

# 有機ランキンサイクルを用いた 舶用主機関向け排熱回収設備の開発

Development of Waste Heat Recovery System for  
Marine Diesel Engine Using Organic Rankine Cycle



若 宮 和 輝	Kazuki Wakamiya	①
八 木 厚 太 郎	Kotaro Yagi	①
元 田 隆 光	Takamitsu Motoda	②
林 博 之	Hiroyuki Hayashi	③
深 井 康 宏	Yasuhiro Fukai	④
伊 妻 恭 平	Kyohei Izuma	⑤

## あ ら ま し

当社では有機媒体ランキンサイクル（Organic Rankine Cycle、以下ORC）を利用した船舶主機関向け排熱回収設備を開発し、有明工場のテストエンジンにおいて実証試験を実施した。本設備の特徴は、蒸気ランキンサイクルでは回収できなかった低温の排熱を、水よりも沸点の低い有機媒体を作動媒体として使用することによって回収できる点である。これにより、今まで未利用のまま棄てられていた舶用ディーゼル主機関からの排熱を回収し、推進力の加勢または発電に利用することが可能であり、燃料消費量や二酸化炭素排出量を改善することができる。今回の実証試験では、通常、未利用のまま棄てられている主機関の掃気排熱を回収し、機関負荷85%において機関軸出力の2%以上の出力が得られることおよび自動運転が可能であるということを確認した。

## Abstract

In general, most low temperature waste heat from internal combustion engines is discarded without being used effectively. To utilize waste heat, a lot of technologies have been studied and developed. The Organic Rankine Cycle (ORC), a recognized and proven technology, can convert low grade waste heat to electricity or propulsion assisting power by using a low boiling point medium as a working fluid. Therefore, it remarkably reduces the fuel consumption and consequently the CO<sub>2</sub> emission of a marine engine.

This study aims to develop a waste heat recovery system for marine engines equipped with the ORC system. The ORC test facility was set up to recover waste heat from the scavenge air circuit of the test engine in our Ariake works. To evaluate the efficiency of each component and verify that the automatic control system operates successfully, the field test was carried out. The results confirmed that the power output of the ORC system can produce more than 2% of the original engine output at 85% engine load. It was also verified that ORC can be operated automatically.

## 1. 緒 言

近年、地球温暖化は世界的に重要な環境問題となっている。地球温暖化の主要因とされる温室効果ガスは

数種類あるが、影響が大きいとされるのが二酸化炭素である。二酸化炭素は様々な産業から排出されており、例えば2012年度に輸送分野から排出された二酸化炭素量は、全排出量のうち約18%を占めるが<sup>1)</sup>、輸送分野からの二酸化炭素排出量は2001年度を境に減少傾向である。これは自家用トラックから営業用トラックへ貨物輸送手段の転換が進んだためである。さらに二酸化炭素排出量を削減するためには、より輸送効率の良い手段、例えば船舶を用いた輸送に転換していくことが必要である。船

① Hitz日立造船(株) 技術開発本部 環境・プラント研究室  
 ② Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 原動機ビジネスユニット 設計部  
 ③ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 原動機ビジネスユニット 技術部  
 ④ Hitz日立造船(株) 技術開発本部 機械・インフラ研究室  
 ⑤ Hitz日立造船(株) 環境・エネルギー・プラント本部 プラント設計部

船を用いた貨物輸送のトンマイルベースのエネルギー消費量は、他の貨物輸送方法と比較すると少ない。国交省も1991年からトラックや飛行機のようなエネルギー消費が多い輸送方法から、鉄道や船舶といった、エネルギー消費の少ない輸送方法へのモダルシフトを推進している。こうした状況の中、2011年7月のIMO海洋環境保護委員会においてGHG排出削減に関する海洋汚染防止条約(MARPOL条約)が改正された。これにより2013年以降、新たに建造される船舶は、船舶の種類毎に2013年から2025年までの期間で段階的に強化されるCO<sub>2</sub>排出基準を満たすことが義務付けられる<sup>2)</sup>。

現在、ほとんどの船舶の動力源としてディーゼルエンジンが使用されている。船舶用ディーゼルエンジンに関して、今日までに様々な熱効率改善技術が開発されてきた。熱効率は約50%にも達しており、他の内燃機関と比較して非常に高い。そのため、エンジン自体の熱効率をさらに改善することは容易なことではなく、残りの約50%の排熱をどれだけ利用できるかがエネルギー消費を低減させるカギとなる。

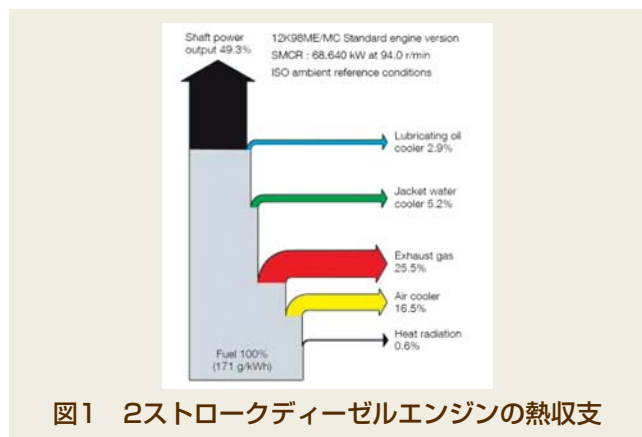


図1 2ストロークディーゼルエンジンの熱収支

一例として、図1に2ストロークディーゼルエンジン(MAN Diesel & Turbo社製12K98ME/MC)の熱収支を示す<sup>3)</sup>。排熱の中で、排気ガスは熱量が最も大きく、排熱回収ボイラーを介して蒸気として熱回収され、燃料の加温やその他の用役として使用される他、蒸気タービンを用いて発電に利用されることもある。排気ガスに次いで熱量が大きいのは掃気であるが、排ガス温度が約230-270℃であるのに対し、掃気の温度は約170-220℃と低く、ほとんどの場合は回収されることなく棄てられている。

以上のことを踏まえて、当社では2ストロークディーゼルエンジンの未利用排熱の中で比較的熱量が大きい掃気排熱を対象に、ランキンサイクルを用いた排熱回収装置を開発し、当社テストエンジン(HITACHI-MAN B & W 4S50ME-T9)を用いて実証試験を実施した。本稿では、排熱回収システムおよび実証試験について報告する。

## 2. 排熱回収システムと作動媒体

本章では、今回の開発において、排熱回収システムと

して使用したORCシステムと作動媒体に関して述べる。

**2.1 ORCシステム** 当社では、低温の熱源から効率的にエネルギーを取り出し、かつコンパクトな装置にするために、比較的簡素なシステムである有機媒体ランキンサイクル(ORC)を採用した。一般的な蒸気ランキンサイクルは作動媒体に水を使用するが、ORCは作動媒体に有機媒体を用いるランキンサイクルである。また、熱源系と媒体系の2つの経路を持つことから、バイナリーサイクルとも呼ばれる。

有機媒体にはトルエン、シリコン、代替フロンなど様々な媒体が適用可能であるが、以下では代替フロンを例に蒸気ランキンサイクルとORCの比較を述べる。水と代替フロンを比較すると、一般的に代替フロンの方が蒸発潜熱が小さく、沸点が低い。このため、水では回収できない熱量が小さな排熱や、低温の排熱からも効率的に回収できる。しかし、代替フロンは膨張機での熱落差が小さいため、同等の出力を得るためには多くの蒸気量が必要である。そのため、補機動力が大きくなるというデメリットもある。

図2に基本的なORCシステムのフロー図を、図3にサイクル線図を示す。ORCシステムは、媒体を圧縮するための循環ポンプ、熱源から熱回収し媒体を予熱・蒸発させる蒸発器、蒸気となった媒体から動力を取り出す膨張機、膨張機の排気を凝縮させる凝縮器で構成される。図2、図3中における1→2は循環ポンプによる圧縮過程、2→3は蒸発器における媒体の予熱・蒸発過程、3→4は膨張機による膨張過程、4→1は凝縮器によって媒体蒸気を復液する凝縮過程を示している。

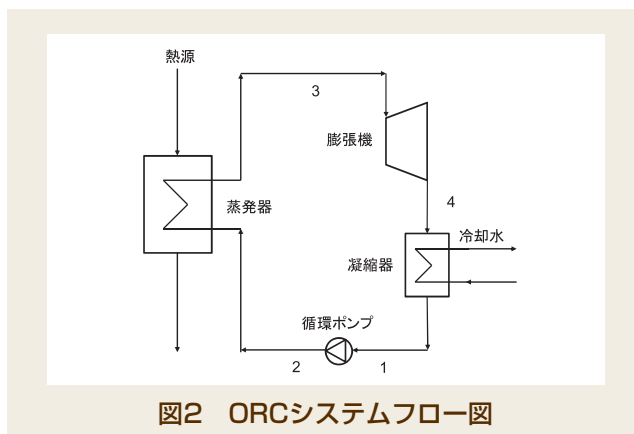


図2 ORCシステムフロー図

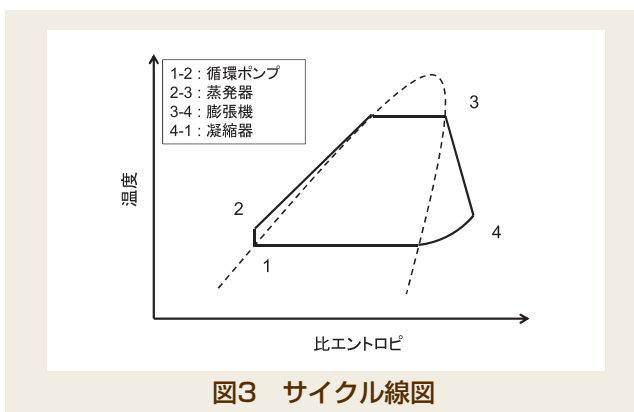


図3 サイクル線図

2.2 使用媒体の選定 ORCシステムにおける作動媒体の選定時に考慮すべき項目を以下に示す。

- 安全性
- 温度・圧力特性が適合
- 環境負荷が低い
- 耐久性(劣化、熱分解)
- 入手が容易

上記のa)に関しては、人体に影響がないことは大前提であるが、万一媒体が漏洩した場合の安全性を考慮すると不燃性であることが望ましい。b)に関しては、作動温度は熱源の温度レベルによって大まかに決められるが、作動温度に対する圧力が極端に高い場合は、リークや構成機器を高圧対応にする必要がありコストが増大する問題もある。また、凝縮圧力も重要な因子となる。凝縮圧力は冷却水の温度によって制限を受ける。凝縮圧力が負圧の場合、低压側に真空装置が必要となり、システム構成が複雑になる。また、装置内に空気が混入することによりシステムの性能が低下することも問題となる。c)に関しては、オゾン層破壊係数(ODP: Ozone Depletion Potential)は限りなく0に近く、さらに温暖化係数(GWP: Global Warming Potential)についても可能な限り小さいことが望ましい。d)に関しては、ハイドロフルオロカーボン(HFC: Hydrofluorocarbon)系の媒体では、熱分解によって有毒ガスが発生する可能性がある。そのため、HFC系の媒体を使用する場合は作動温度に注意し、適した機器構成・制御システムとする必要がある。e)に関しては、コストの問題がある。ORCシステムは2.1節でも述べた通り、膨張機での熱落差が小さいため、出力を得るには多くの媒体量が必要となる。このため、コストを考慮すると工業用途に大量に使用されている媒体は単価も低く、入手が容易であるので作動媒体に適している。

以上より、排熱条件、経済性、安全性、作動媒体の特性などを考慮し、今回の2ストロークディーゼルエンジンの掃気排熱からの熱回収には、作動媒体としてHFCの一種であるR245faを採用した。R245faの主な特性を表1に示す。

表1 代替フロン(R245fa)の特性<sup>4)</sup>

化学式	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>
色	無色
におい	弱い
沸点	15.3℃
融点	-103℃
熱分解温度	>250℃
臨界点	3.64MPa-154.1℃
可燃性	なし
毒性	なし
オゾン破壊係数(ODP)	0
温暖化係数(GWP)	1030

### 3. 実証試験機

本章では実証試験機の構成機器の仕様、制御システ

ムについて述べる。

3.1 試験機の構成 船舶の機関室はスペースが限られており、装置はコンパクトであることが望ましい。本開発では、従来の機関室を大きく変更することなく装置を設置することを想定し、機器構成を検討した。試験機の構成を図4に示す。主な構成機器は、一般的なランキンサイクルシステムと同様、蒸発器・膨張機・凝縮器・循環ポンプである。各機器の仕様を表2に示す。本試験機では、機関負荷が85%においてORCシステムが最高効率となるように設計点を設定し、機器仕様を決定した。また、設計点以上の機関負荷において、タービンの定格以上の蒸気が発生した場合、余剰蒸気をタービン排気側にバイパスするラインを設けている。

タービン動力の利用方法として、主機関のクランク軸に助勢する軸加勢方式と、発電機を駆動する発電方式の2つの運転モードについて試験を行った。

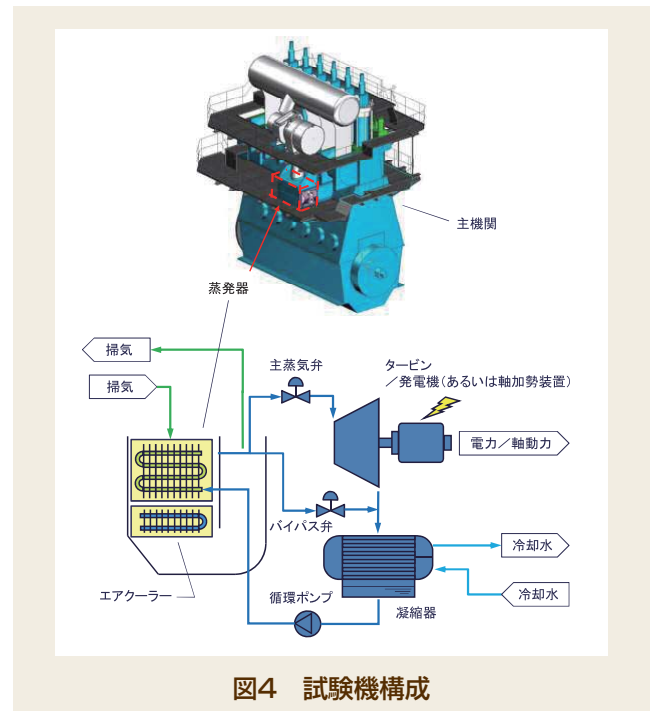


図4 試験機構成

表2 構成機器仕様一覧

機器名	項目	仕様
蒸発器	型式	プレートフィンチューブ
	出力	200kW
膨張機	型式	速度複式衝動タービン
	出力	190kW
クラッチ	型式	摩擦板式電磁クラッチ
凝縮器	型式	プレート式熱交換器
循環ポンプ	型式	縦型2段遠心ポンプ

実証試験で使用した蒸発器の配置図を図5に示す。蒸発器は、主機関の掃気ダクト内に設置するためにコンパクトなプレートフィンチューブ式を採用した。これにより、主機関側の改造を最小限にすることができる。また、

ORC停止中も主機関の運転に影響を及ぼさないように、ORC蒸発器の下流には、掃気の冷却に必要な従来通りの性能を持つエアクーラを設置した。

発電機は、かご型三相誘導発電機を採用した。かご型発電機は同期発電機と異なり、調速機や励磁機を必要とせず、システムを簡潔にすることが可能である。さらに、構造がシンプルであり、消耗する箇所は軸受部分のみであるため、メンテナンス性が良い。

膨張機には速度複式衝動タービンを採用し、発電方式では発電機と直結するシステムとした。軸加勢方式では、ギアを介してクランク軸とタービン軸を結合し、タービンで得られた動力を推進トルクの助勢として利用する。ギアとタービン軸の間には摩擦板式電磁クラッチを設置し、熱源の負荷が低い時は切り離し、負荷が高くなる時にクランク軸とタービン軸を結合するシステム構成とした。

凝縮器はコンパクトで低コスト、船舶でも使用実績の多いプレート式熱交換器を採用した。冷却水に海水を使用するため、プレートにはチタンを採用した。

循環ポンプは設置面積が少なくなるように、縦型の2段遠心ポンプを採用した。

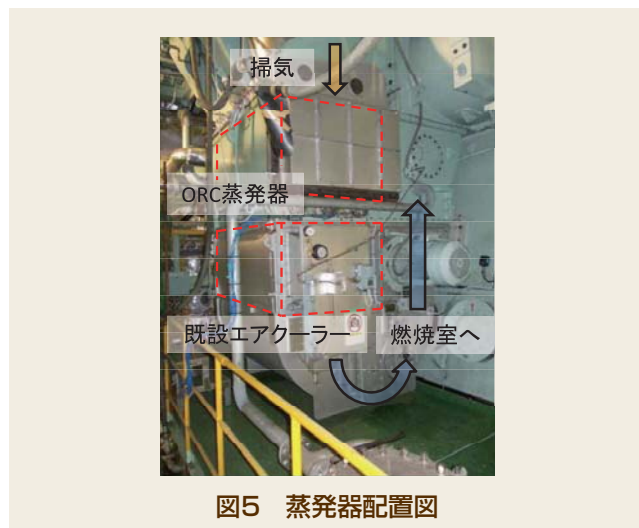


図5 蒸発器配置図

**3.2 制御システム** 主機関運転時において、掃気の熱量は機関負荷の変動に応じて大きく変動する。低負荷では、掃気の熱量が小さくなり、ORCシステムの運転に必要な蒸気量を得ることができなくなる。そのため、ORCシステム運転状態を切り替えるための指標として、制御系に機関負荷を取り込み、自動でORC運転状態を切り替える制御系を構築した。

ORCシステムを起動すると循環ポンプが起動し、スタンバイ運転に移行する。スタンバイ運転では、蒸気温度と圧力が所定の条件に達するまでタービンをバイパスし、作動媒体を装置内で循環させる。蒸気温度と圧力が所定の条件を満たし、ORCシステムで出力を得られるほど機関負荷が高い場合、タービンへの蒸気注入を開始し負荷モードへ移行する。負荷モードでは、タービン入口の主蒸気弁を開けてタービンを加速し、調速運転を行う。タービン速度が同期速度付近になったところで軸加勢方

式ではクラッチを接続、発電方式では発電機を系統に併入して負荷運転に移行する。負荷運転中、主蒸気弁とバイパス弁で前圧制御を行っており、蒸気圧を一定に保っている。機関負荷が低下した場合、負荷から解列して再びスタンバイ状態に戻る。以上のような運転を全て自動で行うように制御系を設計した。

## 4. 試験結果

本章では、ORC出力、ORCシステムの中で性能に大きく関わる機器である蒸発器の性能評価および自動運転の確認結果について述べる。

**4.1 ORC出力** 図6に軸加勢試験時で得られたORC出力を示す。縦軸はテストエンジンの機関出力に対するORCの出力を示している。図6より、本実証試験では、設計点である機関負荷85%時に、機関軸動力の2.2%に相当するORC出力が得られることを確認した。図6では設計点より高負荷側でORC出力が低下しているが、これはタービンバイパスによって凝縮温度が上昇したためである。一般的に、機関負荷が高くなるほど掃気の排熱量は大きくなり、媒体の蒸気量も増えるため高出力を得ることができる。しかしながら、本試験装置の場合は、設計点以上の機関負荷において、蒸気量がタービンの定格以上になった場合、余剰蒸気をタービン排気側へバイパスする。バイパスした高温の媒体蒸気は凝縮器に送られ、凝縮温度が上昇しタービン排気温度も上昇する。その結果、タービンにおける熱落差が小さくなり、設計点より高負荷側では出力が低下している。

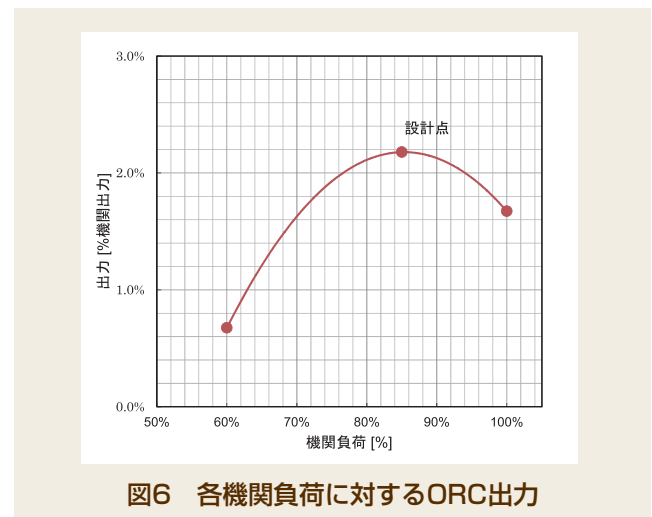


図6 各機関負荷に対するORC出力

**4.2 蒸発器の性能評価** 熱交換器の作動媒体に冷媒を用いた例は報告されているが<sup>5)、6)</sup>、R245faを用いた例は少ない。本実証試験では、作動媒体にR245faを用いた場合の蒸発性能と管内圧力損失を評価した。

各機関負荷に対する媒体の蒸発量を図7に示す。縦軸は、定格蒸発量で無次元化している。図7より、測定結果は各負荷とも計画値とほぼ同等の値であり、計画通りの蒸発性能を示した。

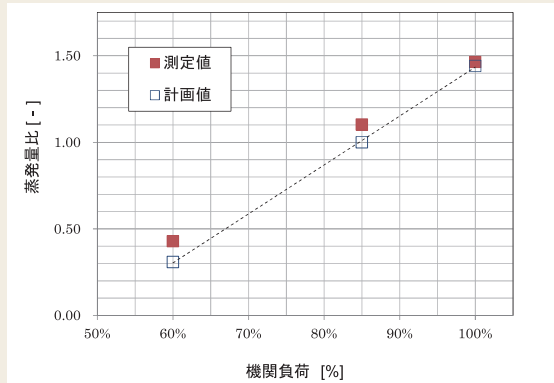


図7 各機関負荷に対する媒体の蒸発量

また、図8に蒸発器の管内圧力損失係数を示す。図の横軸は定格蒸発量で無次元化した。縦軸の圧力損失係数は蒸発器入口配管の動圧から算出した。損失係数の計算式を以下に示す。

$$\zeta = \Delta P / \frac{1}{2} \rho v^2$$

$\Delta P$  : 蒸発器管内圧力損失[Pa]

$\rho$  : 蒸発器入口配管内の媒体密度[kg/m<sup>3</sup>]

$v$  : 蒸発器入口配管内の媒体流速[m/s]

実線は分離流モデルの理論値、破線は均質流モデルの理論値である。一般的に分離流モデルは作動媒体の気-液の密度比が大きな系について妥当なモデルとされている<sup>7)</sup>。それに対し、今回用いたR245faのような気-液の密度比が小さい流体は、均質流モデルに近い特性を持つと考えられる。蒸発器設計時には、管内圧力損失に関して、分離流モデルと均質流モデルそれぞれに対して解析を行った。両モデルの理論値を比較すると、分

離流モデルの方が大きな値であるため、設計時には安全側の値である分離流モデルを使用した。

図より、測定値は均質流モデルに近い値であることが分かる。したがって、R245faのような気-液の密度比の小さい流体の管内圧力損失特性は、均質流に近いということが確認できた。

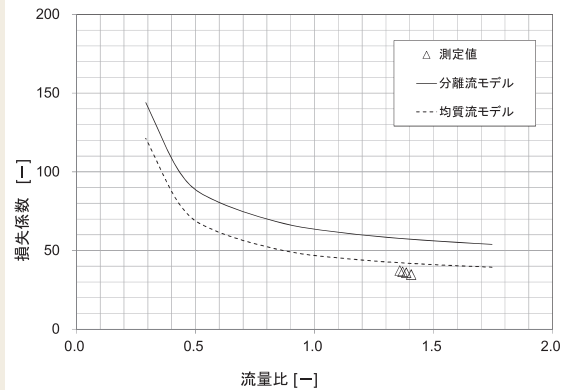


図8 蒸発器管内圧力損失

#### 4.3 制御システム

発電試験時で得られたORCの起動から停止までの時系列データ例を図9に示す。(a)の縦軸はそれぞれ同期速度(1800rpm)に対するタービンの回転数および主機関出力に対する発電機端出力を示している。(b)の縦軸は、媒体蒸気の温度・圧力値と設定入力(SV)値の差で表している。図中のデータは、主機関60%負荷運転時のものであり、ORCは冷態から起動した。スタンバイ運転、タービンの調速運転を経て、起動から20分程度で負荷運転まで移行し、設計通りの制御動作が問題なく行えることを確認した。

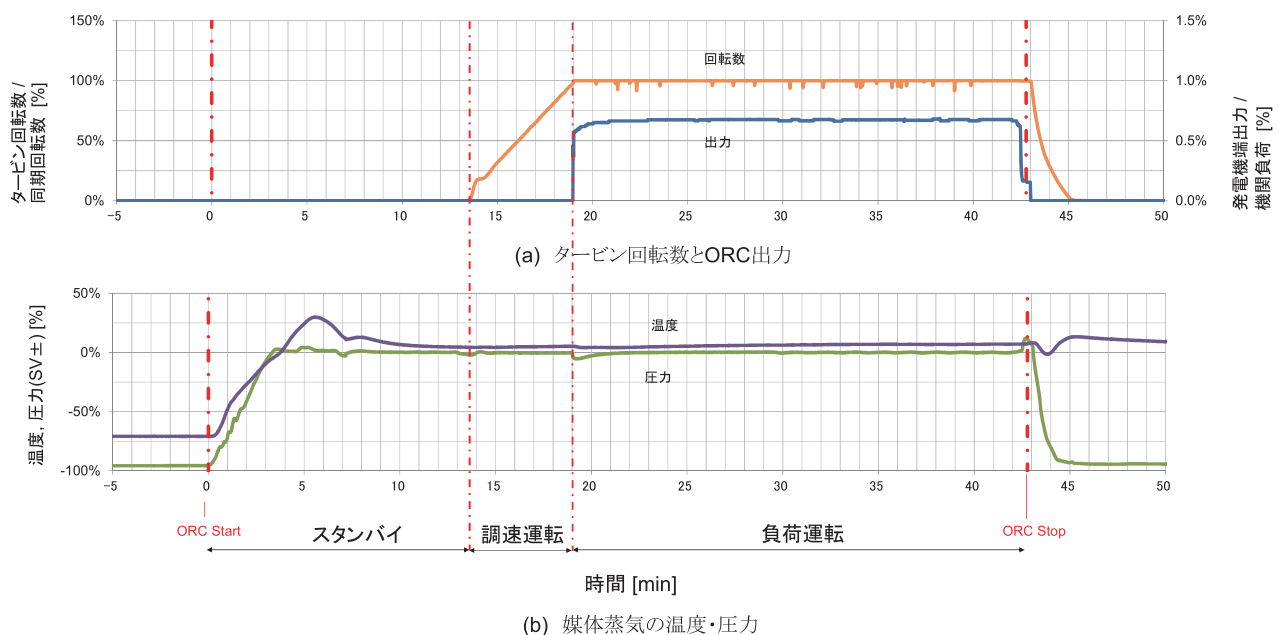


図9 ORC自動運転データ例

## 5. 結言

船用2ストロークディーゼルエンジンの掃気排熱の回収を目的としたORC設備を試作し、4気筒テストエンジンを用いて実証試験を行い、以下のような結果を得た。

- (1) 機関負荷が設計点である85%で運転中、主機関の軸動力の2.2%に相当する出力をORCで得られることを確認した。
- (2) 蒸発器の設計・計画時に重要な要素である管内圧力損失について、R245faのような気-液の密度比が小さな流体は均質流に近い特性を示すことを確認した。
- (3) 種々の運転条件および運転モードで試験を実施した。その結果、今回開発したORC装置において、起動から停止まで、問題なく自動運転できることを確認できた。今回の実証試験では、連続運転時間が十分ではないため、装置および機器の耐久性については課題が残るが、商用化に向けた有益な知見が得られた。

本開発では、船舶の排熱の中でほとんど利用されていない掃気排熱に着目し、排熱を回収する手段の一つとしてORCを用いた排熱回収設備を開発した。この技術は排気やジャケット冷却水などの排熱にも適用可能であり、船舶の排熱回収技術において重要な技術になると考える。

## 参考文献

- 1) 環境省, 2012年度(平成24年度)の温室効果ガス排出量(速報値)について, **2013**.
- 2) 国土交通省, Press Release 国際海事機関(IMO)第65回海洋環境保護委員会(MEPC65)の開催結果, **2013**.
- 3) MAN Diesel & Turbo, Thermo Efficiency System.
- 4) 日本フルオロカーボン協会, 化学物質等安全データシート(MSDS)-R245fa, **2013**.
- 5) 佐賀大学海洋エネルギー研究センター, プレート式蒸発器の性能評価, **2000**, Vol.8 15-29.
- 6) 機能物質科学研究所報告, プレートフィン熱交換器内の冷媒の凝縮および蒸発伝熱特性, **1994**, 第8巻第1号 61-69.
- 7) 日本機械学会編, 改訂 気液二相流技術ハンドブック, **2006**, 24-37.

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 技術開発本部  
技術研究所 環境・プラント研究室  
若宮和輝  
Tel : 06-6551-9435 Fax : 06-6551-9906  
e-mail : wakamiya@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Technology Development Headquarters  
Technical Research Institute  
Environmental System & Plant Laboratory  
Kazuki Wakamiya  
Tel : +81-6-6551-9435 Fax : +81-6-6551-9906  
e-mail : wakamiya@hitachizosen.co.jp



若宮和輝



八木厚太郎



元田隆光



林博之



深井康宏



伊妻恭平