するため、「出力の大きさ」に相当する。すなわち、低温差エンジンでは、限られた熱源温度を有効に利用するため、出力に比べて交換熱量を大きくする必要があり、ディスプレイサの行程容積を大きくしている。図 10 に示す 300 W 級低温差エンジンは埼玉大学で開発された γ 形エンジンであ

る(3)。

一方、2ピストン形エンジン(α形)を低温の熱源で運転させる場合、ピストン位相差を大きくすることで、ディスプレイサ形エンジンと同様、出力に比べて交換熱量を大きくすることができる。7.6節で紹介されている1kW級低温度差エンジンは、位相差を150°としたα形エンジンである。

(2) 低温度差スターリングエンジンの課題

上述の通り、低温度差エンジンは、省エ

ネルギーや地球環境保全などの観点から、極めて有望なエンジンである。しかし、その実用化のためにはいくつかの問題を乗り越えなければならない。以下、低温度差エンジンの問題点や高性能化のための課題をまとめる。

冷却熱源の確保：低温度差エンジンは低効率となり、入熱量及び冷却熱量はともに増大する。性能向上のためには、冷却熱源温度(冷却水温度)と圧縮空間ガス温度との差をできる限り小さくしたいので、冷却のためのラジエタの巨大化、あるいは冷却水ポンプ動力の増大が問題となり得る。ただし、工場排水や河川などの十分な冷却列原があれば問題はない。

エンジンの大型化：性能向上のためには、熱源と作動ガスの温度をできる限り近づける必要がある。したがって、交換熱量を増大させるために伝熱面積を増大する必要があり、熱交換器が大型化する。また、エンジンが大型化すると、圧力損失や機械損失が相対的に増加するため、高い回転数での運転が望めなくなる。低温度差エンジンには、十分な広さの設置スペースが必要となる。

高性能熱交換器の開発：熱源の種類や特性に適した高性能熱交換器が必要となる。さらに、内燃機関の排気ガス等を熱源に利用する場合、排気ガス中に腐食成分が含まれている可能性があるため、熱交換器(特に加熱器)の耐腐食性が重要となりうる。

作動ガスの種類と圧力レベルの選定：作動ガスの種類及び圧力レベルは、エンジンの基本構造やシールなどの要素部品の構成に影響する。もちろん、製作コストやメンテナンス性にも大きく関係するので、エンジン開発時には詳細な検討が必要である。

熱源の温度レベル：使用熱源の温度によって、交換熱量と出力との比を変化させる必要があり、ディスプレイサ形エンジンの行程容積比等の基本構造が異なる。100～400の熱源温度まで対応できるなど、広い温度レベルで作動するエンジンの開発は難しい。

出力形態：低温度差エンジンの効率や回転数、設置スペースを考えると、発電用途が必ずしも得策であるとは言えず、空気コンプレッサや水ポンプの駆動等の動力利用が有望である。特に、水ポンプ駆動は、汲み上げた水をそのままエンジンの冷却に利用できるため、低温度差エンジンの特徴を活かせる用途であると考えられる。

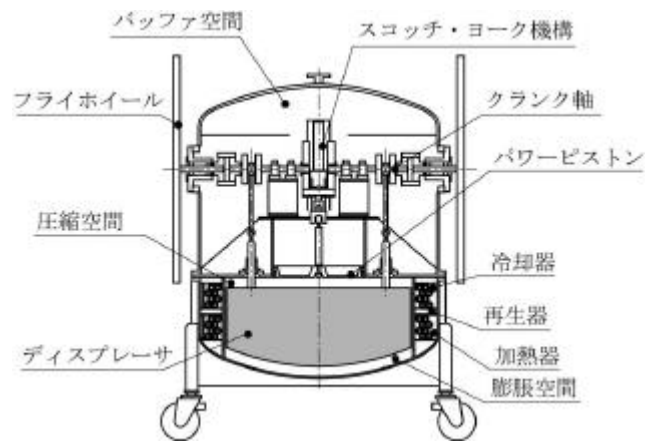


図 10 300 W 級低温度差エンジン(γ形)

1.3.3 フリーピストンスターリングエンジン

通常の内燃機関は、燃料の爆発による圧力上昇を利用して運転している。一方、スターリングエンジンは、作動ガスが熱交換器内を移動することに伴う圧力変化を利用している

ため、クランク軸やフライホイールを取り付けることなく、ピストンの連続した往復運動を実現できる。そのような、クランク軸を持たない形式がフリーピストンエンジンである。それに対して、通常のピストン駆動機構を持つ形式をキネマティックエンジンと呼ぶ。

図 11 に示すフリーピストンエンジンは、エンジンの小型化並びに機械損失低減による高効率化が可能である。通常のフリーピストンエンジンは、各ピストンに機械ばねあるいはガスばねを取り付け（復元力）、ピストン質量（慣性力）と負荷（粘性力に相当）との兼ね合いにより、共振周波数で運転する。振動系の兼ね合いにより適切なピストンストロークが得られ、さらに各ピストンに適切な位相差が生じた場合、通常のキネマティックエンジンと同一の作動空間を構成する。フリーピストンエンジンは、小型化、高出力化及び高効率化の点で優れているが、ストローク制御が困難であること、高効率リニア発電機の開発が必要であること、共振周波数だけで適切に運転するため急激な負荷変動への対応が難しいこと等、開発上の課題が多い。そのため、フリーピストンエンジンの設計・開発には、多くのノウハウを必要とする。7.3 節では研究用に開発されたフリーピストンエンジンが紹介されている。

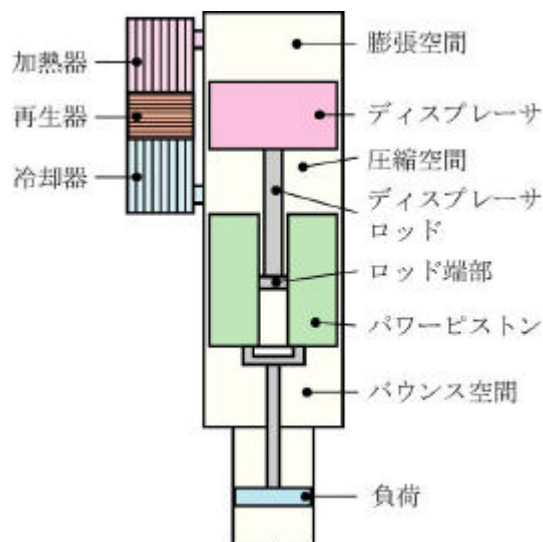


図 11 フリーピストンエンジン

1.4 スターリングエンジンの高性能化と実用化の課題

スターリングエンジンは、爆発がなく静粛な運転ができること、再生器の働きによって高い熱効率を実現できること、そして温度が異なる 2 つの熱源（高温熱源と低温熱源）があればどのような熱源であっても運転できること等の優れた特徴を持つ。19 世紀初頭にスターリングエンジンが発明されて以来、それらの特徴を活かすために様々な改良や新しい要素技術の導入がなされてきた（第 5 章参照）。本節では、スターリングエンジンの性能

表 1 スターリングエンジンの特徴と課題

	利 点	問題点（実際）	解決策（例）
高熱効率性	理論熱効率がカルノーサイクルの熱効率に等しい。	実際のシステム効率は内燃機関と同等程度である。	熱効率は製造コスト（ヒータの材質等）に大きく関係する。
低公害性	連続燃焼であるため、燃焼ガスを使っても排気ガスがクリーンである。	燃料を燃やす場合、CO ₂ 排出量は同じである。	燃料を燃やさなくても作動するのがスターリングエンジンの特徴でもある。
低騒音性	爆発がないので静粛な運転が可能である。	内燃機関も防音設備により静粛な運転が可能である。	低騒音でバランス性に優れたピストン駆動機構が必要である。
熱源の多様性	化石燃料の他、太陽熱や温泉熱等も利用できる。	低温熱源を使用すると熱効率が低下する。	低熱効率であっても利用できる用途を見つける。
重量（比出力）		エンジン全体を圧力容器とするため重い。	移動用ではなく、定地用が適している。
製造コスト		内燃機関と比べて、製造コストが高い。	大量生産に適した高性能熱交換器を開発する。

と現状を分析し，本エンジンの実用化を阻んでいる要因を考える。以下で述べるような課題を克服できれば，スターリングエンジンはすぐにでも様々な用途で実用化されるものと考えられる。

1.4.1 スターリングエンジンの特徴と課題

上述の通り，スターリングエンジンは優れた特徴を持つ動力源である。しかし，それらの優れた特徴が十分に活かされているとは言えないのが実情である。表 1 は本エンジンの特徴，課題並びに解決策を主観的にまとめたものである。

1.4.2 スターリングエンジンの高出力化・高効率化と課題

スターリングエンジンを高出力化・高効率化する方法として，作動ガス圧力を上げること，作動ガスの温度差を大きくすること，機械損失を減らすことなどがあげられる。しかし，表 2 に示すように，それらに伴って様々な問題も生じる。

表 2 スターリングエンジンの高性能化と課題

方 法	概 要	問題点
作動ガスの高圧化	作動ガス圧力にほぼ比例して出力が増加する。	● 強度の関係から，高圧にするほど重量が増す。 ● 製造コストが上がる。 ● 高圧ガス取締法による制限を受ける。
温度差の増大	主として，ヒータ壁温を上昇させる。	● インコネル等の高級なヒータ材料を必要とする。
機械損失の低減	機構部での損失を低減する。	● 小型エンジンでは，機械損失を減らすことは極めて難しい。

1.5 おわりに

本章では，スターリングエンジンの導入として，原理や形式，実用化への課題について解説し

た。スターリングエンジンが優れた特徴を持っていることは間違いない。しかし，軍事用潜水艦などの特殊用途で使用されているものや一部のコジェネ用エンジンとして製品化されているものはあるが，民生レベルで広く普及しているとは言えないのが現状である。スターリングエンジンの実用化と普及のためには，低公害性，高熱効率性及び燃料の多様性という特徴の 1 つだけでもよいので，それを活かすことができる用途を見つけることが重要であると考えられる。また，例え熱効率が高く，環境にやさしいエンジンであっても価格が高ければ実際に使用されることはない。適切なバランスを考えたエンジン設計並びに用途開発が重要となるであろう。

参考文献

- (1) 岩本昭一，浜口和洋，平田宏一，松尾政弘，戸田富士夫：模型スターリングエンジン，1997，山海堂。
- (2) 山下巖，濱口和洋，香川澄，平田宏一，百瀬豊：スターリングエンジンの理論と設計，1999，山海堂。
- (3) S. Iwamoto, F. Toda, K. Hirata, M. Takeuchi and T. Yamamoto, COMPARISON OF LOW- AND HIGH TEMPERATURE DIFFERENTIAL STIRLING ENGINES, Proceedings of 8th International Stirling Engine Conference, p. 29-38, 1997.