

バイオ燃料の陸上・実船試験結果

目次

1. はじめに
2. 試験に使用したバイオ燃料
3. 動粘度・密度の計測
4. 定容燃焼装置（FCA）による試験
5. 混合安定性試験
6. ゴム材料の浸漬試験
7. FAMEによる実船試験
8. HVOによる陸上エンジン試験
9. まとめ

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

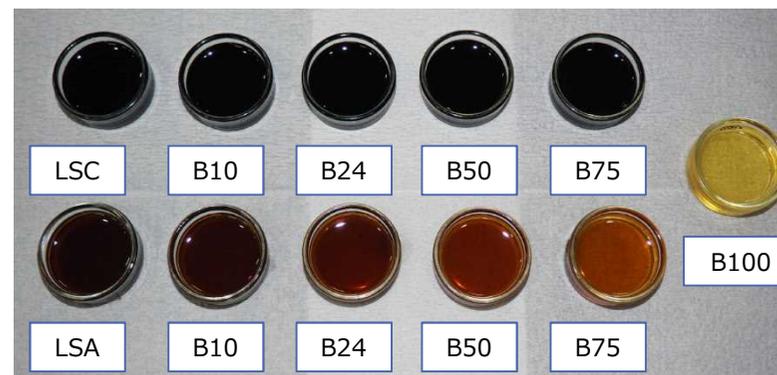
1. はじめに

- 船舶燃料油として利用可能性のあるバイオ燃料について、船舶利用時の技術的な観点による評価の検証を行う。
- バイオ燃料は従来から使用されている船用重油（A重油，高硫黄C重油HSC，低硫黄C重油LSC）と混合して使用されることが想定される。
- 実船試験ではバイオ燃料とLSC重油を混合した場合について検証を行う。
- 陸上試験では、幅広い条件で燃料を混合し、基本的な燃料特性の計測・評価を行う。

No.	試験・評価項目	陸上試験	実船試験
①	性状（動粘度、密度、流動点等）	○	
②	燃焼性の特性	○	○
③	バイオ燃料と重油の混合安定性、スラッジの発生状況	○	○
④	エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食、劣化に及ぼす影響	○	○
⑤	燃費		○
⑥	排出ガスの成分	(○)	○
⑦	燃料油の切替え及びバンカリング時における影響		○

2. 試験に使用したバイオ燃料

- 実船試験等に使用したFAMEのほか、HVOおよびSVOについても各社から提供いただき、陸上試験を進めてきた。
- 実船試験および陸上エンジン試験においては、一部の混合率で試験を行った。その他の陸上試験においてはA重油およびLSC（低硫黄C重油）との混合など、幅広い試験条件とした。

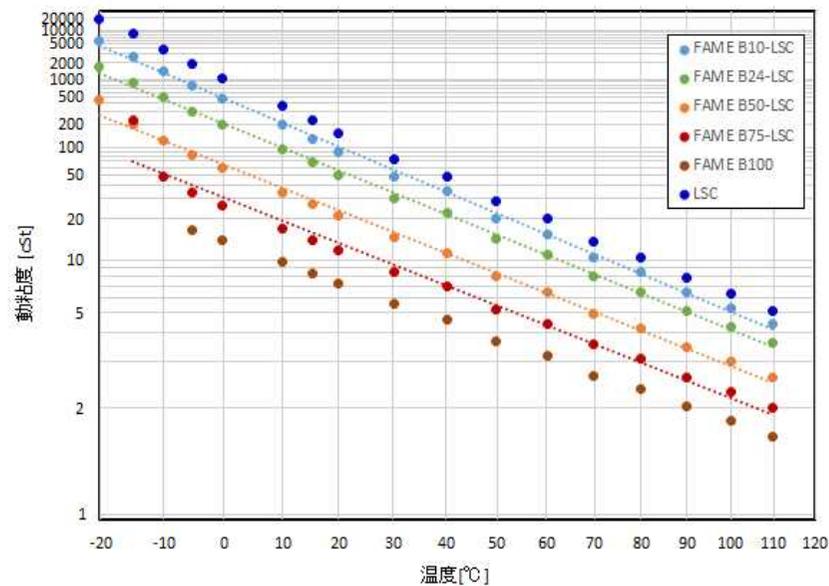


A重油およびLSCとバイオ燃料との混合油

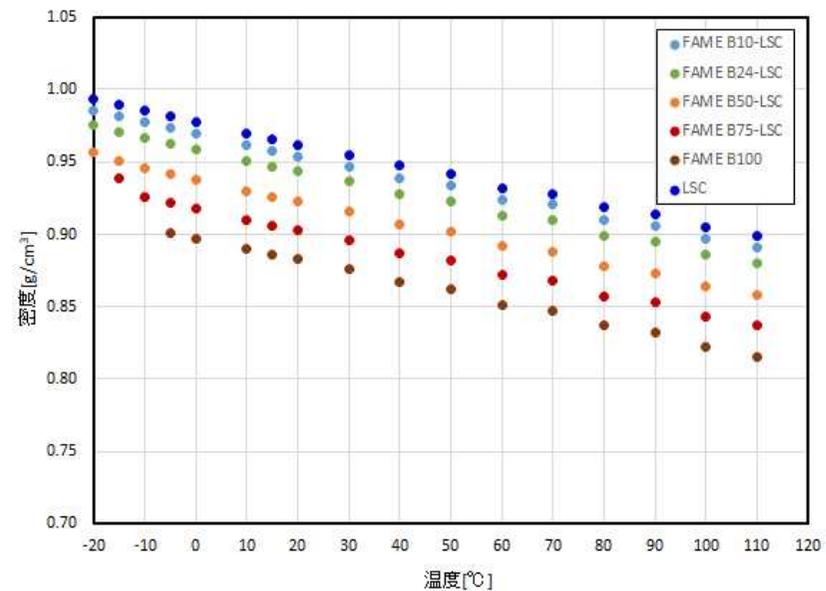
バイオ燃料	陸上・実船試験の状況
SVO (粗バイオ燃料)	<ul style="list-style-type: none"> ● 陸上基礎試験を実施済み ● 海技研の陸上エンジン試験を実施予定（11月）
FAME (脂肪酸メチルエステル)	<ul style="list-style-type: none"> ● トヨフジ海運の実船試験 ● 各種陸上試験を実施済み
HVO (水素化植物油)	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種陸上試験および海技研の陸上エンジン試験を実施済み

3. 動粘度・密度の計測

- A重油およびLSCとバイオ燃料（SVO, FAME, HVO）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- いずれのバイオ燃料においても、温度-動粘度チャートは概ね直線で表されることを確認した。
- いずれのバイオ燃料においても、密度は従来の重油から大幅に変わることはない。
- 混合油の動粘度および密度は、混合する燃料（B0, B100）の間にある。

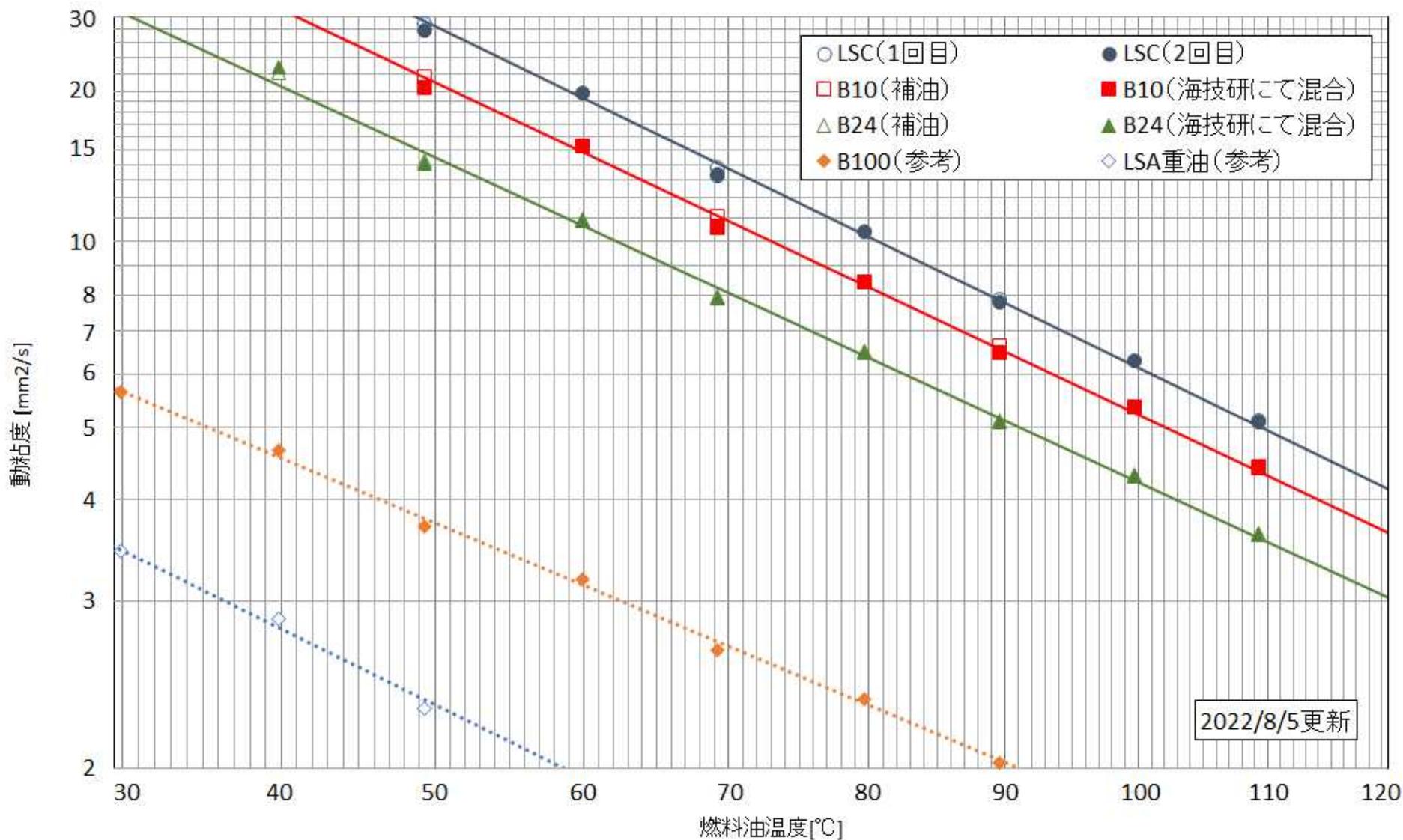


(a) 動粘度の計測例 (FAME-LSC)

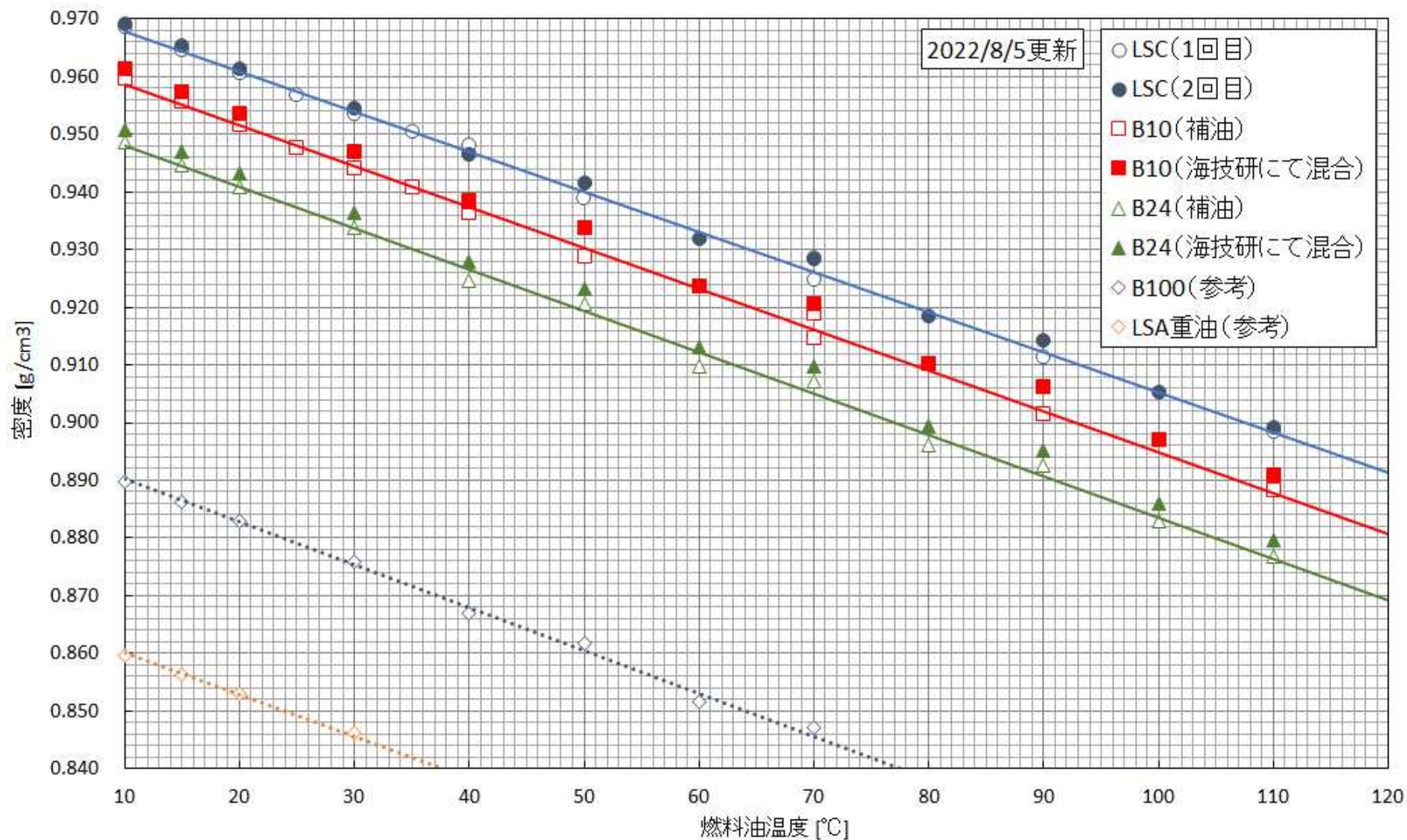


(b) 密度の計測例 (FAME-LSC)

【参考】FAME-LSC混合油の温度に対する動粘度（実船試験用）



【参考】 FAME-LSC混合油の温度に対する密度（実船試験用）

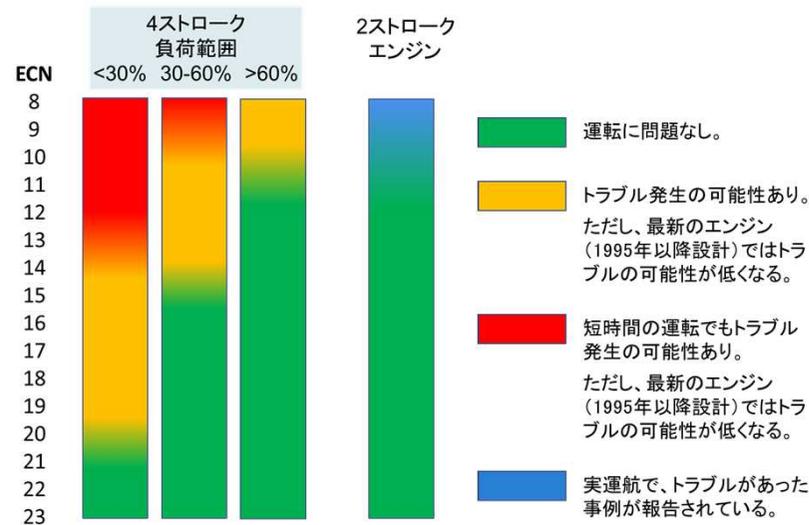


4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

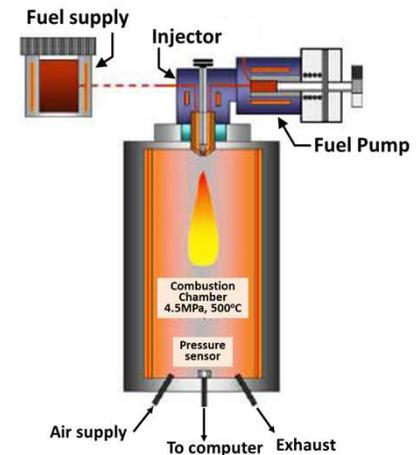
(1) 試験の概要

- バイオ燃料, LSC重油, A重油の燃焼性の相違を調べるため, 定容燃焼装置 (FCA) を用いた燃焼試験を行う。
- FCAでは, 圧力変化および圧力変化率の結果から着火遅れや燃焼時間, 着火性評価指標である推定セタン価ECNなどを求めることができる。

- 例えば, 推定セタン価ECNは, 燃料油の燃焼性 (自己着火のしやすさ, ノッキングのしにくさ) を表す指標である。一般に, ECNが高いほど自己着火しやすく, ノッキングが起こりにくい。



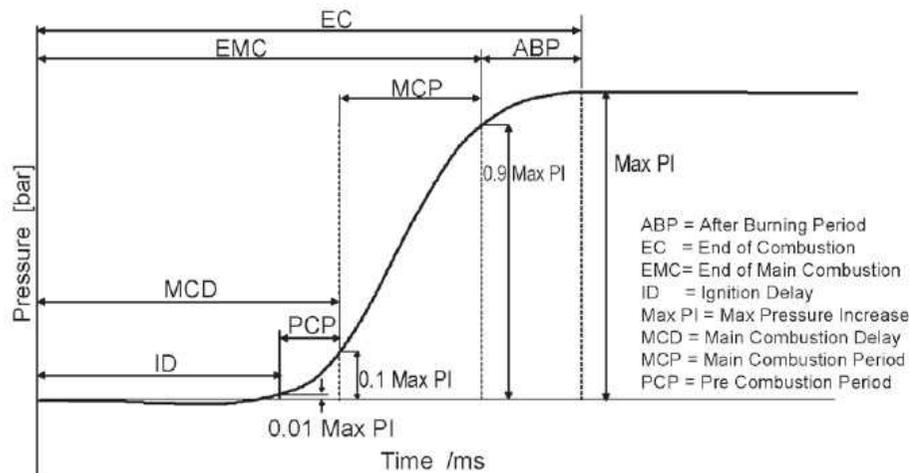
ECNによる燃料の着火性の評価例



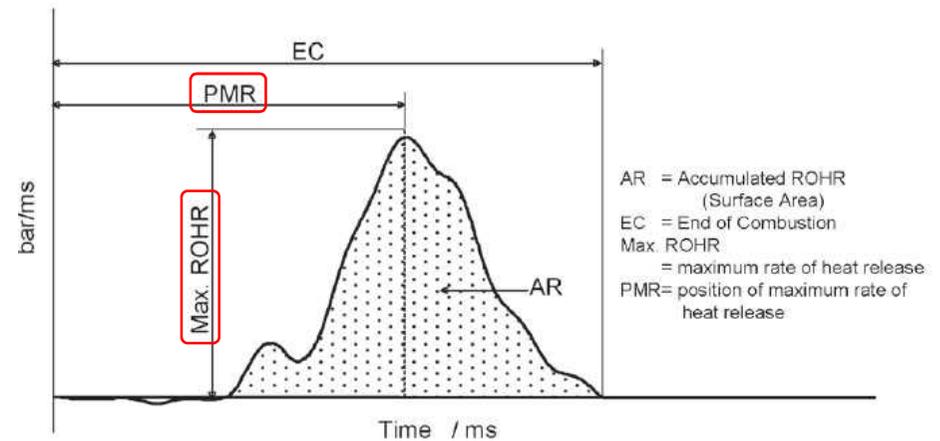
FIA-100 Fuel Combustion Analyzer (FCA)

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(2) 試験結果の評価方法



推定セタン化 $ECN = 153.15e^{-0.2861MCD}$



試験結果	結果の意味	想定されるトラブル
ID, PMRが遅く, Max ROHRの値が高い	<ul style="list-style-type: none"> 遅い着火と急激な燃焼 	エンジン, ピストンリング損傷の可能性
PMRが遅く, Max ROHRの値が低い	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間と膨張行程の温度低下による燃焼の遅れ 燃料油中の重質成分がシリンダ内で燃えるのに時間がかかる 	スートとPMの増加, 過給機トラブルのリスク上昇
ABPの著しい増加	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間 	スートおよびPMの増加, デポジットの発生, 排気管の詰まりなど

(1) CIMAC "Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion", 2011

(2) 竹田他, 定容燃焼試験法 (IP541) による船用残渣燃料油の分析結果, JIME学会誌44-4, 2009

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(3) FCA試験条件

(a) 燃料サンプル加熱条件

Sample viscosity mm ² /s@50°C	Fuel reservoir (°C)	Injection assembly (°C)	Fuel pump (°C)	Fuel grades ISO 8217:2010
<25	50	50	50	DM grade, RMA
25 - 800	125	125	125	RMB - RMK
800 -2000	145	145	145	

※ 以下のFCA試験において、すべてのサンプル油に対してDM grade, RMAの加熱条件としている。

(b) 装置設定条件

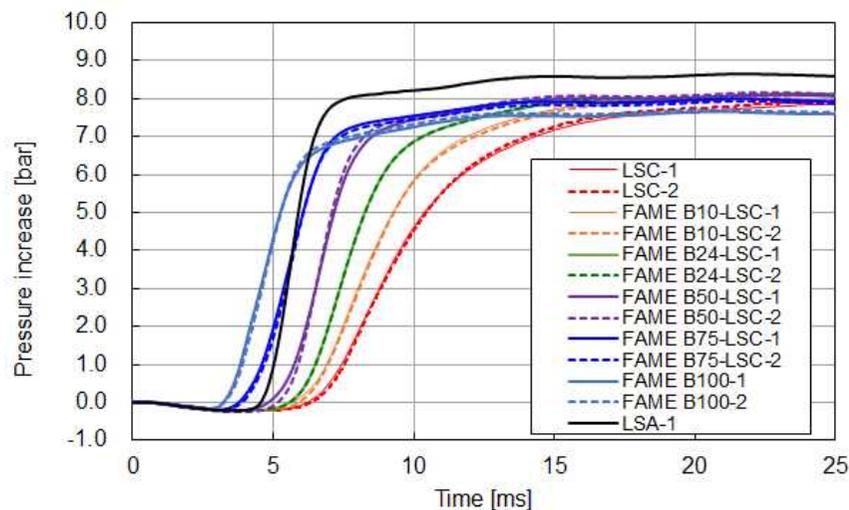
Process parameters	
Initial chamber temperature	500 °C
Initial chamber pressure	4.5 MPa
Injection pressure	35 MPa
Injected volume	Approx. 0.1 ml/injection
No. of injections per test	25

※ FCA試験装置の設定条件は、中速ディーゼルエンジンの低負荷運転に近い条件となっている。実際のエンジン内での燃焼を模擬する目的ではなく、燃料そのものが持つ着火・燃焼特性を評価する試験法である。

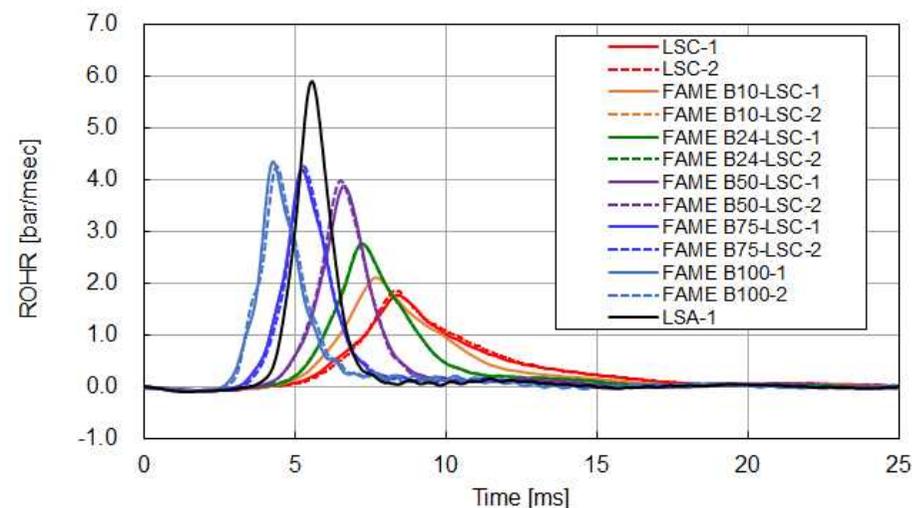
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(4) 燃焼波形

- 圧力変化および熱発生率の結果から着火遅れや燃焼時間を評価できる。
- それぞれのバイオ燃料について、従来燃料 (A重油, LSC) の試験結果と比較した。
- 使用したバイオ燃料 (B100) の燃焼性は高く、燃焼開始が早まる傾向にある。
- B10やB24などの混合率において、燃焼波形は従来燃料 (B0) に近いため、エンジン運転時においても従来燃料使用時の燃焼と大きく変わらないと推定される。



(a) 圧力波形の計測例 (FAME-LSC)



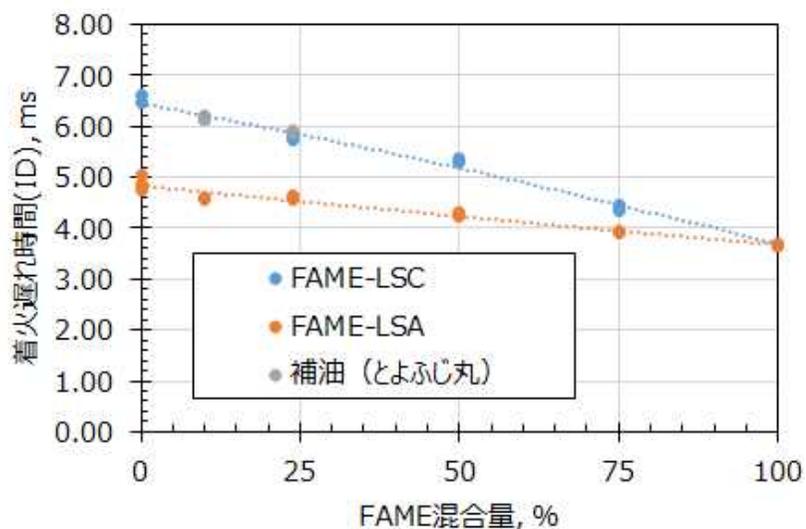
(b) 熱発生率の計測例 (FAME-LSC)

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

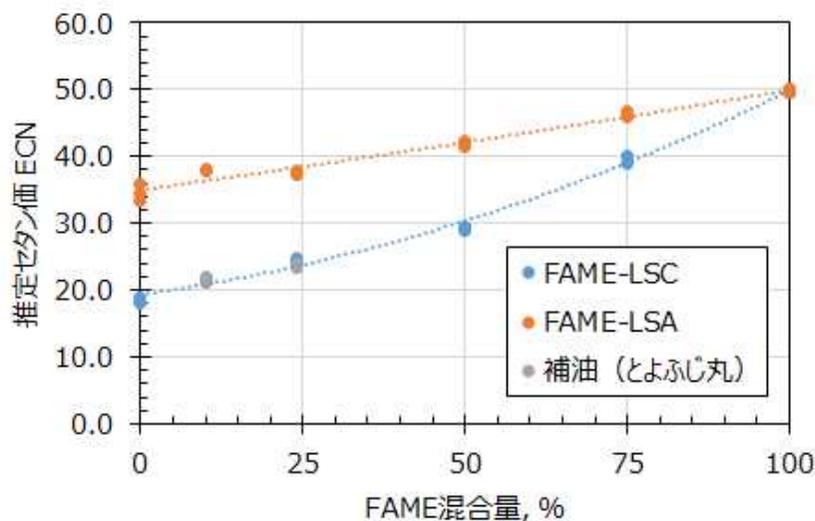
(5) 試験結果の評価例 (FAME-LSC)

- B100の着火遅れ時間IDは短い。実船試験に使用するFAME-LSC混合油 (B10およびB24) の着火性は, LSCと比べてやや高い。
- 実船試験に使用するFAME-LSC混合油 (B10およびB24) のECNは, 21~24であり, 燃焼性に問題ないレベルであると推定される。

※ 規格上, ECNの適用範囲は40までのため, 40を超えたECN値は参考値である。



(a) 着火遅れ時間 ID

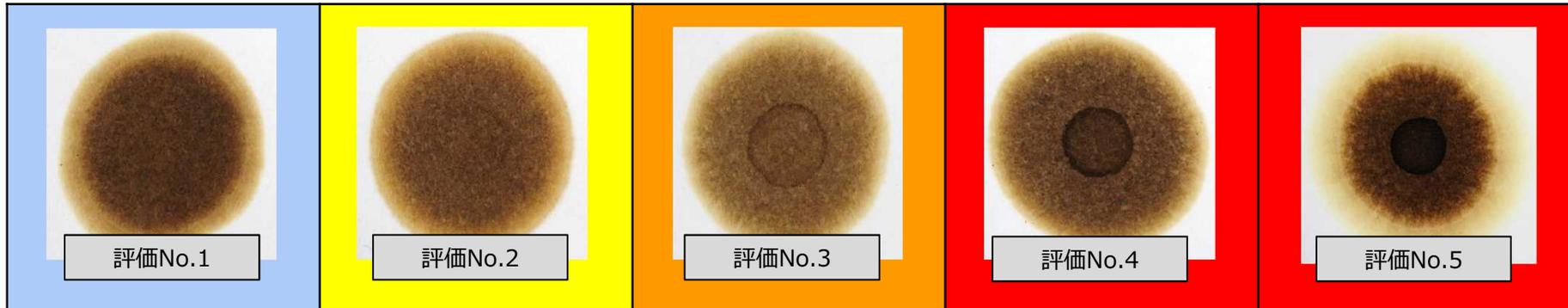


(b) 推定セタン価 ECN

5. 混合安定性試験

(1) スポットテストの概要

燃料油のスポットテスト評価 ASTM D4740



試料油を滴下したところにリングがまったく認められない。



安定性に問題ない。

周囲に不完全な内円がわずかに認められる。



安定性に問題ない。

周囲が完全な線上の内円が認められ、内円と外円の色が同じ。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円の縁が黒色になり、内円内部の色が外円より濃い。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円内部はさらに濃くなり、中心付近以外はほぼ黒くなる。



安定性が悪く、スラッジトラブルが発生する可能性が高い。

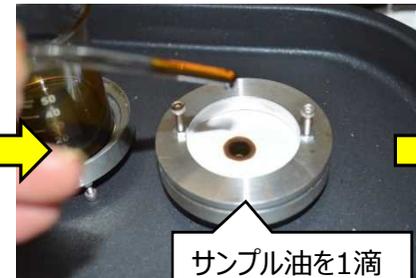
【参考】試験方法



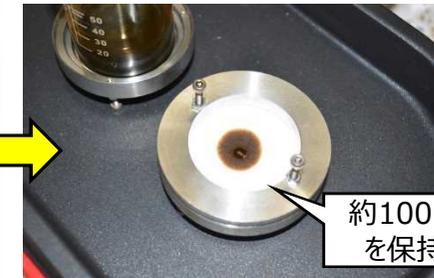
決められたろ紙 (5B) を準備する。



サンプル油とろ紙を約100℃に加熱する。



サンプル油を1滴だけ落とす。



約100℃を保持

5. 混合安定性試験

(2) 試験方法

- スポットテストにより，バイオ燃料と重油（LSC, LSA）の混合比を変えたときの混合安定性を確認する。
- 船内での長時間の貯蔵を想定して，異なる温度条件において，混合後の長期変化を調べる。

試験方法の概要

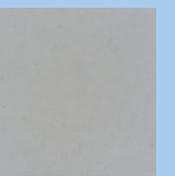
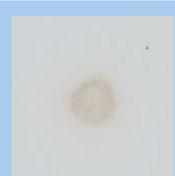
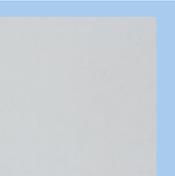
No.	試験 (温度条件)	概要
(1)	常温	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。1回スポットテスト毎に，1時間程度，約100℃までの加熱を繰り返して行う（常時，常温に保管したサンプル油ではない）。
(2)	80℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。スポットテスト毎に約100℃まで加熱し，試験終了後は80℃に加熱した恒温槽内で保管する。

5. 混合安定性試験

(3) 試験結果

- いずれのバイオ燃料とA重油の混合油の混合安定性は、本試験範囲内においてすべて問題ないと判断された。

各種バイオ燃料とA重油の混合安定性試験結果

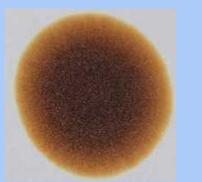
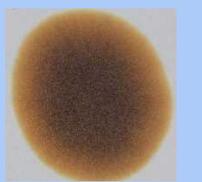
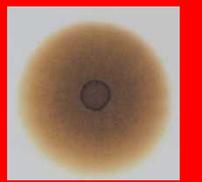
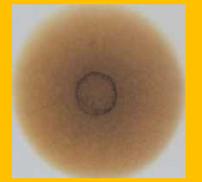
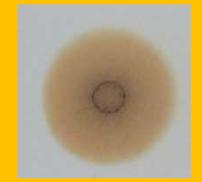
	A重油	B10	B24	B50	B75	B100	備考
SVO 常温・400h							すべて評価No.1であり、安定性に問題ないと判断される。
FAME 常温・400h							すべて評価No.1であり、安定性に問題ないと判断される。
HVO 常温・400h							すべて評価No.1であり、安定性に問題ないと判断される。

5. 混合安定性試験

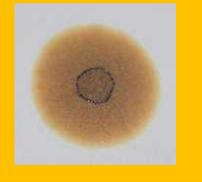
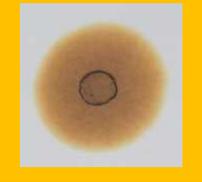
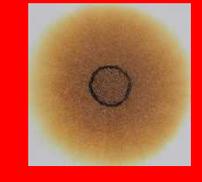
(3) 試験結果

- バイオ燃料とLSCの混合安定性は、時間経過や保管状態によって悪化する。ただし、LSC単体の安定性も悪化するため、バイオ燃料との混合が原因であるかは判断できない。

FAMEとLSCの混合安定性試験結果例

	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	
LSC 常温・0h							B75は評価No.2, それ以外は評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
LSC 常温・650h							B0~B75において, 円がはっきりとしている。

HVOとLSCの混合安定性試験結果 (時間経過)

時間	100h	200h	300h	400h	500h	
HVO-LSC B50 80℃						時間経過とともに, 安定性が悪化している。悪化の進行は周囲状況によって異なると考えられる。

6. ゴム材料の浸漬試験

(1) ゴム材料の試験片

- 3種類のゴム材料（厚さ約2mm）を準備した（下表参照）。
- 以下の浸漬試験においては、JIS K 6258を参考として、厚さの寸法変化を計測した。



準備したゴムシート



切り出したゴム試験片

浸漬試験に用いたゴム試験片

整理記号	A	B	D
種類	中高ニトリルゴム (中高NBR)	高ニトリルゴム (高NBR)	フッ素ゴム (FKM)
アクリロニトリル 含有量	31~35%*	36~42%*	---
備考	一般的なニトリルゴム	一部の燃料移送ポンプに 使用されている材料	耐熱性、耐油性が高い 材料

※ 資料 (<https://www.packing.co.jp/GOMU/GOMU1/nbr.htm>) の参考値であり、ゴム試験片の計測値ではない。

6. ゴム材料の浸漬試験

(2) 試験方法

(a) 試験環境

- 恒温槽を温度55℃に設定し、浸漬試験を行った結果を整理する。



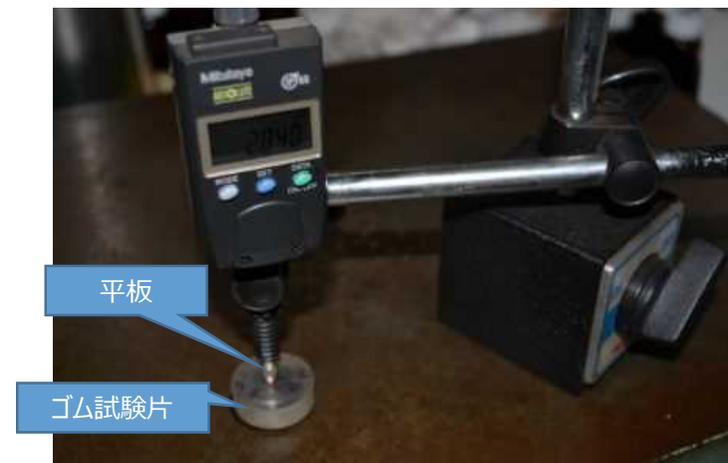
恒温槽



恒温槽内の試験片

(b) 寸法計測

- 定盤の上にゴム試験片を置き、アルミニウム合金製平板による一定加圧条件の下、デジタルマイクロゲージ（分解能1/1000mm）で寸法（厚さ）を計測する。
- ゴム試験片上の4点の寸法を計測をして平均値を求め、あらかじめ浸漬試験の前に個々の試験片において計測していた基準長さに対する寸法変化率を算出する。

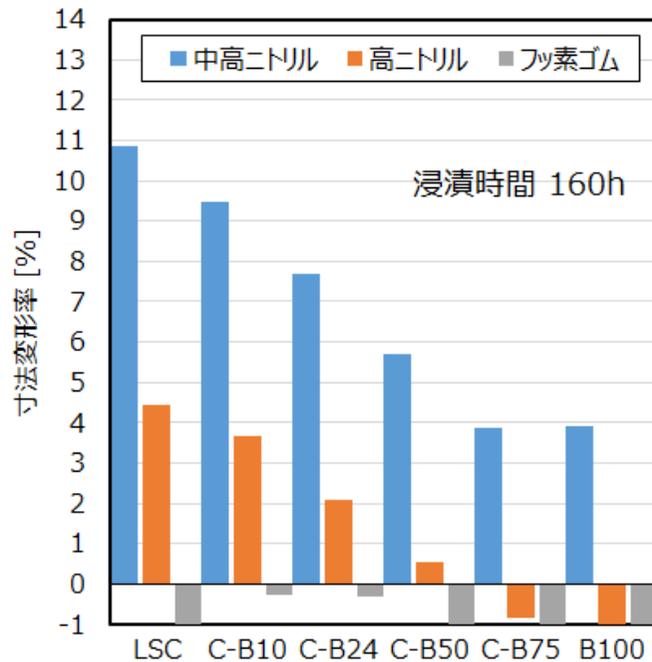


ゴム試験片の寸法計測

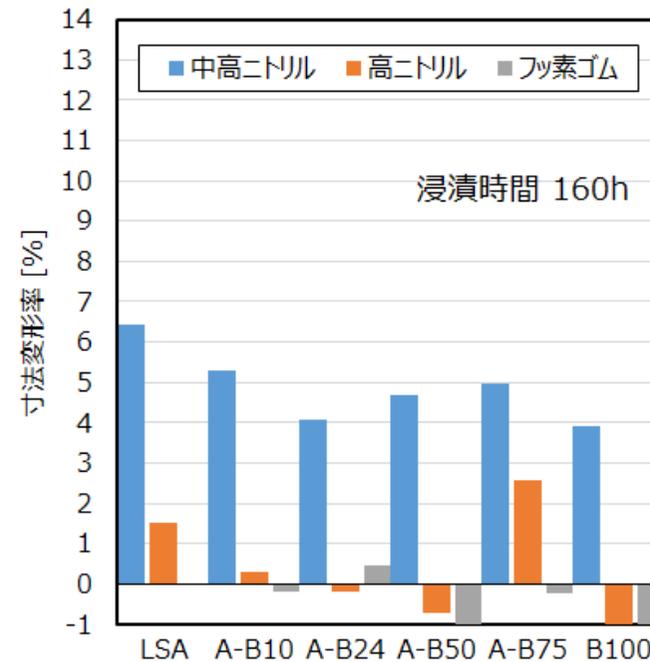
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるSVO (B100) の寸法変化率は、LSC, LSAと比べて小さい。混合油の寸法変化率はその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるSVO (B100) の寸法変化はほとんど確認できない。



(a) LSCとSVOの混合油

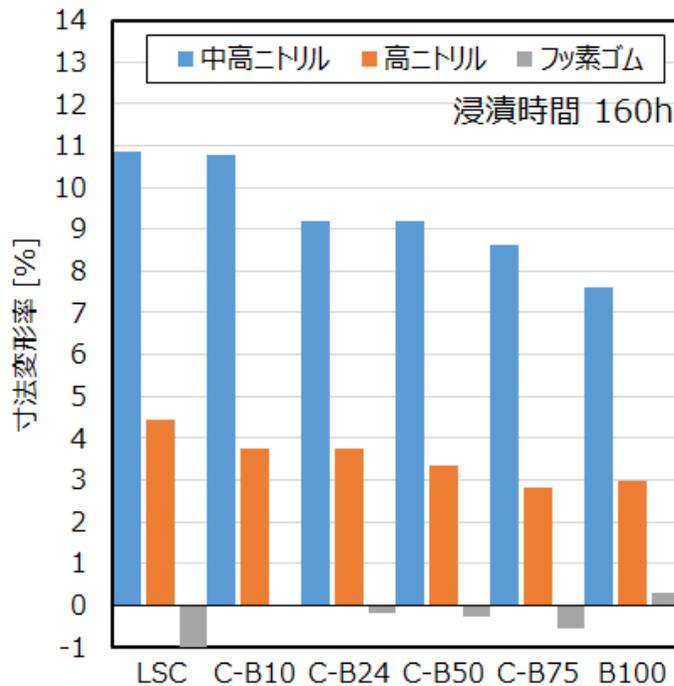


(b) LSAとSVOの混合油

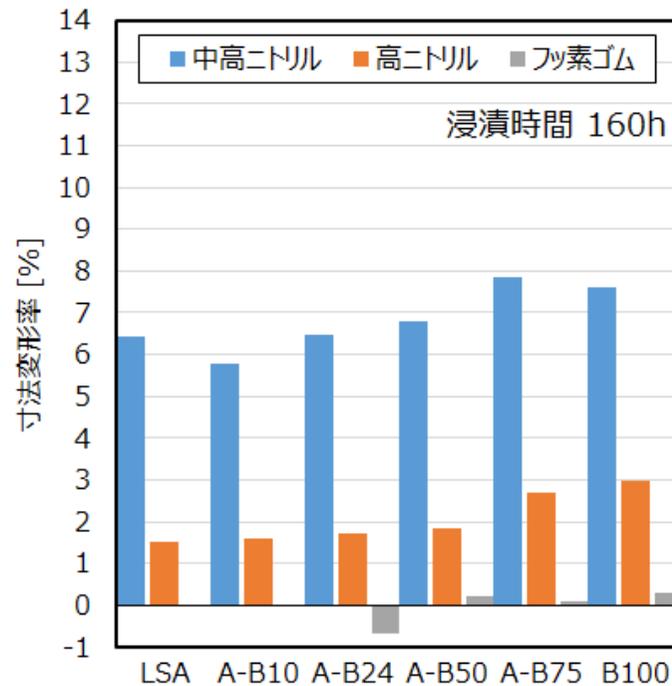
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるFAME (B100) の寸法変化率は、LSCよりもやや小さく、LSAよりもやや大きい。
- 高ニトリルの寸法変化率は、中高ニトリルと比べてかなり小さい (1/3~1/5程度)。
- フッ素ゴムの寸法変化はほとんど確認できない。



(a) FAMEとLSCの混合油

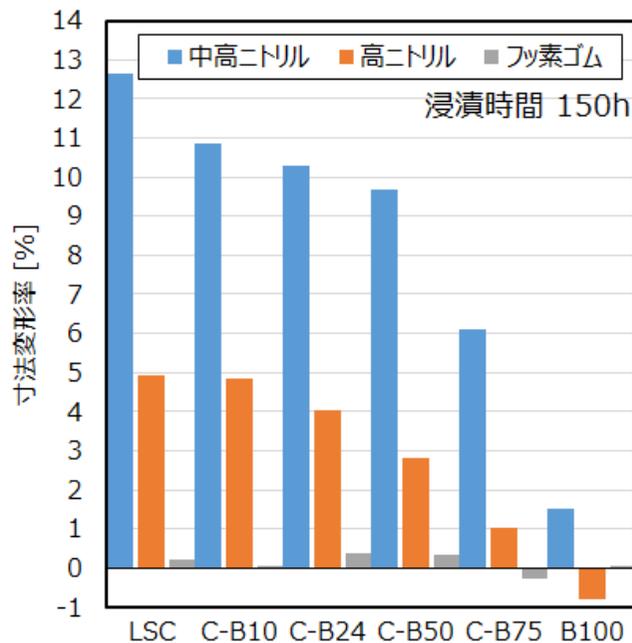


(b) FAMEとLSAの混合油

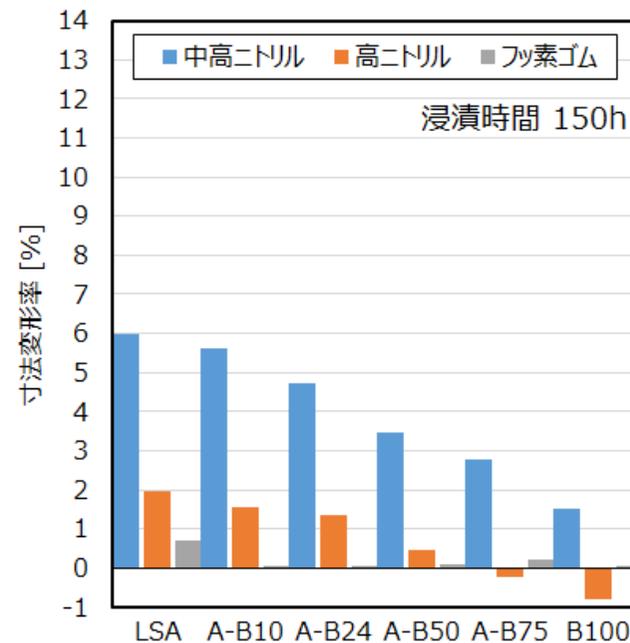
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるHVO (B100) の寸法変化率はLSC, LSAと比べて小さい。また、混合油の寸法変化率は概ねその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるHVO (B100) の寸法変化はほとんど確認できない。



(a) LSCとHVOの混合油

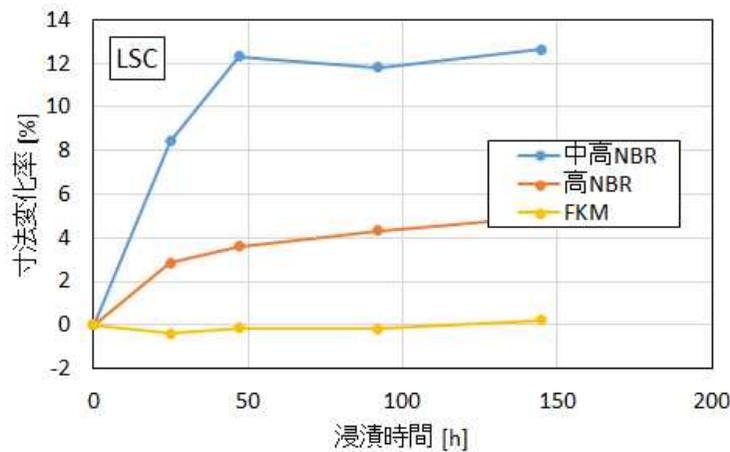


(b) LSAとHVOの混合油

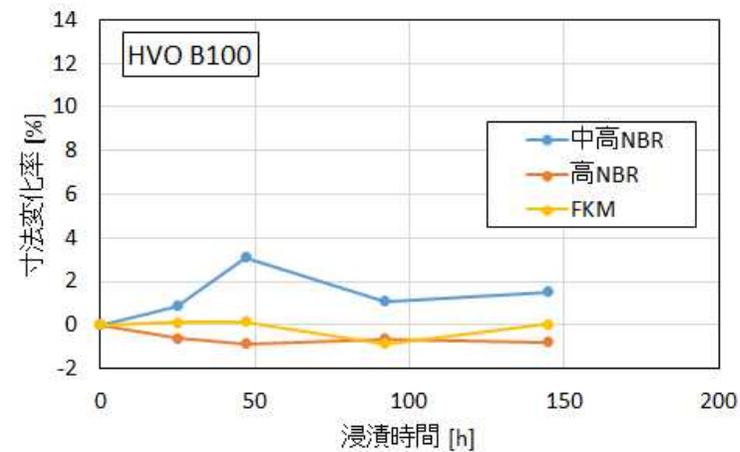
6. ゴム材料の浸漬試験

(4) 試験結果のまとめ

- 本試験に使用したLSCの寸法変化率は、A重油よりも大きい。
- いずれのバイオ燃料の寸法変化率もLSCを上回ることはなかった。
- ゴムの種類によって、寸法変化率は大きく異なる。中高ニトリルの寸法変化率は大きく、高ニトリルの寸法変化率は、中高ニトリルと比べて小さい。フッ素ゴムの寸法変化はほとんど確認できない。



(b) LSCの時系列変化の例



(a) HVO (B100) の時系列変化

※ 寸法変化は、浸漬時間100～150時間程度で概ね安定している。

7. FAMEによる実船試験

- 2022年8月より, とよふじ丸 (トヨフジ海運株式会社) においてFAME-LSC混合油 (B10およびB24) による実船試験を実施した。

船名	とよふじ丸
船種	自動車運搬船
総トン数	12,687 GT
全長 / 幅	165 m / 27.6 m
主機 シリンダ数 ボア径 x ストローク 出力 回転数	2ストロークディーゼル機関、1基 7 520 mm x 2,000 mm 11,935 kW 127 rpm
主発電機	4ストロークディーゼル機関、2基
ボイラ ボイラ蒸発量	2.53 ton/h
就航年月	2005年11月



とよふじ丸

<https://www.toyofuji.co.jp/services/fleet.html>



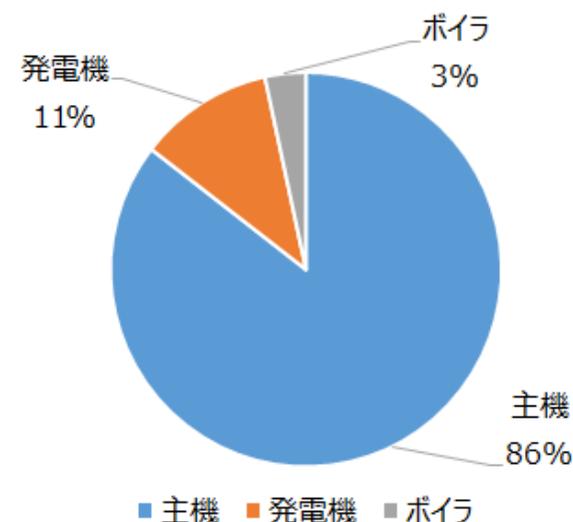
B24で運航中のとよふじ丸

7. FAMEによる実船試験

(1) 実船試験の概要

(a) バイオ燃料の使用状況

- 2022/7/26にバイオ燃料B10を240kL補油し、8/7～8/23の期間中に使用した（約10航海）。
- 2022/8/3にバイオ燃料B24を240kL補油し、8/23～9/3の期間中に使用した（約12航海）。
- バイオ燃料の使用割合は、主機86%，主発電機11%，ボイラ3%である。



バイオ燃料の使用割合



操舵室 (B24使用時)



機関制御室 (B24使用時)

7. FAMEによる実船試験

(b) 主機

- バイオ燃料による運航中、主機の筒内圧力の計測（No.5シリンダ）、燃料消費量、排ガス温度、過給機回転数等の監視・計測を実施した。
- ボイラのマンホールにプローブを取り付け、排ガス計測を行った。



主機の筒内圧力の計測



排ガス計測

7. FAMEによる実船試験

(c) 主発電機・ボイラの運転



発電用ディーゼルエンジン



ストレーナ (フィルタ)

- バイオ燃料による発電用ディーゼルエンジンの運転に異常がないことを確認した。
- ストレーナに液状（軟質）のスラッジが堆積していることを確認した（B10使用時）。

※ ストレーナへのスラッジ付着は通常よりもやや多い。



ボイラ燃焼機の外観



ボイラの燃焼状況（B24使用時）

- バイオ燃料によるボイラの運転に異常がないことを確認した。

※ バイオ燃料の性状によっては、点火時の不具合に注意が必要である。

7. FAMEによる実船試験

(d) 燃料清浄機

- 通常のC重油運転時と同じ調整板を使用して燃料清浄機を運転した。
- 燃料清浄機の状態にほとんど変化はなかった。
- B10運転時に点検した際、Oリングの劣化（膨潤）が確認された。



燃料清浄機

(e) 燃料油の温度調節

- バイオ燃料はLSCと比べて動粘度が低く、B24では粘度調節器（ビスコン）による制御ができなくなった（通常LSC使用時は12.5cStに設定している）。

※ 燃料清浄機のヒーティングのみを行い（約70℃）、その他のヒーティングはOFFとしている。

(f) その他

- 廃油焼却炉の燃焼状態にも変化は確認されなかった。



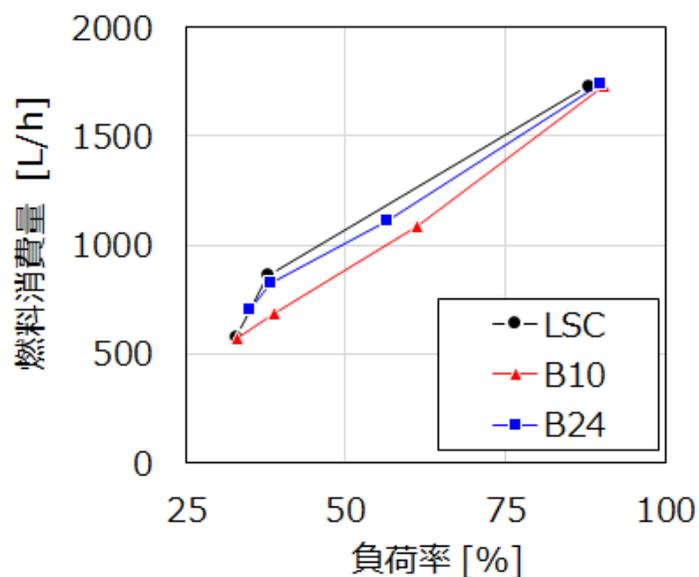
粘度調節器の設定パネル
（機関制御室）

7. FAMEによる実船試験

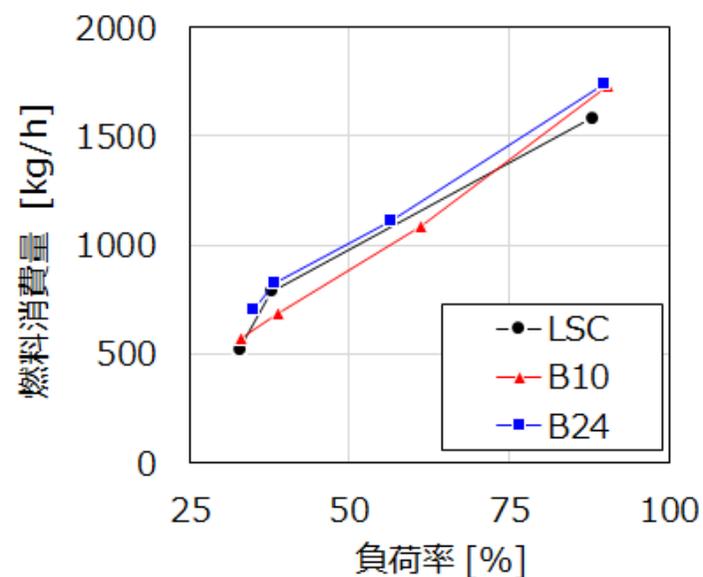
(2) 実船試験の結果

(a) 燃料消費量

- バイオ燃料使用時の燃料消費量[L/h]は、燃料油密度の違いの影響などがあり、LSC使用時と比べてわずかに低く計測されている。
- 燃料油密度の実測値を用いた重量あたりの燃料消費量[kg/h]や各燃料油の発熱量を踏まえた燃料消費率[g/kWh]は、LSC使用時とFAME使用時の相違を確認できない。



(a) 燃料消費量 (L/h)



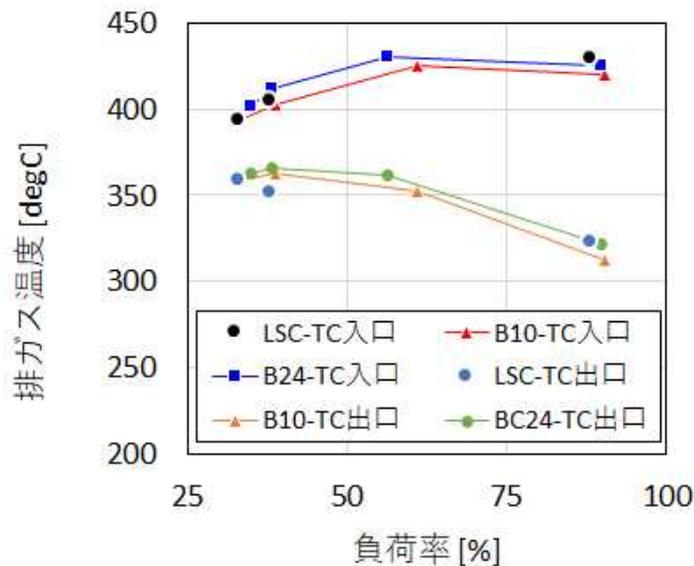
(b) 燃料消費量 (kg/h)

7. FAMEによる実船試験

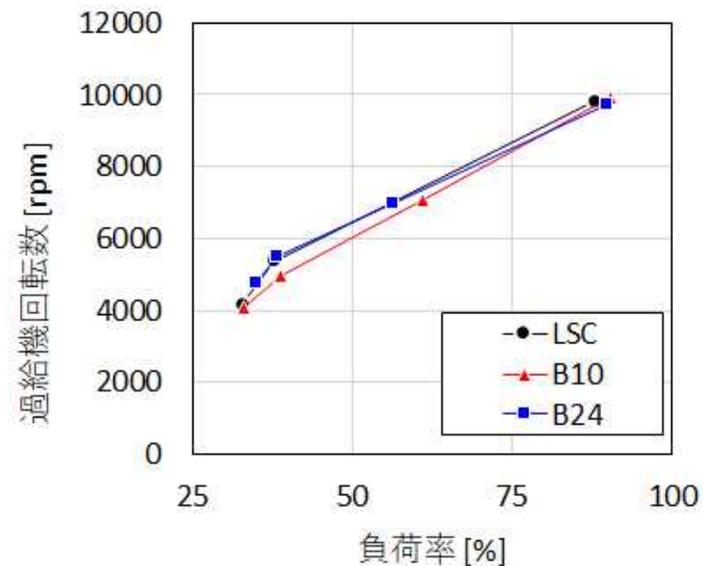
(b) 排ガス温度・過給機回転数

- バイオ燃料使用時の排ガス温度や過給機回転数は、LSC使用時と同様の傾向にあり、大きな違いは確認できない。
- バイオ燃料使用時の各シリンダの排ガス温度は、LSC使用時と同程度であり、大きな違いは確認されなかった。各シリンダ排ガス温度のばらつきも同程度であった。

※ B24使用時の過給機回転数は、LSC使用時と比べて、わずかに低い。



(a) 過給機前後の排ガス温度



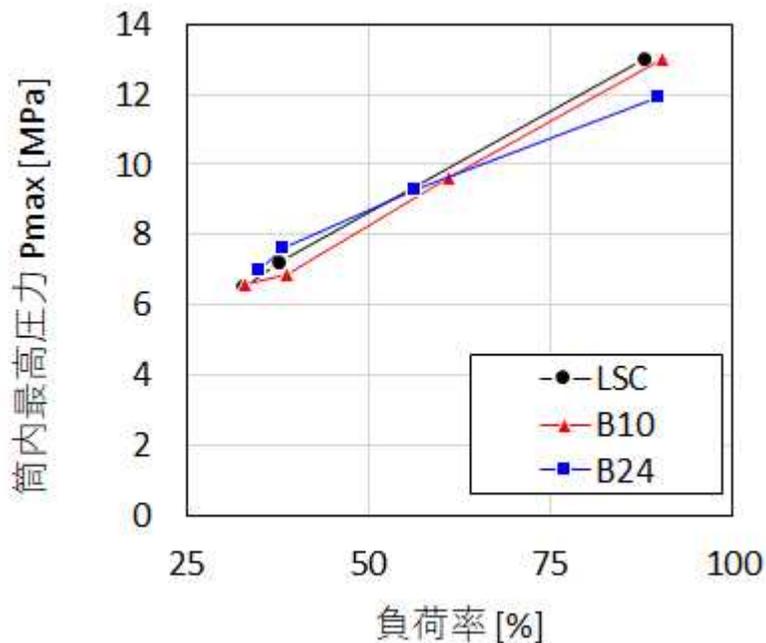
(b) 過給機回転数

7. FAMEによる実船試験

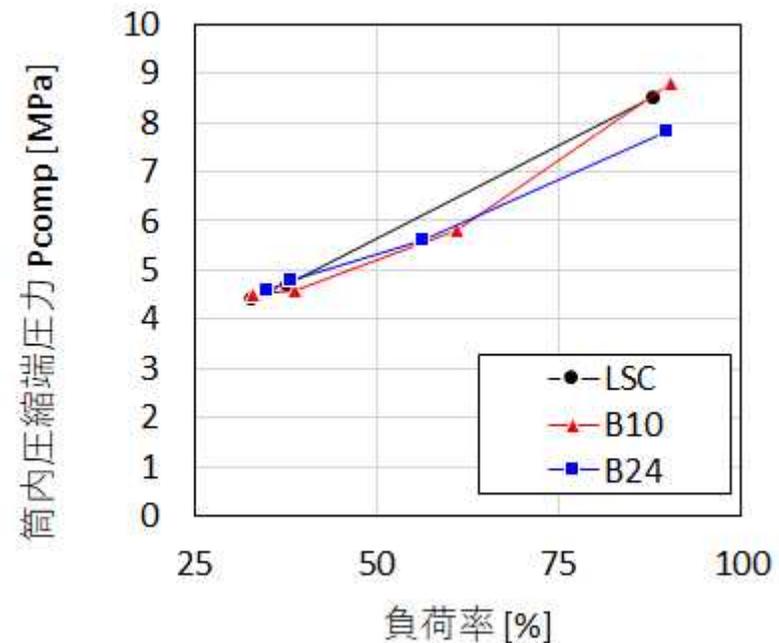
(c) 筒内圧力計測

- LSC使用時およびバイオ燃料使用時の筒内圧力波形を計測した（No.5シリンダ）。
- 計測値にばらつきはあるものの、バイオ燃料使用時の筒内最高圧力 P_{max} や圧縮端圧力 P_{comp} は、LSC使用時と概ね同程度である。

※ B24使用時の高負荷における P_{max} は、LSCおよびB10使用時と比べて、わずかに低い。



(a) 筒内最高圧力 P_{max}

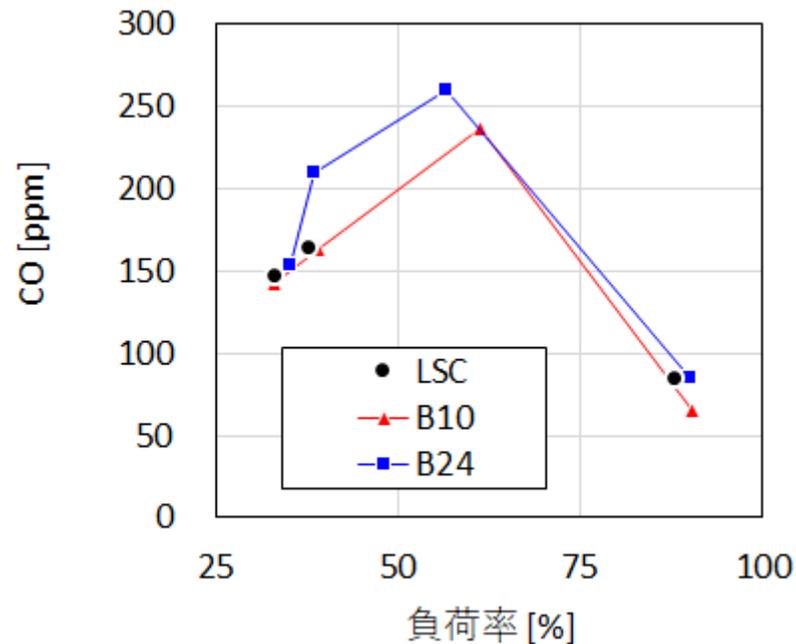


(b) 圧縮端圧力 P_{comp}

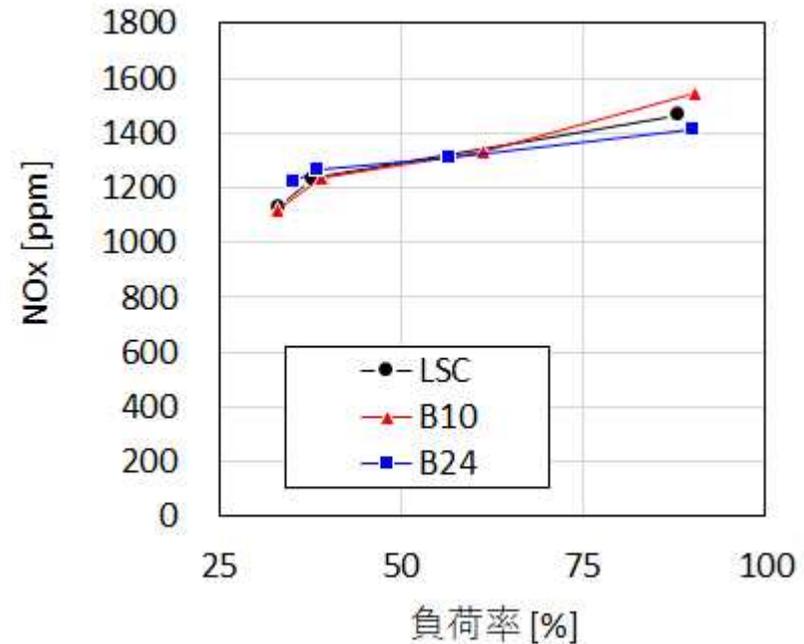
7. FAMEによる実船試験

(d) 排ガス計測

- バイオ燃料使用時のCO濃度は、LSC使用時と同程度であり、大きな違いは確認できない。
- NOx濃度は、バイオ燃料・LSCともに同程度であり、バイオ燃料使用によるNOx増加は確認できない。



(a) CO濃度

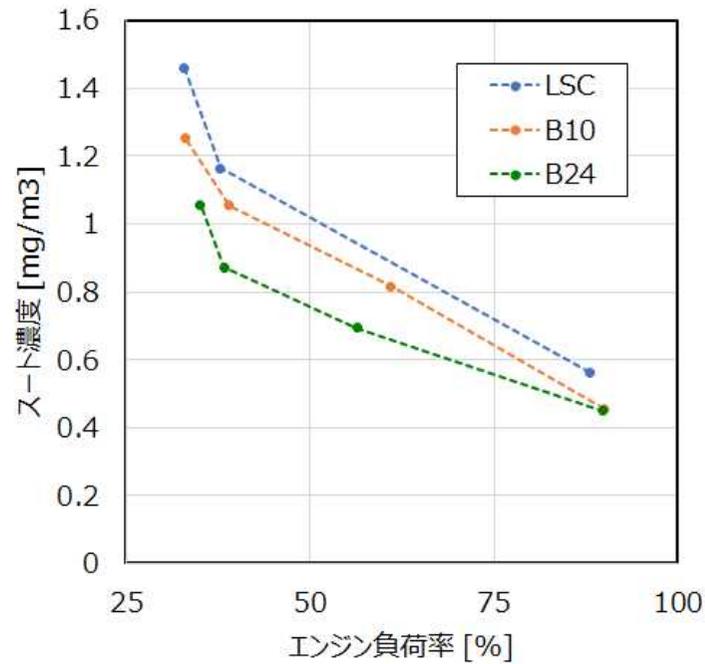


(b) NOx濃度

7. FAMEによる実船試験

(d) 排ガス計測

- バイオ燃料使用時のSoot濃度は、LSC使用時と比べて低下している。



Soot濃度

【参考】LSCおよびバイオ燃料使用時の排ガスは、いずれも無色であった。



排ガスの色 (B24使用時)

7. FAMEによる実船試験

(3) 実船試験後のドックにおける開放点検

- 2022/9/7より、内海造船（広島県尾道市，生口島）に入渠し，主機や発電用ディーゼルエンジン，ボイラ燃焼器，燃料清浄機などの開放点検を行った。



入渠中のとよふじ丸

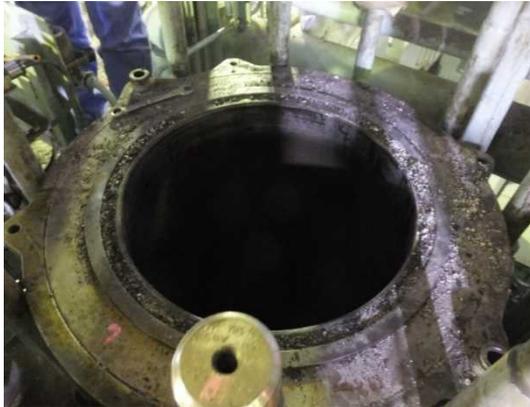


開放点検中の補機

7. FAMEによる実船試験

(a) 主機

- 主機の状態は通常通りであり，バイオ燃料の使用に起因する汚れや損傷などの不具合は確認されなかった。



シリンダ



シリンダヘッド



排気弁



ピストン



燃料噴射ノズル

7. FAMEによる実船試験

(b) 主発電機

- 発電用ディーゼルエンジンにおいて、バイオ燃料の使用に起因する汚れや損傷などの不具合は確認されなかった。



発電用ディーゼルエンジン



燃料噴射ノズル

(c) ボイラ

- ボイラ燃焼器を目視により点検した。バイオ燃料の使用に起因する汚れなどは確認されなかった。



ボイラ燃焼器

8. HVOによる陸上エンジン試験

(1) 実験用ディーゼルエンジン

- HVOによる陸上エンジン試験は、下表No.1のエンジンを使用し、燃焼圧力波形や各部温度などの燃焼状況、排ガス成分を計測した。
- HVOによる陸上エンジン試験は、今後の船舶利用を踏まえて、HVOとA重油の混合油を使用した。

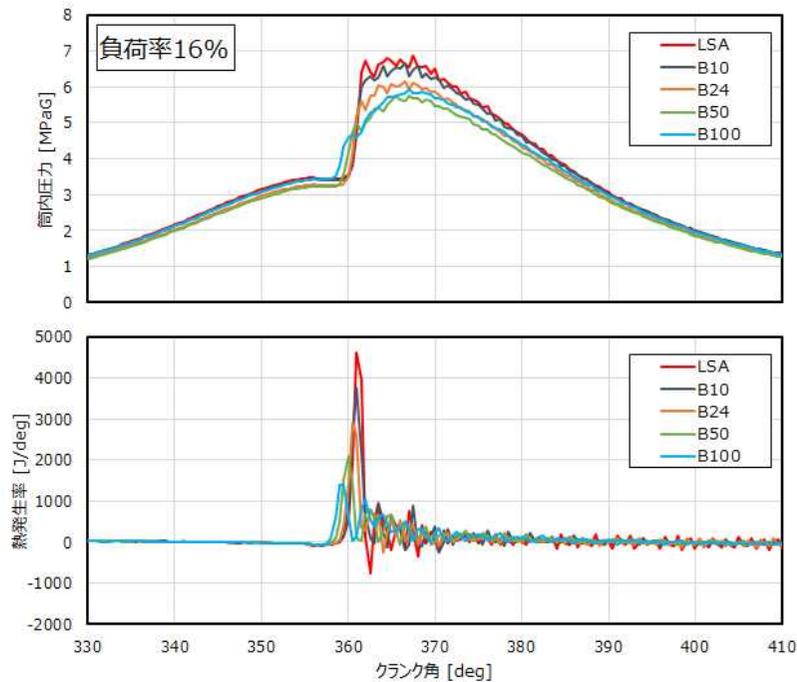
※ SVOによる陸上エンジン試験は、No.2のエンジンを使用し、LSCとの混合油を使用する（11月実施予定）。

No.	1	2
タイプ	4サイクル中速エンジン（海技研）	
定格出力／回転数 シリンダ数	750 kW / 1000 rpm 6気筒	257 kW / 420 rpm 3気筒
外観		
特徴	中速エンジンの中で、機関回転数が高く、ボア径が小さい。機関回転数が速いため、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、機関回転数が遅い。そのため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンと比べて燃料性状の変化に鈍感である。

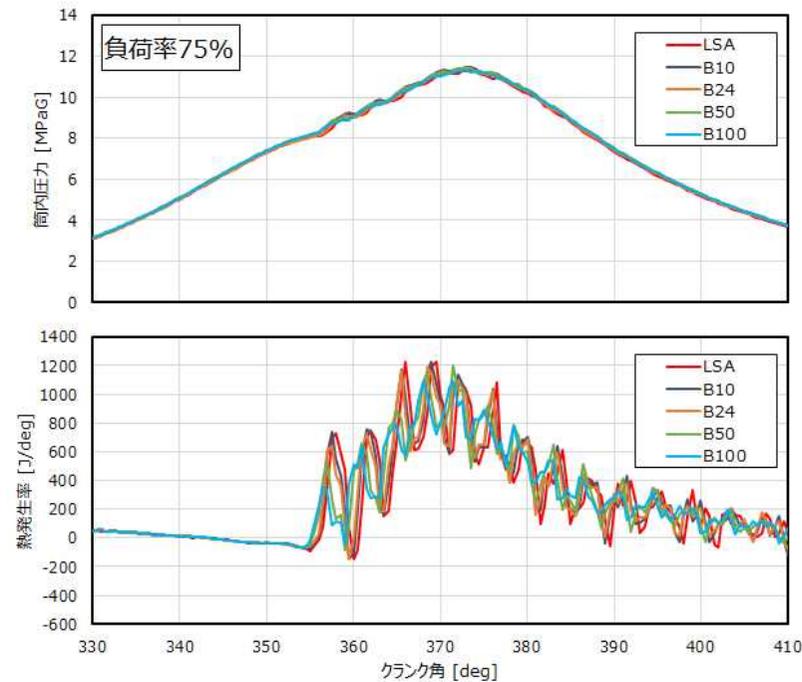
8. HVOによる陸上エンジン試験

(2) 筒内圧力波形

- 圧力波形や熱発生率は、低負荷域（負荷率25%以下）と高負荷域（負荷率50%以上）で状況が異なる。
- 低負荷域においてHVOを使用したとき、A重油と比べて、燃焼は早く始まるものの、圧力の上昇は緩やかである。高負荷域においてHVOを使用したとき、圧力波形や熱発生率はA重油とほとんど変わらない。



(a) 低負荷域の計測例（負荷率16%）

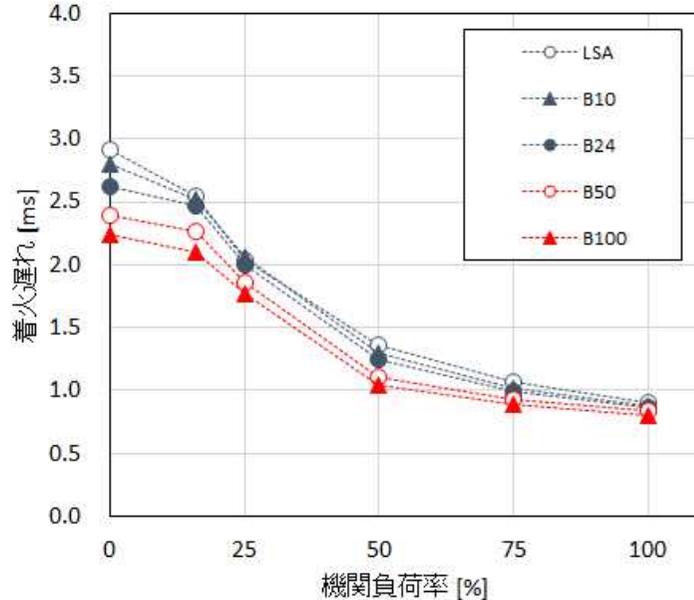
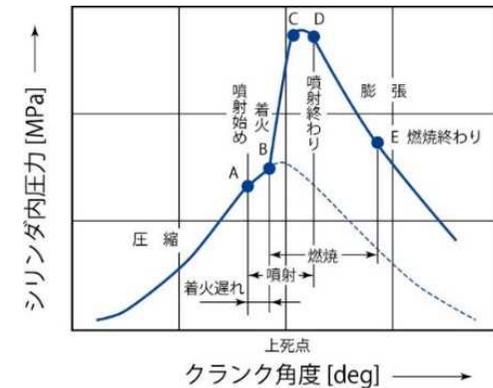


(b) 高負荷域の計測例（負荷率75%）

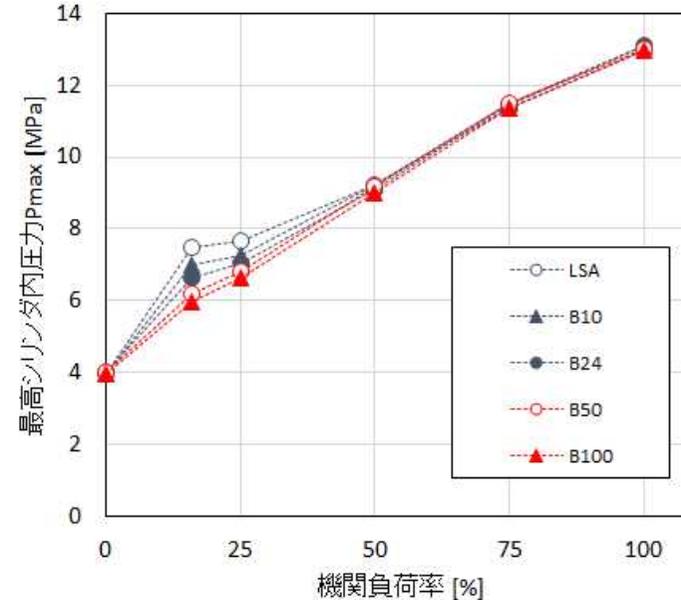
8. HVOによる陸上エンジン試験

(2) 着火遅れ・最高筒内圧力

- 着火遅れ（燃料噴射から着火開始までの時間）は、HVOの混合率が高まるほど短くなる。
- HVOおよびA重油使用時の最高筒内圧力 P_{max} は、負荷率50%以上の範囲において、ほとんど変わらない。
- 負荷率16~25%の範囲において、 P_{max} はHVOの混合率が高くなるに従って低下する。



(a) 着火遅れ

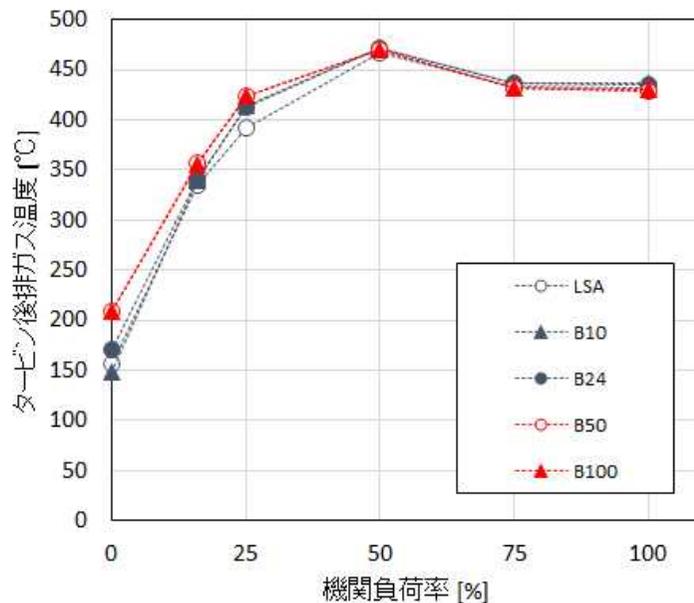


(b) 最高筒内圧力 P_{max}

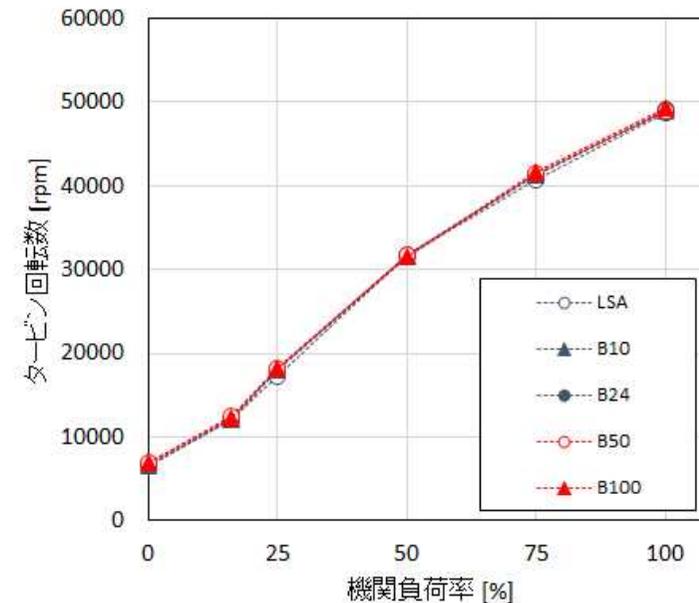
8. HVOによる陸上エンジン試験

(3) 排ガス温度・過給機回転数

- HVOを使用した際の排ガス温度は、低負荷運転時、A重油と比べてわずかに高まる傾向がある。負荷率50%以上の範囲においてはほとんど変わらない。
- HVOおよびA重油使用時の過給機回転数は、すべての試験範囲において、ほとんど変わらない。



(a) 過給機後排ガス温度

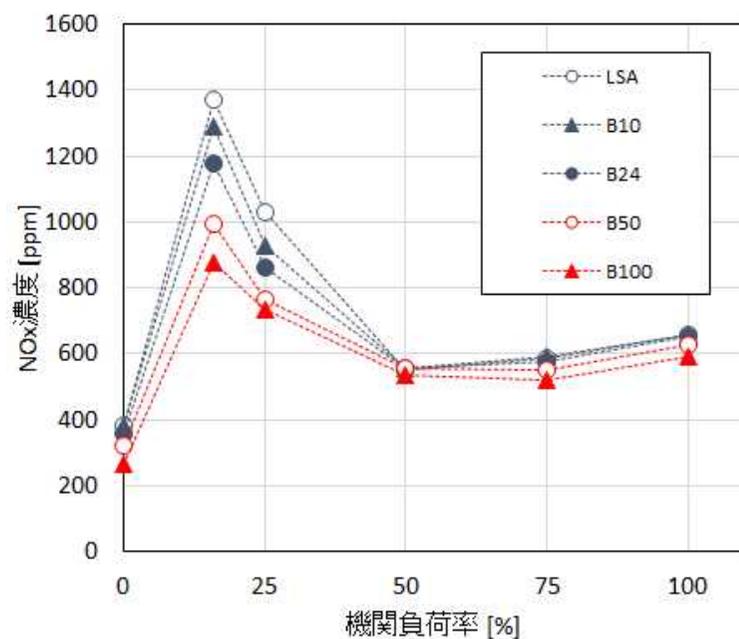


(b) 過給機回転数

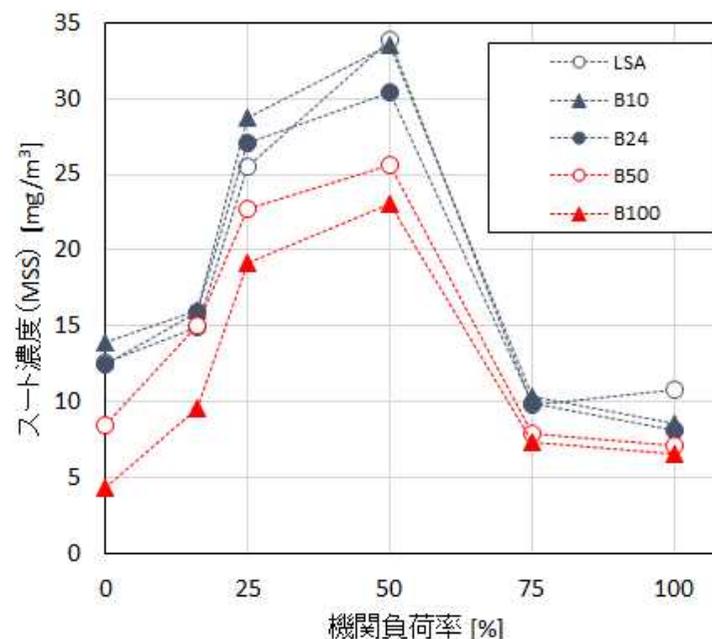
8. HVOによる陸上エンジン試験

(4) 排ガス性状

- HVOを使用した際のNOx濃度は、低負荷域（負荷率16～25%）において、A重油と比べて低下する。
- HVOを使用した際のスート濃度は、A重油と比べて低下する傾向がある。



(a) NOx濃度



(b) Soot濃度

9. まとめ

(1) 動粘度および密度

- A重油およびLSCとバイオ燃料（SVO, FAME, HVO）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
 - いずれのバイオ燃料においても、温度-動粘度チャートは概ね直線で表されることを確認した。
 - いずれのバイオ燃料においても、密度は従来の重油から大幅に変わることはない。
 - 混合油の動粘度および密度は、混合する燃料（B0, B100）の間にある。
 - 燃料清浄機の使用並びにエンジン入口の燃料油温度管理のため、バイオ燃料使用前に混合油の性状を把握しておくことが重要である。
- ※ 実船試験に使用したFAMEはLSCと比べて動粘度が低く、B24の実船試験では粘度調節器（ビスコン）による制御ができなくなるといった状況が生じた。通常のLSC使用時と異なる運転条件となるため、注意が必要である。

9. まとめ

(2) バイオ燃料の燃焼性

- 定容燃焼装置（FCA）による試験を実施し、圧力変化および熱発生率の結果から着火遅れや燃焼時間を評価した。
- それぞれのバイオ燃料について、従来燃料（A重油，LSC）の試験結果と比較した結果，使用したバイオ燃料（B100）の燃焼性は高く，燃焼開始が早まる傾向にあることを確認した。いずれのバイオ燃料においても推定セタン価ECNは，燃焼性に問題ないレベルであると推定される。
- B10やB24などの混合率において，燃焼波形は従来燃料（B0）に近いので，エンジン運転時においても従来燃料使用時の燃焼と大きく変わらないと推定される。
- 実船試験および陸上エンジン試験による計測結果において，バイオ燃料使用時の燃焼状態は従来燃料使用時と大きな違いは確認されなかった。

※ バイオ燃料の性状によっては，エンジン始動時やボイラ点火時の不具合に注意が必要である。

※ 燃焼性が高いバイオ燃料とA重油などを混合した場合，燃焼性が通常の運転時より高まる可能性がある。その際のエンジン運転への影響は不明であり，注意が必要である。

9. まとめ

(3) 混合安定性, スラッジの発生状況

- いずれのバイオ燃料とA重油の混合油の混合安定性は, 本試験範囲内においてすべて問題ないと判断された。
 - バイオ燃料とLSCの混合安定性は, 時間経過や保管状態によって悪化する傾向がある。ただし, LSC単体の安定性も悪化するため, バイオ燃料との混合が原因であるかは判断できない。
 - 実船試験後の燃料清浄機の開放点検より, 燃料清浄機の内部は, 通常のLSC使用時よりもスラッジの付着がやや多いことが確認された。バイオ燃料使用前にタンクや配管に付着していたスラッジが, バイオ燃料の洗浄効果によって流出した可能性があり, 注意が必要である。
- ※ **長時間貯蔵時, 混合安定性は悪化する可能性があるため, 注意が必要である。**
- ※ **LSCとバイオ燃料が混合された状態になり得る配管などでは, スラッジの発生に注意が必要である。**
- ※ **バイオ燃料等の軽質燃料は配管の洗浄効果があると思われる。運用時にはフィルタの状況等を確認することが重要である。**

9. まとめ

(4) エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食，劣化に及ぼす影響

- 本試験に使用したLSCの寸法変化率は，A重油よりも大きい。
- いずれのバイオ燃料の寸法変化率もLSCを上回ることはなかった。
- ゴムの種類によって，寸法変化率は大きく異なる。中高ニトリルの寸法変化率は大きく，高ニトリルの寸法変化率は，中高ニトリルと比べて小さい。フッ素ゴムの寸法変化はほとんど確認できない。
- 実船試験後，主機や発電用ディーゼルエンジンを開放点検を行った結果，機器の腐食は確認されなかった。

※ **ゴム材料の膨潤性は燃料油の成分により大きく異なるため，燃料配管等に使用しているリングなどのゴム製部品には注意する必要がある。**

9. まとめ

(5) 燃料消費量

- バイオ燃料使用時の燃料消費量は、従来燃料使用時と比べて大きくは変わらない。
- ※ 発熱量が低いバイオ燃料を使用する場合、エンジンへの燃料流量が制限を受け、最高出力が低下する可能性があるため、注意が必要である。

(6) 排ガス成分

- 実船試験および陸上エンジン試験において、排ガス中に含まれるNO_x、CO、スートなどの環境汚染物質の増加は確認されていない。
- ※ 当初懸念されていたバイオ燃料使用時のNO_x排出量増加も確認されていない。

9. まとめ

(7) 燃料油の切替え及びバンカリング時における影響

- バンカリングを含めた一連の実船試験は、通常のオペレーションによって対応でき、特別な不具合が生じることはなかった。
- ※ 動粘度の違いによるエンジン運転条件の変化、バイオ燃料の洗浄効果によってスラッジが流出する可能性、長期船内貯蔵による安定性の悪化、発熱量の違いによるエンジン出力特性の変化などに注意が必要である。燃料油の切り替え時には、これらの状態を適切に管理することが重要である。
- ※ バイオ燃料には様々な種類があり、それぞれの特性把握し、適切な管理が必要である。
- ※ バンカー船へのバイオ燃料の積み込みや輸送のルール制限がある。それらを整理して、バイオ燃料の供給を検討することによって、普及やコスト低減につながると思われる。

バイオ燃料関連の試験結果 ～FAME陸上試験および実船試験の報告～

目次

1. はじめに
2. 試験に使用する燃料油
3. 動粘度・密度の計測
4. 定容燃焼装置（FCA）による試験
5. 混合安定性試験
6. ゴム材料の浸漬試験
7. 実船試験の概要
8. 燃費および主機データの実船計測
9. 排ガス成分の実船計測
10. 実船試験後のドックにおける開放点検
11. まとめ

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
トヨフジ海運株式会社

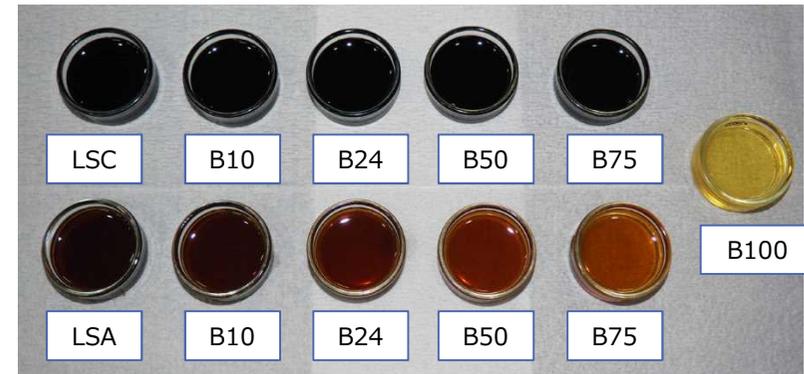
1. はじめに

- 船舶燃料油として利用可能性のあるバイオ燃料について、船舶利用時の技術的な観点による評価の検証を行う。
- バイオ燃料は従来から使用されている船用重油（A重油，高硫黄C重油HSC，低硫黄C重油LSC）と混合して使用されることが想定される。
- 実船試験ではバイオ燃料とLSC重油を混合した場合について検証を行う。
- 陸上試験では、幅広い条件で燃料を混合し、基本的な燃料特性の計測・評価を行う。

No.	試験・評価項目	陸上試験	実船試験
①	性状（動粘度、密度、流動点等）	○	
②	燃焼性の特性	○	○
③	バイオ燃料と重油の混合安定性、スラッジの発生状況	○	○
④	エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食、劣化に及ぼす影響	○	○
⑤	燃費		○
⑥	排出ガスの成分	(○)	○
⑦	燃料油の切替え及びバンカリング時における影響		○

2. 試験に使用する燃料油

- 各種試験に使用する燃料油（A重油，LSC，バイオ燃料，それらの混合油）は下表の通りである。
- 実船試験ではFAME-LSC混合油（B10，B24）を使用する。陸上試験ではA重油との混合油など，幅広い試験条件とする。



種類・項目	A重油	LSC	LSC-FAME混合油 (A重油-FAME混合油)				バイオ燃料 B100 (FAME)
			B10	B24	B50	B75	
動粘度@50℃ [cSt]	2.29	28.0	20.3 (2.42)	14.1 (2.56)	7.96 (2.90)	5.22 (3.27)	3.70
密度@15℃ [g/cm ³]	0.8562	0.9656	0.9575 (0.8591)	0.9470 (0.8632)	0.9262 (0.8710)	0.9064 (0.8786)	0.8862
硫黄濃度 [%]	0.1015	0.4377	0.3932 (0.0865)	0.3320 (0.0760)	0.2229 (0.0563)	0.1220 (0.0385)	0.0234
総発熱量 [J/g]	45,260	41,010	40,785	40,205	---	---	
備考	海技研で使用しているLSA。陸上試験に使用する。	2022年7月末にとよぶじ丸より採取したLSC。	実船試験に使用する（LSC-FAME混合油）。陸上試験では，主に海技研内でLSCとB100を混合したサンプル油を使用する。	陸上試験に使用する。		豊田通商殿より提供いただいたサンプル油。	

- ※ 括弧内の数値はA重油-FAME混合油である。
- ※ 総発熱量を除き，海技研における計測値である。

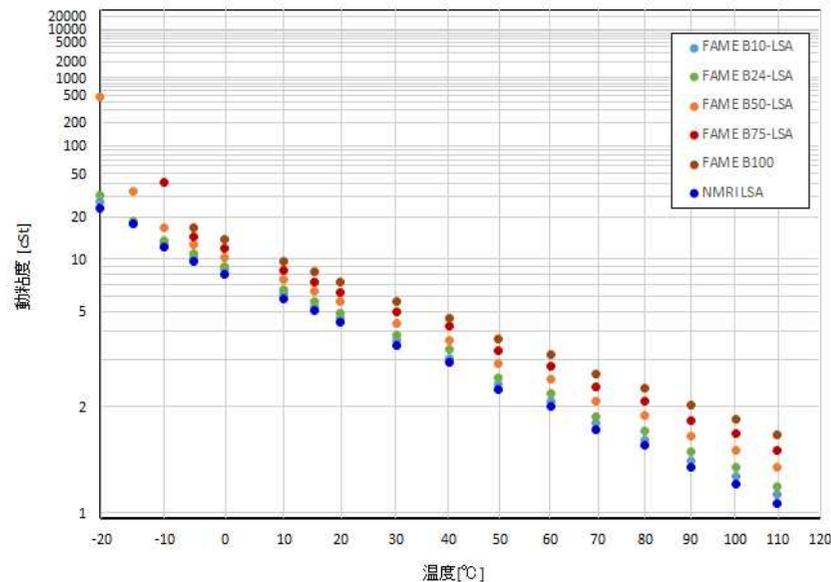
2. 試験に使用する燃料油

- 実船試験に用いたLSC, FAME-LSC混合油 (B10, B24) の性状分析を行った。

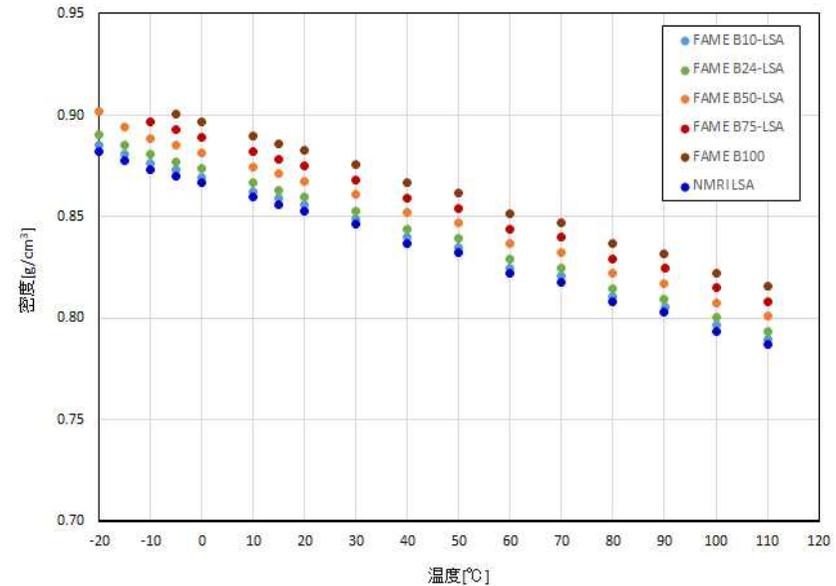
No.	項目	単位	LSC	B10	B24	試験方法	
1	Kinematic viscosity at 50°C	mm ² /s	30.20	21.61	15.00	ISO 3104	
2	Density at 15°C	kg/m ³	964.1	954.0	943.0	ISO 12185	
3	Sulfur	mass%	0.43	0.36	0.31	ISO 8754	
4	Flash point	°C	99.0	101.0	103.0	ISO 2719	
5	Acid number	mgKOH/g	0.02	0.04	0.12	ASTM D664	
6	Carbon residue - Micro method	mass%	4.72	3.92	3.50	ISO 10370	
7	Pour point	°C	-21	0	-3	ISO 3016	
8	Water	vol%	0.0	0.0	0.0	ISO 3733	
9	Ash	mass%	0.003	---	---	ISO 6245	
10	Vanadium (V)	mg/kg	3	---	---	IP 501	
11	Sodium (Na)	mg/kg	1	---	---	IP 501	
12	Aluminum + Silicon (Al+Si)	mg/kg	15未満	---	---	IP 501	
13	Used Lubricating Oil (ULO)	mg/kg	Free	---	---	IP 501	
	Calcium (Ca)	mg/kg	3未満	---	---	IP 501	
	Phosphorus (P)	mg/kg	1未満	---	---	IP 501	
	Zinc (Zn)	mg/kg	1未満	---	---	IP 501	
14	Total Sediment Potential (TSP) -Thermal ageing	mass%	0.03	0.01	0.01	ISO 10307-2	
15	Total Sediment Existent (TSE)	mass%	0.02	<0.01	<0.01	ISO 10307-1	
16	Net heat of combustion	J/g	41,010	40,785	40,250	ASTM D240	
17	Elemental analysis	Carbon (C)	mass%	88.6	87.6	85.9	CHO CORDER
18		Hydrogen (H)	mass%	10.6	10.8	11.0	CHO CORDER
19		Nitrogen (N)	mass%	0.12	0.11	0.096	ASTM D4629
20		Oxygen (O)	mass%	0.2	1.2	2.6	CHO CORDER
21	Copper strip corrosion	-	1a	1a	1a	ASTM D130	

3. 動粘度・密度の計測

- バイオ燃料FAMEとA重油の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100の動粘度および密度はA重油よりも高く、FAMEとA重油の混合油はその間となる。
- 温度0°C以上におけるFAME（B10～B100）の動粘度は、温度-動粘度チャートにおいて直線で表される。



(a) 動粘度 (FAME-A重油)

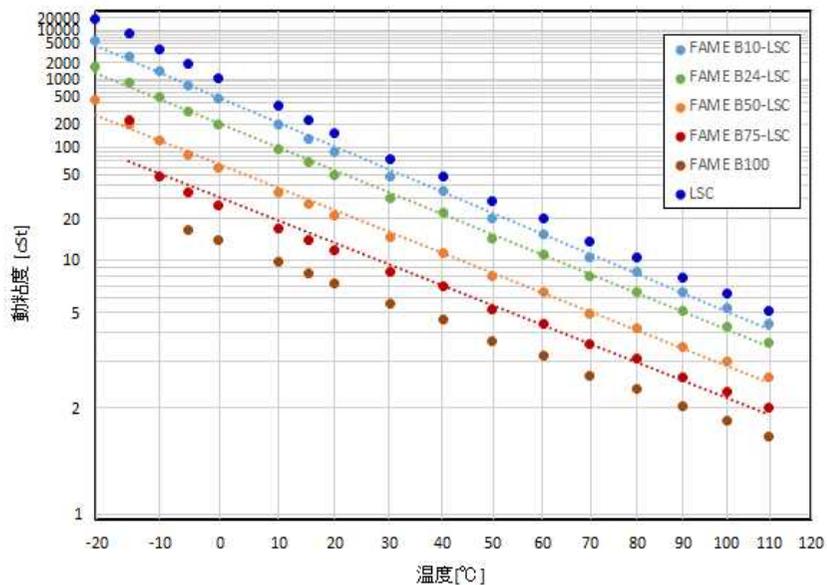


(b) 密度 (FAME-A重油)

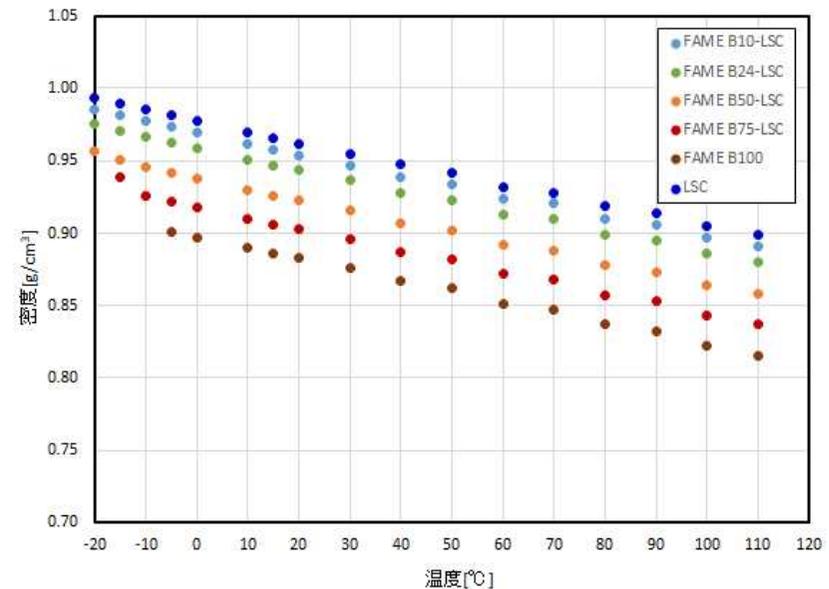
3. 動粘度・密度の計測

- バイオ燃料FAMEとLSCの混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100の動粘度および密度は、LSCよりも低く、LSA（参考値）よりも高い。
- FAMEとLSCの混合油（B10～B75）の動粘度および密度は、LSCとB100の間であり、いずれも広い温度範囲において直線で表される。

※ とよふじ丸に補油したB10およびB24と、海技研で混合したB10およびB24（いずれもB100とLSCを使用）の試験結果はほぼ重なることを確認した。すなわち、いずれのバイオ混合油も適切に混合されていると考えられる。

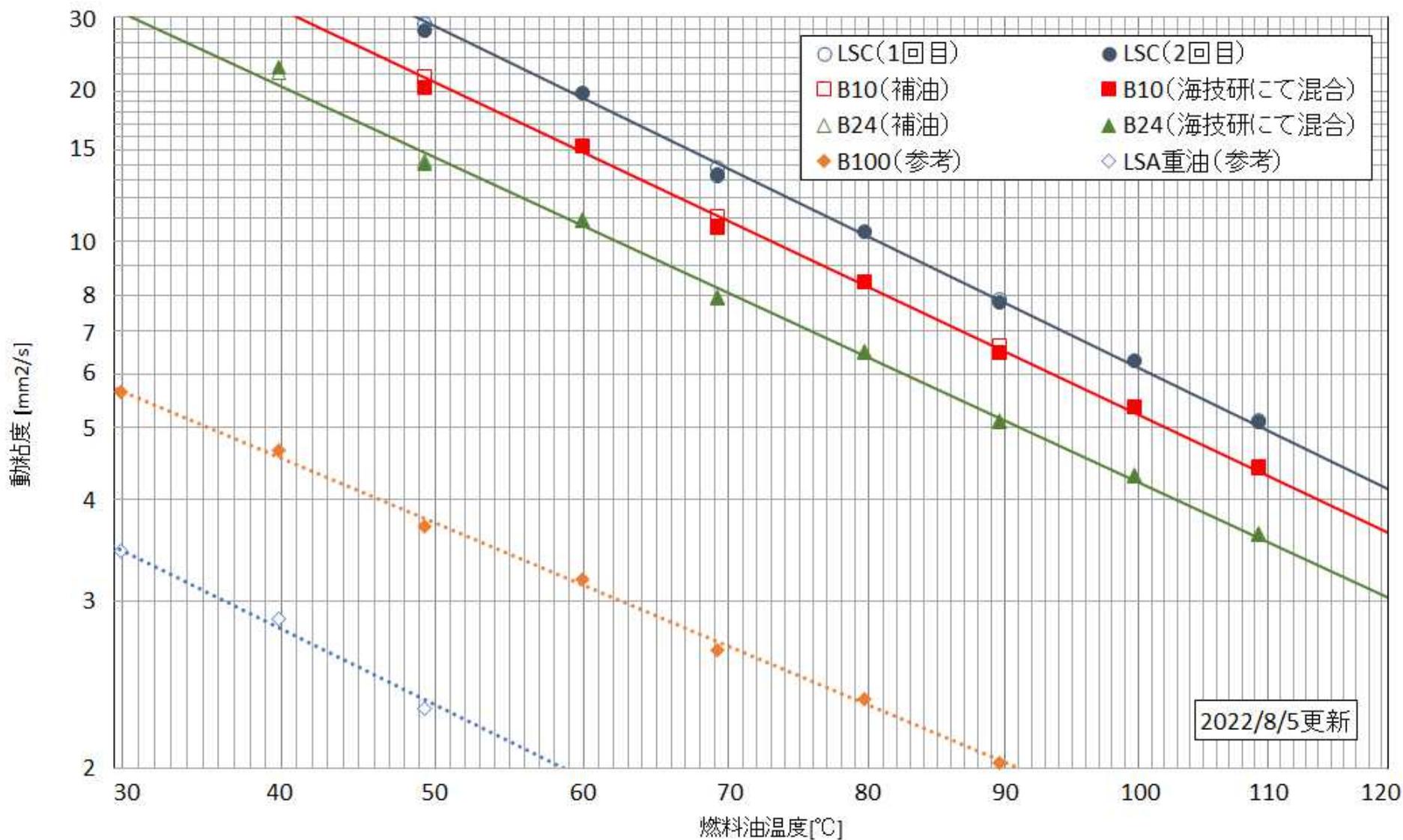


(a) 動粘度 (FAME-LSC)

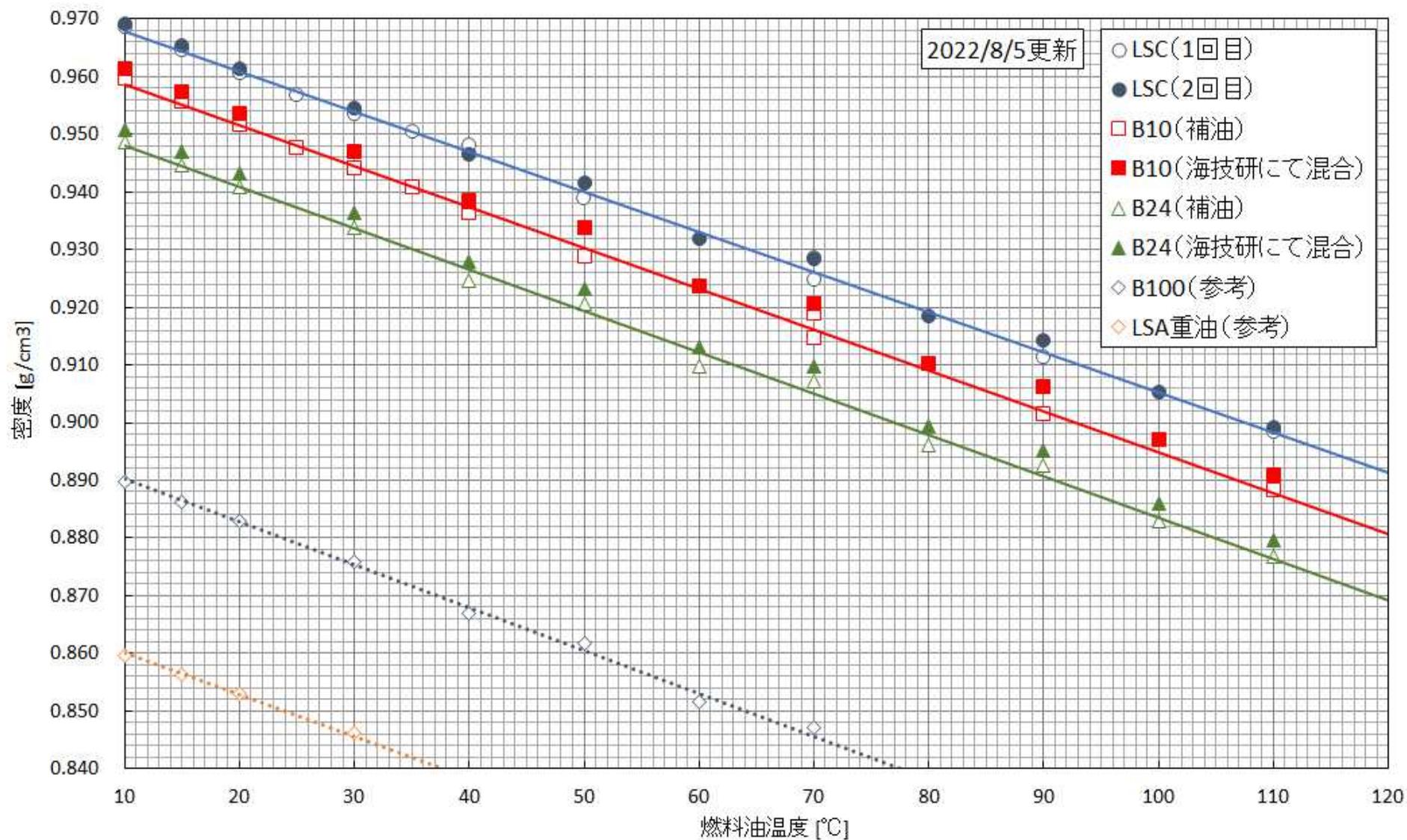


(b) 密度 (FAME-LSC)

【参考】FAME-LSC混合油の温度に対する動粘度（実船試験用）



【参考】 FAME-LSC混合油の温度に対する密度（実船試験用）

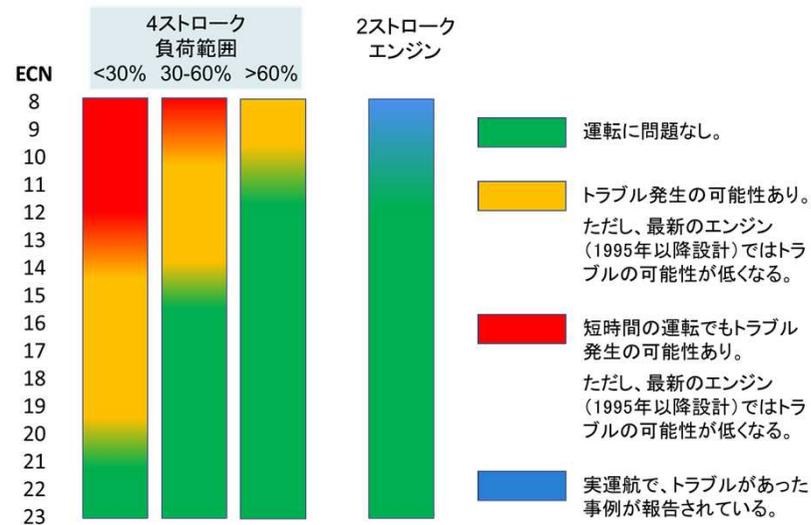


4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

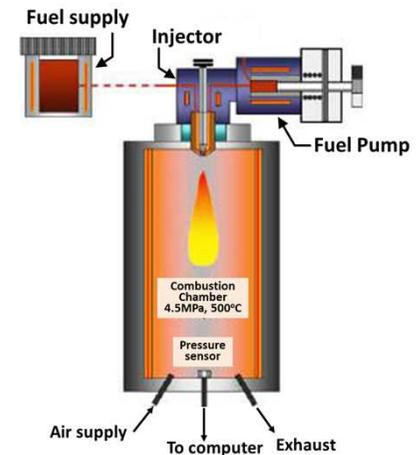
(1) 試験の概要

- バイオ燃料, LSC重油, A重油の燃焼性の相違を調べるため, 定容燃焼装置 (FCA) を用いた燃焼試験を行う。
- FCAでは, 圧力変化および圧力変化率の結果から着火遅れや燃焼時間, 着火性評価指標である推定セタン価ECNなどを求めることができる。

- 例えば, 推定セタン価ECNは, 燃料油の燃焼性 (自己着火のしやすさ, ノッキングのしにくさ) を表す指標である。一般に, ECNが高いほど自己着火しやすく, ノッキングが起こりにくい。



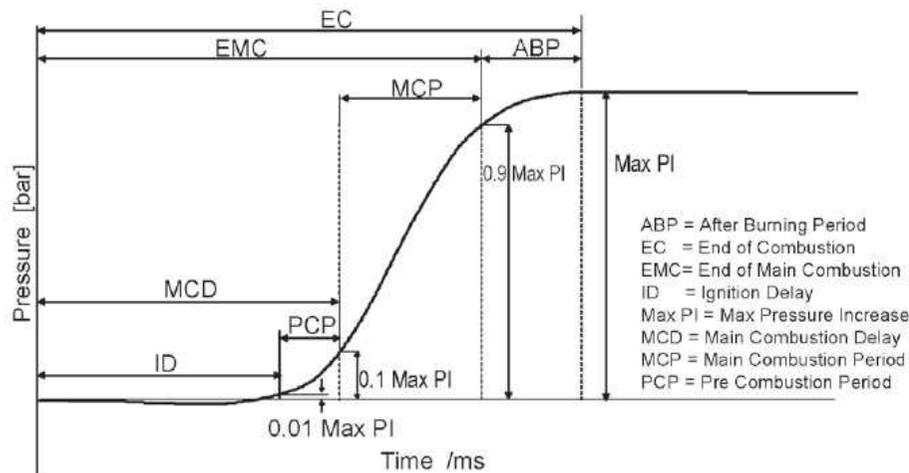
ECNによる燃料の着火性の評価例



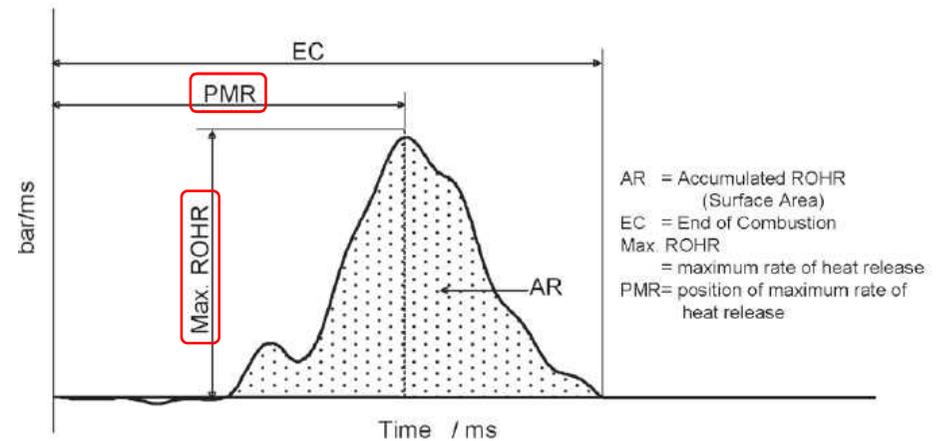
FIA-100 Fuel Combustion Analyzer (FCA)

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(2) 試験結果の評価方法



推定セタン化 $ECN = 153.15e^{-0.2861MCD}$



試験結果	結果の意味	想定されるトラブル
ID, PMRが遅く, Max ROHRの値が高い	<ul style="list-style-type: none"> 遅い着火と急激な燃焼 	エンジン, ピストンリング損傷の可能性
PMRが遅く, Max ROHRの値が低い	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間と膨張行程の温度低下による燃焼の遅れ 燃料油中の重質成分がシリンダ内で燃えるのに時間がかかる 	スートとPMの増加, 過給機トラブルのリスク上昇
ABPの著しい増加	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間 	スートおよびPMの増加, デポジットの発生, 排気管の詰まりなど

(1) CIMAC "Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion", 2011

(2) 竹田他, 定容燃焼試験法 (IP541) による船用残渣燃料油の分析結果, JIME学会誌44-4, 2009

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(3) FCA試験条件

(a) 燃料サンプル加熱条件

Sample viscosity mm ² /s@50°C	Fuel reservoir (°C)	Injection assembly (°C)	Fuel pump (°C)	Fuel grades ISO 8217:2010
<25	50	50	50	DM grade, RMA
25 - 800	125	125	125	RMB - RMK
800 -2000	145	145	145	

※ 以下のFCA試験において、すべてのサンプル油に対してDM grade, RMAの加熱条件としている。

(b) 装置設定条件

Process parameters	
Initial chamber temperature	500 °C
Initial chamber pressure	4.5 MPa
Injection pressure	35 MPa
Injected volume	Approx. 0.1 ml/injection
No. of injections per test	25

※ FCA試験装置の設定条件は、中速ディーゼルエンジンの低負荷運転に近い条件となっている。実際のエンジン内での燃焼を模擬する目的ではなく、燃料そのものが持つ着火・燃焼特性を評価する試験法である。

4. 定容燃焼装置（FCA）による試験

(4) 試験結果の一覧

サンプル	BDF 割合	ID	MCD	EMC	EC	PCP	MCP	ABP	Max ROHR	PMR	AR	Max PI	ECN
	%	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	bar/ms	ms	bar	bar	
LSA	0	4.76	5.08	6.96	15.32	0.32	1.88	8.36	5.92	5.64	8.49	8.55	35.8
LSA-B10	10	4.59	4.88	6.88	16.42	0.29	2.00	9.54	5.67	5.51	8.53	8.69	37.9
LSA-B24	24	4.63	4.95	7.03	15.66	0.32	2.08	8.63	5.32	5.61	8.39	8.54	37.2
LSA-B50	50	4.29	4.58	7.13	16.42	0.29	2.55	9.29	4.94	5.19	8.08	8.23	41.3※
LSA-B75	75	3.89	4.15	7.29	16.32	0.27	3.13	9.03	4.88	4.68	7.86	8.00	46.7※
B100	100	3.70	3.95	7.36	16.41	0.24	3.41	9.05	4.28	4.46	7.56	7.70	49.5※
LSC	0	6.46	7.32	14.68	23.52	0.85	7.36	8.84	1.77	8.43	7.74	7.89	18.9
LSC-B10	10	6.21	6.91	12.76	21.40	0.70	5.84	8.64	2.38	7.65	7.99	8.15	21.2
LSC-B24	24	5.89	6.50	11.24	19.73	0.62	4.74	8.49	2.63	7.53	8.06	8.21	23.8
LSC-B50	50	5.28	5.77	9.10	18.72	0.49	3.33	9.61	3.88	6.68	7.96	8.11	29.2
LSC-B75	75	4.35	4.70	7.61	15.83	0.35	2.91	8.22	4.20	5.33	7.85	8.00	39.7
B100	100	3.70	3.95	7.36	16.41	0.24	3.41	9.05	4.28	4.46	7.56	7.70	49.5※

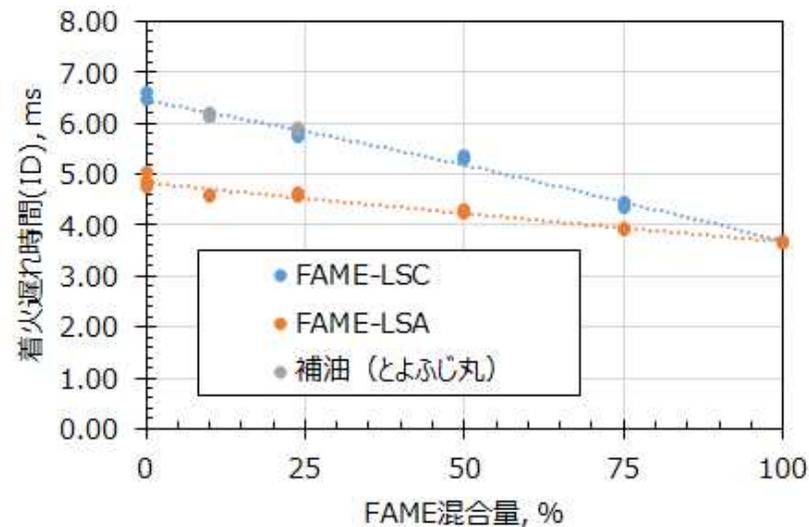
※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

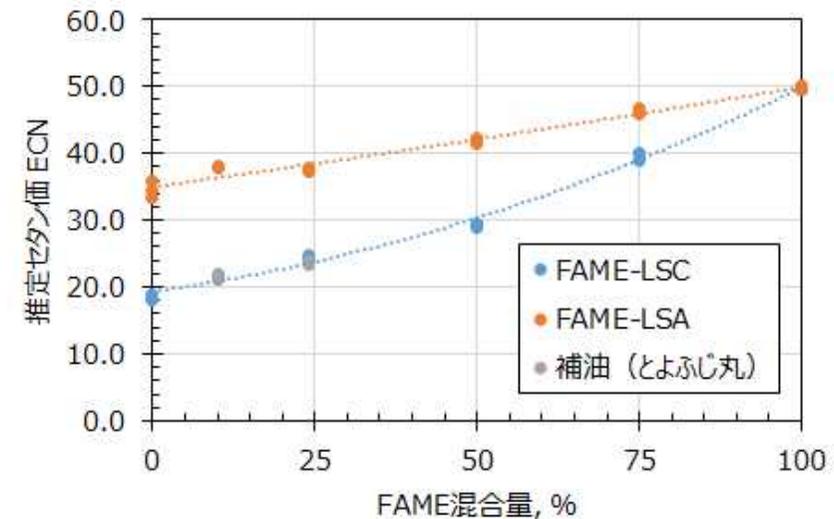
(5) 試験結果の一例

- B100の着火遅れ時間IDは短い。実船試験に使用するFAME-LSC混合油（B10およびB24）の着火性は、LSCと比べてやや高い。
- 実船試験に使用するFAME-LSC混合油（B10およびB24）のECNは、21～24であり、燃焼性に問題ないレベルであると推定される。

※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。



(a) 着火遅れ時間 ID



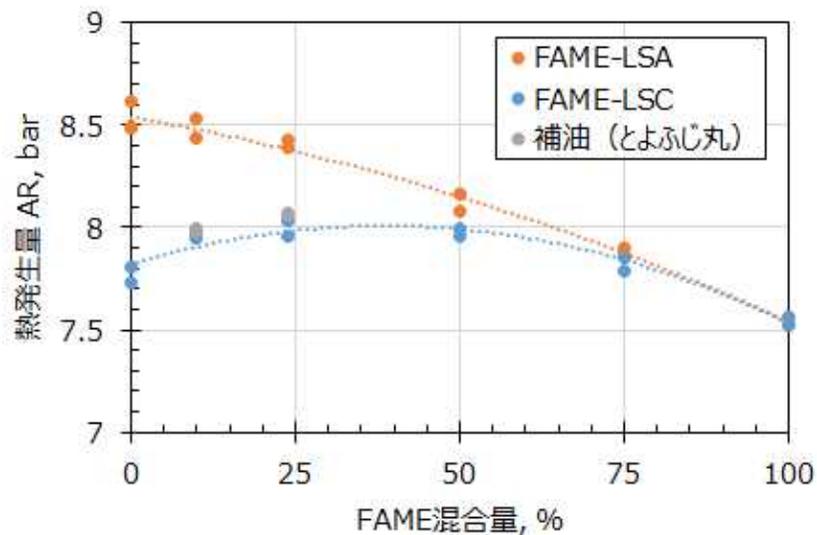
(b) 推定セタン価 ECN

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

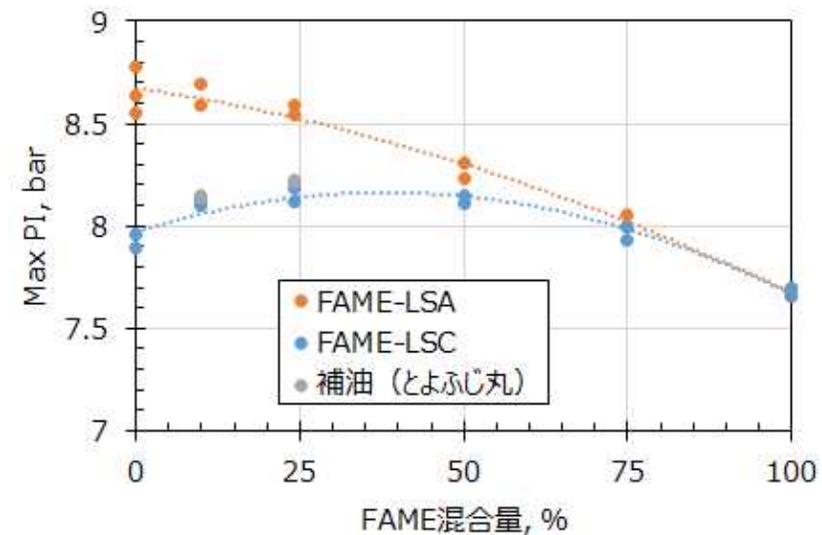
(5) 試験結果の一例

- FCA試験により求まるFAME-LSC混合油 (B10およびB24) の熱発生量ARや最大圧力増加Max PIは, LSCよりもわずかに高い。

※ これらの結果は, 実機試験とは必ずしも整合していないと考えられる。その要因としては, FCAと実機における燃焼条件の相違などが考えられる (要検討)。



(c) 熱発生量
Accumulated ROHR, AR

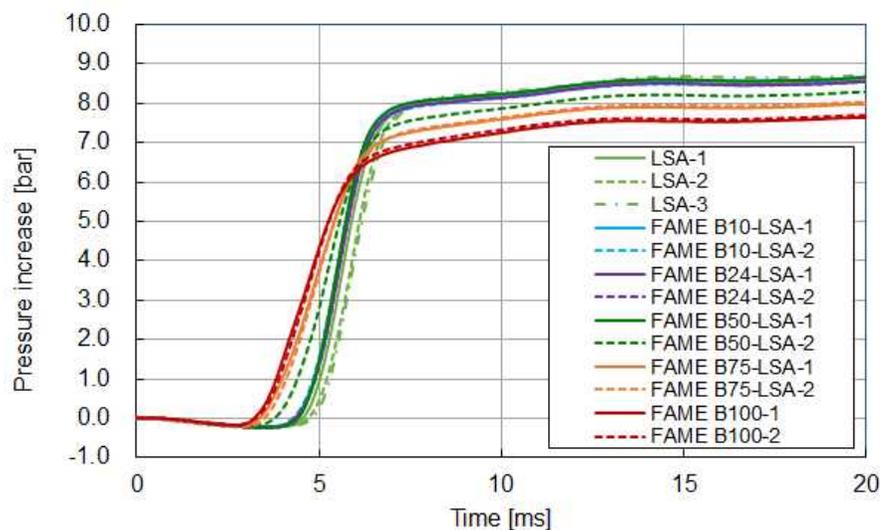


(d) 最大圧力増加
Max Pressure increase, Max PI

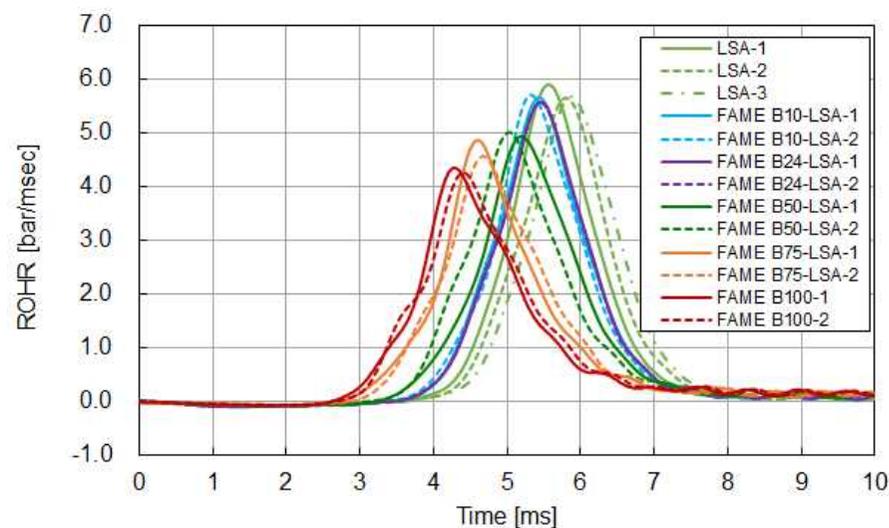
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験結果

(6) 燃焼波形の評価 (FAME-LSA)

- 圧力変化および熱発生率の結果から着火遅れや燃焼時間を評価できる。
- B100は着火性がよく、燃焼時間が短い (燃焼の終了が早い) ことなどがわかる。
- FAMEとA重油の混合油の圧力波形はLSAよりも燃焼が早まる傾向にある。
- FAMEの混合比が高まるほど、最高圧力上昇Max PIや最高圧力変化率Max ROHRなどが低下することなどがわかる。



(a) 圧力波形

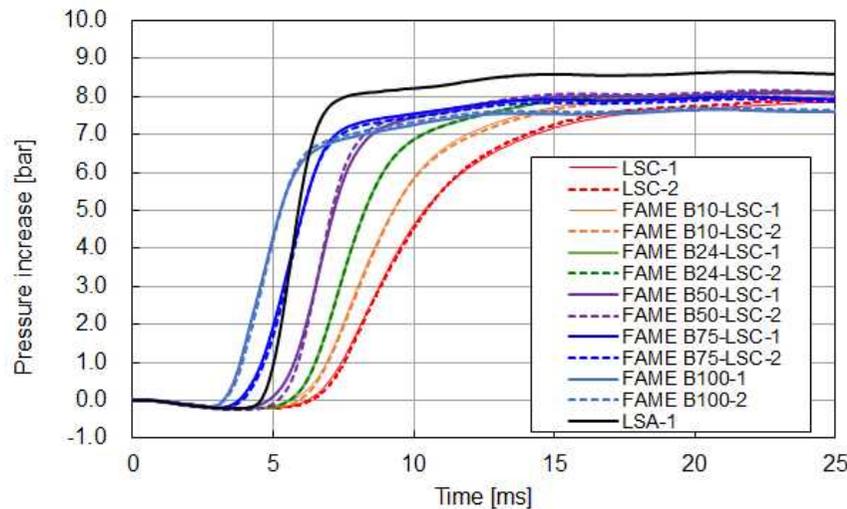


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

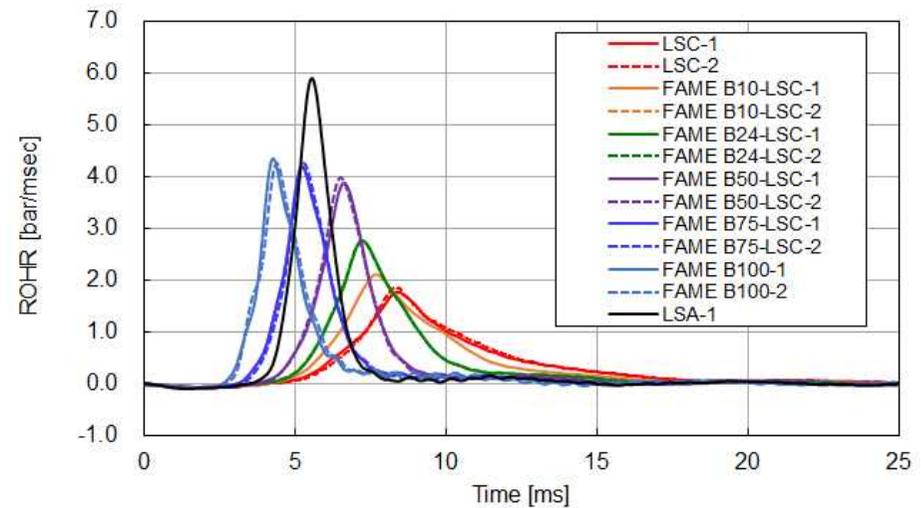
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(7) 燃焼波形の評価 (FAME-LSC)

- B10～B50の範囲において，混合油の圧力波形はLSAとLSCの間にある。
- B75およびB100の燃焼開始・燃焼終了はLSAよりも早いことなどがわかる。
- 実船試験に使用するB10およびB24は，LSCの波形に近いと推定される。



(a) 圧力波形

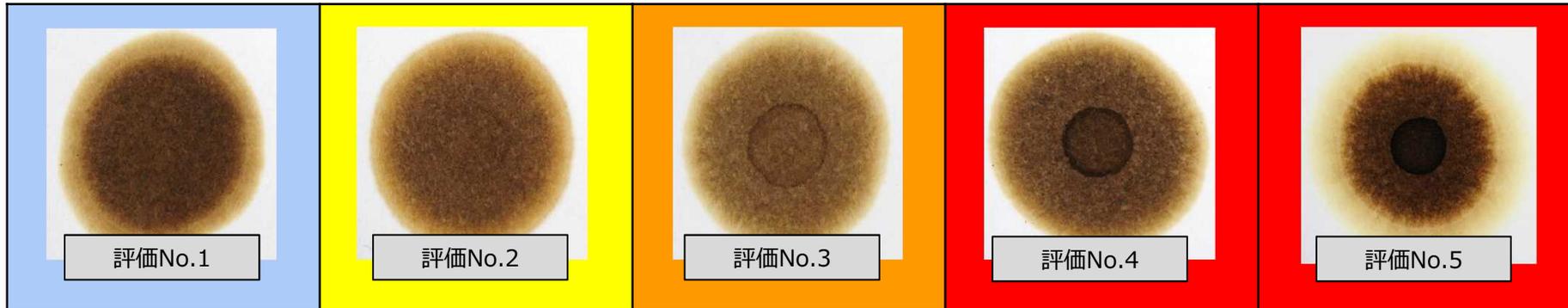


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

5. 混合安定性試験

(1) スポットテストの概要

燃料油のスポットテスト評価 ASTM D4740



試料油を滴下したところにリングがまったく認められない。



安定性に問題ない。

周囲に不完全な内円がわずかに認められる。



安定性に問題ない。

周囲が完全な線上の内円が認められ、内円と外円の色が同じ。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円の縁が黒色になり、内円内部の色が外円より濃い。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円内部はさらに濃くなり、中心付近以外はほぼ黒くなる。



安定性が悪く、スラッジトラブルが発生する可能性が高い。

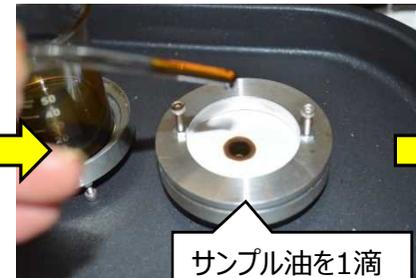
【参考】試験方法



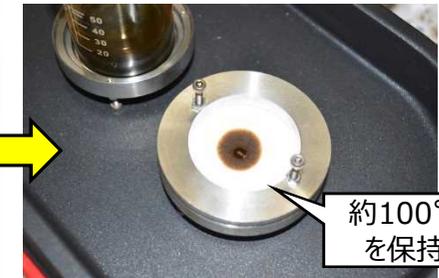
決められたろ紙 (5B) を準備する。



サンプル油とろ紙を約100℃に加熱する。



サンプル油を1滴だけ落とす。



約100℃を保持

5. 混合安定性試験

(2) 試験方法

- スポットテストにより，バイオ燃料と重油（LSC，LSA）の混合比を変えたときの混合安定性を確認する。
- 船内での長時間の貯蔵を想定して，異なる温度条件において，混合後の長期変化を調べる。

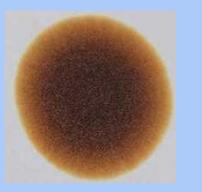
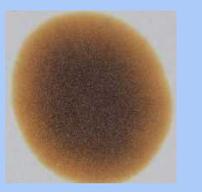
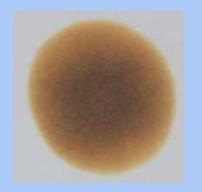
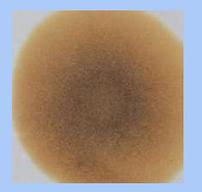
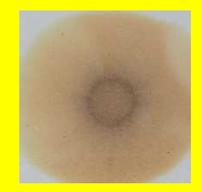
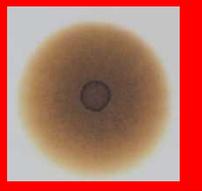
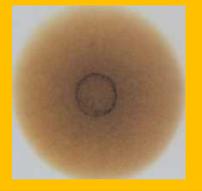
試験方法の概要

No.	試験 (温度条件)	概要	備考
(1)	常温	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。1回スポットテスト毎に，1時間程度，約100℃までの加熱を繰り返して行う（常時，常温に保管したサンプル油ではない）。	
(2)	80℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。スポットテスト毎に約100℃まで加熱し，試験終了後は80℃に加熱した恒温槽内で保管する。	
参考	55℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，常温状態において約1ヶ月間保管したサンプル油であり，参考データとする。	後述のゴム材料浸漬試験と同じ時期に実施する。

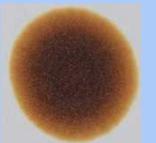
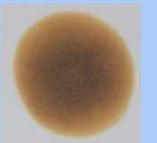
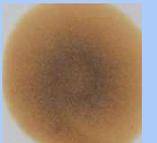
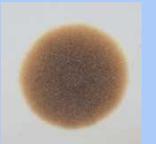
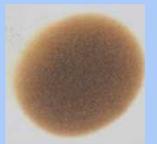
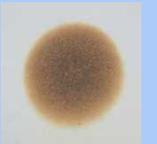
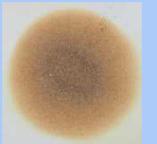
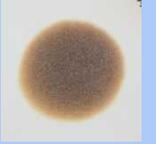
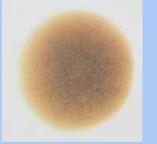
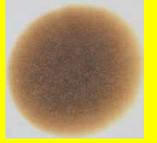
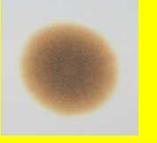
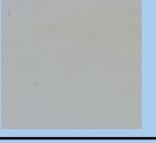
5. 混合安定性試験

(3) 試験結果

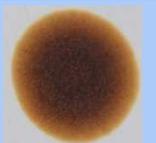
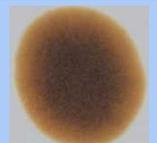
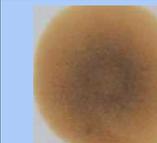
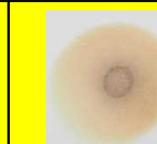
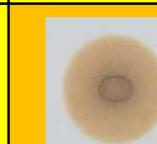
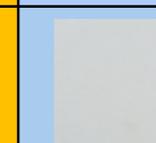
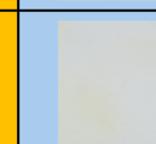
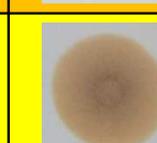
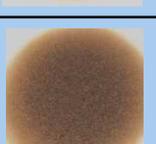
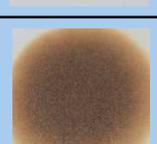
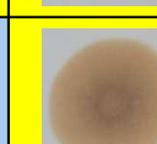
- FAMEとLSCの混合油の混合安定性は、貯蔵時間が長くなるほど悪化する傾向はあるものの、実船試験に使用するB10およびB24は、200～400h程度の時間経過までの混合安定性に問題ないと判断される。
- FAMEとA重油の混合油の混合安定性は、本試験範囲内においてすべて問題ないと判断される。

	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	
LSC 常温・0h							B75は評価No.2, それ以外は評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
LSC 常温・650h							B0～B75において, 円がはっきりとしている。
備考	長時間貯蔵時, LSC単体においても安定性の悪化が確認されている。バイオ燃料混合の影響は不明である。						

(a) LSC-FAME, 常温 (テスト時加熱)

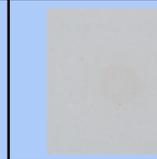
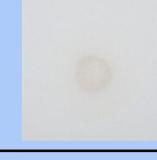
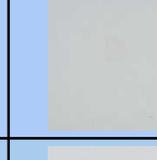
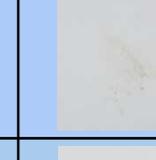
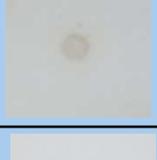
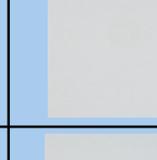
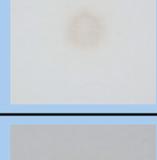
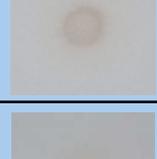
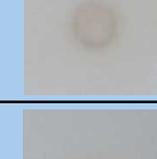
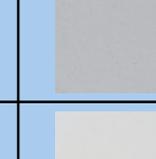
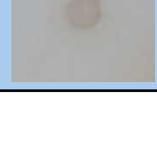
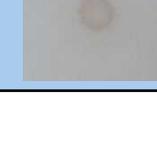
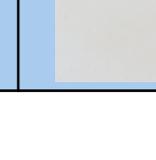
時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B75は評価No.2, それ以外は評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							大きい変化は確認できない。
100h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。
200h							B0 (LSC) ~B50において, 安定性の悪化が確認される。
400h							前回の計測から大きい変化は確認できない。
550h							B0~B75において, 円がはっきりとしている。
650h							B0~B75において, 円がはっきりとしている。

(b) LSC-FAME, 80°C恒温槽

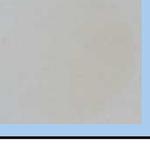
時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B75は評価No.2, それ以外は評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							B50の内円がはっきりとしてきた(評価No.2)。
100h							B50, B75の安定性が悪化している。
200h							B0 (LSC) ~B50において, 安定性の悪化が確認される。
400h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。
550h							円の縁が薄まっている(?)。
650h							円の縁が薄まっている(?)。

※ 通常, 保管温度が高いほど燃料の酸化が進むことが知られているが, 本試験においてその傾向は確認できなかった(原因不明)。

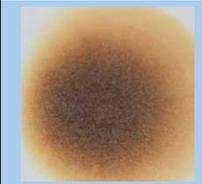
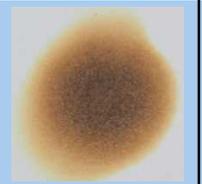
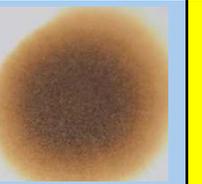
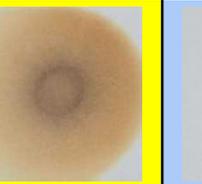
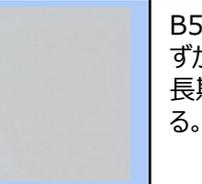
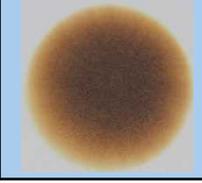
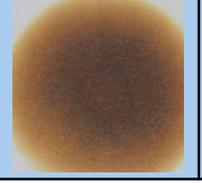
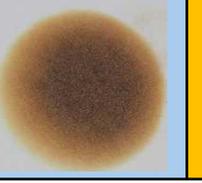
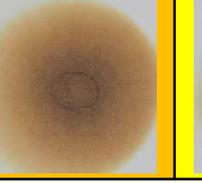
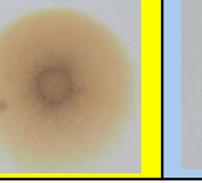
(c) LSA-FAME, 常温 (テスト時加熱)

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
200h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
550h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
650h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

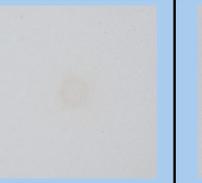
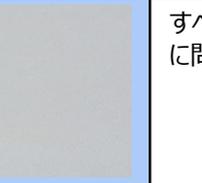
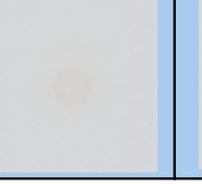
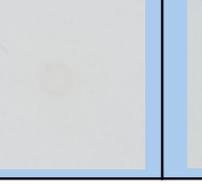
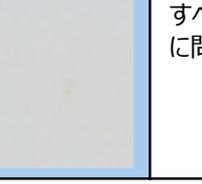
(d) LSA-FAME, 80°C恒温槽

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
200h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
550h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
650h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

【参考】LSC-FAME, 55°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B50～B75において、内円がわずかに認められる。(常温状態で長期に保管していた燃料である。)
350h							

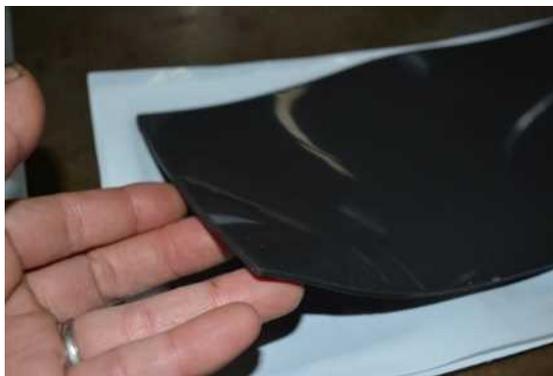
【参考】LSA-FAME, 55°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり、安定性に問題ないと判断される。
350h							すべて評価No.1であり、安定性に問題ないと判断される。

6. ゴム材料の浸漬試験

(1) ゴム材料の試験片

- 3種類のゴム材料（厚さ約2mm）を準備した（下表参照）。
- 以下の浸漬試験においては、JIS K 6258を参考として、厚さの寸法変化を計測した。



準備したゴムシート



切り出したゴム試験片

浸漬試験に用いたゴム試験片

整理記号	A	B	D
種類	中高ニトリルゴム (中高NBR)	高ニトリルゴム (高NBR)	フッ素ゴム (FKM)
アクリロニトリル 含有量	31~35%*	36~42%*	---
備考	一般的なニトリルゴム	一部の燃料移送ポンプに 使用されている材料	耐熱性、耐油性が高い 材料

※ 資料 (<https://www.packing.co.jp/GOMU/GOMU1/nbr.htm>) の参考値であり、ゴム試験片の計測値ではない。

6. ゴム材料の浸漬試験

(2) 試験方法

(a) 試験環境

- 恒温槽を温度55℃に設定し、浸漬試験を行った結果を整理する。



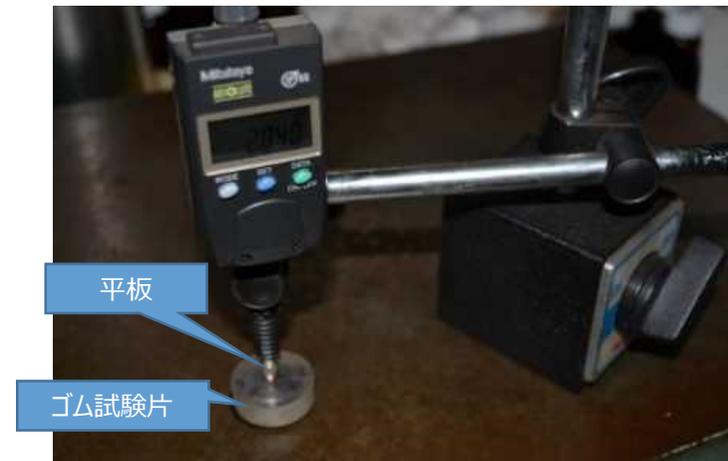
恒温槽



恒温槽内の試験片

(b) 寸法計測

- 定盤の上にゴム試験片を置き、アルミニウム合金製平板による一定加圧条件の下、デジタルマイクロゲージ（分解能1/1000mm）で寸法（厚さ）を計測する。
- ゴム試験片上の4点の寸法を計測をして平均値を求め、あらかじめ浸漬試験の前に個々の試験片において計測していた基準長さに対する寸法変化率を算出する。

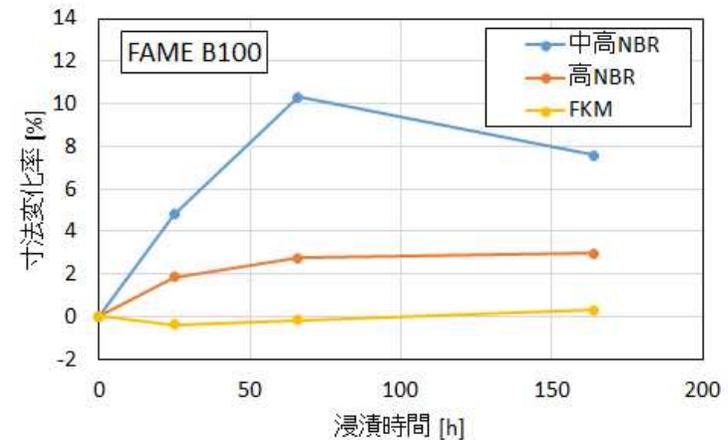


ゴム試験片の寸法計測

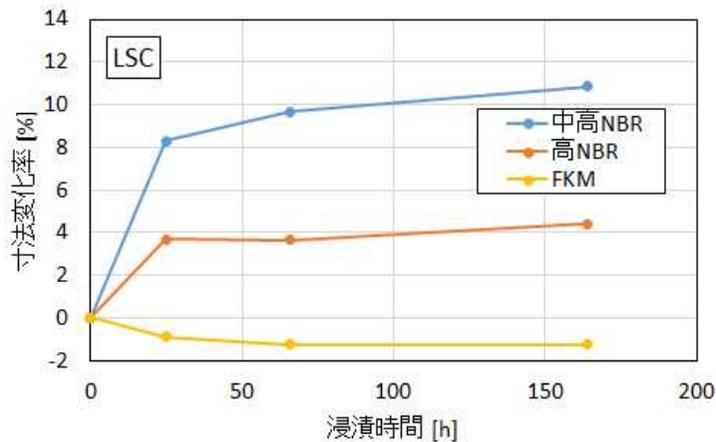
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 時系列変化

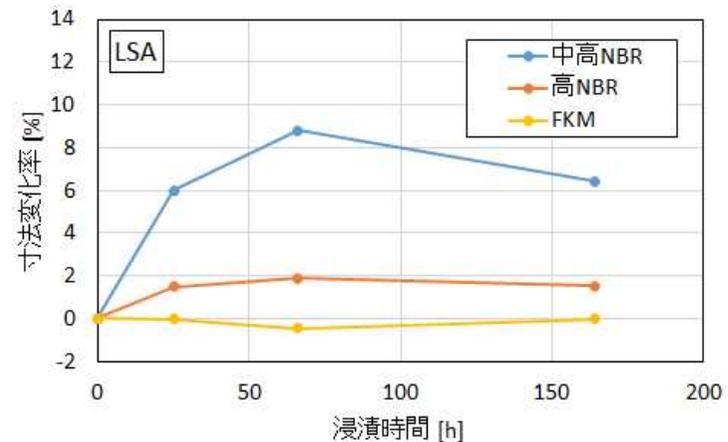
- 各燃料油における浸漬試験の寸法変化は、浸漬時間50～100時間程度で概ね安定している。
- 中高ニトリルの寸法変化は大きく、高ニトリルおよびフッ素ゴムの寸法変化は小さい。



(a) FAME (B100) の時系列変化



(b) LSCの時系列変化

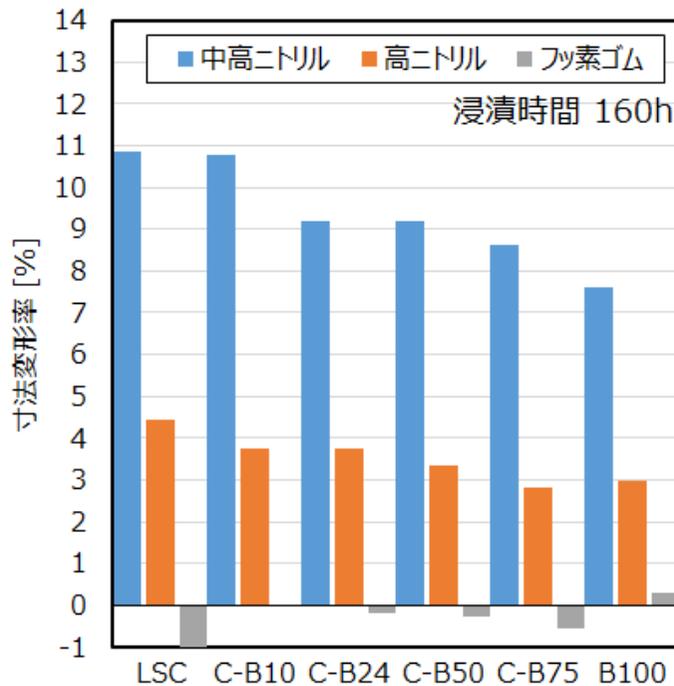


(c) LSAの時系列変化

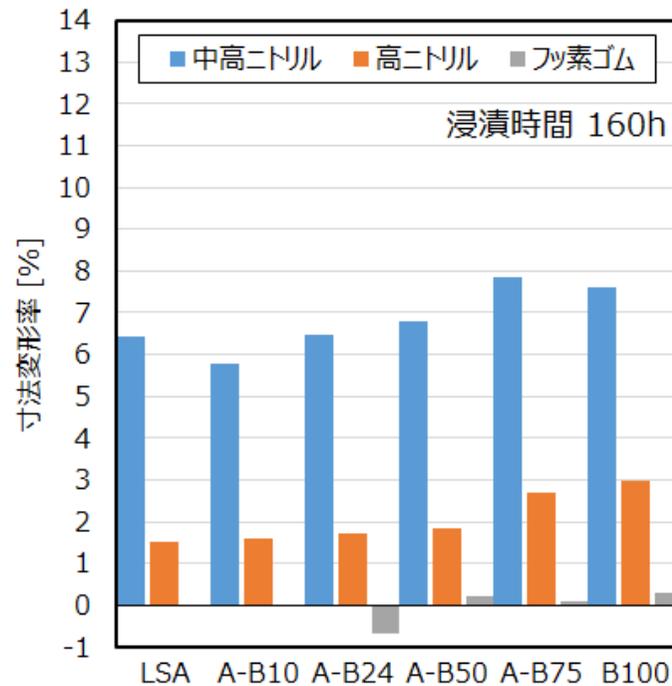
6. ゴム材料の浸漬試験

(4) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるFAME (B100) の寸法変化率は、LSCよりもやや小さく、LSAよりもやや大きい。
- 高ニトリルの寸法変化率は、中高ニトリルと比べてかなり小さい (1/3~1/5程度)。
- フッ素ゴムの寸法変化はほとんど確認できない。



(a) FAMEとLSCの混合油



(b) FAMEとLSAの混合油

7. 実船試験の概要

- 2022年8月より, とよふじ丸 (トヨフジ海運株式会社) においてFAME-LSC混合油 (B10およびB24) による実船試験を実施した。

船名	とよふじ丸
船種	自動車運搬船
総トン数	12,687 GT
全長 / 幅	165 m / 27.6 m
主機 シリンダ数 ボア径 x ストローク 出力 回転数	2ストロークディーゼル機関、1基 7 520 mm x 2,000 mm 11,935 kW 127 rpm
主発電機	4ストロークディーゼル機関、2基
ボイラ ボイラ蒸発量	2.53 ton/h
就航年月	2005年11月



とよふじ丸

<https://www.toyofuji.co.jp/services/fleet.html>

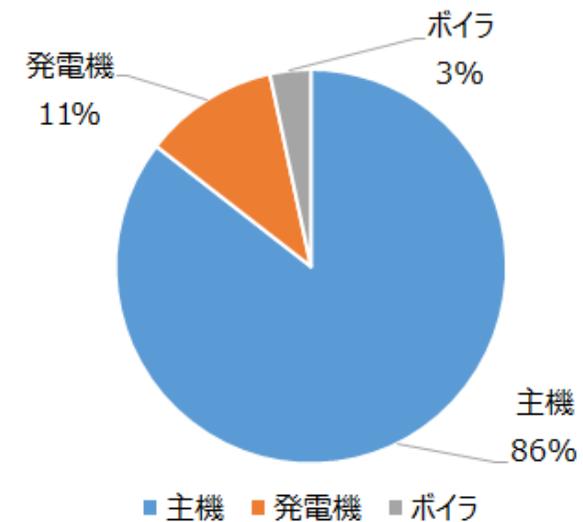


B24で運航中のとよふじ丸

7. 実船試験の概要

(1) バイオ燃料の使用状況

- 2022/7/26にバイオ燃料B10を240kL補油し、8/7～8/23の期間中に使用した（約10航海）。
- 2022/8/3にバイオ燃料B24を240kL補油し、8/23～9/3の期間中に使用した（約12航海）。
- バイオ燃料の使用割合は、主機86%、主発電機11%、ボイラ3%である。



バイオ燃料の使用割合



操舵室 (B24使用時)



機関制御室 (B24使用時)

7. 実船試験の概要

(2) 主機

- バイオ燃料による運航中，主機の筒内圧力の計測（No.5シリンダ），燃料消費量，排ガス温度，過給機回転数等の監視・計測を実施した。
- ボイラのマンホールにプローブを取り付け，排ガス計測を行った。



主機の筒内圧力の計測



排ガス計測

7. 実船試験の概要

(3) 主発電機・ボイラの運転



発電用ディーゼルエンジン



ストレーナ（フィルタ）

- バイオ燃料による発電用ディーゼルエンジンの運転に異常がないことを確認した。
- ストレーナに液状（軟質）のスラッジが堆積していることを確認した（B10使用時）。

※ ストレーナへのスラッジ付着は通常よりもやや多い。



ボイラ燃焼機の外観



ボイラの燃焼状況（B24使用時）

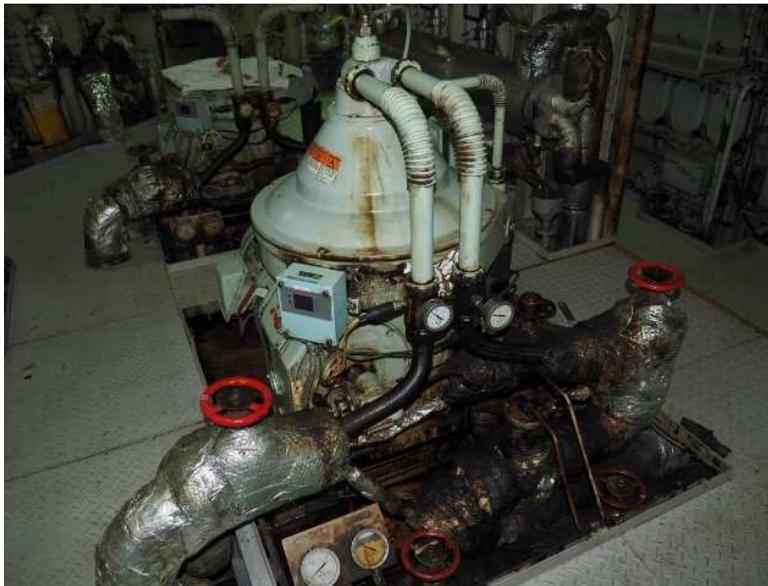
- バイオ燃料によるボイラの運転に異常がないことを確認した。

※ バイオ燃料の性状によっては、点火時の不具合に注意が必要である。

7. 実船試験の概要

(4) 燃料清浄機

- 通常のC重油運転時と同じ調整板を使用して燃料清浄機を運転した。
- 燃料清浄機の状態にほとんど変化はなかった。
- B10運転時に点検した際、Oリングの劣化（膨潤）が確認された。



燃料清浄機



燃料清浄機の点検

7. 実船試験の概要

(5) 燃料油の温度調節

- バイオ燃料はLSCと比べて動粘度が低く、B24では粘度調節器（ビスコン）による制御ができなくなった（通常LSC使用時は12.5cStに設定している）。

※ 燃料清浄機のヒーティングのみを行い（約70℃）、その他のヒーティングはOFFとしている。



粘度調節器の設定パネル（機関制御室）

(6) その他

- 廃油焼却炉の燃焼状態にも変化は確認されなかった。

8. 燃費および主機データの実船計測

(1) 実船試験結果の一覧

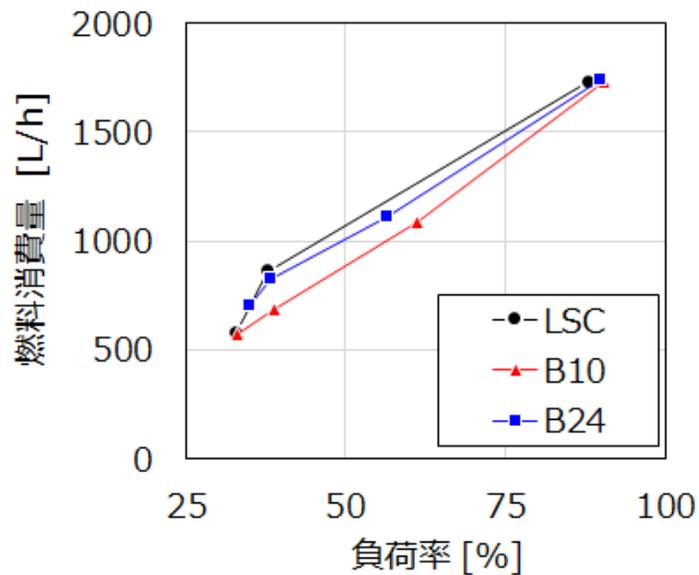
- LSC, B10およびB24運転時の主機データを計測した。

項目	単位	LSC (7/26-28計測)			B10 (8/13-14計測)				B24 (8/27-28計測)			
負荷率	%	88	38	33	90	61	39	33	90	56	38	35
主機回転数	min ⁻¹	125	103	103	125	110	103	103	125	110	103	103
出力	kW	10500	4513	3930	10773	7288	4639	3938	10734	6732	4568	4193
燃料消費量	L/h	1731	863	574	1733	1090	689	576	1740	1110	822	702
TC前排ガス温度	degC	430	405	394	420	425	403	393	425	430	412	402
TC後排ガス温度	degC	323	352	359	313	352	363	359	322	362	366	363
TC回転数	min ⁻¹	9809	5360	4150	9938	7059	4965	4078	9727	6985	5524	4778
圧縮端圧力 Pcomp	MPa	8.5	4.7	4.4	8.8	5.8	4.6	4.5	7.8	5.6	4.8	4.6
筒内最高圧力 Pmax	MPa	13.0	7.2	6.5	13.0	9.6	6.9	6.6	11.9	9.3	7.6	7.0
排気温#1	degC	395	372	359	393	397	373	362	398	404	383	372
排気温#2	degC	389	370	361	379	388	370	358	386	393	381	369
排気温#3	degC	387	373	363	379	390	376	368	386	390	373	369
排気温#4	degC	379	363	357	372	379	359	354	377	378	363	355
排気温#5	degC	399	373	363	386	409	379	373	393	408	389	373
排気温#6	degC	395	383	367	382	398	376	365	387	400	385	370
排気温#7	degC	381	372	364	376	393	369	362	384	398	379	374

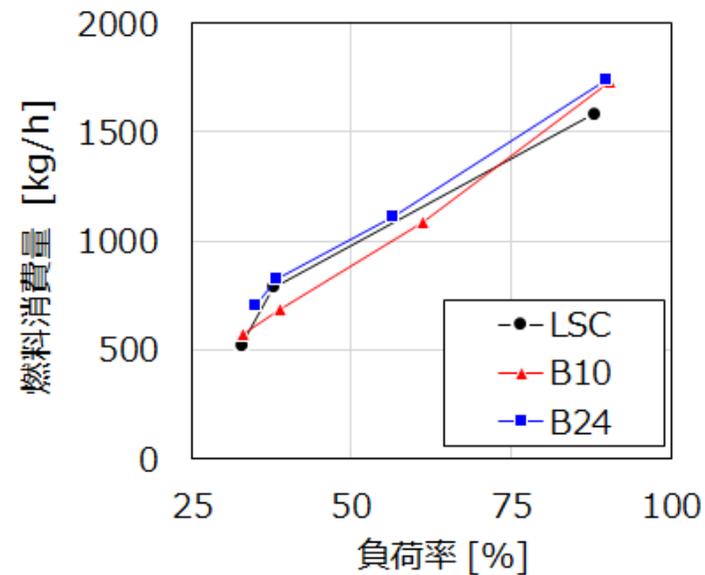
8. 燃費および主機データの実船計測

(2) 燃料消費量

- バイオ燃料使用時の燃料消費量[L/h]は、燃料油密度の違いの影響などがあり、LSC使用時と比べてわずかに低く計測されている。
- 燃料油密度の実測値を用いた重量あたりの燃料消費量[kg/h]や各燃料油の発熱量を踏まえた燃料消費率[g/kWh]は、LSC使用時とFAME使用時の相違を確認できない。



(a) 燃料消費量 (L/h)



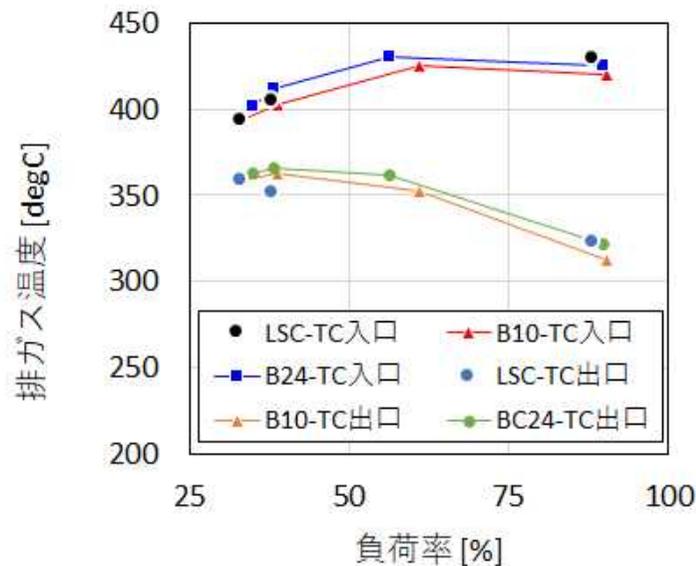
(b) 燃料消費量 (kg/h)

8. 燃費および主機データの実船計測

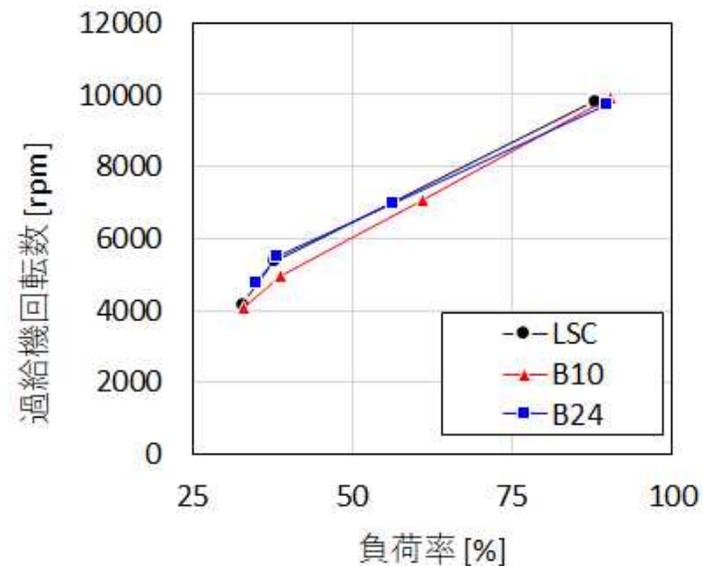
(3) 排ガス温度・過給機回転数

- バイオ燃料使用時の排ガス温度や過給機回転数は、LSC使用時と同様の傾向にあり、大きな違いは確認できない。

※ B24使用時の過給機回転数は、LSC使用時と比べて、わずかに低い。



(a) 過給機前後の排ガス温度

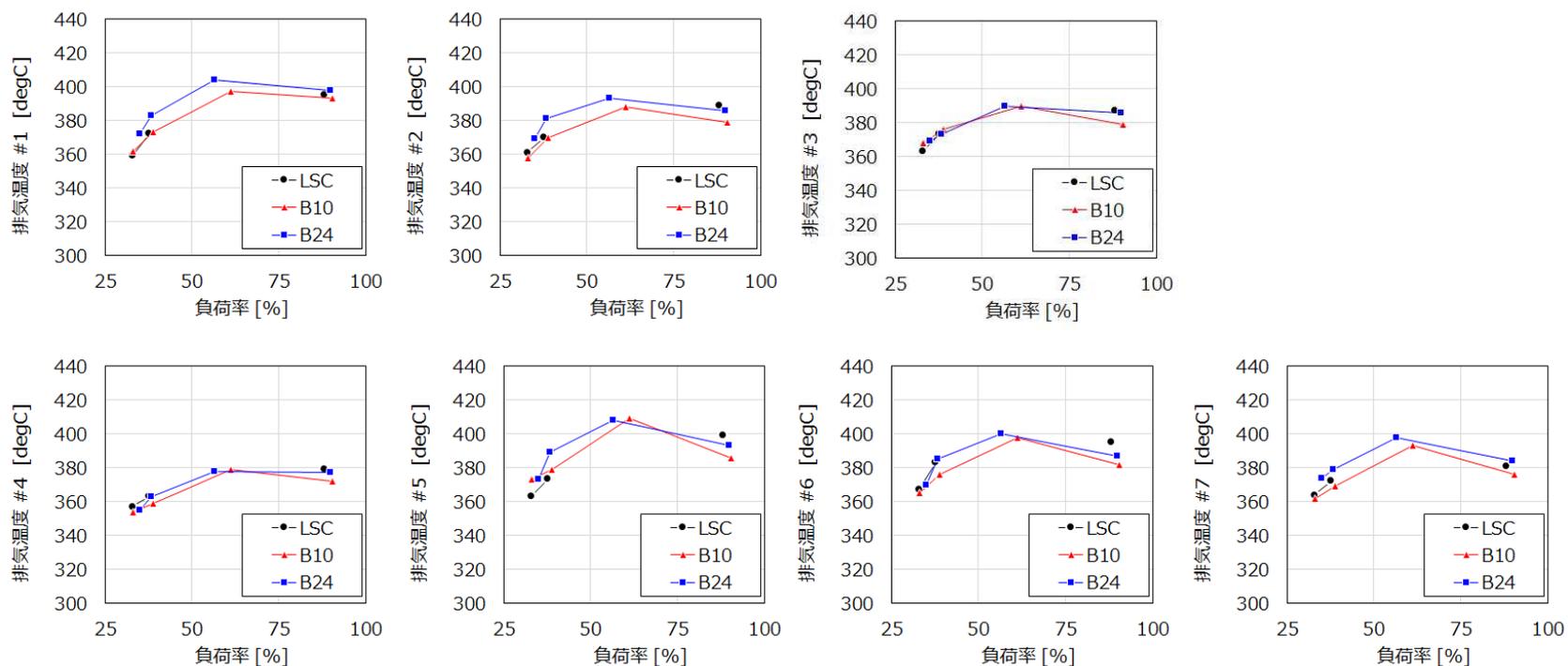


(b) 過給機回転数

8. 燃費および主機データの実船計測

(3) 排ガス温度・過給機回転数

- バイオ燃料使用時の各シリンダの排ガス温度は、LSC使用時と同程度であり、大きな違いは確認できない。
- 各シリンダ排ガス温度のばらつきも同程度であることを確認した。



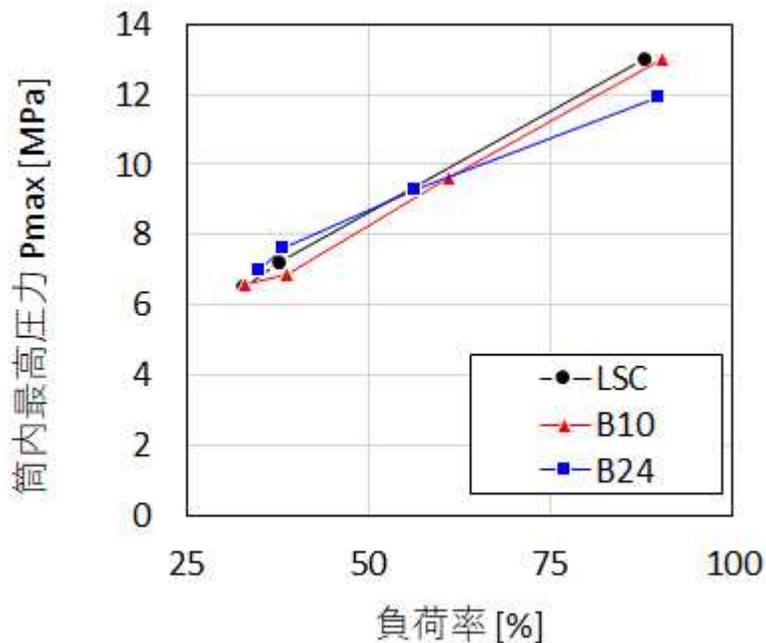
各シリンダの排ガス温度

8. 燃費および主機データの実船計測

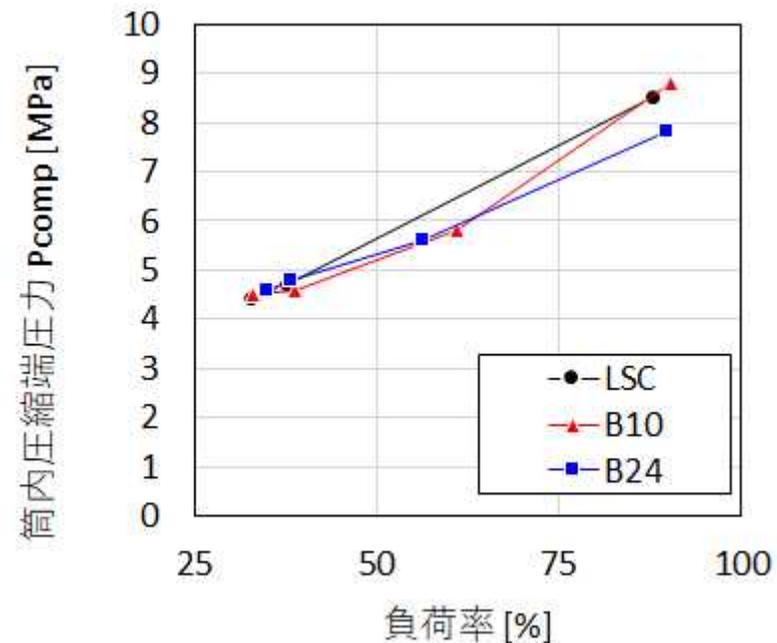
(4) 筒内圧力計測

- LSC使用時およびバイオ燃料使用時の筒内圧力波形を計測した（No.5シリンダ）。
- 計測値にばらつきはあるものの、バイオ燃料使用時の筒内最高圧力 P_{max} や圧縮端圧力 P_{comp} は、LSC使用時と概ね同程度である。

※ B24使用時の高負荷における P_{max} は、LSCおよびB10使用時と比べて、わずかに低い。



(a) 筒内最高圧力 P_{max}



(b) 圧縮端圧力 P_{comp}

9. 排ガス成分の実船計測

(1) 排ガス計測の概要

- 仙台付近や浦賀水道付近において、LSC, B10およびB24運転時の排ガス成分を計測した。



項目	単位	LSC (7/26-28計測)		
負荷率	%	88	38	33
主機回転数	min ⁻¹	125	103	103
出力	kW	10500	4513	3930
CO濃度	ppm	84	163	147
CO ₂ 濃度	vol%	5.6	5.6	5.5
NOx濃度	ppm	1465	1235	1128
O ₂ 濃度	vol%	13.7	14.0	14.0
スート濃度	mg/m ³	0.563	1.163	1.458

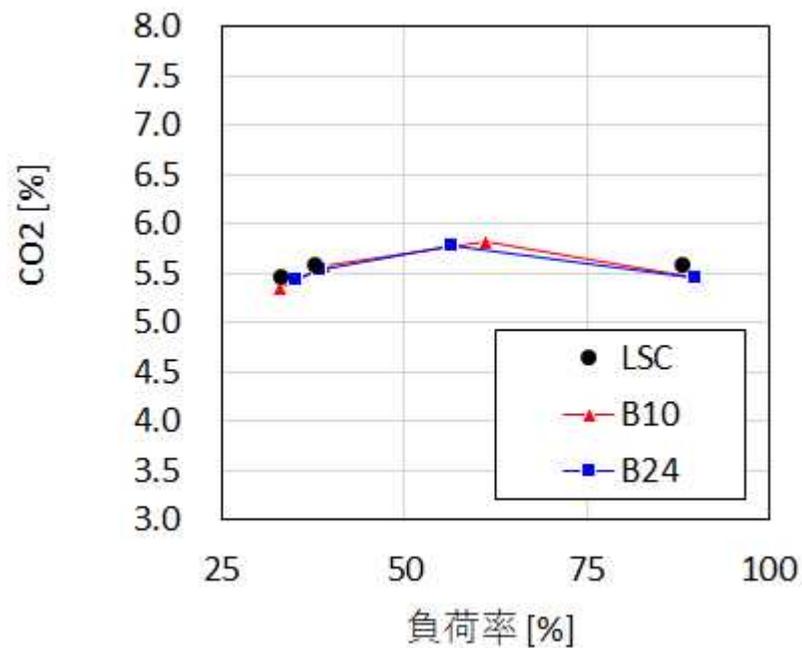
項目	単位	B10 (8/13-14計測)			
負荷率	%	90	61	39	33
主機回転数	min ⁻¹	125	110	103	103
出力	kW	10773	7288	4639	3938
CO濃度	ppm	66	237	164	142
CO ₂ 濃度	vol%	5.5	5.8	5.6	5.4
NOx濃度	ppm	1544	1329	1236	1120
O ₂ 濃度	vol%	14.0	13.5	13.8	14.1
スート濃度	mg/m ³	0.456	0.816	1.054	1.254

項目	単位	B24 (8/27-28計測)			
負荷率	%	90	56	38	35
主機回転数	min ⁻¹	125	110	103	103
出力	kW	10734	6732	4568	4193
CO濃度	ppm	85	259	210	154
CO ₂ 濃度	vol%	5.5	5.8	5.5	5.4
NOx濃度	ppm	1416	1309	1269	1225
O ₂ 濃度	vol%	13.9	13.5	13.8	14.0
スート濃度	mg/m ³	0.449	0.694	0.871	1.056

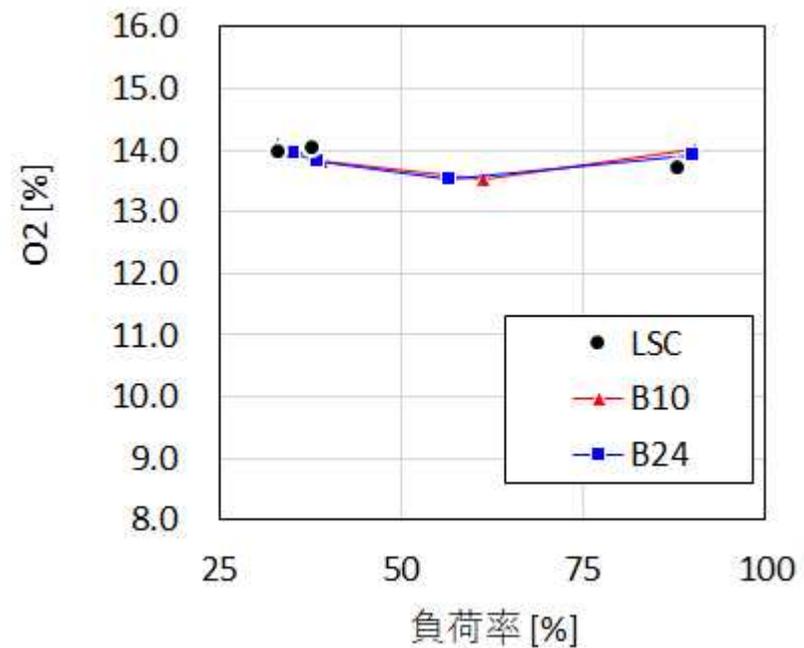
9. 排ガス成分の実船計測

(2) 排ガス計測 (CO₂濃度, O₂濃度)

- B10使用時のCO₂, O₂濃度は, LSC使用時と同程度であり, 大きな違いは確認できない。



(a) CO₂濃度

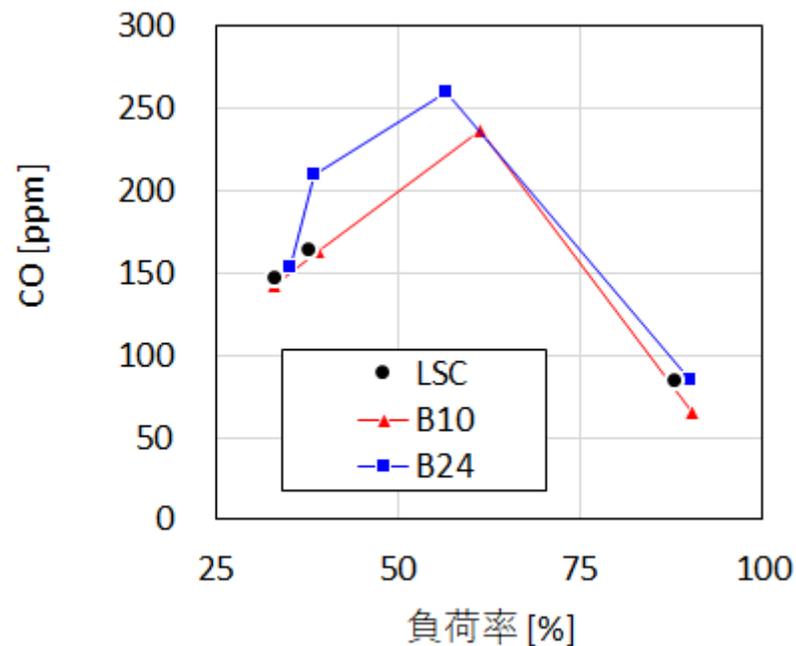


(b) O₂濃度

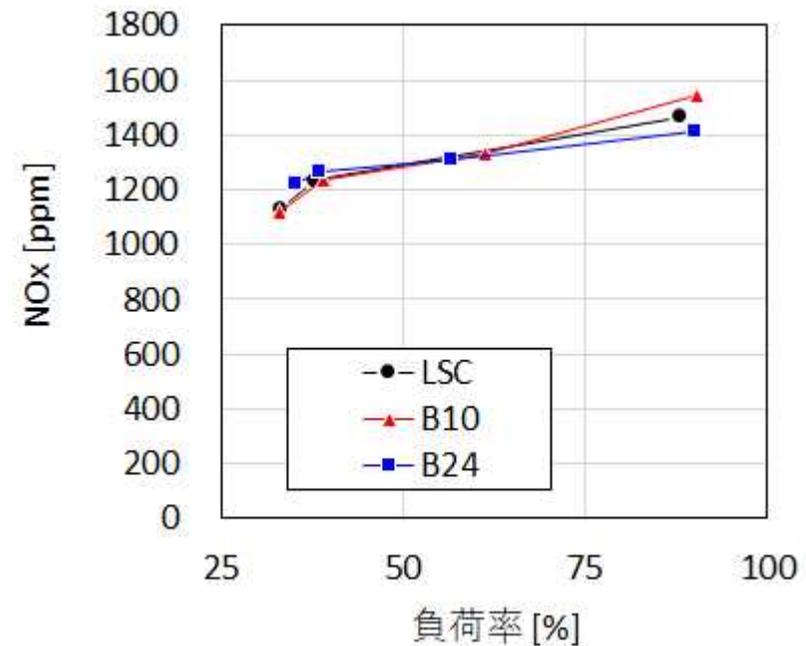
9. 排ガス成分の実船計測

(3) 排ガス計測 (CO濃度, NOx濃度)

- バイオ燃料使用時のCO濃度は、LSC使用時と同程度であり、大きな違いは確認できない。
- NOx濃度は、バイオ燃料・LSCともに同程度であり、バイオ燃料使用によるNOx増加は確認できない。



(a) CO濃度

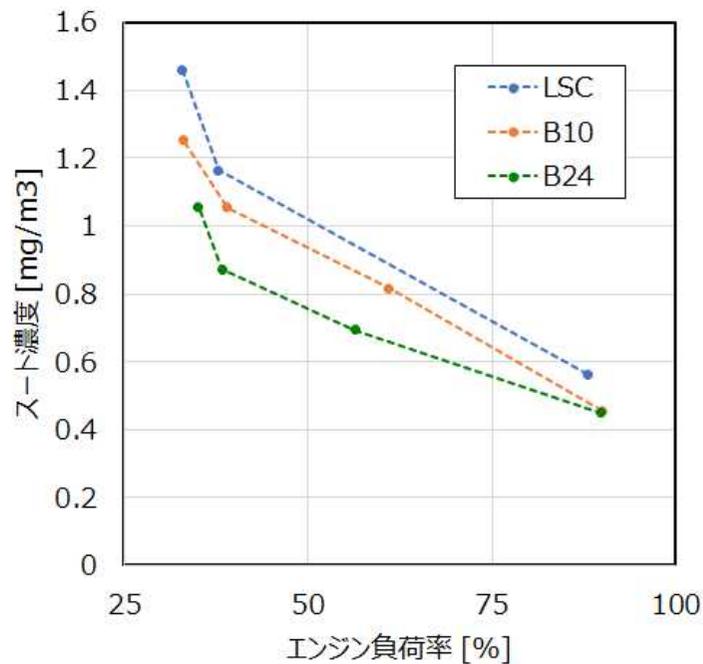


(b) NOx濃度

9. 排ガス成分の実船計測

(3) 排ガス計測 (Soot濃度)

- バイオ燃料使用時のSoot濃度は、LSC使用時と比べて低下している。



Soot濃度

【参考】LSCおよびバイオ燃料使用時の排ガスは、いずれも無色であった。



排ガスの色 (B24使用時)

10. 実船試験後のドックにおける開放点検

- 2022/9/7より、内海造船（広島県尾道市，生口島）に入渠し，主機や発電用ディーゼルエンジン，ボイラ燃焼器，燃料清浄機などの開放点検を行った。



入渠中のとよふじ丸



開放点検中の補機

10. 実船試験後のドックにおける開放点検

(1) 主機

- 主機の状態は通常通りであり、バイオ燃料の使用に起因する汚れや損傷などの不具合は確認されなかった。



シリンダ



シリンダヘッド



排気弁



ピストン



燃料噴射ノズル

10. 実船試験後のドックにおける開放点検

(2) 主発電機

- 発電用ディーゼルエンジンにおいて、バイオ燃料の使用に起因する汚れや損傷などの不具合は確認されなかった。



発電用ディーゼルエンジン



燃料噴射ノズル

(3) ボイラ

- ボイラ燃焼器を目視により点検した。バイオ燃料の使用に起因する汚れなどは確認されなかった。



ボイラ燃焼器

10. 実船試験後のドックにおける開放点検

(4) 燃料清浄機

- 燃料清浄機の内部は、通常時よりもややスラッジの付着が多い状況であった。

※ バイオ燃料使用前にタンクや配管に付着していたスラッジが、バイオ燃料の洗浄効果によって流出した可能性がある。

※ 付着していたスラッジは、通常のLSC使用時よりも軟質であったとのことである。

※ Oリングの膨潤状態などは、機器メーカーによって確認中である。



分解・点検中の燃料清浄機

10. 実船試験後のドックにおける開放点検

(5) その他

- 主機，発電用ディーゼルエンジンおよびボイラの排気管を目視により確認した。バイオ燃料の使用に起因するスートの蓄積などは確認されなかった。



主機の排気管



発電用ディーゼルエンジン（2基）の排気管

1 1 . まとめ

(1) 動粘度および密度

- バイオ燃料B100の動粘度および密度は、LSCよりも低く、LSAよりも高い。実船試験に使用するB10およびB24の動粘度および密度は、LSCとB100の間にある。
- 実船試験に先立って、燃料清浄機の使用並びにエンジン入口の燃料油温度管理のベースデータが得られた。(バイオ燃料使用前に混合油の性状を把握しておくことが重要である。)

※ バイオ燃料はLSCと比べて動粘度が低く、B24の実船試験では粘度調節器（ビスコン）による制御ができなくなるといった状況が生じた。通常のLSC使用時と異なる運転条件となるため、注意が必要である。

(2) バイオ燃料の燃焼性

- 定容燃焼装置（FCA）による試験を実施した結果、実船試験に使用するB10およびB24の推定セタン価ECNは、21～24であり、燃焼性に問題ないレベルであると推定された。
- FCA試験より、FAMEとLSCを混合したB10およびB24は、LSCの燃焼波形に近いいため、LSC運転時の燃焼と大きく変わらないと推定された。
- 実船試験による主機データの計測結果において、バイオ燃料使用時の燃焼状態はLSC運転時と大きな違いは確認されなかった。

※ バイオ燃料の性状によっては、エンジン始動時やボイラ点火時の不具合に注意が必要である。

※ 本試験に使用したFAMEは燃焼性が高い。A重油などと混合した場合、燃焼性が高まることによるエンジン運転への影響は不明であり、注意が必要である。

1 1 . まとめ

(3) 混合安定性, スラッジの発生状況

- 陸上で実施したスポットテストより, FAMEとLSCの混合油の混合安定性は, 貯蔵時間が長くなるほど悪化する傾向はあるものの, 実船試験に使用するB10およびB24は, 200h程度の時間経過までの混合安定性に問題ないと判断された。
 - FAMEとA重油の混合油の混合安定性は, 本試験範囲内においてすべて問題ないと判断された。
 - 実船試験後の燃料清浄機の開放点検より, 燃料清浄機の内部は, 通常のLSC使用時よりもスラッジの付着がやや多いことが確認された。バイオ燃料使用前にタンクや配管に付着していたスラッジが, バイオ燃料の洗浄効果によって流出した可能性があり, 注意が必要である。
- ※ 長時間貯蔵時, 混合安定性は悪化する可能性があるため, 注意が必要である。
- ※ バイオ燃料等の軽質燃料は配管の洗浄効果があると思われる。運用時にはフィルタの状況等を確認することが重要である。

(4) エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食, 劣化に及ぼす影響

- 陸上で実施したゴム浸漬試験より, FAMEによる中高ニトリルゴムの寸法変化率は, LSCとA重油の間であった。
 - 実船試験後, 主機や発電用ディーゼルエンジンを開放点検を行った結果, 機器の腐食は確認されなかった。
- ※ ゴム材料の膨潤性は燃料油の成分により大きく異なるため, 燃料配管等に使用しているリングなどのゴム製部品には注意する必要がある。

1 1 . まとめ

(5) 燃料消費量

- バイオ燃料使用時の燃料消費量は、LSC使用時と比べて大きくは変わらない。
- ※ 発熱量が低いバイオ燃料を使用する場合、エンジンへの燃料流量が制限を受け、最高出力が低下する可能性があるため、注意が必要である。

(6) 排ガス成分

- LSC運転時およびバイオ燃料使用時の排ガス成分を計測した結果、ほとんどの成分において大きな相違は確認されなかった。
- ※ 当初懸念されていたバイオ燃料使用時のNOx排出量増加も確認されていない。

(7) 燃料油の切替え及びバンカリング時における影響

- バンカリングを含めた一連の実船試験は、通常のオペレーションによって対応でき、特別な不具合が生じることはなかった。
- ※ 動粘度の違いによるエンジン運転条件の変化、バイオ燃料の洗浄効果によってスラッジが流出する可能性、長期船内貯蔵による安定性の悪化、発熱量の違いによるエンジン出力特性の変化などに注意が必要である。燃料油の切り替え時には、これらの状態を適切に管理することが重要である。
- ※ バイオ燃料には様々な種類があり、それぞれの特性把握し、適切な管理が必要である。
- ※ バンカー船へのバイオ燃料の積み込みや輸送のルール制限がある。それらを整理して、バイオ燃料の供給を検討することによって、普及やコスト低減につながると思われる。

バイオ燃料関連の試験結果

～HVO陸上試験結果～

目次

1. はじめに
2. 試験に使用する燃料油
3. 動粘度・密度の計測
4. 定容燃焼装置（FCA）による試験
5. 混合安定性試験
6. ゴム材料の浸漬試験
7. 陸上エンジン試験
8. まとめ

（国研）海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

1. はじめに

- 船舶燃料油として利用可能性のあるバイオ燃料について、船舶利用時の技術的な観点による評価の検証を行う（2022年度国交省事業）。
- バイオ燃料は従来から使用されている船用重油（A重油、高硫黄C重油HSC、低硫黄C重油LSC）と混合して使用されることが想定される。
- 陸上試験では、幅広い条件で燃料を混合し、基本的な燃料特性の計測・評価を行う。

No.	試験・評価項目	陸上試験	実機試験
①	性状（動粘度、密度、流動点等）	○	
②	燃焼性の特性	○	○
③	バイオ燃料と重油の混合安定性、スラッジの発生状況	○	○
④	エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食、劣化に及ぼす影響 【陸上試験ではゴム材料の浸漬試験を実施】	○	○
⑤	燃費		○
⑥	排出ガスの成分		○
⑦	燃料油の切替え及びバンカリング時における影響		⊖

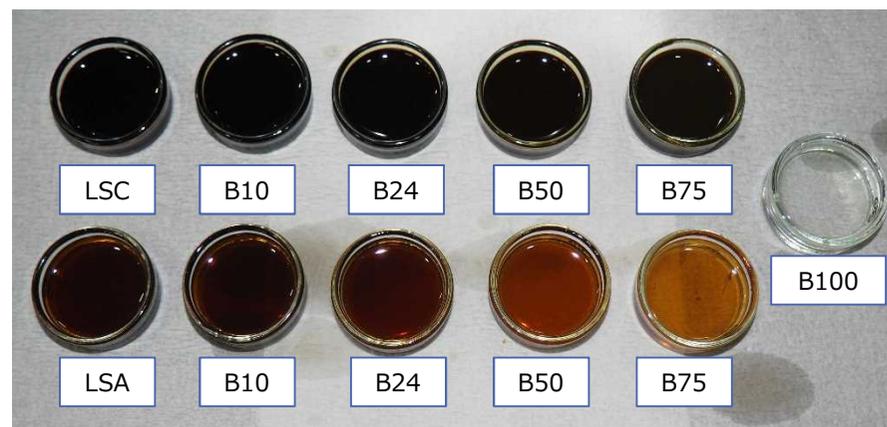
※ HVOの試験では、実船試験は行わず、基本的な陸上試験と陸上エンジン試験を実施する。

2. 試験に使用する燃料油

- 各種試験に使用する燃料油（A重油，LSC，バイオ燃料，それらの混合油）は下表の通りである。

※ 別途実施しているFAMEを使用した試験との整合を取るため、とよぶじ丸から採取したLSCを使用する。

※ 陸上エンジン試験は，A重油（海技研）との混合油を使用する。



種類・項目	A重油	LSC	LSC-HVO混合油 (A重油-HVO混合油)				バイオ燃料 B100 (HVO)
			B10	B24	B50	B75	
動粘度@50℃ [cSt]	2.29	28.0	19.6 (2.32)	12.7 (2.32)	6.61 (2.37)	4.29 (2.43)	2.53
密度@15℃ [g/cm ³]	0.8562	0.9656	0.9476 (0.8489)	0.9218 (0.8386)	0.8746 (0.8193)	0.8286 (0.8009)	0.7823
硫黄濃度 [%]	0.1015	0.4377	0.3980 (0.0911)	0.3443 (0.0808)	0.2398 (0.0569)	0.1354 (0.0386)	0.0212
総発熱量 [J/g]	45,260	41,010					
備考	海技研で使用しているLSA。陸上試験に使用する。	2022年7月末にとよぶじ丸より採取したLSC。					伊藤忠エネクス殿より提供いただいたサンプル油。

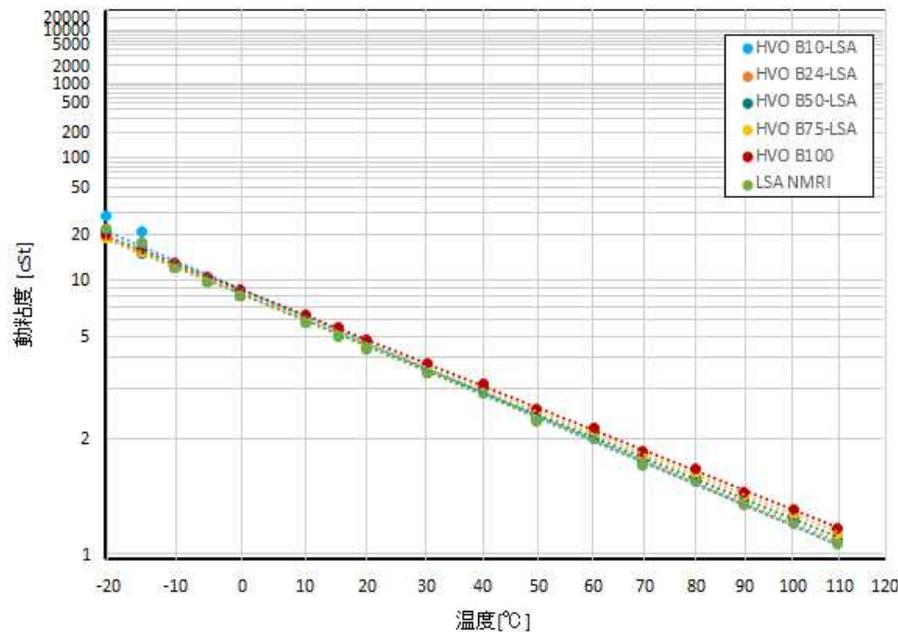
※ 括弧内の数値はA重油-FAME混合油である。 ※ 総発熱量を除き，海技研における計測値である。

3. 動粘度・密度の計測

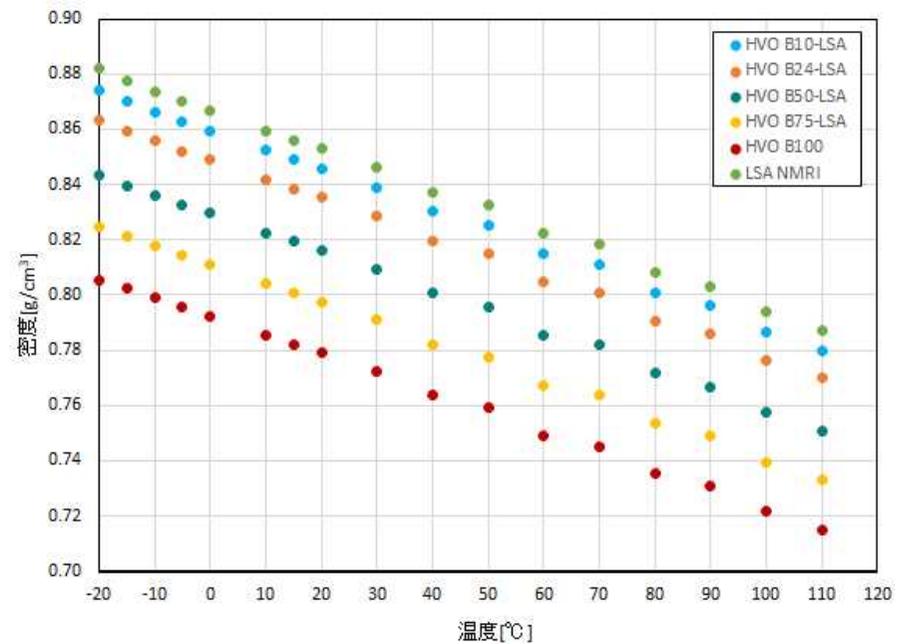
(1) HVOとA重油の混合油

- バイオ燃料HVOとLSA（A重油）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100および混合油の動粘度はLSAとほぼ同程度である。
- HVO（B10～B100）の動粘度は、温度-動粘度チャートにおいて直線で表される。
- B100の密度はLSAよりも低く、HVOとLSAの混合油はその間となる。

※ 現状、流動点の計測は行っていないが、 -20°C までの動粘度の傾きが変わっていないため、各燃料油の流動点は -20°C 以下であると考えられる（冬季の使用においても問題がないレベル）。



(a) 動粘度

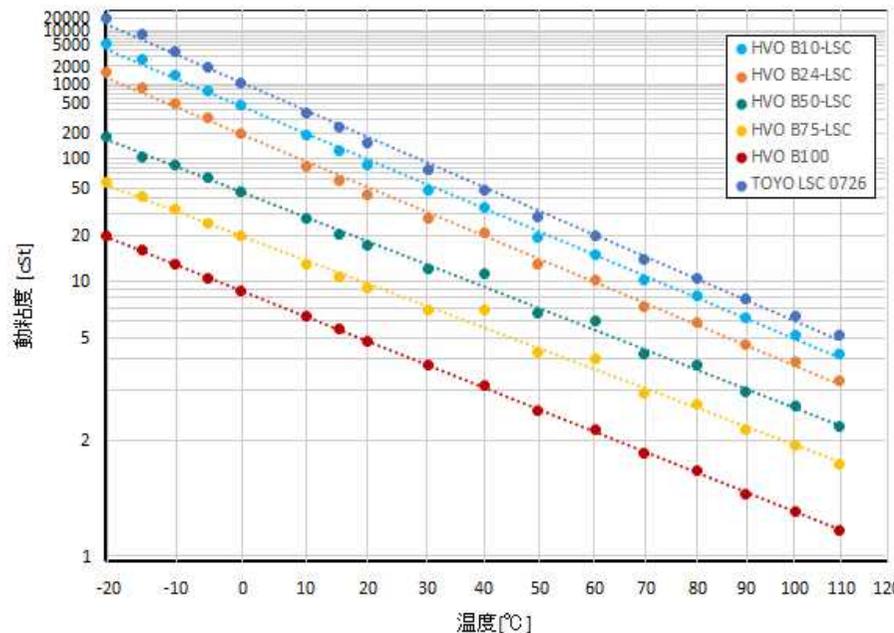


(b) 密度

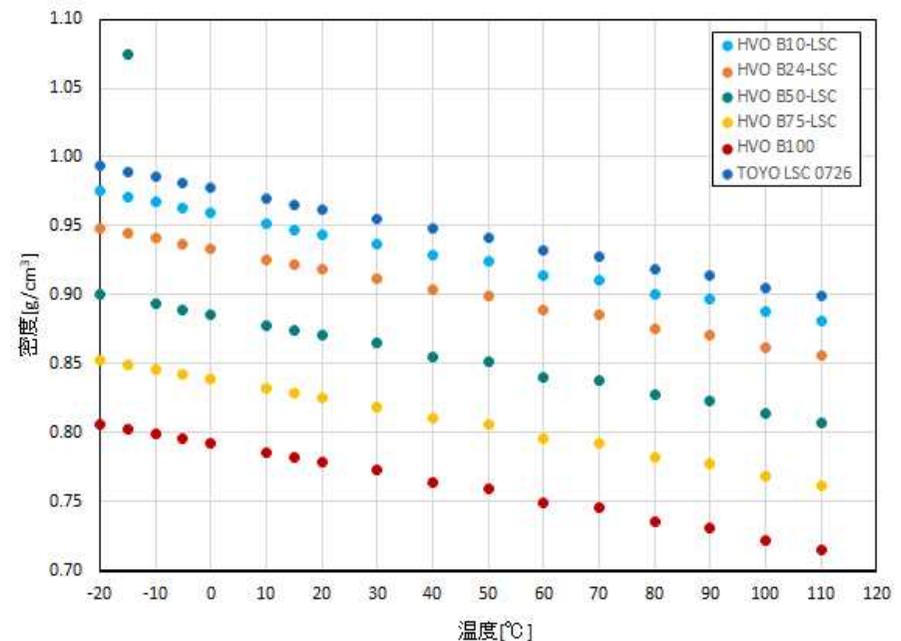
3. 動粘度・密度の計測

(2) HVOとLSCの混合油

- バイオ燃料HVOとLSC（低硫黄C重油）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100の動粘度および密度はLSCよりも低く、HVOとLSCの混合油はその間となる。



(a) 動粘度



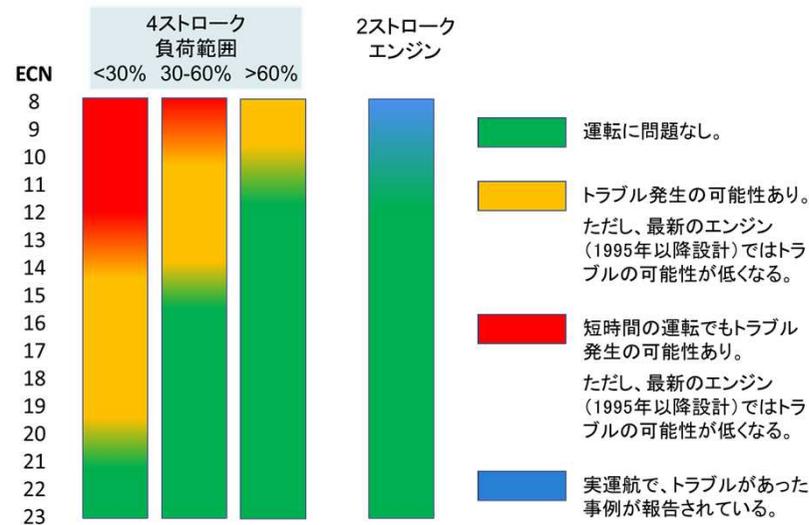
(b) 密度

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

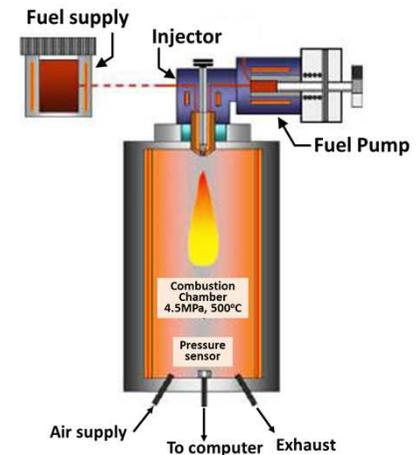
(1) 試験の概要

- バイオ燃料, LSC重油, A重油の燃焼性の相違を調べるため, 定容燃焼装置 (FCA) を用いた燃焼試験を行う。
- FCAでは, 圧力変化および圧力変化率の結果から着火遅れや燃焼時間, 着火性評価指標である推定セタン価ECNなどを求めることができる。

● 例えば, 推定セタン価ECNは, 燃料油の燃焼性 (自己着火のしやすさ, ノッキングのしにくさ) を表す指標である。一般に, ECNが高いほど自己着火しやすく, ノッキングが起こりにくい。



ECNによる燃料の着火性の評価例

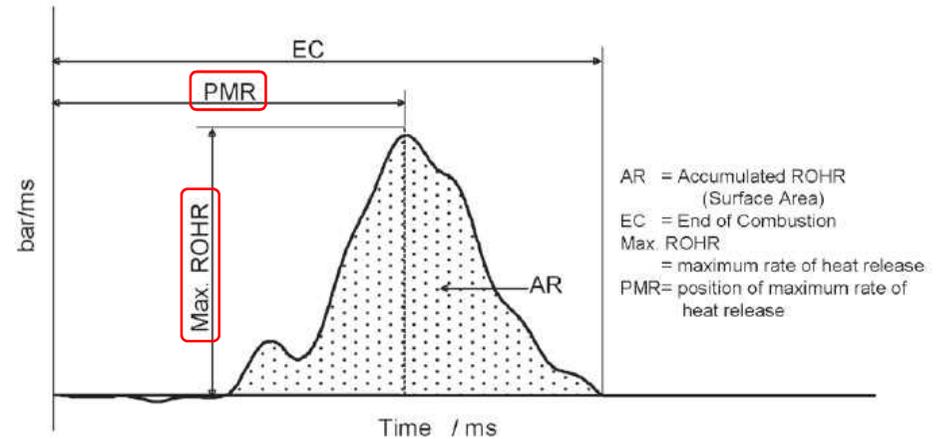
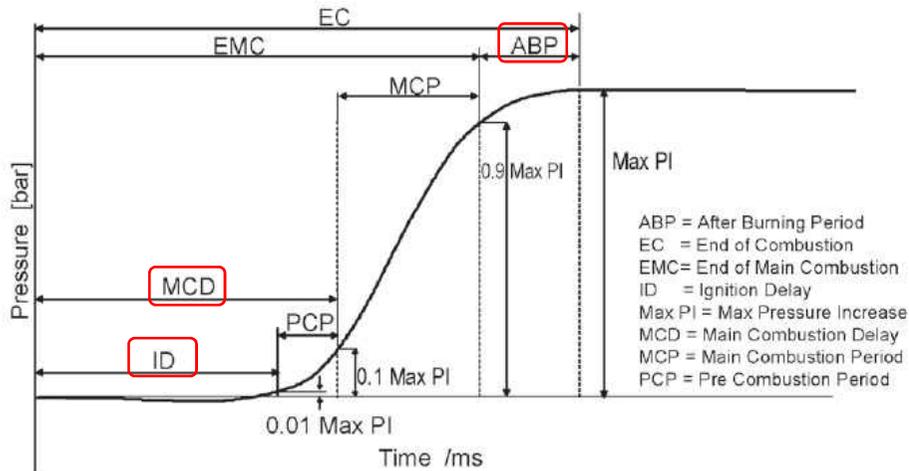


FIA-100 Fuel Combustion Analyzer (FCA)

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(2) 試験結果の評価方法

推定セタン化 $ECN = 153.15e^{-0.2861MCD}$



試験結果	結果の意味	想定されるトラブル
ID, PMRが遅く, Max ROHRの値が高い	<ul style="list-style-type: none"> 遅い着火と急激な燃焼 	エンジン, ピストンリング損傷の可能性
PMRが遅く, Max ROHRの値が低い	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間と膨張行程の温度低下による燃焼の遅れ 燃料油中の重質成分がシリンダ内で燃えるのに時間がかかる 	スートとPMの増加, 過給機トラブルのリスク上昇
ABPの著しい増加	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間 	スートおよびPMの増加, デポジットの発生, 排気管の詰まりなど

(1) CIMAC "Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion", 2011

(2) 竹田他, 定容燃焼試験法 (IP541) による船用残渣燃料油の分析結果, JIME学会誌44-4, 2009

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(3) FCA試験条件

(a) 燃料サンプル加熱条件

Sample viscosity mm ² /s@50°C	Fuel reservoir (°C)	Injection assembly (°C)	Fuel pump (°C)	Fuel grades ISO 8217:2010
<25	50	50	50	DM grade, RMA
25 - 800	125	125	125	RMB - RMK
800 -2000	145	145	145	

※ 以下のFCA試験において、すべてのサンプル油に対してDM grade, RMAの加熱条件としている。

(b) 装置設定条件

Process parameters	
Initial chamber temperature	500 °C
Initial chamber pressure	4.5 MPa
Injection pressure	35 MPa
Injected volume	Approx. 0.1 ml/injection
No. of injections per test	25

4. 定容燃焼装置（FCA）による試験

(4) 試験結果の一覧【継続中】

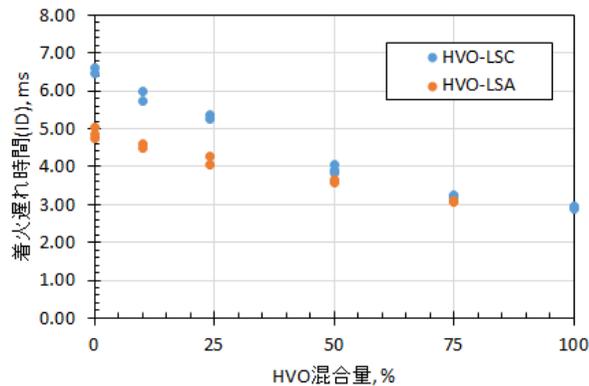
サンプル	BDF 割合	ID	MCD	EMC	EC	PCP	MCP	ABP	Max ROHR	PMR	AR	Max PI	ECN
	%	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	bar/ms	ms	bar	bar	
LSA	0	4.76	5.08	6.96	15.32	0.32	1.88	8.36	5.92	5.64	8.49	8.55	35.8
LSA-B10	10	4.59	4.89	6.96	16.48	0.30	2.07	9.52	5.82	5.54	8.52	8.68	37.9
LSA-B24	24	4.05	4.31	6.94	16.5	0.27	2.63	9.55	5.51	4.94	8.46	8.62	44.6
LSA-B50	50	3.65	3.87	7.70	18.03	0.23	3.83	10.33	6.19	4.27	8.35	8.50	50.6
LSA-B75	75	3.07	3.31	9.06	18.32	0.24	5.75	9.26	6.03	3.63	8.24	8.39	59.4
B100	100	2.94	3.16	9.16	18.35	0.22	6.00	9.19	6.35	3.41	8.24	8.38	62.0
LSC	0	6.46	7.32	14.68	23.52	0.85	7.36	8.84	1.77	8.43	7.74	7.89	18.9
LSC-B10	10	6.00	6.71	12.20	20.46	0.71	5.49	8.26	2.50	7.49	8.10	8.26	22.5
LSC-B24	24	5.37	5.85	9.60	18.95	0.49	3.75	9.35	3.52	6.54	8.27	8.43	28.7
LSC-B50	50	4.05	4.32	7.94	18.23	0.28	3.62	10.29	5.35	4.73	8.37	8.52	44.5
LSC-B75	75	3.21	3.44	8.79	18.36	0.23	5.35	9.58	5.67	3.74	8.12	8.27	57.2
B100	100	2.94	3.16	9.16	18.35	0.22	6.00	9.19	6.35	3.41	8.24	8.38	62.0

※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。

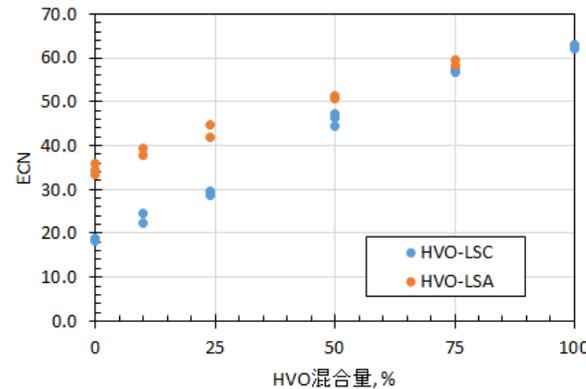
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(5) 試験結果の一例

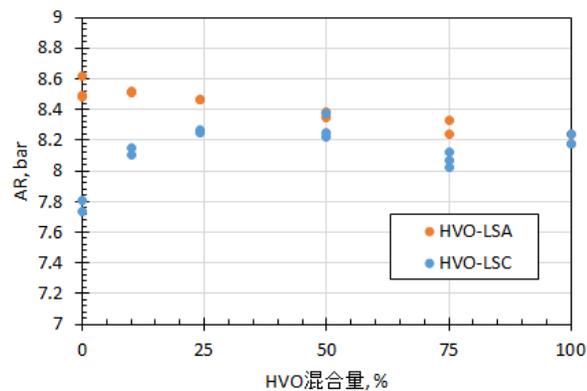
- バイオ燃料混合率に対する各FCA試験結果を整理する。



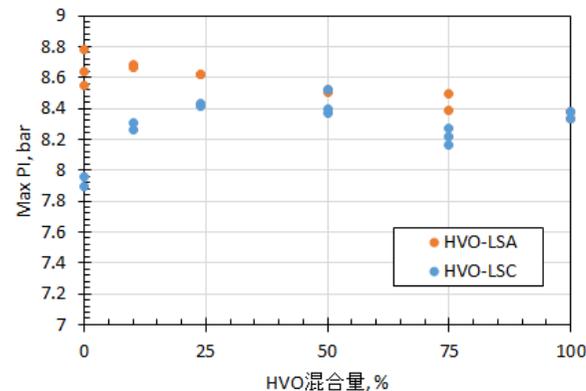
(a) 着火遅れ時間 ID



(b) 推定セタン価 ECN



(c) 熱発生量 AR



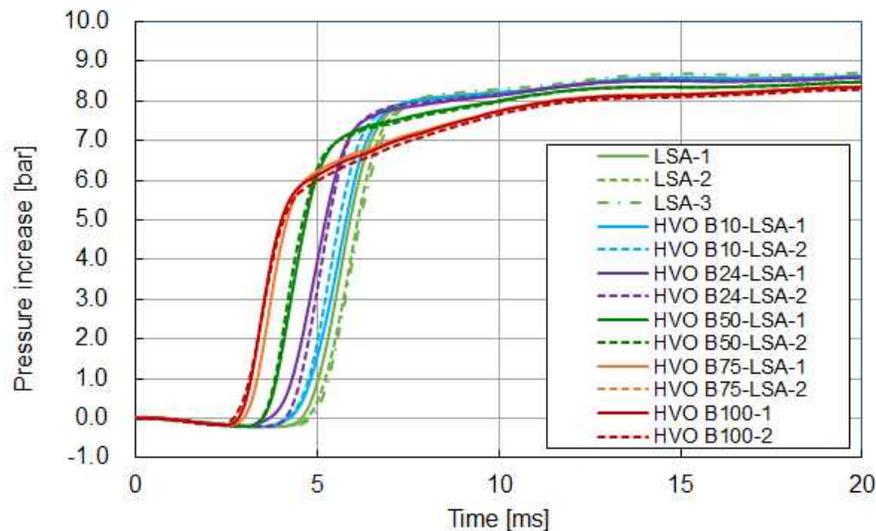
(d) 最大圧力増加 Max PI

- 着火遅れ時間IDは、HVO混合率の増加に伴って短くなる（燃焼性が高まる）。
- 推定セタン価ECNは、HVO混合率の増加に伴って高まる。
- 熱発生量ARや最大圧力増加Max PIは、HVO混合率が25%以上の範囲において、変化が小さい。
- エンジン運転に及ぼす影響は小さいと考えられる。

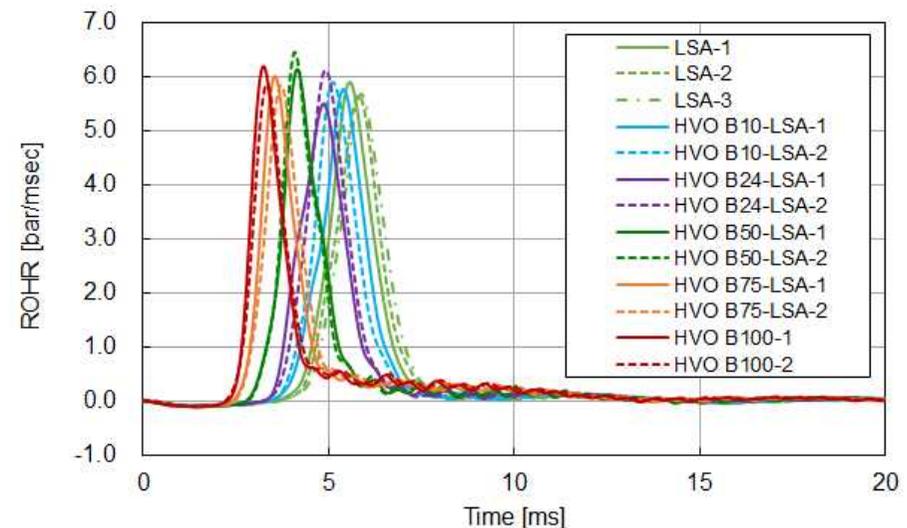
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(6) 燃焼波形の評価 (HVO-LSA混合油)

- 圧力変化および熱発生率の結果から着火遅れや燃焼時間を評価できる。
- B100は着火性がよく、燃焼時間が短いことがわかる。
- HVOとLSA重油の混合油の圧力波形はLSAよりも燃焼が早まる傾向を示す。
- HVOの混合比は、最高圧力上昇Max PIや最高圧力変化率Max ROHRに与える影響が小さいことがわかる。



(a) 圧力波形

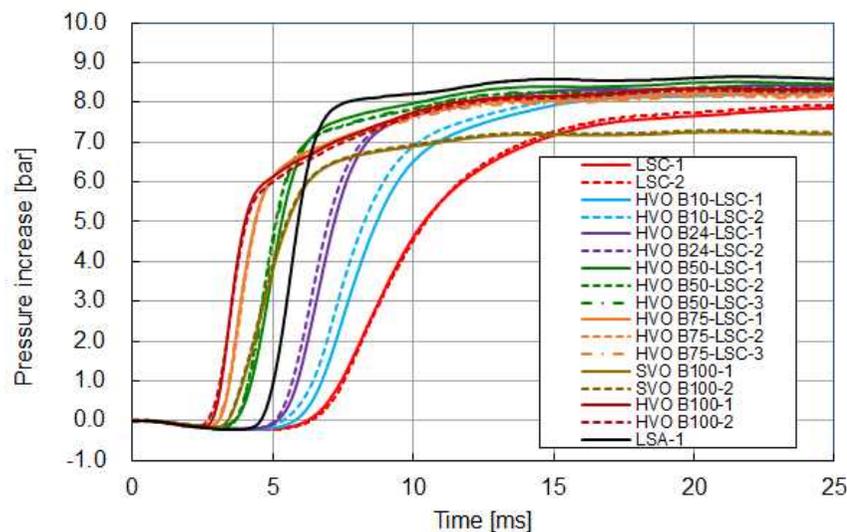


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

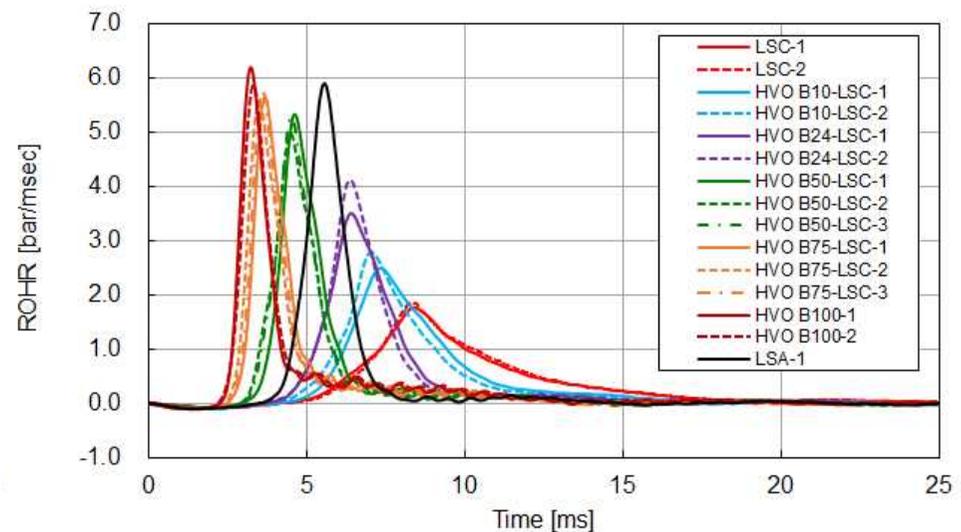
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(7) 燃焼波形の評価 (HVO-LSC混合油)

- HVOとLSCの混合油の圧力波形は, LSCよりも大幅に燃焼が早まる傾向にある。
- HVOの混合比によって, 最高圧力変化率Max ROHRに与える影響などが大きいことがわかる。
- HVOとLSCの混合油B10およびB24の圧力波形と熱発生率は, 概ねLSCとA重油の間にある。



(a) 圧力波形

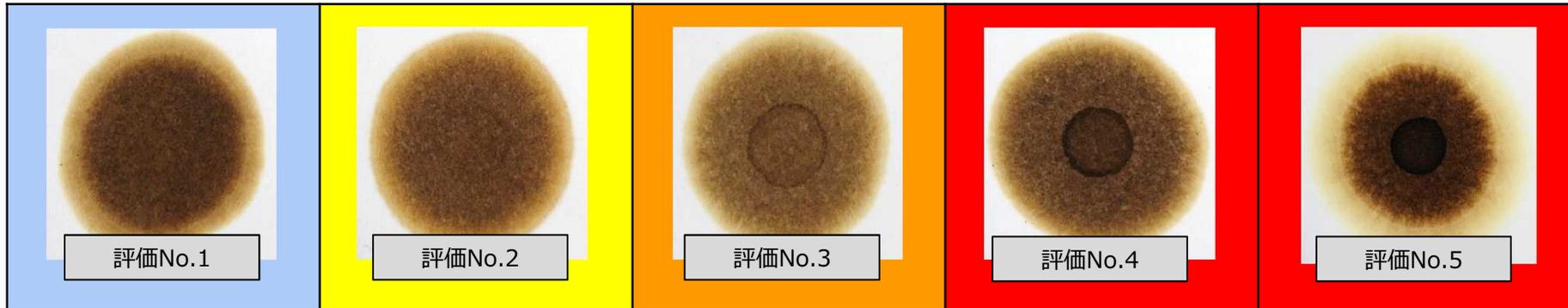


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

5. 混合安定性試験

(1) スポットテストの概要

燃料油のスポットテスト評価 ASTM D4740



試料油を滴下したところにリングがまったく認められない。



安定性に問題ない。

周囲に不完全な内円がわずかに認められる。



安定性に問題ない。

周囲が完全な線上の内円が認められ、内円と外円の色が同じ。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円の縁が黒色になり、内円内部の色が外円より濃い。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円内部はさらに濃くなり、中心付近以外はほぼ黒くなる。



安定性が悪く、スラッジトラブルが発生する可能性が高い。

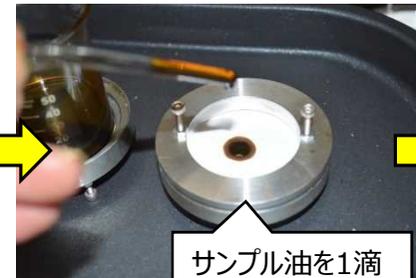
【参考】試験方法



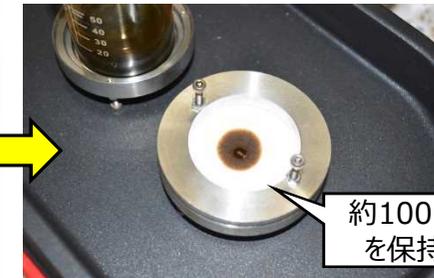
決められたろ紙 (5B) を準備する。



サンプル油とろ紙を約100℃に加熱する。



サンプル油を1滴だけ落とす。



約100℃を保持

5. 混合安定性試験

(2) 試験方法

- スポットテストにより，バイオ燃料と重油（LSC，LSA）の混合比を変えたときの混合安定性を確認する。
- 船内での長時間の貯蔵を想定して，異なる温度条件において，混合後の長期変化を調べる。

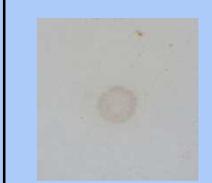
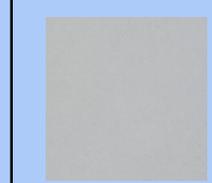
試験方法の概要

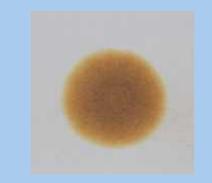
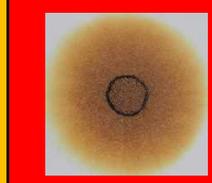
No.	試験 (温度条件)	概要	備考
(1)	常温	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。1回スポットテスト毎に，1時間程度，約100℃までの加熱を繰り返して行う（常時，常温に保管したサンプル油ではない）。	
(2)	80℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。スポットテスト毎に約100℃まで加熱し，試験終了後は80℃に加熱した恒温槽内で保管する。	
参考	55℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，常温状態において約20日間保管したサンプル油であり，参考データとする。	後述のゴム材料浸漬試験と同じ時期に実施する。

5. 混合安定性試験

(3) 試験結果の概要

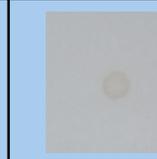
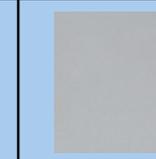
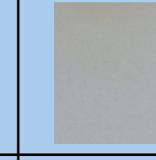
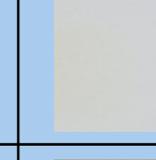
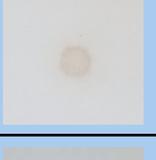
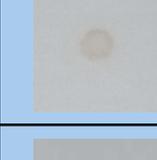
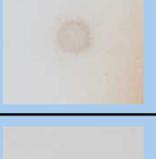
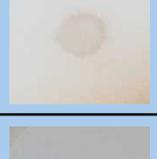
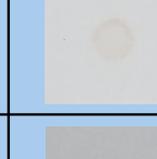
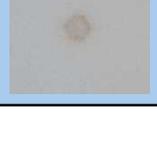
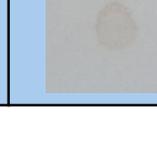
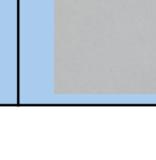
- HVOとA重油の混合油の混合安定性は、本試験範囲内においてすべて問題ないと判断される。
- HVOとLSCの混合油の混合安定性は、時間経過や保管状態によって悪化する。ただし、LSC単体の安定性も悪化するため、HVOとの混合が主原因であるかは判断が難しい。

混合率	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	
A重油 常温・500h							長期に保管した場合であっても、安定性に問題ないと判断される。

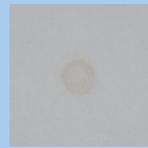
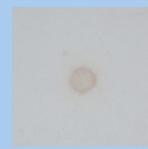
時間	100h	200h	300h	400h	500h	
HVO-LSC B50 80℃						時間経過とともに、安定性が悪化している。悪化の進行は周囲状況によって異なると考えられる。

※ スポットテストの終盤、HVOとLSCの混合油B24およびB50において、目視によりスラッジと思われる物質の生成が確認された。

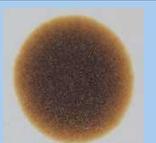
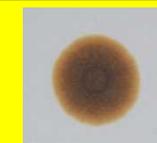
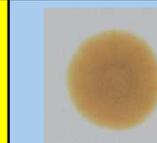
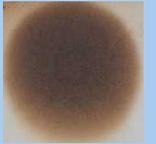
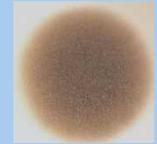
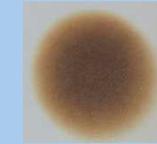
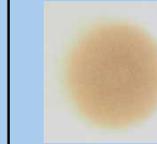
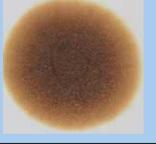
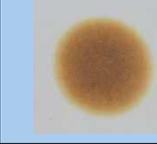
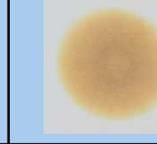
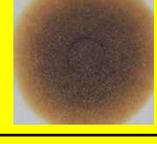
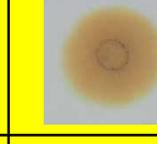
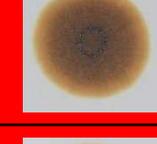
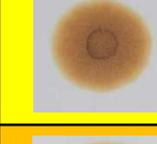
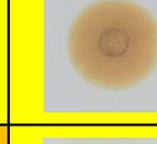
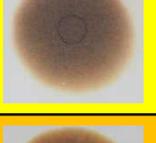
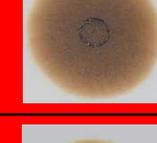
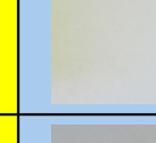
(a) LSA-HVO, 常温貯蔵 (テスト時加熱)

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
200h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
300h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
500h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

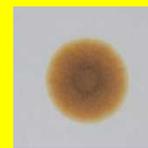
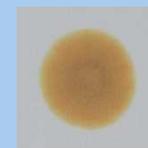
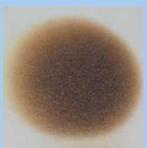
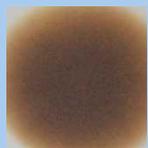
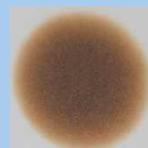
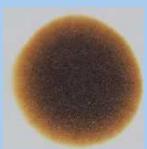
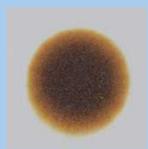
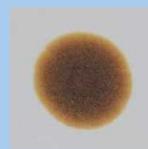
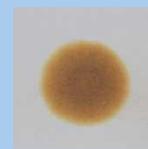
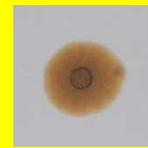
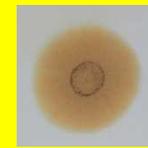
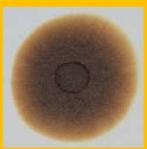
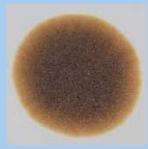
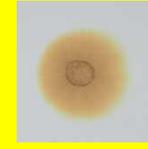
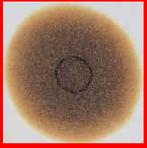
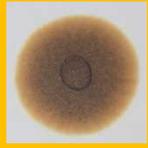
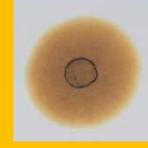
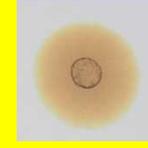
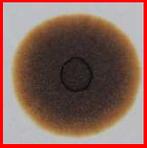
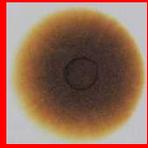
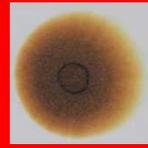
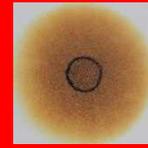
(b) LSA-HVO, 80°C恒温槽

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
200h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
300h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
500h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

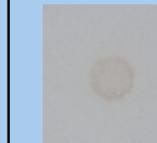
(c) LSC-HVO, 常温貯蔵 (テスト時加熱)

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B24とB50において、内円がわずかに認められる。
50h							安定性の悪化は確認できない。 (試験時の攪拌が不足していた可能性がある。)
100h							安定性の悪化は確認できない。 (試験時の攪拌が不足していた可能性がある。)
200h							B10～B75において、内円が認められる。
300h							安定性が徐々に悪化している。
400h							B0～B75において、安定性の悪化が確認される。
500h							安定性の悪化が確認される。

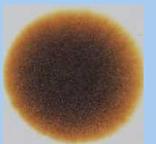
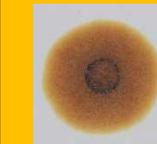
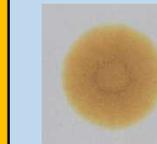
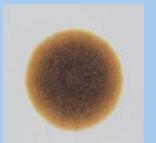
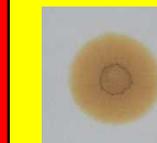
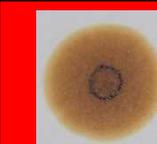
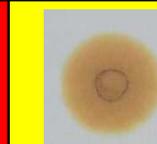
(d) LSC-HVO, 80°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B50とB75において、内円がわずかに認められる。
50h							安定性の悪化は確認できない。 (試験時の攪拌が不足していた可能性がある。)
100h							安定性の悪化は確認できない。 (試験時の攪拌が不足していた可能性がある。)
200h							B0～B75において、内円が認められる。
300h							B24がかなり悪化している。
400h							B0～B75において、安定性の悪化が確認される。
500h							安定性の悪化が確認される。

【参考】LSA-HVO, 55°C恒温槽

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

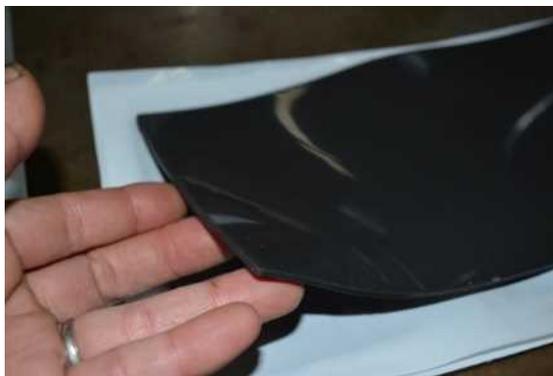
【参考】LSC-HVO, 55°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							混合後, 長期に常温保管していたサンプル油であり, 既にB24, B50の安定性が悪化している。
50h							B24~B75の安定性悪化が進行している。
100h							LC (B0) ~B75の安定性悪化がやや進行している。

6. ゴム材料の浸漬試験

(1) ゴム材料の試験片

- 3種類のゴム材料（厚さ約2mm）を準備した（下表参照）。
- 以下の浸漬試験においては、JIS K 6258を参考として、厚さの寸法変化を計測した。



準備したゴムシート



切り出したゴム試験片

浸漬試験に用いたゴム試験片

整理記号	A	B	D
種類	中高ニトリルゴム (中高NBR)	高ニトリルゴム (高NBR)	フッ素ゴム (FKM)
アクリロニトリル 含有量	31~35%*	36~42%*	---
備考	一般的なニトリルゴム	一部の燃料移送ポンプに 使用されている材料	耐熱性、耐油性が高い 材料

※ 資料 (<https://www.packing.co.jp/GOMU/GOMU1/nbr.htm>) の参考値であり、ゴム試験片の計測値ではない。

6. ゴム材料の浸漬試験

(2) 試験方法

(a) 試験環境

- 恒温槽を温度55℃に設定し、浸漬試験を行った結果を整理する。



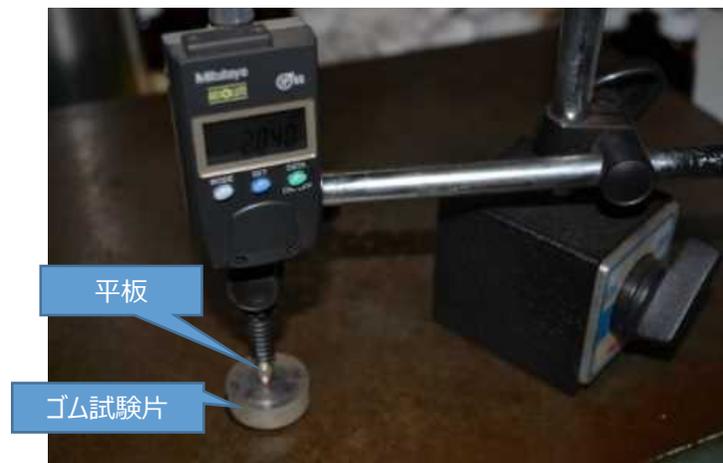
恒温槽



恒温槽内の試験片

(b) 寸法計測

- 定盤の上にゴム試験片を置き、アルミニウム合金製平板による一定加圧条件の下、デジタルマイクロゲージ（分解能1/1000mm）で寸法（厚さ）を計測する。
- ゴム試験片上の4点の寸法を計測をして平均値を求め、あらかじめ浸漬試験の前に個々の試験片において計測していた基準長さに対する寸法変化率を算出する。

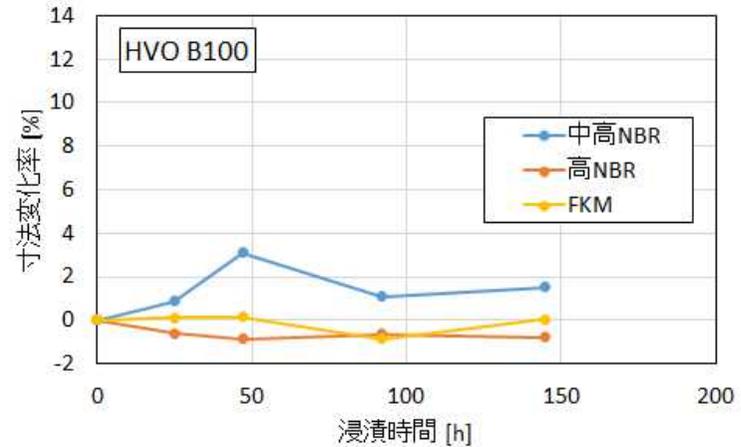


ゴム試験片の寸法計測

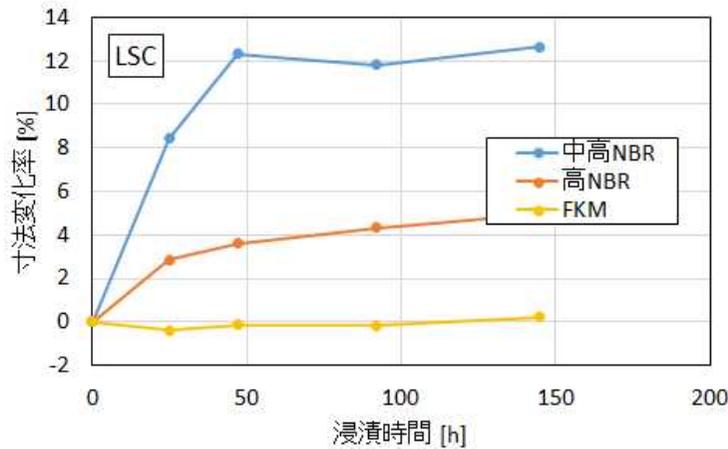
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 時系列変化

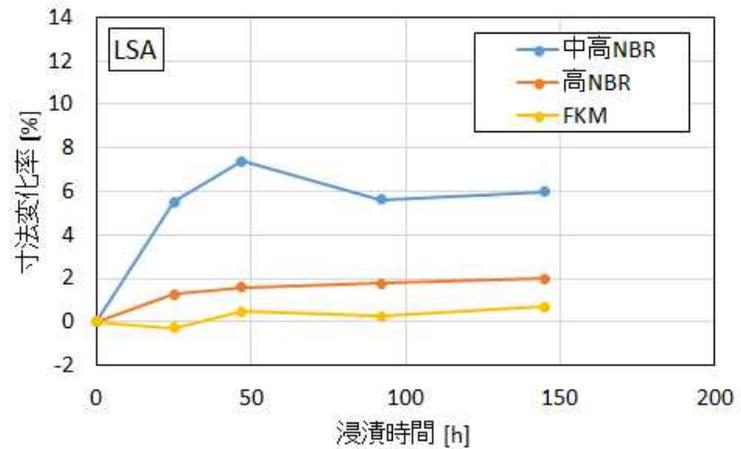
- 各燃料油における浸漬試験の寸法変化は、浸漬時間100～150時間程度で概ね安定する。
- 中高ニトリルの寸法変化は大きく、高ニトリルおよびフッ素ゴムの寸法変化は小さい。



(a) HVO (B100) の時系列変化



(b) LSCの時系列変化

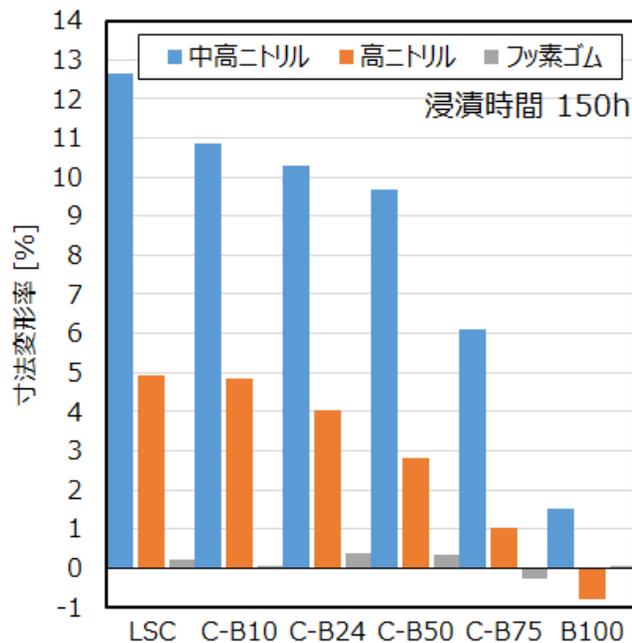


(c) LSAの時系列変化

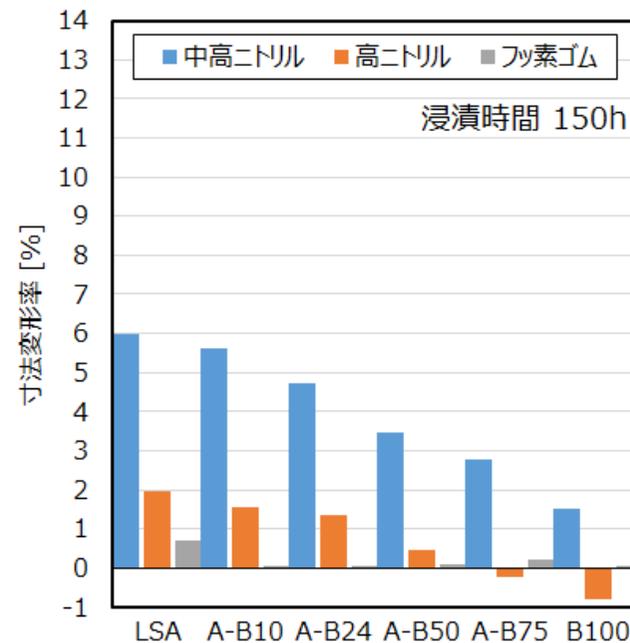
6. ゴム材料の浸漬試験

(4) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるHVO (B100) の寸法変化率はLSC, LSAと比べて小さい。また、混合油の寸法変化率は概ねその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるHVO (B100) の寸法変化はほとんど確認できない。



(a) LSCとHVOの混合油



(b) LSAとHVOの混合油

7. 陸上エンジン試験

(1) 実験用ディーゼルエンジン

- 下表No.1のエンジンを使用し、燃焼圧力波形や各部温度などの燃焼状況、排ガス成分を計測する。
- HVOによる陸上エンジン試験は、今後の船舶利用を踏まえて、HVOとA重油の混合油を使用する。
- 通常のA重油を使用した際のデータを計測し、バイオ燃料使用時と比較する。

No.	1	2
タイプ	4サイクル中速エンジン（海技研）	
定格出力／回転数 シリンダ数	750 kW / 1000 rpm 6気筒	257 kW / 420 rpm 3気筒
外観		
特徴	中速エンジンの中で、機関回転数が高く、ボア径が小さい。機関回転数が速いため、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、機関回転数が遅い。そのため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンと比べて燃料性状の変化に鈍感である。

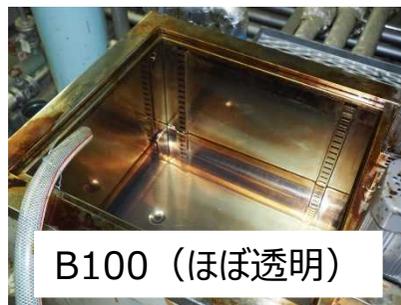
7. 陸上エンジン試験

(2) 試験の概要

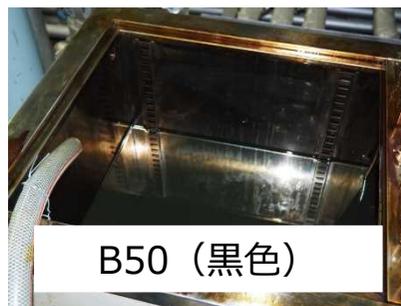
- 混合率は、別途実施したFAME実船試験に合わせてB10とB24とする。さらにB50とB100の短時間運転を実施する。
- エンジンを船用負荷特性で運転し、負荷率25, 50, 75, 100%としたときの定常データを計測する。さらに、船用負荷特性16%（設備上の最小負荷）およびアイドリング時のデータを計測する。



HVO



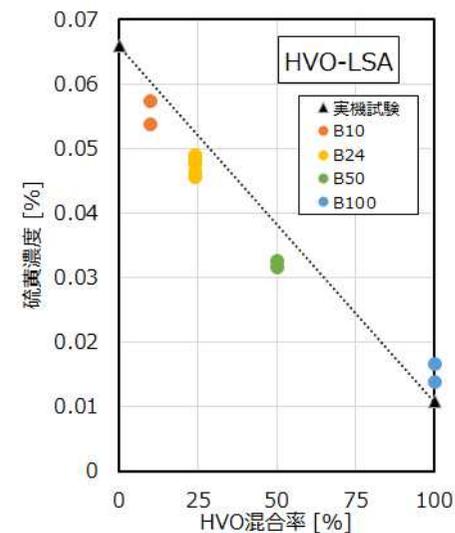
B100 (ほぼ透明)



B50 (黒色)



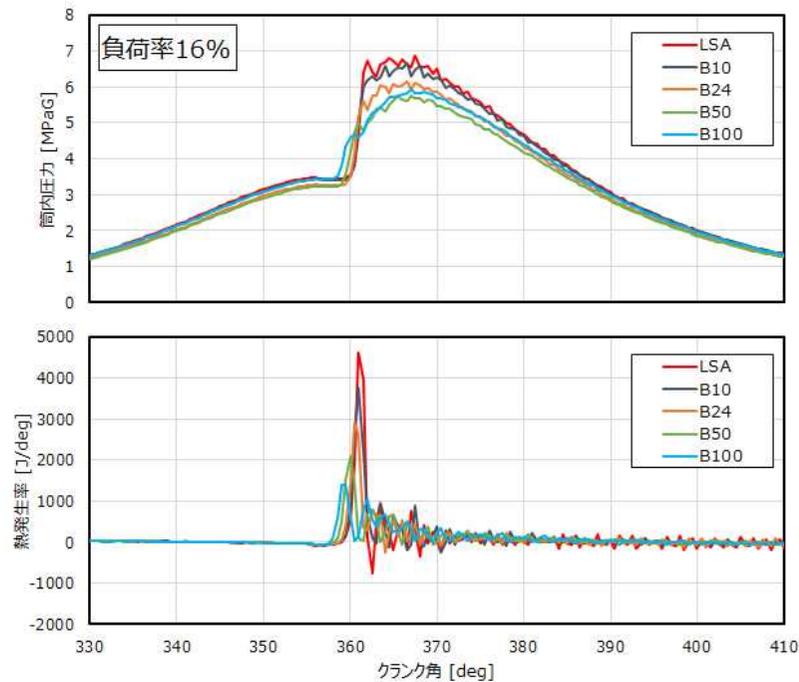
- 燃料の切り替え状況は、燃料中の硫黄濃度で確認している。



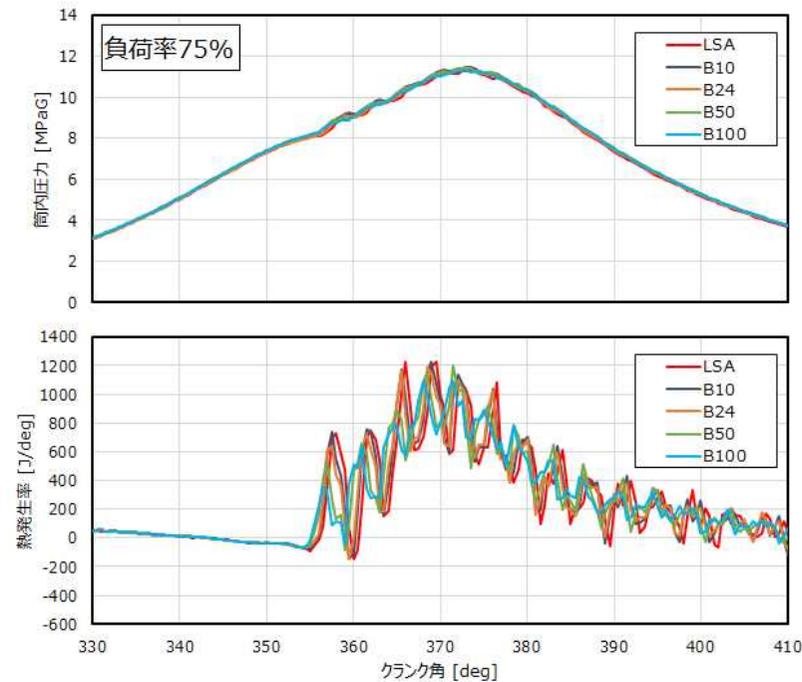
7. 陸上エンジン試験

(3) 筒内圧力波形（抜粋・まとめ）

- 圧力波形や熱発生率は，低負荷域（負荷率25%以下）と高負荷域（負荷率50%以上）で状況が異なる。
- 低負荷域においてHVOを使用したとき，A重油と比べて，燃焼は早く始まるものの，圧力の上昇は緩やかである。高負荷域においてHVOを使用したとき，圧力波形や熱発生率はA重油とほとんど変わらない。



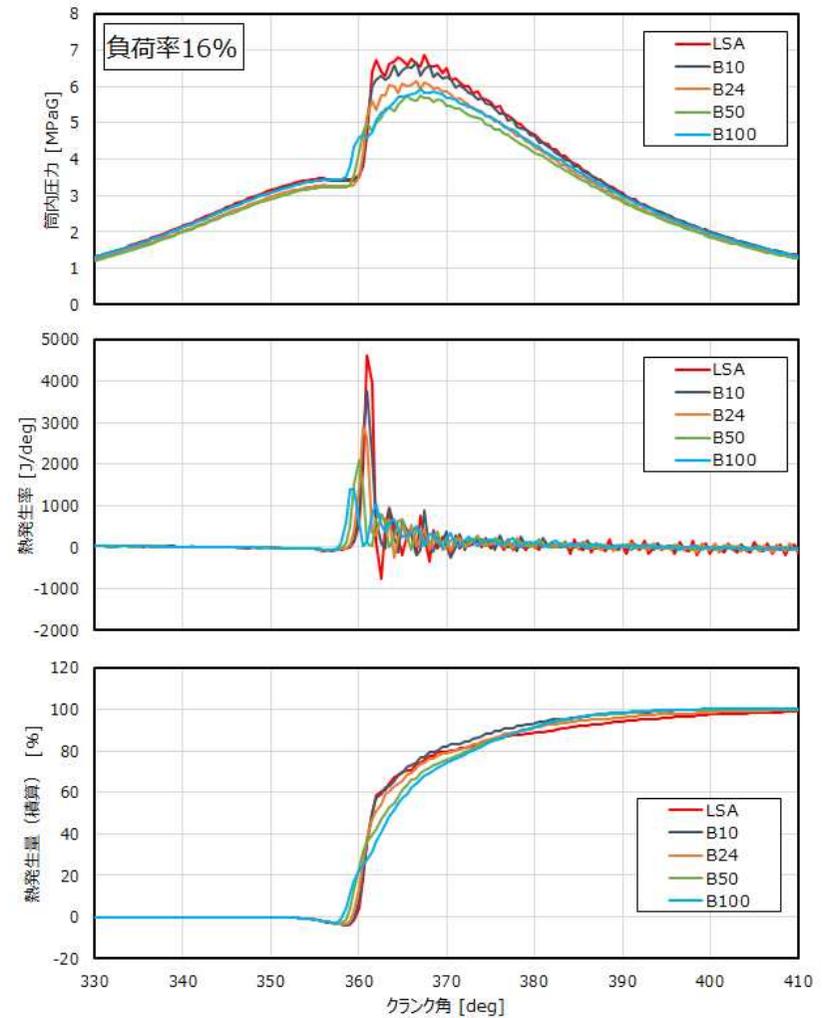
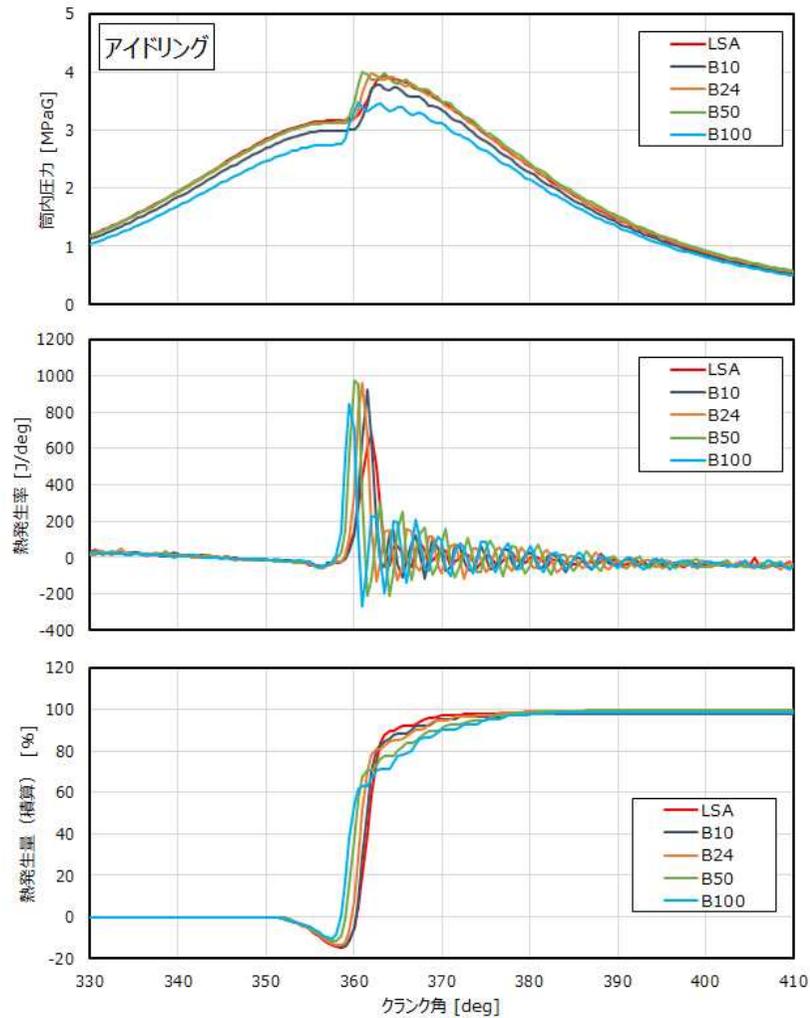
(a) 低負荷域の計測例（負荷率16%）



(b) 高負荷域の計測例（負荷率75%）

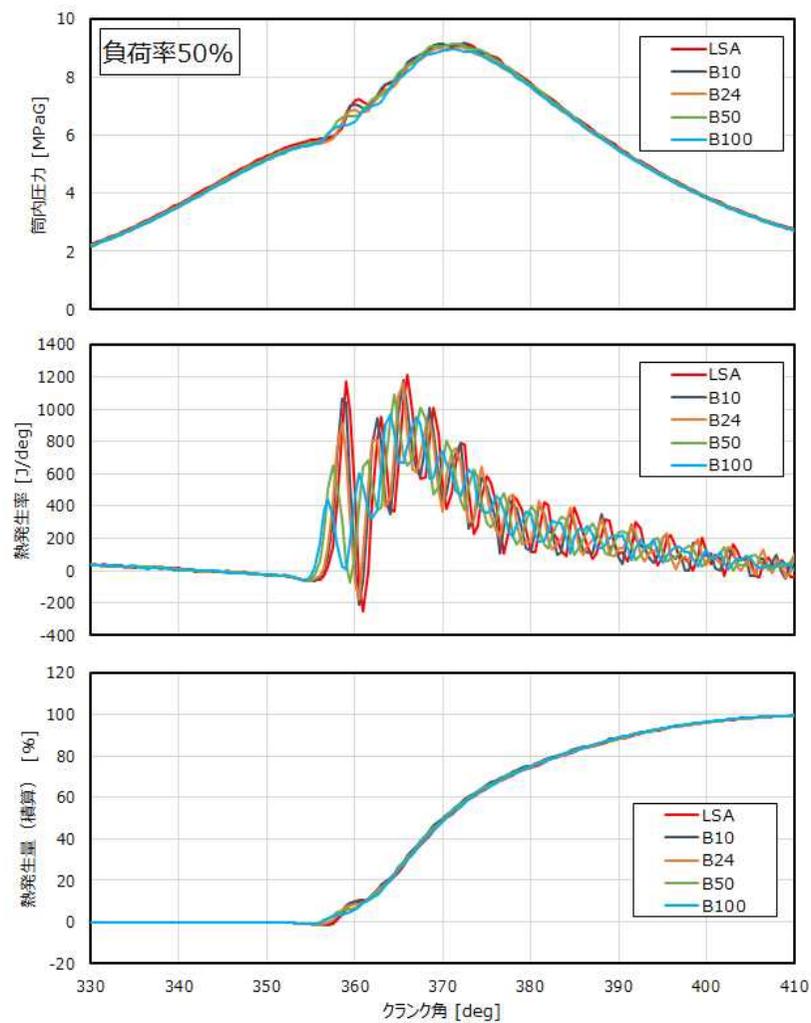
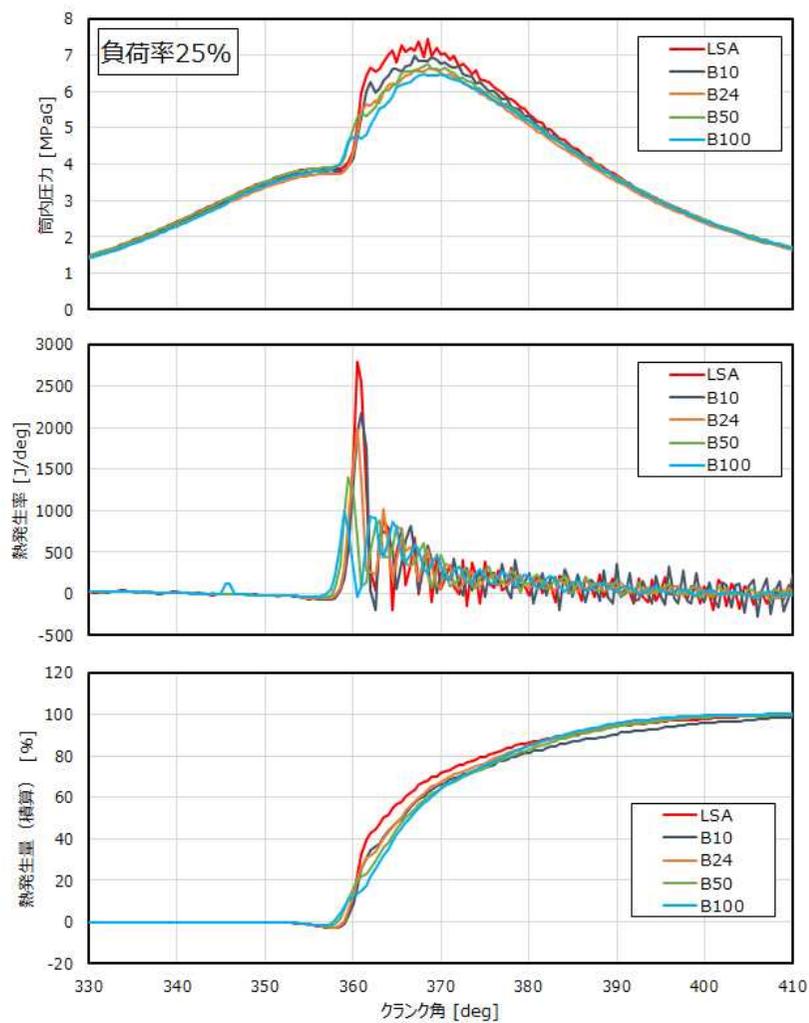
7. 陸上エンジン試験

【参考】筒内圧力波形



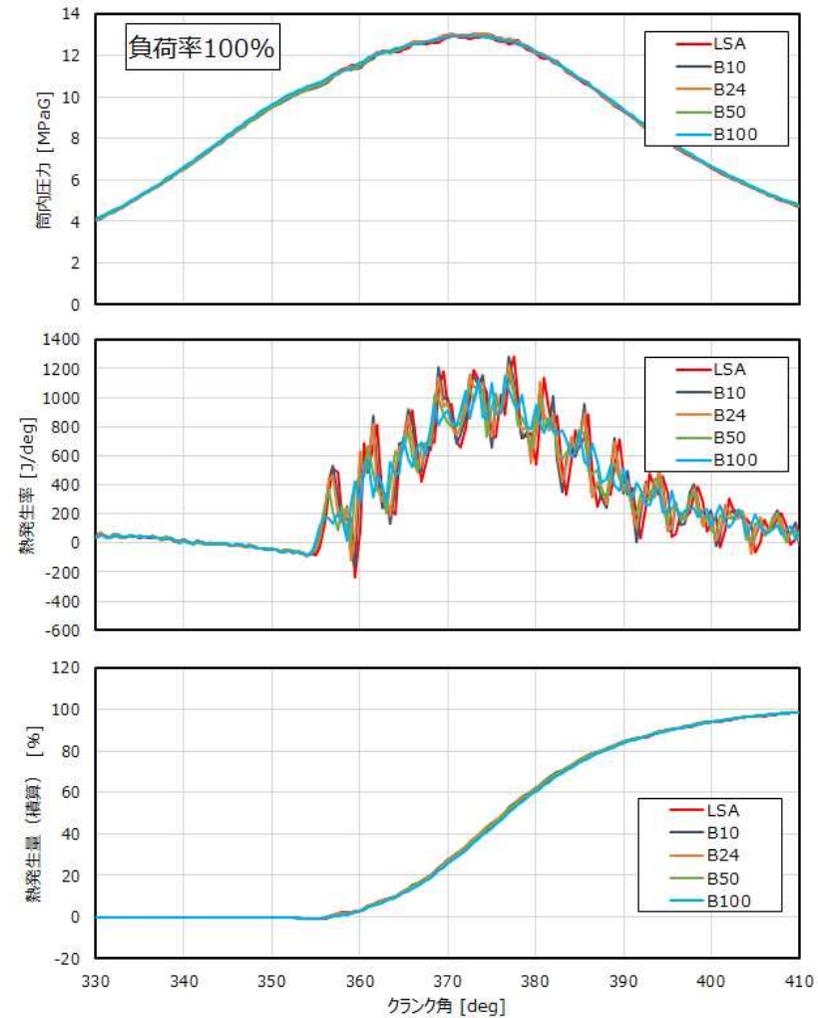
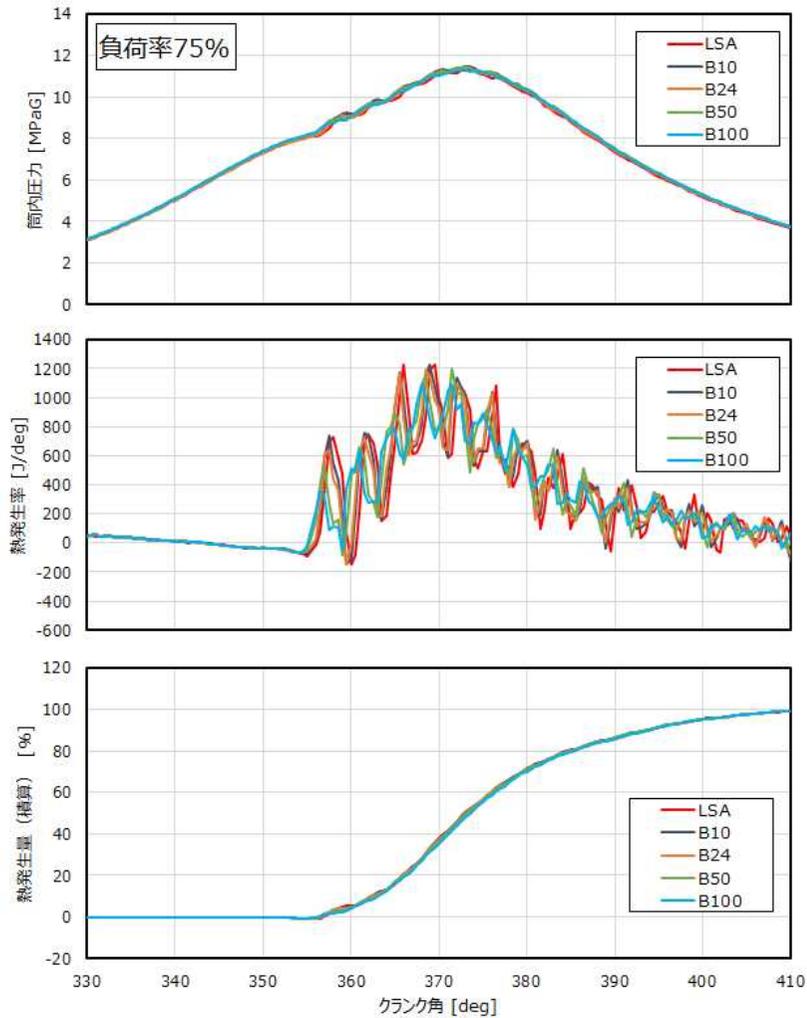
7. 陸上エンジン試験

【参考】筒内圧力波形



7. 陸上エンジン試験

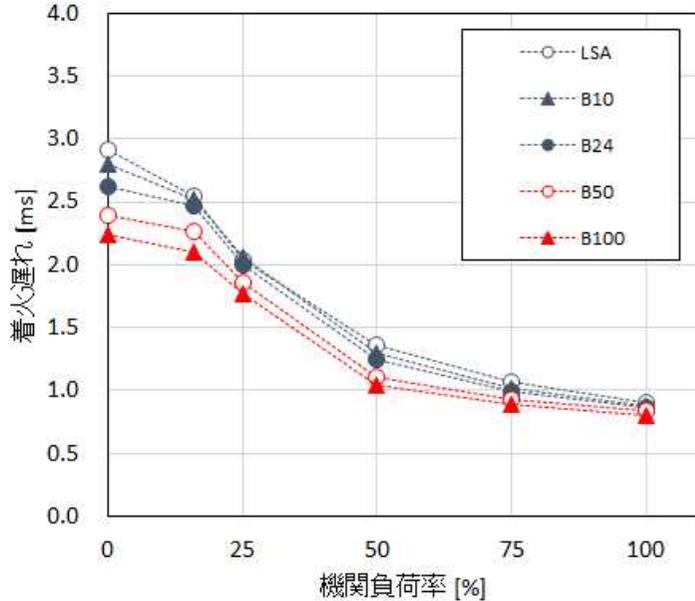
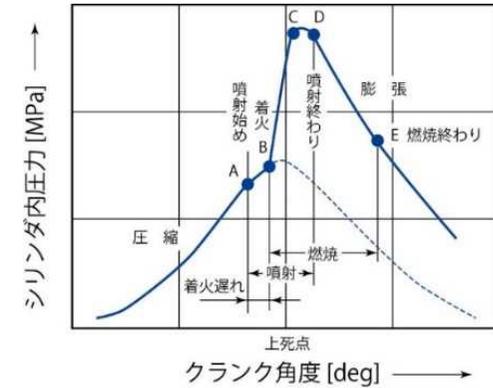
【参考】筒内圧力波形



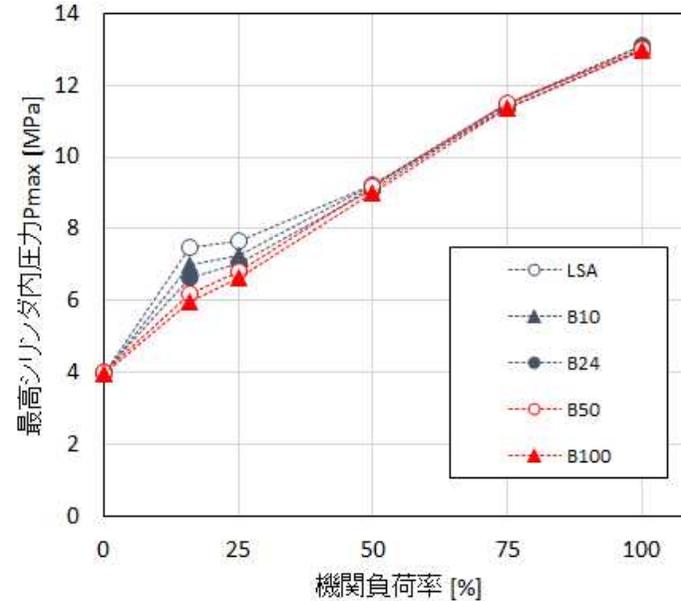
7. 陸上エンジン試験

(4) 着火遅れ・最高筒内圧力

- 着火遅れ（燃料噴射から着火開始までの時間）は、HVOの混合率が高まるほど短くなる。
- HVOおよびA重油使用時の最高筒内圧力 P_{max} は、負荷率50%以上の範囲において、ほとんど変わらない。
- 負荷率16~25%の範囲において、 P_{max} はHVOの混合率が高くなるに従って低下する。



(a) 着火遅れ

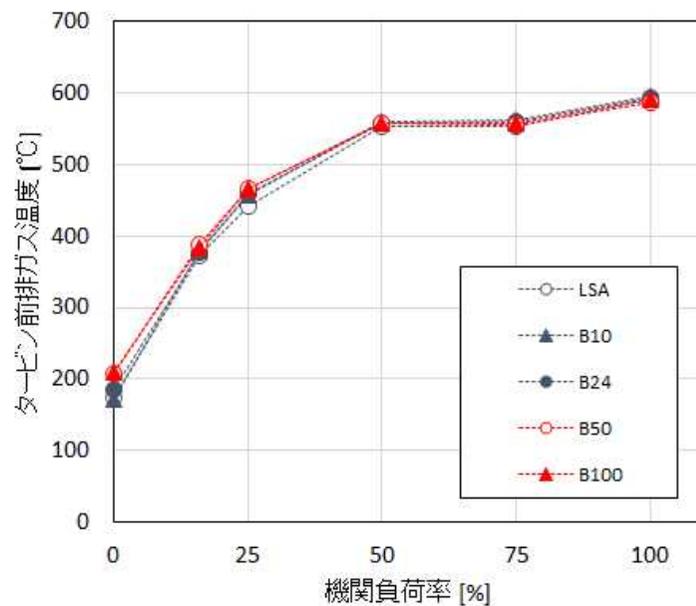


(b) 最高筒内圧力 P_{max}

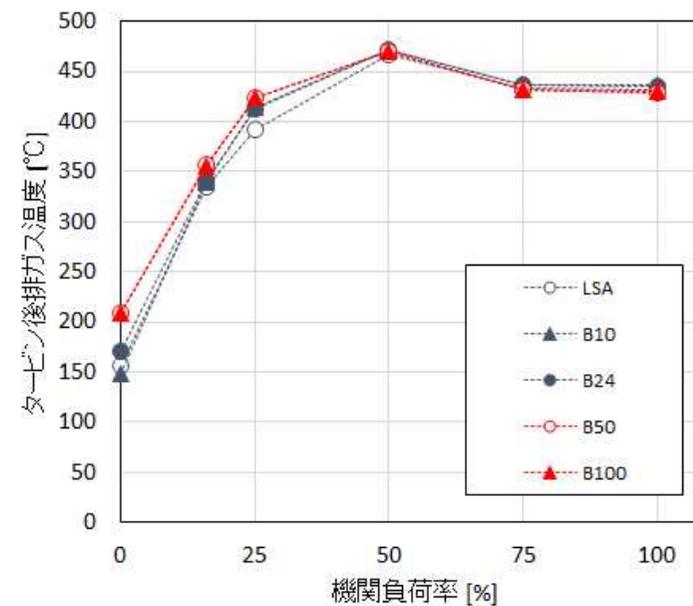
7. 陸上エンジン試験

(5) 排ガス温度

- HVOを使用した際の排ガス温度は、低負荷運転時、A重油と比べてわずかに高まる傾向がある。
- 負荷率50%以上の範囲においてはほとんど変わらない。



(a) 過給機前排ガス温度

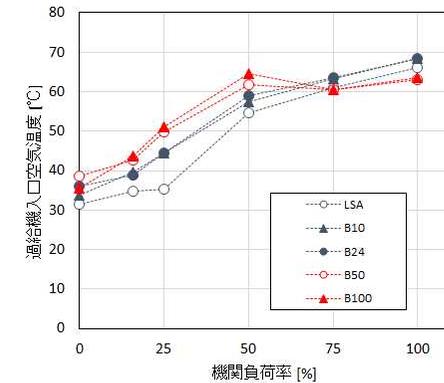


(b) 過給機後排ガス温度

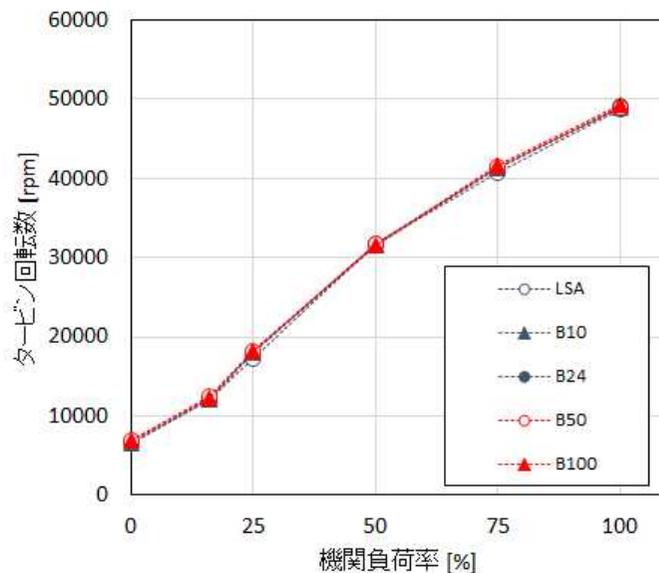
7. 陸上エンジン試験

(6) 過給機回転数・給気圧力

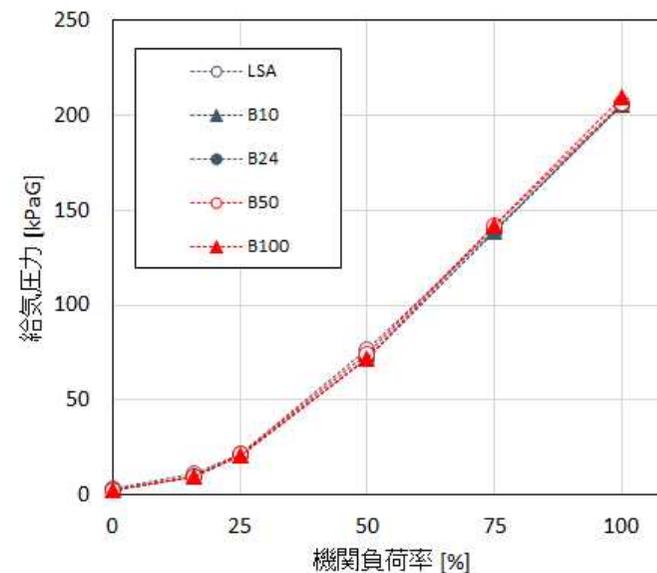
- HVOおよびA重油使用時の過給機回転数および給気圧力は、すべての試験範囲において、ほとんど変わらない。
- バイオ燃料を使用した際の排ガス温度は、低負荷運転時、わずかに高まる傾向がある。負荷率50%以上の範囲においてはほとんど変わらない。



【参考】過給機入口空気温度



(a) 過給機回転数

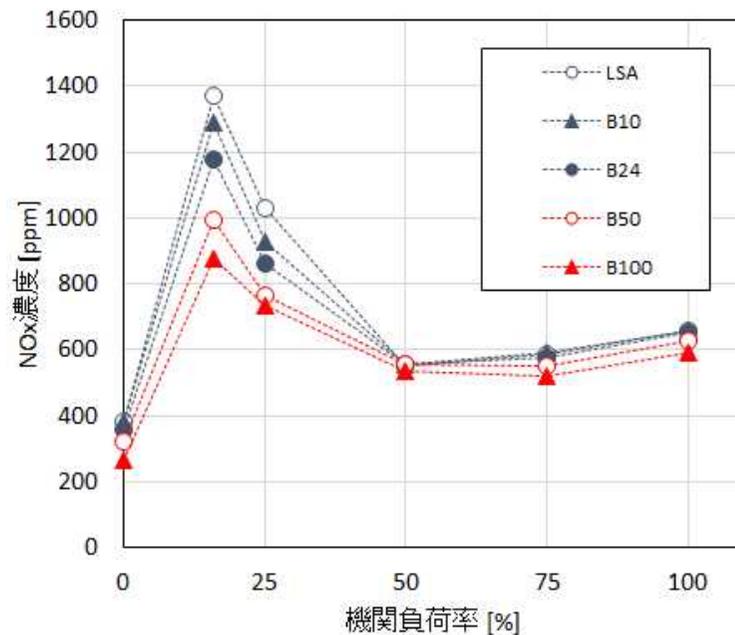


(b) 給気圧力

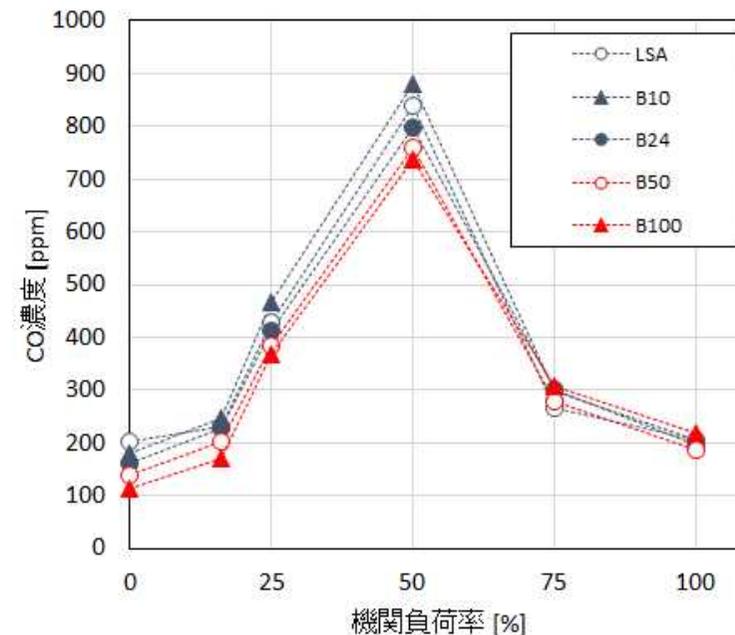
7. 陸上エンジン試験

(7) 排ガス性状

- HVOを使用した際のNOx濃度は、低負荷域（負荷率16～25%）において、A重油と比べて低下する。
- HVOを使用した際のCO濃度は、負荷率50%以下において、低下する傾向がある。



(a) NOx濃度

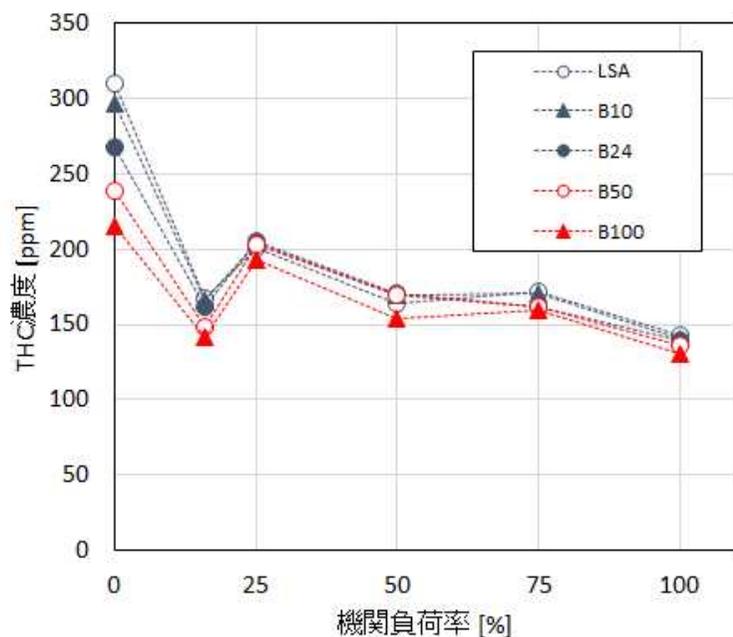


(b) CO濃度

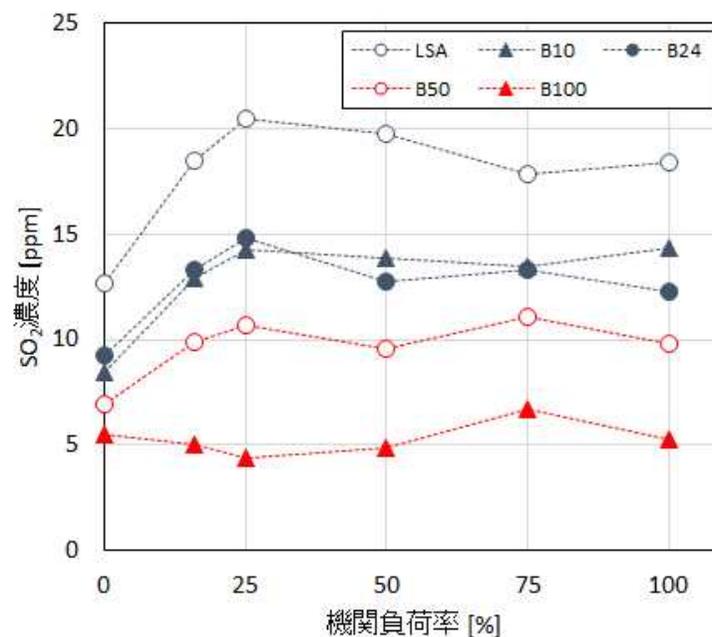
7. 陸上エンジン試験

(7) 排ガス性状

- HVOを使用した際のTHC濃度は、A重油と比べてわずかに低下する傾向がある。
- HVOを使用した際のSO₂濃度は、燃料油中の硫黄濃度の影響を受けて、低下している。



(c) THC濃度

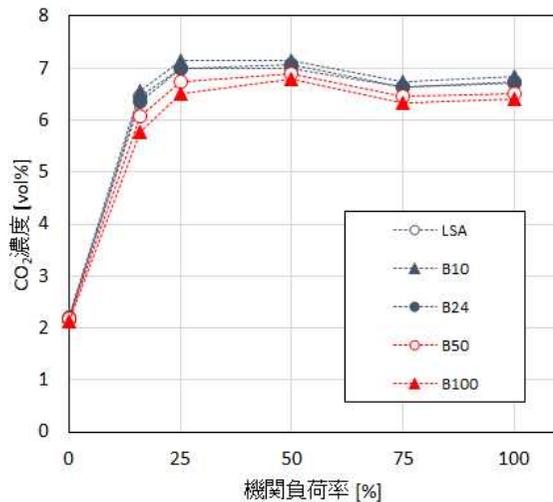


(d) SO₂濃度

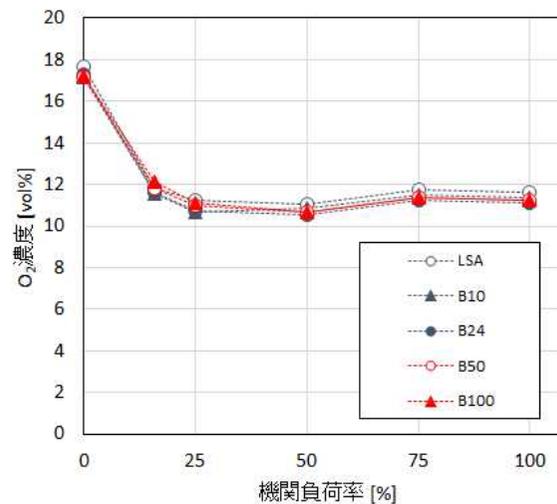
7. 陸上エンジン試験

(7) 排ガス性状

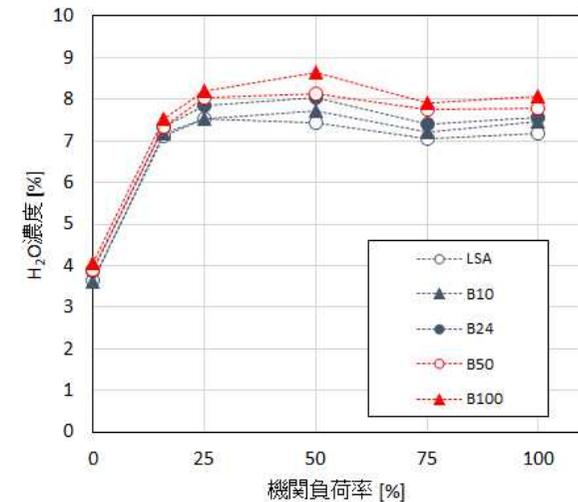
- HVOを使用した際のCO₂濃度は、A重油と比べてわずかに低下する傾向がある。
- HVOを使用した際のO₂濃度は、A重油と比べてほとんど変わらない。
- HVOを使用した際のH₂O濃度は、A重油と比べてわずかに増加する傾向がある。



(e) CO₂濃度



(f) O₂濃度

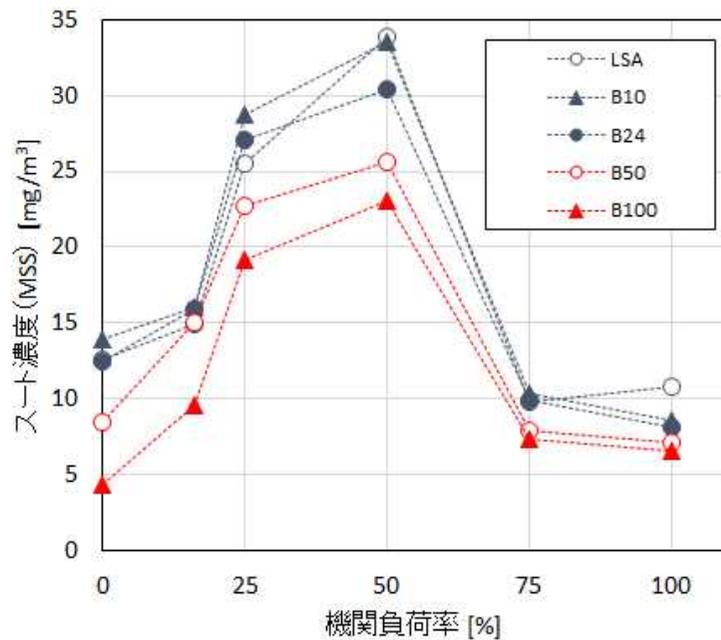


(g) H₂O濃度

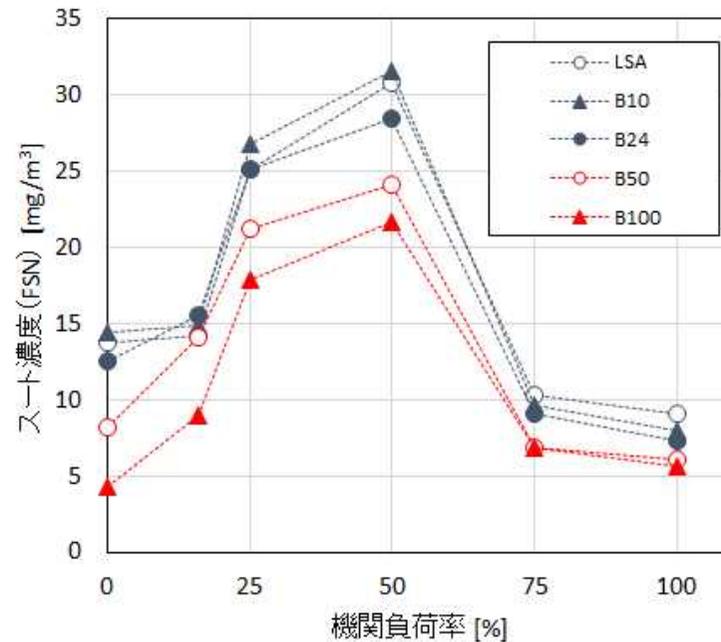
7. 陸上エンジン試験

(7) 排ガス性状

- 2種類のスート濃度計測器を用いて計測した（MSS：Micro Soot Sensor, FSN：Filter Smoke Number）。
- HVOを使用した際のスート濃度は、A重油と比べて低下する傾向がある。



(h) スート濃度



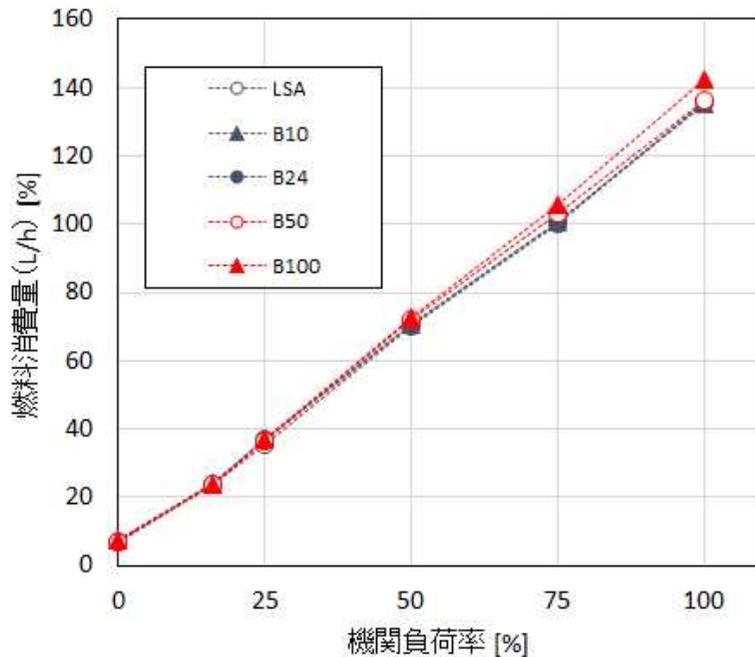
(i) スート濃度

7. 陸上エンジン試験

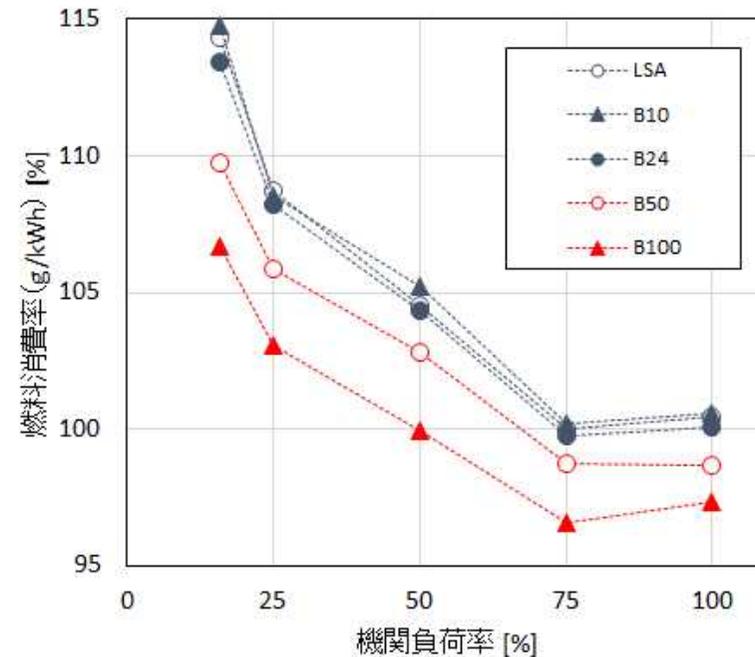
(8) 燃料消費量【参考】

- HVO使用時の燃料消費量 (L/h) の計測値は, A重油と比べてわずかに多い。
- 燃料密度を考慮したHVO使用時の燃料消費率 (g/kWhに相当) は, A重油と比べて低くなる傾向がある。ただし, 熱量補正はしていない。

※ A重油使用時の負荷率75%の計測値を基準としている。



(a) 燃料消費量 (容積)



(b) 燃料消費率 (熱量補正なし)

7. 陸上エンジン試験

(9) 陸上試験時のスラッジ発生状況など

- 一連の陸上エンジン試験において、スラッジ発生等の不具合は確認されなかった。
- 試験前後に一次フィルタを点検し、陸上エンジン試験後にもスラッジの蓄積・フィルタの詰まりは確認されなかった。
- その他、運転中のトラブルは確認されなかった。



バイオ燃料試験前（清掃済み）



陸上エンジン試験後の点検

8. まとめ

(1) 動粘度および密度

- 上記で使用したバイオ燃料HVOおよび混合油の動粘度は、A重油とほぼ同程度であり、温度-動粘度チャートにおいて直線で表される。
- HVOの密度はA重油よりも低く、HVOとA重油の混合油はその間となる。

※ HVOは従来のA重油と同様に取り扱うことができると考えられる。

(2) 定容燃焼装置（FCA）による試験

- HVOは着火性がよく燃焼時間が短いこと、HVOとA重油の混合油の圧力波形はA重油よりも燃焼が早まる傾向にあることなどを確認した。
- HVOとLSCの混合油の圧力波形は、LSCよりも大幅に燃焼が早まる傾向にある。また、HVOの混合比によって、最高圧力変化率Max ROHRなどに与える影響などが大きいことを確認した。

※ 本試験に使用したHVOは燃焼性が高い。A重油と混合した場合など、燃焼性が高まることによるエンジン運転への影響は不明であり、注意が必要である。

8. まとめ

(3) 混合安定性

- 陸上で実施したスポットテストより、HVOとA重油の混合油の混合安定性は、本試験範囲内においてすべて問題ないと判断された。また、HVOとA重油の混合油を用いた陸上エンジン試験においても、スラッジ発生などの不具合は確認されなかった。
- HVOとLSCの混合油の混合安定性は、時間経過や保管状態によって悪化する。LSC単体の安定性も悪化するため、HVOとの混合が原因であるかは判断できないものの、LSCを使用するエンジンにおいては、スラッジが発生する可能性が高く、十分な注意が必要である。

※ LSCとHVOが混合された状態になり得る配管などでは、スラッジの発生に注意が必要である。

※ バイオ燃料等の軽質燃料は配管の洗浄効果があると思われる。運用時にはフィルタの状況等を確認することが重要である。

(4) ゴム材料の浸漬試験

- 中高ニトリルにおけるHVO（B100）の寸法変化率はLSC、LSAと比べて小さい。また、混合油の寸法変化率は概ねその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるHVO（B100）の寸法変化はほとんど確認できない。

8. まとめ

(5) 陸上エンジン試験

- HVOとA重油の混合油を使用し、中速4ストロークディーゼルエンジンによる実機試験を行った。
 - 圧力波形や熱発生率は、低負荷域（負荷率25%以下）と高負荷域（負荷率50%以上）で状況が異なり、低負荷域においてHVOを使用したとき、燃焼はA重油と比べて早く始まるものの圧力上昇は緩やかであること、高負荷域においてHVOを使用したとき、圧力波形や熱発生率はA重油とほとんど変わらないことなどを確認した。
 - 着火遅れはHVOの混合率が高まるほど短くなる傾向がある。
 - HVO使用時の最高筒内圧力 P_{max} は、高負荷域においてA重油とほとんど変わらない。低負荷域において P_{max} はHVOの混合率が高くなるに従って低下する。
 - 排ガス温度や過給機の運転状況は、HVOおよびA重油使用時ともにほとんど変わらない。
 - HVOを使用時の排ガス中の NO_x 濃度やCO濃度、スート濃度は、低負荷域においてA重油と比べて低下する。
- ※ HVO使用時の燃焼状態は、A重油使用時とは異なるものの、運転に支障が生じることはなかった。
- ※ 排ガス中に含まれる NO_x 、CO、スートなどの環境汚染物質の増加は確認されていない。
- ※ 混合安定性の試験結果を踏まえて、A重油専焼の船用ディーゼルエンジンにおけるHVOの使用は問題ないと考えられる。

バイオ燃料関連の試験結果 ～SVO陸上試験結果・陸上エンジン試験計画～

目次

1. はじめに
2. 試験に使用する燃料油
3. 動粘度・密度の計測
4. 定容燃焼装置（FCA）による試験
5. 混合安定性試験
6. ゴム材料の浸漬試験
7. 陸上エンジン試験【計画中】
8. まとめ

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

1. はじめに

- 船舶燃料油として利用可能性のあるバイオ燃料について、船舶利用時の技術的な観点による評価の検証を行う（2022年度国交省事業）。
- バイオ燃料は従来から使用されている船用重油（A重油、高硫黄C重油HSC、低硫黄C重油LSC）と混合して使用されることが想定される。
- 陸上試験では、幅広い条件で燃料を混合し、基本的な燃料特性の計測・評価を行う。

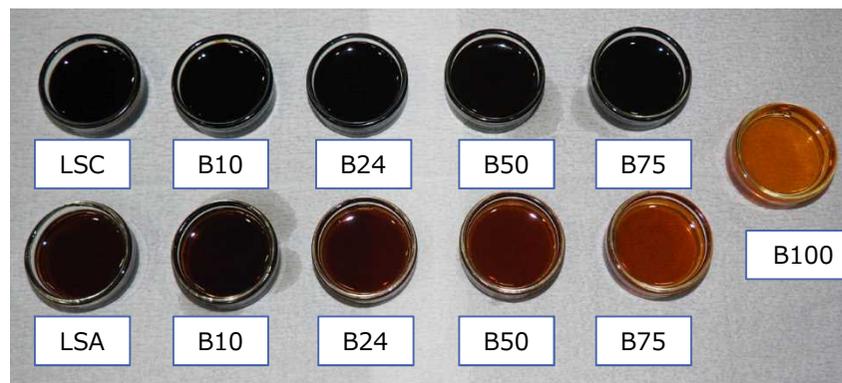
No.	試験・評価項目	陸上試験	実機試験
①	性状（動粘度、密度、流動点等）	○	
②	燃焼性の特性	○	○
③	バイオ燃料と重油の混合安定性、スラッジの発生状況	○	○
④	エンジン等のエンジンルーム内の機器の腐食、劣化に及ぼす影響 【陸上試験ではゴム材料の浸漬試験を実施】	○	○
⑤	燃費		○
⑥	排出ガスの成分		○
⑦	燃料油の切替え及びバンカリング時における影響		⊖

※ SVOの試験では、実船試験は行わず、基本的な陸上試験と陸上エンジン試験を実施する。

2. 試験に使用する燃料油

- 各種試験に使用する燃料油（A重油，LSC，バイオ燃料，それらの混合油）は下表の通りである。

- ※ 別途実施しているFAMEを使用した試験と整合を取るため，陸上エンジン試験を除き，とよふじ丸から採取したLSCを使用する。
- ※ 陸上エンジン試験は，別途，海技研が購入するLSCとの混合油を使用する。



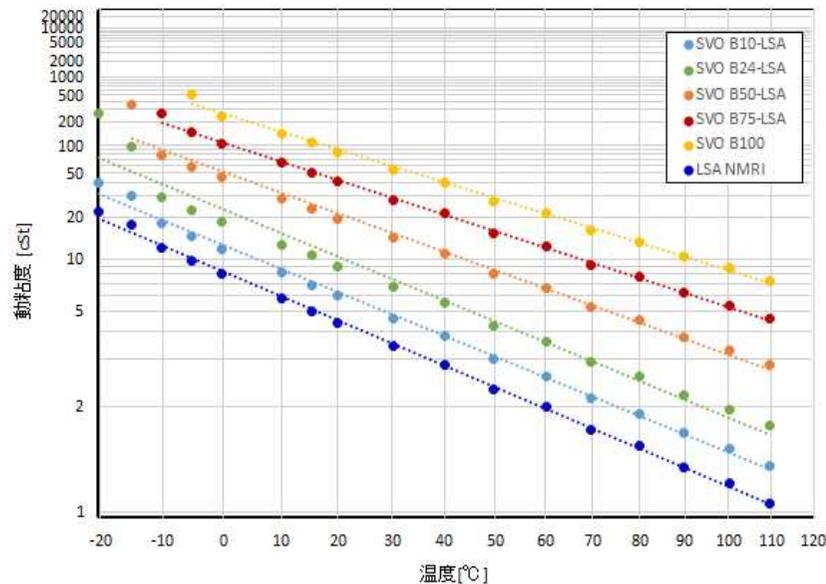
種類・項目	A重油	LSC	LSC-SVO混合油 (A重油-SVO混合油)				バイオ燃料 B100 (SVO)
			B10	B24	B50	B75	
動粘度@50℃ [cSt]	2.29	28.0	27.9 (3.00)	27.7 (4.20)	28.0 (8.05)	27.9 (14.9)	27.2
密度@15℃ [g/cm ³]	0.8562	0.9656	0.9615 (0.8632)	0.9562 (0.8730)	0.9458 (0.8912)	0.9357 (0.9083)	0.9253
硫黄濃度 [%]	0.1015	0.4377	0.3914 (0.0883)	0.3236 (0.0773)	0.2171 (0.0562)	0.1207 (0.0382)	0.0228
総発熱量 [J/g]	45,260	41,010					
備考	海技研で使用しているLSA。陸上試験に使用する。	2022年7月末にとよふじ丸より採取したLSC。					阪和興業殿より提供いただいたサンプル油。

※ 括弧内の数値はA重油-FAME混合油である。 ※ 総発熱量を除き，海技研における計測値である。

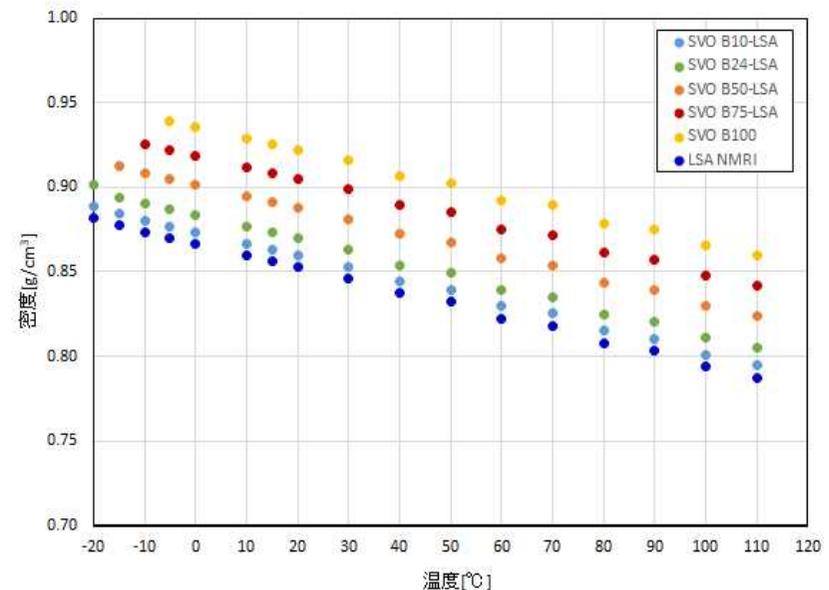
3. 動粘度・密度の計測

- バイオ燃料SVOとLSA（A重油）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100の動粘度および密度はLSAよりも高く、SVOとLSAの混合油はその間となる。
- 温度0℃以上におけるSVO（B10～B100）の動粘度は、温度-動粘度チャートにおいて直線で表される。

※ 現状、流動点の計測は行っていないが、0℃以下の動粘度の傾きが変化しているため、各燃料油の流動点は0～-10℃以下であると考えられる（冬季の使用においても概ね問題がないレベル）。



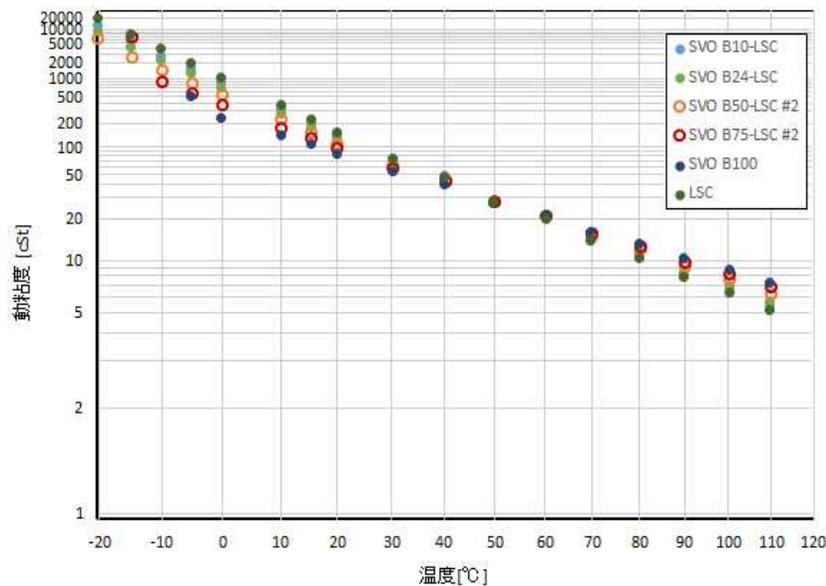
(a) 動粘度 (SVO-A重油)



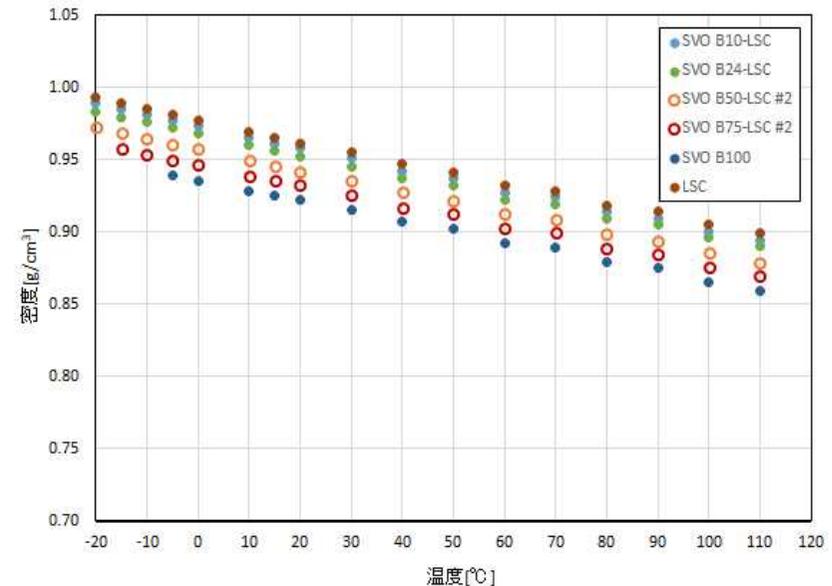
(b) 密度 (SVO-A重油)

3. 動粘度・密度の計測

- バイオ燃料SVOとLSC（低硫黄C重油）の混合油について、動粘度および密度の計測を行った。
- B100の動粘度はLSCと同程度であり、SVOとLSCの混合油も同程度である。
- B100の密度はLSCよりもわずかに低く、SVOとLSCの混合油はその間となる。



(a) 動粘度 (SVO-LSC)



(b) 密度 (SVO-LSC)

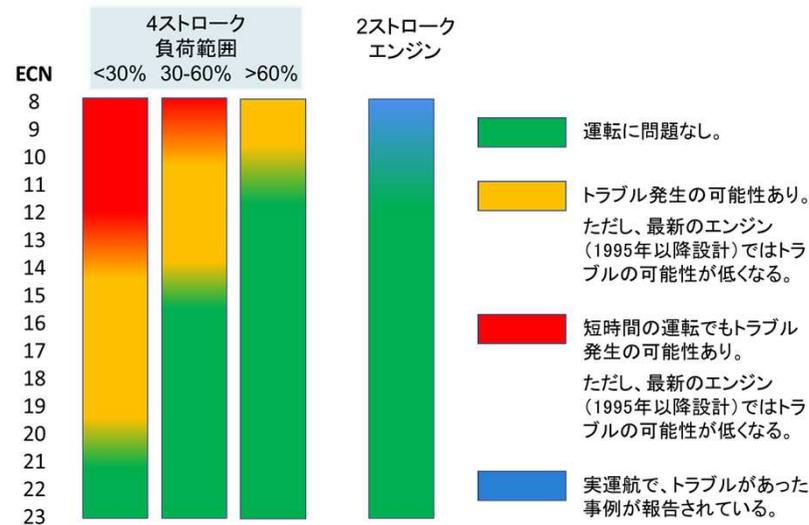
※ 陸上エンジン試験に使用するLSCとは異なる。陸上エンジン試験においては、別途、海技研が購入するLSCとの混合油を使用する。

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

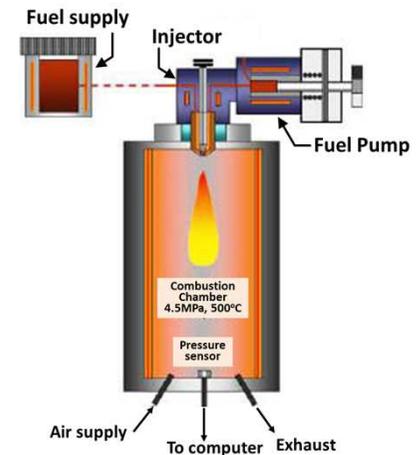
(1) 試験の概要

- バイオ燃料, LSC重油, A重油の燃焼性の相違を調べるため, 定容燃焼装置 (FCA) を用いた燃焼試験を行う。
- FCAでは, 圧力変化および圧力変化率の結果から着火遅れや燃焼時間, 着火性評価指標である推定セタン価ECNなどを求めることができる。

- 例えば, 推定セタン価ECNは, 燃料油の燃焼性 (自己着火のしやすさ, ノッキングのしにくさ) を表す指標である。一般に, ECNが高いほど自己着火しやすく, ノッキングが起こりにくい。



ECNによる燃料の着火性の評価例

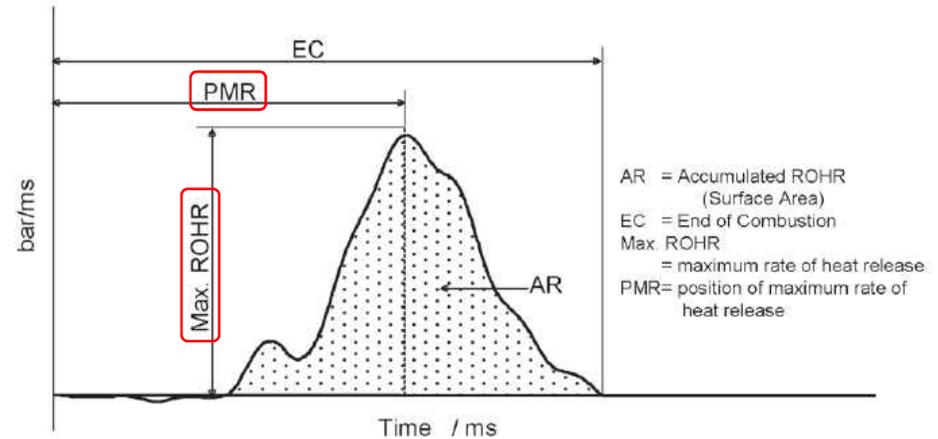
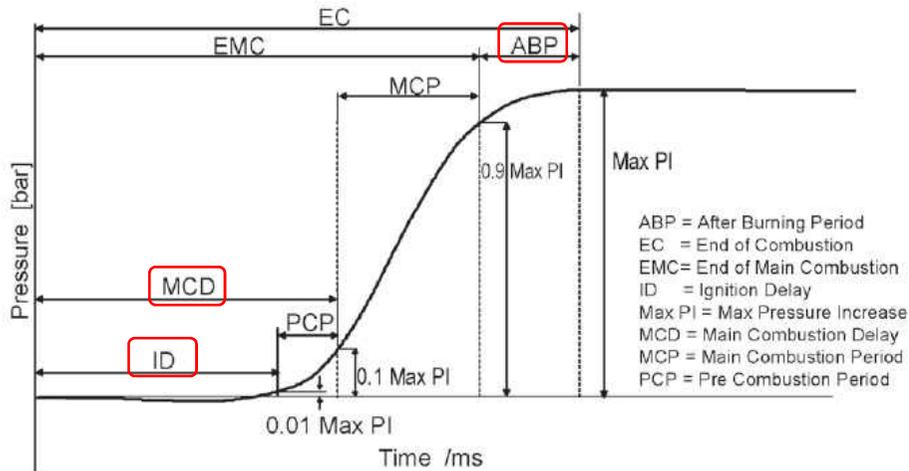


FIA-100 Fuel Combustion Analyzer (FCA)

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(2) 試験結果の評価方法

推定セタン化 $ECN = 153.15e^{-0.2861MCD}$



試験結果	結果の意味	想定されるトラブル
ID, PMRが遅く, Max ROHRの値が高い	<ul style="list-style-type: none"> 遅い着火と急激な燃焼 	エンジン, ピストンリング損傷の可能性
PMRが遅く, Max ROHRの値が低い	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間と膨張行程の温度低下による燃焼の遅れ 燃料油中の重質成分がシリンダ内で燃えるのに時間がかかる 	スートとPMの増加, 過給機トラブルのリスク上昇
ABPの著しい増加	<ul style="list-style-type: none"> 長い燃焼時間 	スートおよびPMの増加, デポジットの発生, 排気管の詰まりなど

(1) CIMAC "Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion", 2011

(2) 竹田他, 定容燃焼試験法 (IP541) による船用残渣燃料油の分析結果, JIME学会誌44-4, 2009

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(3) FCA試験条件

(a) 燃料サンプル加熱条件

Sample viscosity mm ² /s@50°C	Fuel reservoir (°C)	Injection assembly (°C)	Fuel pump (°C)	Fuel grades ISO 8217:2010
<25	50	50	50	DM grade, RMA
25 - 800	125	125	125	RMB - RMK
800 -2000	145	145	145	

(b) 装置設定条件

Process parameters	
Initial chamber temperature	500 °C
Initial chamber pressure	4.5 MPa
Injection pressure	35 MPa
Injected volume	Approx. 0.1 ml/injection
No. of injections per test	25

4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(4) 試験結果の一覧

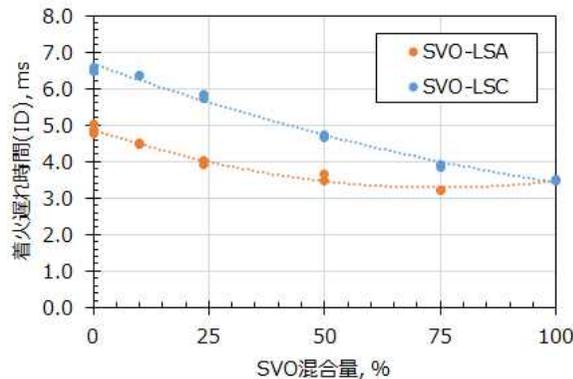
サンプル	BDF 割合	ID	MCD	EMC	EC	PCP	MCP	ABP	Max ROHR	PMR	AR	Max PI	ECN
	%	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	bar/ms	ms	bar	bar	
LSA	0	4.76	5.08	6.96	15.32	0.32	1.88	8.36	5.92	5.64	8.49	8.55	35.8
LSA-B10	10	4.49	4.76	7.03	17.44	0.27	2.27	10.41	5.95	5.18	8.55	8.70	39.2
LSA-B24	24	4.01	4.28	7.66	18.09	0.27	3.38	10.43	4.69	4.78	8.27	8.43	45.0*
LSA-B50	50	3.47	3.73	8.14	18.30	0.27	4.41	10.16	3.71	4.12	7.84	7.99	52.7*
LSA-B75	75	3.22	3.50	7.99	18.13	0.29	4.49	10.14	3.17	4.01	7.55	7.68	56.3*
B100	100	3.50	3.85	7.39	15.00	0.34	3.55	7.61	3.00	4.46	7.12	7.26	50.9*
LSC	0	6.46	7.32	14.68	23.52	0.85	7.36	8.84	1.77	8.43	7.74	7.89	18.9
LSC-B10	10	6.34	7.08	13.67	22.20	0.73	6.59	8.54	1.80	8.13	7.73	7.88	20.2
LSC-B24	24	5.83	6.47	11.86	19.93	0.64	5.39	8.07	2.06	7.59	7.78	7.93	24.1
LSC-B50	50	4.73	5.25	9.36	17.48	0.53	4.11	8.11	2.55	6.30	7.61	7.75	34.1
LSC-B75	75	3.85	4.25	7.87	15.33	0.40	3.62	7.46	2.80	5.12	7.38	7.52	45.4*
B100	100	3.50	3.85	7.39	15.00	0.34	3.55	7.61	3.00	4.46	7.12	7.26	50.9*

※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。

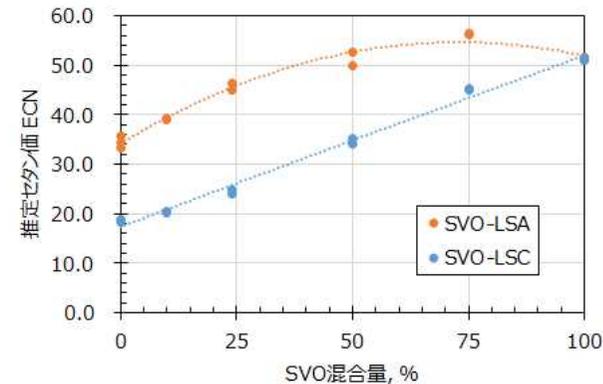
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(5) 試験結果の一例

- SVOとLSCの混合油の推定セタン価ECNは、B10～B50の範囲において、LSAとLSCの間であり、燃焼性に問題ないレベルであると推定される。

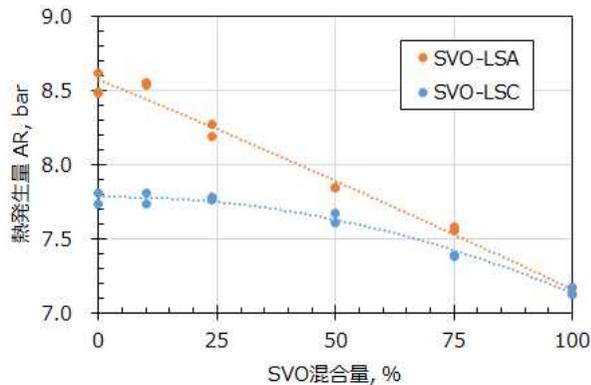


(a) 着火遅れ時間 ID

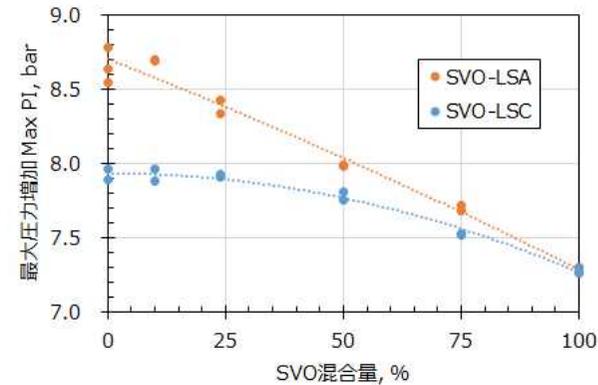


(b) 推定セタン価 ECN

※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。



(c) 熱発生量 AR

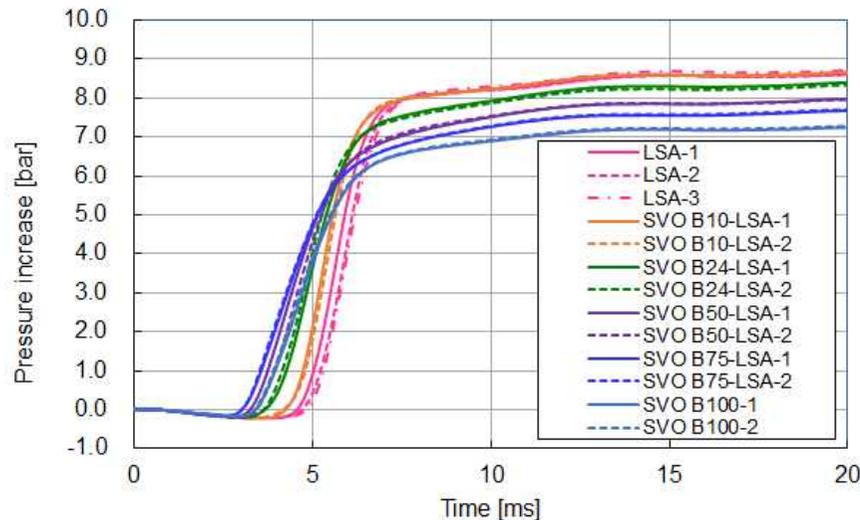


(d) 最大圧力増加 Max PI

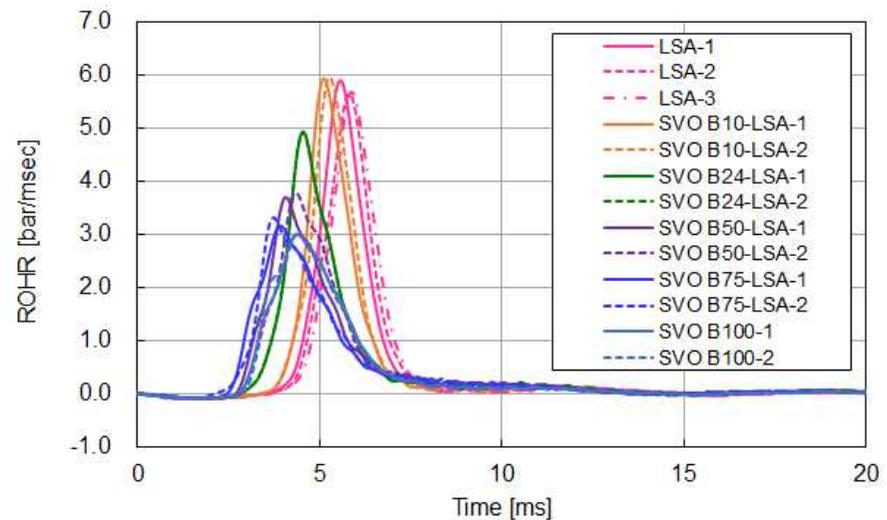
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(6) 燃焼波形の評価 (SVO-LSA)

- 圧力変化および熱発生率 (圧力変化率) の結果から着火遅れや燃焼時間を評価できる ((2)参照)。
- 混合油の圧力波形はLSAよりも燃焼が早まる傾向にある。
- SVOの混合比が高まるほど、最高圧力上昇Max PIや最高圧力変化率Max ROHRなどが低下することなどがわかる。



(a) 圧力波形

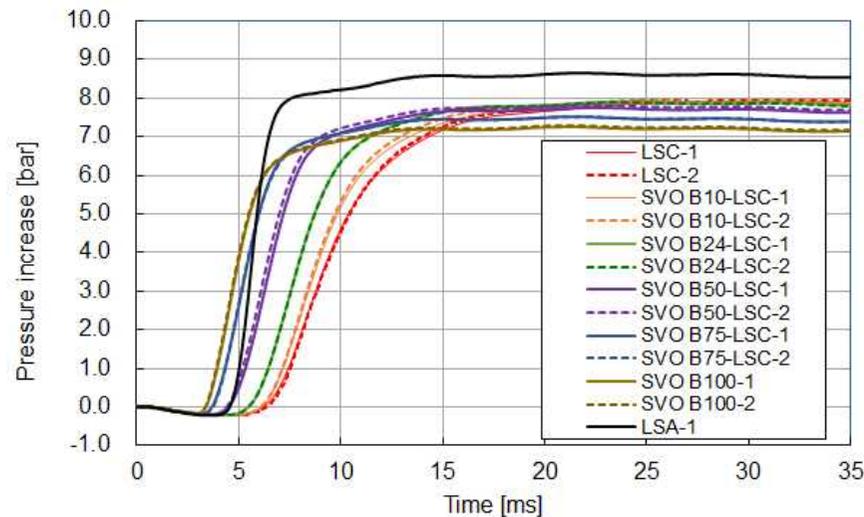


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

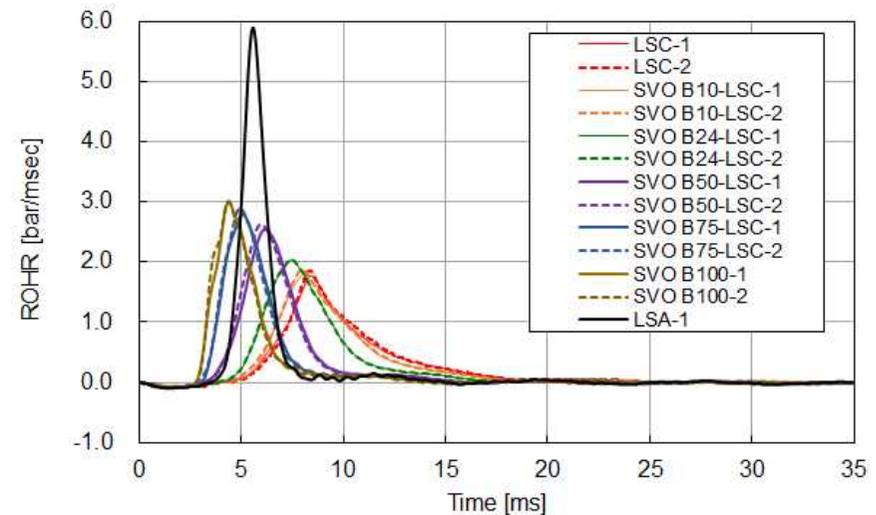
4. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

(7) 燃焼波形の評価 (SVO-LSC)

- 圧力変化および熱発生率 (圧力変化率) の結果から着火遅れや燃焼時間を評価できる ((2)参照)。
- B10～B50の範囲において, 混合油の圧力波形はLSAとLSCの間にある。
- B75およびB100の燃焼開始・燃焼終了はLSAよりも早いことなどがわかる。



(a) 圧力波形

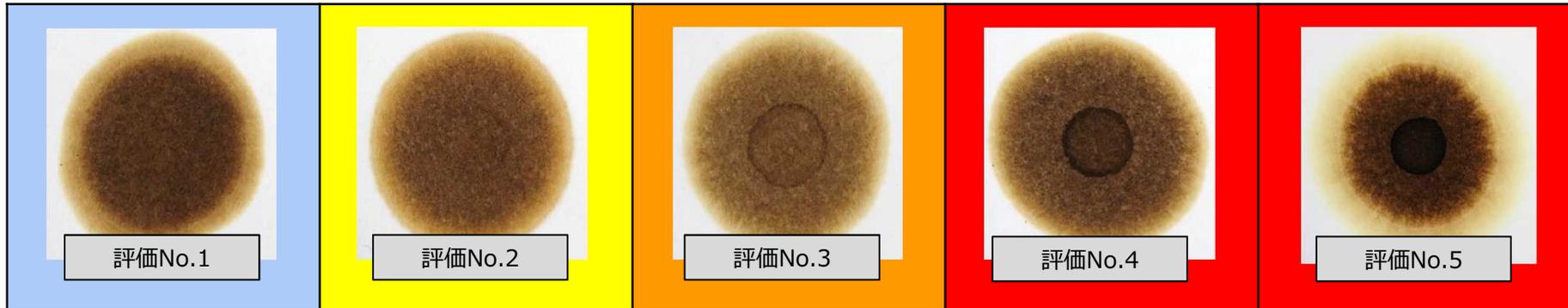


(b) 熱発生率 (圧力変化率)

5. 混合安定性試験

(1) スポットテストの概要

燃料油のスポットテスト評価 ASTM D4740



試料油を滴下したところにリングがまったく認められない。



安定性に問題ない。

周囲に不完全な内円がわずかに認められる。



安定性に問題ない。

周囲が完全な線上の内円が認められ、内円と外円の色が同じ。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円の縁が黒色になり、内円内部の色が外円より濃い。



安定性がやや悪く、スラッジトラブルが発生する可能性がある。

内円内部はさらに濃くなり、中心付近以外はほぼ黒くなる。



安定性が悪く、スラッジトラブルが発生する可能性が高い。

【参考】試験方法



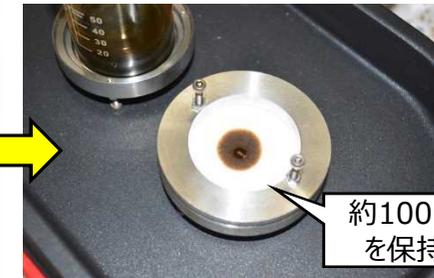
決められたろ紙 (5B) を準備する。



サンプル油とろ紙を約100℃に加熱する。



サンプル油を1滴だけ落とす。



約100℃を保持

5. 混合安定性試験

(2) 試験方法

- スポットテストにより，バイオ燃料と重油（LSC，LSA）の混合比を変えたときの混合安定性を確認する。
- 船内での長時間の貯蔵を想定して，異なる温度条件において，混合後の長期変化を調べる。

試験方法の概要

No.	試験 (温度条件)	概要	備考
(1)	常温	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。短時間ではあるが，スポットテスト毎に約100℃までの加熱を繰り返して行う（常時，常温保管をしたサンプル油ではない）。	
(2)	80℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，直ちに試験を開始する。● 安定性試験に使用する混合油は少量である。スポットテスト毎に約100℃まで加熱し，試験終了後は80℃に加熱した恒温槽内で保管する。	
参考	55℃	<ul style="list-style-type: none">● バイオ燃料と重油を混合した後，常温状態において約1ヶ月間保管したサンプル油であり，参考データとする。	後述のゴム材料浸漬試験と同じ時期に実施する。

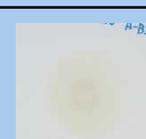
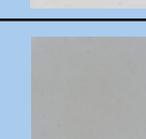
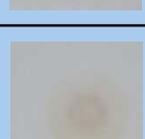
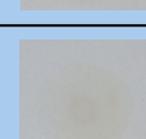
5. 混合安定性試験

(3) 試験結果の概要

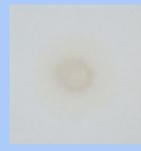
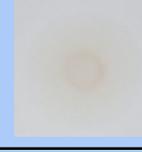
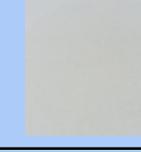
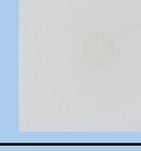
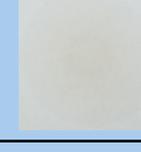
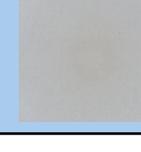
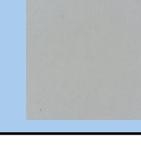
- SVOとA重油の混合油の混合安定性は、本試験範囲内においてすべて問題ないと判断される。
- SVOとLSCの混合油の混合安定性は、時間経過や保管状態によって悪化する。ただし、LSC単体の安定性も悪化するため、SVOが原因であるかは判断できない。

	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	
A重油 常温・500h							すべて評価 No.1であり、 安定性に問題 ないと判断され る。
	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	
LSC 常温・500h							B24～B75は 評価No.4であ る。

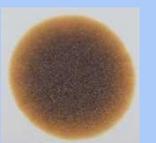
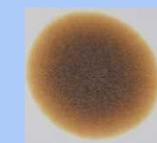
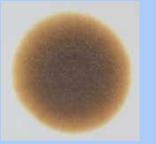
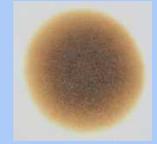
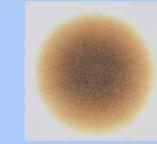
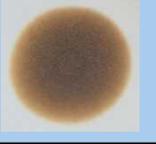
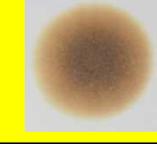
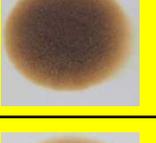
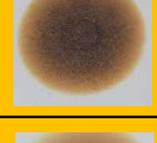
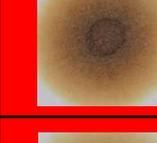
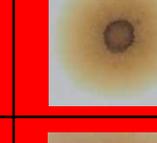
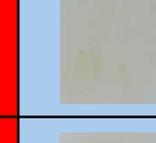
(a) LSA-SVO, 常温貯蔵 (テスト時加熱)

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
250h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
300h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
500h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

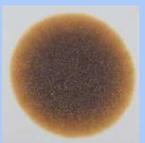
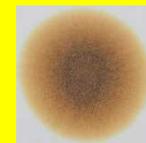
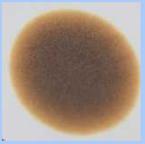
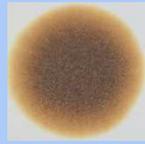
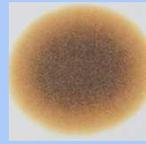
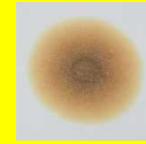
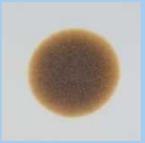
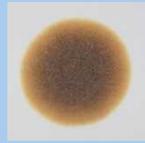
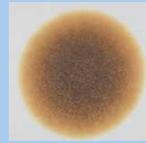
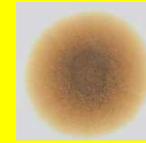
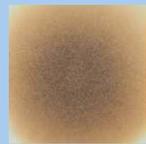
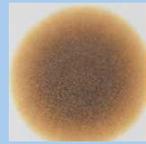
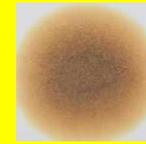
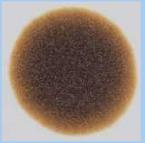
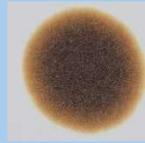
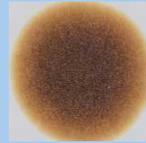
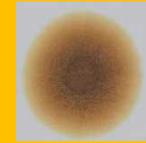
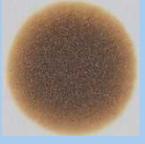
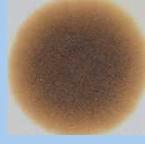
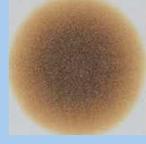
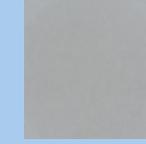
(c) LSA-SVO, 80℃恒温槽

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
50h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
100h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
250h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
300h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
400h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
500h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

(c) LSC-SVO, 常温貯蔵 (テスト時加熱)

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B75は評価No.3, それ以外は評価No.1~2である。
50h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。
100h							B75の混合油は, 内円の縁が黒色になり, 内円内部の色が外円より濃くなっている (評価No.4)。
250h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。
300h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。
400h							B50の悪化が確認される。
500h							前回の計測と比べて, 大きい変化は確認できない。

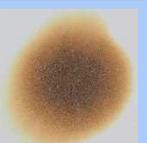
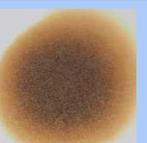
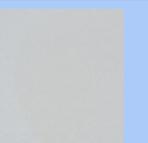
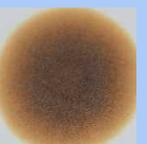
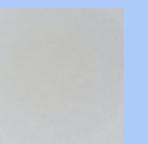
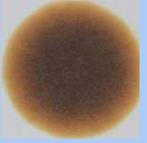
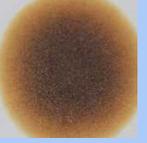
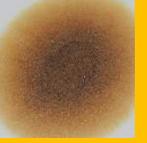
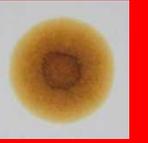
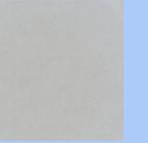
(d) LSC-SVO, 80°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B75は評価No.3, それ以外は評価No.1である。
50h							B50の内円がはっきりとしてきた(評価No.2)。
100h							前回の計測時から, 大きい変化は確認できない。
250h							前回の計測時から, 大きい変化は確認できない。
300h							B0~B10において, 内円が確認できる(評価No.2)。
400h							前回の計測時から, 大きい変化は確認できない。
500h							前回の計測時から, 大きい変化は確認できない。

【参考】LSA-SVO, 55°C恒温槽

時間	LSA	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
150h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。
350h							すべて評価No.1であり, 安定性に問題ないと判断される。

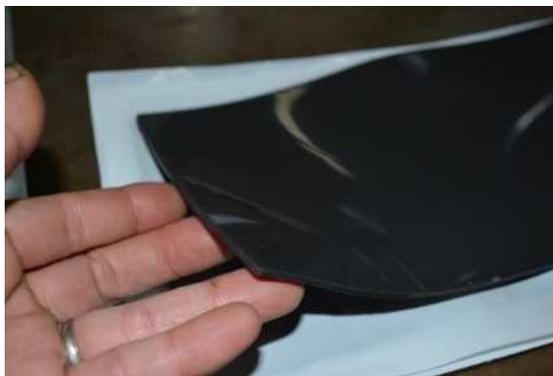
【参考】LSC-SVO, 55°C恒温槽

時間	LSC	B10	B24	B50	B75	B100	備考
0h							B75は評価No.3, それ以外は評価No.1~2である。
150h							B75の混合油は, 内円の縁が黒色になり, 内円内部の色が外円より濃くなっている(評価No.4)。
350h							全体的に安定性の悪化が確認される。

6. ゴム材料の浸漬試験

(1) ゴム材料の試験片

- 3種類のゴム材料（厚さ約2mm）を準備した（下表参照）。
- 以下の浸漬試験においては、JIS K 6258を参考として、厚さの寸法変化を計測した。



準備したゴムシート



切り出したゴム試験片

浸漬試験に用いたゴム試験片

整理記号	A	B	D
種類	中高ニトリルゴム (中高NBR)	高ニトリルゴム (高NBR)	フッ素ゴム (FKM)
アクリロニトリル 含有量	31~35%*	36~42%*	---
備考	一般的なニトリルゴム	一部の燃料移送ポンプに 使用されている材料	耐熱性、耐油性が高い 材料

※ 資料 (<https://www.packing.co.jp/GOMU/GOMU1/nbr.htm>) の参考値であり、ゴム試験片の計測値ではない。

6. ゴム材料の浸漬試験

(2) 試験方法

(a) 試験環境

- 恒温槽を温度55℃に設定し、浸漬試験を行った結果を整理する。



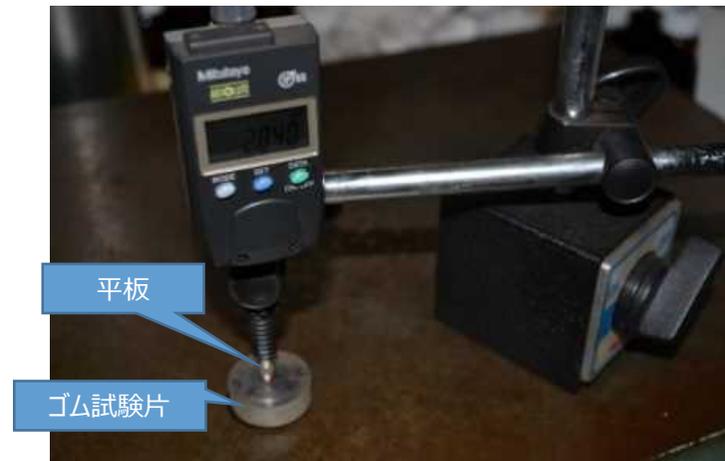
恒温槽



恒温槽内の試験片

(b) 寸法計測

- 定盤の上にゴム試験片を置き、アルミニウム合金製平板による一定加圧条件の下、デジタルマイクロゲージ（分解能1/1000mm）で寸法（厚さ）を計測する。
- ゴム試験片上の4点の寸法を計測をして平均値を求め、あらかじめ浸漬試験の前に個々の試験片において計測していた基準長さに対する寸法変化率を算出する。

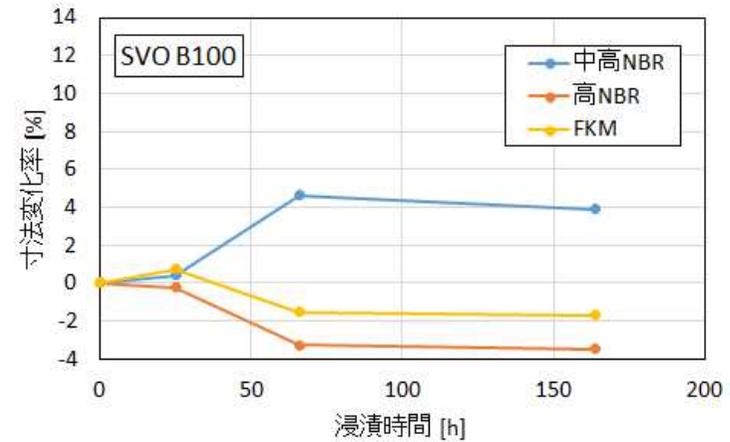


ゴム試験片の寸法計測

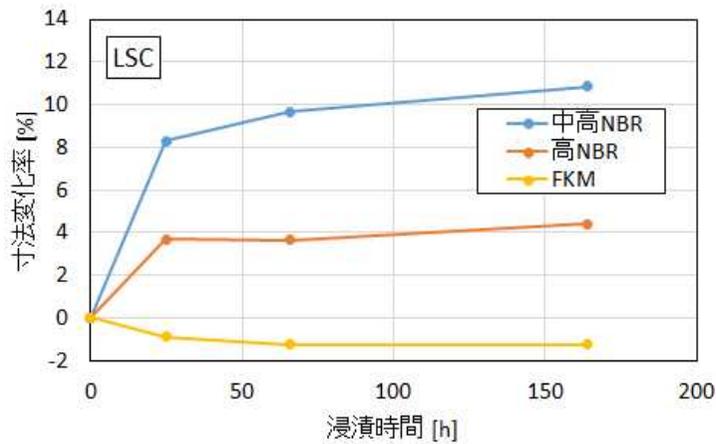
6. ゴム材料の浸漬試験

(3) 時系列変化

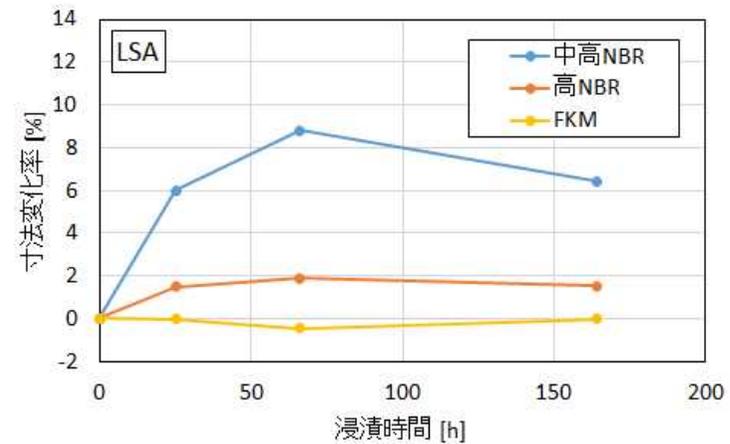
- 各燃料油における浸漬試験の寸法変化は、浸漬時間50~100時間程度で概ね安定している。
 - 中高ニトリルの寸法変化は大きく、高ニトリルおよびフッ素ゴムの寸法変化は小さい。
- ※ SVO (B100) による高ニトリルとフッ素ゴムの寸法変化率はマイナスとなっている（寸法が減少する方向）。再試験の実施を検討している。



(a) SVO (B100) の時系列変化



(b) LSCの時系列変化

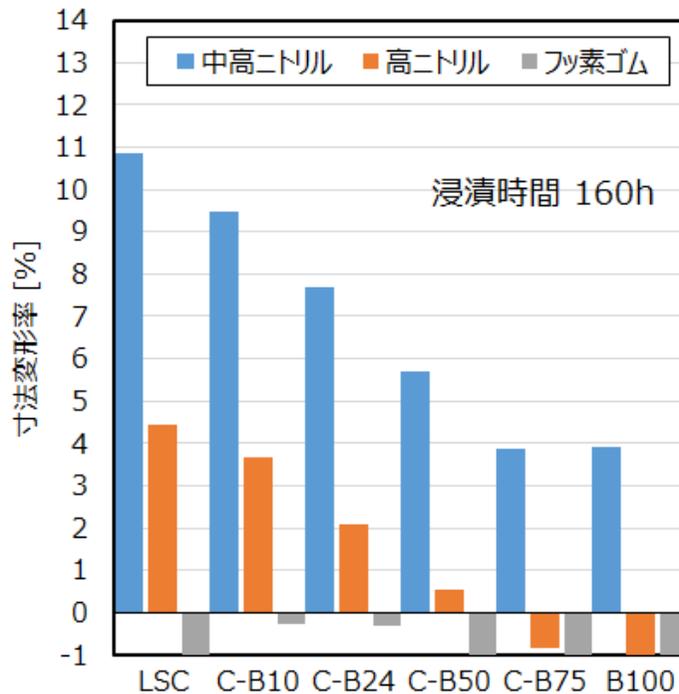


(c) LSAの時系列変化

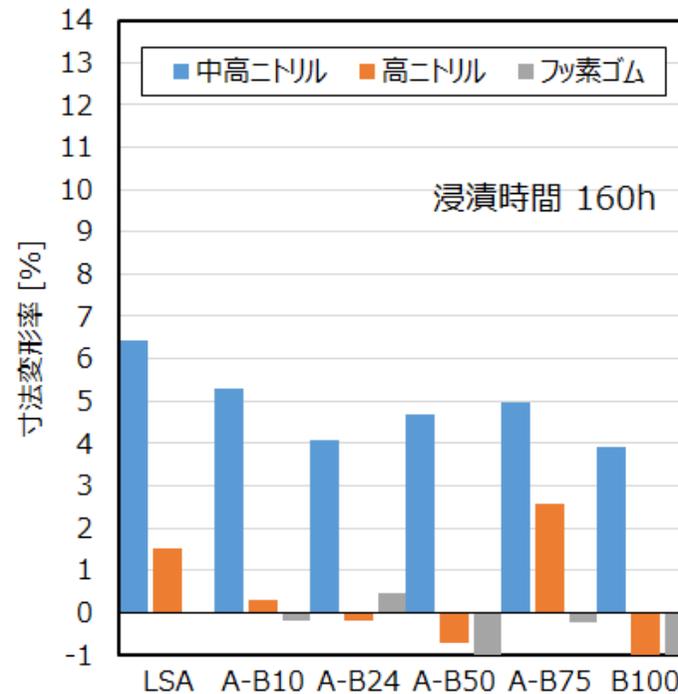
6. ゴム材料の浸漬試験

(4) 試験結果

- 中高ニトリルにおけるSVO (B100) の寸法変化率は、LSC、LSAと比べて小さい。混合油の寸法変化率はその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるSVO (B100) の寸法変化はほとんど確認できない。



(a) LSCとSVOの混合油



(b) LSAとSVOの混合油

7. 陸上エンジン試験【計画中】

(1) 実験用ディーゼルエンジン

- 下表No.2のエンジンを使用し、燃焼圧力波形や各部温度などの燃焼状況、排ガス成分を計測する。
- SVOによる陸上エンジン試験は、今後の船舶利用を踏まえて、SVOとLSCの混合油を使用する。
- 通常のLSCを使用した際のデータを計測し、バイオ燃料使用時と比較する。

※ 陸上エンジン試験においては、上記の混合安定性やゴム材料浸漬試験で使用したLSCとは異なる燃料油を使用する。

No.	1	2
タイプ	4サイクル中速エンジン（海技研）	
定格出力／回転数 シリンダ数	750 kW / 1000 rpm 6気筒	257 kW / 420 rpm 3気筒
外観		
特徴	中速エンジンの中で、機関回転数が高く、ボア径が小さい。機関回転数が速いため、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、機関回転数が遅い。そのため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンと比べて燃料性状の変化に鈍感である。

7. 陸上エンジン試験【計画中】

(2) 試験の概要

- 混合率は、別途実施したFAME実船試験に合わせてB10とB24とする。さらに、運転の不具合が確認されない場合、B50の試験を実施する。
- 混合油を準備した後、燃料清浄機を使用し、バイオ燃料使用時の注意点等を取りまとめる（清浄機メーカーへの協力依頼済み）。
- エンジンを船用負荷特性において25, 50, 75, 100%としたときの定常データを計測し、バイオ燃料使用時とLSC使用時の試験結果と比較する。



燃料清浄機（三菱化工機製）



実験用ディーゼルエンジン

8. まとめ

(1) 動粘度および密度

- バイオ燃料B100の動粘度および密度は、LSAよりも高い。バイオ燃料SVOとLSAの混合油の動粘度および密度は、LSAとB100の間にある。
- バイオ燃料B100の動粘度および密度は、LSCと同程度であり、SVOとLSCの混合油も同程度である。一方、B100の密度はLSCよりもわずかに低く、SVOとLSCの混合油はその間となる。

(2) 定容燃焼装置（FCA）による試験

- バイオ燃料SVOとLSAの混合油の圧力波形より、混合油の燃焼はLSAよりも早まる傾向にある。また、混合油の推定セタン価ECNは、LSAよりも高くなる。
- バイオ燃料SVOとLSCの混合油における圧力波形は、B10～B50の範囲において、LSAとLSCの間にある。B75およびB100の燃焼開始・燃焼終了はLSAよりも早い。

8. まとめ

(3) 混合安定性

- 現時点までのスポットテストにおいて、バイオ燃料SVOとLSAの混合油の混合安定性に問題ないと判断される。
 - バイオ燃料SVOとLSCの混合油の混合安定性は、時間経過とともに悪化する傾向がある。ただし、LSC単体の安定性の悪化も確認されており、バイオ燃料の混合による影響であるかは判断できない。また、高温貯蔵（80℃）による顕著な悪化は確認されなかった。
- ※ SVOとLSCの混合油において、B75の混合安定性は他の混合割合と比べて悪く評価されている。特異性の有無については不明である。
- ※ スポットテストはスラッジの有無を評価する試験である。スラッジ以外の固形生成物（例えばバクテリア等の微生物の増殖）については不明であり、注意が必要である。
- ※ バイオ燃料等の軽質燃料は配管の洗浄効果があると思われる。実運用時にはフィルタの状況を確認することが重要である。

(4) ゴム材料の浸漬試験

- 中高ニトリルにおけるSVO（B100）の寸法変化率は、LSC、LSAと比べて小さい。混合油の寸法変化率はその間にある。
- 高ニトリルおよびフッ素ゴムにおけるSVO（B100）の寸法変化はほとんど確認できない。