

船と海のスターリングエンジン

Stirling Engine of Ships and the Sea

独立行政法人 海上技術安全研究所 平田宏一

1. 夢の環境調和型エンジン

交通機関の動力源としては、小型乗用車では小型・軽量なガソリンエンジン、航空機では大推進力が得られるジェットエンジン、そして船舶の主機関としては高効率なディーゼルエンジンが主流となっている。また、最近では環境保全並びにエネルギーの有効利用の観点から、燃料電池などの新しい動力源や電気推進船や電気自動車等の電気エネルギーを利用した動力システムの研究開発が活発に行われている。このように、私たちが利用している動力システムは、それぞれの動力源の特徴を最大限に活かして、それぞれの用途や状況に合わせて使われている。

本稿で述べるスターリングエンジンは、ディーゼルエンジンよりも古くに発明され、発展と低迷を繰り返しながら開発が進められてきた外燃機関である。以下、低公害性・燃料の多様性など、環境調和性に優れた特徴を持つスターリングエンジンが、どのような船舶分野に適用できるのか考えてみたい。

2. スターリングエンジンの動作原理と特徴

スターリングエンジンは、民生レベルで広く普及したエンジンではなく、その構造や原理はあまり知られていない。

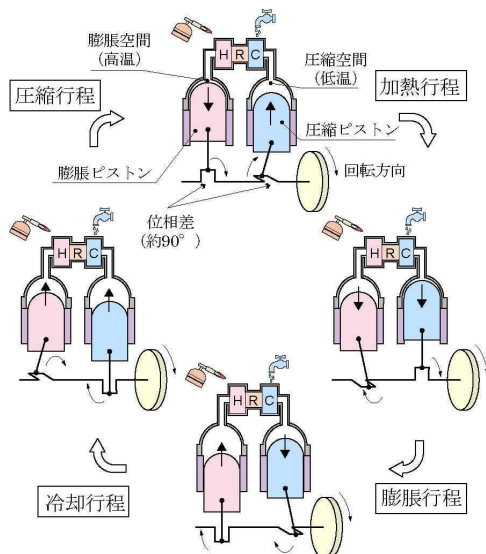


図1 スターリングエンジンの動作原理

はじめに、スターリングエンジンの動作原理を簡単に紹介する。図1にスターリングエンジンの動作原理を示す。スターリングエンジンは、2つのピストン、ヒータ、再生器およびクーラで構成される熱交換器並びに90°の位相差を持つクランク機構から構成されている。同図に示すように、作動ガスは、2つのピストンが往復運動することにより、高温空間と低温空間との間を移動し、加熱・冷却が繰り返される。そして、作動ガスの移動により生じる圧力変動を利用して連続的な運転を可能としている。スターリングエンジンには、作動空間の構成が異なるいくつかの形式があるが、作動ガスの移動に伴う圧力変動を利用するという、基本的な動作原理はほぼ同じである。

スターリングエンジンは燃料の爆発を利用しないため、静粛な運転が可能である。また、外燃機関であるため、化石燃料に限らず、あらゆる熱源を利用できる。さらに、冷却行程において再生器に蓄えた熱エネルギーを加熱行程で再利用することにより熱効率を高められるという特徴がある。ただし、実際のスターリングエンジンでは、再生熱交換の不十分さによる熱損失や作動ガスが熱交換器内を高速で流れることによる圧力損失、エンジンからの放熱や熱伝導による熱損失などが生じるため、大型船用ディーゼルエンジンに匹敵するような高い熱効率を実現するのはかなり難しい。

また、実用的な出力を得るためには、作動ガスに分子量が小さいヘリウムや水素を使用し、しかも作動空間を数MPaに加圧した状態で運転するのが一般的である。そのため、圧力容器構造やシール構造が、実用化に対する技術的な課題となり得る。特に、高温・高圧の条件下で高い強度を必要とするヒータは、高価な特殊合金が使われることがあり、生産コストの面でも問題視されている。

3. 陸上用スターリングエンジンの開発事例

スターリングエンジンは、1816年に発明されて以来、国の内外で様々な研究開発が進められてきた。近年では、1980年代に実施された通商産業省のムーンライト計画において、国内4社は熱効率30～35%の高性能エンジンを開発し、本エンジンの高熱効率性を実証している。その後も各種の実験用エンジンが開発され、要素技術やシステム

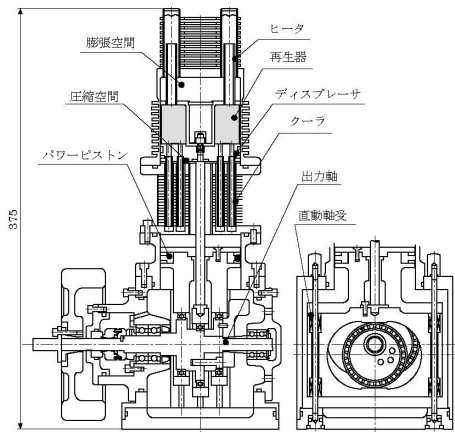


図 2 100 W 級実験用スターリングエンジン

技術の構築がなされてきた。図 2 は、当研究所で研究を進めている 100 W 級実験用スターリングエンジンである。特殊な熱交換器を採用しており、小型化を目指して開発されたスターリングエンジンである。

最近の陸上用スターリングエンジンの開発状況としては、都市ガスを燃やして電気と温水を作り出すコジェネレーションシステムの研究開発が活発に行われている。これは、小規模な発電を家庭あるいは地域に分散させ、高効率で無駄の少ないエネルギー利用を目指したものである。同様に、エネルギーの有効利用に着目して、工場排熱やごみ焼却炉等の熱を利用した廃熱利用スターリングエンジン、生ごみ・糞尿を発酵させて生成するメタンガスや木質チップを利用したバイオマス利用スターリングエンジンも注目を浴びている。

4. 船舶分野における適用可能性

上述の通り、優れた特徴を有するスターリングエンジンであるが、船舶分野での応用については、活発な研究開発がなされていないのが実情である。静粛性・高効率性の特徴を活かして、一部の軍事用潜水船の動力源としてスターリングエンジンが利用されているが、一般の貨物船や旅客船等で使われた事例は見当たらない。以下、船舶分野におけるスターリングエンジンの適用可能性について考えてみる。

4.1 大型船舶の主機関としての利用

ディーゼルエンジンの代替動力源として、大型船舶の主機関への適用を検討する。全長 300 m 程度の貨物船の主機関は 20,000 kW 程度の出力を必要とする。図 3 は、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大型船舶用スターリングエンジンである⁽¹⁾。同出力レ

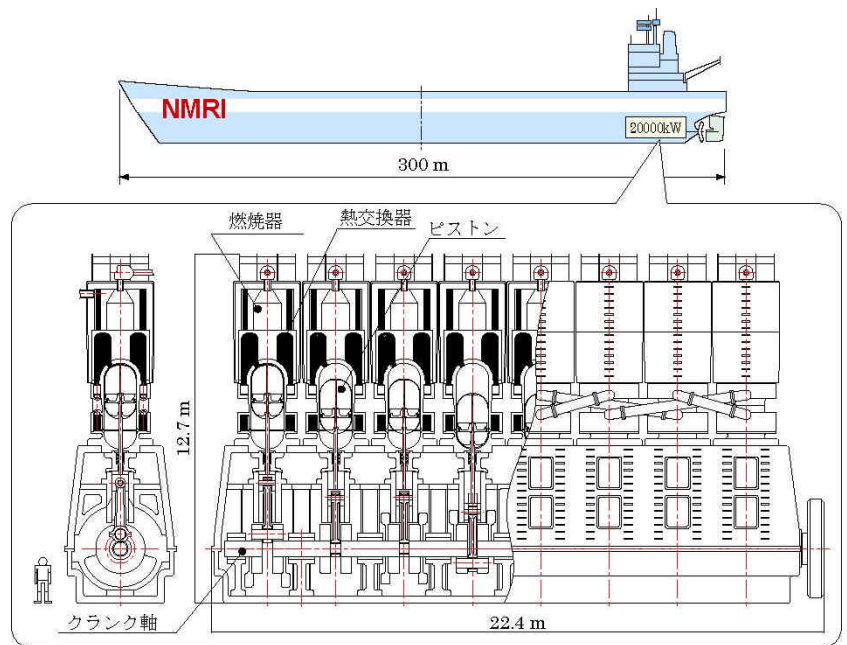


図 3 20,000 kW 級船用スターリングエンジンの概念図

ベルのディーゼルエンジンと比べると、高さはほとんど変わらないが、クランク軸方向の長さが約 2 倍の寸法となっている。スターリングエンジンが大型化する要因としては、高圧容器として構成されるシリンダ並びに熱交換器に高い強度を必要とすること、さらに大容量の熱を授受するために大型の熱交換器が必要となることなどがあげられる。また、熱効率の面でも、現在のディーゼルエンジンに対して優位性は確認できず、スターリングエンジンを大型船舶の主機関として適用するためには、高温・高圧に耐えるヒータ材料の開発や高回転数での運転を可能とする圧力損失・機械損失の低減技術など、多くの課題が残されている。

4.2 小型船舶の動力源としての利用

スターリングエンジンは、圧力容器構造と熱交換器の強度の兼ね合いから、比較的小さい出力が適していると言われている。以下、小型船舶への適用例として、観光用水陸両用船に用いるスターリングエンジンを検討する。

図 4 は、200 kW 級スターリングエンジン発電機を搭載

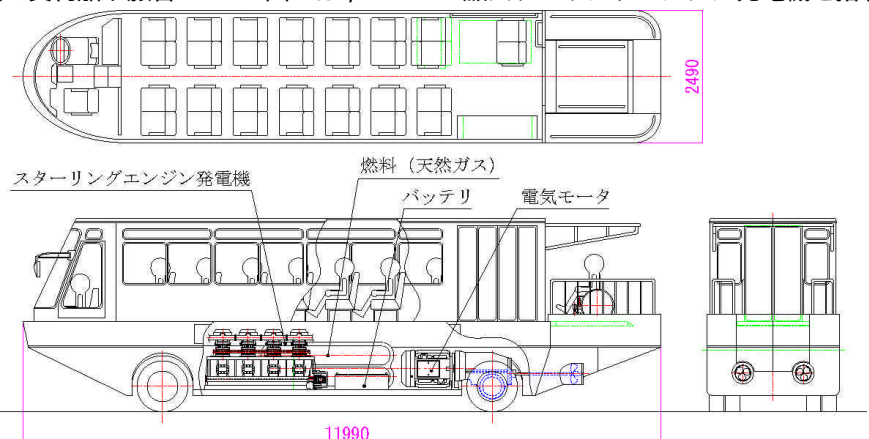


図 4 スターリングエンジン発電機を搭載した観光用水陸両用船の概念図

した水陸両用船の概念図である。燃料には天然ガスを使用し、電気モーターで推進するハイブリッド式である。発電機を内蔵したスターリングエンジンを想定し、エンジンの小型化を試みることによって、水陸両用船に概ね適合した寸法の動力システムとなっている。

小出力のスターリングエンジンであれば、技術的な問題はかなり少ない。観光用水陸両用船のように、静粛性や環境調和性を要求される用途であれば、スターリングエンジンの利用価値はかなり高い。ただし、実用化のためには、製作コストの低減や安全性・信頼性の確保などの課題があると考えられる。

4.3 主機関の排熱利用

大型船用ディーゼルエンジンは、燃料が持つ熱量の 30 % 程度が排気ガスの熱として放出される。すなわち、出力が 20,000 kW のディーゼルエンジンの排気ガスから、5 % 程度の熱を回収ができれば、補機 1 台分の動力を補うことができる。エネルギーバランスの簡易計算を行うと、図 5 に示すように、20,000 kW のディーゼルエンジンから排出される 400 °C の排気ガスを利用して、出力 700 kW のスターリングエンジンを運転することができると試算される。

燃焼ガス等の高温熱源を用いたスターリングエンジンで熱効率 5 % を達成することは難しいことではない。しかし、

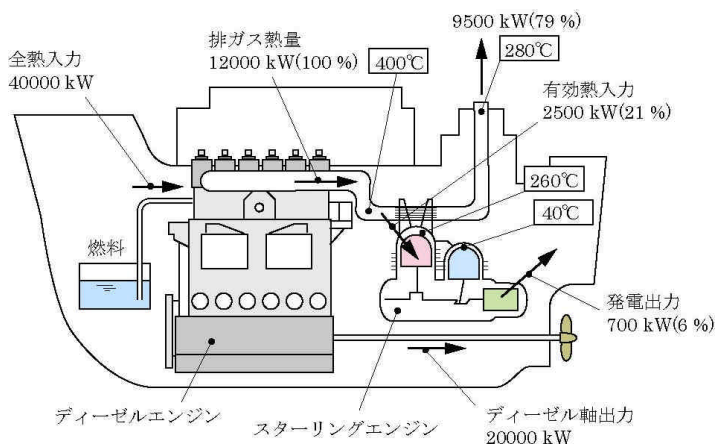


図 5 排熱利用スターリングエンジンシステム

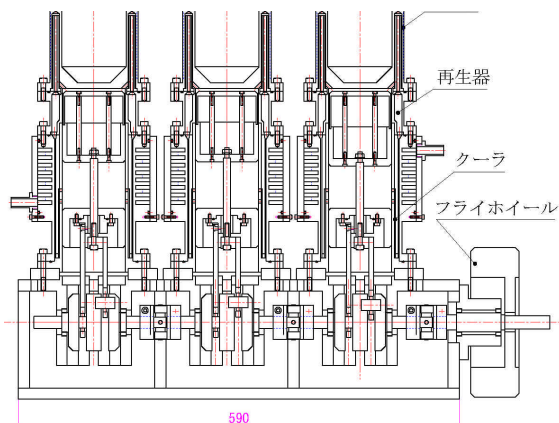


図 6 排熱利用を想定した実験用スターリングエンジン

排気ガスの温度が 300 ~ 400 °C であることを考えると、実際に使用できる熱量に制限を受け、しかもエンジンの理論熱効率が著しく低下するため、実用レベルのスターリングエンジンを開発できるかどうか現状では判断できない。排熱利用エンジンでは、排熱の熱量だけでなく、温度レベルが重要な検討課題である。

図 6 は、当研究所で設計・試作を進めている排熱利用スターリングエンジンである。高温熱源には 400 °C 程度の排熱を想定しており、作動温度レベルが異なる 3 段のスターリングエンジンにより、排熱のエネルギーを最大限に利用することを目指している。

4.4 その他の動力回収

陸上施設では、飲食店や宿泊施設等の生ごみを利用したバイオマス発電やごみ焼却炉の熱を利用した動力回収が検討されている。同様に、旅客船などでは、多くの生ごみが発生するため、それをメタン発酵させて発電することが可能であろう。このような用途については、エンジンの設置場所や船舶のエネルギーバランスを考慮した体系的な設計が必要不可欠である。

5 . 船用スターリングエンジンの実用化に向けて

本稿では、スターリングエンジンの構造・動作原理について概説し、本エンジンの船用分野への適用性について検討した。圧力容器構造となるスターリングエンジンは大型化が困難であり、大型船舶の主機関への適用はかなり難しいと推測される。一方、現在の船用大型ディーゼルエンジンの完成度はかなり高く、エンジン本体の熱効率向上はかなり難しいところまで来ている。そのため、本稿で述べたような、ディーゼルエンジンからの排熱を利用したエネルギーの有効利用技術は、今後の技術課題の一つであると考えられる。また、環境調和性が必要とされる小型船舶へのスターリングエンジンの適用は、実用までにはいくつかの技術的なハードルを乗り越えなければならないが、夢のある適用分野であると考えられる。

参考文献

- 1) 平田宏一, 20,000 kW 級船舶用スターリングエンジンの検討, 日本機械学会第 6 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p. 21-22 (2002 年 10 月).



平田 宏一 (ひらた こういち)
 平成 4 年 3 月 埼玉大学大学院理工学研究科
 機械工学専攻修了
 平成 4 年 4 月 運輸省船舶技術研究所機関動力部 研究官
 平成 10 年 3 月 埼玉大学大学院理工学研究科
 より博士 (工学) 取得
 現 在 独立行政法人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