

船舶・燃料研究WG報告

2020年3月

船舶・燃料研究WG



Japan Marine and Auto
Petroleum Program

1. J-MAP船舶・燃料研究の目的・概要

1. 目的

IMO(国際海事機関)において、一般海域における船用燃料硫黄分規制の強化が決定し、2020年1月より施行される。

船舶用燃料油は、低硫黄化することにより性状が大きく変化するため、その利用に係る船舶機関への影響について、石油側・船舶側、双方で技術的な検討が必要である。

このため船舶・燃料研究WGを設立し、現行C重油を使用している船用エンジンへの低硫黄化に伴う性状変化の影響を把握する。

2. 概要

陸上試験: 代表的な船用エンジンタイプである中速4ストロークエンジン、低速2ストロークエンジンを用いて、低硫黄化に伴い大きな変化が想定される動粘度及び着火性に着目し、燃焼性への影響を把握する。

海上試験: 様々なエンジンタイプ、大きさ、使用形態の内航船舶を用いて、現行C重油と低硫黄船用油での燃焼性を比較し、実用上の問題の可能性を把握する。

陸上試験

— 試験機関を用いた燃焼試験結果 —

2018年 7月～10月, 12月

2019年 8月～ 9月

3. はじめに

低硫黄燃料油の品質確保にかかる燃焼試験について

- 船用燃料油のアベイラビリティの拡大を図るべく、低硫黄化に伴う性状変化が現行C重油を使用している船用エンジンに影響しないかを確認するため、実機による実際の使用を想定した燃焼試験を実施。
- 石油連盟及び日本船用工業会間で調整の結果、以下の試験燃料について燃焼試験を行う。
- また試験燃料毎に、特性の異なる複数の船用エンジンで燃焼試験を行う。

現行の船用燃料油と低硫黄化に伴う変化

現行	低硫黄化 (3.5%以下→0.5%以下) による性状変化	試験の要否
軽油	変化なし	不要
A重油 ・着火性: セタン指数40程度 ・動粘度: 2~20mm ² /s	硫黄分以外変化なし	不要
C重油 ・着火性: CCAI860程度 ・動粘度: 50~180mm ² /s	着火性や動粘度に 変化あり ・着火性: CCAI 860/ セタン指数35程度 ・動粘度: 2~180mm ² /s	性状変化の影響を 評価する試験が必要

試験燃料の性状

試験燃料	動粘度 (mm ² /s)	着火性	備考
試験燃料① (A重油に 近いもの)	2~20	セタン指数 35程度	・着火性、動粘度 を最も大きく変 化させた燃料
試験燃料② (①と③の 中間)	20~50	CCAI 860 /セタン指 数35	・動粘度によって ヒーティングレ ベルが変わるた め動粘度を①と ③の中間にした 燃料
試験燃料③ (現行の C重油)	50~180	CCAI 860 程度	・基準燃料とする

(注) セタン指数(CI: Cetane Index)・・・軽油やA重油の着火性を示す指標。

CCAI ...C重油の着火性を示す指標。

(※) 着火性及び動粘度レベルに変化がないC重油については、試験燃料③で評価する(低硫黄化燃料であっても、燃焼性は同等と判断)。

3. はじめに

試験燃料性状のねらい

想定シナリオ

現行、高硫黄C重油を使用している船舶が、C重油の代わりとして低硫黄燃料油を使用する状況を想定する。このため、現状のC重油を使用する場合の運転方法と同様に、A重油で起動した後に試験燃料に切替える。

試験燃料①: A重油に近い燃料油 (CI 35程度、動粘度2~20 mm²/s)

Point: 着火性と動粘度を最も大きく変えた燃料

➡ 起動時に従来のA重油を使用すれば、現在のC重油と同じように使用可能であることを確認。

試験燃料②: 中間動粘度燃料油 (CCAI 860 / CI 35程度、動粘度20~50 mm²/s)

Point: 動粘度に着目した燃料

➡ ①と③の中間レベルの燃料。低動粘度で、従来のC重油とは加熱条件が変わるが、適切に加熱すれば、問題なく使用できることを確認。

試験燃料③: 現行C重油相当燃料油 (CCAI 860程度、動粘度50~180 mm²/s)

Point: 基準燃料

➡ 着火性及び動粘度レベルに変化のない低硫黄C重油については、試験燃料③で評価する。

4. 燃焼試験に用いるエンジン

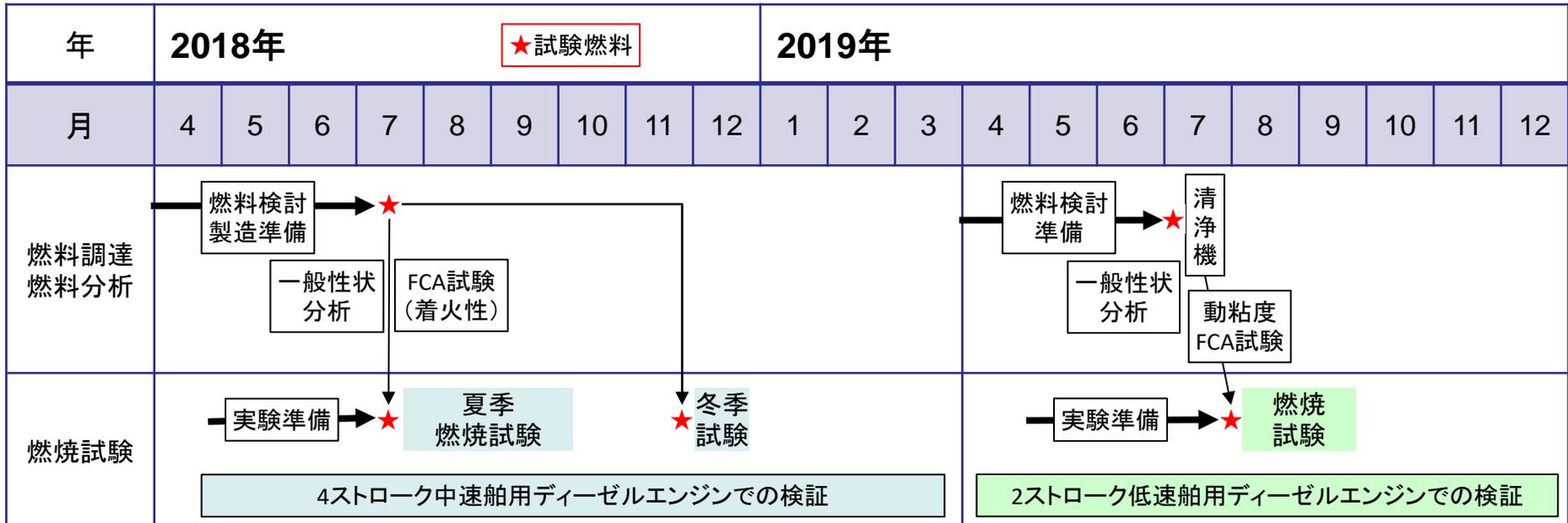
○代表的な船用エンジンタイプについて燃焼試験を実施。

エンジンNo.	1	2	3
タイプ	4サイクル中速エンジン (海技研)		2サイクル低速エンジン (東京海洋大学)
定格出力／回転数 シリンダー数	750 kW / 1000 rpm 6気筒	257 kW / 420 rpm 3気筒	1257 kW / 162 rpm 3気筒
搭載船例	499GT	199GT	3000GTクラス
外観			
特徴	中速エンジンの中で、機関回転速度が速く、ボア径の小さい機関のサンプル。機関回転速度が速いため、燃焼期間に余裕がなく、燃料性状の変化に敏感である。	中速エンジンの中で、機関回転速度が遅い機関のサンプル。機関回転速度が遅いため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンに比して燃料性状の変化に鈍感である。	機関回転速度が遅い2サイクル低速エンジン。燃焼期間に余裕があり、4サイクル中速エンジン(No.1 & No.2エンジン)に比して燃料性状の変化に鈍感である。

5. エンジン燃焼試験実施スケジュール

		2018年度			2019年度
エンジンNo.		1		2	3
試験時期		夏季	冬季	夏季のみ	夏季のみ
試験燃料	燃料①	n=1	n=1	n=1	n=1
	燃料②	n=1	n=1		n=1
	燃料③	n=1	n=1	n=1	n=1

スケジュール



6. 燃焼試験 条件・計測マトリックス

燃料	試験燃料性状		試験条件*		計測項目	
	動粘度 mm ² /s (50°C)	着火性	エンジン 運転条件	燃料噴射前 加熱条件	エンジン	エミッション
①	2 - 20	CI 35	船用特性 25% 50% 75% 100%	加熱なし	燃料噴射圧 筒内圧 熱発生率 着火遅れ 燃料温度 排ガス温度 冷却水温度 燃料消費量 ・ ・ ・	NOx CO ₂ CO O ₂ THC スート PM [EC,OC]** スモーク
②	20 - 50	CCAI 860 /CI 35		燃料加熱温度を適切に設定して実験を実施。 →メーカー推奨の動粘度範囲内に設定***		
③	50 - 180	CCAI 860		メーカー推奨の動粘度範囲内に設定		

* エンジン及び付帯設備の性能要件等により、一部実験条件に変更がある。

** PM計測は、エンジン1の夏季実験時のみ実施。

*** 各エンジンメーカーの仕様による。C重油の場合、通常は10~20mm²/sの範囲内でエンジンごとに指定されている。

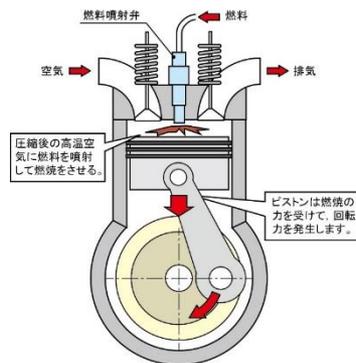
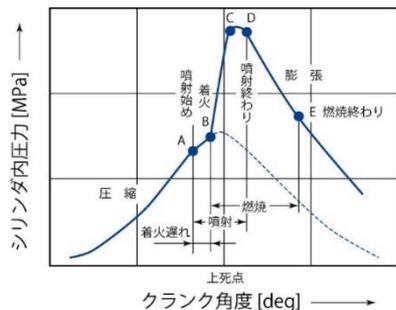
7. 燃焼試験

○負荷率25%*, 50%, 75%, 100%(50%以上が航海中の主な負荷率)の負荷率において、十分に安定させた状態で圧力波形や排ガス温度, 排ガス性状などを計測する。

* 負荷率25%は, 4ストロークエンジンでは, 従来のC重油で注意が必要な負荷率

(a) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力

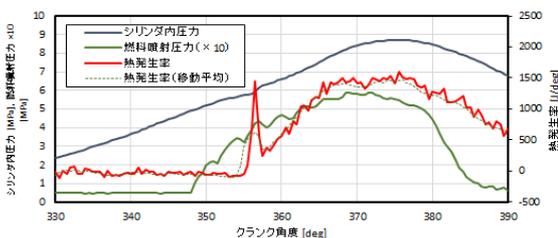
燃料の着火性を評価する指標の一つに着火遅れ(燃料を噴射してから着火するまでの期間)や最高シリンダ内圧力Pmaxがある。



(b) 圧力波形・熱発生率

シリンダ内圧力波形や熱発生率 $dQ/d\theta$ [J/deg]を詳細に分析することで, 燃料の燃焼状態を調べることができる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{V}{\kappa - 1} \frac{dP}{d\theta} + \frac{\kappa P}{\kappa - 1} \frac{dV}{d\theta}$$



(c) その他

その他の評価指標として, 排ガス温度や過給機特性, 排ガス性状などがある。

機関監視項目

- 機関出力
- 機関回転数, トルク
- 過給機回転数, ロードインジケータ値
- 燃料油消費量

(圧力項目)

- 潤滑油機関入口, 潤滑油過給機入口, 排気弁駆動油機関入口
- 燃料油機関入口,
- 1次冷却水機関入口
- 2次冷却水空気冷却器入口,
- 掃気圧力, 始動空気, コントロールエア,
- 過給機入口排気背圧, 過給機出口排気背圧

(温度項目)

- 過給機吸込温度, 掃気クランク温度, スカフティングボックス温度
- 排ガスシリンダ出口, 排ガス過給機入口・出口
- 1次冷却水機関入口, 1次冷却水シリンダ出口, 1次冷却水過給機出口
- 2次冷却水空気冷却器入口・出口
- 潤滑油機関入口・出口, ピストン冷却油出口, 高圧作動油機関入口

排ガス計測項目

- NO_x, O₂濃度: 化学発光式および磁気風式 濃度計
- CO, CO₂濃度: 赤外吸収式 濃度計
- スoot濃度: フィルタスモークメータ, マイクロsootセンサ
- スモーク濃度: オパシメータ

2018年度陸上試験結果

4サイクル船用ディーゼル機関
試験機関 No.1 & 2

夏季 2018年 7月-10月

冬季 2018年12月(試験機関No.1のみ)

8. 2018年度の燃焼試験に用いた試験燃料

名 称		試験燃料①	試験燃料②	試験燃料③
密度@15°C (g/cm ³)		0.8835	0.9408	0.9855
動粘度 (mm ² /s)	@40°C	2.43	---	---
	@50°C	2.03	35.2	153
	@75°C	---	15.1	45.0
流動点 (°C)		-42.5	-22.5	-5.0
引火点 (°C)		73.0	87.5	126.5
水分 (容量%)		0.03>	0.03>	0.27
残留炭素分 (質量%)		0.02	7.54	11.5
灰分 (質量%)		0.001>	0.001>	0.006
硫黄分 (質量%) ^{※1}		0.16	1.06	2.42
セタン指数(新)		35.4	---	---
CCAI		---	833	857
ECN ^{※2}		16.7	24.0	17.9

※1 燃料性状としては動粘度、着火性に着目し、燃焼性に影響しない硫黄分は規制値適合を条件としない。

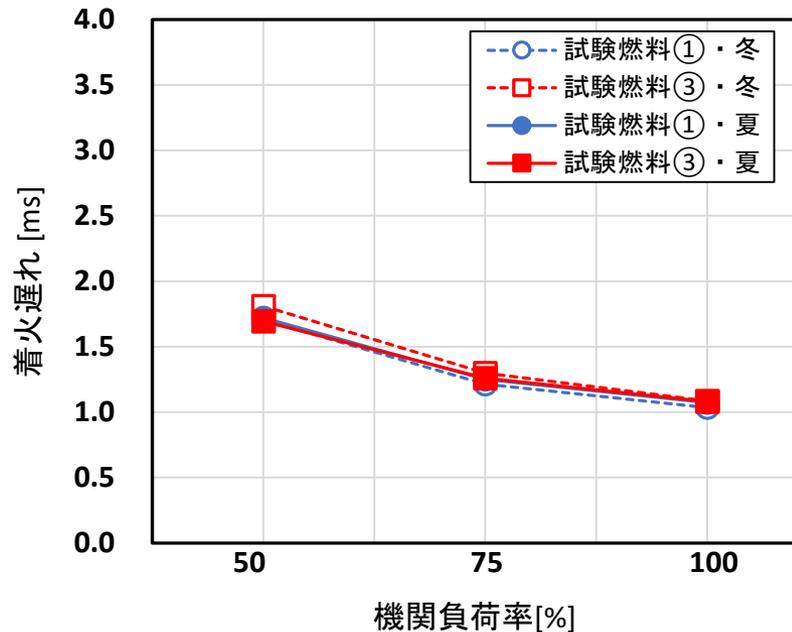
※2 推定セタン価。FCAIによる試験結果。

9. 燃焼試験に用いたエンジン

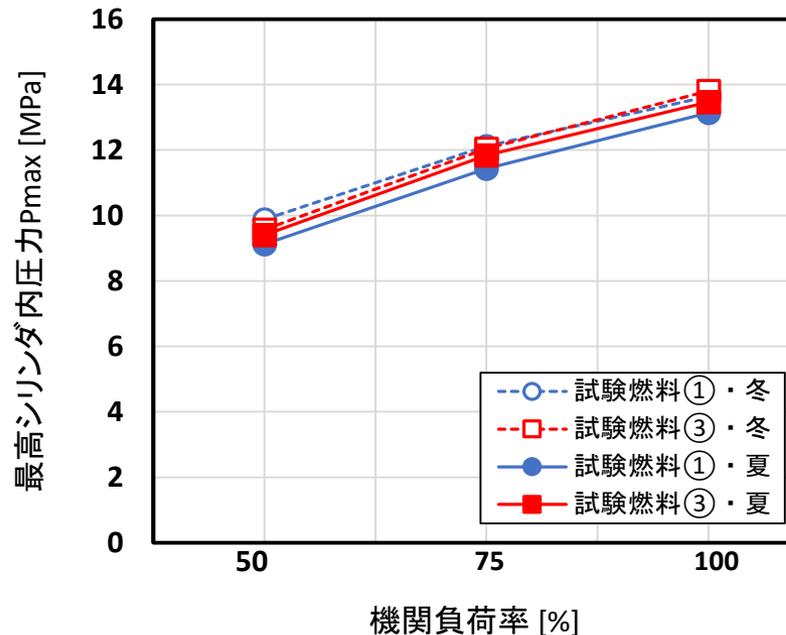
燃焼試験に使用したNo.1エンジン

No.		1	2
タイプ		4サイクル中速エンジン	
型式		新潟原動機 6L19HX	マツイ鉄工所 MU323DGSC
定格出力／回転数		750 kW / 1000 rpm	257 kW / 420 rpm
シリンダ数		6気筒	3気筒
シリンダ径×ストローク		190×260 mm	230×380 mm
燃料噴射系	燃料噴射	機械制御	機械制御
	開弁圧力	35.0 MPa	25.5 MPa
	噴射ノズル	φ0.32×9穴-噴射角140°	φ0.32×7穴-噴射角120°
過給機		あり	あり
冷却水ヒータ		あり	なし

(1) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

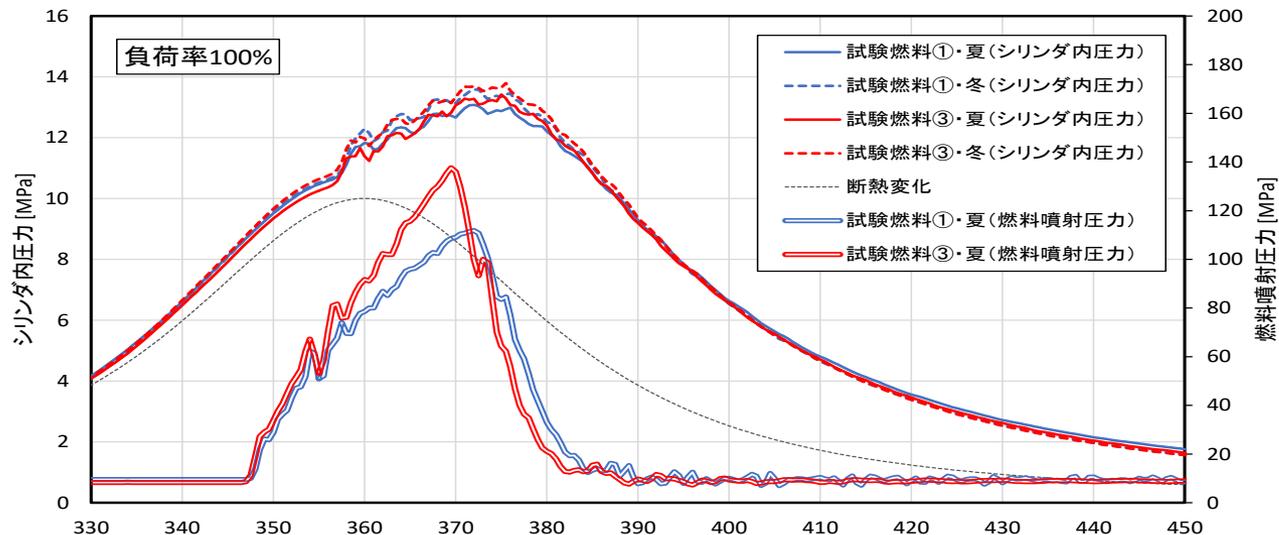


(b) 最高シリンダ内圧力Pmax

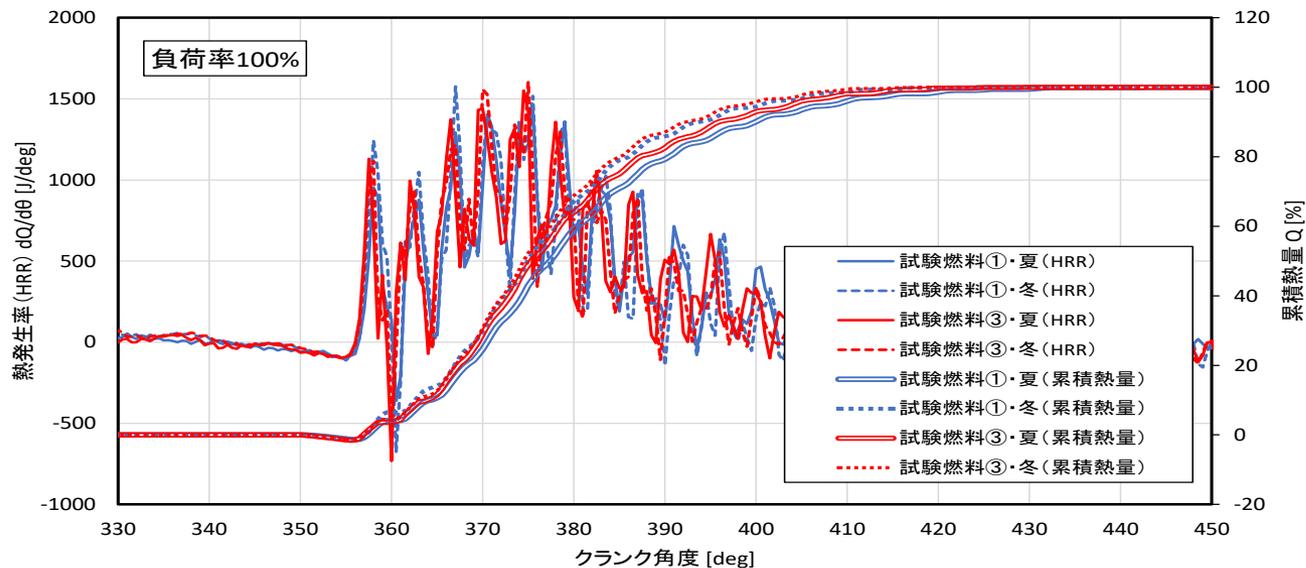
- 負荷率50%以上の範囲において、
着火遅れは、試験燃料①の試験燃料③とほぼ同じである。
最高シリンダ内圧力は、試験燃料①が試験燃料③よりもわずかに低い。
- 夏季・冬季で同様の傾向がみられる。
(機関室温度は冬季の方が15~20°C程度低い条件で試験を実施。)

9.1 試験機関No.1 (4スト/750kW/1000rpm) : 試験燃料①, ③

(2) 圧力波形および熱発生率 (負荷率100%)



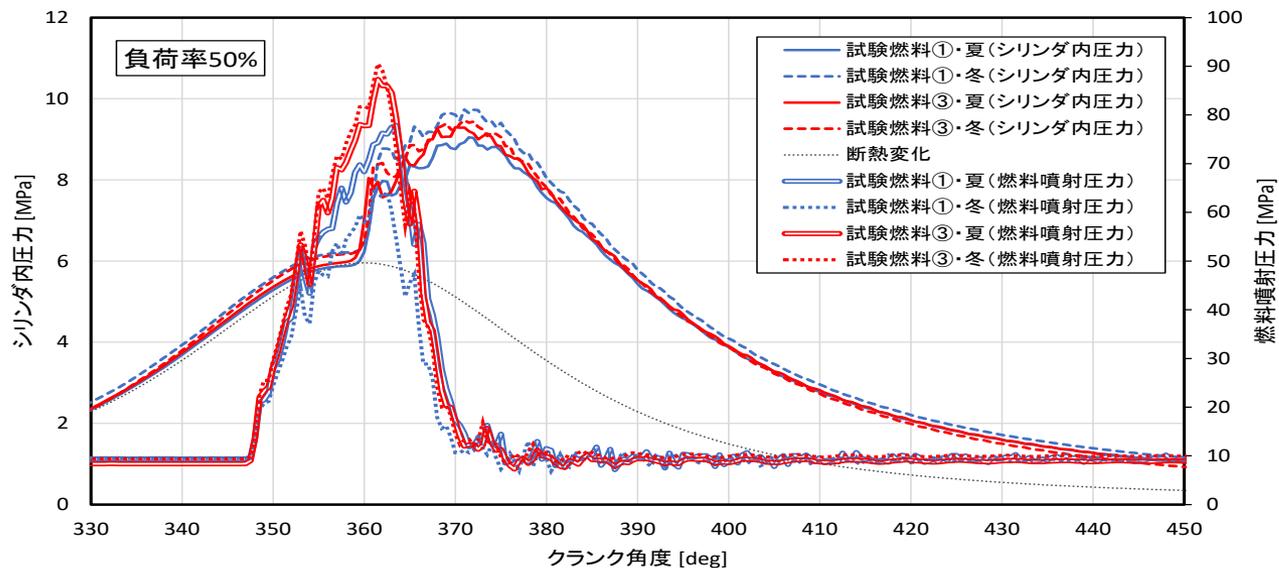
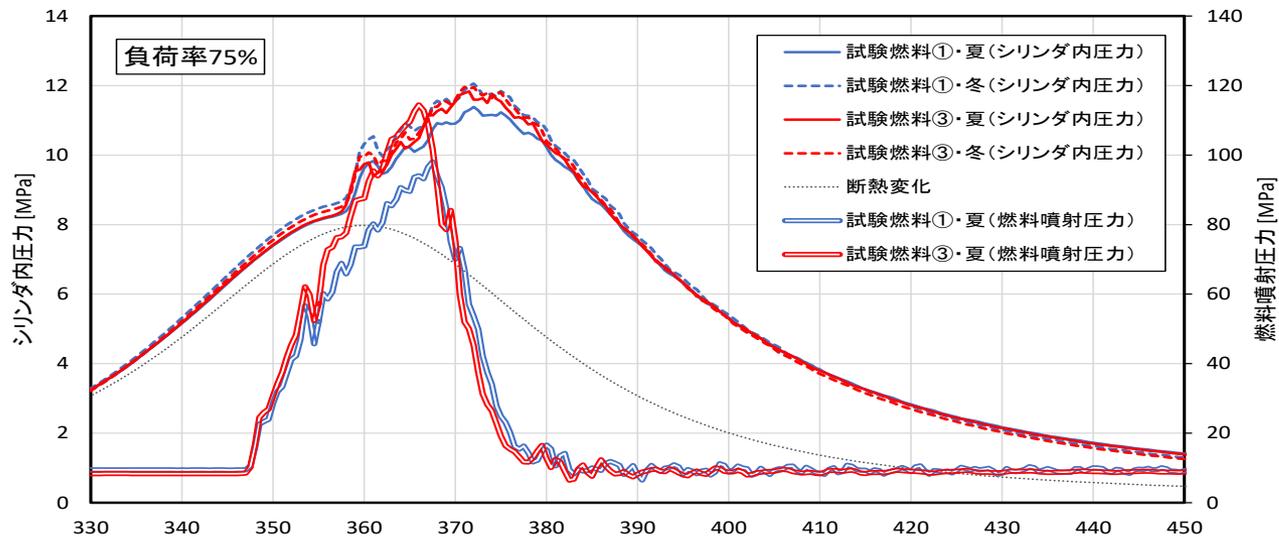
➤ 夏季・冬季ともに、負荷率100%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。



➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃焼期間に相当)は、燃料の種類による影響をほとんど受けていない。

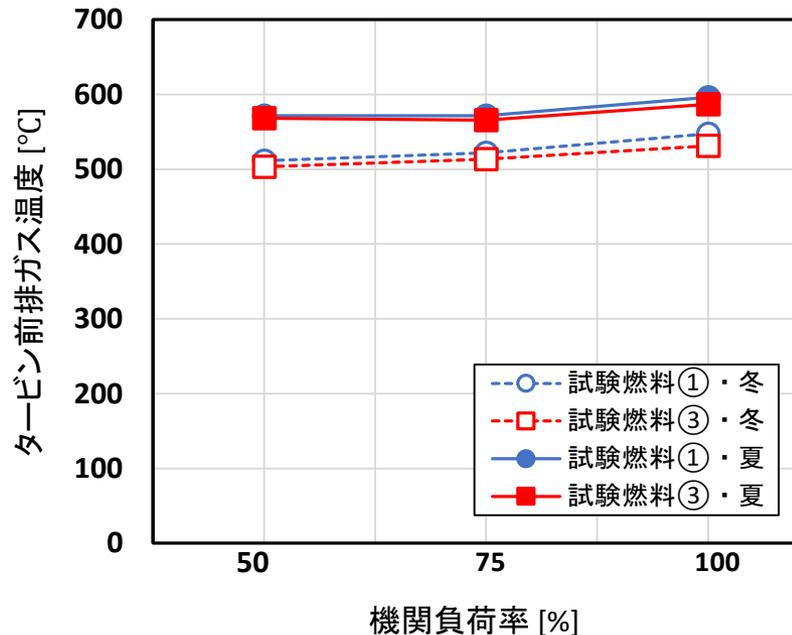
9.1 試験機関No.1 (4スト/750kW/1000rpm) : 試験燃料①, ③

(2) 圧力波形および熱発生率 (負荷率75%, 50%)

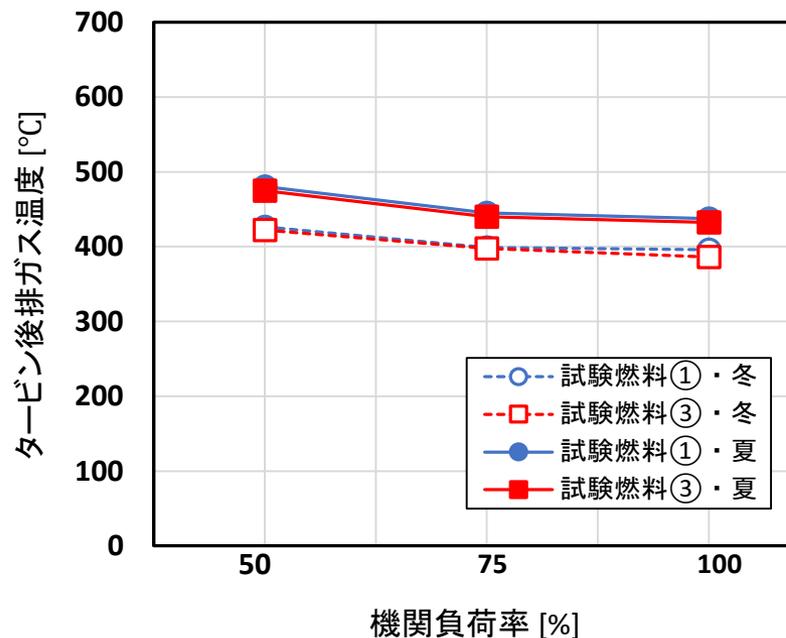


➤ 負荷率50%, 75%
もほぼ同様の結果
が得られており, 圧
力波形や熱発生率
は燃料種の影響を
ほとんど受けてい
ない。

(3) 排ガス温度



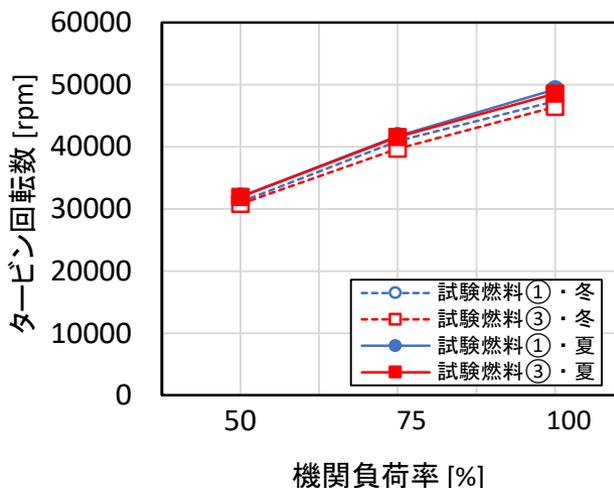
(a) タービン前排ガス温度



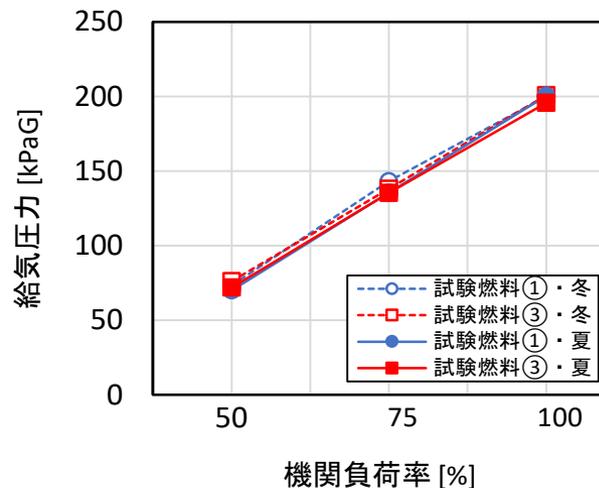
(b) タービン後排ガス温度

- 夏季・冬季ともに、タービン前後排ガス温度、回転数、給気圧力は、燃料種の影響をほとんど受けていない。

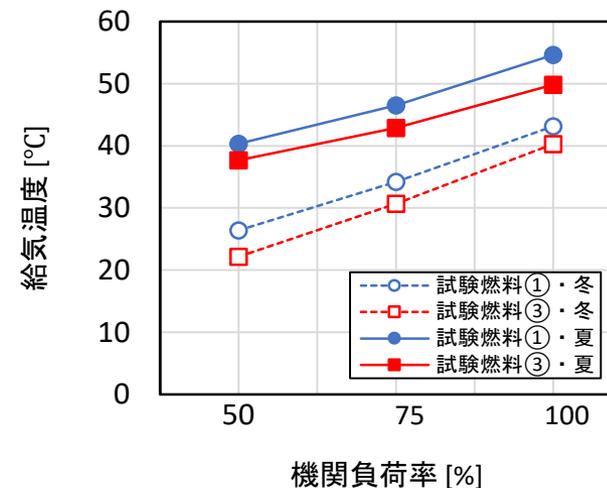
(4) 過給機特性



(a) タービン回転数



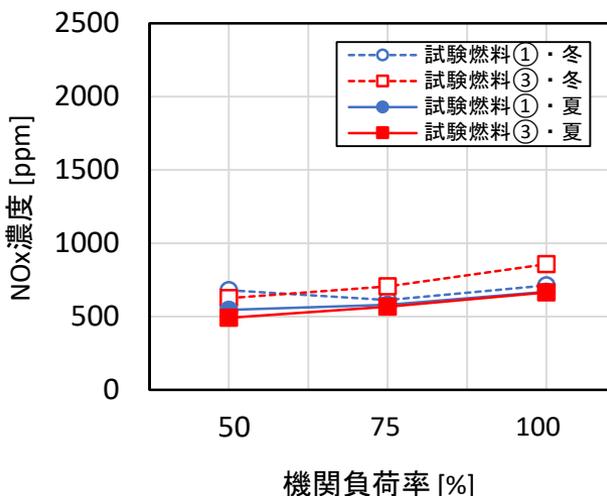
(b) 給気圧力



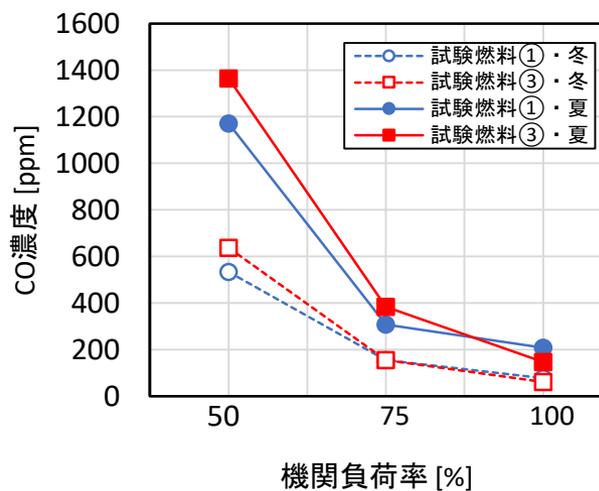
(c) 給気温度

- 冬期のタービン回転数がわずかに低い。
- 給気温度は冬季の方が10~15°C程度低く、タービン前後排ガス温度は冬期の方が50~60°C程度低い。

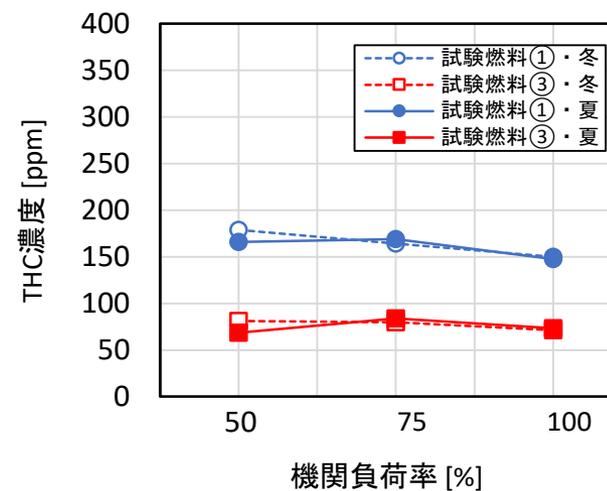
(6) 排ガス性状 (NO_x, CO, THC)



(a) NO_x濃度



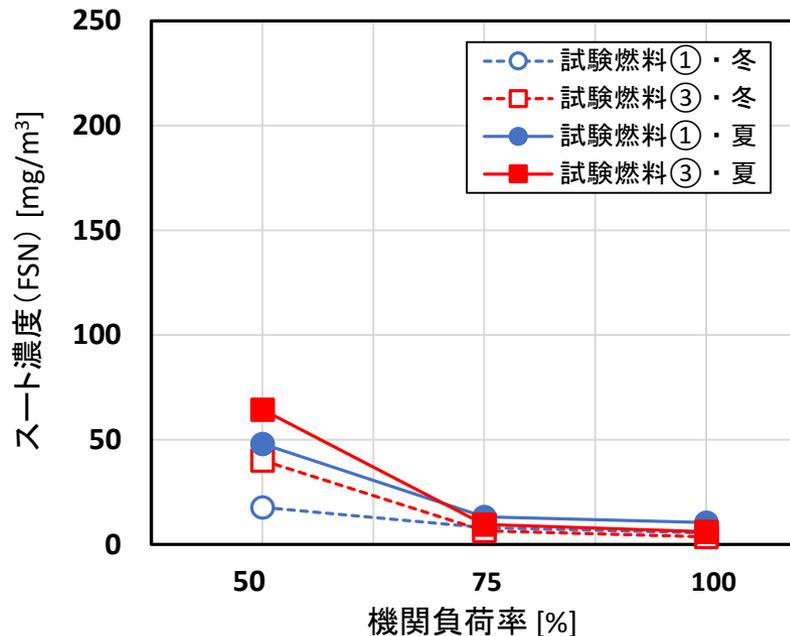
(b) CO濃度



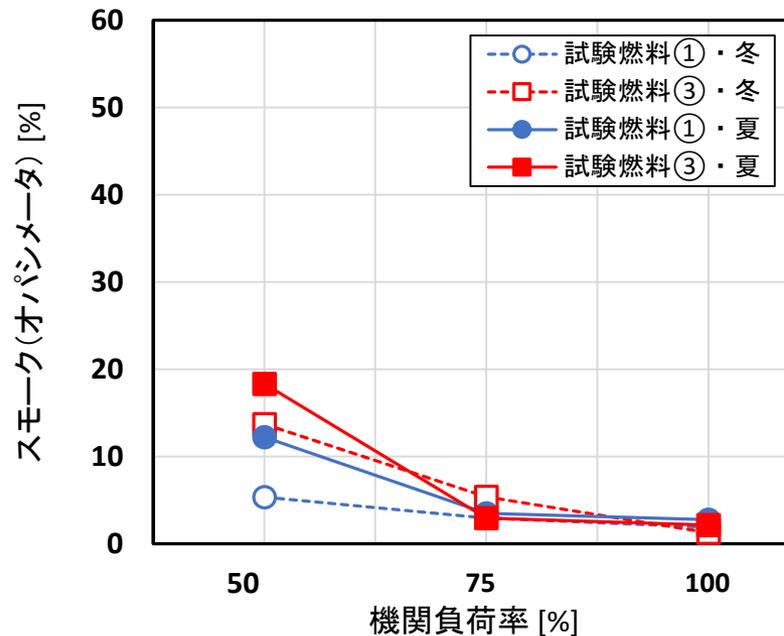
(c) THC濃度

- 負荷率50%以上の範囲において、
NO_x, CO濃度は、試験燃料①の試験燃料③とほぼ同じレベルである
THC濃度は、試験燃料①の方が試験燃料③に比べて高い
- 冬季のNO_x濃度は夏季よりわずかに高く、CO濃度は夏季よりも低い

(6) 排ガス性状(スート, スモーク)



(a) スート濃度 (FSN)

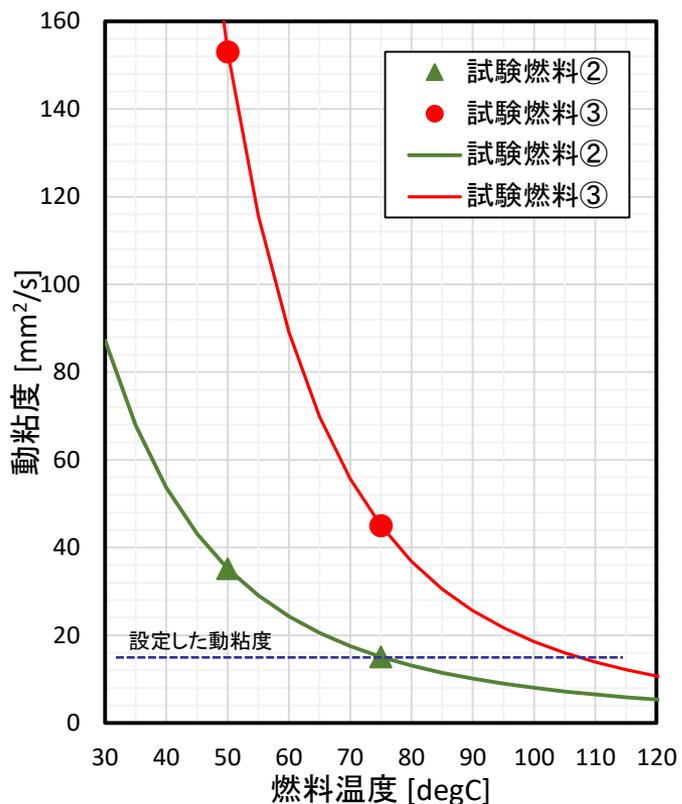


(b) スモーク濃度

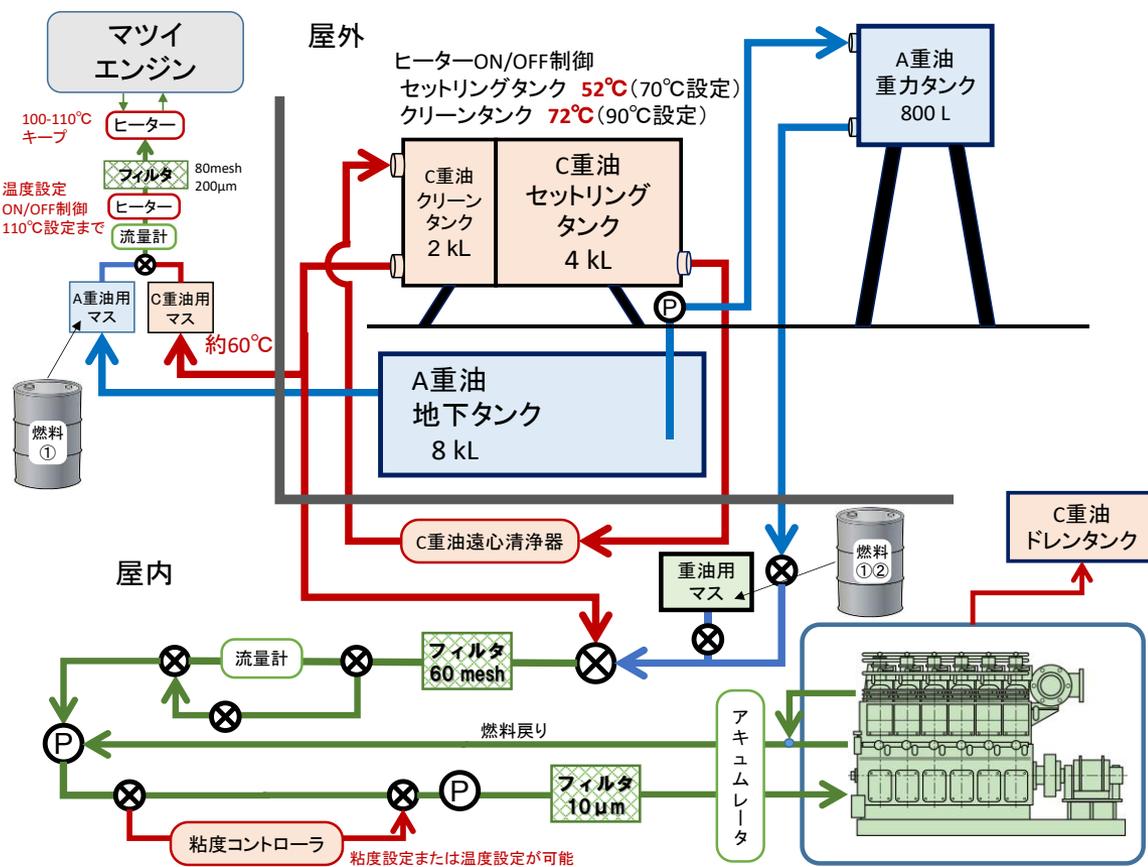
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①のスート濃度およびスモーク濃度は、試験燃料③とほぼ同じレベルである
- 冬季のスート、スモーク濃度は夏季よりも低い

(1) 試験方法の概要

- 燃料温度と動粘度の関係から、使用可能な動粘度レベルになるように粘度コントロールを行った。
- 本燃焼試験では、動粘度を約18mm²/sにコントロールした。

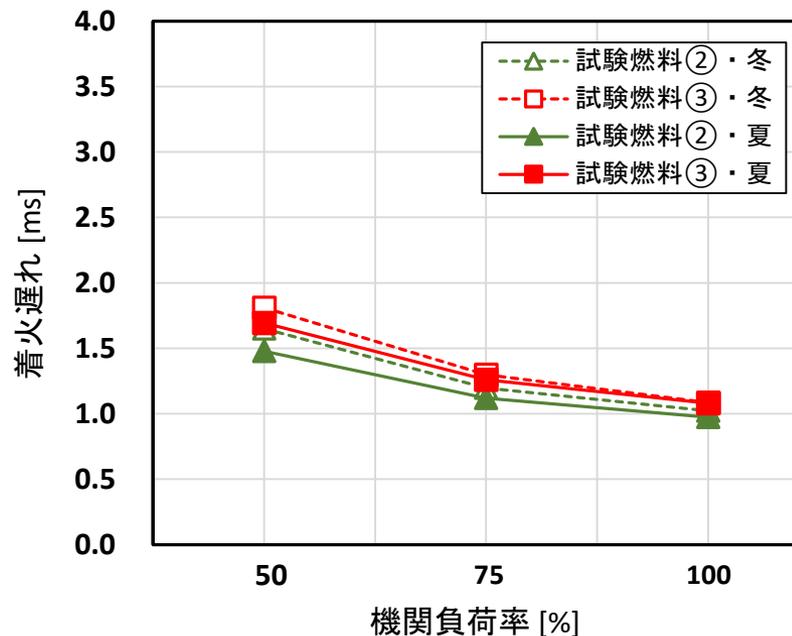


燃料温度に対する動粘度

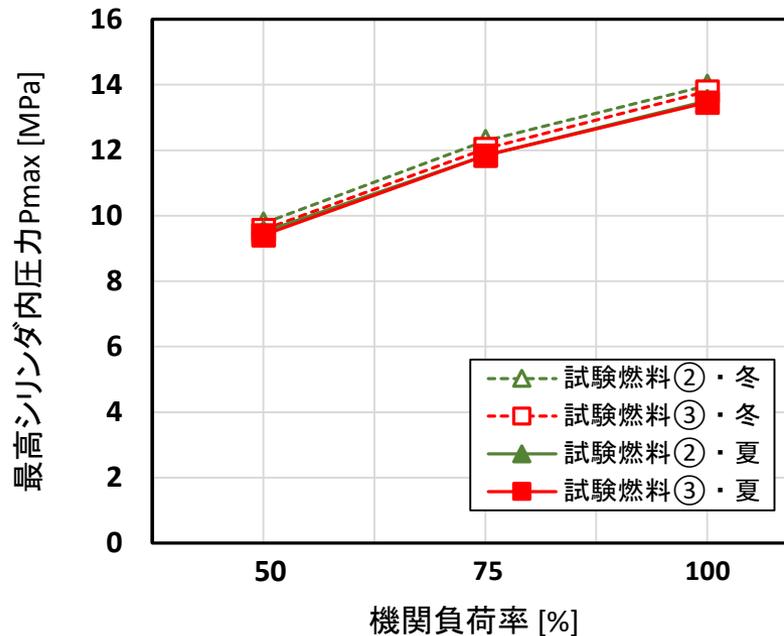


試験設備の概要

(3) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

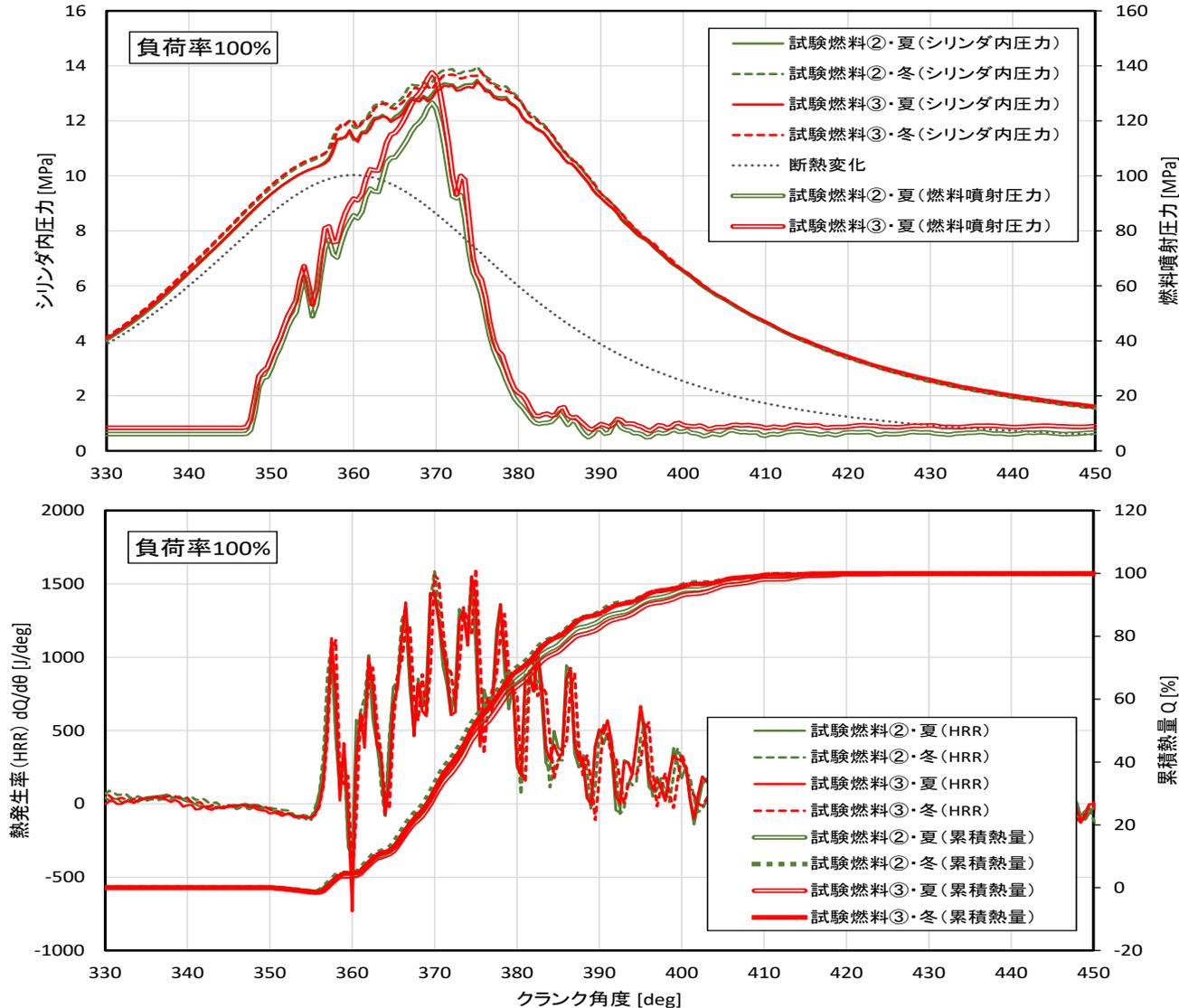


(b) 最高シリンダ内圧力 Pmax

- 負荷率50%以上の範囲において、着火遅れ、最高シリンダ内圧力ともに、試験燃料②と試験燃料③でほぼ同じである。
- 夏季・冬季で同様の傾向がみられる。
(機関室温度は冬季の方が15~20°C程度低い条件で試験を実施。)

9.2 試験機関No.1 (4スト/750kW/1000rpm) : 試験燃料②, ③

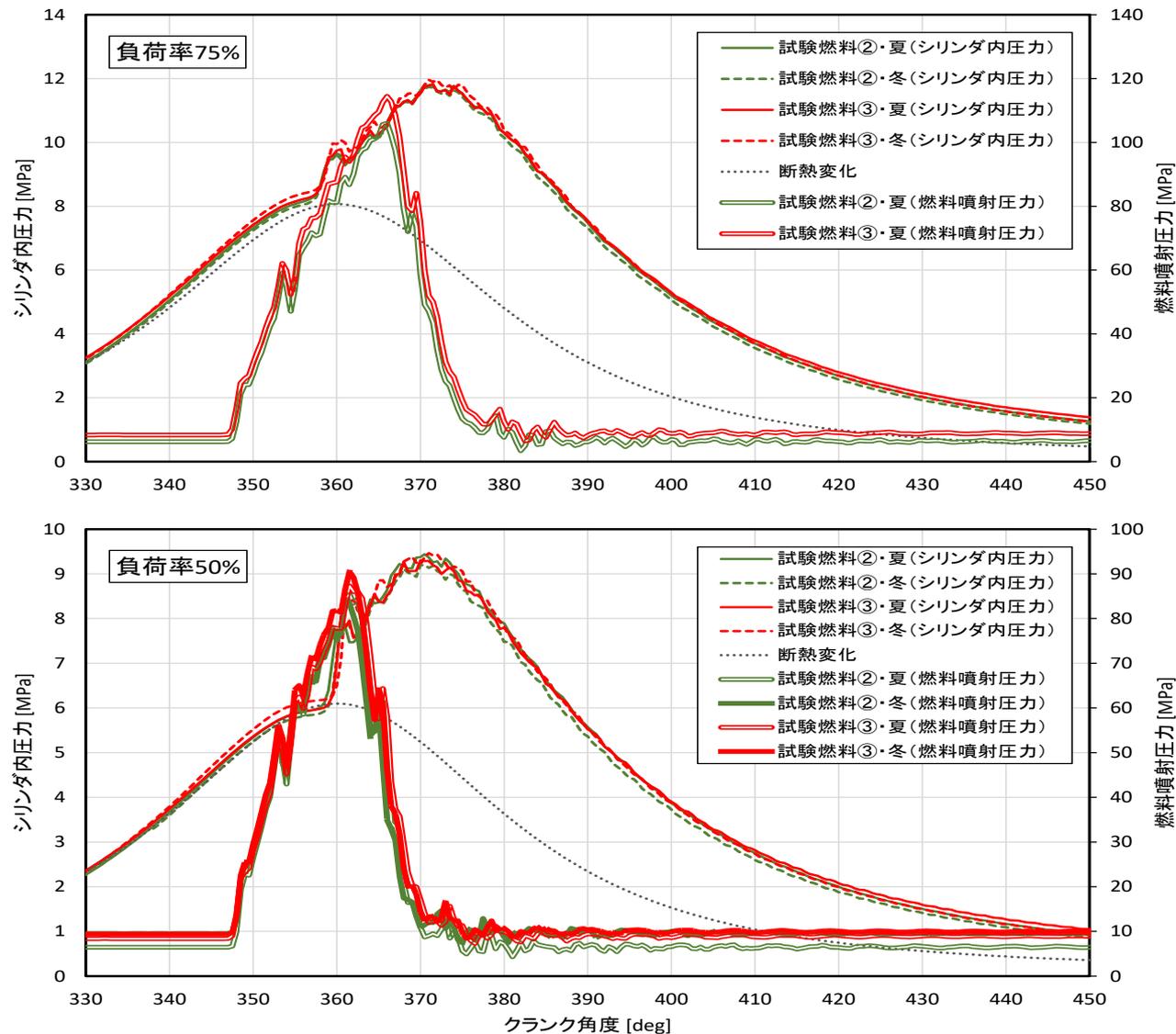
(4) 圧力波形および熱発生率 (負荷率100%)



➤ 夏季・冬季ともに、負荷率100%における試験燃料②と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。

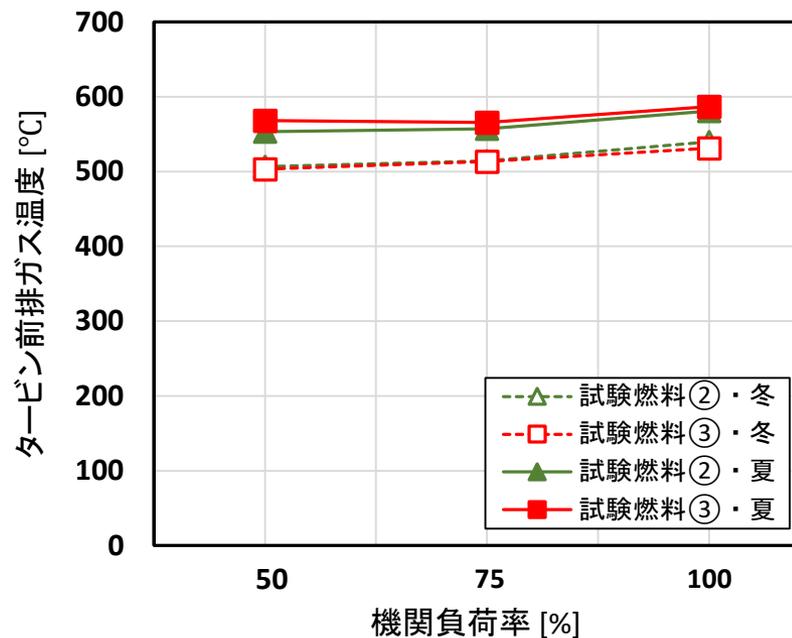
➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃烧期間に相当)は、燃料種の影響をほとんど受けていない。

(5) 圧力波形および熱発生率 (負荷率75%, 50%)

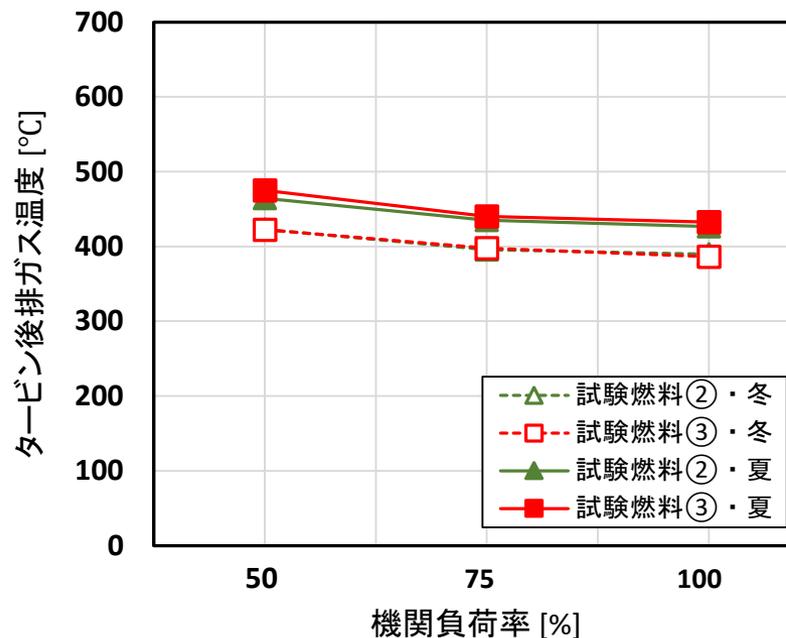


➤ 負荷率50%, 75%もほぼ同様の結果が得られており、圧力波形や熱発生率は燃料種の影響をほとんど受けていない。

(6) 排ガス温度



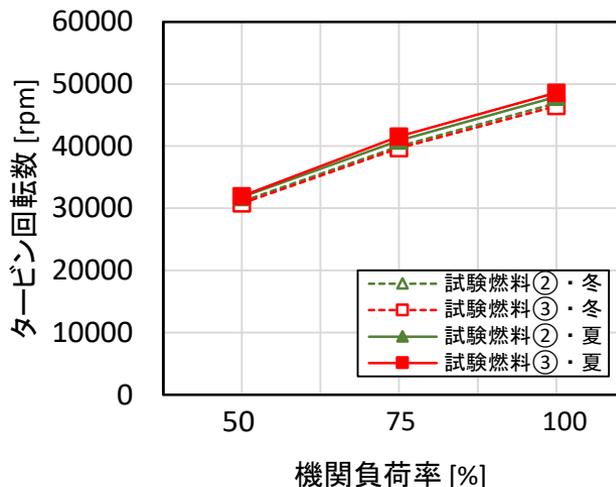
(a) タービン前排ガス温度



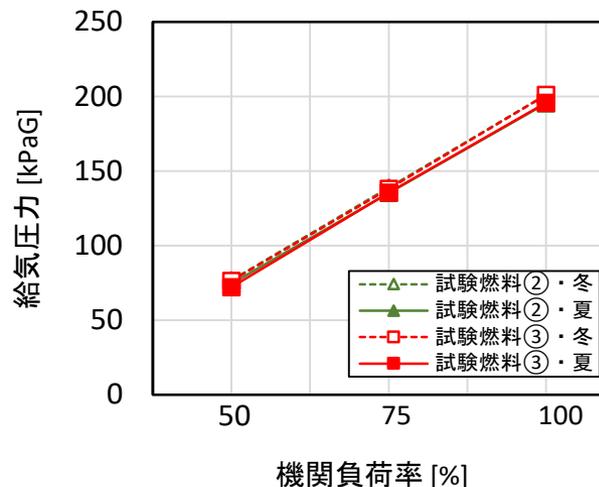
(b) タービン後排ガス温度

- 夏季・冬季ともに、タービン前後排ガス温度、回転数や給気圧力は、燃料の影響をほとんど受けていない。
- タービン前後排ガス温度は冬季の方が50～60°C程度低く、タービン回転数が冬季の方がわずかに低い。
- 給気温度は冬季の方が10～15°C程度低い。

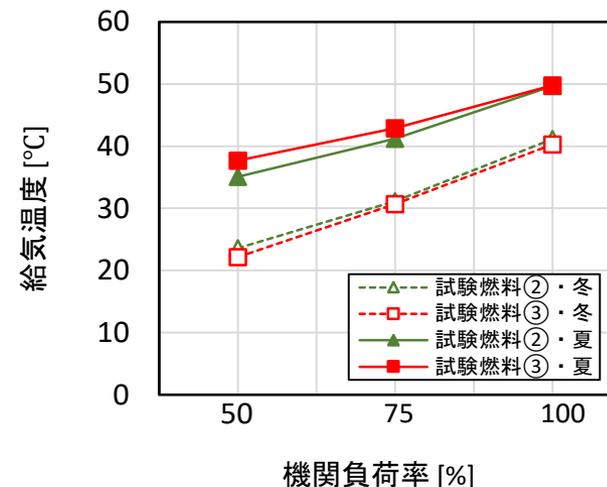
(6) 過給機特性



(a) タービン回転数



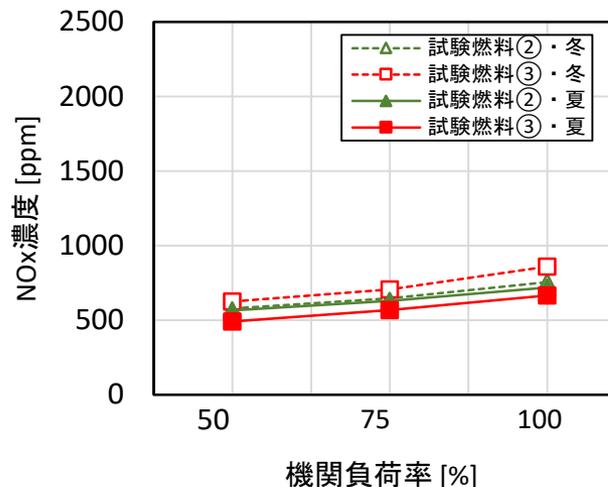
(b) 給気圧力



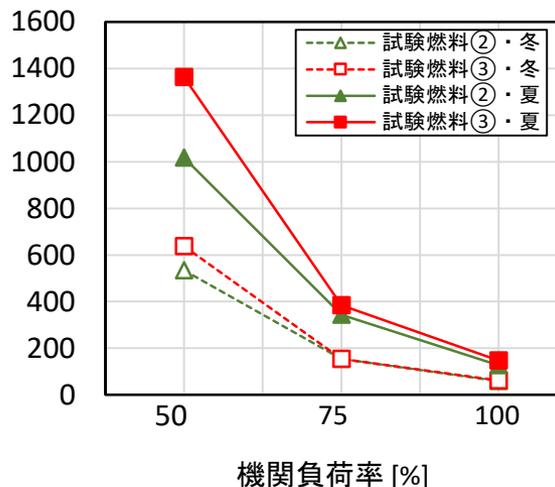
(c) 給気温度

- 夏季・冬季ともに、タービン回転数や給気圧力は、燃料の影響をほとんど受けていない。
- タービン前後排ガス温度は冬季の方が50～60°C程度低く、タービン回転数が冬季の方がわずかに低い。
- 給気温度は冬季の方が10～15°C程度低い。

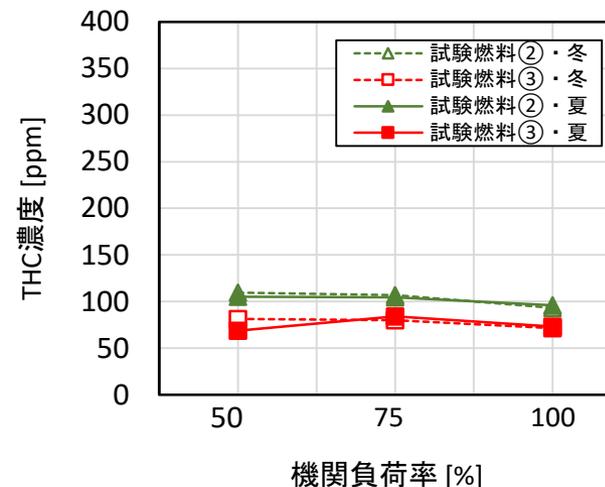
(7) 排ガス性状 (NO_x, CO, THC)



(a) NO_x濃度



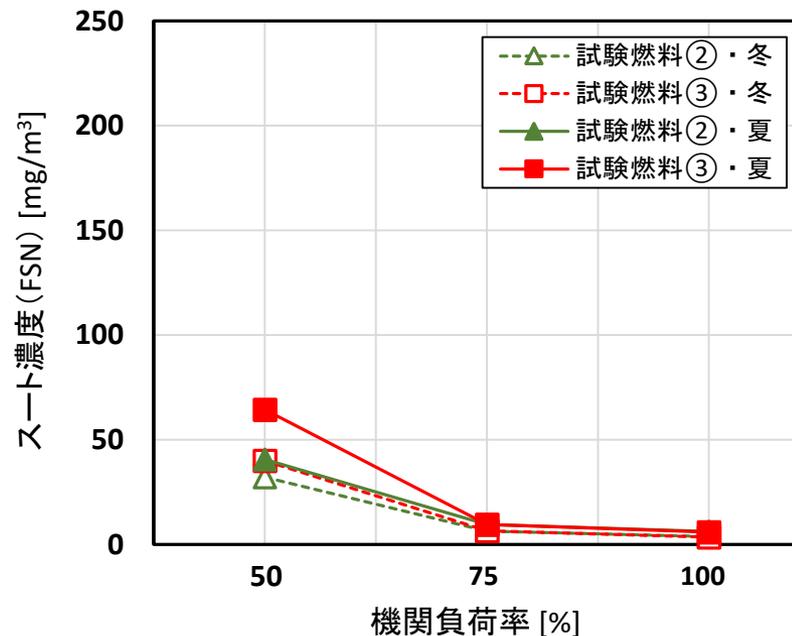
(b) CO濃度



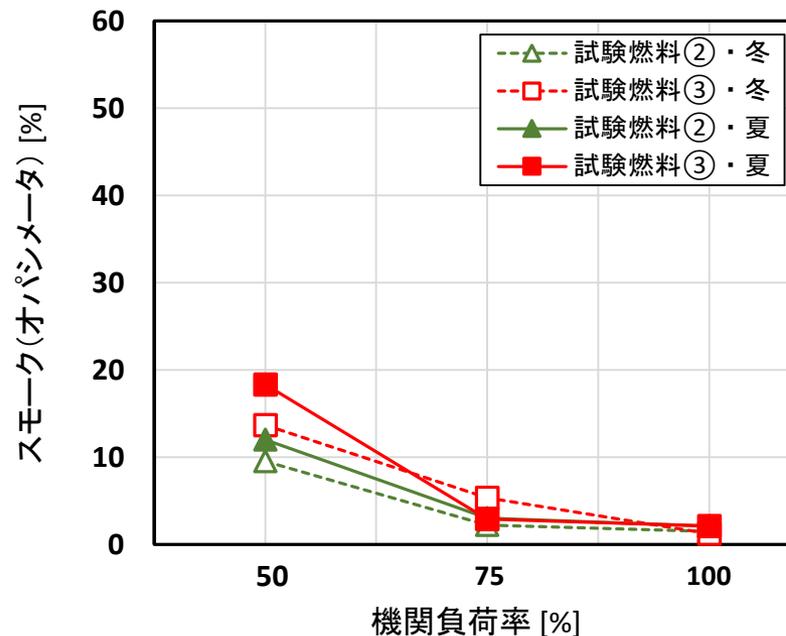
(c) THC濃度

- 夏季・冬季ともに、試験燃料②のNO_x, CO, THC濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。
- 冬季のCO濃度は夏期よりも低い。

(7) 排ガス性状(スート, スモーク)



(a) スート濃度 (FSN)

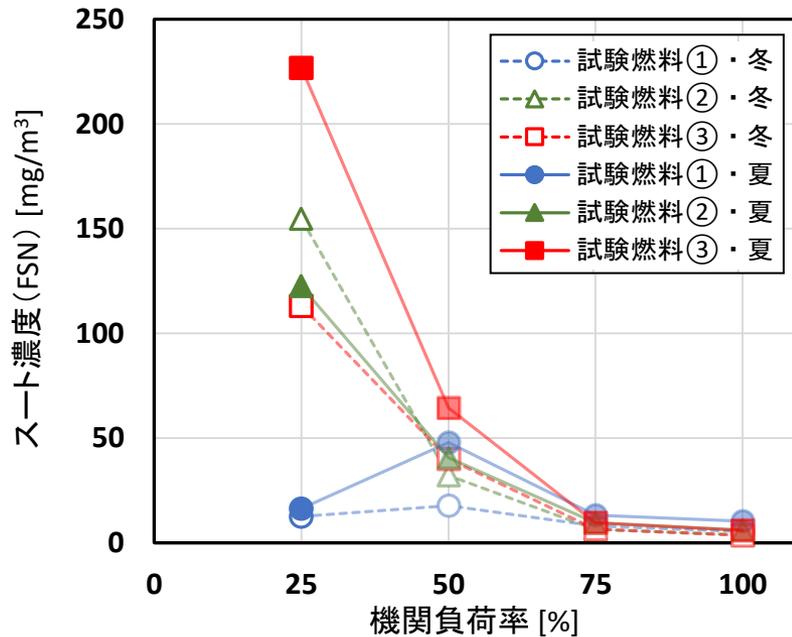


(b) スモーク濃度

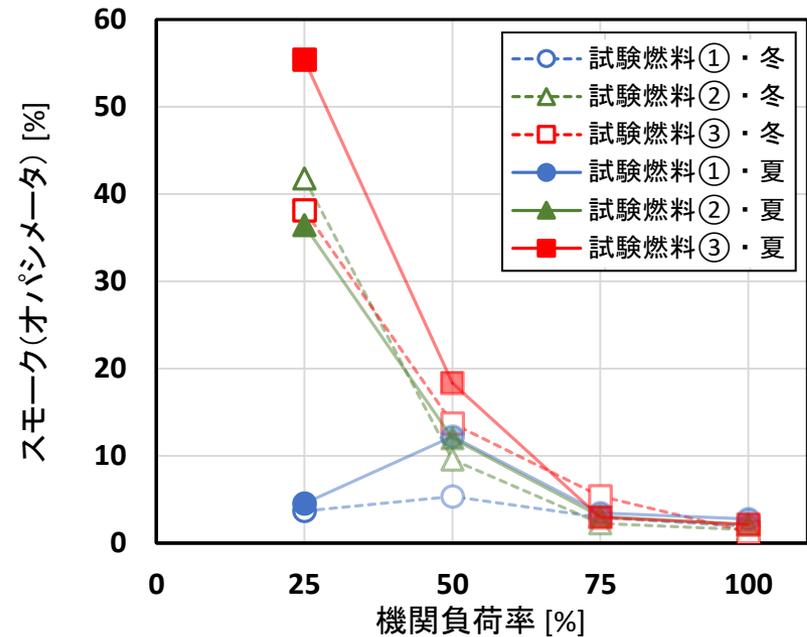
- 夏季・冬季ともに, 試験燃料②のNO_x, CO濃度は試験燃料③とほぼ同じレベルである。
- 冬季のCO濃度は夏期よりも低い。

9.3 各種燃料使用時の注意点

(1) スートおよびスモーク(試験燃料①, ②, ③)



(a) スート濃度 (FSN)

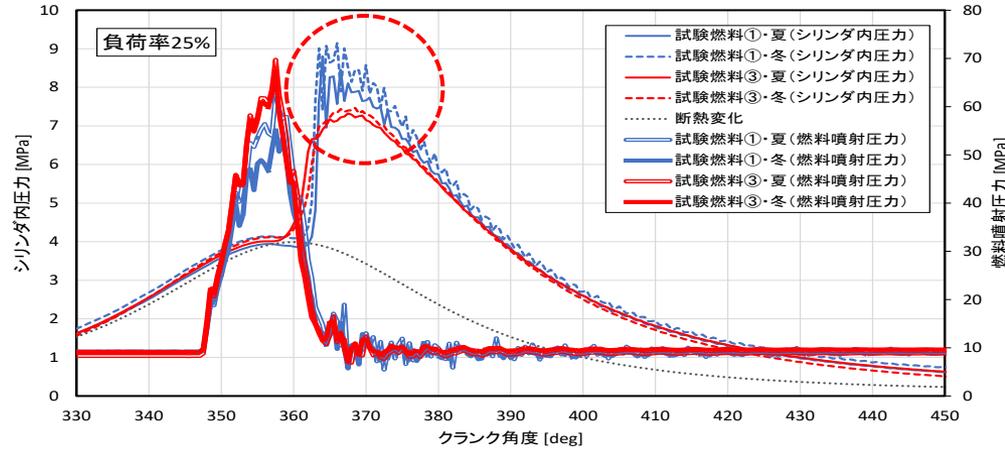


(b) スモーク濃度

- 試験燃料①の負荷率25%におけるスート濃度およびスモーク濃度は試験燃料③と比べて低い。
- 負荷率25%におけるスート濃度は試験燃料②・試験燃料③ともに高まる傾向があり、注意が必要である。

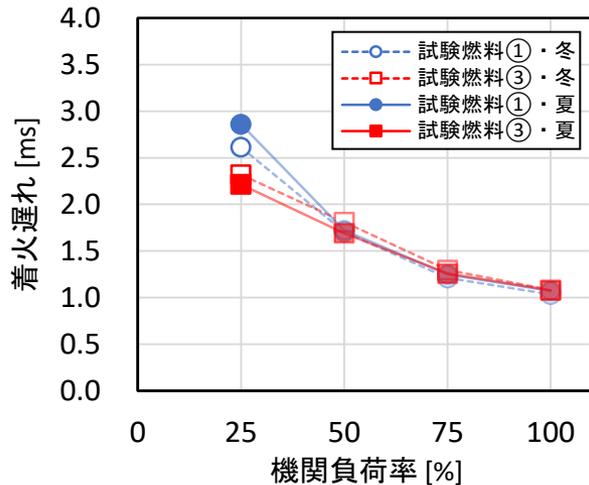
9.3 各種燃料使用時の注意点

(2) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力(試験燃料①, ③)

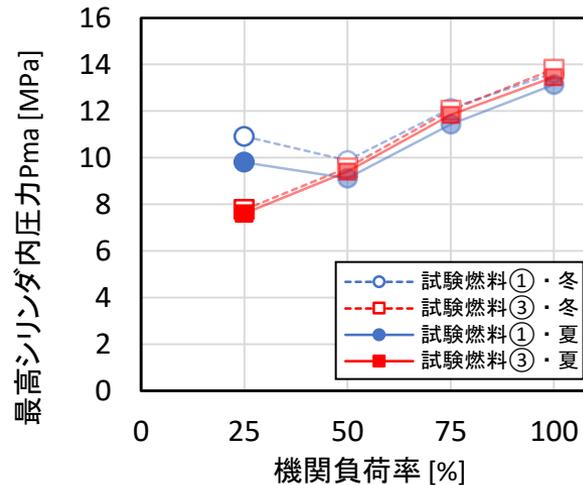


(a) 圧力波形

- 負荷率25%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形は大きく異なる。
- 負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力は高く、変化率が高い。(ディーゼルのロック現象が現れている。)
- 夏季・冬季ともに同様の傾向がみられる。



(b) 着火遅れ



(c) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 夏季・冬季ともに、負荷率25%における試験燃料①の着火遅れは試験燃料③よりも大きい。
- 夏季・冬季ともに、負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力はやや高い(圧力波形参照)。

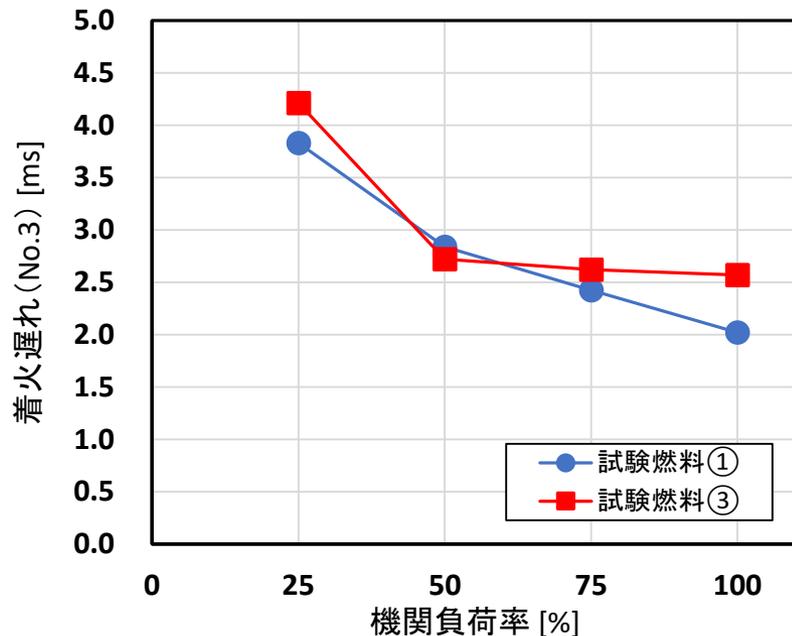
これら以外の負荷率25%における計測結果は燃料の違いの影響をほとんど受けていない。

10. 燃焼試験に用いたエンジン

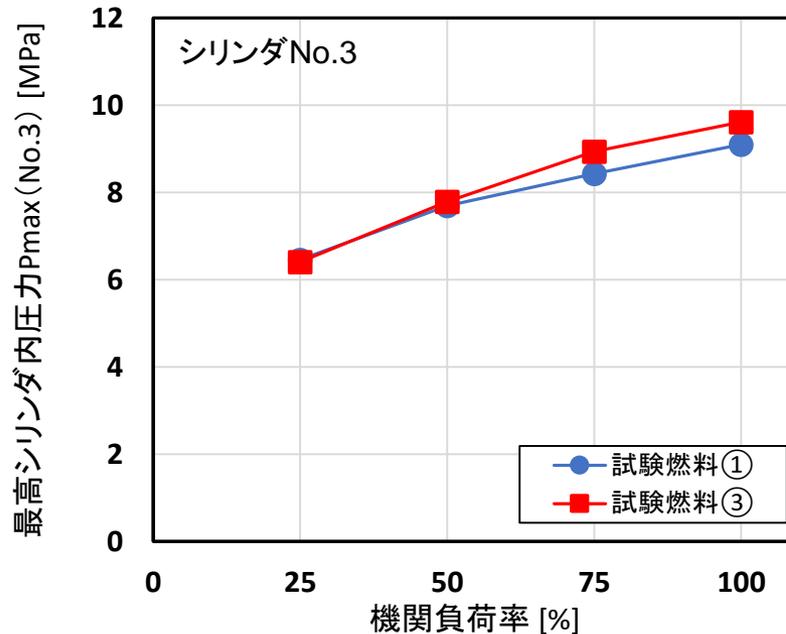
燃焼試験に使用したNo.2エンジン

No.		1	2
タイプ		4サイクル中速エンジン	
型式		新潟原動機 6L19HX	マツイ鉄工所 MU323DGSC
定格出力／回転数		750 kW / 1000 rpm	257 kW / 420 rpm
シリンダ数		6気筒	3気筒
シリンダ径×ストローク		190×260 mm	230×380 mm
燃料噴射系	燃料噴射	機械制御	機械制御
	開弁圧力	35.0 MPa	25.5 MPa
	噴射ノズル	φ0.32×9穴-噴射角140°	φ0.32×7穴-噴射角120°
過給機		あり	あり
冷却水ヒータ		あり	なし

(1)着火遅れ・最高シリンダ内圧力



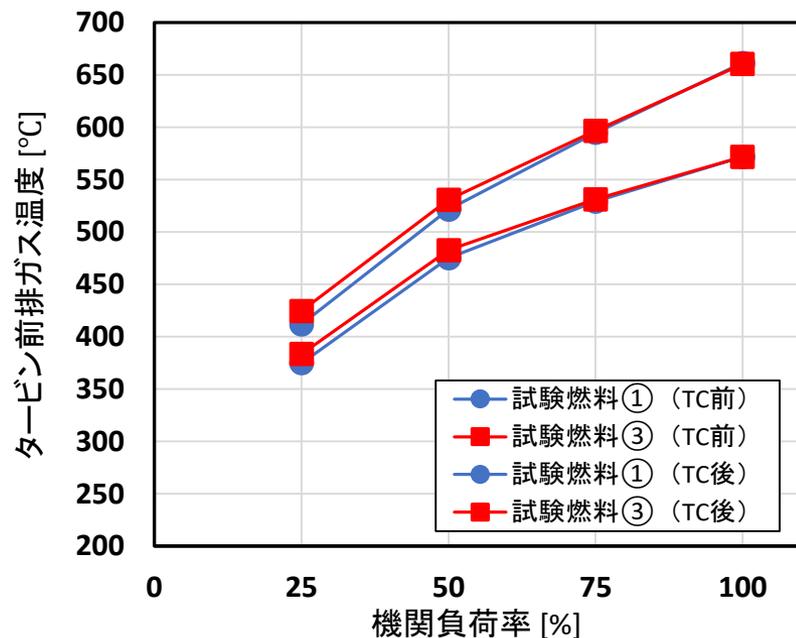
(a) 着火遅れ



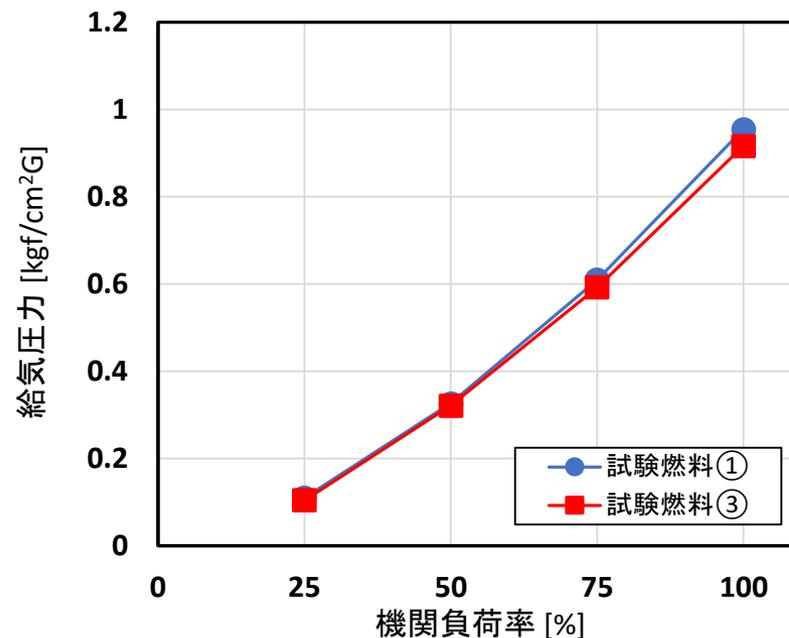
(b) 最高シリンダ内圧力 Pmax

- すべての負荷域において, 試験燃料①の着火遅れ, 最高シリンダ内圧力は試験燃料③と同程度である。

(3) 排ガス温度・過給機特性



(a) タービン前後排ガス温度

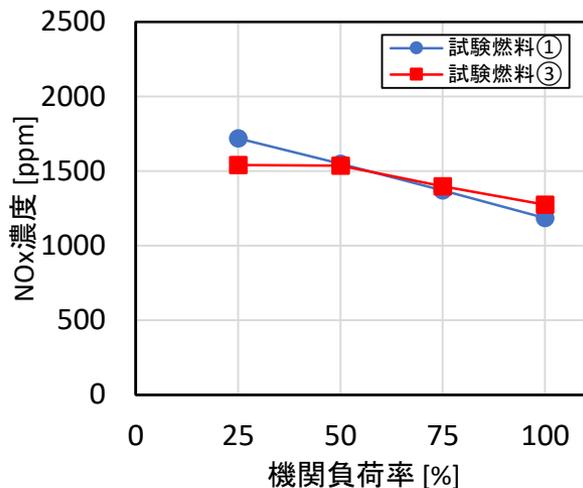


(b) 給気圧力

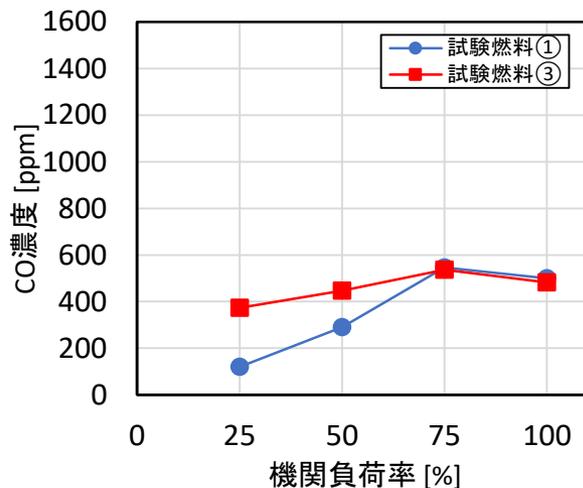
- タービン前後排ガス温度および給気圧力は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

10.1 試験機関No.2(4スト/257kW/420rpm) : 試験燃料①, ③

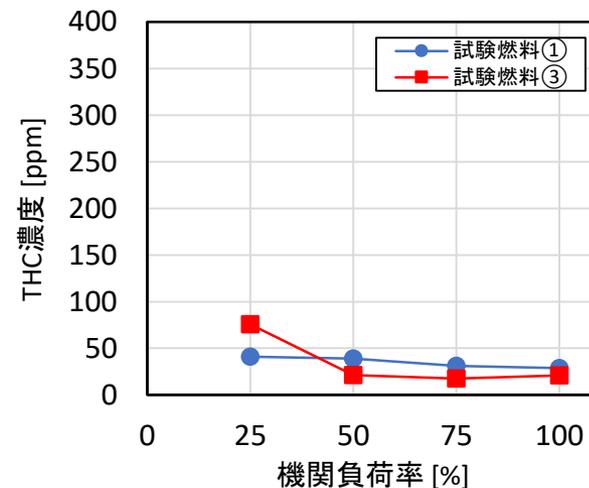
(4) 排ガス性状(NOx, CO, THC)



(a) NOx濃度



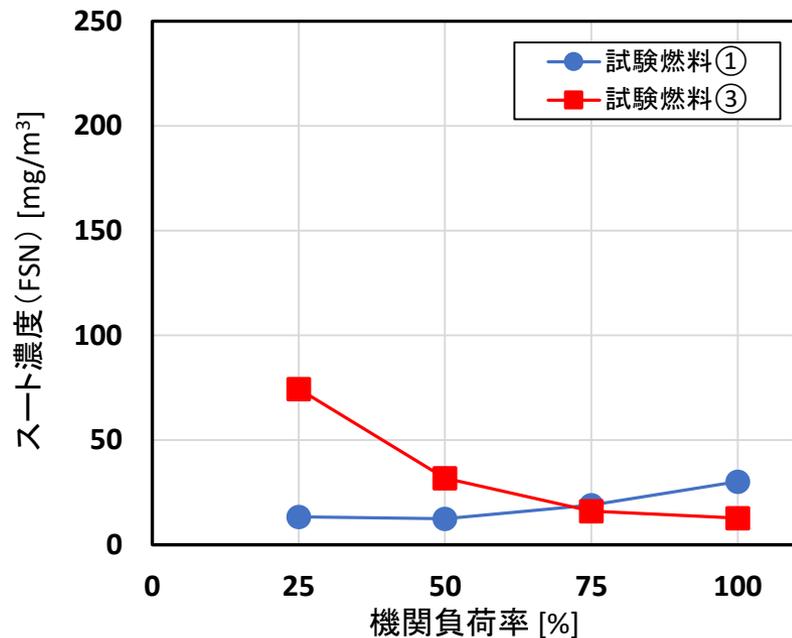
(b) CO濃度



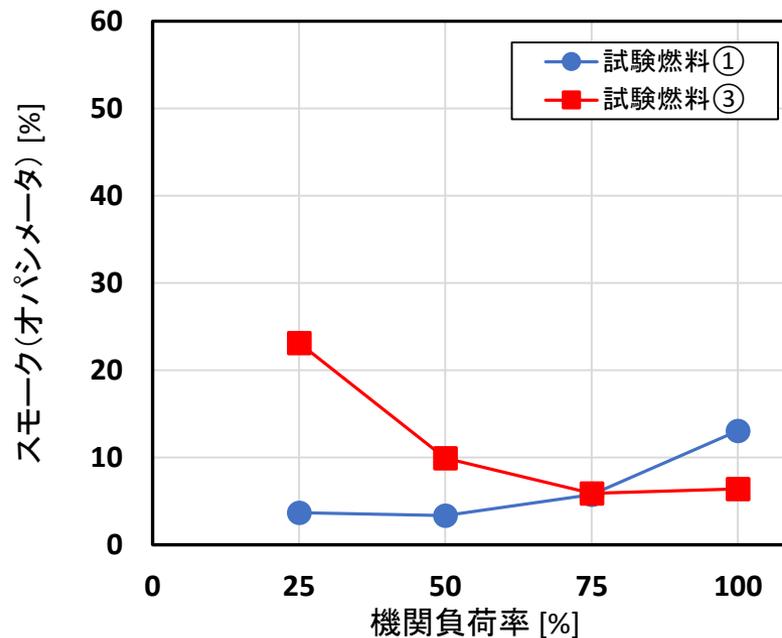
(c) THC濃度

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の排ガスは試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。

(4) 排ガス性状(スート, スモーク)



(a) スート濃度 (FSN)



(b) スモーク濃度

- 試験燃料①の負荷率25%におけるスート濃度およびスモーク濃度は試験燃料③と比べて低い。

11. 2018年度陸上試験結果のまとめ

- 試験燃料①から③について、2つの4ストロークディーゼルエンジンによる夏季・冬季の燃焼試験を実施した。

試験燃料

- ①: A重油に近いもの
- ②: ①と③の間(動粘度に着目)
- ③: 現行C重油(基準燃料)

結果は以下の通りである。

- a. 試験燃料①による燃焼試験において、負荷率が50%以上の範囲(航海中の主な負荷率)では概ね試験燃料③(基準燃料)と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さかった。
 - b. 試験燃料②による燃焼試験において、燃料を適切に加熱することで、概ね試験燃料③(基準燃料)と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さかった。
- 以上のことから、試験燃料①及び②は従来のC重油と同様に使用できると考えられる。ただし、従来のC重油と同様、起動時や低負荷時の運転には注意が必要である。

注) 従来のC重油で注意が必要な負荷率が50%未満の範囲では、エンジンによっては、試験燃料①、試験燃料②、試験燃料③ともに注意すべき事象が見られた(燃焼開始時のシリンダ圧力変化及びスートやCOなどの排ガス性状)。

2019年度試験結果

2サイクル船用ディーゼル機関
試験機関No.3

2019年8月～9月

12. 燃焼試験に用いた試験燃料

試験燃料の性状(2019年度)

名 称		試験燃料①	試験燃料②	試験燃料③
密度@15°C (g/cm ³)		0.8961	0.9505	0.9834
動粘度 (mm ² /s)	@40°C	3.327	---	---
	@50°C	2.712	22.73	172.8
	@75°C	---	10.34	50.77
流動点 (°C)		-27.5	-20.0	-2.5
引火点 (°C)		80.0	83.0	94.0
水分 (容量%)		0.00	0.00	0.00
残留炭素分 (質量%)		0.03	6.73	11.6
灰分 (質量%)		0.001未満	0.015	0.025
硫黄分 (質量%) ^{※1}		0.19	1.61	2.28
セタン指数(新)		35.8	---	---
CCAI		---	850	853
ECN ^{※2}		18.2	16.5	15.1

※1 燃料性状としては動粘度、着火性に着目し、燃焼性に影響しない硫黄分は規制値適合を条件としない。

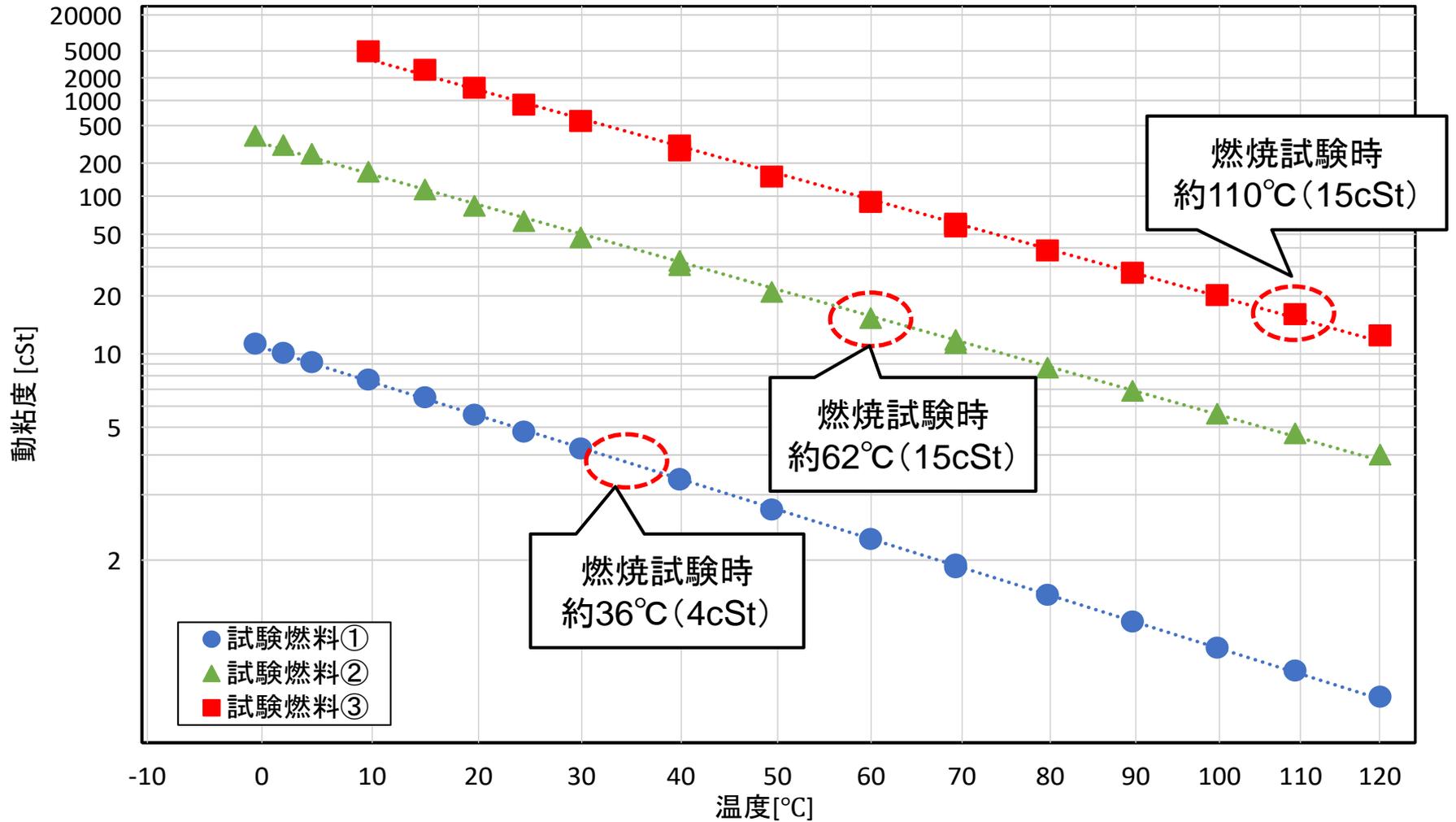
※2 推定セタン価。FCAによる試験結果。

13. 燃焼試験に用いたエンジン

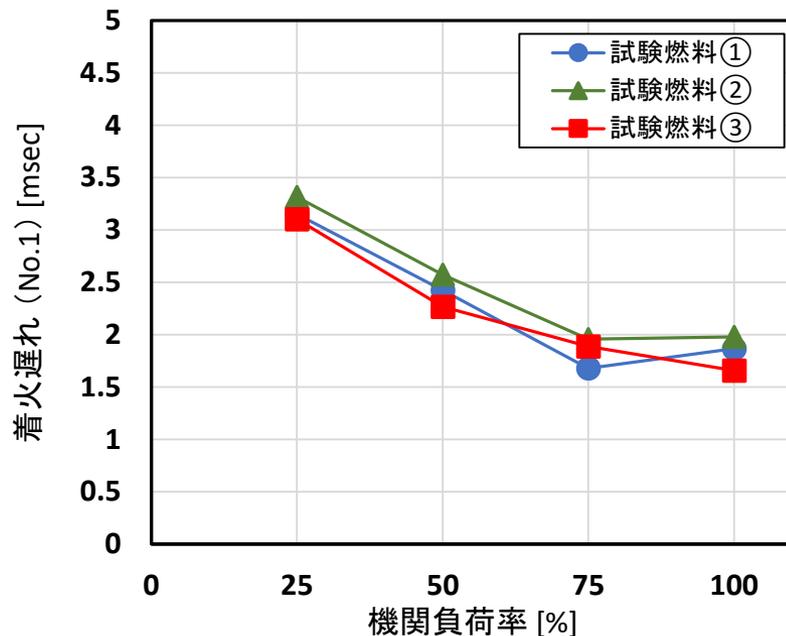
燃焼試験に使用したNo.3エンジン

No.	3	
タイプ	2サイクル低速エンジン	
型式	赤阪鐵工所 3UEC33LSII-Eco	
定格出力／回転数	1,275 kW／162 rpm	
シリンダ数	3気筒	
シリンダ径×ストローク	330×1,050 mm	
燃料噴射系	燃料噴射	電子制御
	設定開弁圧力	31.7 MPa
過給機	あり	

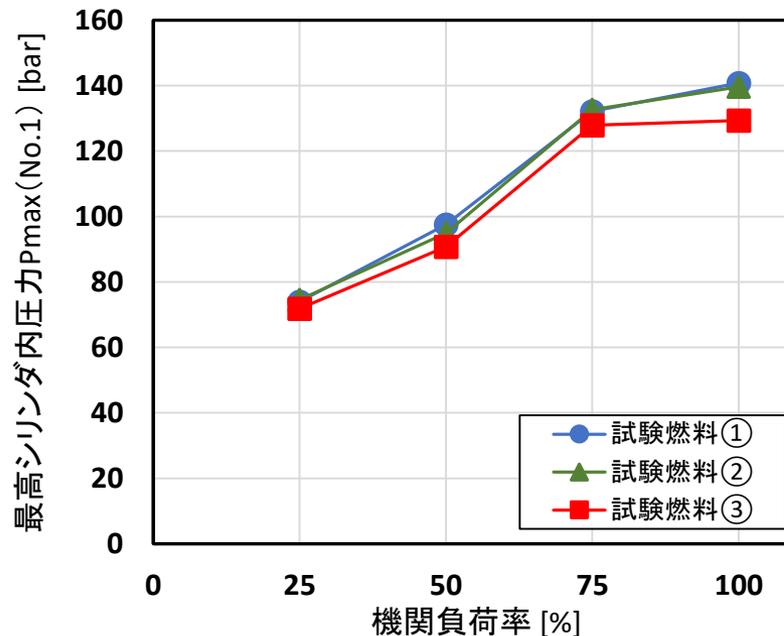
【参考】試験燃料の動粘度計測結果



(2) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



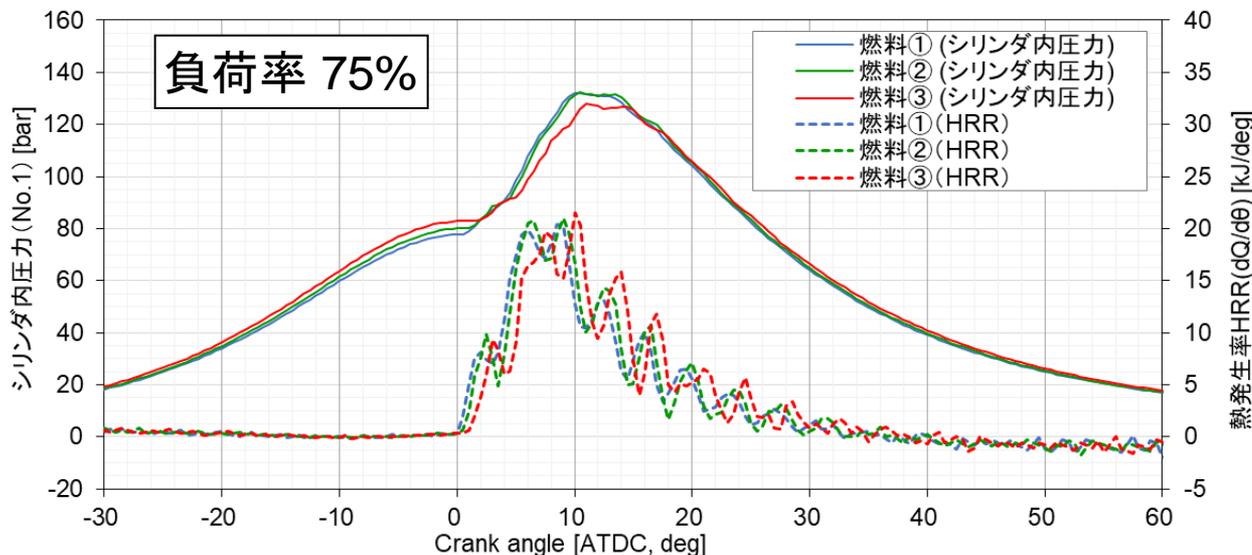
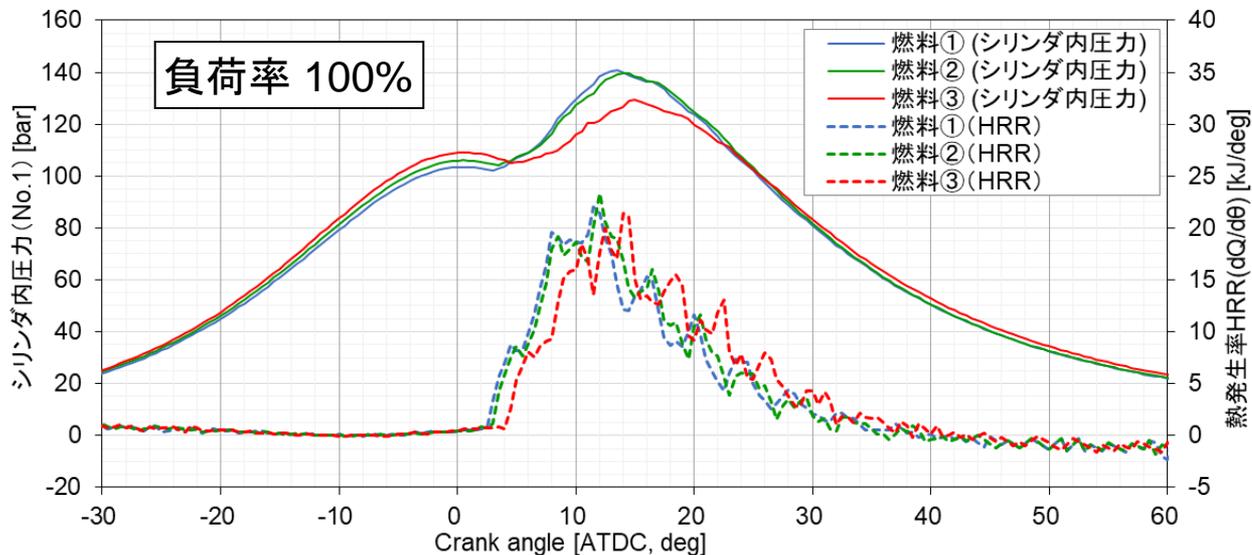
(a) 着火遅れ



(b) 最高シリンダ内圧力 Pmax

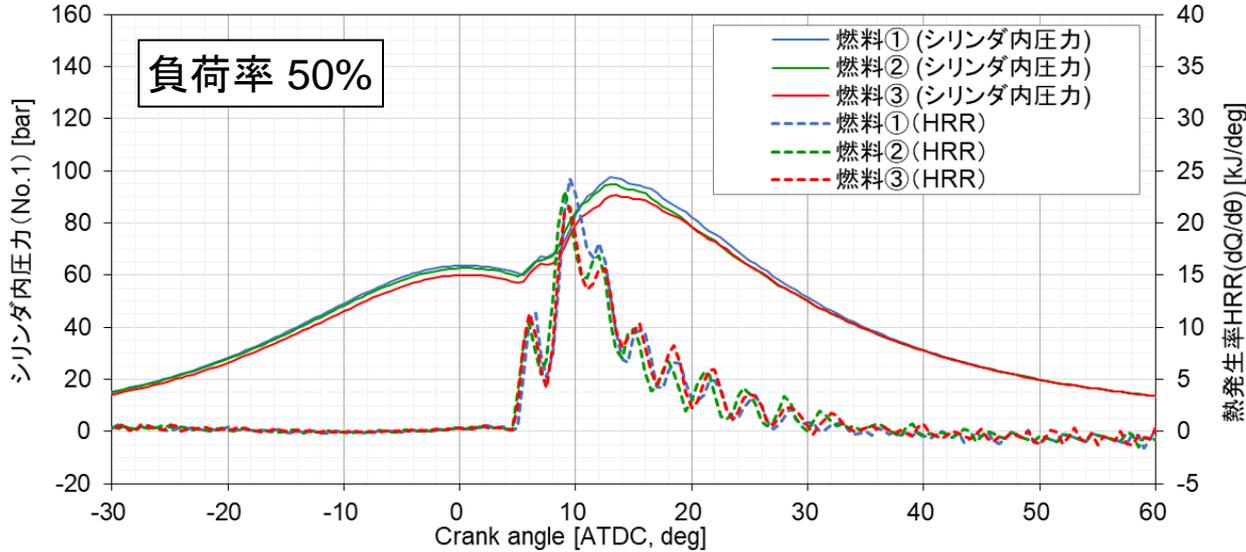
- 試験燃料①および試験燃料②の着火遅れと試験燃料③の着火遅れの相違は小さい。
- 高負荷域において、試験燃料①および試験燃料②の最高シリンダ内圧力は試験燃料③よりもわずかに高い。
- 通常運転時の使用範囲内であり、限界点と比較としても問題がないレベルである。

(3) 圧力波形および熱発生率(負荷率100%, 75%)

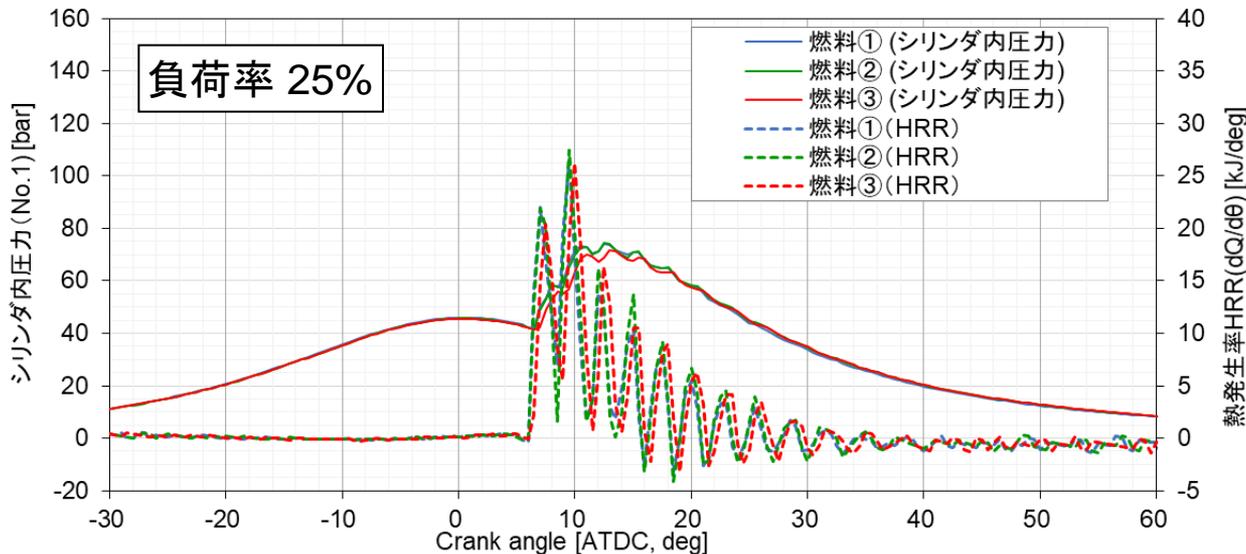


- 高負荷域において、試験燃料①および②の最高シリンダ内圧力は試験燃料③よりもわずかに高い。
- 熱発生率も含め、異常燃焼が確認できないため、問題ないと判断できる。

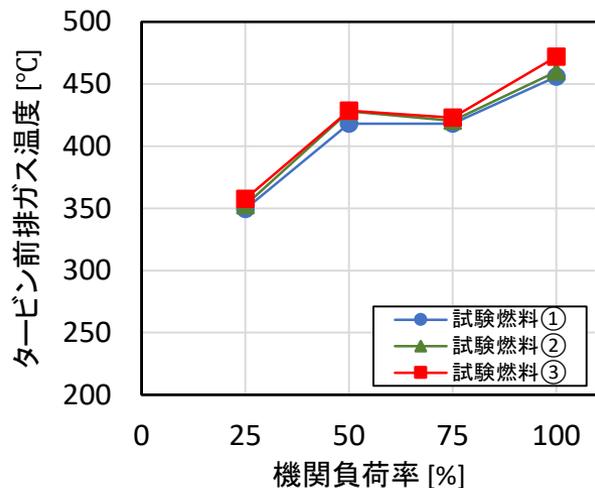
(3) 圧力波形および熱発生率(負荷率25%, 50%)



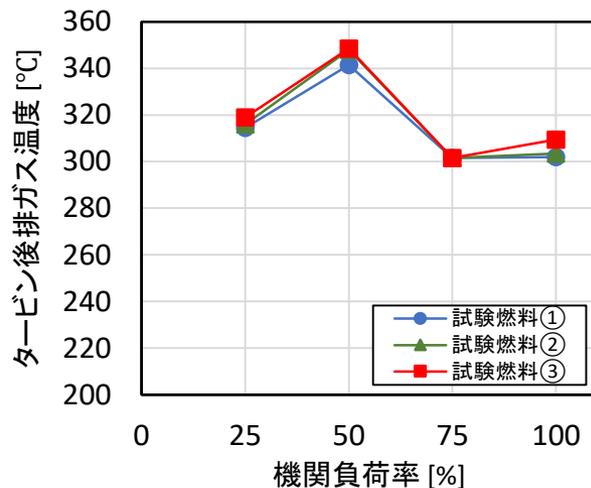
➤ 低負荷域において、試験燃料①および試験燃料②の圧力波形、熱発生率は試験燃料③とほぼ同じである。



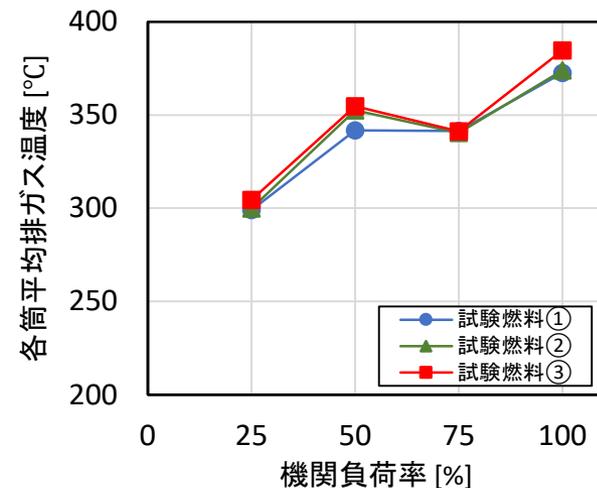
(4) 排ガス温度, 過給機特性



(a) 各筒平均排ガス温度



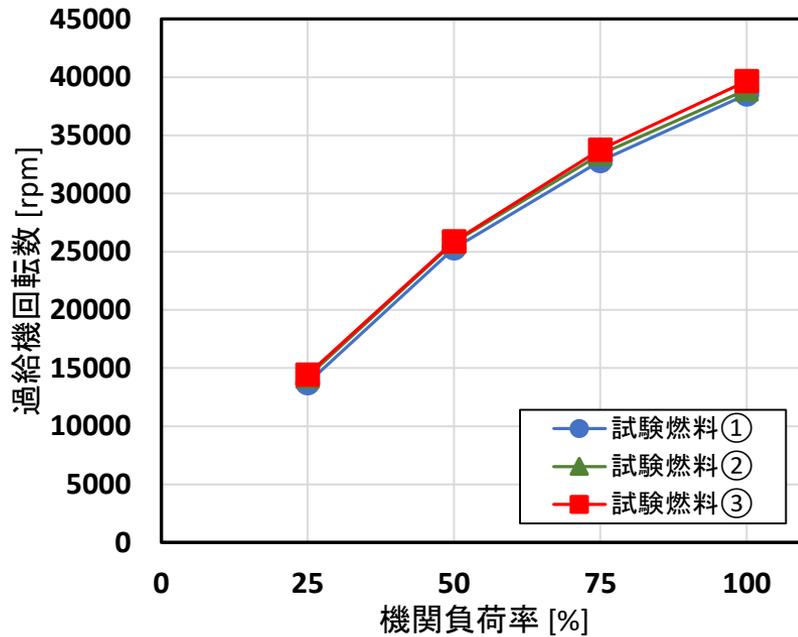
(b) タービン前排ガス温度



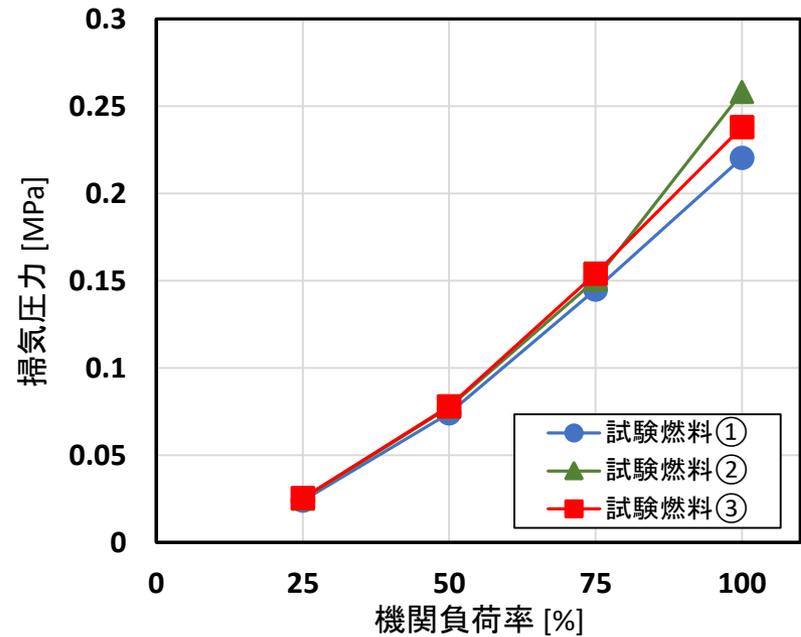
(c) タービン後排ガス温度

- 試験燃料①および試験燃料②の排ガス温度は、試験燃料③とほぼ同じであり、燃料種の影響をほとんど受けていない。

(4) 過給機特性



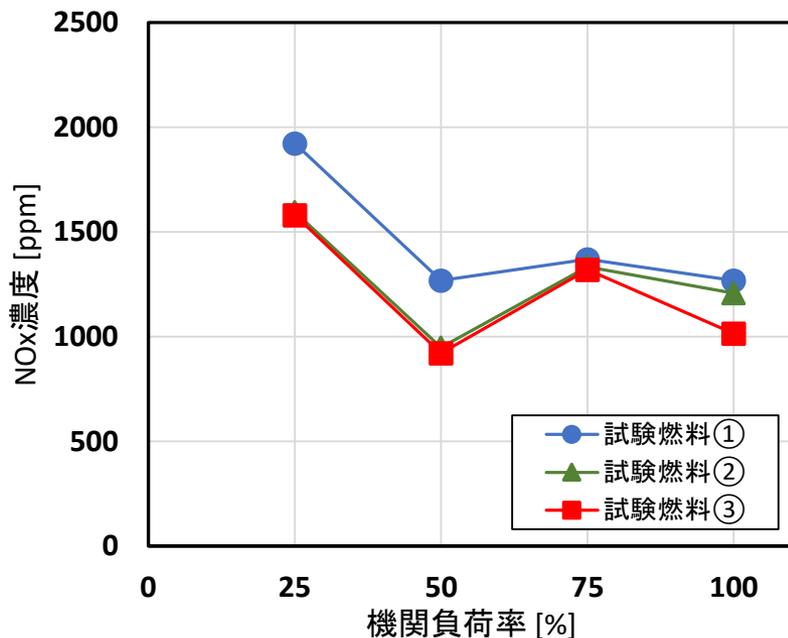
(a) タービン回転数



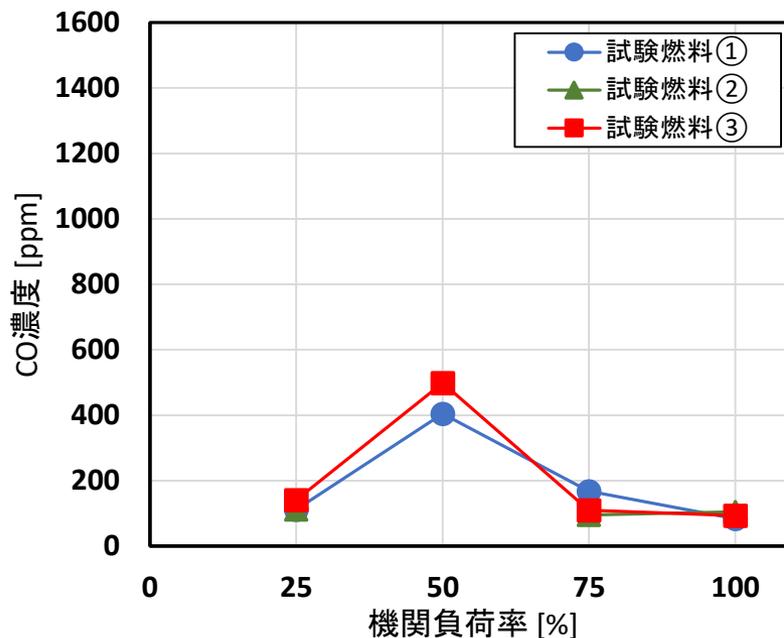
(b) 掃気圧力

- タービン回転数は燃料種の影響をほとんど受けていない。
- 高負荷時の掃気圧力は、ややばらつきが大きいが、通常運転時の使用範囲内であり、問題がないレベルである。

(5) 排ガス性状(NOx, CO)



(a) NOx濃度

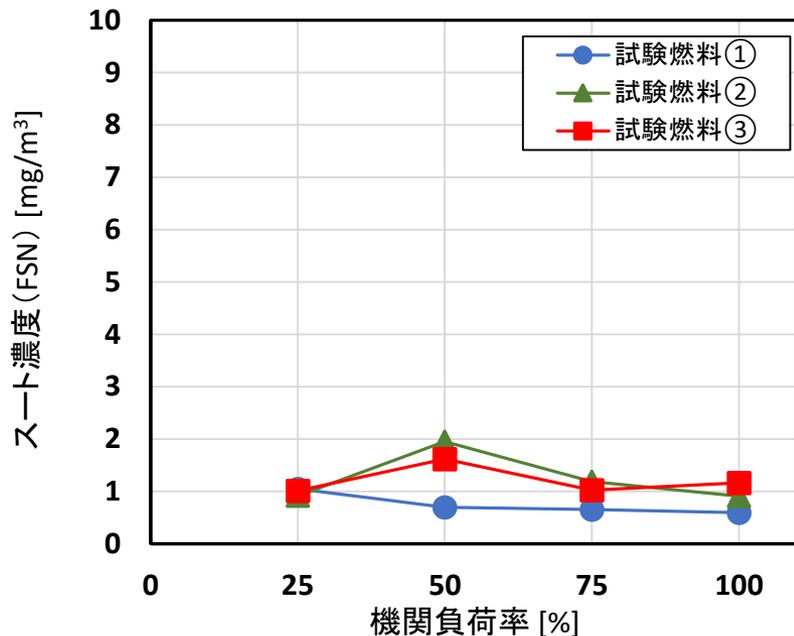


(b) CO濃度

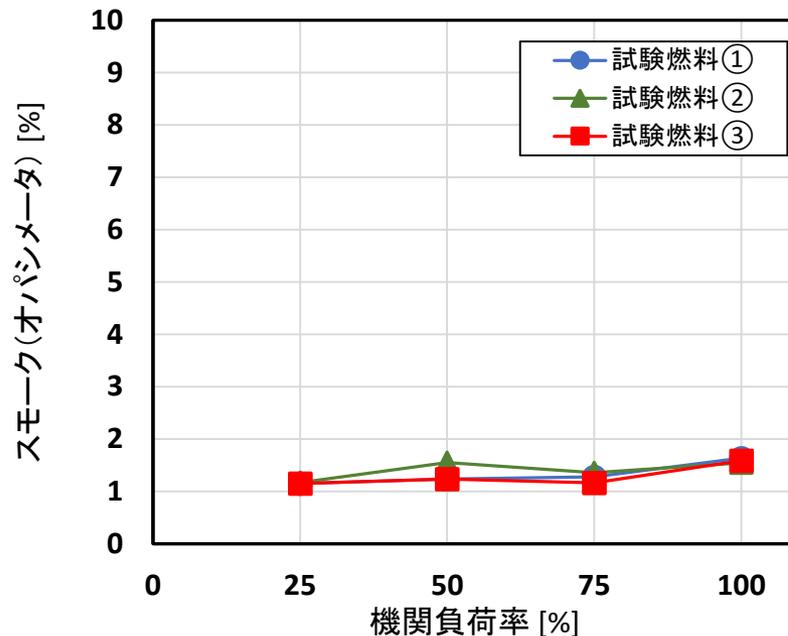
- 低負荷時における試験燃料①のNOx濃度は試験燃料③と比べてわずかに高いが、問題のないレベルである。
- 試験燃料②のNOx濃度は試験燃料③とほぼ同じである。
- 試験燃料①, ②, ③のCO濃度は問題のないレベルである。

※負荷率50%における試験燃料②のCO濃度は計測器の都合により計測できていない。

(5) 排ガス性状(スス)



(d) スoot濃度 (FSN)



(e) スモーク濃度

- 試験燃料①, ②, ③のスoot濃度, スモーク濃度は問題のないレベルである。

- 2ストロークディーゼルエンジンによる燃焼試験を実施した結果、試験燃料①および試験燃料②は試験燃料③（基準燃料）と比較して、問題となる差異は認められなかった。
- 以上のことから、2ストロークディーゼルエンジンにおいて、試験燃料①および②は従来のC重油と同様に使用できると考えられる。

試験燃料

- ①: A重油に近いもの
- ②: ①と③の中間(動粘度に着目)
- ③: 現行C重油(基準燃料)

- 燃料の低硫黄化に伴う性状変化として、動粘度の低下、着火性指標変化に着目して試験燃料を作製し、船用4ストローク、2ストロークエンジンによる燃焼試験を実施した。その結果、動粘度レベルが異なり、着火性指標が変化した燃料についても、現行のC重油と同様に使用可能であることが確認された。

試験燃料

- ①: A重油に近いもの
- ②: ①と③の間(動粘度に着目)
- ③: 現行C重油(基準燃料)

海上試験

—実船を用いた燃焼試験—

2019年6月～8月実施

16. はじめに

調査の概要

現行C重油を使用している船用エンジンに対し、燃料油の低硫黄化による性状変化が船用エンジンへ及ぼす影響を確認するため、実船での燃焼性評価を実施する。試験内容は以下の通りである。

1. 試験燃料油は低硫黄C重油(LSC)と船舶で現在使用している高硫黄C重油(HSC)とし、それらを用いて、複数の負荷で燃焼試験を行い、データを採取する。
2. 上述の2種類の試験燃料油での試験結果を比較することで、燃焼性を評価する。

実船試験スケジュール

- 2019年6月末から実施した第1回実船試験では、499GT~749GTの4隻の内航貨物船を調査した。
- 2019年7月末から実施した第2回実船試験では、内航フェリーと内航RoRo船による2隻を調査した。
- 2019年8月末から実施した第3回実船試験では、499~8000GTの内航貨物船、貨客船、RoRo船を調査した。

17. 対象船舶の概要

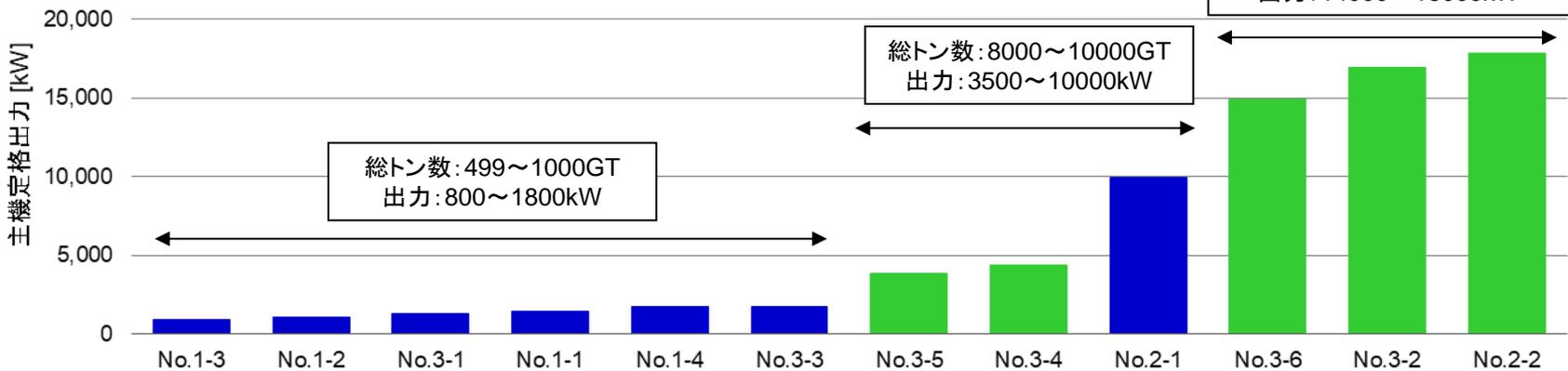
- エンジン出力は900～18,000kW程度であり，4ストロークエンジンと2ストロークエンジンが含まれている。
- 船種としては，鉄鋼運搬船，セメント運搬船，LPG運搬船，旅客船，RoRo船が含まれている。



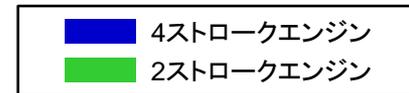
14,000GT RoRo船

8,000GT貨物船

総トン数: 10000～14000GT
出力: 14000～18000kW



実船試験の対象船舶 (出力順)



18. 対象船舶および主機関の主要目

(a) 第1回実船試験

項目	No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4
総トン数	499GT	499GT	749GT	749GT
船種	鉄鋼運搬船	鉄鋼運搬船	セメント運搬船	鉄鋼運搬船
全長・幅	70m × 12m	74m × 12m	77m × 15m	86m × 13m
エンジン形式	阪神内燃機 LA32G-15 4ストローク6気筒	阪神内燃機 LH28 4ストローク6気筒	ヤンマー 6L21AL-SV 4ストローク6気筒	赤阪鐵工所 A34S 4ストローク6気筒
主機定格出力	1,471kW @ 280min ⁻¹	1,029kW @ 395min ⁻¹	880kW @ 900min ⁻¹	1,764kW @ 280min ⁻¹
特徴	2010年就航。	2017年就航。	2010年就航。電気推進船。	1996年就航。

(b) 第2回実船試験

項目	No.2-1	No.2-2
総トン数	9,730GT	13,950GT
船種	フェリー	RoRo船
全長・幅	167m × 25.6m	173m × 26.6m
エンジン形式	JFE-S.E.M.T. -Pielstick 18PC2-6V × 2基 4ストローク18気筒	川崎重工MAN B & W 8L60MC-C 2ストローク8気筒
主機定格出力	9,930kW @ 520min ⁻¹	17,840kW @ 123min ⁻¹
特徴	2002年就航。	2006年就航。

19. 対象船舶および主機関の主要目

(c) 第3回実船試験

項目	No.3-1	No.3-2	No.3-3
総トン数	499GT	13,927GT	999GT
船種	鉄鋼運搬船	RoRo船	LPG運搬船
全長・幅	75m × 11.5m	166m × 27m	66m × 12.5m
エンジン形式	新潟原動機 6M31NT 4ストローク6気筒	三井造船 12L50MC 2ストローク12気筒	阪神内燃機 LH36L 4ストローク6気筒
主機定格出力	1,323kW @ 290min ⁻¹	16,920kW @ 148min ⁻¹	1,765kW @ 250min ⁻¹
特徴	2017年就航。	2003年就航。	1999年就航(要確認)。

項目	No.3-4	No.3-5	No.3-6
総トン数	5,681GT	7,918GT	10,620GT
船種	貨客船	セメント運搬船	RoRo船
全長・幅	118m × 17m	126m × 21.4m	167m × 27m
エンジン形式	三菱重工 6UEC35LSE-Eco-B2 2ストローク6気筒	マキタ-三井 MAN B&W 6L35MC 2ストローク6気筒	MAN B&W 9S50ME-C8.5 2ストローク9気筒
主機定格出力	4,350kW @ 167min ⁻¹	3,883kW @ 210min ⁻¹	14,940kW @ 127min ⁻¹
特徴	2014年就航。ディーゼル 主機関+電動駆動 プロペ ラのハイブリッド方式	2000年就航。	2017年就航。

20. 燃焼試験に用いる燃料

項目	試験燃料 第1回実船試験		試験燃料 第2回実船試験		試験燃料 第3回実船試験	
	成績表※1	計測※2	成績表※1	計測※2	成績表※1	計測※2
密度@15°C (g/cm ³)	0.9247	0.926	0.9326	0.934	0.9295	0.931
動粘度@50°C (mm ² /s)	27.1	26.0	17.1	17.2	42.0	40.5
流動点 (°C)	-22.5	---	-5.0	---	12.5	---
引火点 (°C)	108.0	---	99.0	---	95.0	---
水分 (容量%)	0.05	---	0.00	---	0.00	---
残留炭素分 (質量%)	2.90	---	2.10	---	2.88	---
灰分 (質量%)	0.003	---	0.004	---	0.011	---
硫黄分 (質量%)	0.26	0.26	0.43	0.42	0.30	0.30
総発熱量 (MJ/kg)	44.55	---	44.38	---	44.47	---
CCAI	822	824	837	840	819	821

※1: 石油商社から入手した試験成績表に記載された数値である。(代表値, 算出値を含む。)

※2: バンカリング船から採取した代表的なサンプル油の計測値である。

バンカリング船のタンク内のHSC残油が少ない場合, 製油所から出荷されるLSCとほぼ同等の性状の燃料油が補油されることを確認した。

(1) 燃焼試験時の燃料性状

(a) 第1回実船試験

名称	LSC (参考)	No.1-1 鉄鋼運搬船		No.1-2 鉄鋼運搬船		No.1-3 セメント運搬船		No.1-4 鉄鋼運搬船	
		LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC
密度@15°C (g/cm ³)	0.9247	0.930	0.961	0.928	0.963	0.928	0.975	0.941	0.979
動粘度@50°C(mm ² /s)	27.1	30.9	150.5	30.3	130.4	29.8	139.8	37.9	70.9
硫黄分(質量%)	0.26	0.46	2.36	0.36	2.13	0.36	2.50	0.69	1.19
CCAI	822	825	833	823	837	823	848	832	861

(b) 第2回実船試験

名称	LSC (参考)	No.2-1 フェリー		No.2-2 RoRo船	
		LSC	HSC	LSC	HSC
密度@15°C (g/cm ³)	0.9326	0.934	0.960	0.934	0.956
動粘度 @50°C(mm ² /s)	17.1	18.2	114.5	18.9	153.6
硫黄分(質量%)	0.43	0.47	1.87	0.52	2.46
CCAI	837	838	835	838	828

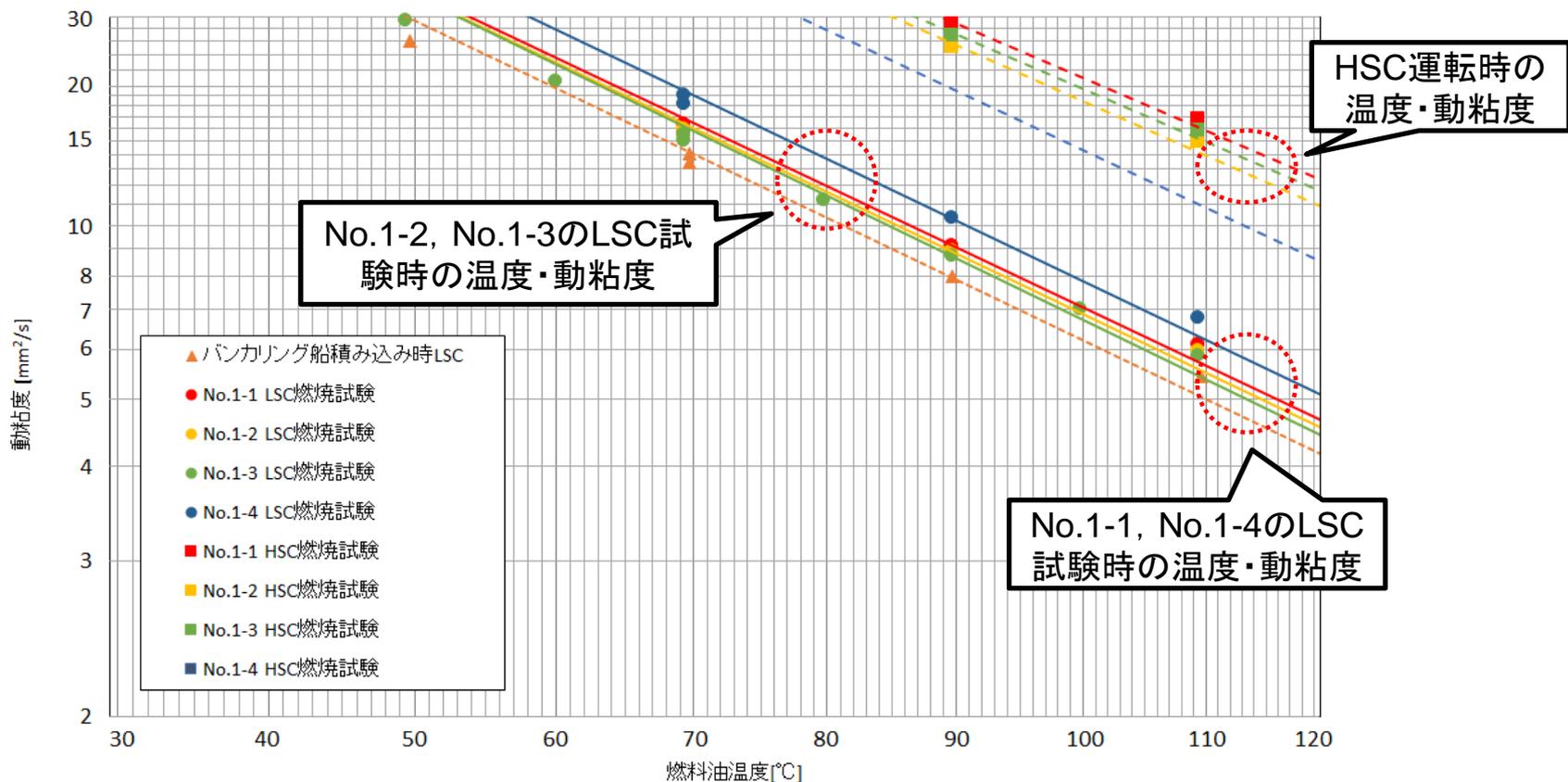
(c) 第3回実船試験

名称	LSC (参考)	No.3-1 鉄鋼運搬船		No.3-2 RoRo船		No.3-3 LPG運搬船		No.3-4 貨客船		No.3-5 セメント運搬船		No.3-6 RoRo船	
		LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC	LSC	HSC
密度@15°C (g/cm ³)	0.9295	0.938	0.975	0.932	0.976	0.934	0.985	0.932	0.948	0.932	0.967	0.934	0.969
動粘度@50°C (mm ² /s)	42.0	49.4	132.6	41.8	143.7	42.8	145.9	42.1	158.5	40.9	156.7	43.2	145.1
硫黄分(質量%)	0.30	0.59	2.31	0.37	2.67	0.48	2.32	0.36	1.62	0.35	1.74	0.44	2.25
CCAI	819	825	848	822	848	823	857	821	819	822	838	823	841

◆ 各船におけるLSC燃焼試験時の硫黄濃度および動粘度は、補油したLSCとタンク内のHSC残油が混合されたためやや高くなっている。

◆ LSC燃焼試験時のCCAIは、出荷されたLSCとほぼ同じである。

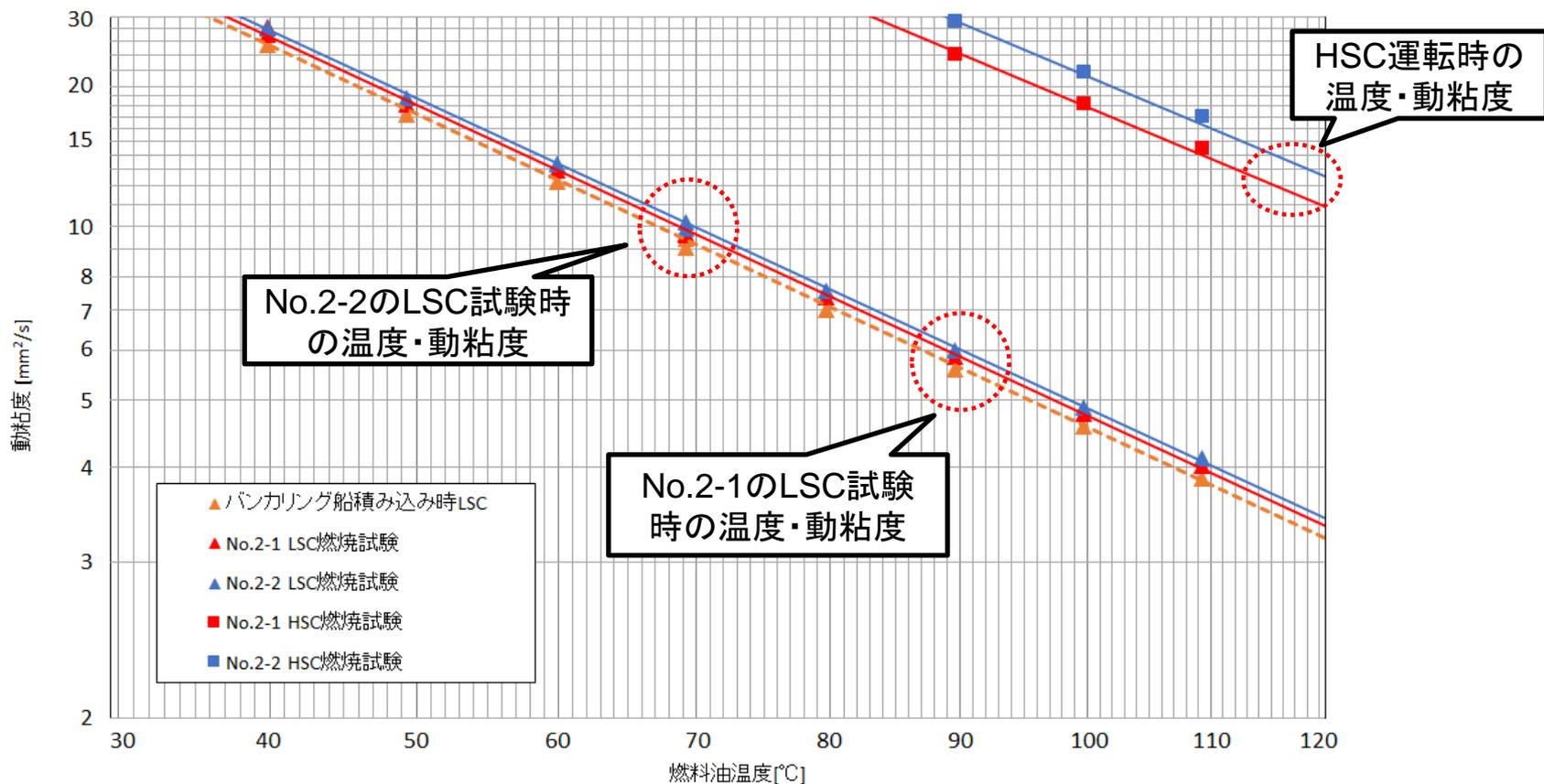
(2) 燃焼試験時の燃料油温度と動粘度 (第1回実船試験)



LSC試験時燃料油温度と動粘度

船名	No.1-1 鉄鋼運搬船	No.1-2 鉄鋼運搬船	No.1-3 セメント運搬船	No.1-4 鉄鋼運搬船
燃料油温度	約110°C	約73°C	約80°C	約117°C
動粘度	約6mm ² /s	約15mm ² /s	約14mm ² /s	約5.5mm ² /s

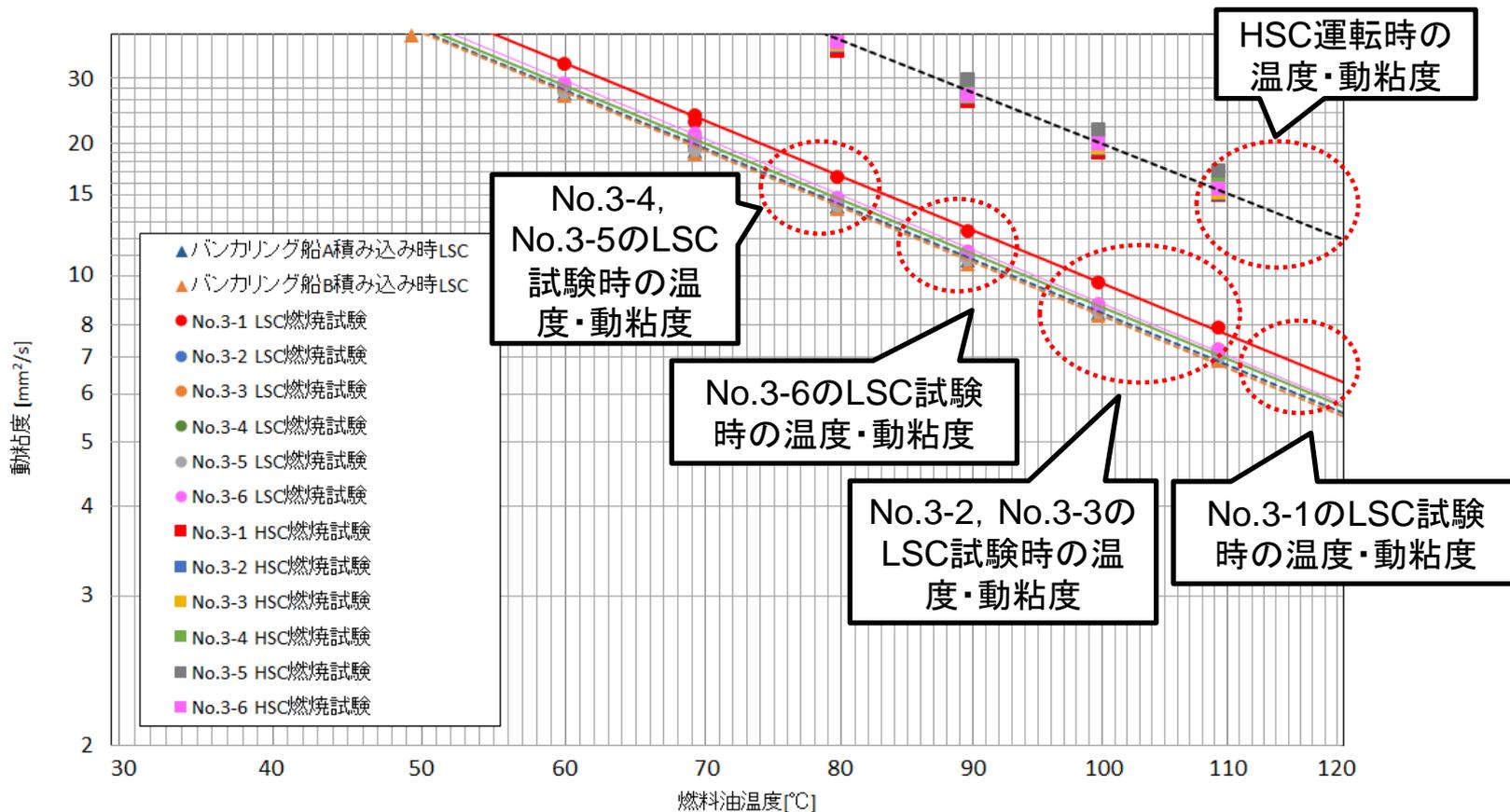
(3) 燃焼試験時の燃料油温度と動粘度 (第2回実船試験)



LSC試験時燃料油温度と動粘度

船名	No.2-1 フェリー	No.2-2 RoRo船
燃料油温度	88~90 $^{\circ}\text{C}$	66~68 $^{\circ}\text{C}$
動粘度	約6 mm^2/s	約11 mm^2/s

(4) 燃焼試験時の燃料油温度と動粘度 (第3回実船試験)

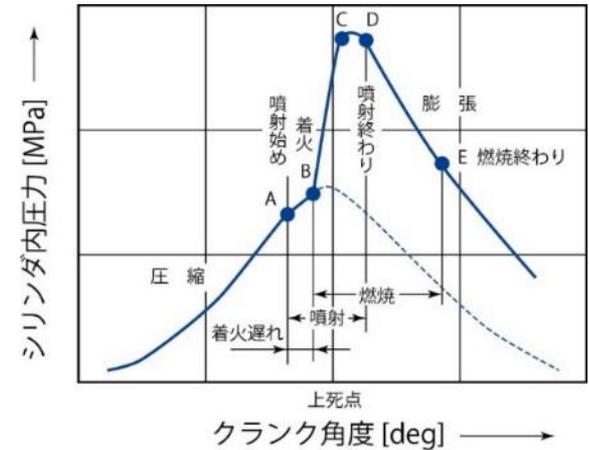


LSC試験時燃料油温度と動粘度

船名	No.3-1 鉄鋼運搬船	No.3-2 RoRo船	No.3-3 LPG運搬船	No.3-4 貨客船	No.3-5 セメント運搬船	No.3-6 RoRo船
燃料油温度	約116°C	約97°C	約109°C	81~83°C	82~84°C	約90°C
動粘度	約7mm ² /s	約8mm ² /s	約7mm ² /s	約12mm ² /s	約12mm ² /s	約11mm ² /s

21. 燃焼試験

- 燃焼性を評価する指標として、着火遅れ(燃料を噴射してから着火するまでの期間)や最高筒内圧力 P_{max} 、熱発生率などがある。
- これらを詳細に調べるためには、燃料噴射圧力および筒内圧力の変化を計測する必要があるが、実運航中の船舶においてこれらを計測することは難しい。
- 本実船試験においては、排ガス温度や過給機特性の計測および排気色(黒煙)や異音の目視等による確認により低硫黄燃料油の燃焼特性を評価する。

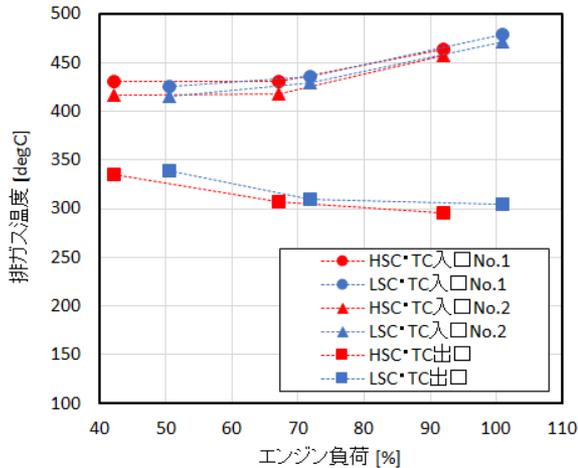


計測・確認項目

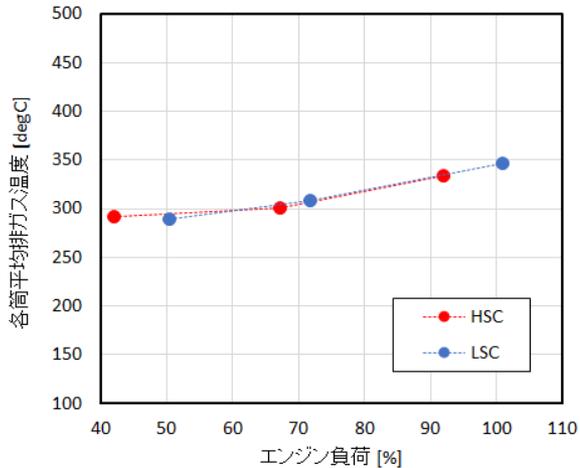
排ガス温度	各筒出口	・失火に伴う排ガス温度の低下, 燃焼の遅れなどの異常燃焼に伴う排ガス温度変化を確認・評価する。
	過給機 入口・出口	・燃焼ガスのエネルギー変化を表している。これらの温度変化を確認することで燃焼状態を評価する。 ・燃焼の遅れなどの異常燃焼が生じるとこれらの温度が上昇することがある。
過給機特性	過給機 回転数	・燃焼ガスのエネルギーを表す評価指標である ・燃焼時の空気量に影響するため, 燃焼状態に影響を及ぼす。
	給気圧力	・燃焼時の空気量を表す。
最高筒内圧力		・異常燃焼の有無を評価する(一部の船舶で計測)。
排気色		・黒煙が確認される場合, 不完全燃焼などによる燃焼性悪化が生じていると評価される。
異音		・燃料の急激な燃焼などで生じるノッキング現象の有無を評価する。

21.1 燃焼試験の結果(第1回実船試験)

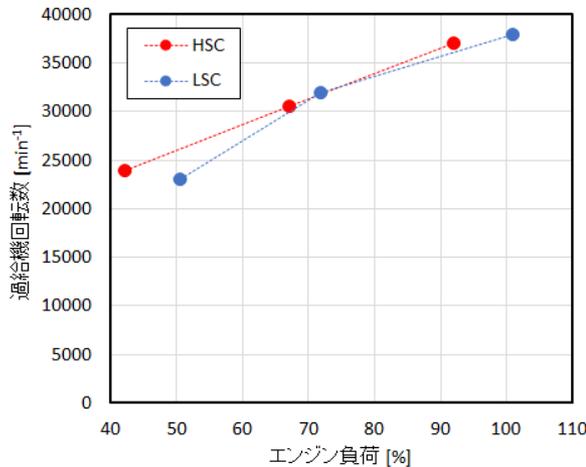
(1) No.1-1 鉄鋼運搬船



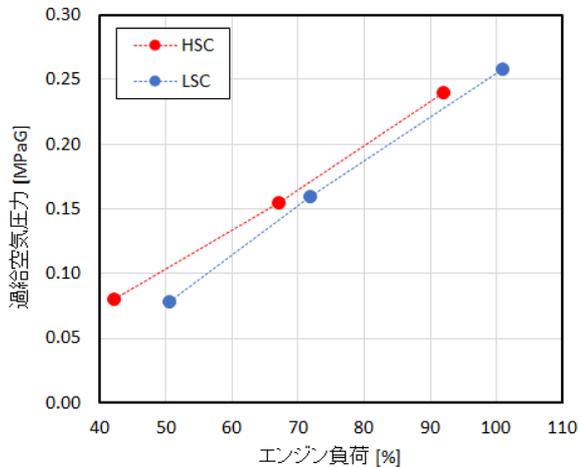
(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数

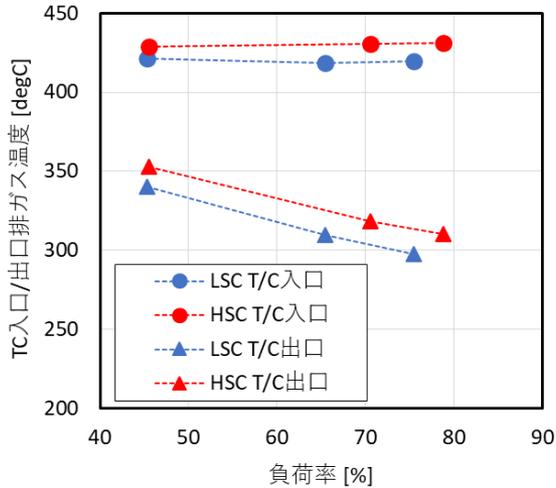


(d) 給気圧力

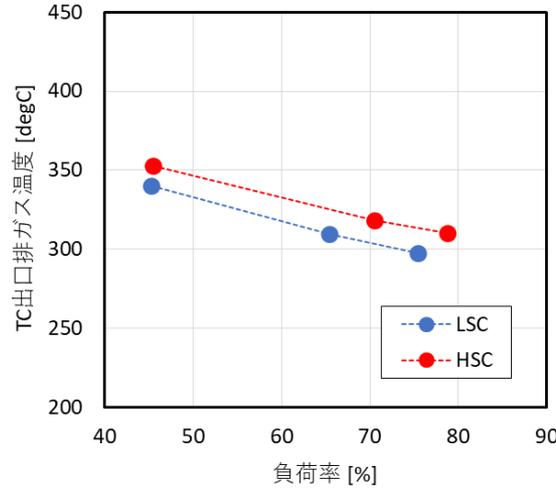
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.1 燃焼試験の結果(第1回実船試験)

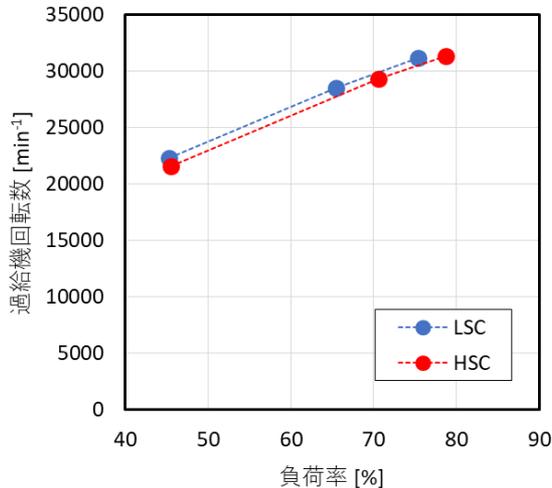
(4) No.1-2 鉄鋼運搬船



(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度

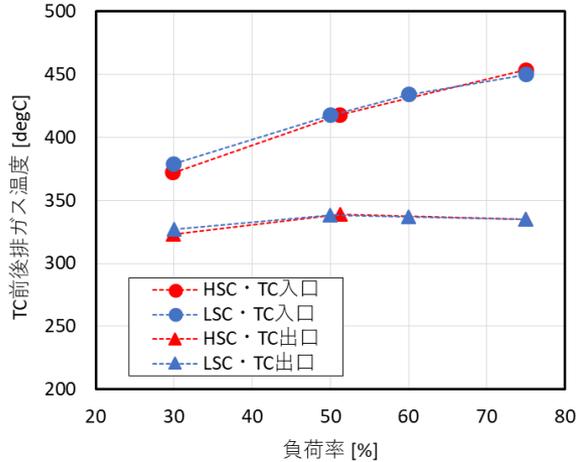


(c) 過給機回転数

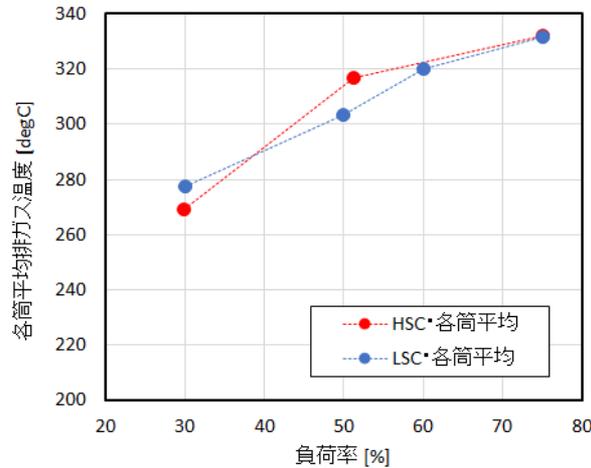
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.1 燃焼試験の結果(第1回実船試験)

(3) No.1-3 セメント運搬船



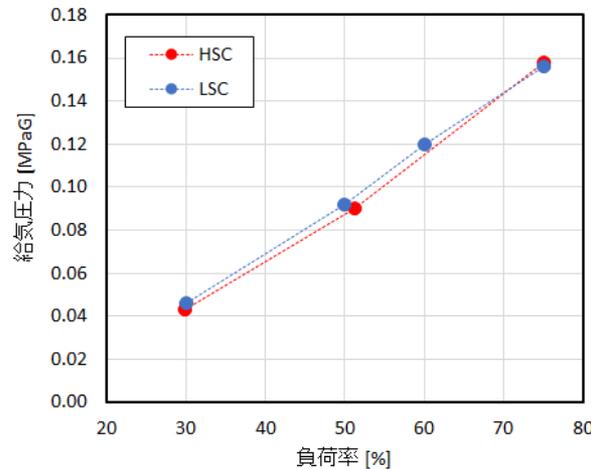
(a) 過給機前後排ガス温度



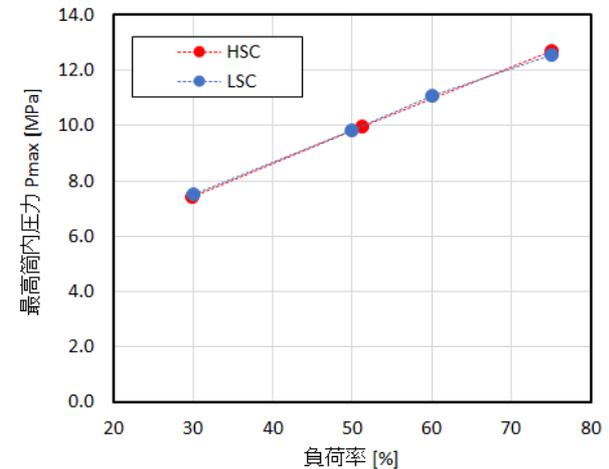
(b) 各筒平均排ガス温度

計測器なし

(c) 過給機回転数



(d) 給気圧力

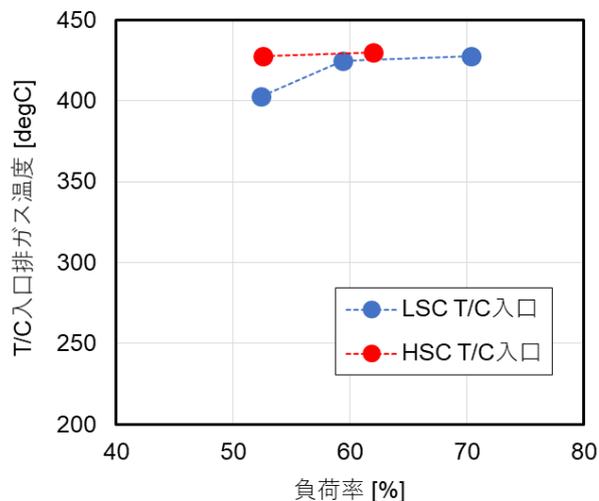


(e) 最高筒内圧力

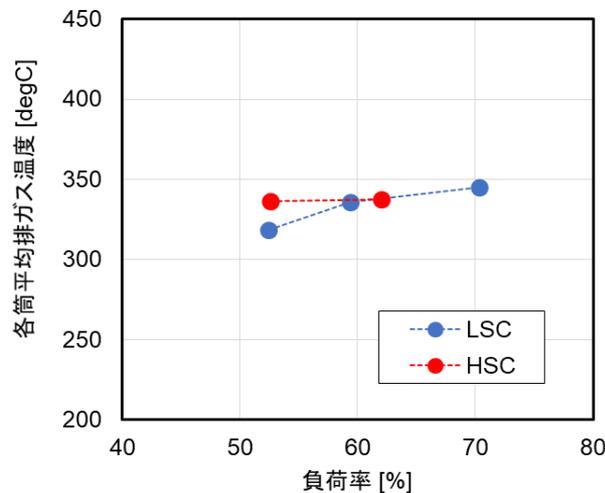
- LSC運転時の排ガス温度, 過給機特性および最高筒内圧力はHSC運転時とほぼ変わらず, 燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.1 燃焼試験の結果(第1回実船試験)

(4) No.1-4 鉄鋼運搬船



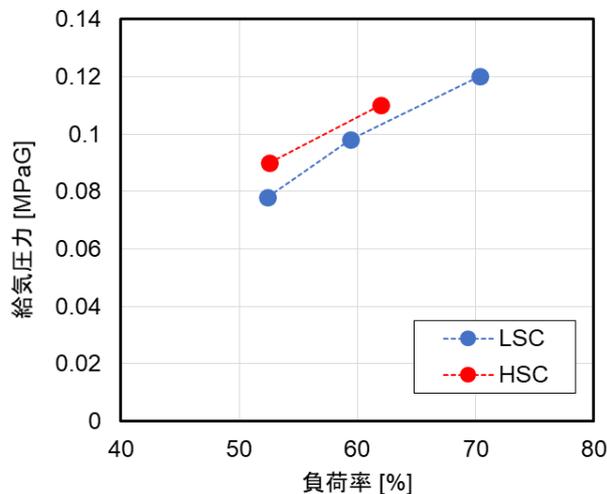
(a) 過給機前排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度

計測器なし

(c) 過給機回転数

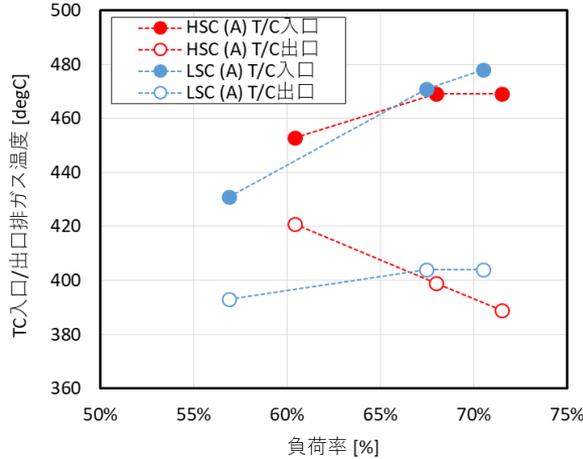


(d) 給気圧力

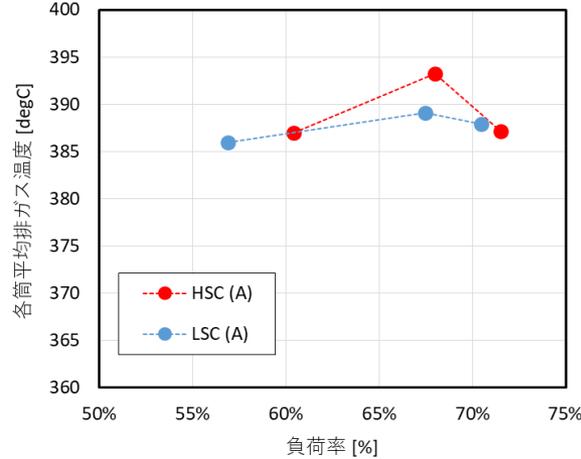
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず，燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.2 燃焼試験の結果(第2回実船試験)

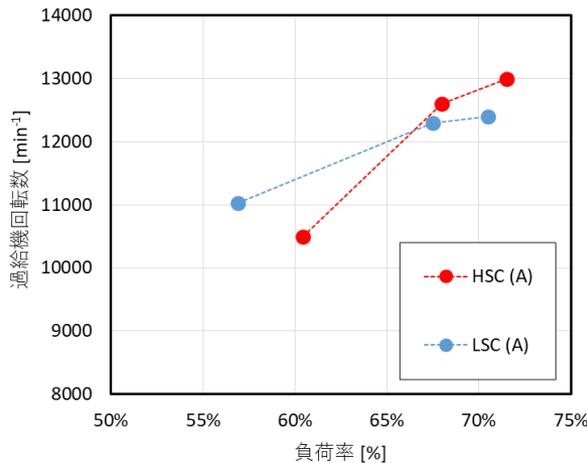
(1) No.2-1 フェリー



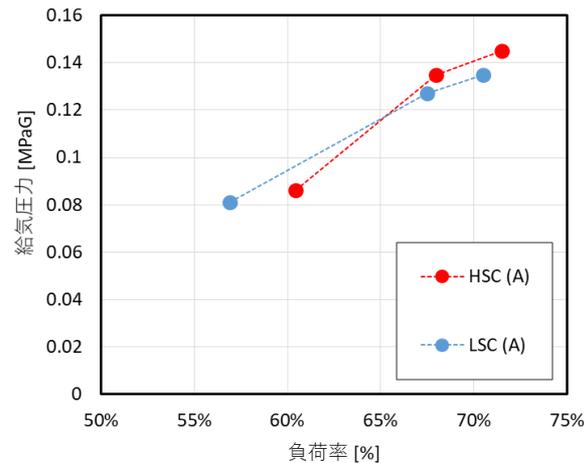
(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数



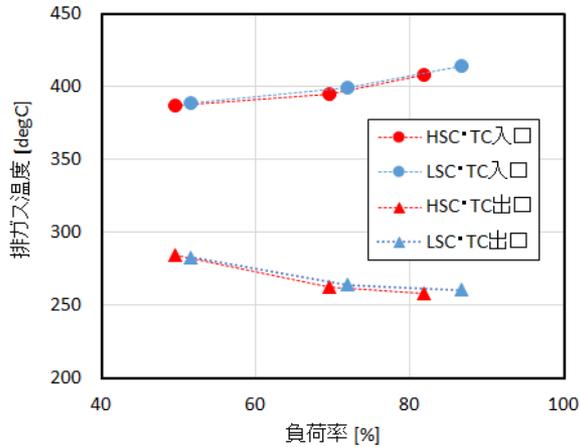
(d) 給気圧力

- 負荷率が65%を超える範囲において、LSC運転時の燃焼状態はHSC運転時とほぼ変わらない。
- 負荷率が65%よりも低い範囲において、計測値のばらつきが大きい。計測時間が短かったため、十分に安定したデータではないことが考えられる。
- いずれも燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

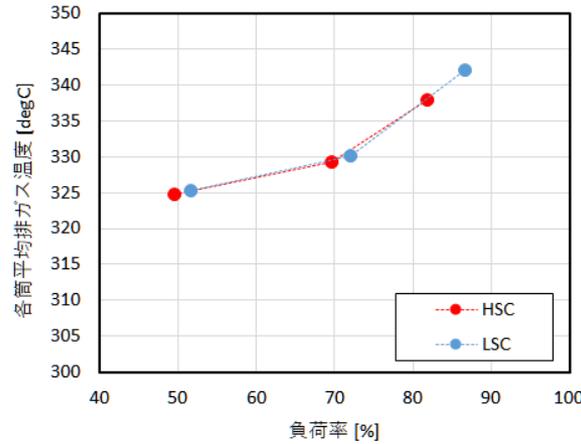
※ 上図の(A)は、V型エンジンの片側9気筒2列のうち片側(A列)の機器類における計測結果という意味である。

21.2 燃焼試験の結果(第2回実船試験)

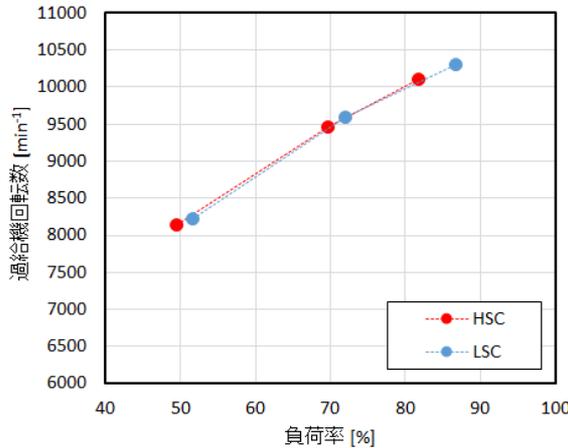
(2) No.2-2 RoRo船



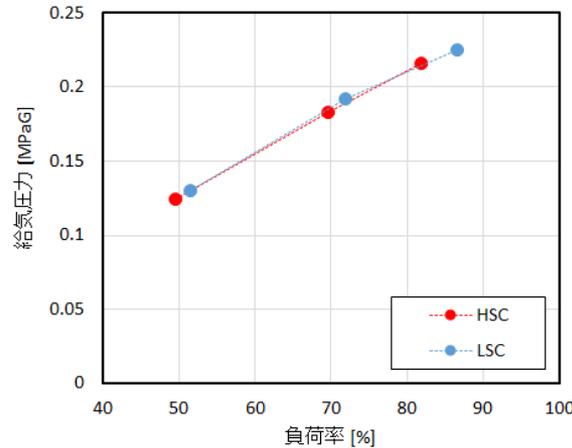
(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度

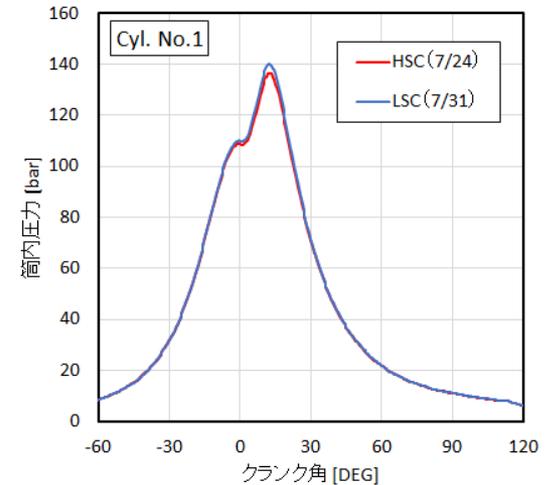


(c) 過給機回転数



(d) 給気圧力

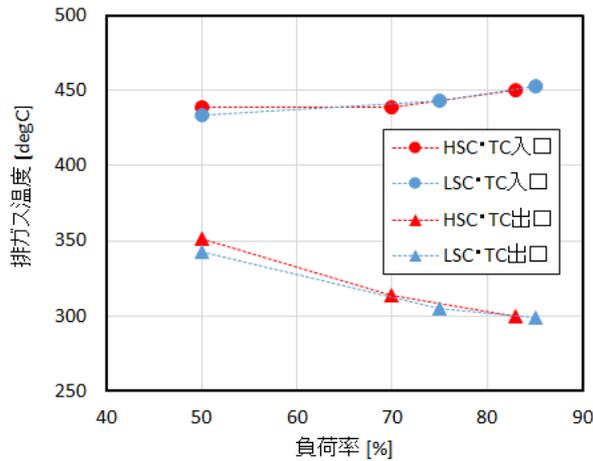
- LSC運転時の排ガス温度, 過給機特性および圧力波形(負荷率約85%)はHSC運転時とほぼ変わらず, 燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。



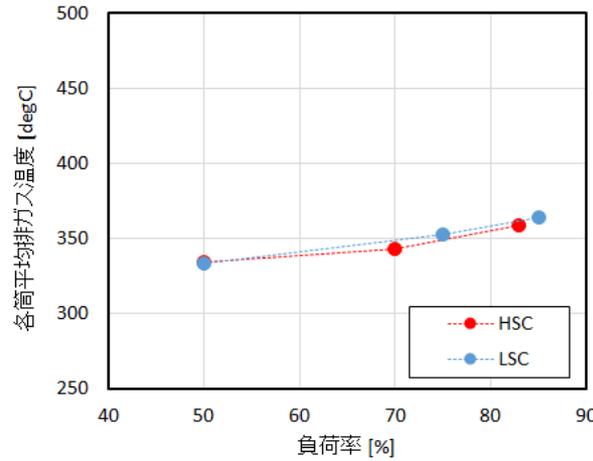
(e) 圧力波形(負荷率約85%)

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

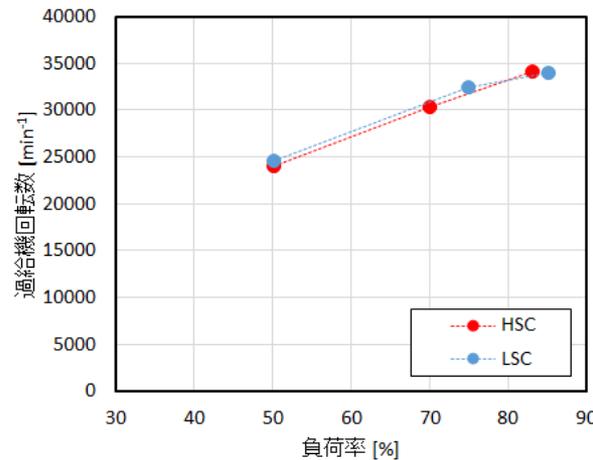
(1) No.3-1 鉄鋼運搬船



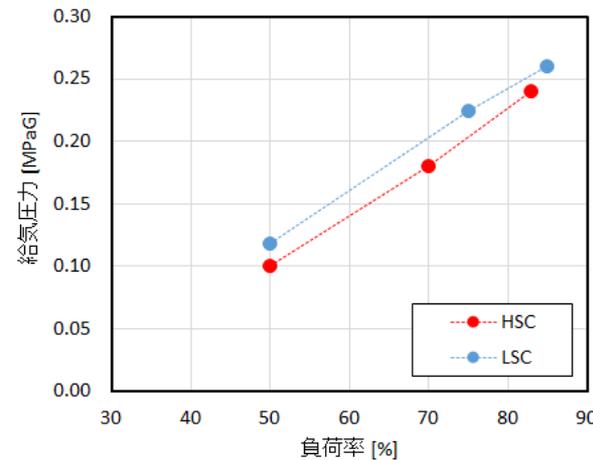
(a) 過給機前後排ガス温度



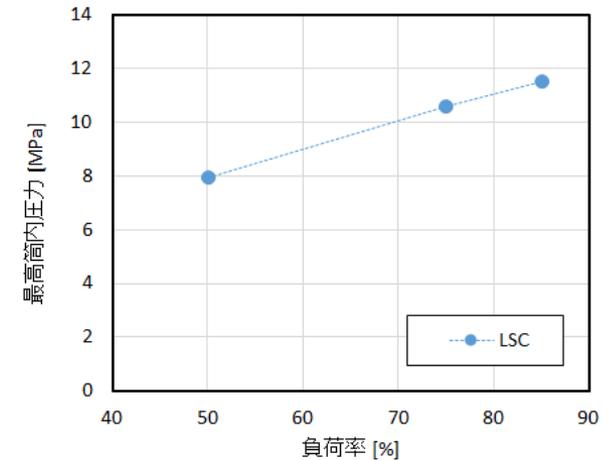
(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数



(d) 給気圧力

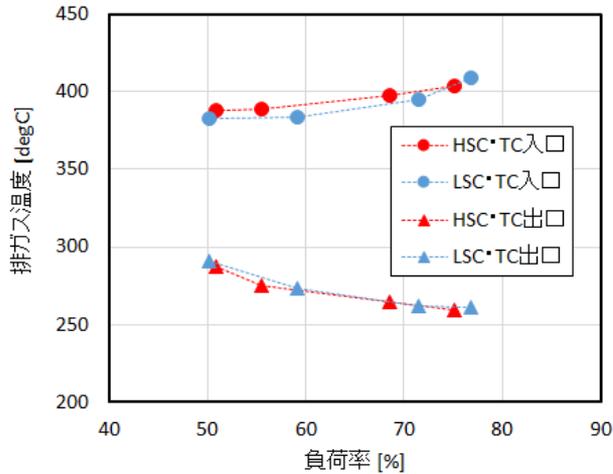


(e) 最高筒内圧力

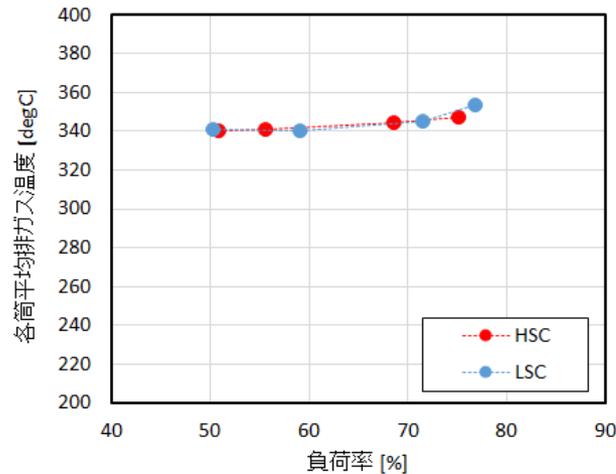
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- LSC運転時の最高筒内圧力は適切である(エンジンメーカーにより確認)。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

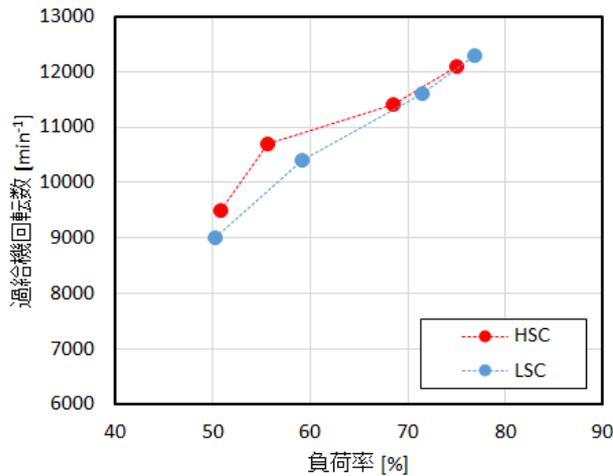
(2) No.3-2 RoRo船



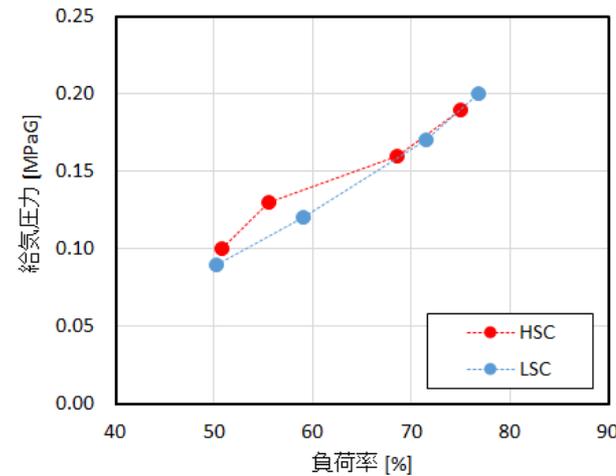
(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数

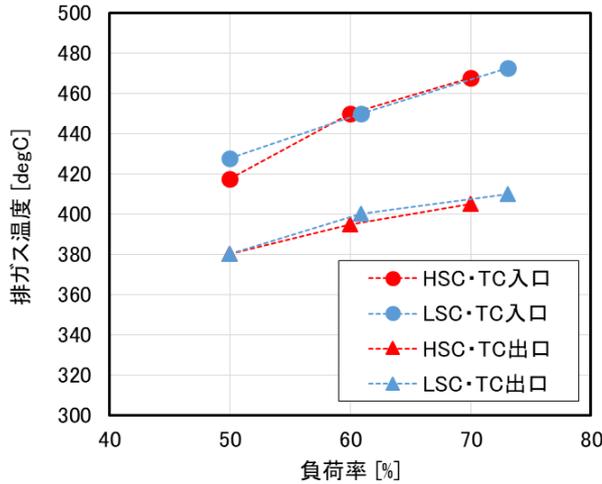


(d) 給気圧力

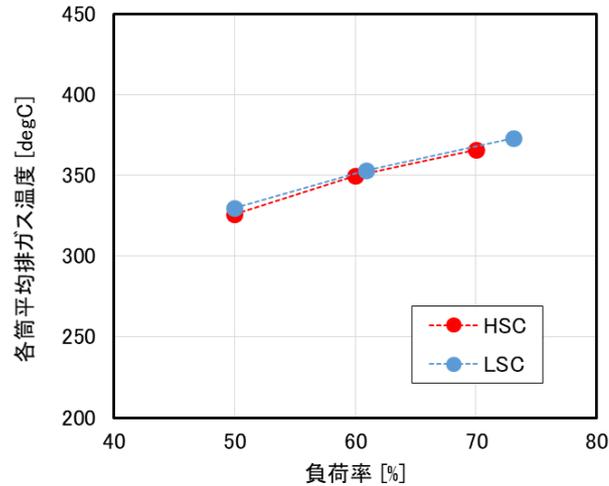
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

(3) No.3-3 LPG運搬船

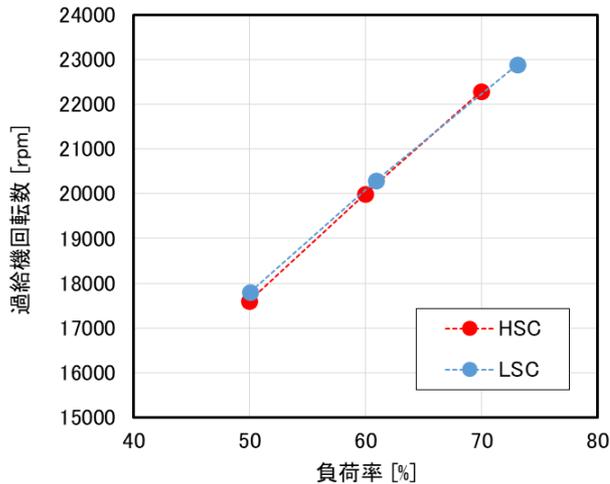


(a) 過給機前後排ガス温度

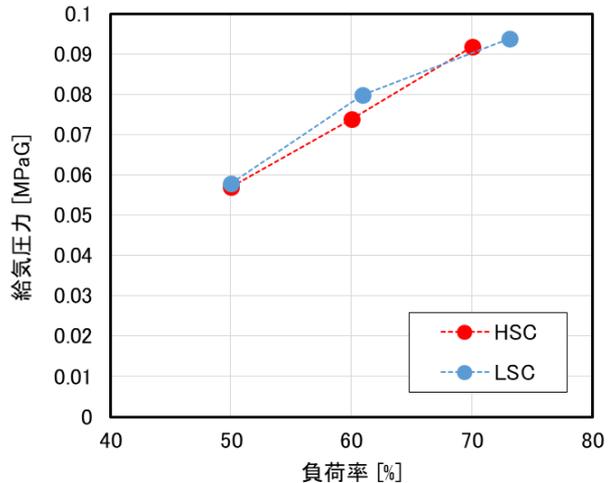


(b) 各筒平均排ガス温度

- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。



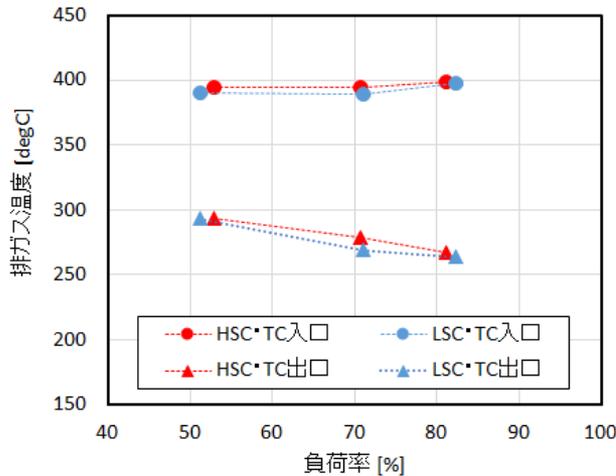
(c) 過給機回転数



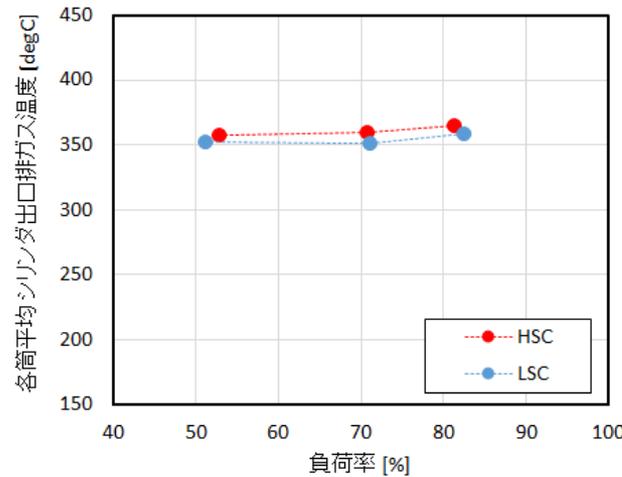
(d) 給気圧力

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

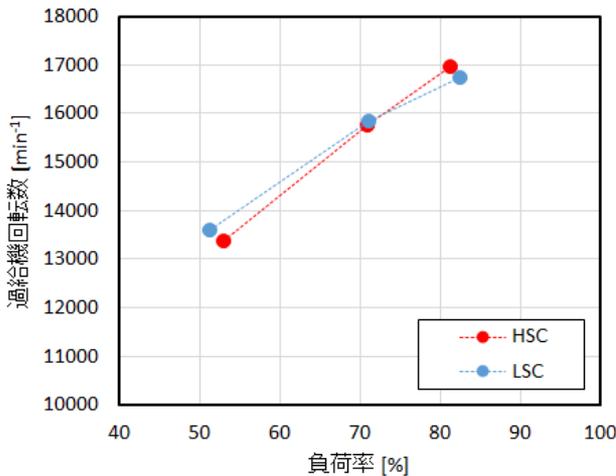
(4) No.3-4 貨客船



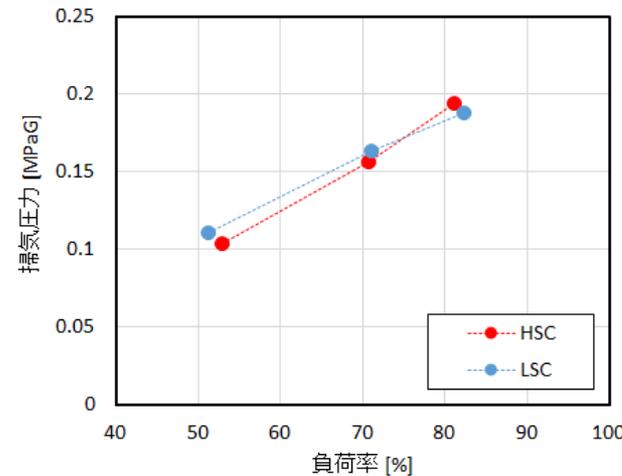
(a) 過給機前後排ガス温度



(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数

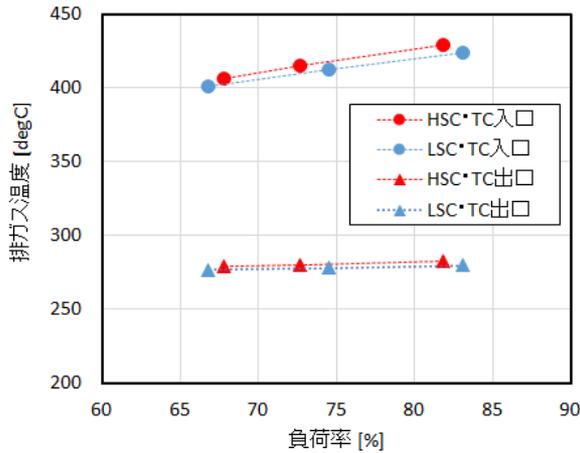


(d) 掃気圧力

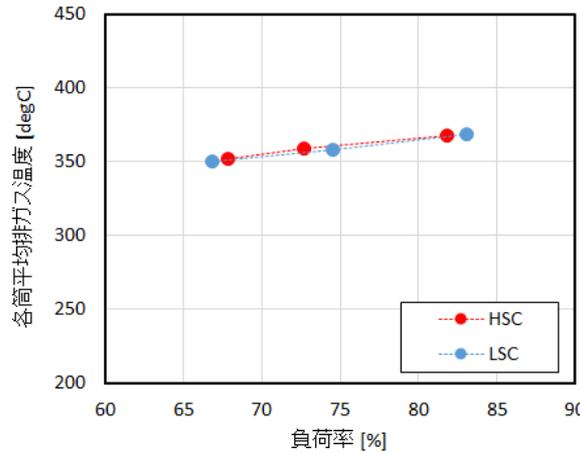
- LSC運転時の排ガス温度および過給機特性はHSC運転時とほぼ変わらず、燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

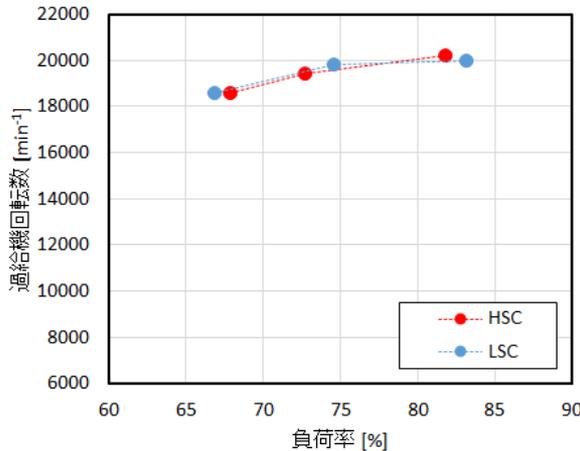
(5) No.3-5 セメント運搬船



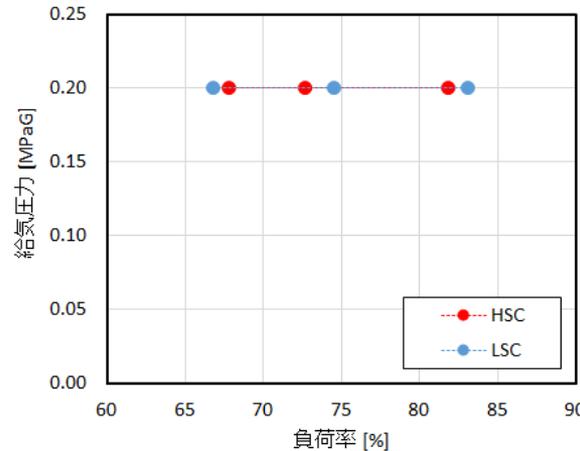
(a) 過給機前後排ガス温度



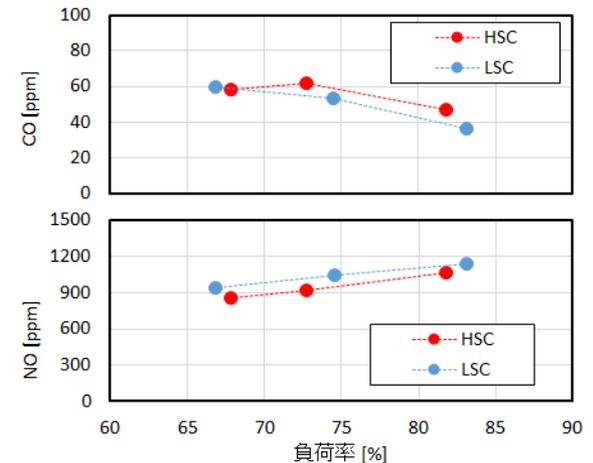
(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数



(d) 給気圧力

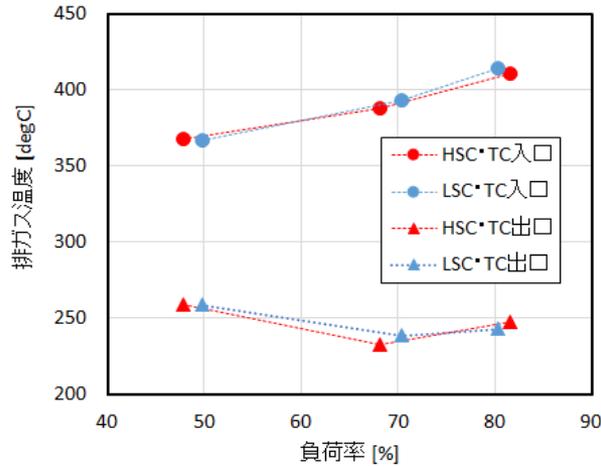


(e) 排ガス性状

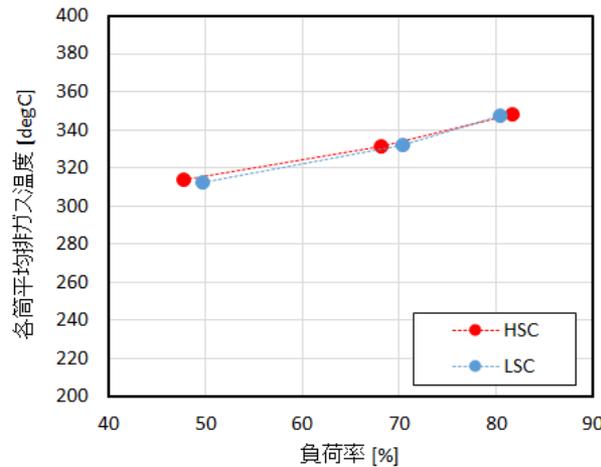
- LSC運転時の排ガス温度, 過給機特性および排ガス性状(CO濃度, NO濃度)はHSC運転時とほぼ変わらず, 燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

21.3 燃焼試験の結果(第3回実船試験)

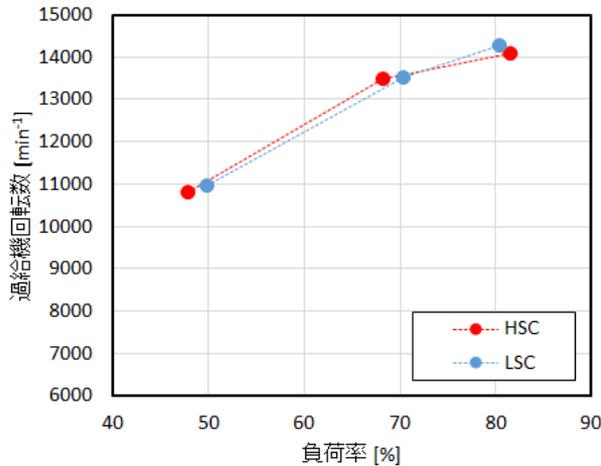
(6) No.3-6 RoRo船



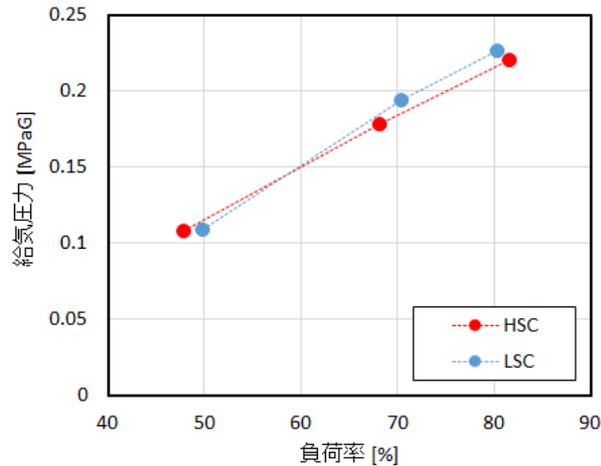
(a) 過給機前後排ガス温度



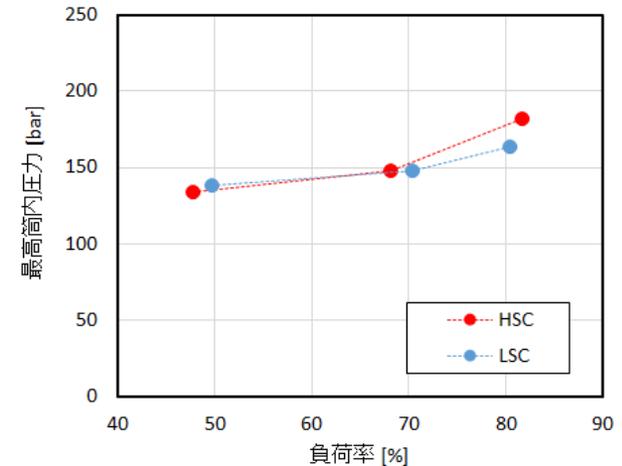
(b) 各筒平均排ガス温度



(c) 過給機回転数



(d) 給気圧力



(e) 最高筒内圧力

- LSC運転時の排ガス温度, 過給機特性および最高筒内圧力はHSC運転時とほぼ変わらず, 燃焼性に問題は確認できなかった。
- 異音や黒煙発生などの異常は確認されなかった。

- 現行C重油を使用している船用エンジンに対し、燃料油の低硫黄化による性状変化が船用エンジンへ及ぼす影響を確認するため、12隻の内航船舶によって燃焼試験を行った結果、低硫黄C重油(LSC)運転時の燃焼状態はHSC運転時とほぼ変わらないことを確認した。

- 低硫黄化後の船用燃料油の性状変化を想定して試験燃料を作製し、代表的な船用エンジンタイプである中速4ストロークエンジン、2ストロークエンジンを用い燃焼試験を実施した。その結果、いずれのエンジンにおいても、低硫黄燃料油が従来のC重油と同様に使用できることが示唆された。
- 様々なエンジンタイプ、大きさ、使用形態の12隻の内航船舶を用いて燃焼性試験を行い、低硫黄燃料油の燃焼状態は従来のC重油とほぼ変わらず、問題なく使用できることを確認した。