

# 内航船舶用排熱回収システムにおける排気管流路の圧力損失

## Pressure Drop of Exhaust Pipe for Marine Heat Recovery System

石村 恵以子（海技研） 正 平田 宏一 正 今井 康之 正 川田 正國

Eiko ISHIMURA, Koichi HIRATA, Yasuyuki IMAI and Masakuni KAWADA

National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa Mitaka, TOKYO

In order to keep clean a harbor area, we develop a heat recovery system using a Stirling engine. A heat exchanger of the Stirling engine is located into an exhaust gas pipe of a Diesel engine. The pressure drop, which is caused by the heat exchanger, affects to the performance of the Diesel engine strongly. In this paper, the pressure loss is measured with an experimental engine system, and compared with calculated results of a CFD analysis.

Key Words : Stirling Engine, Waste Heat Recovery

System and Pressure Drop

### 1. まえがき

港湾に停泊している船用のディーゼルエンジンから放出される排ガスは、港湾地域の大气環境汚染の原因となっている。著者らはその解決方法の一つとして、運航中のディーゼルエンジンから放出される排熱をスターリングエンジン発電機によって回収し、電気エネルギーを蓄える排熱回収システムを提案している<sup>1)</sup>。

本排熱回収システムは、ディーゼルエンジンの排気管流路中にスターリングエンジンの熱交換器を組み込むものである。それによって生じる圧力損失はディーゼルエンジンの過給機の運動に影響するため、ディーゼルエンジンの出力性能に与える影響は大きい。本報では、排熱回収スターリングエンジンを当研究所内のディーゼルエンジンの排気管流路に組み込んだ場合の圧力損失の実験結果を報告するとともに、CFD 解析による計算結果との比較・検討を行う。さらに、それらの結果を踏まえて実船実験に使用する排熱回収システムの排気管流路について検討する。

### 2. 実験装置概要

図 1 は実験を行ったディーゼルエンジンの排気管流路の概略図である。ディーゼルエンジンの諸元を表 1 に示す。以下の実験における排ガス圧力の計測箇所は、ディーゼルエンジンの過給機出口部 (A 点)、スターリングエンジンの上流部 (B 点) 及び下流部 (C 点)、さらにその下流の D 点である。なお、主要部の排気管内径は約 150 mm、排気管流路 A 点から D 点までの長さはおよそ 14.5 m である。スターリングエンジンの目標出力は 500 W であり、その熱交換器は外径 6 mm の伝熱管 64 本で構成された多管式熱

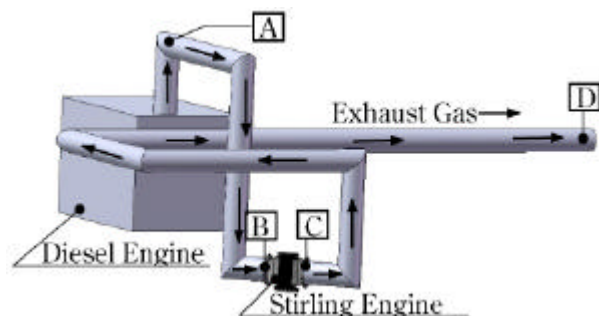


Fig. 1, Outline of Exhaust Gas Flow Line

Table 1, Specifications of Diesel Engine

Engine Type	Matsui MU323DGSC (3 cylinder, 4 stroke)
Cylinder Bore	230 mm
Piston Stroke	380 mm
Rated Power	257 kW (350 PS)
Rated Engine Speed	420 rpm
Fuel	Heavy Oil (A)

交換器である。

### 3. 実験結果並びに CFD 解析との比較

以下、スターリングエンジンをディーゼルエンジンの排気管流路に組み込んだ際の圧力計測並びに CFD 解析を行う。解析には市販ソフトウェアである SolidWorks 及び COSMOSFloWorks を使用する。

3.1 実験結果 表 2 にディーゼルエンジンの運転条件並びに実験により簡易的に求めた排ガス流量を示す。本実験では、過給機出口の排ガス温度が約 400 °C になるように回転数と負荷を調整している。図 2 は実験結果の一例であり、回転数 420 rpm における 1 サイクルあたりの圧力変動 (ゲージ圧) である。これより、排ガス圧力は 1 サイクル中 3

Table 2, Operating Condition of Diesel Engine

	Engine Speed (rpm)	Shaft Power (kW)	Flow Rate of Exhaust Gas (kg/s)
1	265	66	0.1437
2	333	80	0.1857
3	382	106	0.2281
4	420	116	0.2642

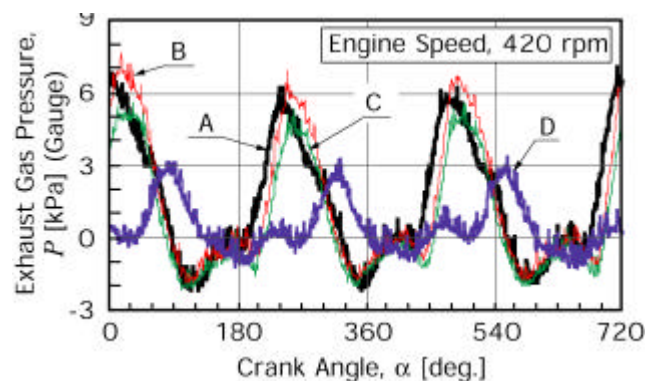


Fig.2, Experimental Result of Exhaust Gas Pressure

つの極大値を持つことがわかる。これは、本ディーゼルエンジンが3気筒であるため、排気弁の開閉に合わせて変動が繰り返されているものと考えられる。また、排気管流路上流側のA点から下流側のD点にかけて、排ガス圧力の最大値は徐々に小さくなり、位相が少しずつ遅れていることがわかる。一般に、ディーゼルエンジンの排気管流路の圧力損失は、水柱マノメータを用いて平均的な圧力差によって評価される。以下、1サイクルの算術平均を求めて解析結果との比較を行う。本実験結果のように変動が大きい圧力をどのように評価するかは今後の検討課題である。

3.2 CFD 解析と実験結果との比較 CFD 解析を行うために、実験装置のA点・D点を含む全流路並びにスターリングエンジンの熱交換器をモデル化した。解析における排ガス流量は変動がない定常流れとし、実験より簡易的に求めた平均排ガス流量を計算条件として与えている。図3は解析結果の一例であり、スターリングエンジンの熱交換器部(B点・C点)を抜き出したものである。同図は回転数を420 rpm としたときの解析結果であり、この部分の圧力損失は約680 Pa であることがわかる。

図4は、回転数に対する隣り合う計測箇所の圧力損失を示している。同図において、それぞれの実験結果は、1サイクルの圧力の平均値から求めている。これより、圧力損失は回転数の上昇に伴い増大していることがわかる。また、スターリングエンジンが配置されているB-C間の圧力損失が比較的大きいことがわかる。回転数420 rpm におけるB-C間の圧力損失は、実験結果が680 Pa、解析結果が470 Pa となった。実験結果と解析結果とは30 %程度の相違があるが、解析結果は各運転条件並びに各測定位置において実験結果を概ねよく表していると言える。また、回転数420

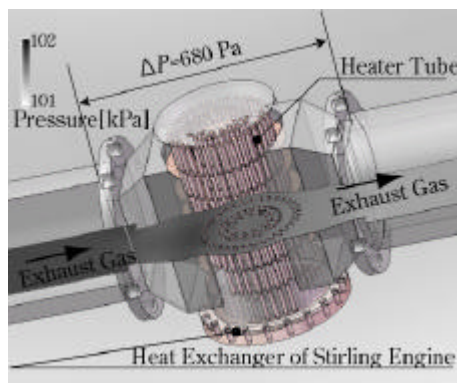


Fig. 3, Calculated Result of CFD Analysis

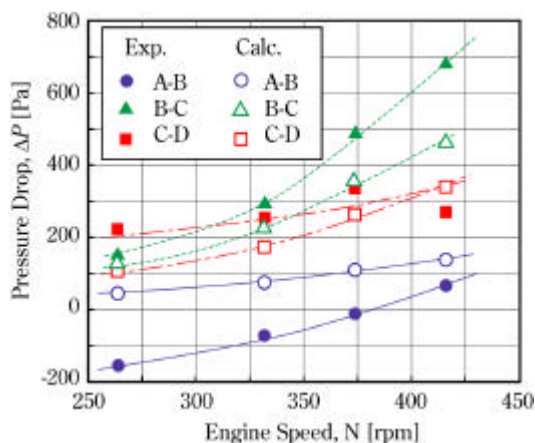


Fig. 4, Comparison of Calculated and Experimental Results

rpm における排気管流路全体の圧力損失を表すA点とD点の圧力損失は、実験結果1040 Pa、解析結果が940 Pa となった。ディーゼルエンジンの排気管流路の圧力損失は200? 300 mmAq (約2? 3 kPa) が目安であり、本運転条件においては圧力損失がディーゼルエンジンに与える影響は小さいと考えられる。ただし、実際の排ガス圧力は大きく変動しており、さらに詳細な評価を行う場合には、より整合性が高い解析モデルを構築することが必要であると考えられる。

#### 4.実証試験用排熱回収システムの設計

現在、実海域における実証試験を計画しており、それに向けたスターリングエンジン及びそれを囲むダクトの設計を進めている。上記の実験では1台のスターリングエンジンを排気管流路中に配置しているが、実証試験では、ほぼ同形状の3台のスターリングエンジンを直列に配置することを考えている。図5は実証試験用のダクト並びにスターリングエンジンの熱交換器のCFD解析を行った結果である。熱交換器の側部に十分な流路を確保した形状並びにその隙間に断熱材を挿入した形状の2種類に対して解析を行った。実証試験に使用する予定である船用ディーゼルエンジンの定格運転時の排ガス流量を計算条件として与えた結果、ダクトでの圧力損失は、十分な流路を確保した形状で約360 Pa、断熱材を挿入した形状で1300 Pa となった。

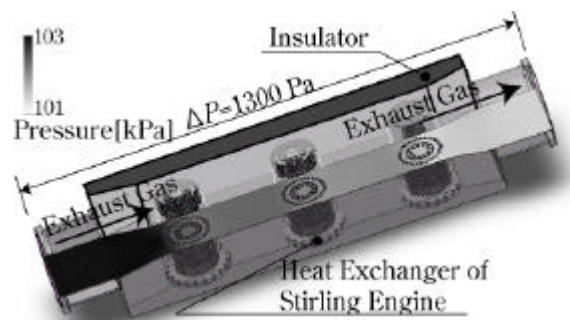


Fig. 5, Calculated Results of Heat Recovery System

#### 5.あとがき

本報では、スターリングエンジンをディーゼルエンジンの排気管流路に組み込んだ際の圧力損失の計測並びにCFD解析を行った。その結果、定常流れを計算条件とした解析結果は、実測の平均排ガス圧力を概ねよく表すことがわかった。そして、実海域における実証試験に用いる排気管流路を設計するための圧力損失の試算を行うことができた。今後、実際の船舶に搭載する排熱回収システムの排気管流路について、圧力変動の取り扱いや、適切なモデル化手法を検討することにより、高性能な排熱回収システムを開発していきたいと考えている。

本研究は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 基礎的研究推進制度により実施されているものであり、関係各位並びに共同研究実施者に対し、深い感謝の意を表する。

#### 文 献

- (1) 平田ほか, スターリングエンジンを用いた排熱回収システムの開発(第1報 実験用エンジンの設計・試作並びに性能特性), 日本機械学会第10回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p. 97-100, 2006.