

スターリングエンジンの研究・開発動向

平田宏一（(独)海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域 主任研究員）

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問題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。

本報では、当研究所で進めている排熱利用スターリングエンジンに関連した研究をはじめ、国内外で研究・開発が進められている高性能スターリングエンジンの現状、バイオマスや太陽熱を利用した関連研究について解説する。

2. スターリングエンジンの基本構造と特徴

図1にスターリングエンジンの基本構造を示す。スターリングエンジンは、一対のピストンと熱交換器等から構成されている。作動ガスを高温空間と低温空間の間を移動させることにより圧力変化を生じさせ、膨脹・圧縮を繰り返して運転している。

圧力変化によって効率よく動力を得るためには、作動空間内に高圧の作動ガスを封入し、運転するのが一般的である。また、伝熱性能の向上や熱交換器における圧力損失の低減の観点から、ヘリウムや水素等の分子量の小さい作動ガスが用いられることが多い。

図2は各種エンジンの出力レベルと熱効率の関係を模式的に表している。スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて、高い熱効率が得られやすいという特性がある。この

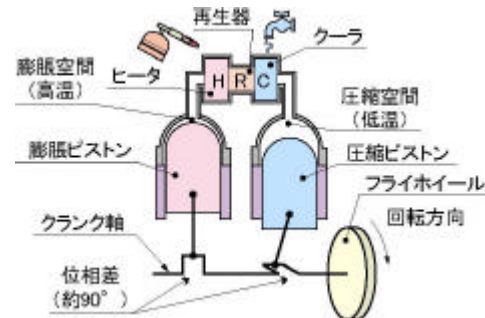


図1 スターリングエンジンの基本構造

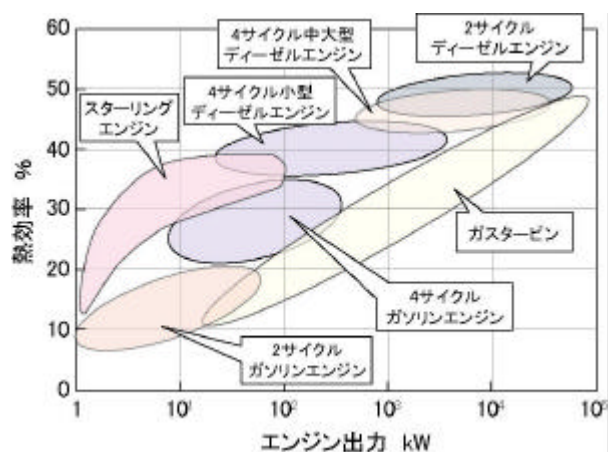


図2 各種エンジンの出力と熱効率

ような特性をうまく活かすことで、スターリングエンジンは様々な用途で活躍できるものと考えられる。

3. スターリングエンジンの技術

スターリングエンジンの歴史は古い。第二次大戦中には、オランダの Philips 社によって可搬式発電機が開発されている。その後、様々な技術が導入され、現在に至っている。

(1) ハーメティック式エンジン

前述の通り、スターリングエンジンを高出力化するためには、エンジン内部を高圧に保つ必

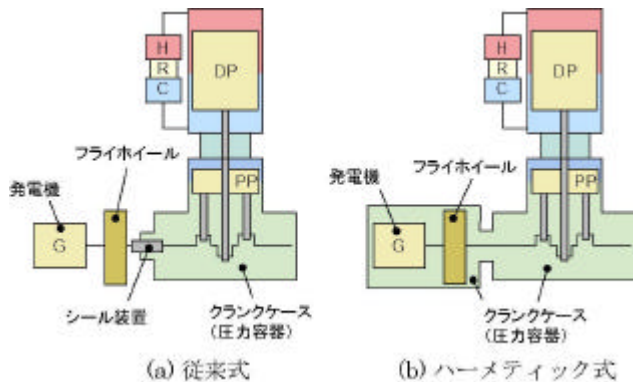


図3 従来式エンジンとハーメティック式エンジン

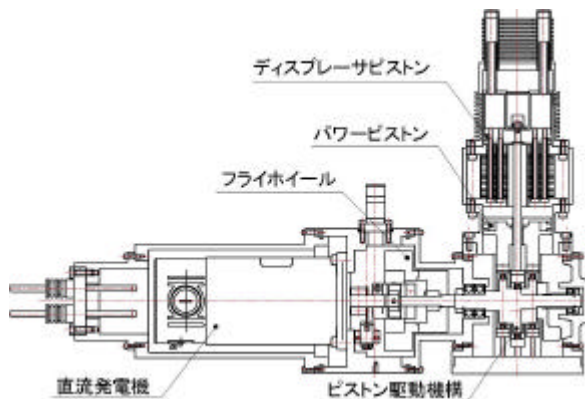


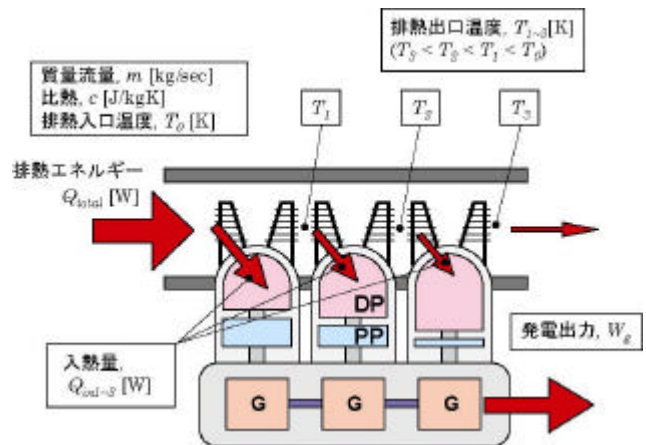
図4 100 W 級実験用エンジン (海技研)

要がある。図3(a)に示すように、作動ガスを密閉するにはメカニカルシールなどのシール装置が使われてきたが、小出力のエンジンでは、その摩擦損失の割合が大きく、出力性能に大きく影響する。そこで、図3(b)に示す発電機を圧力容器に内蔵したハーメティック式と呼ばれる形式が、最近の小型エンジン発電機の主流となっている。

図4は、出力100 W程度の実験用ハーメティック式エンジンである。ハーメティック式とすることで、発電出力は40 %程度も向上できることが確認されている¹⁾。

(2) 多段式排熱利用エンジン

図5は著者らが提案している多段式スターリングエンジンである²⁾。同図(a)において、3台のエンジンが直列に配置され、排熱は左から右の方向に流れる。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。図6は理想的な条件のもとで、多段式エンジンの



(a) 多段式エンジンの概念図



(b) 実験用エンジンの外観 (海技研)

図5 多段式スターリングエンジン

出力性能を試算した結果の一例である。これより、多段式エンジンは、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ことがわかる。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、ディスプレサおよ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。

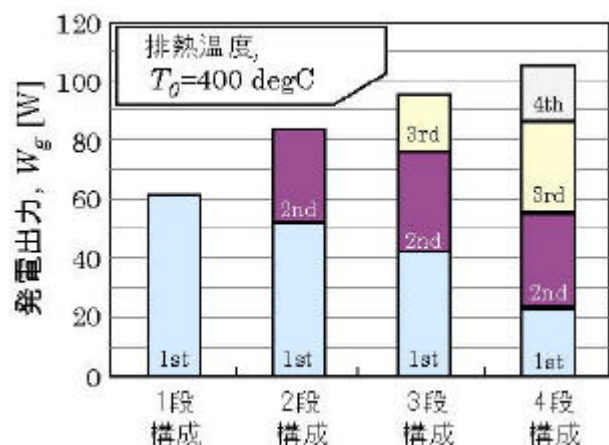


図6 多段式エンジンの出力試算結果

(3) フリーピストンエンジン

スターリングエンジンの小型化を目指す場合、図7に示すようなフリーピストン式と呼ばれる特殊なエンジン形式が利用されることがある。これは、ピストン系の共振現象を利用して作動するエンジンであり、クランク機構を持たないのが特徴である。往復運動を行うピストンとリニア発電機を一体構造とすることでエンジン発電機の小型化を図ることができる。さらに機構部の摩擦損失が大幅に低減されるため、高効率化が可能となる。当初、この形式のエンジンは宇宙分野での開発が盛んであったが、最近では国内外の関連企業によって民生用途での製品化が進められている。2005年4月に松下電器産業社のベンチャー企業として発足したeスター社では、セラミックス製熱交換器や新型リニア発電機など、高性能化・量産化のための新しい技術開発を含めて、フリーピストン式エンジンの開発を進めている³⁾。

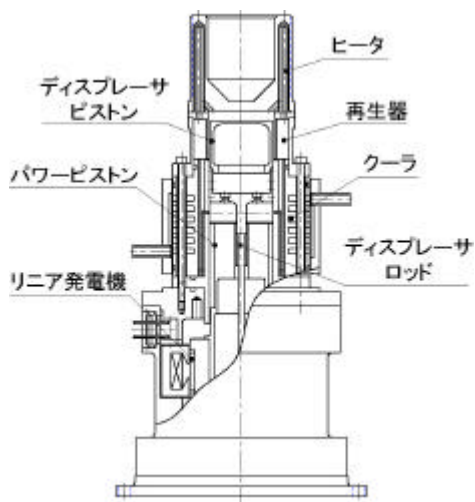


図7 フリーピストンエンジンのイメージ
(eスター社)

4. スターリングエンジンの用途開発

スターリングエンジンの優れた性能を活かすことができれば、主動力源や排熱利用、コジェネレーションなど、様々な用途開発が可能である。以下、スターリングエンジンの用途開発について考えてみる。

(1) 主動力源 交通機関への適用)

スターリングエンジンを交通機関の主動力源として適用可能性を検討した例を紹介する。図8は大型船舶用スターリングエンジンの概念図である⁴⁾。出力は20,000 kWであり、経験則やシミュレーション計算を利用して概念設計を行った。本エンジンは、同出力レベルのディーゼルエンジンと比べて高さ寸法は概ね同じであるが、クランク軸方向の長さが約2倍の寸法となっている。また、熱効率についても、現在のディーゼルエンジンに対する優位性は確認されなかった。図2に示したように、スターリングエンジンは、比較的低い出力レベルにおいて高い熱効率が得られやすいという特徴がある。これはエンジンを大出力化する場合、圧力容器構造の制限によってエンジンの構造部材の肉厚が増大し、それに伴う熱損失が増大するためである。

図9は、200 kW 級スターリングエンジンを搭載した観光用水陸両用船の概念図である⁴⁾。このように、静粛性・環境調和性を要求される用途では、スターリングエンジンの利用価値は高いと考えられる。しかし、製作コストや信頼性を考えると、現在のスターリングエンジンが

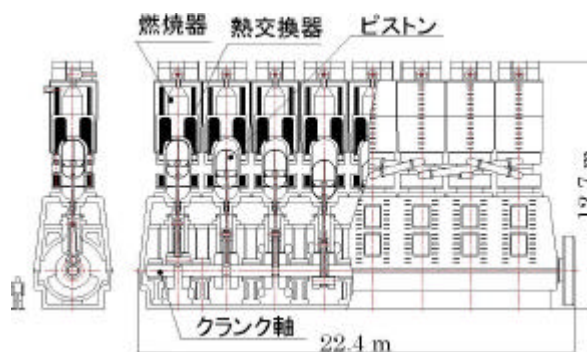


図8 大型船舶用スターリングエンジンの概念図

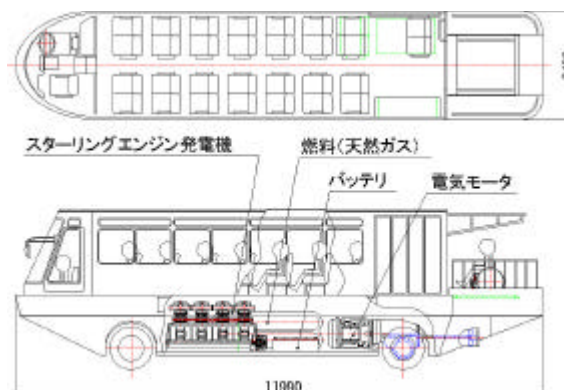


図9 観光用水陸両用船の概念図

自動車・船用エンジンに対抗するのは極めて困難であり、さらなるブレイクスルー技術が必要不可欠である。

(2) 排熱回収システム

多様な燃料から動力を取り出すことができるという、このエンジンの特徴を活かすことで、排熱利用発電が可能となる。排熱には、工場排熱や内燃機関の排ガスなどがあり、一般に温度が低い。低温度熱源を利用するスターリングエンジンの実用化には、高性能熱交換器の開発など、様々なブレイクスルー技術が必要であるが、排熱の総エネルギー量は極めて大きく、300～400℃程度の排熱を有効に回収する技術が確立されれば、その用途は極めて広い。

図10は、その一例として、「鉄道建設・運輸施設整備支援機構：運輸分野における基礎的研究推進制度」のもとに、著者らが研究・開発を進めている船舶用排熱回収システムの概要である⁵⁾。本排熱回収システムは、港湾地域の環境汚染を改善することを目的とし、運航中の推進に使うディーゼルエンジンの排熱エネルギーを

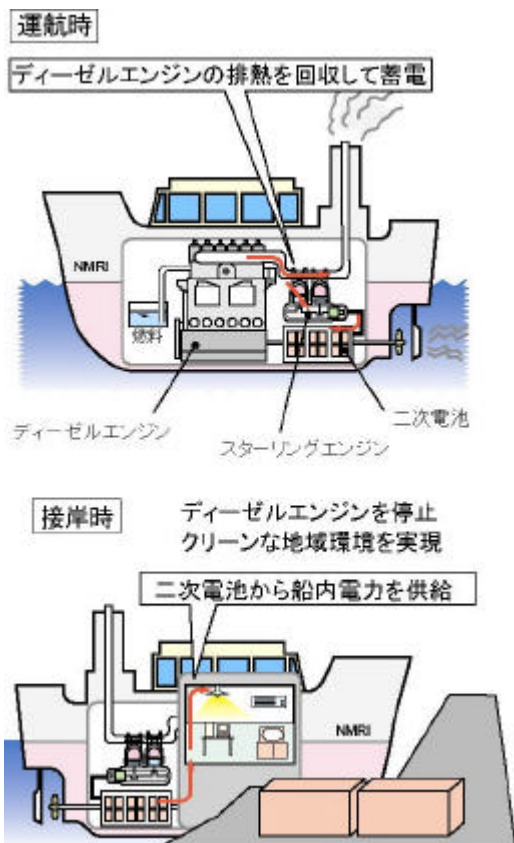
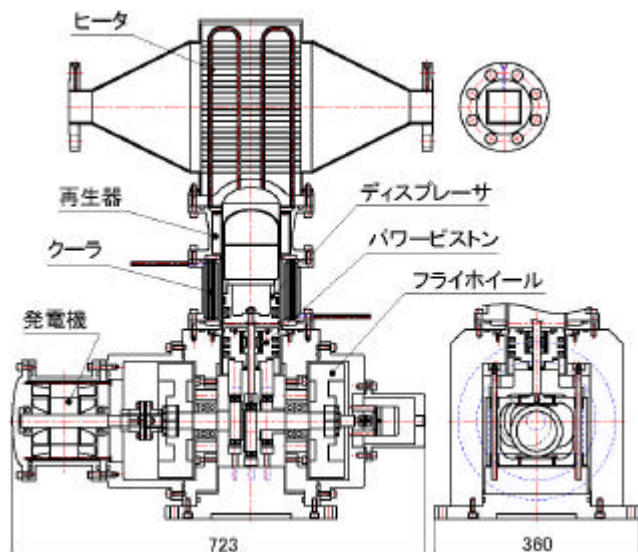


図10 船舶用排熱回収システムのイメージ図

スターリングエンジンによって回収し、電気として蓄え、停泊中の船内電力に使用する。したがって、船舶が停泊している際、発電用ディーゼルエンジンの運転が不要となり、港湾地域の環境汚染が改善され、クリーンな地域環境を保つことができるようになる。現在までに、図11に示す実験用エンジンを設計・試作し、300～400℃程度の熱源による試験運転並びに性能評価を進めている。



(a) 実験用エンジンの構造



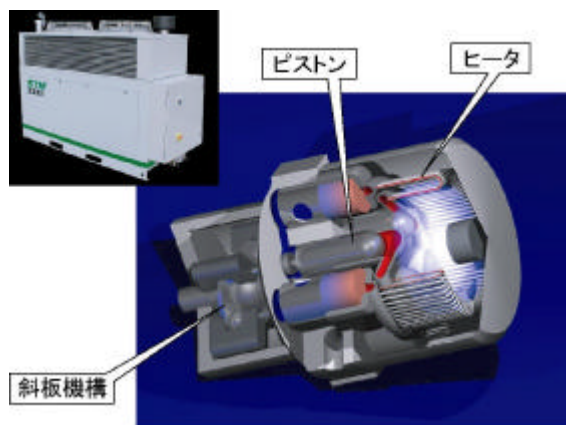
(b) 実験用エンジンの外観

図11 排熱利用スターリングエンジン

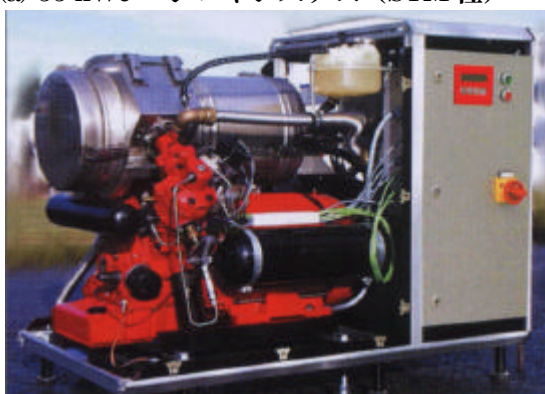
(3) コージェネレーションシステム

小型で高効率なエンジンが開発されれば、業務用あるいは家庭用コージェネレーションシステムの普及が期待できる。これは燃料が持つ熱エネルギーを発電と給湯に効率よく変換するものであり、エネルギーの有効利用が可能となる。

図12に示したエンジンはコージェネレーション



(a) 55 kWe コージェネシステム (STM 社) ⁶⁾



(b) 10 kWe コージェネシステム (SOLO 社) ⁷⁾



(c) 0.75 kWe エンジン (WhiperGEN 社) ⁸⁾

図 12 コージェネレーションシステム用
スターリングエンジン

システムへの適用を目指して製品化されつつあるエンジンである。コージェネレーション用エンジンは、出力や効率の性能ばかりでなく、社会への普及を考慮したシステム構成が重要になるものと考えられる。

(4) バイオマス利用システム

一方、木質チップや発酵メタンなどを利用す



図 13 35 kW バイオマス利用エンジン ⁹⁾

るバイオマスエネルギー利用システムの研究・開発も活発に行われている。図 13 はデンマーク工科大学の Carlsen 教授らが開発している 35 kW 級バイオマス利用スターリングエンジンであり、システムの製品化を目指した研究・開発が進められている。国内においても、いくつかのバイオマス利用システムのフィールドテストが進められており、スターリングエンジンに対する期待は高い。

(5) その他の用途開発

その他の用途として、スターリングエンジンの高熱効率性や低騒音といった特徴を活かした、海中動力用スターリングエンジンの研究・開発などが進められている。スウェーデンの Kockmus 社で開発された 75 kW スターリングエンジンは、40 %以上の熱効率に達し、数機の軍事用潜水艦に搭載されている。

また、スターリングエンジンを用いた太陽熱利用システムの研究・開発も活発に行われている(図 14)。このような自然エネルギーの有効利用は、将来の地球環境保全に役立つのは間違いない。



図 14 太陽熱利用エンジン ⁷⁾

さらに、発展途上国や山岳地向けのエンジン開発も有望である。そのような用途では、低コスト化とメンテナンス性の向上が重要な課題となる。

5. おわりに

以上、スターリングエンジンの優れた特徴をやや強調して、関連技術や用途開発について解説してきた。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スターリングエンジンは、様々な分野で活用される可能性があることは間違いない。しかし、このエンジンにはいくつかの問題点もある。例えば、高効率化のためには、耐熱性・耐圧性が高い特殊材料を使用する必要がある、製作コストが高くなること、過去に開発された高性能スターリングエンジンの技術（ノウハウ）が継続的に伝承されていないこと、さらに運転実績に乏しく信頼性が十分でないことなどである。これらの課題を克服し、スターリングエンジンが様々な分野で活躍することを期待している。

参考文献

- (1) HIRATA, K, Mechanical Loss Reduction of a 100 W Class Stirling Engine, Proc. of 11th International Stirling Engine Conference, p.338-343, 2003.
- (2) HIRATA, K. and KAWADA, M., Development of a Multi-cylinder Stirling Engine, Proceedings of 12th International Stirling Engine Conference, p.315-324, Sept. 2005.
- (3) 赤澤輝行, 村尾景司, 平田宏一, 星野健, 高効率スターリングエンジンの開発, 日本機械学会第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.105-106 (2005).
- (4) HIRATA, K. and KAWADA, M, Discussion of Applicative Marine Stirling Engine Systems, 7th International Symposium On Marine Engineering, Oct. 2005.
- (5) 平田宏一, 加納敏幸, 川田正國, 赤澤輝行, 井上敏彦, 飯田光利, スターリングエンジンを用いた内航船用排熱回収システムの提案, 日本機械学会第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.97-98 (2005年).
- (6) STM 社 ホーム ページ , <http://www.stmpower.com/>, 2005.
- (7) SOLO 社 カタログ, 2005.
- (8) Whisper Tech 社 カタログ, 2005.
- (9) M. Pålsson and H. Carlsen, Development of a Wood Powder Fuelled 35 kW Stirling CHP Unit, Proc. of 11th International Stirling Engine Conference, 2003.