

排熱利用スターリングエンジンの開発並びに性能特性

エネルギー・環境評価部門 *平田 宏一，今井 康之，川田 正國
(株) e スター 赤澤 輝行，坂口 諭

1. まえがき

運航中のディーゼルエンジンから放出される排熱を回収する技術は，エネルギーの有効利用あるいは環境保全の観点から極めて有望である。平成 17 年度より開始された(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 基礎的研究推進制度「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」において，著者らは，400 の高温熱源で運転する目標出力 500 W の実験用スターリングエンジンを設計・試作し，その性能評価を開始した。以下，開発を進めている実験用スターリングエンジンについて報告する。

2. 実験用スターリングエンジンの開発

平成 17 年度に開発した実験用スターリングエンジンは，当研究所内の既存設備を利用して性能測定を行うことを前提として設計条件を設定している。すなわち，ディーゼルエンジンの排ガスを模擬した実験用高温空気を作り出すための電気ヒータや空気コンプレッサの制限から，温度 400 ，容積流量 1000 NL/min の空気を高温熱源として用いることとし，その条件における目標出力を 500 W とした。なお，実際のディーゼルエンジンは，排ガス温度がやや低いものの，流量は桁違いに大きい。すなわち，想定する運転条件は異なるものの，高温空気による性能測定結果を詳細に評価することで，排熱回収システムを実証するためのエンジン開発並びにシステム開発に貢献するデータ蓄積が可能であると考えている。

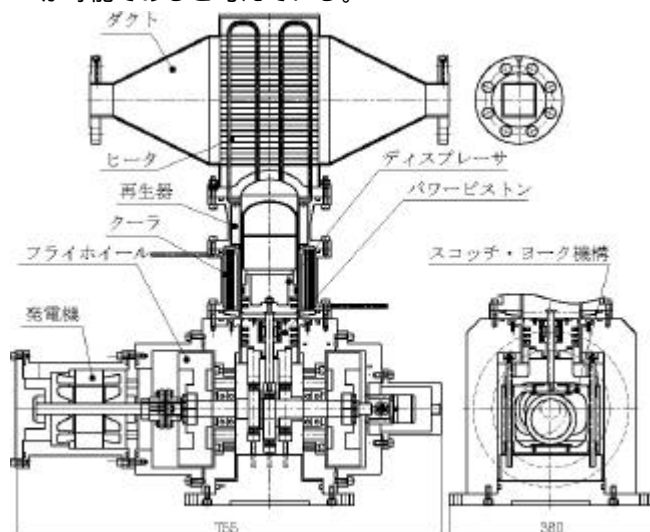


図1 実験用スターリングエンジンの構造

図1に実験用スターリングエンジンの構造，表1に主なエンジン仕様を示す。本エンジンは，同一シリンダにディスプレーサとパワーピストンとを配置した β 形と呼ばれる形式である。シリンダの上端には高温熱交換器（ヒータ）が設置され，その周囲に高温熱源を流すためのステンレス鋼製ダクトが取り付けられる。シリンダ周囲には円環形状の再生器及び多管式クーラが設置されている。

発電機は，出力 750 W の三相交流誘導モータを流用しており，クランクケースに取り付けられる。これは，発電機を耐圧構造に内蔵したハーメティック形式と呼ばれる形式であり，高圧の作動ガスを密封するための動的シールを必要としないため，機械損失の低減を図ることができる形式である。

従来から開発されてきた高性能スターリングエンジンのヒータ材料は，高温条件下での強度を確保するため，インコネルやハステロイ X などの特殊ニッケル合金が使われることが多かった⁽¹⁾。一方，本研究で開発する排熱利用スターリングエンジンは，熱源温度が低いため，それらの特殊合金を使用する必要はない。400 以下の低温熱源で作動させる実験用スターリングエンジンのヒータ材料には熱伝導率が高い銅合金が適切であると考え，外径 6 mm，内径 4 mm の銅パイプを採用した（図2）。

ピストン駆動機構に採用したスコッチ・ヨーク機構は，アルミニウム合金製のクランクケース内に内蔵されている。スコッチ・ヨーク機構は，長円形状の穴を持つヨークの内部を転がり軸受が運動する機構であり，ヨークに直動軸受を取り付けることで，ピストン

表1 主なエンジン仕様

エンジン形式	β 形
ディスプレーサ行程容積 (ピストン径×ストローク)	283 cm ³ ($\phi 100 \times 36$ mm)
パワーピストン行程容積 (ピストン径×ストローク)	220 cm ³ ($\phi 100 \times 28$ mm)
ヒータ管形式 (外径×内径×長さ×本数)	シェルアンドチューブ式 ($\phi 6 \times \phi 4 \times 630$ mm×64 本)
再生器形式 (外径×内径×長さ)	積層金網 ($\phi 135 \times \phi 104 \times 69$ mm)
ヒータ管形式 (外径×内径×長さ×本数)	シェルアンドチューブ式 ($\phi 3 \times \phi 2.2 \times 108$ mm×420 本)
ピストン駆動機構	スコッチ・ヨーク機構
発電機形式	三相誘導発電機 (ハーメティック式)
目標出力@定格回転数	500 W@1000 rpm
定格作動ガス圧力	2~4 MPa
作動ガス	ヘリウム



図2 銅製ヒータ

の直動運動を実現できる機構である。接触部の硬度や軸受とヨークとのクリアランス管理に課題がある。

3. 実験用スターリングエンジンの性能特性

平成17年2月に上記の実験用エンジンが完成し、その後、高温空気を熱源とした性能測定実験を進めている。以下、現在までの実験結果の一部を紹介する。

図3は、高温空気温度を400℃、高温空気流量を1000 NL/minとし、作動ガスにヘリウムおよび窒素を使用した場合のエンジン回転数に対する図示出力並びに膨張空間ガス温度の実験結果を示している。これより、作動ガスにヘリウムを用いた場合、図示出力は窒素を用いたときの図示出力よりも30%程度も大きく、最大値が得られるエンジン回転数が高まっていることがわかる。これは熱交換器、特に再生器における圧力の影響を大きく受けているためである。

同図における最大図示出力は、エンジン回転数600 rpmにおいて210 W程度であり、目標性能には至っ

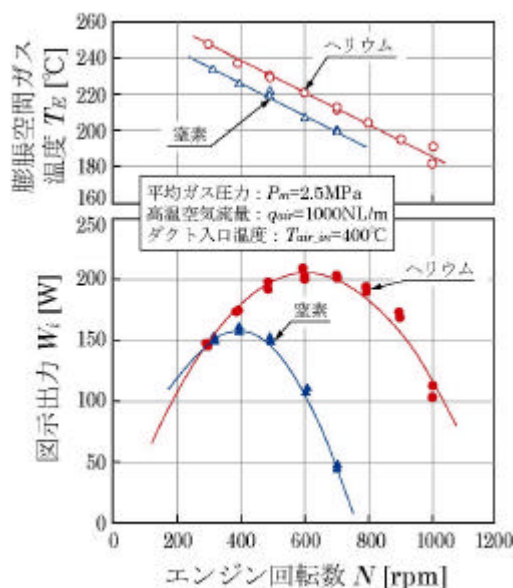


図3 膨張空間ガス温度および図示出力の測定結果

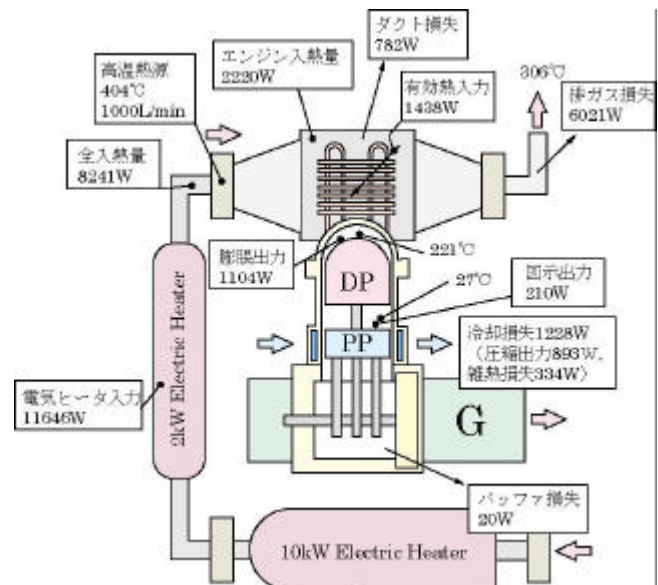


図4 エネルギーバランス

ていない結果である。これは、作動ガス圧力が低いこと、膨張空間ガス温度が設計時の値よりも低いことが原因であると考えられる。

図4に最大図示出力時のエネルギーバランスを示す。電気ヒータで加熱された全入熱量約8.2 kWの空気は、排ガス損失の約6.0 kWがダクト出口から排出されている。ダクト内では有効熱入力約1.4 kWがヒータで熱交換され、膨張出力の1.1 kWが作動ガスに伝達されている。そして、210 Wの図示出力が得られている。主な熱損失としては、ダクト部から大気への放熱されたダクト損失が782 Wである。これはダクト周辺を断熱することで低減できると考えられる。また、シリンダ壁での熱伝導損失等を含む雑熱損失が334 Wである。これらの損失は、従来のスターリングエンジンと比べてかなり低いレベルである。

4. あとがき

本報では、実験用スターリングエンジンの開発状況について述べた。本エンジンの現在までの総運転時間は300時間以上であり、その間、大きなトラブルもなく、概ね順調に運転を続けている。一方、目標性能を達成するためには、各種熱損失を低減するとともに作動ガス圧力を高めていく必要がある。さらに、機械損失や発電性能の評価等が今後の課題である。それらについては、今後も詳細な実験を継続するとともに、平成18年度に開発する新たな実験用スターリングエンジンの設計に反映させていく予定である。

参考文献

- (1) 山下他, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, 1986