

# バイオ燃料関連の陸上試験結果

## 目次

1. はじめに
2. 陸上試験の概要
3. 試験に使用する燃料油
4. 動粘度・密度の計測と燃料性状
5. 定容燃焼装置（FCA）による試験
6. 混合安定性試験
7. 析出物・スラッジの発生
8. バイオ燃料の酸化劣化試験
9. 金属腐食試験
10. 陸上エンジン試験
11. その他の調査
12. 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

① 継続

調査・検討項目

- 船舶燃料油として利用可能性が高いバイオ燃料について、船舶利用時の技術的課題の有無について、調査・検討を行う。
- 海上技術安全研究所は、関係者と情報交換・協力をしながら、陸上試験を主担当として実施する。
- 海上試験については阪和興業株式会社が主担当となり、情報交換・協力をしながら調査事業を進める。

No.	調査・検討項目	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	燃料油の切替え及びバンカリング時における影響		○

本報告資料について

① 継続	2022年度の試験内容を単純にSVOベースまたは異なるバイオ燃料で更新した内容
② 更新	2022年度の試験内容をSVOまたは異なるバイオ燃料で実施して昨年度には確認できなかった新たな特徴がある内容
③ 新規	新規に実施した試験内容

## 2. 陸上試験の概要

① 継続

No.	調査・検討項目	概要
①	性状に関する調査	<ul style="list-style-type: none"><li>● 燃料油温度に対する動粘度並びに密度を計測する。</li><li>● 必要に応じて、詳細な性状分析を行う。 (海上試験で使用するSVOを主対象とする。)</li></ul>
②	燃焼性の特性	<ul style="list-style-type: none"><li>● 定容燃焼装置 (FCA) による燃焼試験を行う。 (海上試験で使用するSVOを主対象とする。)</li><li>● 試験用ディーゼルエンジンによる運転を行う*。</li></ul>
③	バイオ燃料と重油の混合安定性	<ul style="list-style-type: none"><li>● 海上試験で使用するSVOについて、混合安定性試験 (スポットテスト) を実施する。</li><li>● 異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性試験を行う。</li></ul>
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	<ul style="list-style-type: none"><li>● バイオ燃料の酸化劣化による金属材料への長期的な影響を調べる。</li><li>● 燃料油の性状分析として、酸価の計測を行う。</li><li>● ランシマツ法による酸化安定性試験および銅板腐食試験の計測を行う。</li><li>● 酸化防止剤の効果調べる。</li></ul>
⑤	燃費	<ul style="list-style-type: none"><li>● 試験用ディーゼルエンジンによる運転の際、燃費 (燃料消費量) を計測する*。</li></ul>

※ 2022年度に実施できなかったジャトロファFAMEによる陸上エンジン試験を実施する。

# 3. 試験に使用する燃料油

- 2023年度の試験に使用したバイオ燃料および混合・比較のために使用した燃料油（A重油, LSC）は下表の通りである。



燃料油の外観  
(左からLSA, SVO  
①～③, LSC)

2022年度の試験に使用した燃料油（参考）

種類・項目	SVO 2022	FAME 2022	HVO 2022	ジャトロ ファ 2022
動粘度@50℃ [cSt]	27.2	3.70	2.53	4.23
密度@15℃ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.9253	0.8862	0.7823	0.8853
備考	阪和興業殿より提供いただいたサンプル油。	豊田通商殿より提供いただいたサンプル油。	伊藤忠エネクス殿より提供いただいたサンプル油。	南国殖産殿より提供いただいたサンプル油。

2023年度の試験に使用した燃料油

種類・項目	A重油	LSC	SVO					廃食油FAME			ジャトロ ファ FAME
			①	②	③	④	⑤	①	②	③	
動粘度@50℃ [cSt]	2.462	34.7	26.0	27.3	27.5	27.4	28.1	3.693	3.411	3.718	3.937
密度@15℃ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.8581	0.9473	0.9231	0.9245	0.9244	0.9233	0.9244	0.8821	0.882	0.886	0.8837
硫黄濃度 [%]	0.0763	0.4420									
備考	海技研で使用しているLSA。	祥暉丸に補油したLSCのサンプル油	第一鐵運丸に補油したSVO（9/9名古屋）。	祥暉丸に補油したSVO（9/25大阪）。	海青丸に補油したSVO（10/2大阪）。	主に酸化劣化の調査に使用するSVO（10/17名古屋）。	主に酸化劣化の調査に使用するSVO（10/27大阪）。	A社より入手したサンプル油。	B社より入手したサンプル油。	C社より入手したサンプル油。	D社より入手したサンプル油。

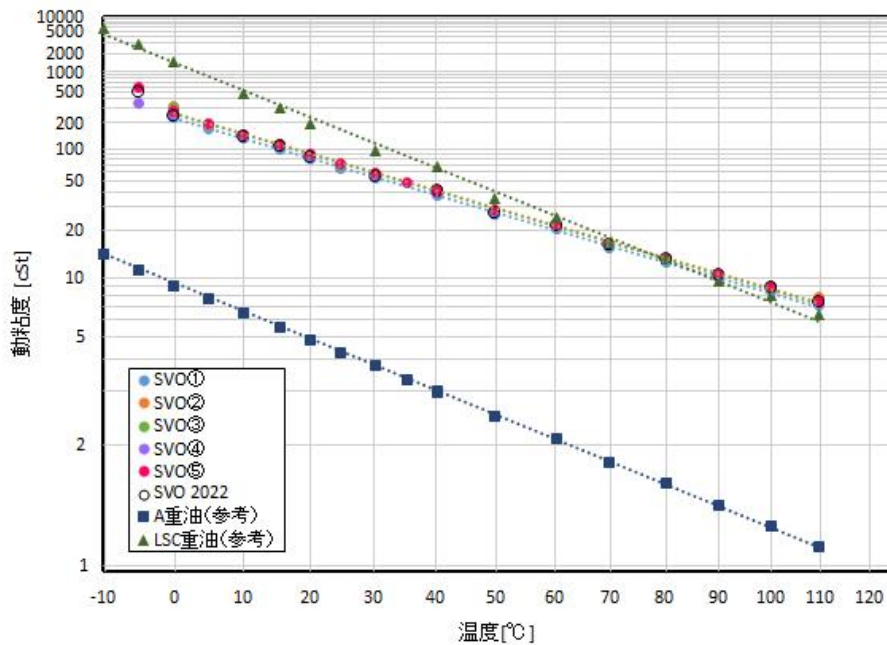
※ 上表の値は、海技研が入手後に計測した値である。

※ 上表のSVOは“非パーム油”として集荷された燃料油である。

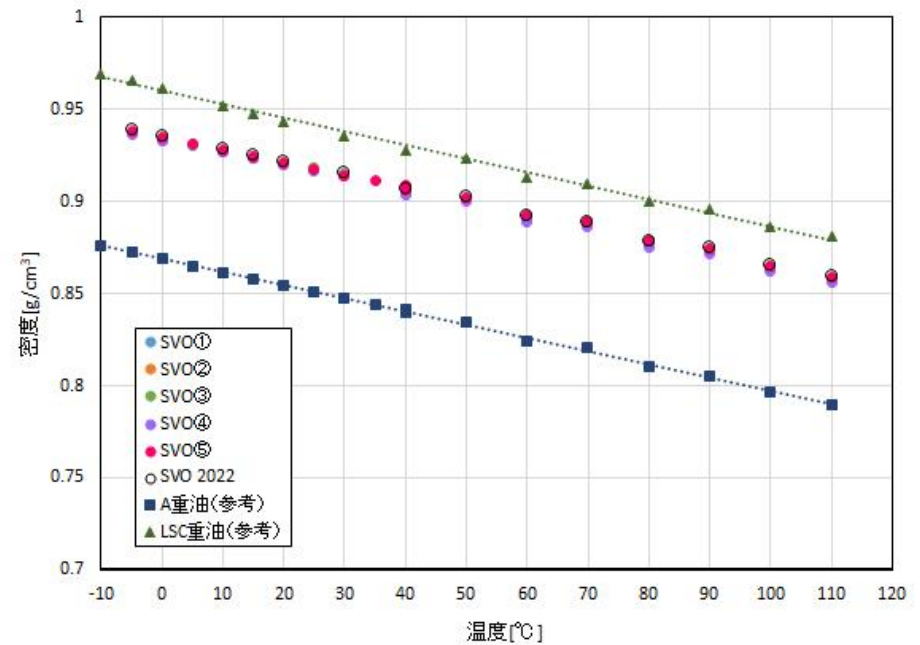
# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状

## (1) SVOの動粘度・密度

- 本年度に入手したSVO①～⑤および2022年度に使用したSVOについて、動粘度および密度の計測結果を整理した。
- 計測したすべてのSVOは収集・バンクリング時期がやや異なるものの、動粘度および密度はいずれもほぼ同じである。



(a) 動粘度 (B100)

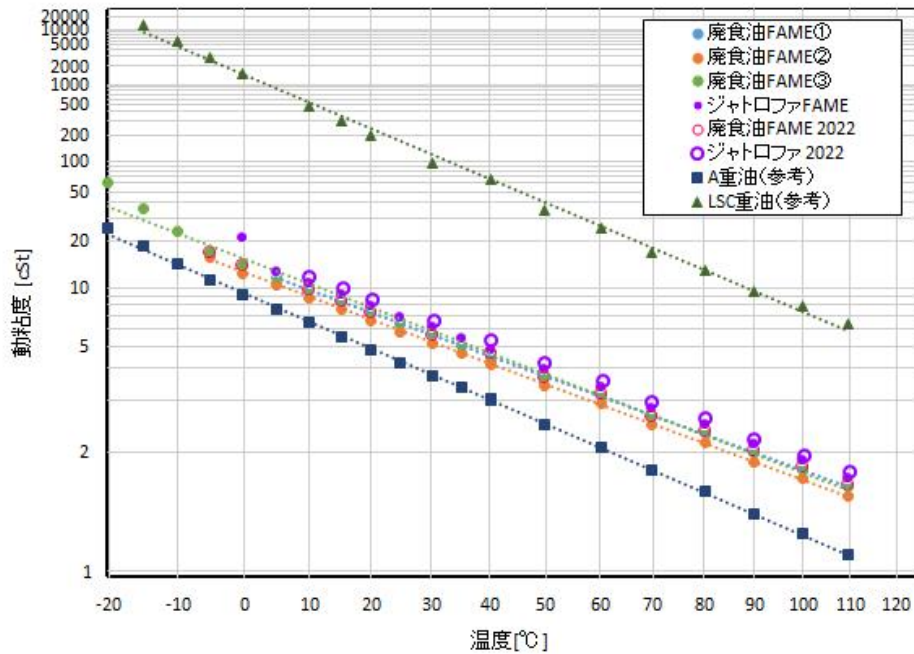


(b) 密度 (B100)

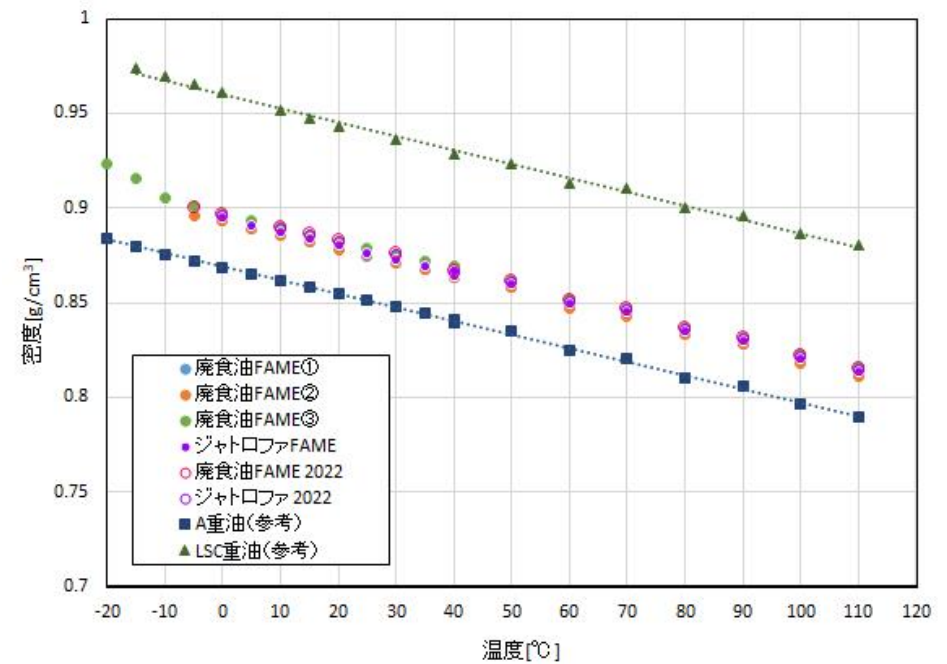
# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状

## (2) FAMEの動粘度・密度

- 本年度に入手した廃食油FAME①～③およびジャトロファFAME, 2022年度に使用したFAMEについて, 動粘度および密度の計測結果を整理した。
- 計測したすべてのサンプル油の動粘度および密度は概ね同程度である。



(a) 動粘度 (B100)



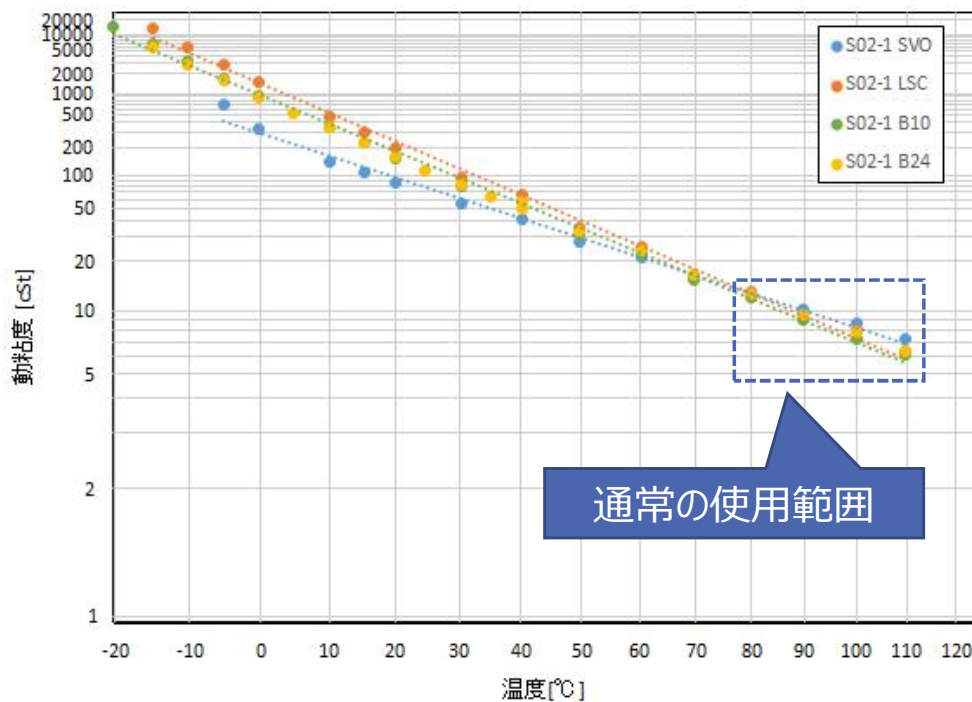
(b) 密度 (B100)

# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状

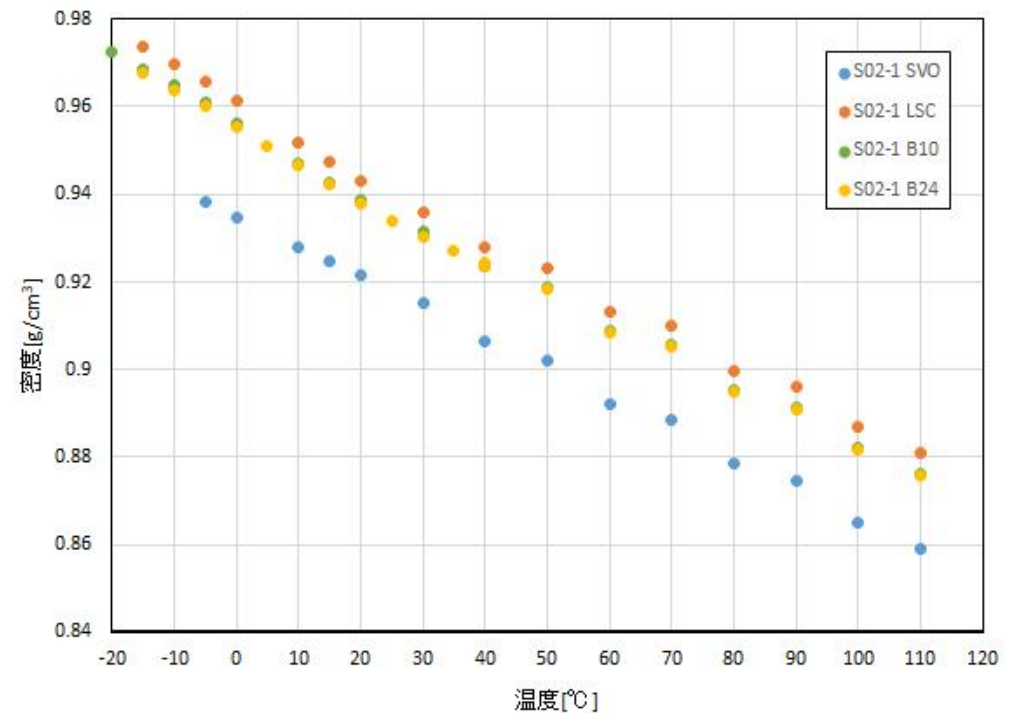
① 継続

## (3) SVO・LSC混合油の動粘度・密度

- 祥暉丸に補油したSVO②および本船に使用しているLSC②との混合油（B10，B24）について，動粘度および密度の計測を行った。
- 混合油とLSCの動粘度および密度に大きな違いはなく，80～100℃程度にヒーティングすることで，通常のLSCと同様に扱うことができると考えられる（次ページ参照）。

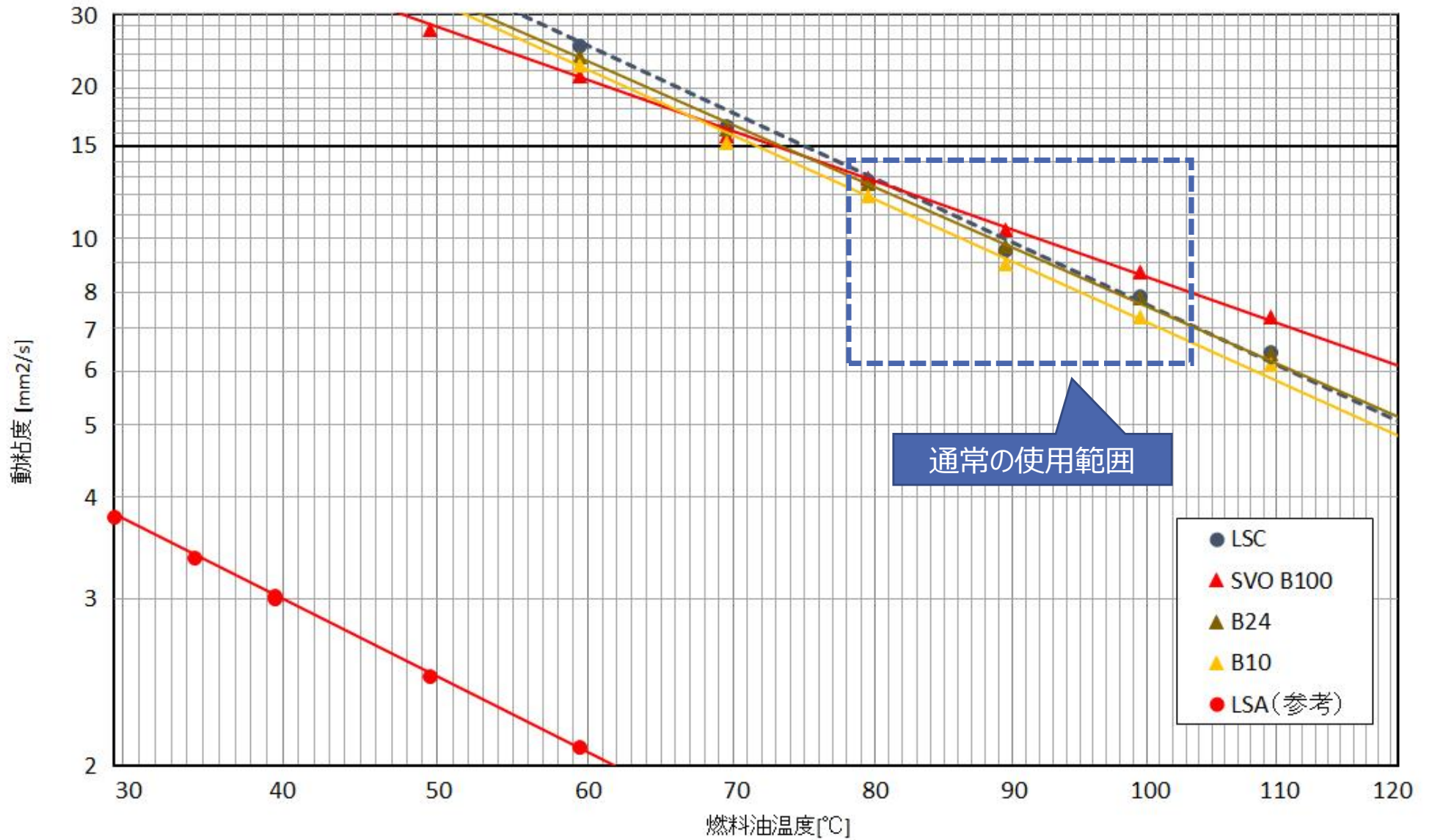


(a) 動粘度 (SVO② + LSC)



(b) 密度 (SVO② + LSC)

# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状



温度-動粘度チャート (SVO② + LSC)



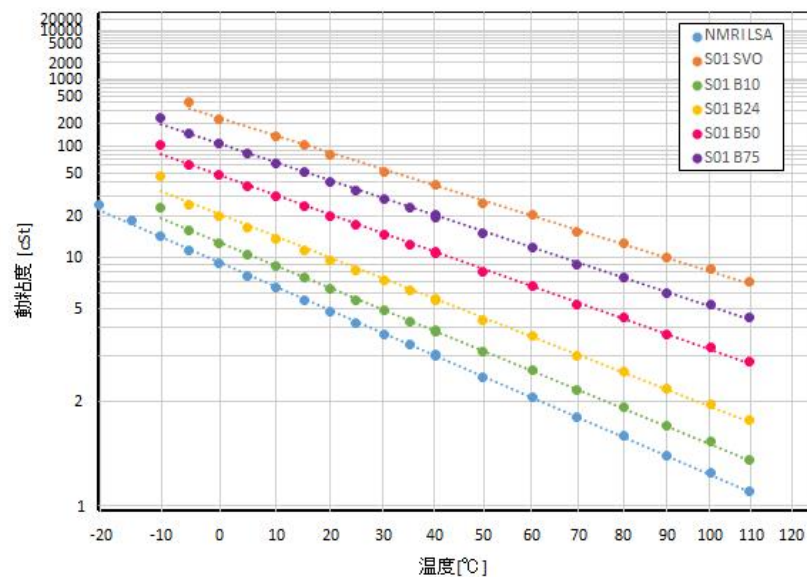
# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状

① 継続

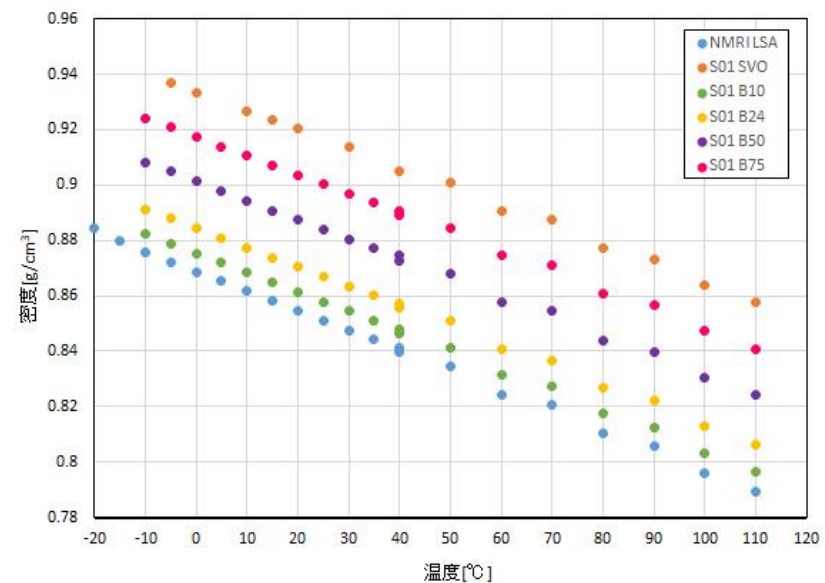
## (4) SVO・LSA混合油の動粘度・密度

- SVO①とLSAの混合油（B0～100）について、動粘度および密度の計測を行った。
- ディーゼルエンジンで使用できる動粘度が2～16cStの範囲とした場合※，B50以下のバイオ燃料割合であれば常温30℃で使用可能である（次ページ参照）。
- B50を超えるバイオ燃料割合においては、動粘度を16cSt以下とするために、燃料油のヒーティングが必要となる。

※ 使用可能な動粘度についてはエンジンメーカーに問い合わせる必要がある。2cStはA重油使用時の目安，16cStはC重油使用時のヒーティング温度の目安である。

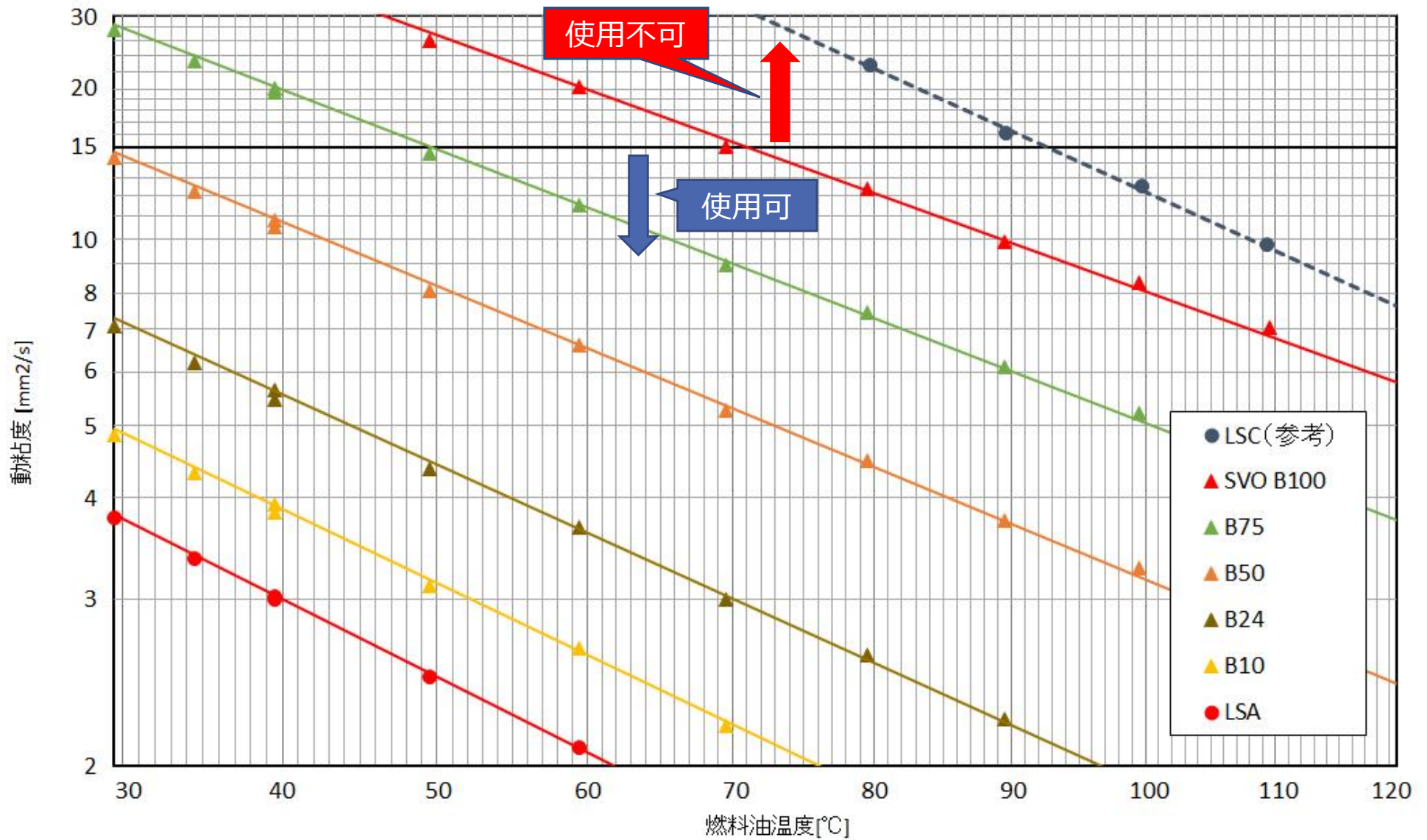


(a) 動粘度 (SVO① + LSA)



(b) 密度 (SVO① + LSA)

# 4. 動粘度・密度の計測と燃料性状



温度-動粘度チャート (SVO①+LSA)

### (5) 試験結果のまとめ

- ① 2022年度に引き続き、数種類のバイオ燃料の動粘度・密度を計測した結果、本年度に入手したSVOの動粘度・密度は昨年度の計測結果とほぼ同じであった。
- ② 本年度に入手した廃食油FAMEおよびジャトロファFAMEの動粘度・密度は昨年度の計測結果とほぼ同程度であった。
- ③ SVOとLSAの混合油について動粘度および密度の計測を行った結果、B50を超えるバイオ燃料割合においては、動粘度を16cSt以下とするために、燃料油のヒーティングが必要となることを確認した。

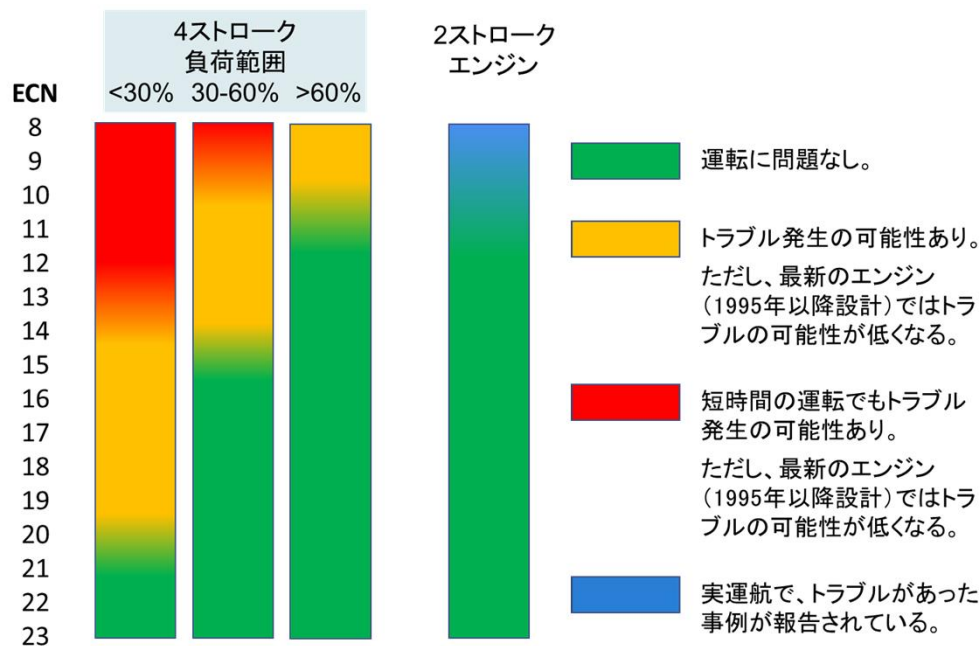
### (6) 試験結果を踏まえた推奨事項

- バイオ燃料をA重油と混合して使用する場合、混合油の動粘度はA重油と比べて高まる可能性がある。特に、バイオ燃料の混合割合を高めた場合、エンジンメーカーが指定する動粘度まで下げるために、燃料油のヒーティングが必要となり得る。使用するバイオ燃料の性状を把握しておくことが重要である。

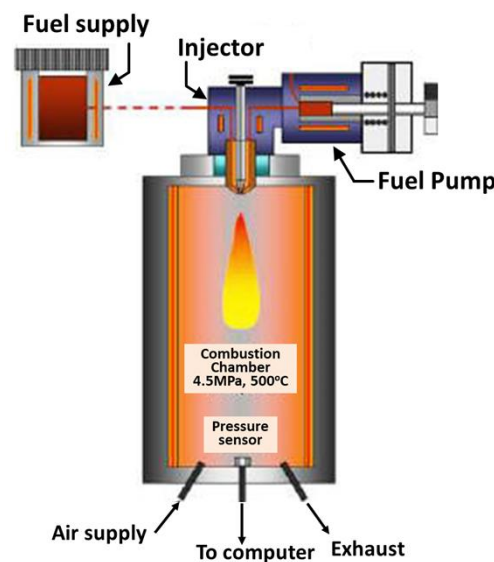
# 5. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

## (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。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

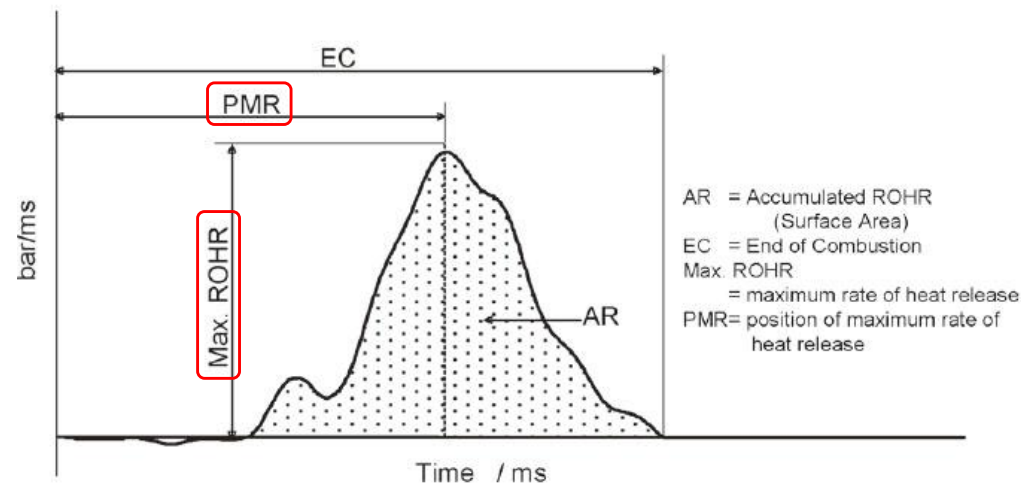
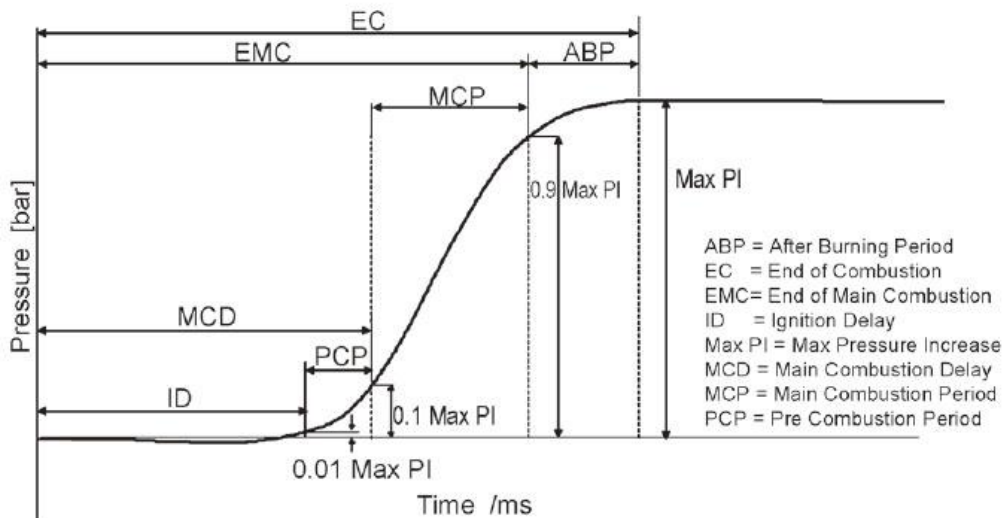


FIA-100 Fuel Combustion Analyzer (FCA)

# 5. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

## (2) 試験結果の評価方法

推定セタン価  $ECN = 153.15e^{-0.2861MCD}$



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"> <li>遅い着火と急激な燃焼</li> </ul>	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"> <li>長い燃焼時間と膨張行程の温度低下による燃焼の遅れ</li> <li>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</li> </ul>	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"> <li>長い燃焼時間</li> </ul>	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

# 5. 定容燃焼装置 (FCA) による試験

① 継続

## (3) FCA試験条件

### (a) 燃料サンプル加熱条件

Sample viscosity mm <sup>2</sup> /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。

# 5. 定容燃焼装置（FCA）による試験

① 継続

## (4) 各種サンプル油の試験結果とまとめ

- 2022年度に引き続き、定容燃焼装置（FCA）による試験を実施した結果、いずれのサンプル油においても、着火性は昨年度と同等であり、問題は確認されなかった。

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	
A重油	0	4.31	4.59	7.07	15.61	0.29	2.48	8.54	5.00	5.06	6.93	7.06	41.14
LSC重油	0	5.46	6.04	10.37	17.42	0.58	4.33	7.05	2.69	6.77	6.76	6.89	27.19
SVO①	100	3.37	3.68	7.90	13.94	0.31	4.21	6.04	2.39	4.07	5.90	6.01	53.44
SVO②	100	3.46	3.78	7.84	14.29	0.32	4.07	6.44	2.45	4.14	5.89	6.00	51.93
SVO③	100	3.36	3.68	7.83	13.54	0.32	4.15	5.70	2.41	4.08	5.88	5.99	53.44
SVO④	100	3.20	3.50	7.77	13.31	0.31	4.27	5.53	2.59	3.80	6.08	6.19	56.26
SVO⑤	100	3.38	3.70	7.72	13.32	0.32	4.03	5.60	2.56	4.20	6.24	6.35	53.14
SVO 2022	100	3.50	3.85	7.39	15.00	0.34	3.55	7.61	3.00	4.46	7.12	7.26	50.90
SVO②-LSC (B10)	10	5.17	5.67	9.65	15.89	0.50	3.98	6.24	2.72	6.40	6.73	6.86	30.22
SVO②-LSC (B24)	24	4.92	5.36	9.74	16.49	0.45	4.37	6.75	2.44	6.10	6.62	6.75	33.00
廃食油FAME①	100	3.61	3.86	7.43	16.60	0.25	3.57	9.17	3.59	4.45	6.25	6.36	50.79
廃食油FAME②	100	3.56	3.81	7.45	16.22	0.25	3.64	8.76	3.36	4.21	6.24	6.35	51.51
廃食油FAME③	100	3.78	4.04	7.24	16.51	0.27	3.20	9.27	3.54	4.6	6.23	6.35	48.16
ジャトロファFAME	100	3.29	3.52	7.87	17.70	0.22	4.35	9.83	3.81	3.78	6.00	6.11	55.94
FAME 2022	100	3.70	3.95	7.36	16.41	0.24	3.41	9.05	4.28	4.46	7.56	7.70	49.50

※ 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。

# 6. 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。



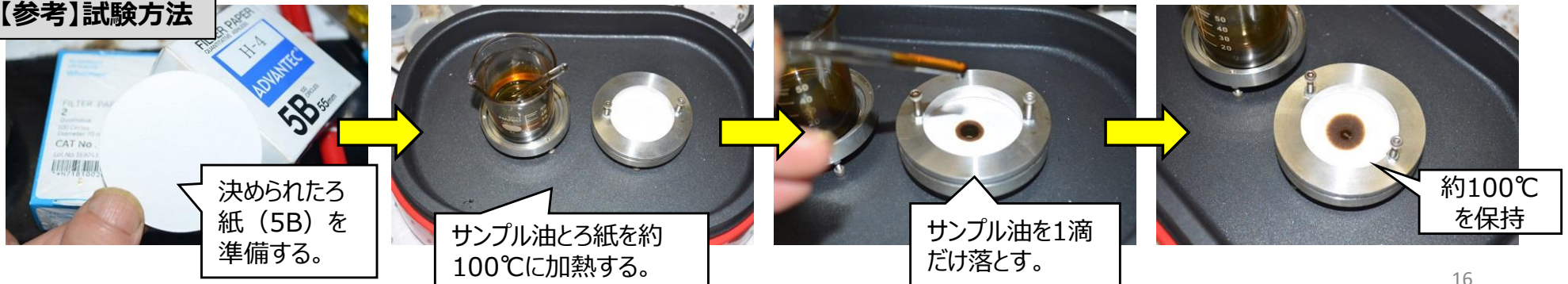
安定性がやや悪く、スラッジラブルが発生する可能性がある。

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°Cに加熱する。

サンプル油を1滴だけ落とす。

約100°Cを保持



## (2) 試験方法

- 2022年度に実施した混合安定性試験より，バイオ燃料と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，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。また，A重油との混合油の混合安定性は，試験範囲内においてすべて問題ないと判断された。
- 2023年度は，海上試験に用いた燃料油の混合安定性試験および異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性試験を実施した。




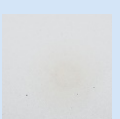
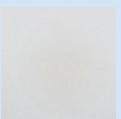
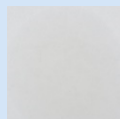



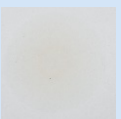
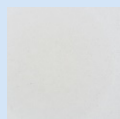


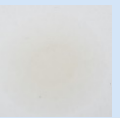



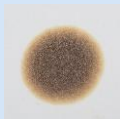



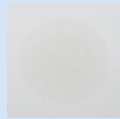




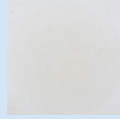
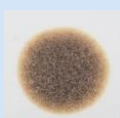



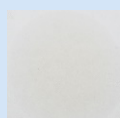
### 2023年度に実施した混合安定性試験

No.	調査・検討項目	概要
①	海上試験に用いた燃料油の混合安定性試験	<ul style="list-style-type: none"><li>● 海上試験に使用したSVO①～③とA重油，LSCとの混合安定性を調べる。</li><li>● 2022年度と同様，80℃条件における長期保管時のデータも取得する。</li></ul>
②	異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性試験	<ul style="list-style-type: none"><li>● SVO④，SVO⑤，廃食油FAME，ジャトロファFAMEを使用して，混合安定性を調べる。</li><li>● 2022年度と同様，80℃条件における長期保管の影響を調べる。</li></ul>

# 6. 混合安定性試験

## (2) 混合直後の混合安定性試験の結果




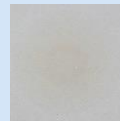
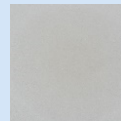
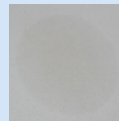


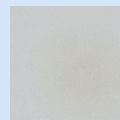
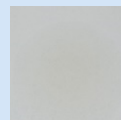
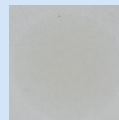

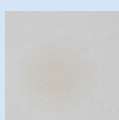

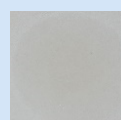
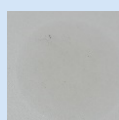

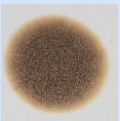



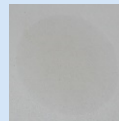




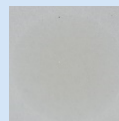




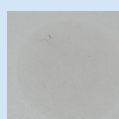
- 海上試験に用いたSVO①～③とA重油，LSCの混合油の混合安定性は，混合直後，すべて問題ないと判断された。

	B0	B10	B24	B50	B75	B100	
LSA							SVO①
							SVO②
							SVO③
LSC							SVO①
							SVO②
							SVO③

# 6. 混合安定性試験

## (3) 長時間高温条件に保管したサンプル油の混合安定性




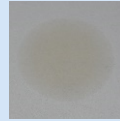
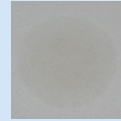
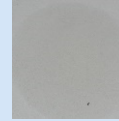

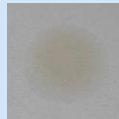
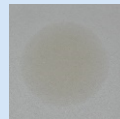
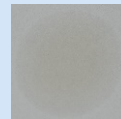
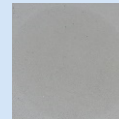


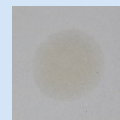
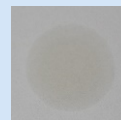



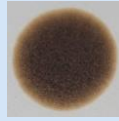
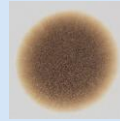

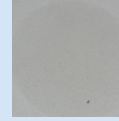



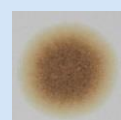
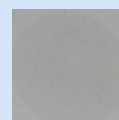



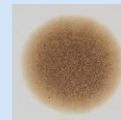

- SVO①～③とA重油，LSCの混合油の混合安定性は，長時間高温条件に曝した場合であっても，すべて問題ないと判断された（400h，80℃）。

	B0	B10	B24	B50	B75	B100	
LSA							SVO①
							SVO②
							SVO③
LSC							SVO①
							SVO②
							SVO③

# 6. 混合安定性試験

## (3) 長時間高温条件に保管したサンプル油の混合安定性

- SVO①～③とA重油， LSC②の混合油の混合安定性は，長時間高温条件に曝した場合であっても，すべて問題ないと判断された（1000h， 80℃）。

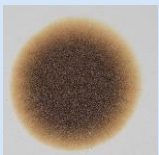
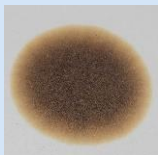



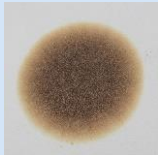

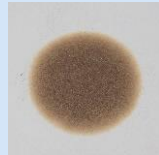

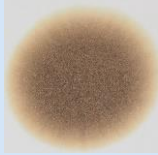
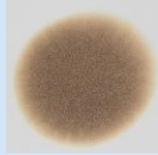


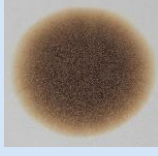


	B0	B10	B24	B50	B75	B100	
LSA							SVO①
							SVO②
							SVO③
LSC							SVO①
							SVO②
							SVO③

# 6. 混合安定性試験

## (4) 異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性

- 4種類のバイオ燃料とLSCによる混合安定性試験を行った。
- いずれのバイオ燃料もB24に調合し，それらを同じ割合で混合した。

(a) 単一のバイオ燃料とLSCの混合燃料 (B24)

時間	SVO④	SVO⑤	廃食油 FAME	ジャトロファ FAME	備考
0h					すべて問題ないと判断される (評価No.1)。
100h					すべて問題ないと判断される (評価No.1)。
200h					すべて問題ないと判断される (評価No.1)。
500h					すべて問題ないと判断される (評価No.1)。

# 6. 混合安定性試験

## (4) 異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性




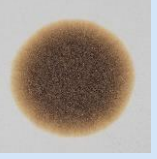





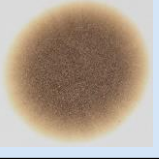






(b) 2種類のバイオ混合燃料（B24）を継ぎ足した場合

時間	SVO④ + SVO⑤	SVO④ + 廃食用油 FAME	SVO④ + ジャトロファ FAME	SVO⑤ + 廃食用油 FAME	SVO⑤ + ジャトロファ FAME	廃食用油 FAME + ジャトロファ FAME	備考
0h							すべて問題ないと判断される（評価No.1）。
100h							すべて問題ないと判断される（評価No.1）。
200h							すべて問題ないと判断される（評価No.1）。
500h							すべて問題ないと判断される（評価No.1）。

# 6. 混合安定性試験

## (4) 異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性

(c) 3~4種類のバイオ混合燃料 (B24) を継ぎ足した場合

時間	SVO④ +SVO⑤ +廃食油FAME	SVO④ +SVO⑤ +ジャトロファFAME	SVO⑤ +廃食油FAME +ジャトロファFAME	SVO④+⑤ +廃食油AME +ジャトロファFAME	備考
0h					すべて問題ないと判断される (評価 No.1)。
100h					すべて問題ないと判断される (評価 No.1)。
200h					すべて問題ないと判断される (評価 No.1)。
500h					すべて問題ないと判断される (評価 No.1)。

## (5) 試験結果のまとめ

- ① 海上試験に用いたSVOとLSC重油とA重油の混合安定性試験を実施した結果、高温状態で長時間保管した場合（80℃で1000h）であっても、安定性の悪化は確認されなかった。
- ② 異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性試験を行った結果、A重油およびLSC重油との混合油ともに、安定性の悪化は確認されなかった。

## (6) 試験結果を踏まえた推奨事項

- 長時間貯蔵時や燃料切り替え時にバイオ燃料とLSC重油とが配管内で混合する際など、スラッジが発生する可能性がある。また、バイオ燃料等の軽質燃料は配管の洗浄効果があると言われており、既に配管等に蓄積されていたスラッジが流出する可能性がある。すなわち、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。【2022年度試験結果より】

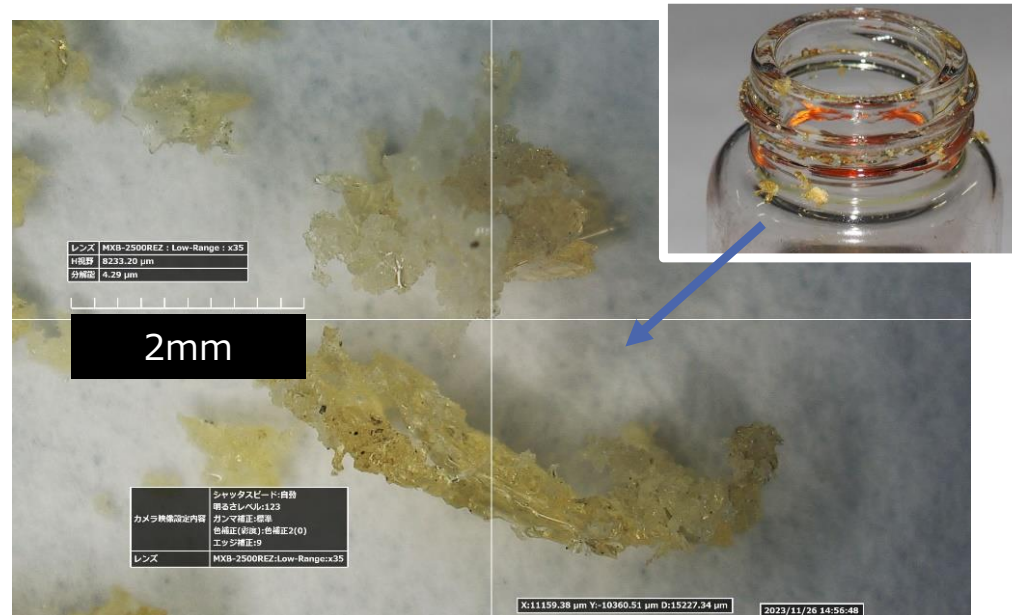


# 7. 析出物・スラッジの発生

③ 新規

## (1) 目視による析出物・スラッジの確認

- 混合安定性の悪化は確認できないものの、SVOとA重油の混合油を高温条件80℃で1000h経過後、容器上端に黄白色の固形物が確認された。
- 同様の固形物は、SVO単体の長期高温保管時にも現れている。
- これらはフィルタの詰まりやプランジャの固着などのトラブルの要因となり得る。



SVO-A重油との混合油の析出物 (80℃, 1000h)

# 7. 析出物・スラッジの発生

③ 新規

## (2) 低温条件における固形物の析出

- 一部のバイオ燃料において、B100およびバイオ混合油を低温状態（例えば-5℃）とした場合、燃料の一部が分離する現象や表面のみがやや固くなる現象などが確認された（2022年度）。
- 一部のバイオ燃料とLSAの混合油を0℃以下で保管した場合、B100では全体が固まり、B75では液体と固体に分離するなどの現象が確認された（目視のため詳細は不明）。
- バイオ燃料を寒冷地で使用する場合、注意する必要がある。



低温条件下における分離（2022年度）



低温条件下におけるSVO-LSA混合油（約0℃）

## (3) 長期保管時の析出物・スラッジ

- 1年程度，容器内で常温保管をしていた一部のバイオ燃料とLSC重油の混合油において，容器の底部にグリース状の堆積物が確認された。
- 1年程度，容器内で常温保管をしていた一部の廃食油FAMEにおいても，容器の底部に白色の析出物が確認された。
- これらはフィルタの詰まり，あるいは燃料噴射弁やプランジャの固着などのトラブルの要因となり得る。



(a) LSC混合油の堆積物（常温，1年間）



(b) 廃食油FAMEの析出物（常温，1年間）

# 7. 析出物・スラッジの発生

③ 新規

## (4) 容器内におけるバイオ燃料の保管

- バイオ燃料を長期保存した際の課題を調べるため、バイオ燃料を小型の金属製容器に長時間保管し、状態を確認した。
- サンプル油には、廃食油FAME①とSVO④の2種類を使用し、それぞれ水なしと水を約1wt%添加した状態とする。さらに、常温（25℃）および高温環境（80℃）の2条件において約1000h保管した。



鉄鋼材料製容器内におけるバイオ燃料の保管



- ※ 寸法90mm×60mm×深さ18mm程度のブリキ製容器に、半分程度のサンプル油を入れた。
- ※ 保管時は、簡易的な蓋をはめた状態としている。

# 7. 析出物・スラッジの発生

③ 新規

## (4) 容器内におけるバイオ燃料の保管

- それぞれのバイオ燃料の保管状況による違いが確認された。

	常温保管 (1000h)		80℃保管 (1000h)	
	水なし	水あり (約1wt%)	水なし	水あり (約1wt%)
廃食油FAME①	 <p>目視による変化は確認されない。</p>	 <p>目視による変化は確認されない。</p>	 <p>サンプル油がわずかに変色している。</p>	 <p>サンプル油が変色し、容器底面がわずかに変色している。</p>
SVO④	 <p>細かい微粒子が析出している (詳細不明)。</p>	 <p>サンプル油中に多くの有色物質が確認できる。</p>	 <p>サンプル油がガム状に固化している。</p>	 <p>目視による変化は確認されない。</p>

# 7. 析出物・スラッジの発生

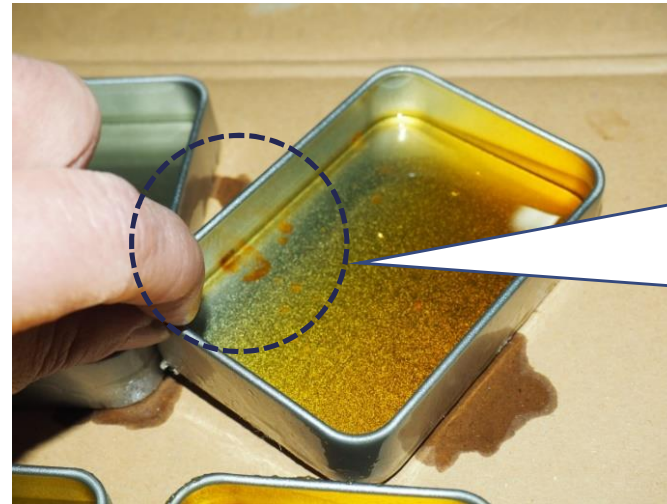
③ 新規

## (4) 容器内におけるバイオ燃料の保管



容器の底に、  
細かい微粒子  
が析出している  
(詳細不明)。

SVO④-水なし-常温



サンプル油が変色している。  
わずかではあるが、容器の底面が茶褐色に変色している  
(さびまたは腐食)。

FAME①-水あり-80℃



サンプル油中に  
多くの有色物質が確認できる  
(詳細不明)

SVO④-水あり-常温



サンプル油がガム状に固化している。  
容器を傾けてもサンプル油は流れない。

SVO④-水なし-80℃

## 7. 析出物・スラッジの発生

### (5) 試験結果のまとめ

- ① 混合安定性の悪化は確認できない燃料油であっても、バイオ燃料とA重油の混合油を高温条件80℃で1000h経過後、容器上端に黄白色の固形物が確認された。
- ② 1年程度、容器内で常温保管をしていた一部のバイオ燃料とLSC重油の混合油では容器の底部にグリース状の堆積物、廃食油FAMEでは析出物が確認された。
- ③ 一部のバイオ燃料とLSAの混合油を0℃以下の低温状態で保管した場合、B100では全体が固まり、B75では液体と固体に分離するなどの現象が確認された。

### (6) 試験結果を踏まえた推奨事項

- バイオ燃料と重油を混合した直後の混合安定性に問題がない場合であっても、バイオ燃料または混合油を長期に保管した場合、あるいはバイオ燃料を低温状態とした場合など、バイオ燃料由来の固形物が析出することがある。トラブルを未然に防ぐためには、バイオ燃料を長期に保管しないこと、フィルタの状態等を定期的を確認することが重要である。

# 8. バイオ燃料の酸化劣化試験

## (1) バイオ燃料の酸化劣化

- バイオ燃料の酸化劣化の指標（試験方法）として、酸価（Acid number）や酸化安定性（Oxidation stability）がある。
- 酸化劣化が進むと、遊離脂肪酸が燃料システムの金属等を腐食することがあると言われている。

項目	説明（2022年度ガイドラインより）
酸価	酸価は油の中の酸性成分（弱酸成分と強酸成分）の全量、すなわちナフテン系、添加剤中の酸性物質、使用中に生成した有機酸などすべてを合せた量を意味し、全酸価（Total acid number, TAN）とも呼ばれる。燃料1gに含まれる酸性物質の量を中和するのに必要な水酸化カリウム（KOH）の量（mg）で評価する。FAME（B100）では主に遊離脂肪酸量を推定するために利用されている。酸価は燃料が酸化劣化すると大きくなるが、船用重油には硫黄分が含まれているため、自動車用燃料に比べ酸価は比較的高い値を示す。FAME、SVOにおいては、デポジット形成や金属の腐食などを引き起こす酸化劣化の指標として利用できることが知られている。
酸化安定性	FAME、SVOは、時間の経過とともに劣化し、ガム状のポリマーや不溶性物質などの不純物を形成し、配管やエンジンにデポジットが形成される可能性がある。また、生成される有機酸は金属材料の腐食やゴム・樹脂の劣化の原因となる。したがって、使用前に燃料を長期間保管したりせず、比較的短期間で使用することが推奨される。酸化防止剤を早い段階で添加することで、劣化を抑え、保管期間を延長できる可能性がある。HVOについては、2重結合を含まないため、酸化安定性は良好である。バイオ燃料の酸化安定性は、JIS K 2390では、EN 14112またはEN 15751に従い、ランシマツ試験機で酸化誘導時間を測定することが要求されている。

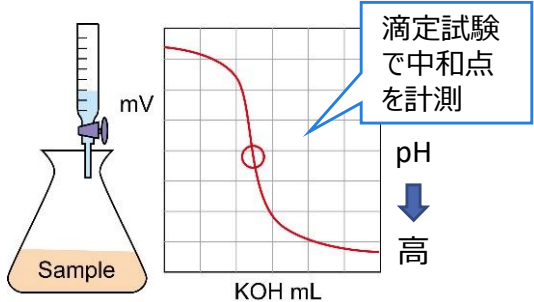
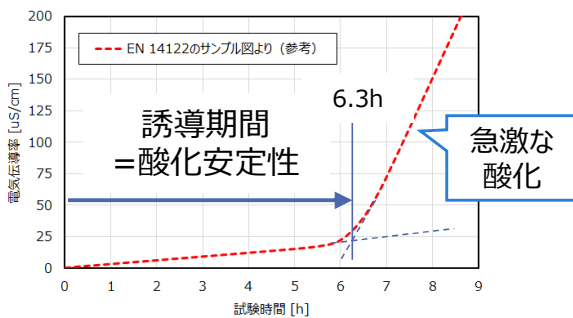
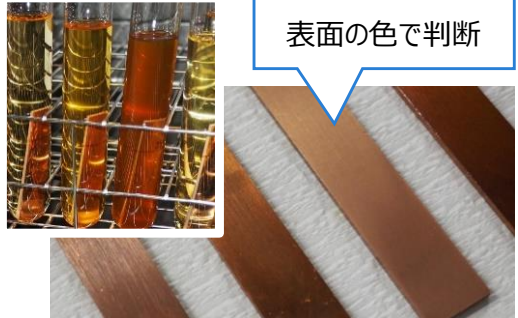


# 8. バイオ燃料の酸化劣化試験

③ 新規

## (2) 酸価・酸化安定性・腐食試験

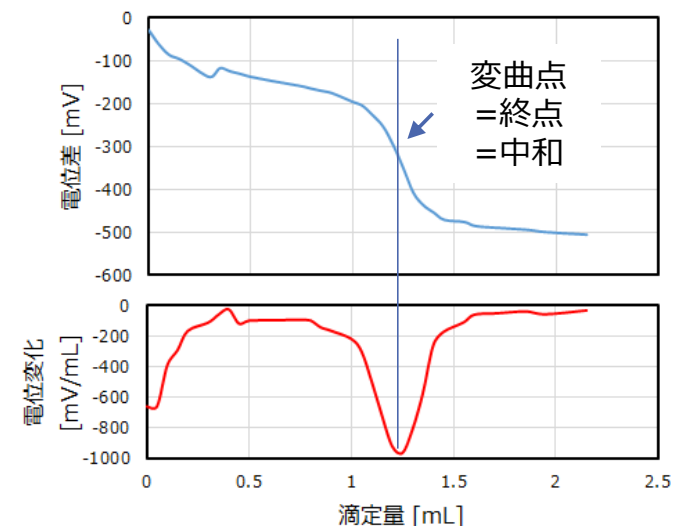
- 酸価は計測時点におけるサンプル油の物性であり，バイオ燃料の場合，一般に時間経過に伴って増加する。
- 酸化安定性試験はサンプル油の劣化特性を短時間で計測するための加速試験であり，通常は燃料製造直後に試験を行う。

酸価	酸化安定性	腐食試験
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 酸価は，酸化の状態を評価する際に用いられる物性値であり，試料1gを中和するのに必要な水酸化カリウムのmg数と定義されている。</li><li>✓ バイオ燃料の酸価は，光・空気・水分などの接触や高温保管によって上昇することが知られている。</li></ul> 	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ EN14112で規格化された酸化安定性は，酸化劣化の状態を評価するための加速試験である。</li><li>✓ 決められた条件のもと，急激な酸化が生じるまでの時間を計測する。</li><li>✓ 既に酸化が生じている場合，酸化安定性の数値は低くなる。</li></ul> 	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 腐食試験は，短時間で材料や装置の実使用条件での性能を評価するために行われる。</li><li>✓ 石油製品の腐食試験としては，JIS K 2513に銅板腐食試験方法が規格化されている。</li></ul> 

## (1) 酸価 (Acid number)

- 酸価は、油脂の精製および変質の指標となる数値のひとつであり、試料1g中に含有する遊離脂肪酸、樹脂酸などを中和するのに必要とする水酸化カリウムのmg数と定義されている。
- 船用燃料規格ISO 8217において、C重油の酸価は2.5mg-KOH/g以下とされている。

※ JIS K 2390「自動車燃料－混合用脂肪酸メチルエステル (FAME)」において、酸価の要求品質は0.50mgKOH/g以下とされている。



滴定曲線とその微分曲線の一例

### 【計測原理】

サンプル油を規定で決められた滴定溶剤に溶かし、ガラス電極と比較電極とを用いて、水酸化カリウムの2-プロパノール溶液で電位差滴定する。電位差（またはpH）の読みと、これに対応する滴定量との関係を作図し、電位差の変化から得られる変曲点（右上図において滴定曲線の傾斜が最大となる点）を終点として検出する。

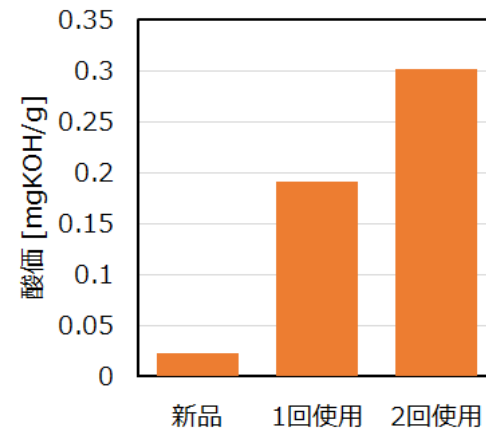
### 【廃食油の酸価】

- 未精製のパーム油やヤシ油などは、原料に含まれる加水分解酵素の力が強いため、一般に酸価が高いと言われている（7～20mgKOH/g程度）。なお、食用油とするときには、酸価をおおよそ0.2～0.5mgKOH/g以下となるように精製されている。
- 精製された油であっても、高温で水と反応するために加水分解が起こり、酸価が上昇する。また、油の酸化に伴って、脂肪酸の炭素鎖が切れてアルデヒドが生成され、さらにその部分がカルボン酸となるなどの反応が起こり、酸価が上昇する。したがって、使用後の食用油（廃食油）の酸価はフレッシュな食用油よりも高まるのが一般的である。

## 【参考】食用油の酸化劣化

- 未開封の食用油（キャノーラ油）を準備し、通常の使用前後の物性の変化を計測した。
- 通常の調理（あじフライ、からあげ）によって、酸価が徐々に増加していくこと、酸化安定性が高まること、動粘度および密度に大きな変化がないことを確認した。

※ 使用したキャノーラ油は菜種油を品種改良した食用油である。食用油には一般的に酸化防止剤が添加されている。食品の揚げ物調理を行うと、食品中のアミノ酸と還元糖が反応し、強い酸化防止作用を持つメラノイジンを生成する。2回使用油は、もとの酸価は未使用油より高いが、メラノイジン生成により酸化安定性が高くなったものと考えられる。

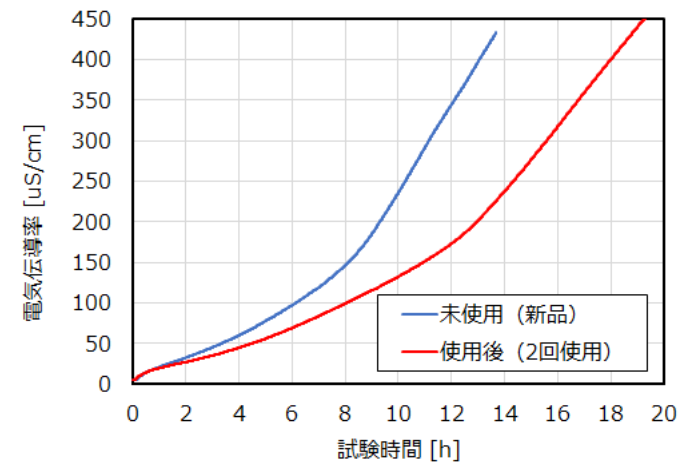


酸価の計測結果

キャノーラ油

### 食用油（キャノーラ油）の酸化劣化

種類・項目	未使用 (新品)	1回使用	2回使用
動粘度@50℃ [cSt]	25.268	25.757	25.642
密度@15℃ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.9203	0.9206	0.9205
酸価 [mgKOH/g]	0.02326	0.19060	0.30133
酸化安定性 [h]	8.7	---	12.9
酸化安定性試験後の酸価 (試験時間)	0.76166 (13.7)	---	1.59835 (24.9)



酸化安定性試験結果

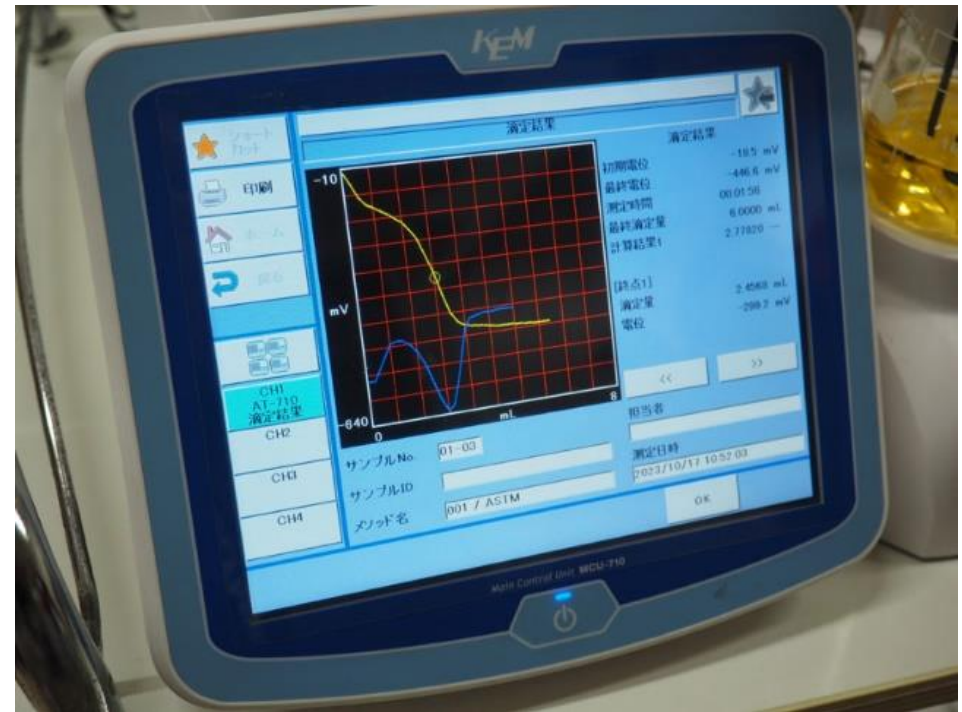
# 8.1 酸価の計測

## (2) 酸価計測器

- ASTM D664およびJIS K2501の電位差滴定法に準拠した酸価計測器（京都電子工業社，電位差自動滴定装置AT-710M）を用いて，各種バイオ燃料等の酸価計測を行った。



酸価計測器の外観



計測画面

# 8.1 酸価の計測

## (3) 計測条件

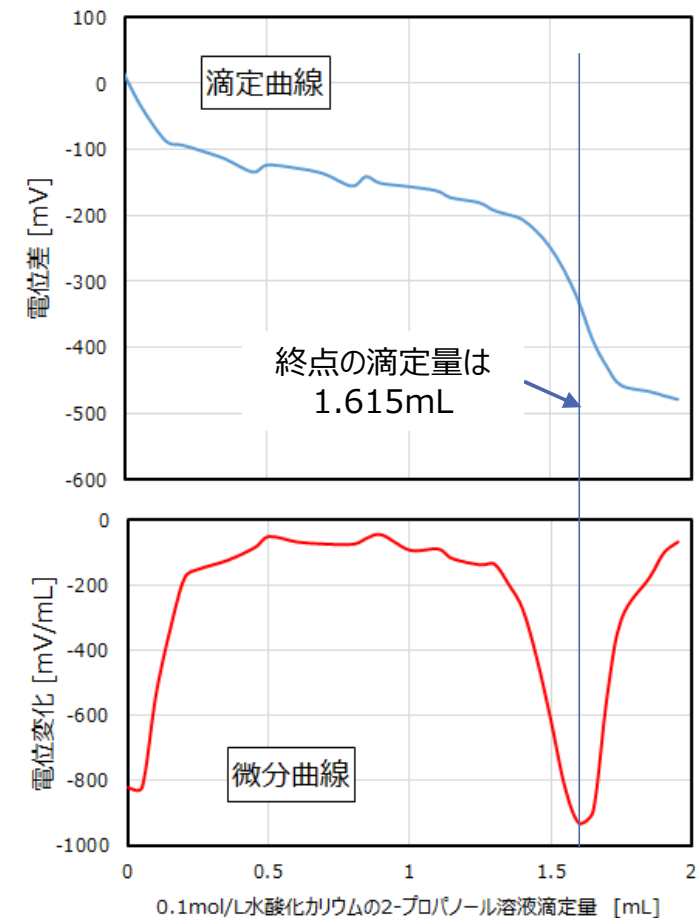
- 酸価の計測方法や計測条件は、JIS K 2501「石油製品及び潤滑油－中和価試験方法」およびASTM D664に規定されている。
- 以下の計測においては、これらの規定を参照して、計測条件を設定している。

※ 以下の計測では滴定溶剤を60mLとしている。また、サンプル油の量に制限があるため、下表のサンプル油量を参考にしつつ、適切な計測結果が得られるように調節している。

試料（サンプル油）のはかり採り量

酸価 [mgKOH/g]	滴定溶剤 125mL	滴定溶剤 60mL
	サンプル油量 [g]	サンプル油量 [g]
0.05を超え1.0以下	20.0±2.0	10.0±1.0
1.0を超え5.0以下	5.0±0.5	2.5±0.25
5.0を超え20以下	1.0±0.1	0.5±0.05
20を超え100以下	0.25±0.02	0.25±0.02
100を超え250以下	0.10±0.01	0.10±0.01

※ JIS K 2501:2003では滴定溶剤125mLだけが規定されている。ASTM D664:2018では滴定溶剤125mLと60mLの両方が規定（推奨）されている。



$$\text{酸価 [mgKOH/g]} = \frac{56.1 \times 0.1 \times \text{滴定量 [mL]}}{\text{サンプル油量 [g]}}$$

滴定溶液のモル濃度が0.1mol/Lの場合、中和点までの滴定量がわかれば、上式により酸価を算出できる。

## (4) 各種燃料油の酸価

- 各種バイオ燃料を入手した後、酸価を計測した。
- 下表のバイオ燃料（B100）の酸価は、入手後の状態であり、製造直後の計測ではない。
- バイオ燃料の酸価は、船用燃料規格ISO 8217におけるC重油の基準2.5mg-KOH/gよりも高いものがある。
- 酸価は金属腐食の指標であり、バイオ燃料を高い混合割合で使用する場合は特に注意する必要がある。

酸価の計測結果（入手後）

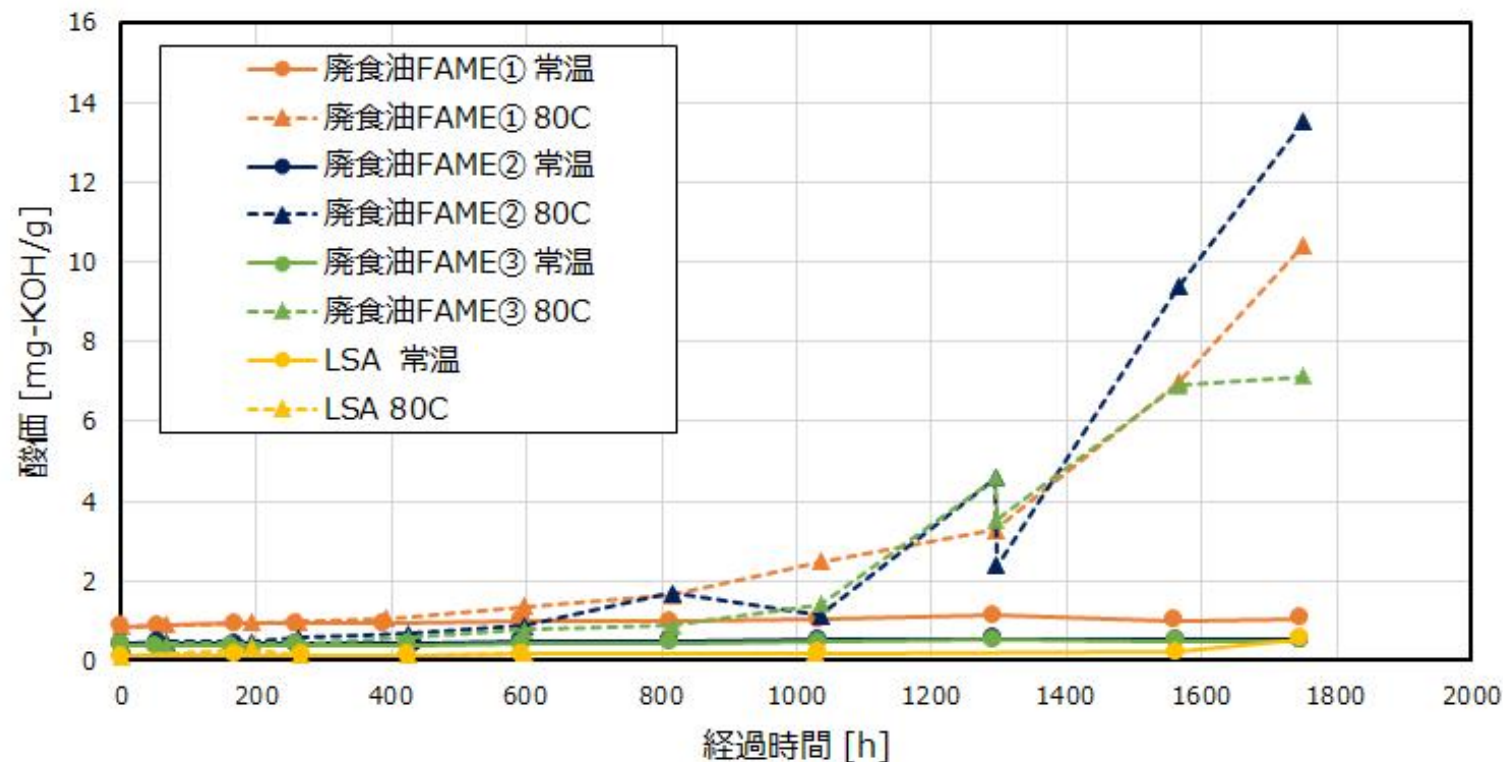
種類・項目	SVO				
	①	②	③	④	⑤
酸価 [mgKOH/g]	2.43173	4.36604	4.41823	1.07793	3.69754

種類・項目	廃食油FAME			ジャトロファFAME	参考	
	①	②	③		A重油	LSC
酸価 [mgKOH/g]	1.08809	0.40726	0.38007	0.99795	0.11285	0.78344

※ SVO①と④は同じ回収業者（地域），SVO②，③および⑤は同じ回収業者（地域）であり，後者の酸価はやや高い。

## (5) 保管温度と経過時間の影響

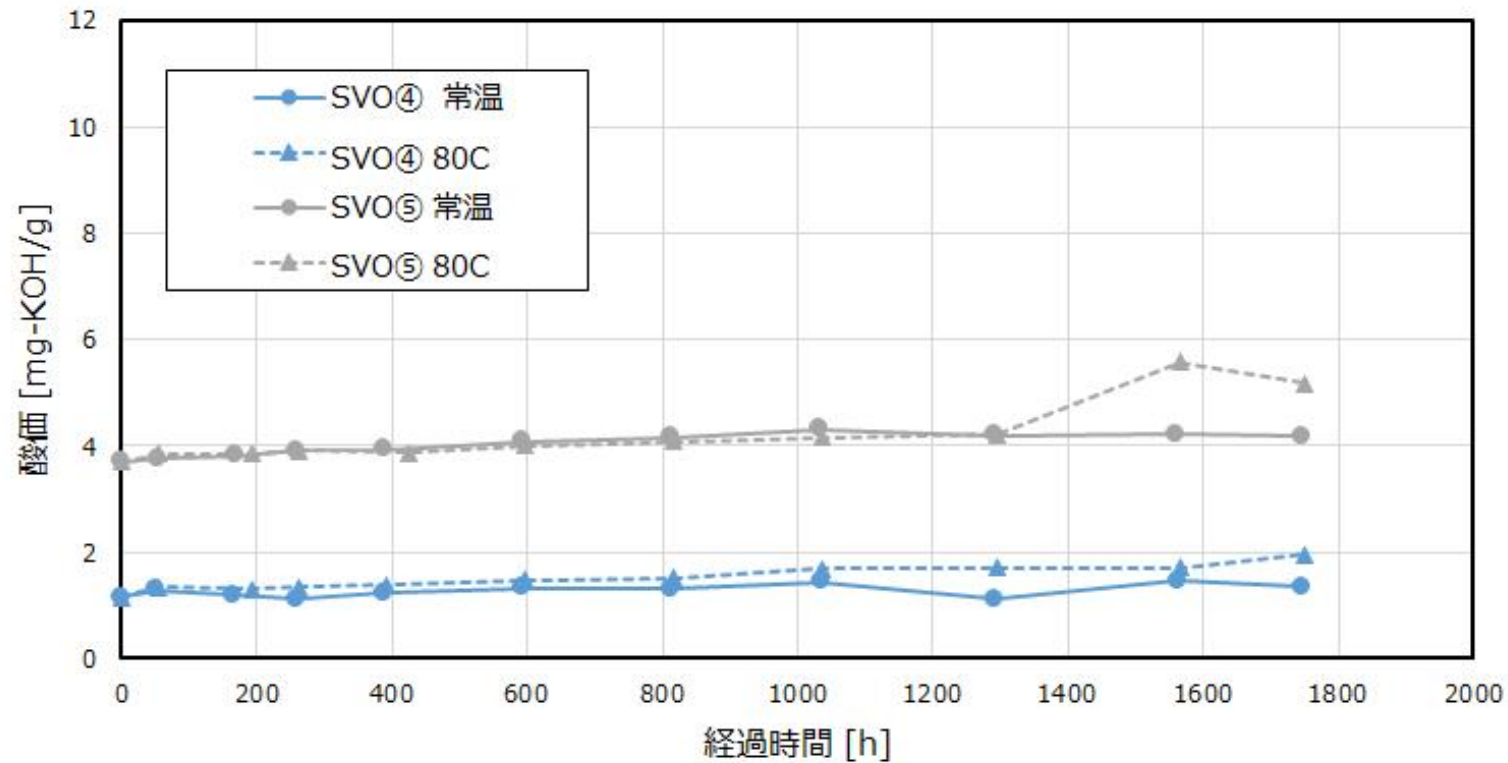
- 6種類のバイオ燃料およびA重油について、常温および80℃の高温条件として、経過時間に対する酸価の変化を計測した。
- 高温条件下の廃食用油FAMEは、経過時間1000hあたりから大幅な酸価の増加が確認された。



保管温度と経過時間の影響 (廃食用油FAME)

## (5) 保管温度と経過時間の影響

- 常温および80℃の高温条件とした2種類のSVOは、1800h程度の経過時間では、明確な酸価の増加は確認されなかった。

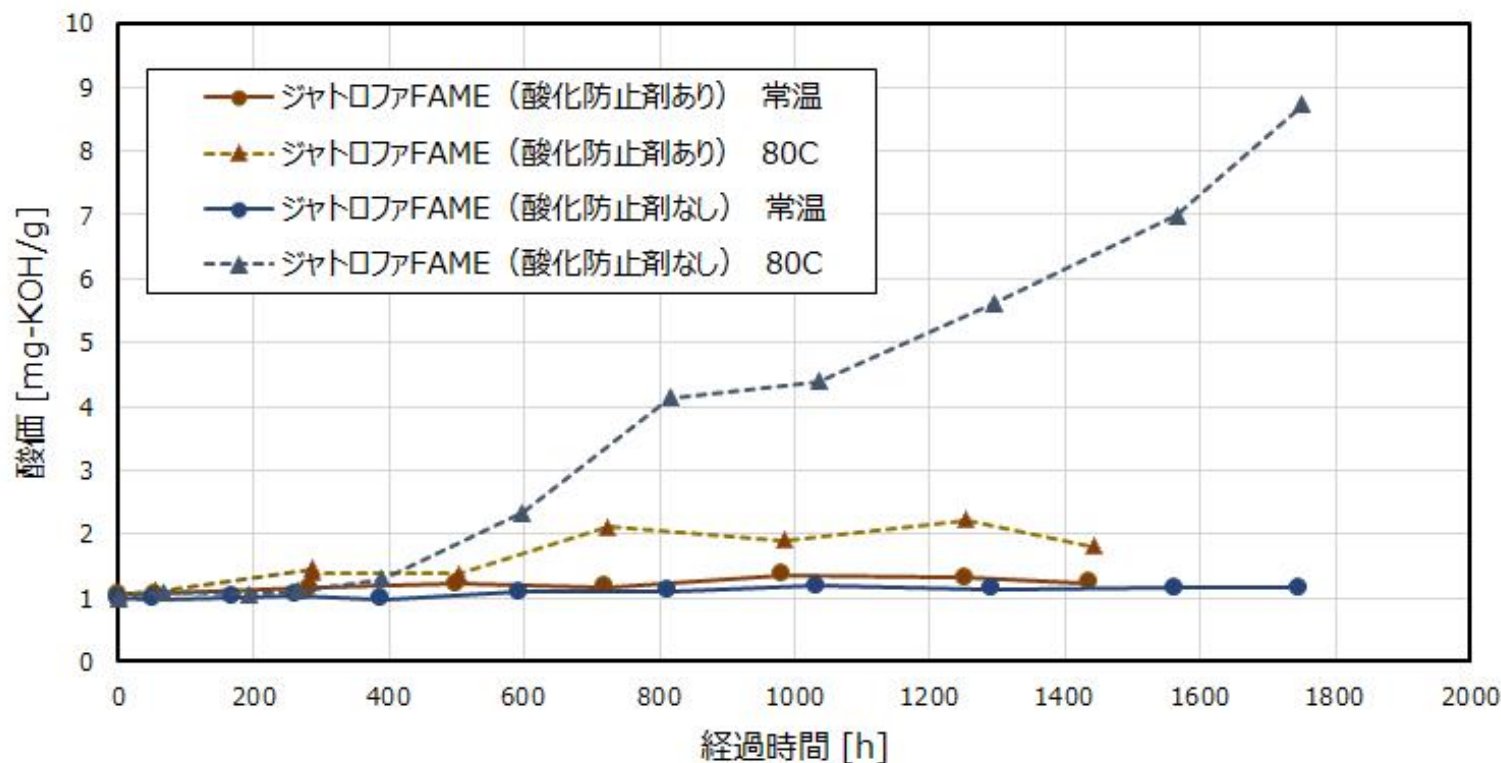


保管温度と経過時間の影響 (SVO)



## (5) 保管温度と経過時間の影響

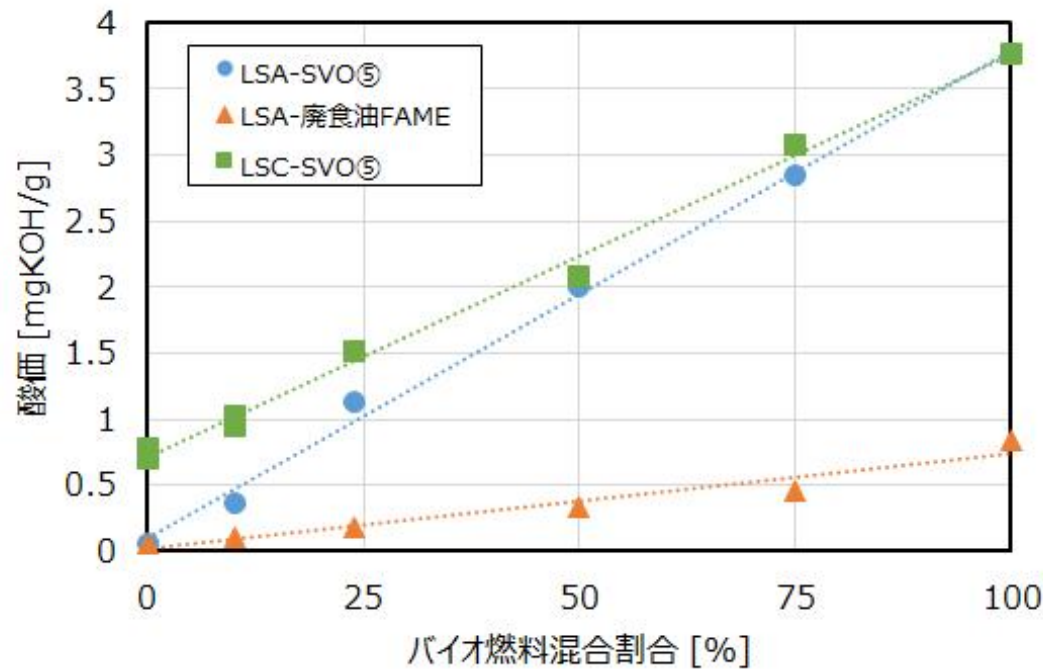
- ジャトロファFAMEにおいて、酸化防止剤の効果を確認した。
- 酸化防止剤を添加しない場合、高温条件下のジャトロファFAMEは経過時間400hあたりから酸価の増加が確認される。一方、酸化防止剤を添加した場合、経過時間1500h程度でも酸価の変化を確認できない。



保管温度と経過時間の影響 (廃食油FAME)

## (6) 混合油の酸価

- 2種類のバイオ燃料（SVO⑤, 廃食油FAME①）を使用し, 重油を混合したときの酸価を計測した。
- 酸価は, バイオ燃料の混合割合が増加するに従って, ほぼ直線的に上昇する。



混合油の酸価計測結果

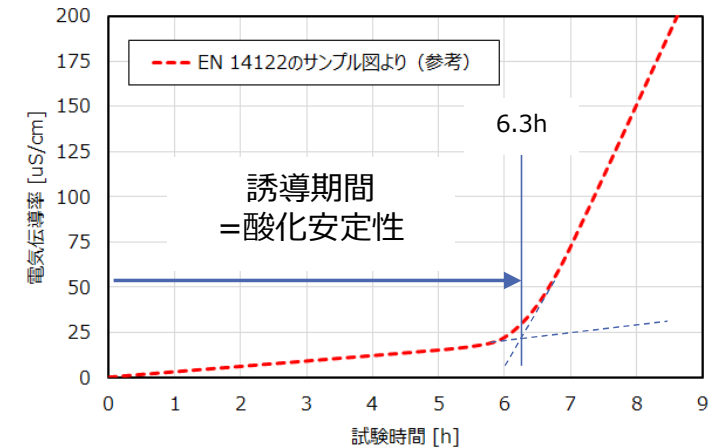
混合油の酸価計測結果

	B0	B10	B24	B50	B75	B100
SVO⑤-A重油	0.05237	0.36037	1.13525	2.00097	2.85038	3.76094
廃食油FAME①-A重油	0.05237	0.10917	0.18071	0.33334	0.46172	1.08809
SVO⑤-LSC	0.78344	0.95289	1.50752	2.07653	3.07764	3.76094

# 8.2 酸化安定性試験

## (1) 酸化安定性 (Oxidation stability)

- 測定を開始した瞬間から酸化生成物の生成が急速に増加し始めるまでの時間を誘導期間 (induction period) という。
- 酸化安定性は、決められた手順に従って決定される誘導期間であり、時間 (単位: h) で表される。
- 計測方法は欧州規格EN 14122に規定されている。



### 【計測原理】

サンプル油を規定で定められた目標温度110℃まで加熱し、乾燥空気を通すことによって、酸化プロセスが生じ、揮発性化合物が生成される。生じた揮発性化合物は空気とともに、蒸留水を入れた計測容器に送られる。計測容器に備えた導電率電極は計測・記録装置に接続されており、蒸留水に吸収された揮発性カルボン酸の解離による導電率の急速な増加に至るまでの時間 (誘導期間) が求められる。この誘導期間が酸化安定性の指標となる。

### 【酸化プロセスの詳細】

欧州規格EN 14112においては、酸化プロセスを2つの段階に分けて酸化安定性を求める (右上図参照)。

- 第1段階 (誘導期間) は、酸素によって過酸化物が生成されるゆっくりとした反応を特徴とする。
- 第2段階は、過酸化物が生成されるだけでなく、高温条件下において過酸化物が解離する急速な反応を特徴とする。この段階では、アルデヒド、ケトン、低級脂肪酸などが生成される。

欧州規格EN 14112は、酸化プロセス中に生成される揮発性の解離生成物 (主にギ酸と酢酸) による導電率の変化を測定する方法である。

### 【電気伝導率 (導電度)】

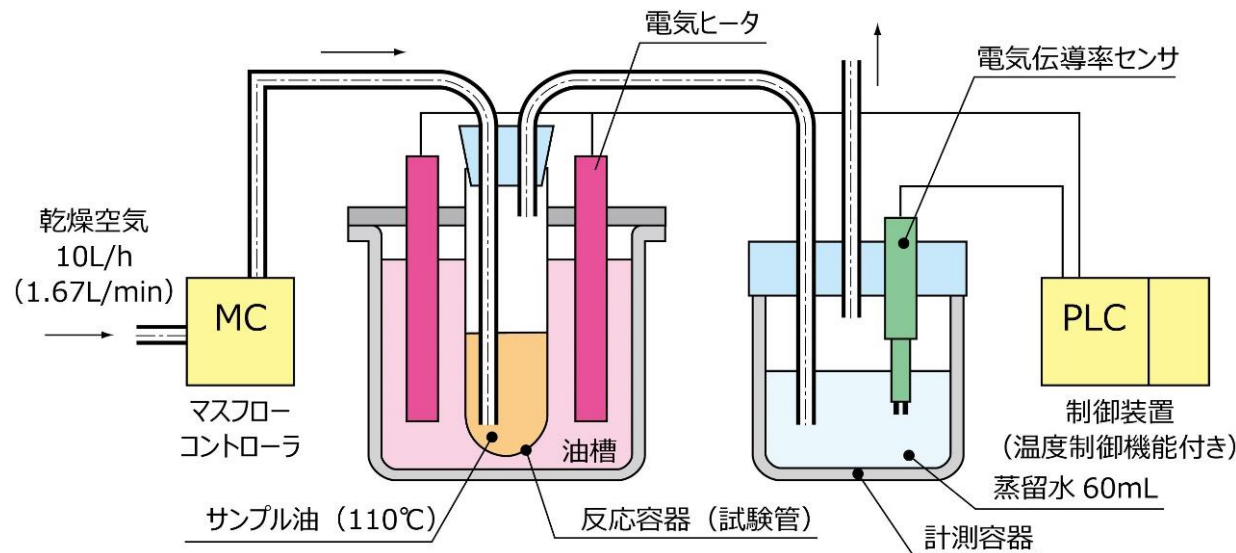
固体や液体などの電流の流れやすさを示す物性値である。単位は $\text{S/m}$  (ジーメンズ・パー・メートル) で表され、 $\text{S}$ は電気抵抗の逆数 ( $\text{S}=1/\Omega$ ) である。純水の電気伝導率は $5\mu\text{S/cm}$ 以下、水道水の電気伝導率は $100\sim 300\mu\text{S/cm}$ 程度である。

# 8.2 酸化安定性試験

## (2) 酸化安定性試験装置

- 欧州規格EN 14122に記載されているランシマット法を参照して，試験装置を構築した。

- ◆ サンプル油を入れた反応容器を温度制御された油槽（110℃）に設置する。
- ◆ 乾燥空気はマスフローコントローラを介して反応容器に送られる（10L/h）。反応容器から排出される気体は電気伝導率センサを取り付けた計測容器に送られる。
- ◆ 電気伝導率はPLC（Programmable Logic Controller）によって計測・記録される。



酸化安定性試験装置（ランシマット法）



反応容器部の外観



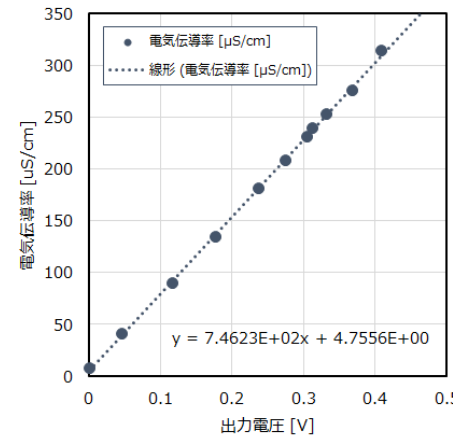
計測容器の外観

# 8.2 酸化安定性試験

## (3) 酸化安定性試験装置の検証と解析

### (a) 電気伝導率センサ

- 試験に先立って、既存の電気伝導率計測器を用いて、試験に使用する電気伝導率センサの検証を行った。
- 電気伝導率センサは、電気伝導率0～300 μS/cmの範囲において、ほぼ線形の実出力電圧であることを確認した。



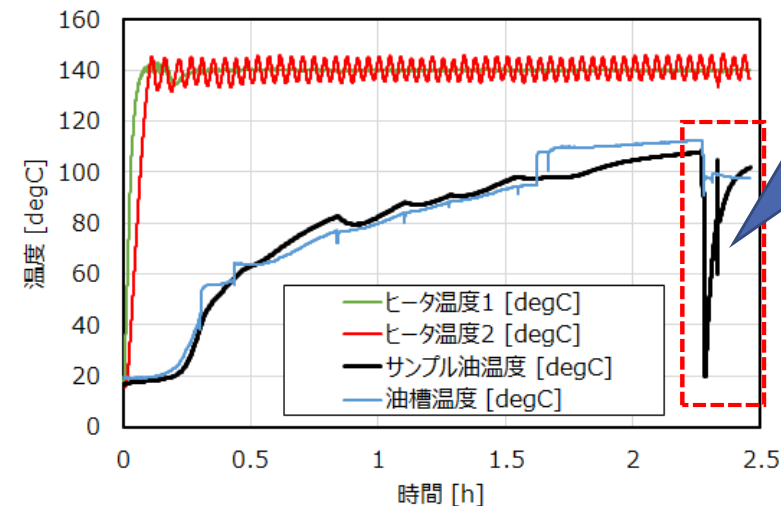
センサの検定結果



検定に使用した計測器

### (b) サンプル油温度

- 電気ヒータの設定温度を140℃に制御することで、サンプル油温度が約110℃となることを確認した。
- 油槽温度とサンプル油温度は概ね同程度になることを確認した。ただし、油槽温度は上下方向に温度変化が生じやすいので注意が必要である。
- サンプル油温度（油槽温度）が110℃まで上昇する時間は、加熱開始から2h程度である。
- 試験装置の都合により、酸化安定性試験においてサンプル油温度は計測しない。油槽温度を確認しながら試験を進める。



温度変化の計測結果

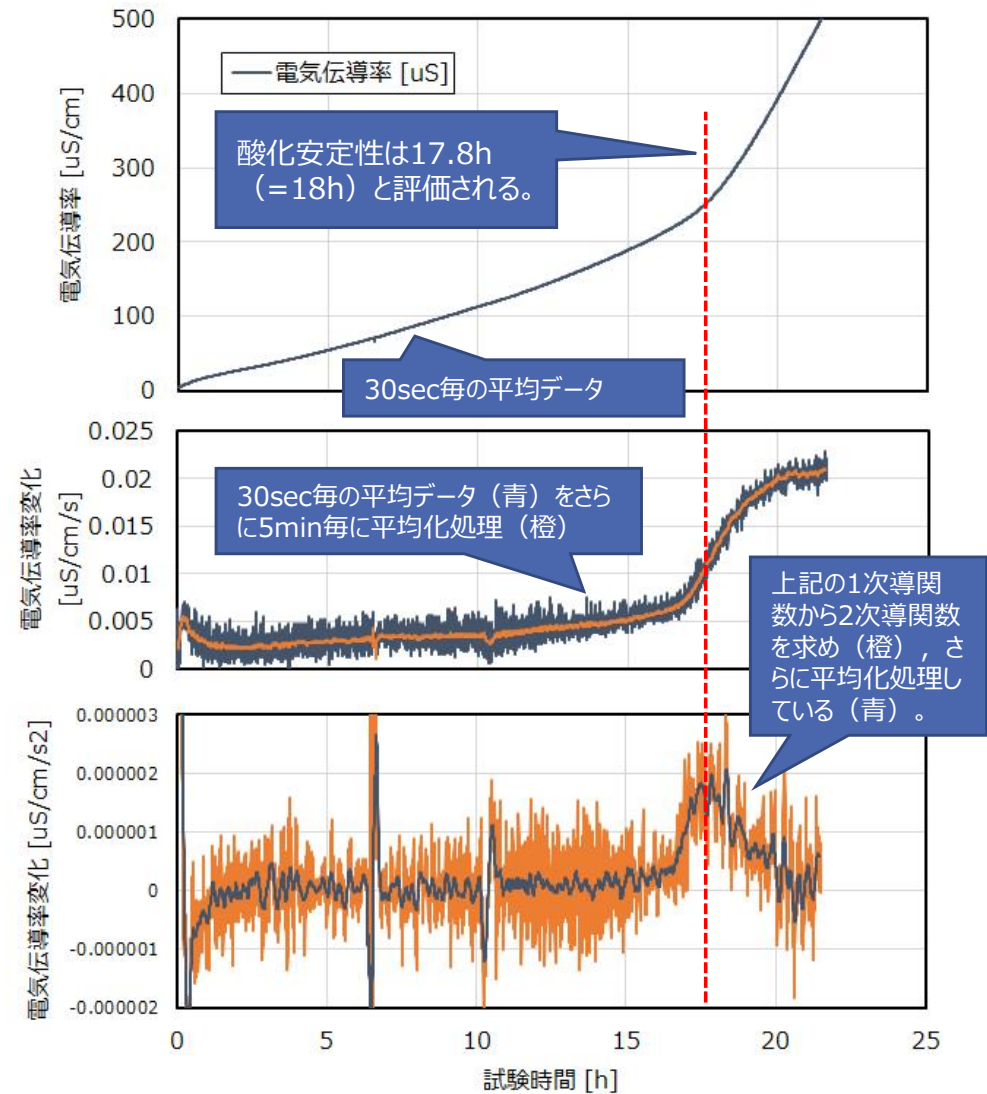
# 8.2 酸化安定性試験

## (c) 計測データの解析

- EN 14122においては、電気伝導率の2次導関数の最大値を使用して誘導期を計測できるとされている。
- ただし、複数の平均化処理をしないと、2次導関数の最大値を評価できない。
- 現時点で自動計算は難しいため、計測後の手作業によって誘導期を求める。



PLC計測画面



酸化安定性試験結果の解析例 (廃食油FAME)

## 8.2 酸化安定性試験

③ 新規

### (4) 各種バイオ燃料の酸化安定性

- 7種類のバイオ燃料（B100）および比較のためのA重油を用いて、ランシマツト法による酸化安定性を計測した。
- JIS K 2390「自動車燃料－混合用脂肪酸メチルエステル（FAME）」の品質基準は酸化安定性10h以上であり、この基準を下回るサンプルもあった。
- 酸化安定性試験前後の酸価を計測した結果、試験後の酸価は、いずれのバイオ燃料も増加している。

※ 下表の酸化安定性は、バイオ燃料の製造直後の計測結果ではない。保管状況等によっては、既に酸化劣化していたサンプル油もあり得る。その場合、酸化安定性は製造直後と比べて低く計測される。

※ 酸化安定性は酸化防止剤の添加によって大きく異なる。それぞれのバイオ燃料において、酸化防止剤の種類や添加量などの詳細は不明である。

酸化安定性の計測結果（B100）

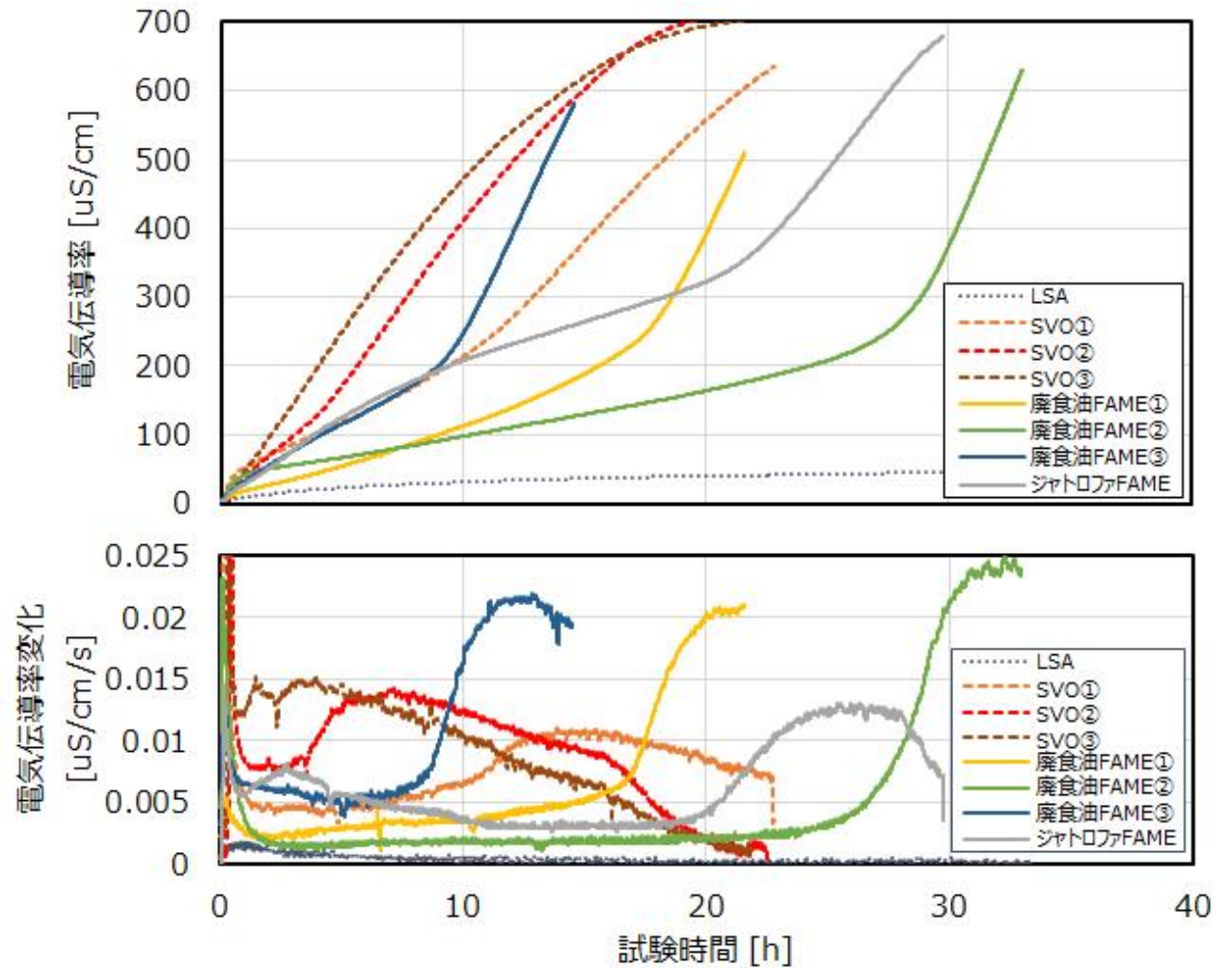
種類・項目	SVO			廃食油FAME			ジャトロファ FAME	A重油 (比較用)	
	①	②	③	①	②	③			
酸化安定性 [h]	11.3	4.6	(1.4)	17.8	29.1	9.3	21.8	---	
試験時間 (110℃) [h]	22.8	22.6	21.9	21.6	33.0	14.6	29.8	18.4	
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	2.43173	4.36604	4.41823	0.86028	0.40726	0.38007	1.09238	0.11285
	試験後	3.44826	5.62585	5.59598	2.41052	2.15620	1.94911	4.10212	0.40567

※ 比較のために使用したA重油は、同一試験における電気伝導率の変化はわずかであり、酸化安定性を計測できなかった。

## (4) 各種バイオ燃料の酸化安定性

- 7種類のバイオ燃料は、酸化安定性の数値だけでなく、誘導期間における電気伝導率変化（反応速度）も大きく異なる。
- 各種バイオ燃料の酸化劣化の特性は様々であり、SVO、FAMEといった製造方法による明確な違いは確認されなかった。

※ 今回の試験に使用した廃食油FAME①～③は、他のバイオ燃料と比べて、誘導期間が終了した後の反応速度（電気伝導率変化）が大きい。その要因が、製造方法によるのか、酸化防止剤によるのかは判断できない。



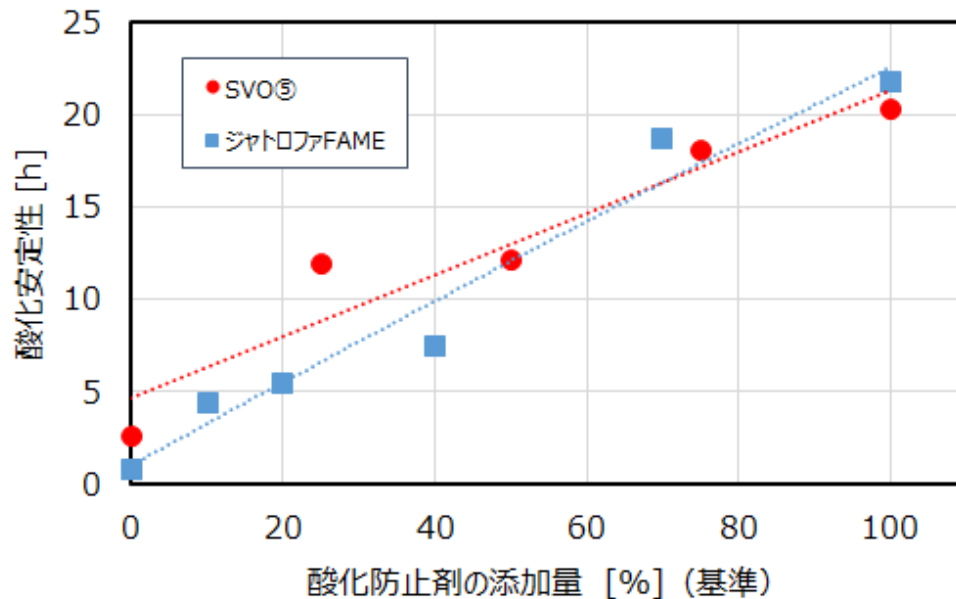
各種バイオ燃料の酸化安定性の計測結果 (B100)



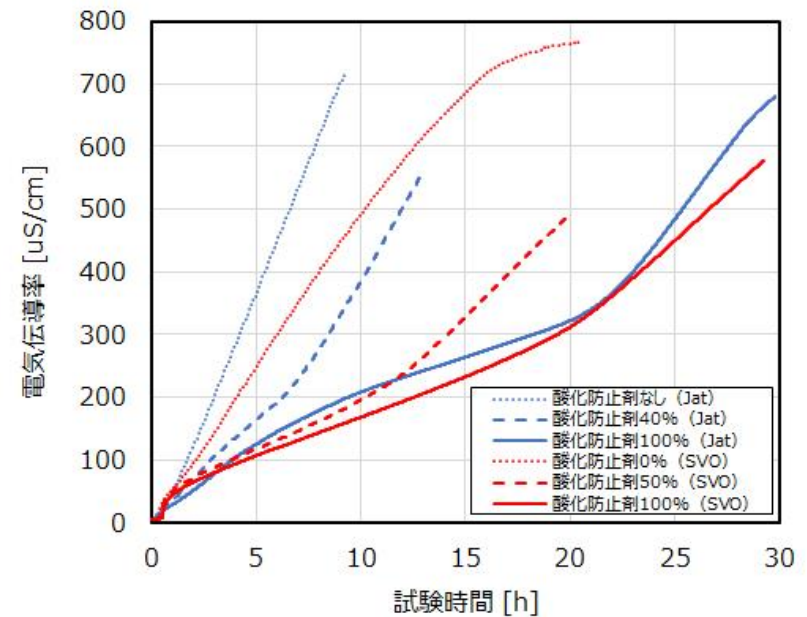
## (5) 酸化防止剤の影響

- バイオ燃料には酸化防止剤の使用が推奨されている。
- 酸化防止剤を添加しない状態で入手できたジャトロファFAMEと入手時の酸化安定性が低かったSVO⑤を用いて、酸化安定性試験によって酸化防止剤の効果を確認した。
- 酸化防止剤の添加量を減らすほど、酸化安定性は低下する傾向がある。

※ 酸化防止剤の添加量は、個々のサンプル油の特性に合わせて、基準値（100%）を設定した。



酸化防止剤添加試験結果

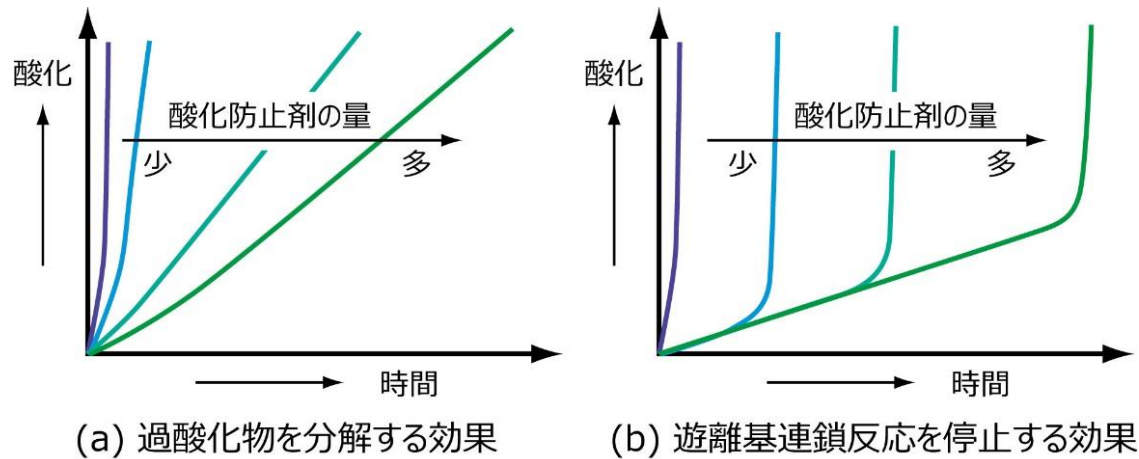


試験結果の一例

# 8.2 酸化安定性試験

## 【解説】酸化防止剤の影響

- 酸化防止剤は、過酸化物やラジカル（遊離基）と反応して、安定な物質にすることで、油の酸化を防ぐものである。
- 炭化水素は酸素が存在すると、光や熱によって結合が切れ、過酸化物が生じ、不安定な過酸化物は最終的に解離し、ラジカルと呼ばれるものになる。ラジカルは、その名のとおり非常に反応性が高く、連鎖反応が起き、炭化水素から脂肪酸などの酸性物質を生じる。そのため、酸化防止剤の効果は、大きく分けて、過酸化物を分解する効果と、ラジカルの連鎖反応を停止する効果がある。
- 酸化防止の原理は、酸化防止剤自身から生じるラジカルによって、過酸化物を分解したり、ラジカルを消滅させたりするものであり、その遊離基自体が、炭化水素と反応して酸化を過剰に促進するほど活性があるものは不適切であり、逆に安定すぎて過酸化物やラジカルと反応しないものも適切ではない。
- 過酸化物を分解する物質としては、有機硫黄などの硫黄化合物、ラジカル反応を物質するものとしてフェノールなどの芳香族系酸化防止剤が知られているが、酸化を防ぎたい油の性状に合わせて適切な反応性のものを選択し、適量を使用する必要がある。



酸化防止剤の効果

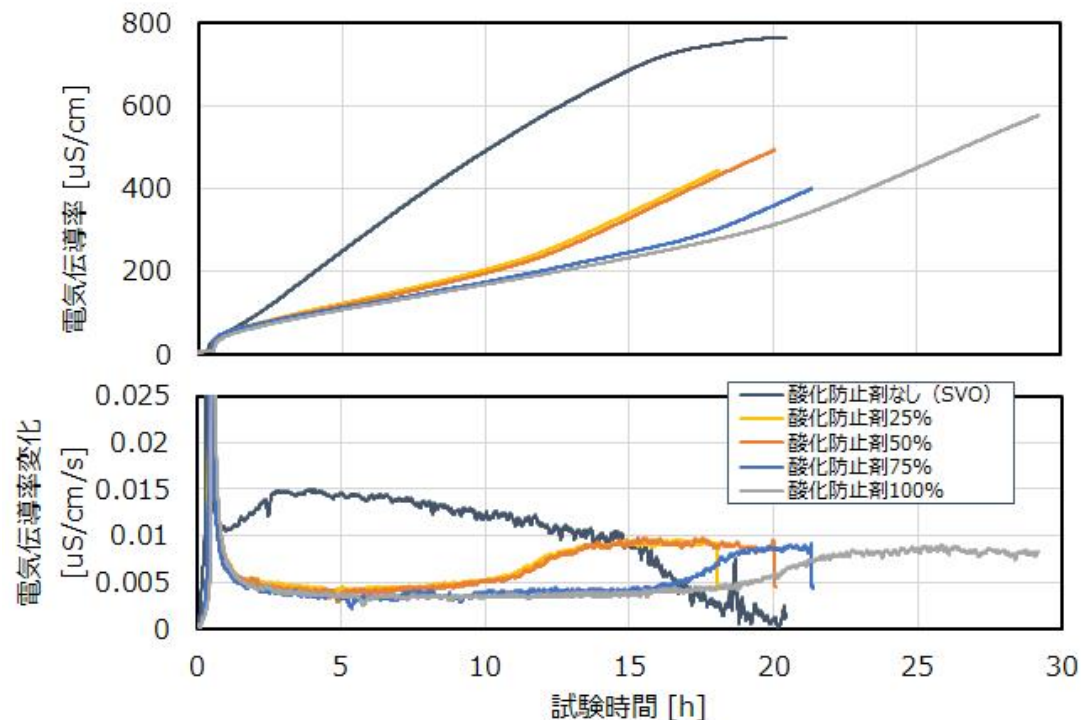
# 8.2 酸化安定性試験

## 【参考】酸化防止剤の影響

- 酸化防止剤の添加によって、明確な誘導期間が延長され、酸化安定性が著しく増加している。
- SVO⑤における電気伝導率は、他のバイオ燃料（FAME）と比べて、誘導期間前後の変化（傾き）がやや小さく、酸化安定性（誘導期間）がややわかりにくい。

酸化防止剤添加試験結果（SVO⑤）

酸化防止剤の添加量		なし	25%	50%	75%	100%
酸化安定性 [h]		2.6	11.9	12.1	18.1	20.3
試験時間 (110℃) [h]		20.4	18.1	20.0	21.4	29.3
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	3.69754	3.86826	3.71151	3.92533	3.72649
	試験後	4.58275	4.32470	4.41159	4.22288	4.43354



酸化防止剤添加試験結果（SVO⑤）

# 8.2 酸化安定性試験

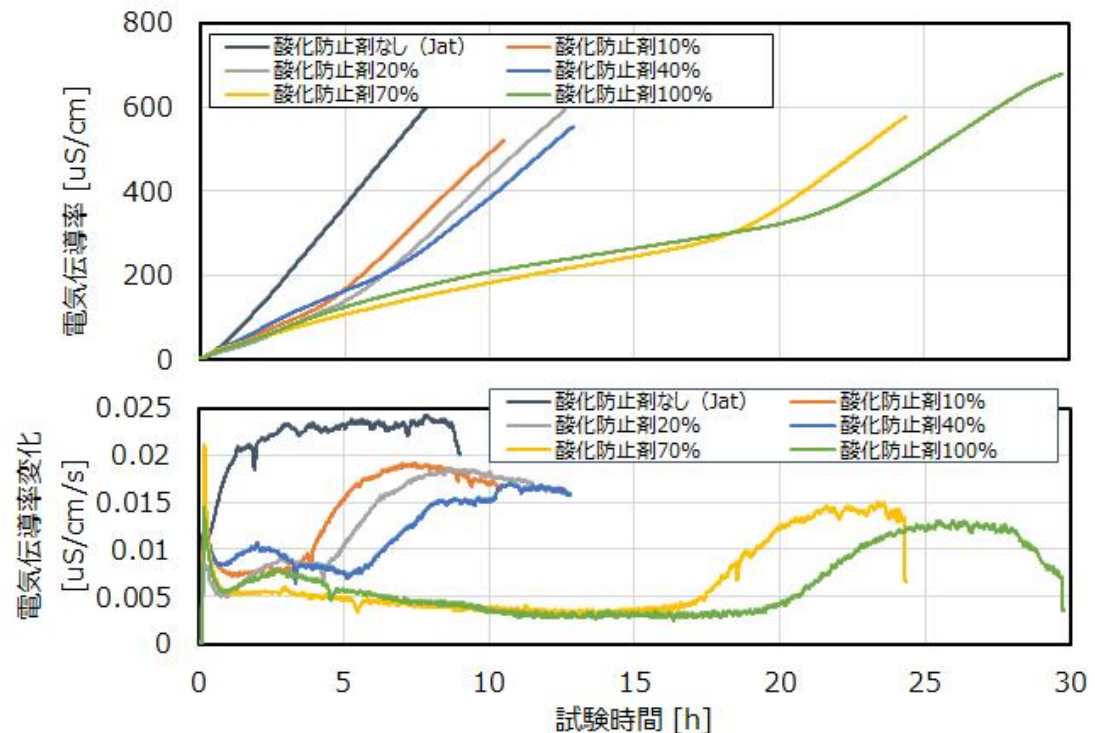
## 【参考】酸化防止剤の影響

酸化防止剤添加試験結果（ジャトロファFAME）

- 酸化防止剤の添加によって、明確な誘導期間が現れ、酸化安定性が著しく増加している。

酸化防止剤の添加量		なし	10%	20%	40%	70%	100%
酸化安定性 [h]		0.8	4.4	5.4	7.5	18.7	21.8
試験時間 (110℃) [h]		9.3	10.5	12.6	12.9	24.4	29.8
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	0.99795	1.06536	1.08624	1.06798	1.08149	1.09238
	試験後	3.72848	2.69943	3.09151	2.85545	3.22712	4.10212

- ジャトロファFAMEの誘導期間における電気伝導率の変化（傾き）は、廃食油FAMEがほぼ直線的であるのと比べて、やや低下する傾向がある（直線ではない）。



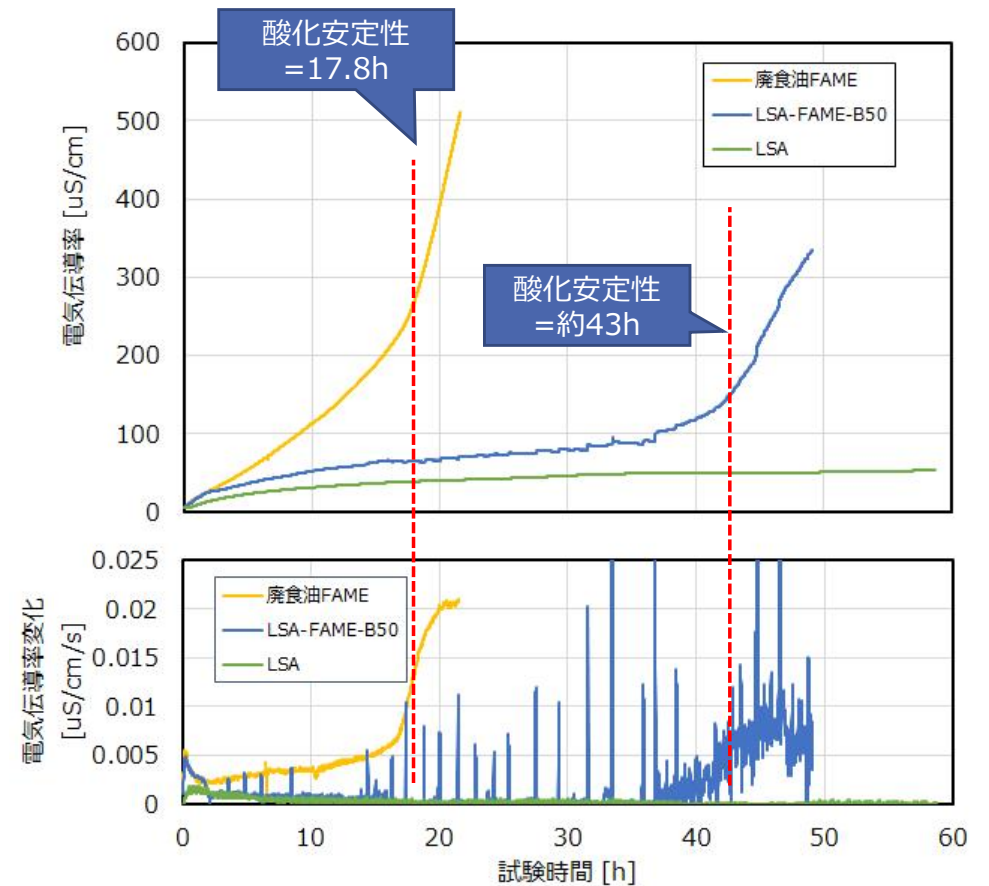
酸化防止剤添加試験結果（ジャトロファFAME）

# 8.2 酸化安定性試験

## (6) 混合油の酸化安定性

- 誘導期間が明確に現れた廃食油FAME①とA重油との混合油（B50），A重油（B0）の酸化安定性試験を行った。
- 廃食油FAME①の酸化安定性が18hであるのに対して，A重油との混合油B50では約43hと評価された。この現象は，A重油中の成分が酸化防止剤として働いたためであると考えられる。
- 試験終了後の酸価が廃食油FAME①と同程度以上に上昇しているため，混合油の場合も長期間の保管には注意が必要である。

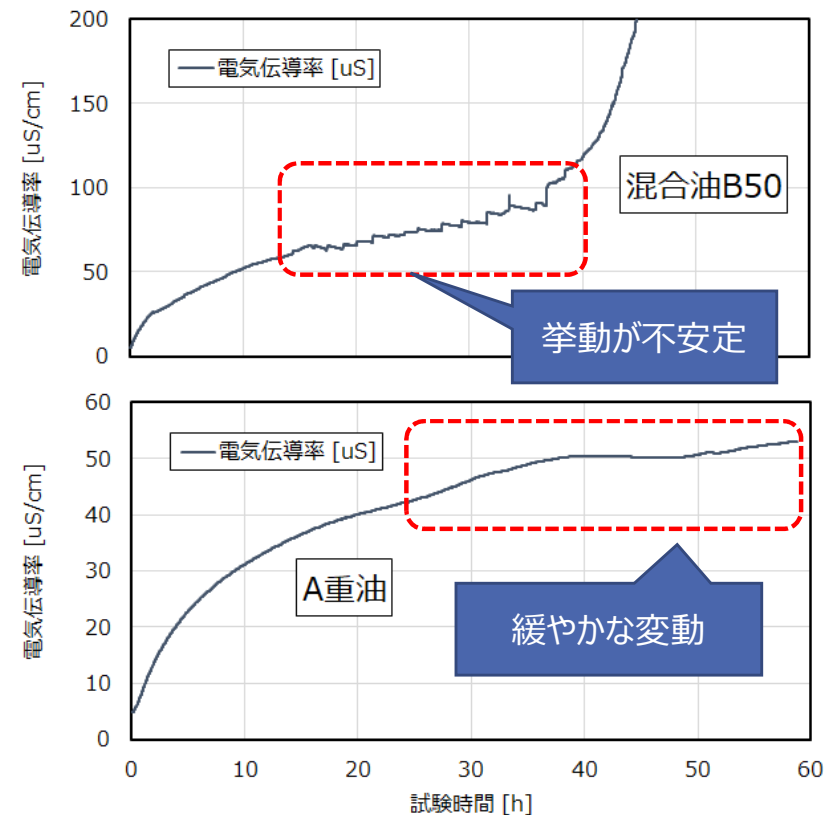
種類・項目		廃食油 FAME①	B50	A重油
酸化安定性 [h]		17.8	(43)	---
試験時間 (110℃) [h]		21.6	49.0	58.7
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	0.86028	0.36377	0.11285
	試験後	2.41052	3.65546	0.13181



廃食油FAME①とA重油との混合油の酸化安定性試験

## 【解説】混合油の酸化安定性

- 廃食用油FAME①とA重油との混合油B50における試験では、試験時間15～38hあたりの電気伝導率の挙動が安定していない。微小ではあるが、電気伝導率の計測値が変動しており、他の試験結果とは明らかに異なる。また、試験終了後の酸価は廃食用油FAME①と同程度以上に上昇している。
- A重油の試験では、試験時間25h以降、電気伝導率の変化（傾き）が長期的に変動しているものの、短期的な変動は極めて小さい。また、約60hの試験時間において明確な誘導時間は確認できず、試験後の酸価の増加もかなり小さい。
- 以上より、廃食用油FAME①の酸化安定性が18hであるのに対して、A重油との混合油B50が約43hとなったのは、A重油中の成分が酸化防止剤として働き、過酸化物の生成を抑制したことが原因であると考えられる。なお、酸化防止剤として働く成分は不明であるが、芳香族や有機硫黄が酸化防止剤となることが知られている。
- ただし、強制的な酸化を続けることで、最終的には過酸化物がラジカル（遊離基）となって、急激な反応が進み、酸解離が起これば電気伝導率が増加する。しかし、前ページの図にあるように、その速度はB100と比べて遅い。このようなA重油の酸化防止剤的な働きは、A重油の組成に大きく依存する。したがって、バイオ燃料の混合油の初期の酸価は、バイオ燃料比率に依存するが、長期間の安定性は、バイオ燃料そのものの性状だけでなく、共存する他の燃料油の影響も受けるため、注意する必要がある。
- また、本試験において、最終的なB50の酸価は、B100の場合と同程度以上まで上がっていることから、混合油の場合も長期間保管には注意が必要である。



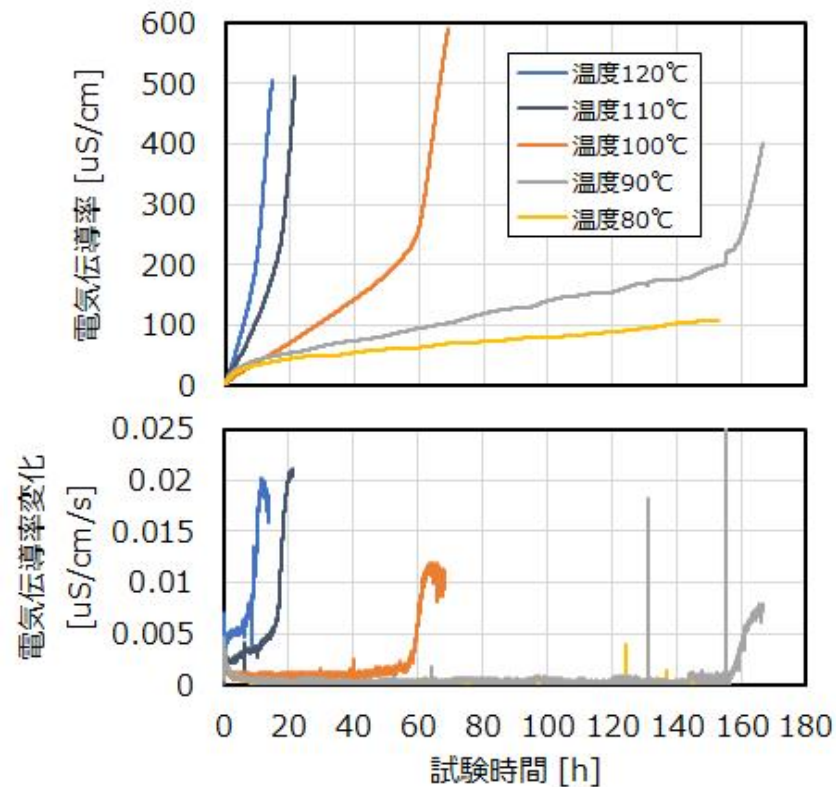
混合油B50とA重油の試験結果

## 8.2 酸化安定性試験

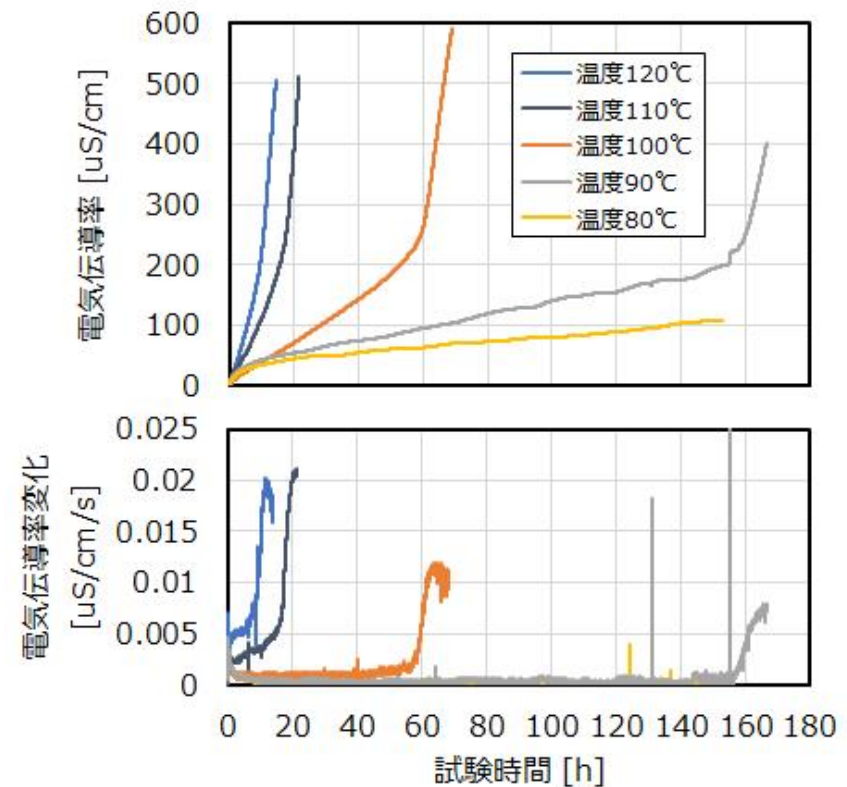
③ 新規

### (7) 試験温度の影響と劣化の予測

- 廃食油FAME①およびSVO④を用いて、酸化安定性試験と同様の方法により、試験温度を80～120℃の範囲で変化させた際の誘導期間を計測した。
- 誘導期間は試験温度の上昇に従って短くなることが確認された。



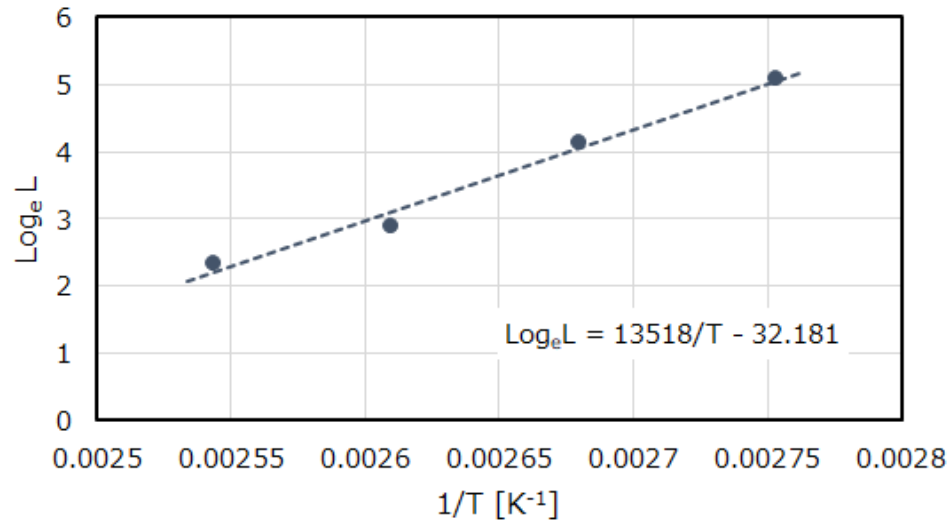
(a) 廃食油FAME①



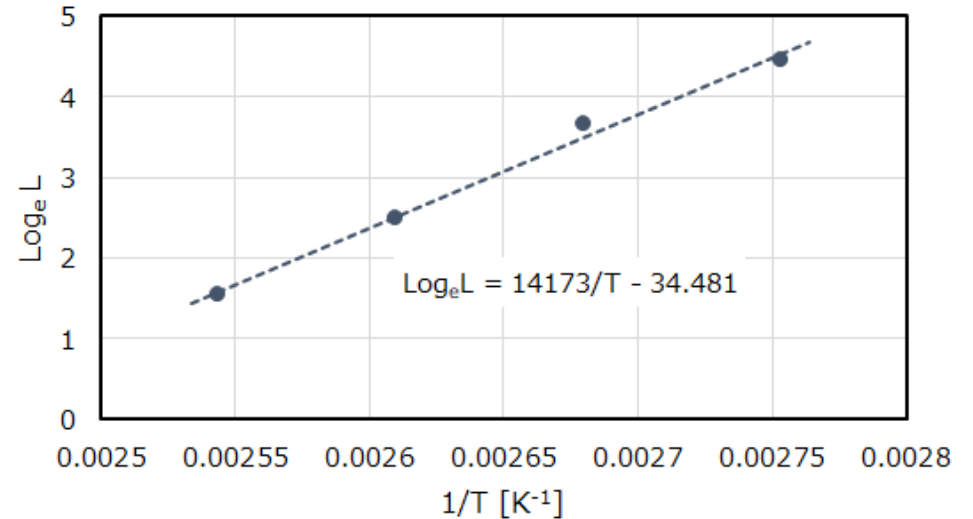
(b) SVO④

## (7) 試験温度の影響と劣化の予測

- 上記の試験結果において、誘導期間L（時間[h]）の対数と試験温度T（絶対温度[K]）の逆数との間に、直線関係が存在すると仮定する（アレニウスの式）。
- 試験結果は概ね適切な直線関係が得られることを確認できた。すなわち、直線の近似式を用いることによって、異なる温度条件における誘導期間を推定できる。



(a) 廃食油FAME①



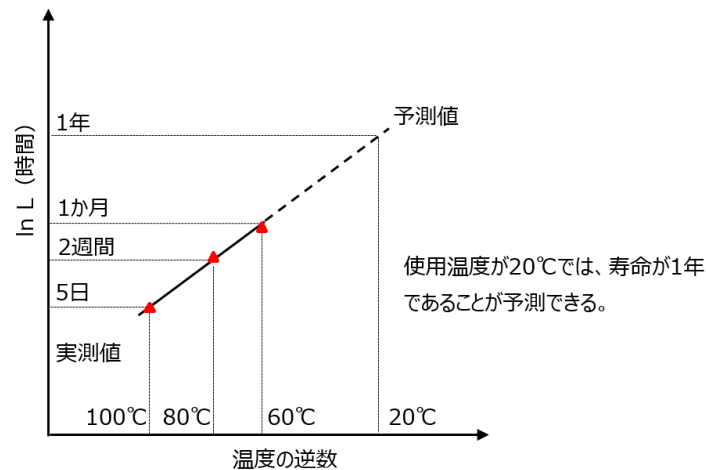
(b) SVO④

アレニウスプロット



## 【解説】アレニウスの式

- 一般に、反応速度は温度の上昇に伴って速くなる。アレニウスの式とは温度依存性を表わす式であり、化学反応における反応速度定数kが熱活性化過程によって表される式(1)で定義される。
- 式(1)の両辺の対数をとると式(2)が得られる。または、反応がある一定のレベルまで進む時間（物理量が $P_0$ から $P_1$ に変化する時間）をLとした式(3)より、式(4)および式(5)が得られる。
- すなわち、式(2)または式(5)の関係から、反応速度定数kまたは時間Lの対数値を絶対温度の逆数値 $1/T$ でプロットすると直線関係が得られ、実験より得られる数点のデータより定数（傾きと切片）が求められる。このようなプロット法をアレニウスプロットと呼び、化学反応による寿命予測や各種機械的特性などの加速試験の評価に適用される。



アレニウスプロットの例

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

k: 反応速度定数, A: 頻度因子,  $E_a$ : 活性化エネルギー, R: 気体定数, T: 絶対温度

$$\log_e k = \log_e A - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (2)$$

$$\log_e P_1 = -kL + \log_e P_0 \quad (3)$$

$$L = A' \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\log_e L = \log_e A' - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (5)$$

## 8.2 酸化安定性試験

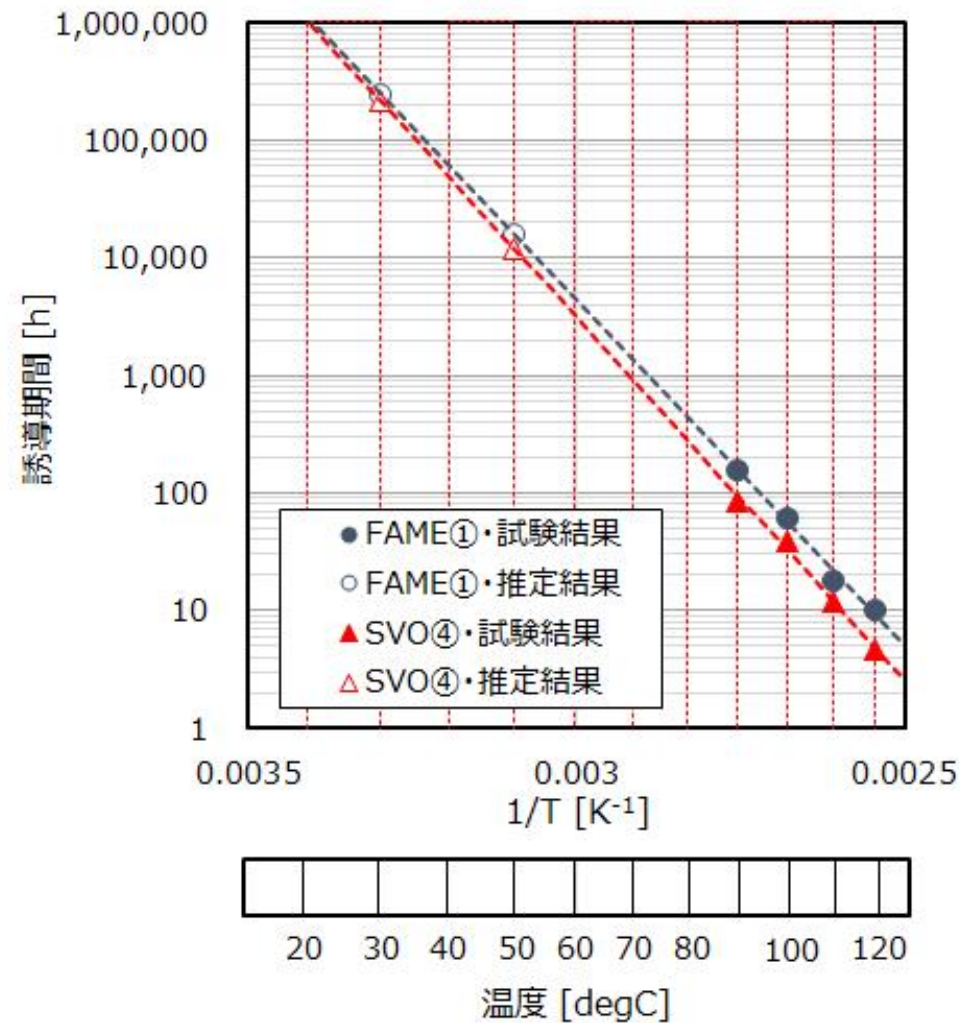
③ 新規

### (7) 試験温度の影響と劣化の予測

- バイオ燃料が空気とよく接触している場合、廃食油FAME①の誘導期間は、例えば50℃条件で15500h（約1.8年）、30℃条件で約28年と推定される。
- SVO④の誘導期間は、例えば50℃条件では11800h（約1.3年）、30℃条件では約24年の誘導期間と推定される。



- バイオ燃料の酸化劣化は温度に強く依存する。バイオ燃料を船内で保管する場合、できる限り保管温度を高めないこと、酸化劣化が急激に進行する前に使い切ることが重要である。



誘導期間の推定

# 8.2 酸化安定性試験

## (7) 試験温度の影響と劣化の予測

(a) 試験結果および推定結果 (廃食油FAME①)

試験温度		試験結果				推定結果		
		120℃	110℃	100℃	90℃	80℃	50℃	30℃
誘導期間 [h] (酸化安定性)		10.3	17.8	61.1	159.4	445	15537 (1.8年)	245435 (28.0年)
試験時間 [h]		14.5	21.6	69.1	173.8	(153.2)	---	---
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	0.98984	1.08809	0.98984	0.98984	(1.08809)	---	---
	試験後	3.38081	2.41052	4.24800	4.84195	(1.09595)	---	---

(b) 試験結果および推定結果 (SVO④)

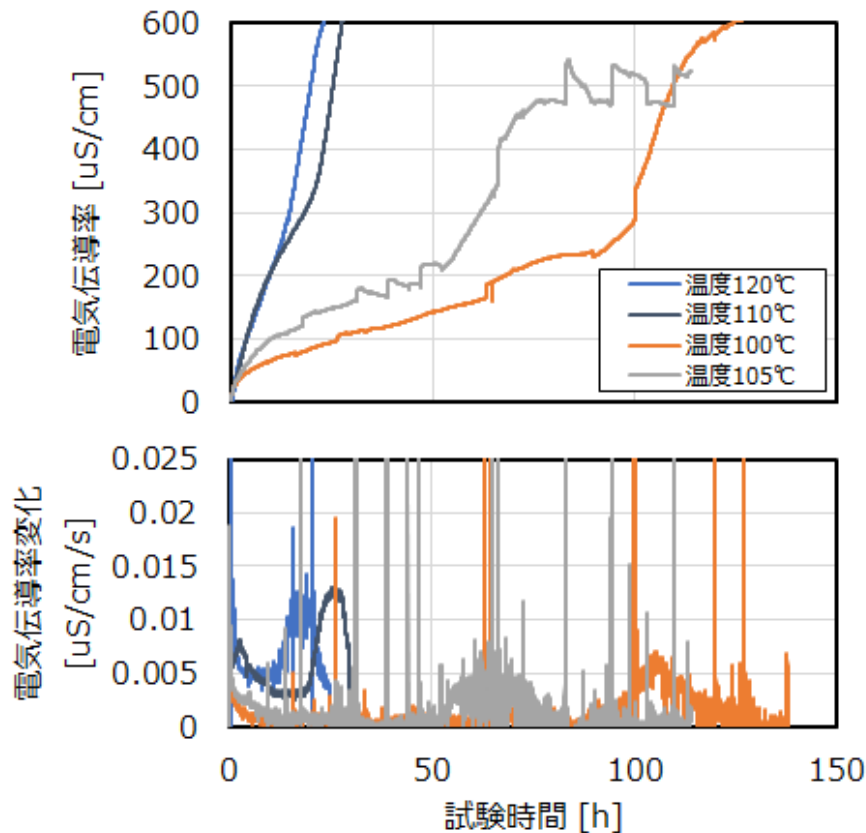
試験温度		試験結果				推定結果		
		120℃	110℃	100℃	90℃	80℃	50℃	30℃
誘導期間 [h] (酸化安定性)		4.6	12.1	39.0	85.6	285	11824 (1.3年)	213509 (24.4年)
試験時間 [h]		24.1	23.6	59.7	90.0	---	---	---
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	1.07131	1.07793	1.07131	1.07131	---	---	---
	試験後	3.55263	1.93616	3.38598	2.03278	---	---	---

# 8.2 酸化安定性試験

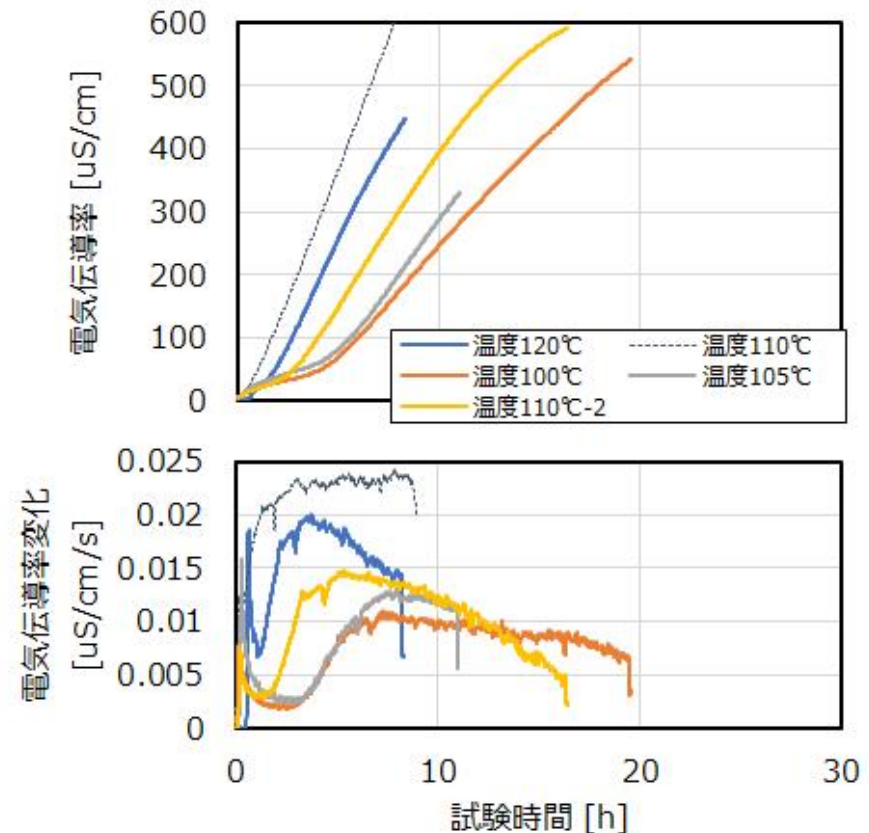
## (8) 酸化防止剤の影響

- ジャトロファFAMEを用いて、酸化安定性試験と同様の方法により、試験温度を90～120℃の範囲で変化させた際の誘導期間を計測した。

※ 酸化防止剤ありの場合、計測データに不具合が生じている（滑らかな試験結果が得られていない）。化学変化が不安定なのか、酸化防止剤の混合が不十分なのかはわからない。



(a) ジャトロファFAME（酸化防止剤あり）

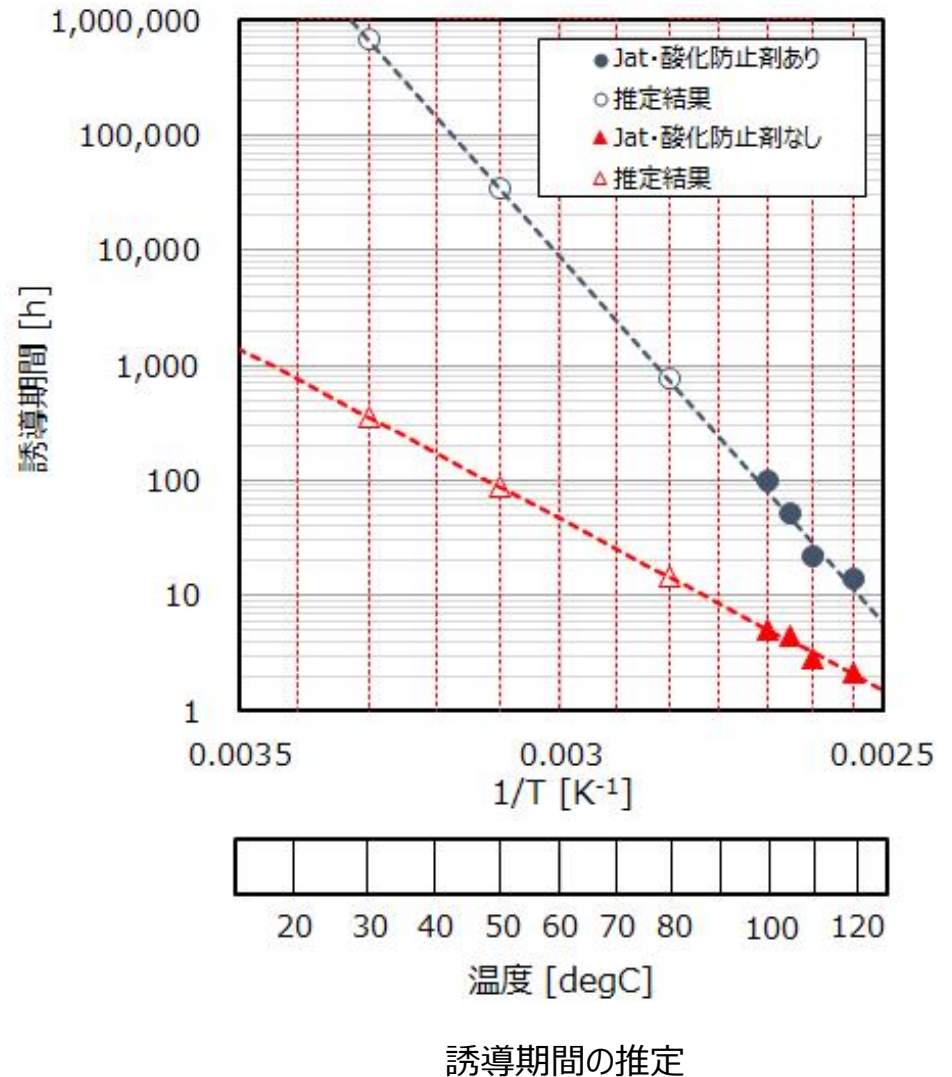
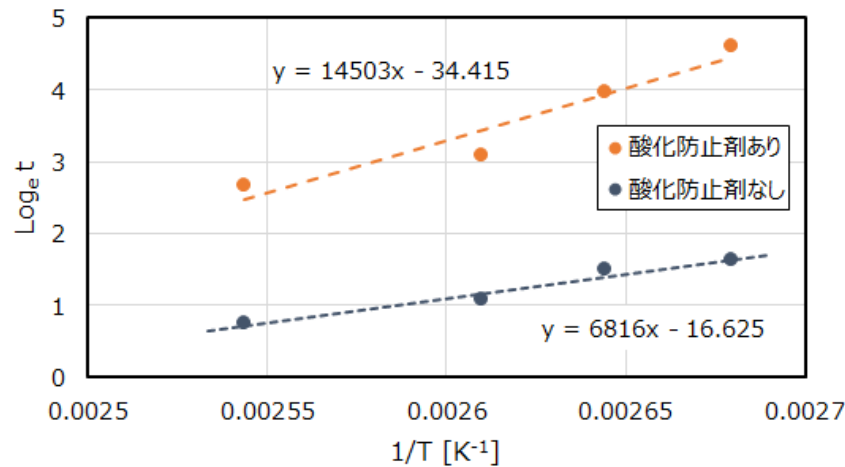


(b) ジャトロファFAME（酸化防止剤なし）

# 8.2 酸化安定性試験

## (8) 酸化防止剤の影響

- バイオ燃料が空気とよく接触している場合，酸化防止剤を添加したジャトロファFAMEの誘導期間は，例えば50℃条件で33900h（約3.9年）と推定される。
- 一方，酸化防止剤を添加していないジャトロファFAMEの誘導期間は，例えば50℃条件で87hに低下すると推定される。



# 8.2 酸化安定性試験

## (8) 酸化防止剤の影響

(a) 試験結果および推定結果（ジャトロファFAME・酸化防止剤あり）

試験温度		試験結果				推定結果		
		120℃	110℃	105℃	100℃	80℃	50℃	30℃
誘導期間 [h] (酸化安定性)		14.2	21.8	52.2	100.8	760	33874 (3.7年)	677390 (77年)
試験時間 [h]		25.2	29.8	114.0	138.2	---	---	---
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	(1.09238)	1.09238	(1.09238)	(1.09238)	---	---	---
	試験後	6.35866	4.10212	30.85113	20.14777	---	---	---

(b) 試験結果および推定結果（ジャトロファFAME・酸化防止剤なし）

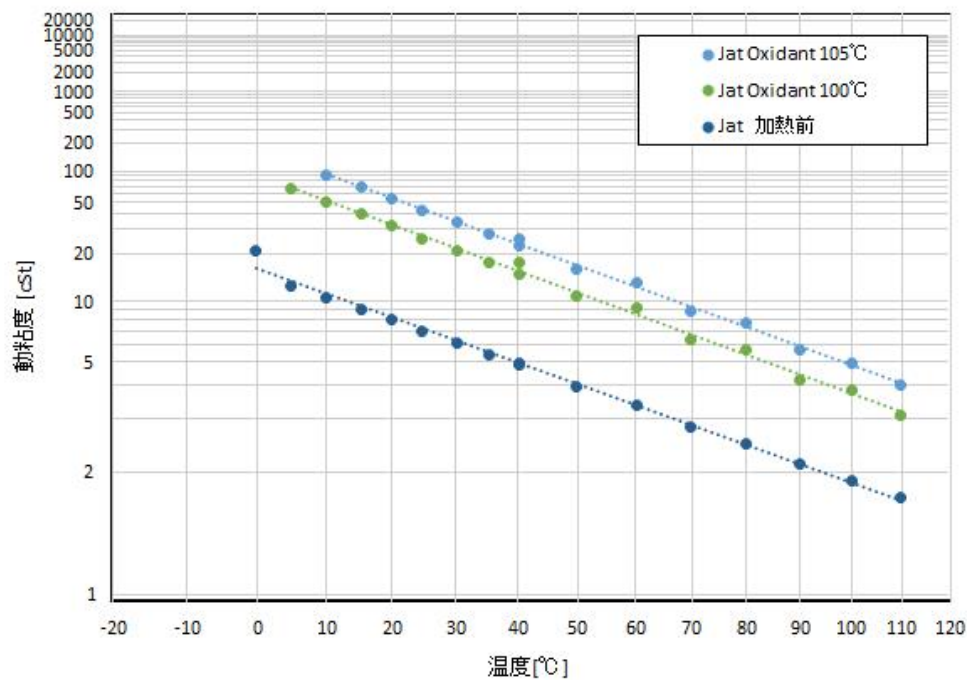
試験温度		試験結果					推定結果		
		120℃	110℃	110℃	105℃	100℃	80℃	50℃	30℃
誘導期間 [h] (酸化安定性)		2.1	---	2.9	4.4	5.1	14.5	87.1	350.3 (15日)
試験時間 [h]		8.3	9.3	16.4	11.0	19.6	---	---	---
酸価 (参考) [mg-KOH/g]	試験前	(0.99795)	0.99795	(0.99795)	(0.99795)	(0.99795)	---	---	---
	試験後	3.43533	3.72848	5.19128	2.29351	4.95285	---	---	---

## 8.2 酸化安定性試験

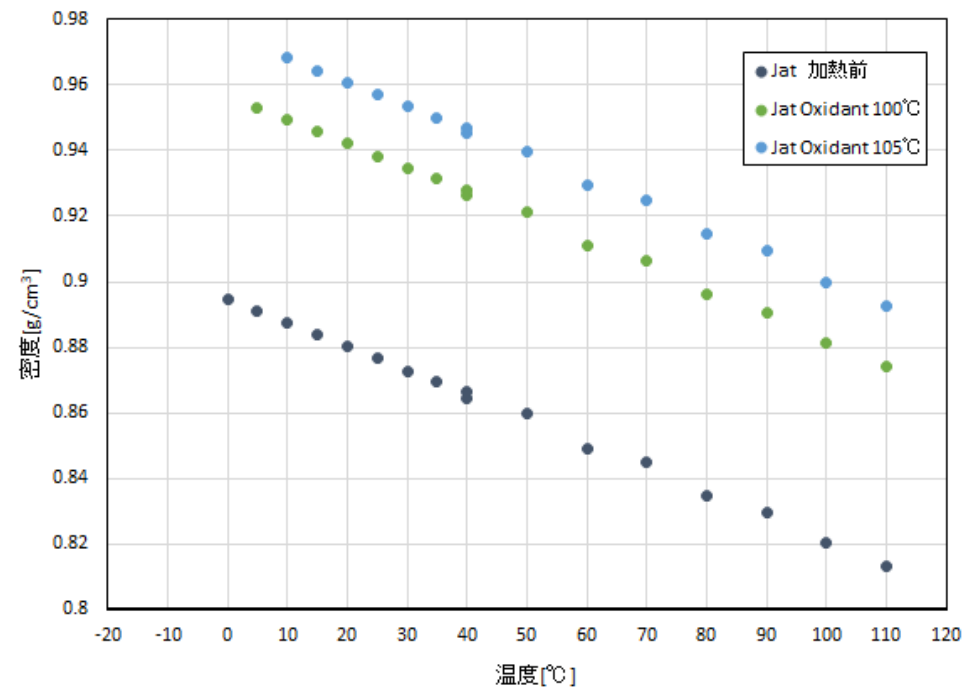
③ 新規

### 【参考】試験温度の影響

- 酸化安定性試験によって酸価が大きく変化したジャトロファFAMEについて、動粘度および密度を計測した。
- 100℃で138h加熱したサンプル油および105℃で114h加熱したサンプル油の動粘度並びに密度は、加熱前と比べて大きく増加することを確認した。



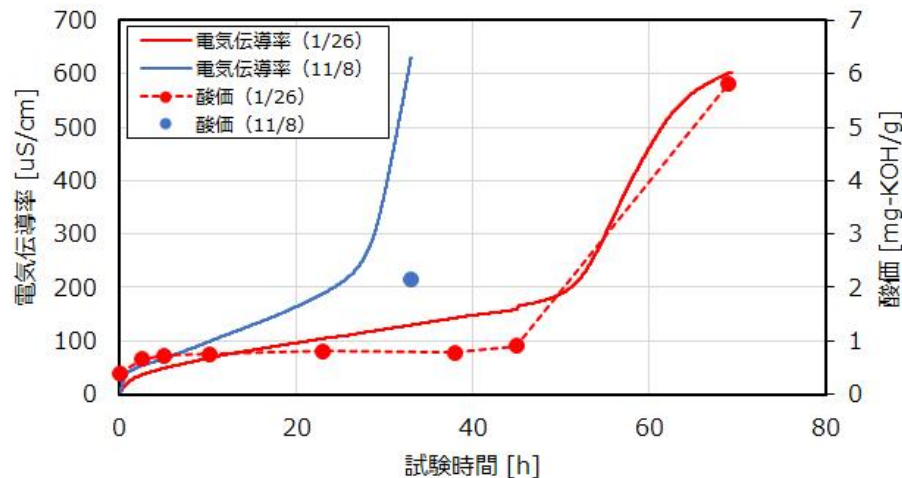
(a) 動粘度の計測結果



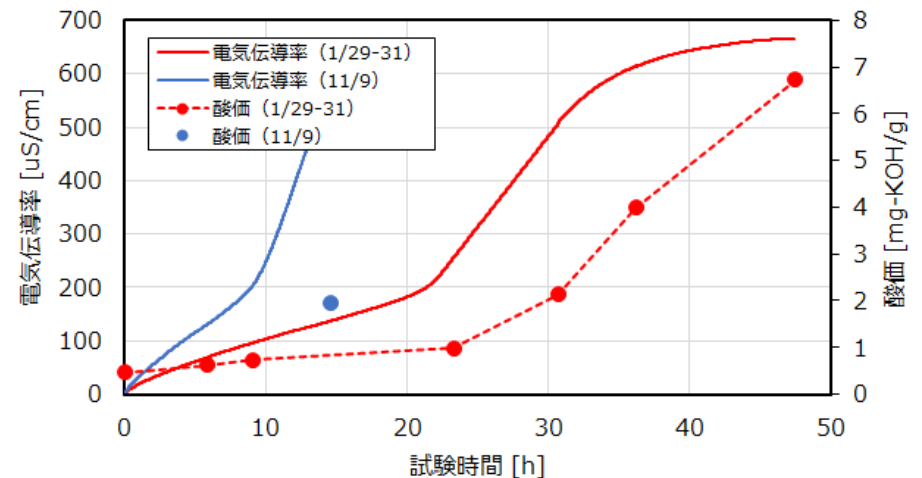
(b) 密度の計測結果

## (9) 酸価と酸化安定性

- 2種類の廃食油FAMEを用いて、酸化安定性試験時の酸価を計測し、酸化安定性と酸価の相関を調べた。
- 誘導期間に至るまでの酸価の変化は小さく、誘導期間後、急激に増加する。
- 船用燃料規格ISO 8217において、C重油の酸価は2.5mg-KOH/g以下とされている。この数値を目安とした場合、バイオ燃料は誘導期間に至るまでに使用することが望ましい。周囲状況によって異なるが、上記の試験結果より、通常は半年程度が使用の目安となり得る。



廃食油FAME② (試験温度110°C)



廃食油FAME③ (試験温度110°C)

※ この試験における試験温度や空気流量は酸化安定性試験と同じに設定している。ただし、サンプル油を抜き取る際、サンプル油の温度は一時的に低下する。その影響を受けて、本試験における誘導期間は、通常の試験と比べて増大していると考えられる。



### (1) 試験結果のまとめ

- ① 各種バイオ燃料を入手した後、酸価を計測した結果、一部のバイオ燃料（B100）の酸価は、船用燃料規格ISO 8217におけるC重油の基準2.5mg-KOH/gよりも高いことを確認した。
- ② 6種類のバイオ燃料について、常温および80℃の高温条件として、経過時間に対する酸価の変化を計測した結果、バイオ燃料を高温条件とした場合、経過時間1000hあたりから酸価が大幅に増加するサンプルがあった。
- ③ バイオ燃料と重油の混合油の酸価は、バイオ燃料の混合割合が増加するに従って、ほぼ直線的に上昇することを確認した。
- ④ 7種類のバイオ燃料（B100）を用いて、ランシマツ法による酸化安定性を計測した。JIS K 2390の品質基準である酸化安定性10h以上を下回るサンプルもあった。なお、各種バイオ燃料の酸化劣化の特性は様々であり、SVOやFAMEといった製造方法による明確な違いは確認されなかった。
- ⑤ 酸化防止剤を添加しない状態で入手できたバイオ燃料を用いて、酸化防止剤の効果を確認した結果、酸化安定性は酸化防止剤の添加量を増やすほど向上する傾向があることを確認した。

- ⑥ 廃食油FAMEとA重油との混合油（B50）の酸化安定性試験を行った結果，混合油B50の酸化安定性は廃食油FAMEと比べて2倍以上に向上するものの，試験終了後の酸価は廃食油FAMEと同程度まで上昇することを確認した。混合油の場合も酸化劣化が生じていると考えられる。
- ⑦ 試験温度を変化させた際の誘導期間を計測することによって，バイオ燃料の酸化劣化時間を予測した。また，誘導期間に至るまでの酸価の変化は小さく，誘導期間後，急激に増加することを確認した。

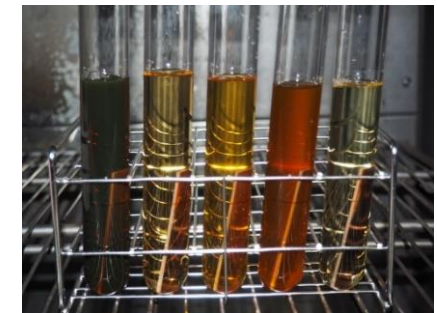
### (2) 試験結果を踏まえた推奨事項

- バイオ燃料と重油の混合油の酸価は，バイオ燃料の混合割合が増加するに従って，ほぼ直線的に上昇する。また，混合油の酸化安定性試験を行った後の酸価は廃食油FAMEと同程度まで上昇する。金属腐食の指標であり，バイオ燃料を高い混合割合で使用する場合，燃料系統に使用している材料を見直すなどの対応が必要である。
- バイオ燃料の長期保管や高温保管を避け，少なくとも誘導期間に至るまでに使用することが望ましい。
- 酸化防止剤を添加しない状態で入手できたバイオ燃料を用いて，酸化防止剤の効果を確認した結果，酸化安定性は酸化防止剤の添加量を増やすほど向上する傾向があることを確認した。すなわち，十分な量の酸化防止剤が添加されたバイオ燃料の使用が推奨される。

# 9. 金属腐食試験

## (1) 酸価と金属腐食

- バイオ燃料または混合油の酸価は、金属に対する腐食傾向と相関関係があるといわれている（ASTM D664）。
- 酸価が異なるサンプル油を用いて、金属腐食を調べる（JIS K 2513「石油製品-銅板腐食試験方法」参照）。



銅板腐食試験の様子

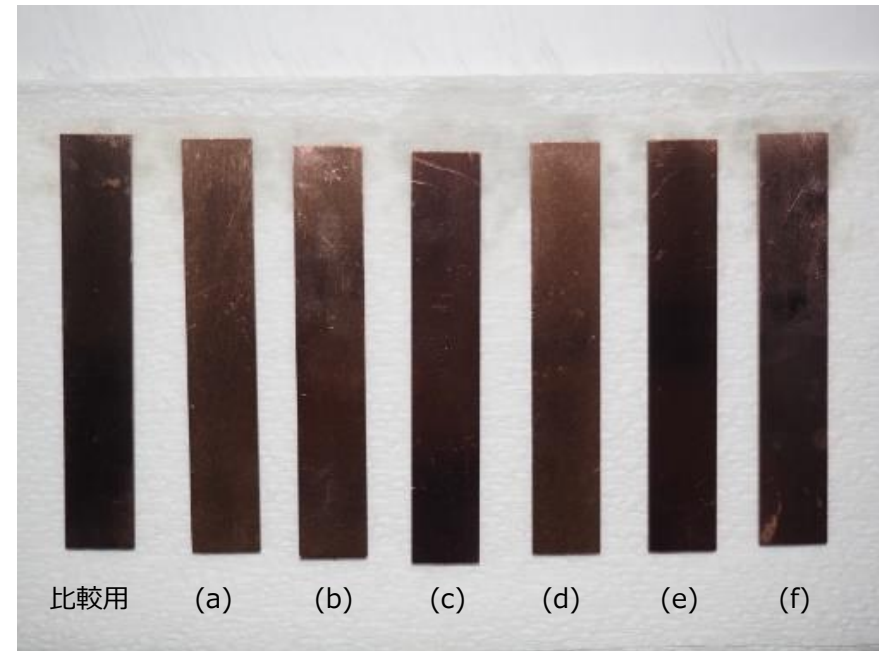
銅板腐食標準による腐食の分類（JIS K 2513）

変色のイメージ

		変色番号	変色の程度	変色の状態
磨きたての銅板		磨きたての銅板		
わずかに変色	1a	1	わずかに変色	a. 薄いだいだい色（磨きたての銅板とほとんど同じ色）
	1b			b. 濃いだいだい色
中程度に変色	2a	2	中程度に変色	a. ピンク色
	2b			b. 紫色がかった薄いピンク色
	2c			c. だいだい色の上に濃いピンク色、紫色がかった青色などの多色模様
	2d			d. 薄い金色がかった銀色
	2e			e. 黄銅色または金色
濃く変色	3a	3	濃く変色	a. 黄銅色の上に赤茶色の模様
	3b			b. 赤と緑を伴った多色模様（くじゃく模様）
腐食	4a	4	腐食	a. 生地が見える程度の緑がかった青紫色または黒色
	4b			b. 黒鉛のような黒色または光沢のない黒色
	4c			c. 光沢のある黒色

## (2) 銅板腐食試験の結果

- 6種類のサンプル油を用いて、銅板腐食試験を行った結果、試験温度50℃、試験時間3hにおいて、色の変化はほとんど確認されなかった（評価1a）。
- JIS K 2390「自動車燃料－混合用脂肪酸メチルエステル（FAME）」では、試験温度50℃、試験時間3hにおいて、1以下とされている。



銅板腐食試験結果（温度50℃，時間3h）

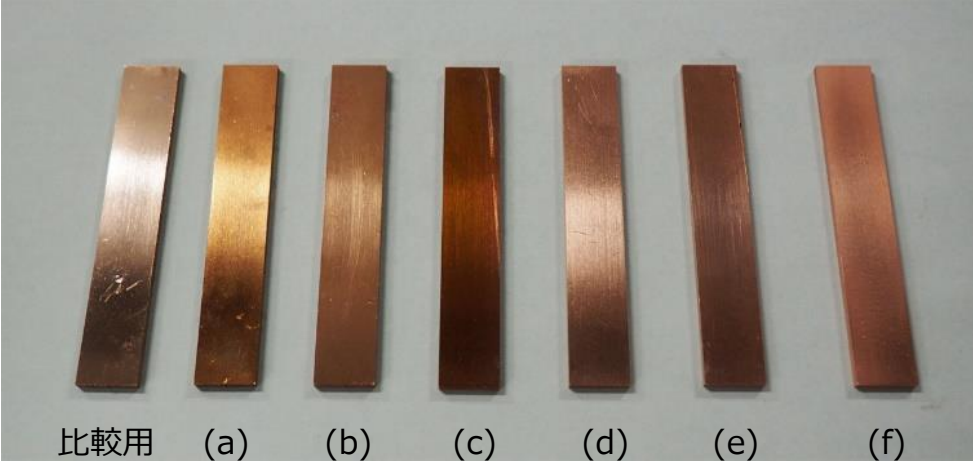
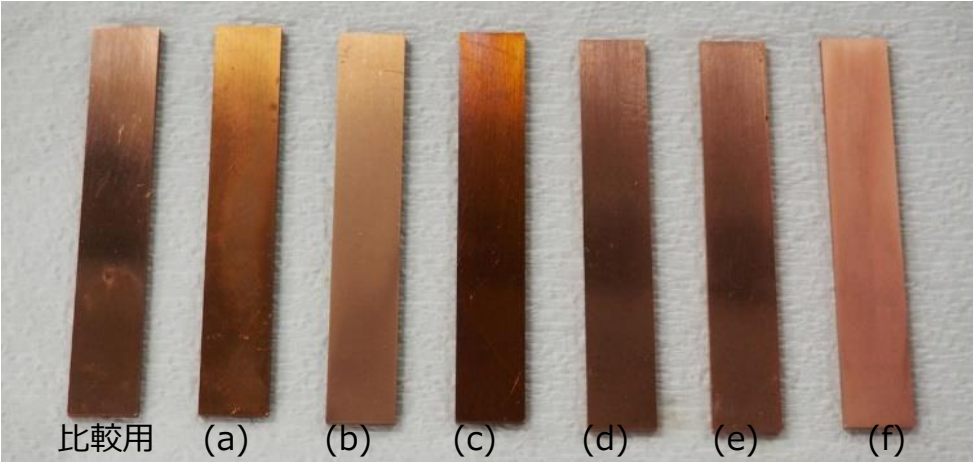
銅板腐食試験に用いたサンプル油の酸価

		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
サンプル油		A重油	廃食油 FAME①	ジャトロファ FAME	SVO④	SVO⑤	劣化させた バイオ燃料
酸価（参考） [mgKOH/g]	試験前	0.05237	1.08809	1.08311	1.07793	3.87082	23.6899
	500h試験後※	0.15864	0.25952	0.18832	0.61785	2.46859	20.8934

※ 銅板腐食試験200h～500hに用いたサンプル油の酸価。

# 9. 金属腐食試験

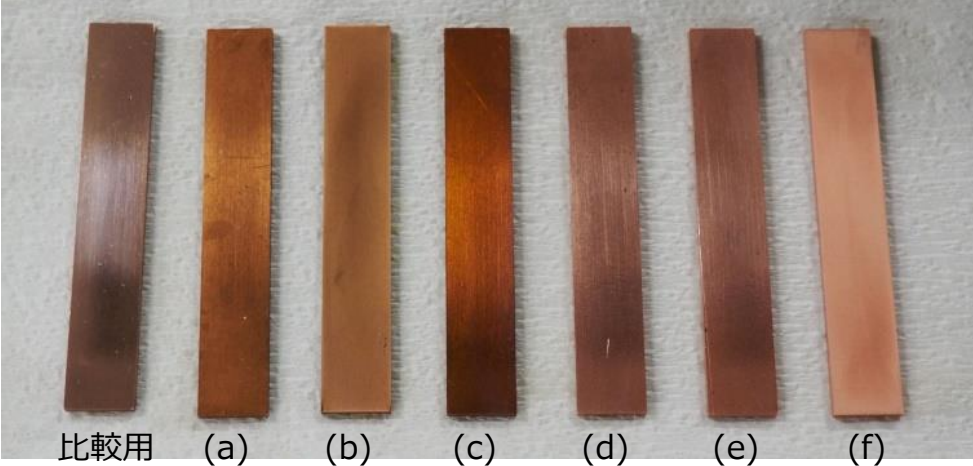
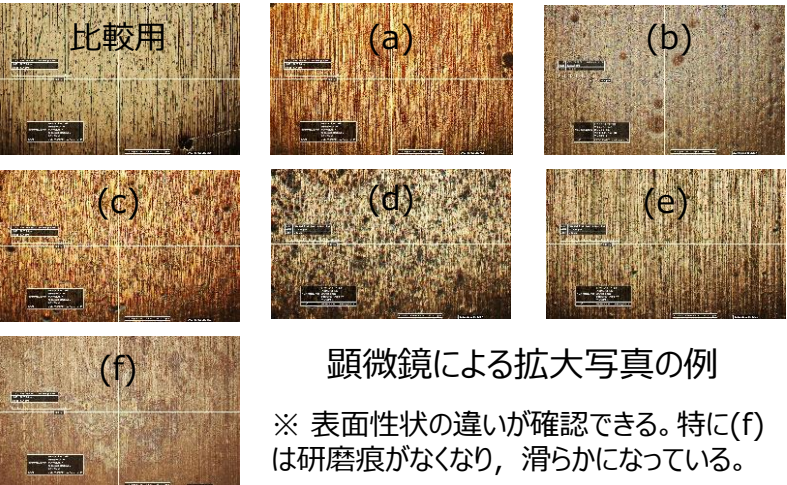

## (2) 銅板腐食試験の結果

条件	外観	備考
<p>試験温度80℃ 試験時間50h</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 試験温度50℃, 試験時間3hの銅板腐食試験を行ったサンプル材を使用して, 試験温度を80℃に上昇させて試験を継続した。</li> <li>● サンプル油の違いによる色の変化が確認できる。例えば, (a)と(c)はやや濃い色である(評価1b)。</li> <li>● それ以外の(b), (d)~(f)は色の変化をほとんど確認できない(評価1a)。</li> </ul>
<p>試験温度80℃ 試験時間100h</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 試験時間50hと大きな違いは確認できない。</li> <li>● (a)と(c)は濃い色(評価1b), (b), (d)~(f)は色の変化をほとんど確認できない(評価1a)。</li> <li>● ただし, (f)の表面の光沢が他の試験片と異なるように見える(光沢がなくなっている)。</li> </ul>

# 9. 金属腐食試験

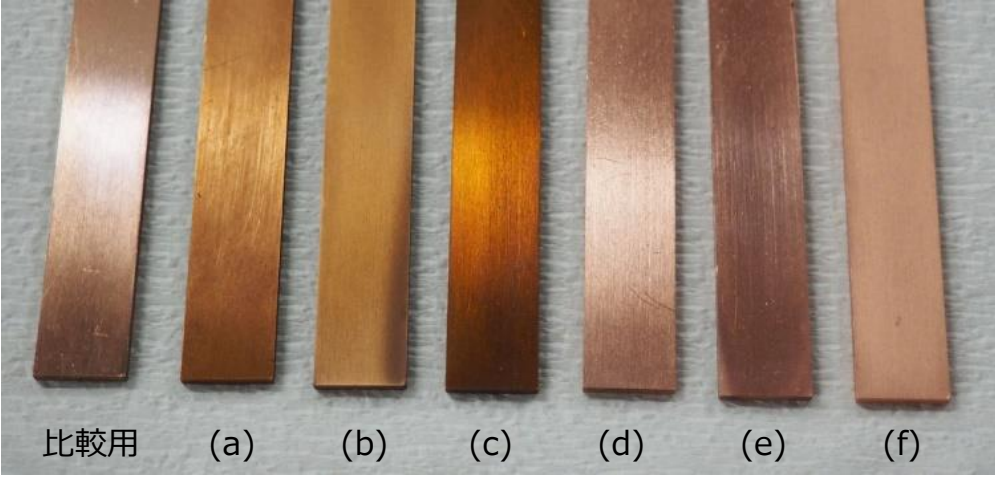

③ 新規

## (2) 銅板腐食試験の結果

条件	外観	備考
<p>試験温度80℃ 試験時間200h</p>	 <p>比較用 (a) (b) (c) (d) (e) (f)</p>  <p>顕微鏡による拡大写真の例</p> <p>※ 表面性状の違いが確認できる。特に(f)は研磨痕がなくなり、滑らかになっている。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 試験時間100hまでと変色の傾向は同じである。</li> <li>● (a)と(c)は濃いだいだい色（評価1b）である。</li> <li>● (d)～(f)は、色の変化は小さいが、表面の光沢がなくなってきた。</li> <li>● サンプル油の色の変化が激しいため、試験時間200h後、すべてのサンプル油を交換した。</li> </ul>  <p>腐食試験前 50h試験後 腐食試験前 200h試験後</p> <p>サンプル油(f)の色の変化</p> <p>※ サンプル油自体の色の変化も確認されている。例えば、サンプル油(f)は変色がわかりやすい。</p>

# 9. 金属腐食試験

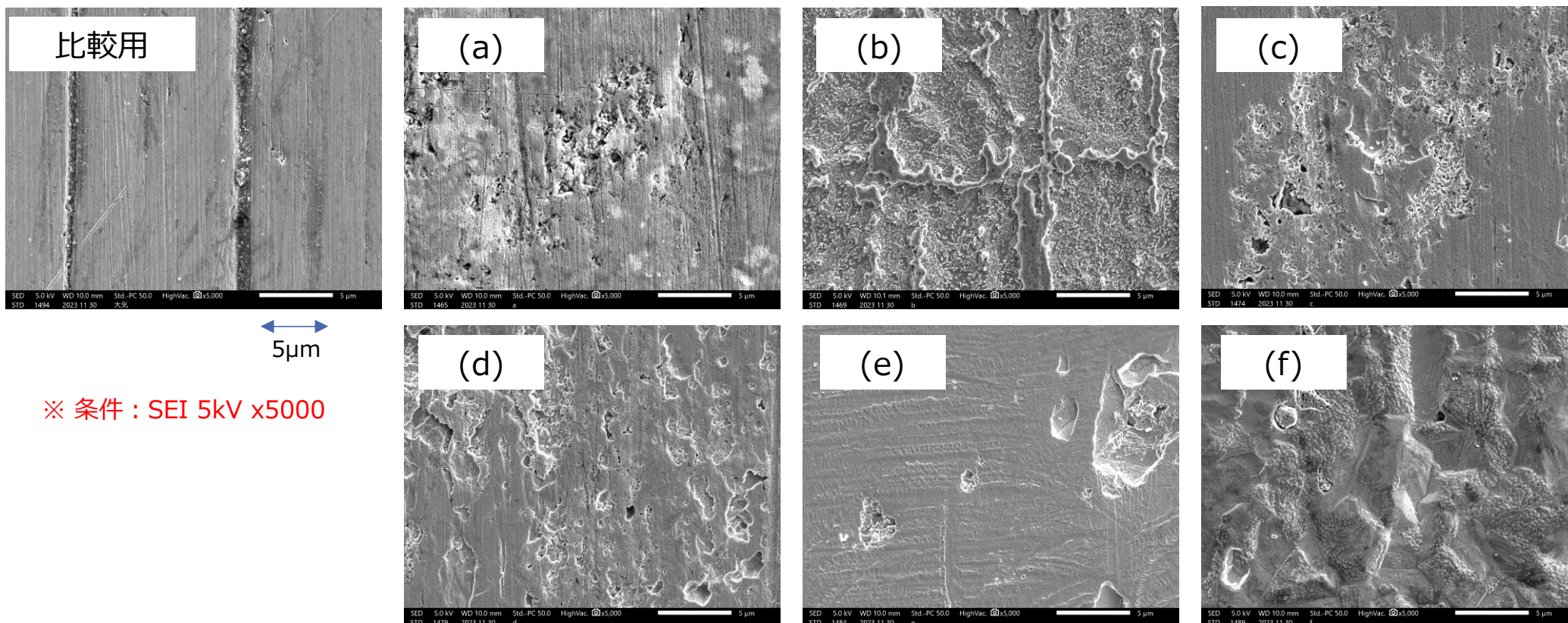
## (2) 銅板腐食試験の結果

条件	外観	備考
<p>試験温度80℃ 試験時間500h</p>	 <p>比較用 (a) (b) (c) (d) (e) (f)</p>  <p>比較用 (c) (f)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 試験時間200hまでと変色の傾向は同じである。</li> <li>● (a), (b), (c)は濃いだいだい色（評価1b）である。目視による濃さの度合いは、(b)&lt;(a)&lt;(c)である。</li> <li>● (b), (d), (e), (f)は、色の変化は小さいが、表面の光沢がなくなってきた。</li> <li>● 光学顕微鏡による観察から、(f)の表面性状は全体的に変化（腐食）していることがわかる。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● JIS K 2513に規定された変色の状況では、腐食の度合いを判断しづらい。</li> </ul>		

# 9. 金属腐食試験

## (2) 銅板腐食試験の結果

- 500hの試験終了後の銅板表面を電子顕微鏡によって観察した。
- 比較用（磨きたての銅板を大気下で放置）に対して，(a)～(f)の表面はすべて変化（腐食）していることがわかる。

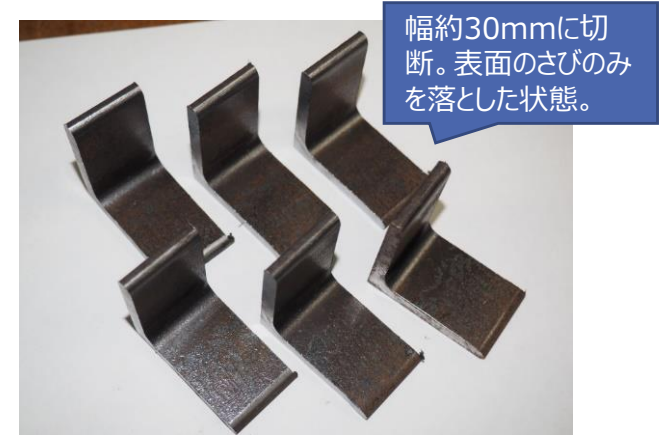




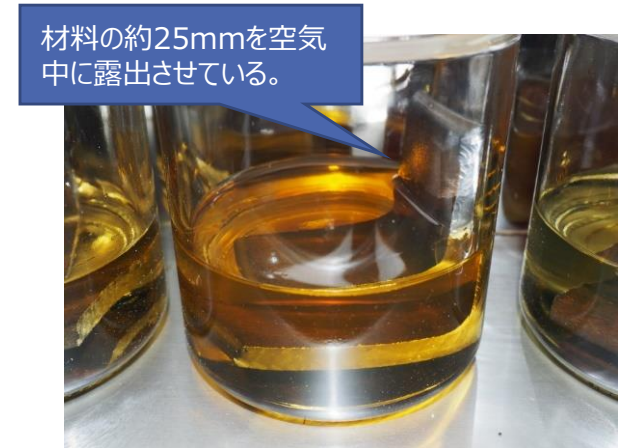
# 9. 金属腐食試験

## (3) 鉄鋼材料腐食試験 (SS400アングル材)

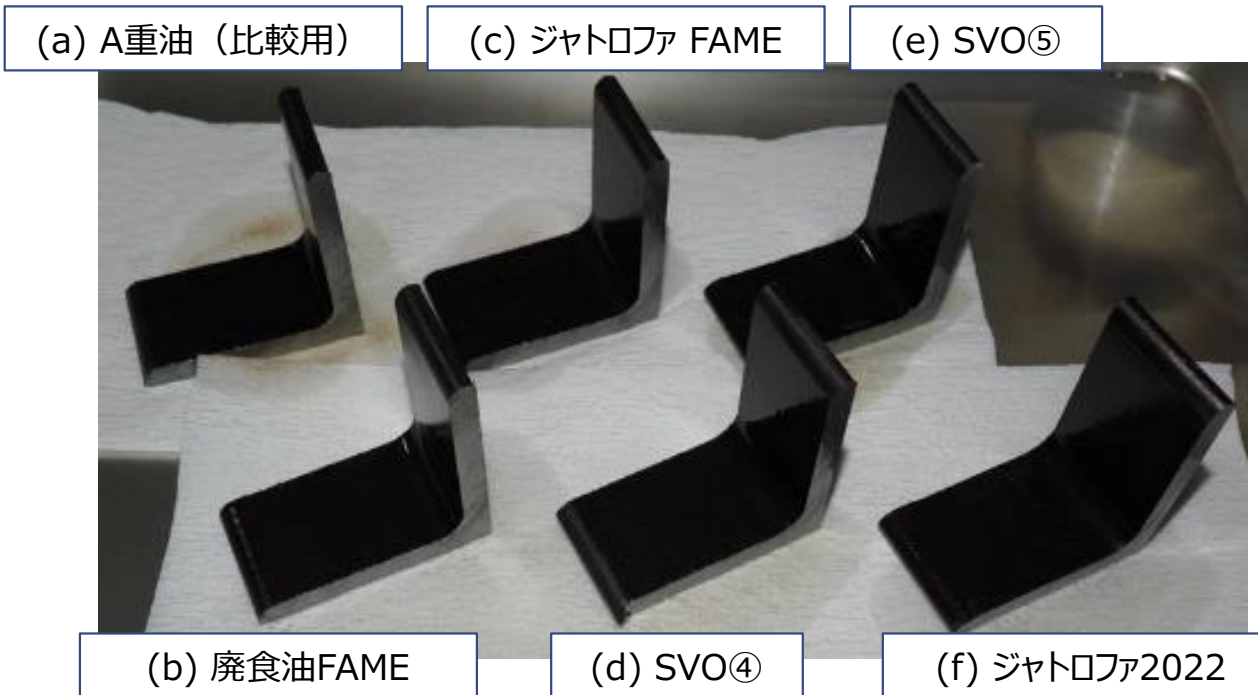
- 銅板腐食試験に使用した6種類のサンプル油を用いて、鉄鋼材料 (50×50アングル材, SS400) の腐食を調べた結果、試験温度80℃、試験時間3hにおいて、色の変化は確認されなかった。



腐食試験に使用した鉄鋼材料 (試験前)



腐食試験時の鉄鋼材料



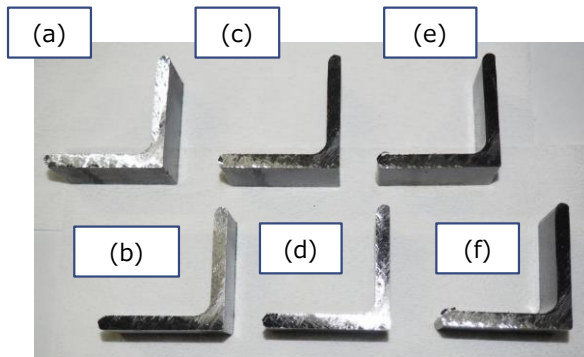
鉄鋼材料腐食試験結果 (温度80℃, 時間3h)

# 9. 金属腐食試験

## (3) 鉄鋼材料腐食試験 (SS400アングル材)

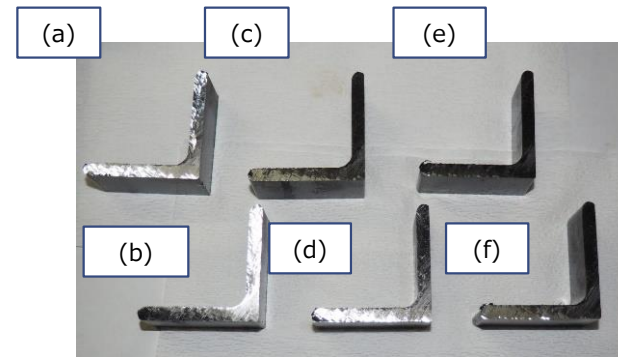
試験温度80°C, 試験時間50h

- 色や表面の変化は確認されなかった。



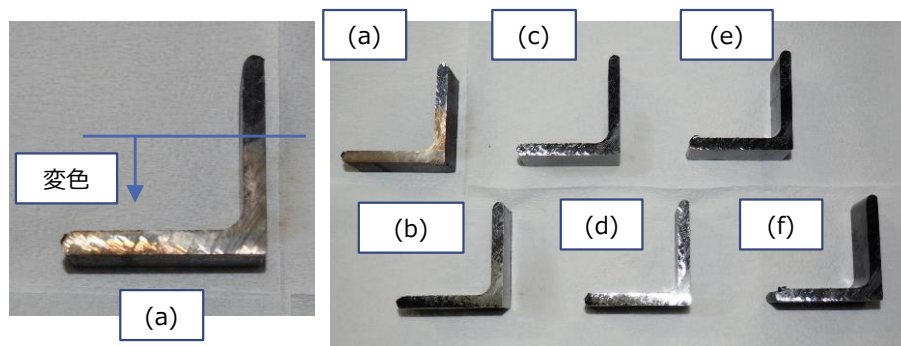
試験温度80°C, 試験時間100h

- 色や表面の変化は確認されなかった。



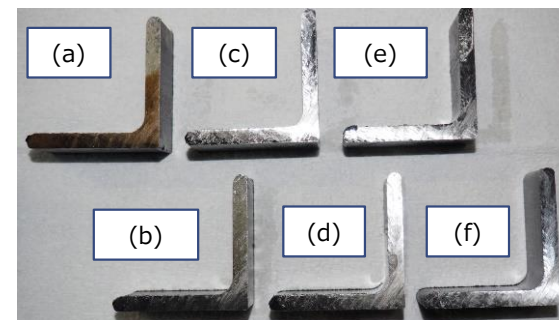
試験温度80°C, 試験時間500h

- (a)のA重油に浸かっている部分がわずかに変色している。



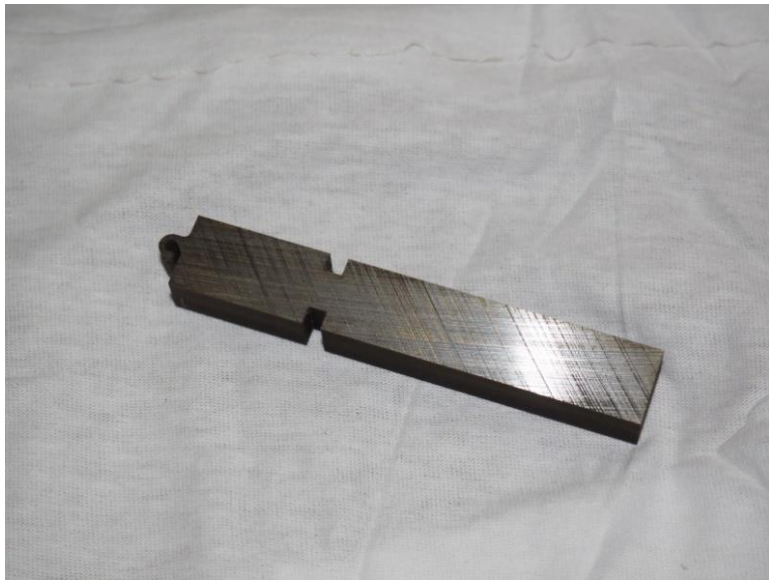
試験温度80°C, 試験時間800h

- 試験時間500hと変わらず, (a)のA重油に浸かっている部分だけがわずかに変色している。



## (5) 鉄鋼材料腐食試験 (SS400板材)

- 鉄鋼材料 (SS400板材を加工) の腐食を調べる。
- サンプル油には, 廃食油FAME①とSVO④, ジャトロファFAME (酸化防止剤あり・なし) の4種類を使用する。
- それぞれのサンプル油について, 水なしと水を約0.5wt%添加した状態, 常温 (25℃) および高温環境 (80℃) の計4条件において腐食試験を行う。



準備したSS400試験片

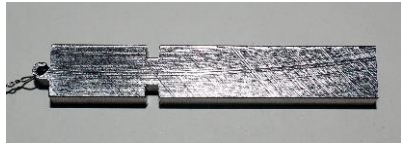
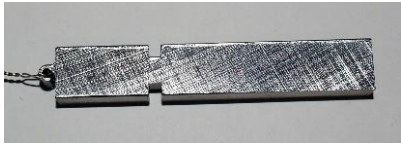
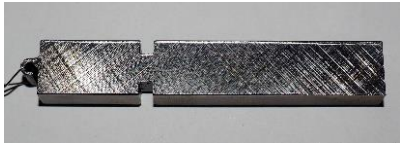
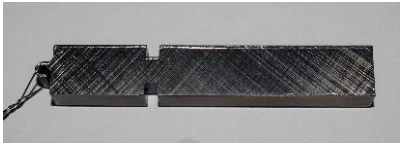
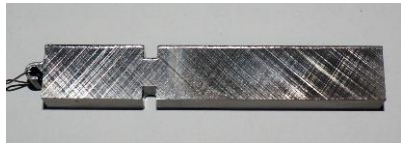

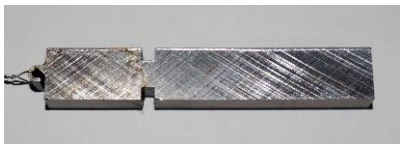
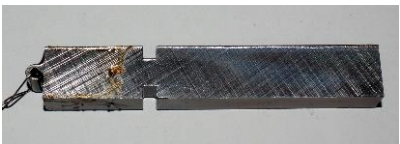
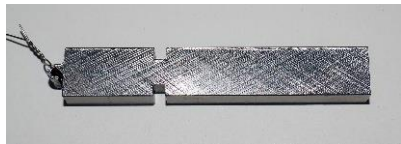
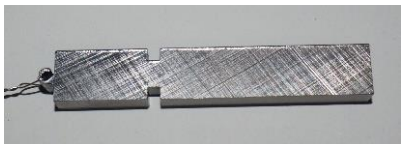

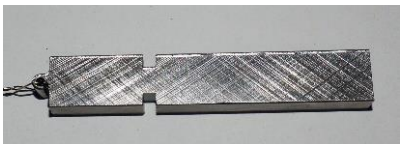
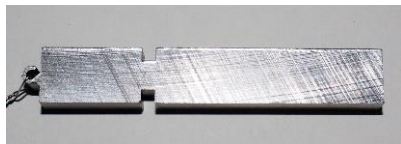
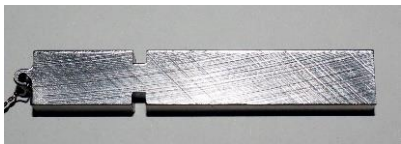
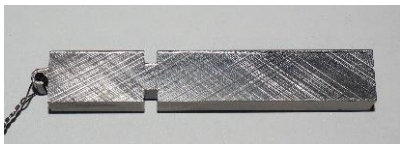



鉄鋼材料腐食試験の様子

# 9. 金属腐食試験

③ 新規

## (4) 鉄鋼材料腐食試験 (SS400板材)

	常温保管 (約30日)		80℃保管 (約30日)	
	水なし	水あり (約1wt%)	水なし	水あり (約1wt%)
廃食油FAME①	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 
SVO④	わずかな変色が確認される。 	わずかな変色が確認される。 	わずかな変色が確認される。 	わずかな変色が確認される。 
ジャトロアFAME 酸化防止剤あり	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 
ジャトロアFAME 酸化防止剤なし	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 

# 9. 金属腐食試験

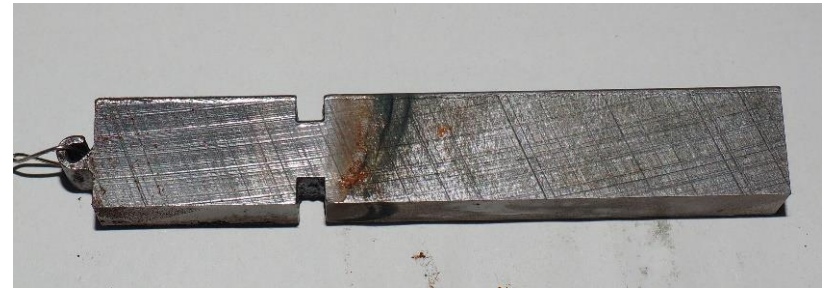
## 【参考】鉄鋼材料腐食試験（SS400板材）

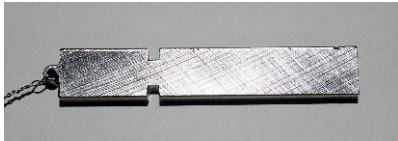
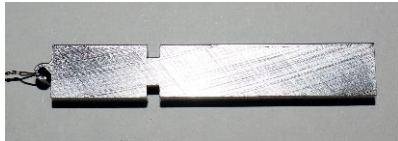
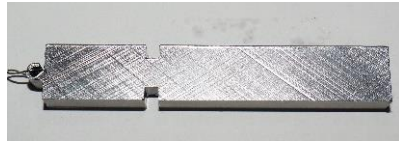
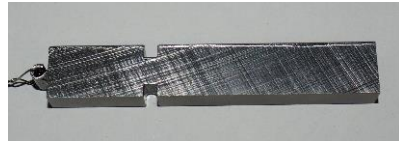
- 比較のため、水道水により腐食させる試験、工作機械の摺動面油（Shell Tonna S3 M）を用いて同様の試験を行った。

【作動油の製品紹介】厳選した添加剤(油性向上剤・耐摩耗剤・防錆防食剤・酸化防止剤など)をバランス良く配合し、各種工作機械用の超高性能しゅう動面油です。メンテナンスの簡素化を重視した水溶性切削液との高い分離性、極圧性を有し、油圧作動油・軸受油用など幅広く使用できます。

### 水・常温保管（約20日後）

他の条件と比べて、全体的に変色している。水と大気の境あたりに、表面の錆が確認される。



	常温保管（約30日）		80℃保管（約30日）	
	水なし	水あり（約1wt%）	水なし	水あり（約1wt%）
作動油 （工作機械用）	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 	表面の変化は確認されない。 

# 9. 金属腐食試験

## (3) 金属腐食の文献調査

- 上記の金属試験において、A重油や一部のバイオ燃料でわずかな変色が確認されたものの、明確な腐食は確認されなかった。
- 一方、バイオ燃料に腐食原因物資と言われている水やオレイン酸が含まれる場合、腐食が促進されるといった報告があるので注意が必要である。

### 【参考】文献(4)より

- 空気雰囲気、80℃、常圧、浸漬10日の条件において、炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、純銅のFAME浸漬試験を行った結果、FAMEのみの場合、変化が見られなかった。
- オレイン酸を添加した場合、わずかな変色が確認された。
- 水を添加した場合、著しい変色が認められた。

	純銅	アルミニウム合金 (A6061)	炭素鋼 (SS400)	ステンレス鋼 (SUS304)
試験前				
FAMEのみ				
FAME + オレイン酸 (0.5wt%)				
FAME + 水 (0.5wt%)				
FAME + オレイン酸 (0.5wt%) + 水 (0.5wt%)				
試験後の試験液				

浸漬試験片の外観 (文献(4))

## 【解説】金属腐食試験の考察

### (1) 銅板腐食試験における酸価の変化

- 銅板腐食後のサンプル油の酸価は、(a)のA重油を除き、すべてのバイオ燃料において試験前の酸価よりも低下している。一般に、バイオ燃料の酸化によって生じる有機酸（主にギ酸、酢酸）が増加すると酸価が上昇するが、銅板腐食試験では、銅表面に生じた酸化銅と有機酸が反応し、有機酸が消費されることが酸価低下の原因と考えられる。

### (2) 電子顕微鏡による観察と元素分析

- 銅板腐食試験後の電子顕微鏡による観察では、いずれのサンプルも腐食が観察された。特にサンプル(b), (f)は最初の加工傷が観察できないほど全面腐食しており、(f)では結晶粒界、粒子形状も確認できるほど、厳しい腐食条件であることがわかる。
- 比較用の銅板と腐食が激しかった(b), (f)については、簡易的な元素分析（定性）をおこなった。いずれもCuと微量の酸素が検出され、その他の不純物は検出されなかった。試験片として用いたのはC1100（タフピッチ銅、Cu $\geq$ 99.90%、O：0.02~0.05%）であり、酸化被膜の形成なども考慮すると、矛盾のない結果となった。

### (3) バイオ燃料と金属腐食

- ISO 8217の船用燃料油規格では、A重油の酸価は0.5mgKOH/g、C重油で2.5mgKOH/g以下とされている。今回の試験結果から、一部のバイオ燃料を高混合率で使用する場合に、C重油の規格値を超えた酸価をもつ燃料になる可能性があり、金属腐食の評価のためには、実環境条件も考慮した腐食環境の検討が必要である。
- 一般に鋼材の腐食促進因子には、pH（pH4以下で腐食速度が増大。pH4~10では鋼材表面に到達する酸素量に依存）、溶存酸素、塩化物などの溶解成分、流速、温度が挙げられている。
- バイオ燃料中の金属の腐食については、資料が少なく、多くの場合、自動車用FAMEを対象としている。例えば、燃料系統に使われている鉄鋼材料の耐食性については、無塗装の船付き燃料タンク、特に溶接部のような不均質組織になっている部分も含め、今後も検討が必要と考えられる。

## (1) 試験結果のまとめ

- ① 6種類のサンプル油を用いて銅板腐食試験を行った結果、JIS K 2390の試験条件である試験温度50℃、試験時間3hにおいて、色の変化はほとんど確認されず、基準を満足した。しかし、より厳しい高温・長時間の条件下においては、銅板表面の変色や腐食が確認された。
- ② 鉄鋼材料の腐食試験を行った結果、A重油が浸かっている部分、あるいは一部のバイオ燃料ではわずかな変色が確認されたものの、バイオ燃料による明確な腐食は確認されなかった。

## (2) 試験結果を踏まえた推奨事項



- 銅板腐食試験を行った結果、厳しい高温・長時間の条件下においては、銅板表面の変色や腐食が確認された。また、バイオ燃料に水分が含まれると鉄鋼材料を腐食させることがあり得る。長期にバイオ燃料を使用する場合、燃料油システムの材質を見直すなどの対応が必要である。



# 10. 陸上エンジン試験

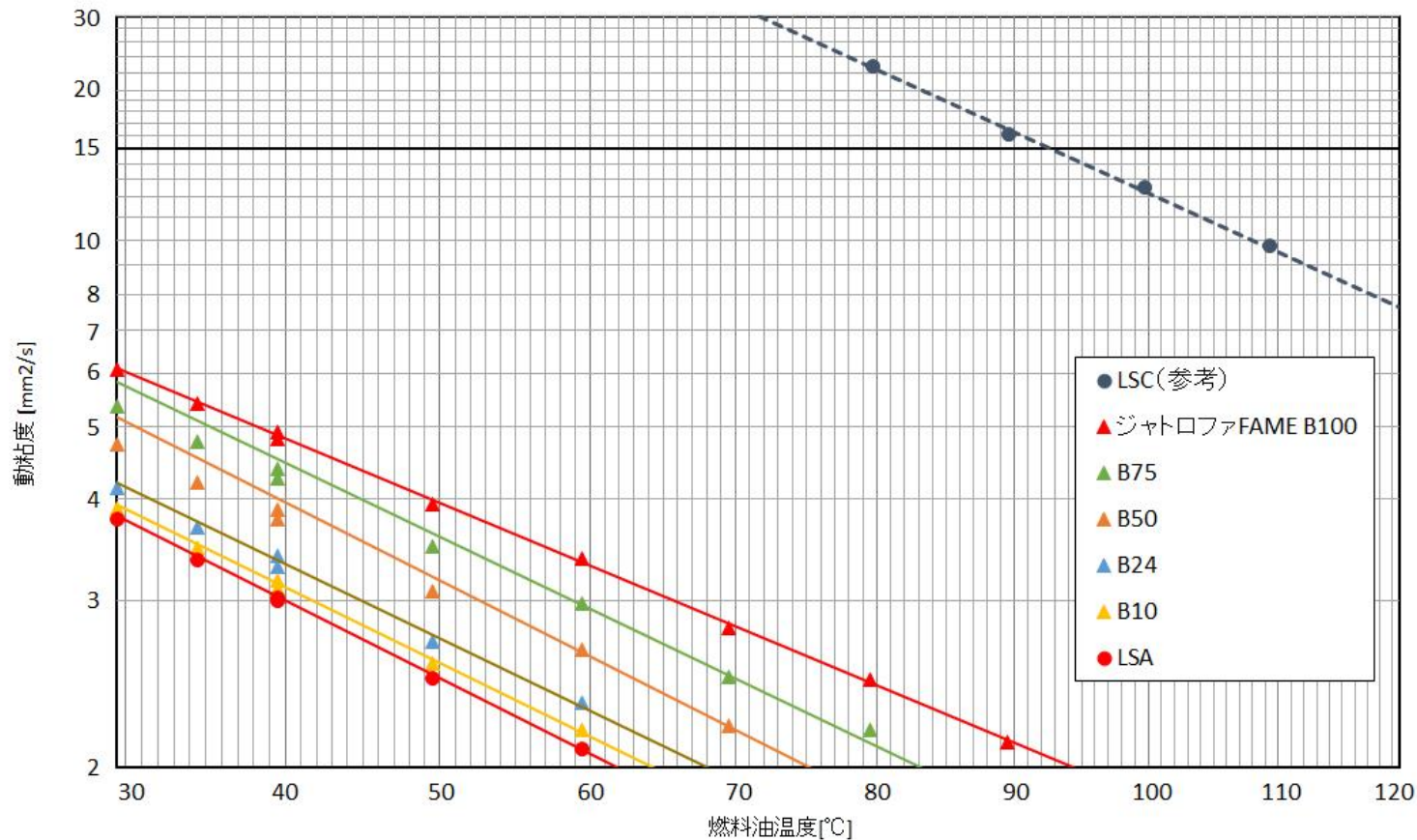
① 継続

- 2022年度に実施できなかったジャトロファFAMEによる陸上エンジン試験を行った。
- 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，排ガス成分を計測した。
- ジャトロファFAMEとA重油の混合油（B10～B100）を使用し，通常のA重油を使用した際のデータと比較する。

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。

## (2) 試験に使用する混合油の動粘度・密度

- ジャトロファFAMEの動粘度はLSAに近い値のため、ヒーターをすることなく運転できることを確認している（「4. 動粘度・密度の計測」参照）。



温度-動粘度チャート (ジャトロファFAME + LSA)

## (3) バイオ混合油の定容燃焼装置（FCA）による試験

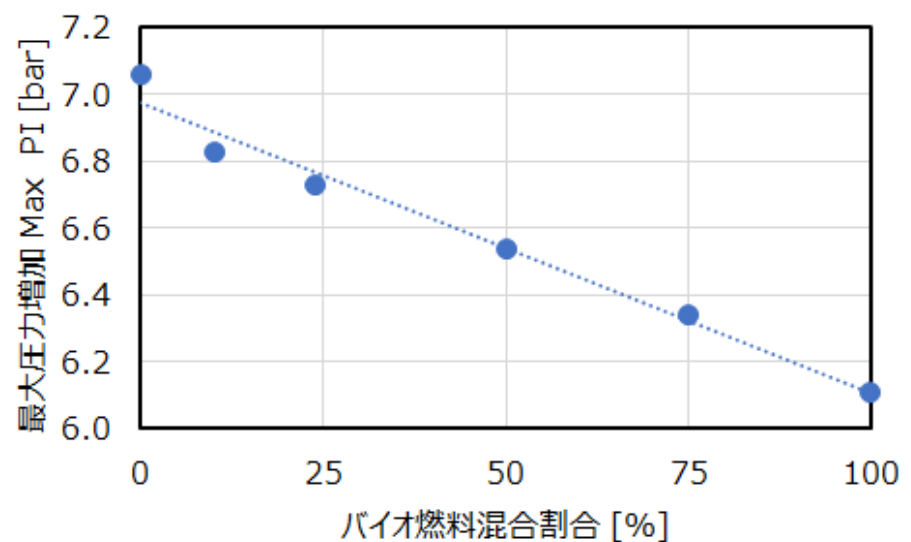
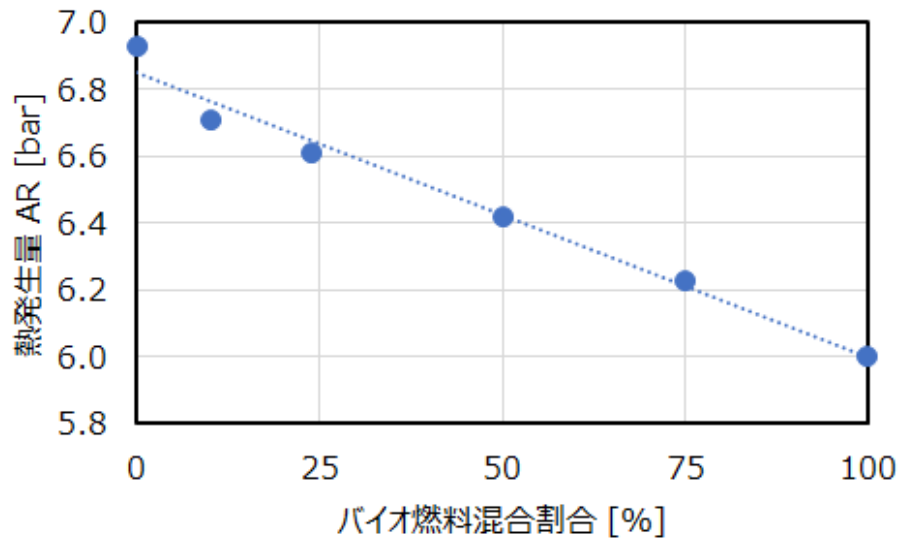
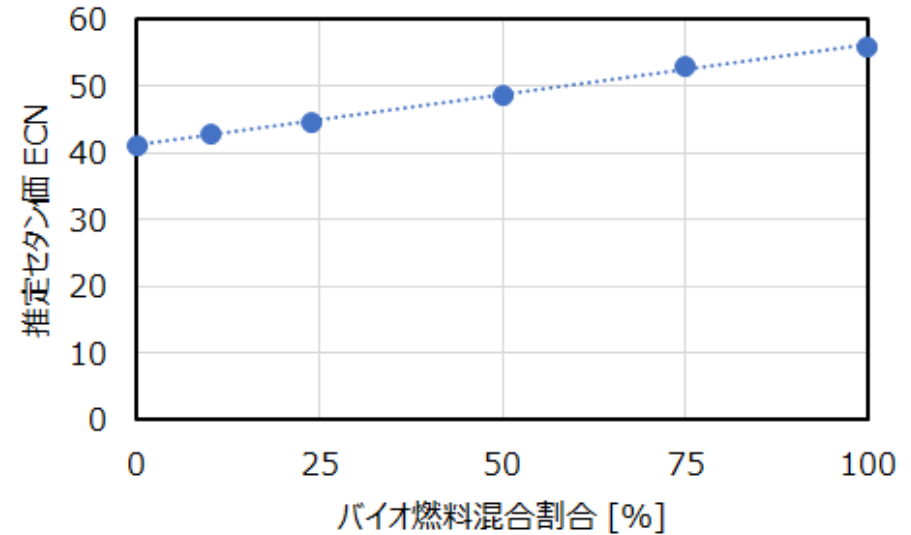
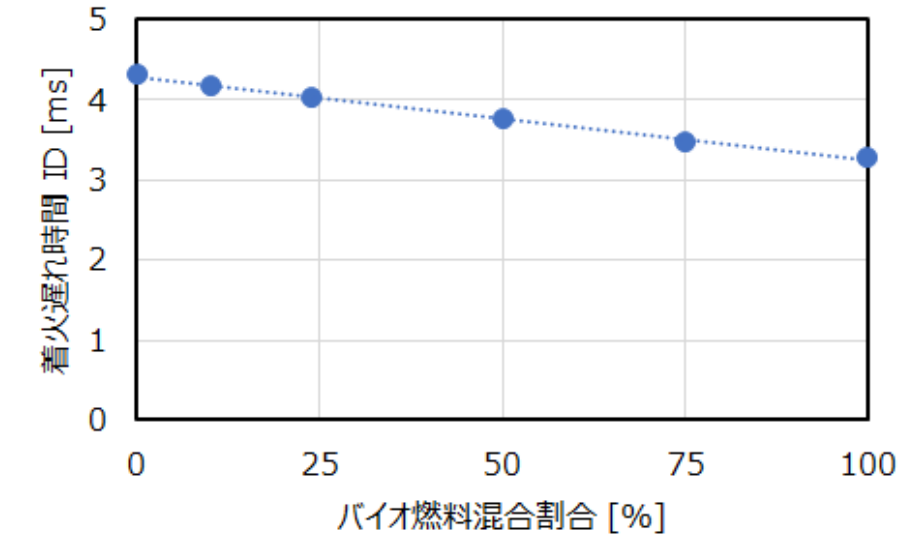
- 実機試験に先立って、ジャトロファFAME-LSA混合油の定容燃焼装置（FCA）による試験を行った（「5. 定容燃焼装置（FCA）による試験」参照）。
- バイオ混合油の燃焼特性は、ジャトロファFAME（B100）とLSAの間にあることを確認した（次ページ参照）。

ジャトロファFAME-LSA混合油のFCA試験結果

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	
A重油	0	4.31	4.59	7.07	15.61	0.29	2.48	8.54	5.00	5.06	6.93	7.06	41.14
B10	10	4.17	4.46	7.3	17.49	0.29	2.84	10.2	4.88	4.92	6.71	6.83	42.75
B24	24	4.04	4.31	7.21	18.09	0.27	2.9	10.88	4.53	4.91	6.61	6.73	44.63
B50	50	3.76	4.01	7.32	17.05	0.25	3.32	9.73	4.32	4.38	6.42	6.54	48.63
B75	75	3.48	3.71	7.63	17.56	0.23	3.91	9.94	4.03	4.06	6.23	6.34	52.98
ジャトロファFAME	100	3.29	3.52	7.87	17.70	0.22	4.35	9.83	3.81	3.78	6.00	6.11	55.94

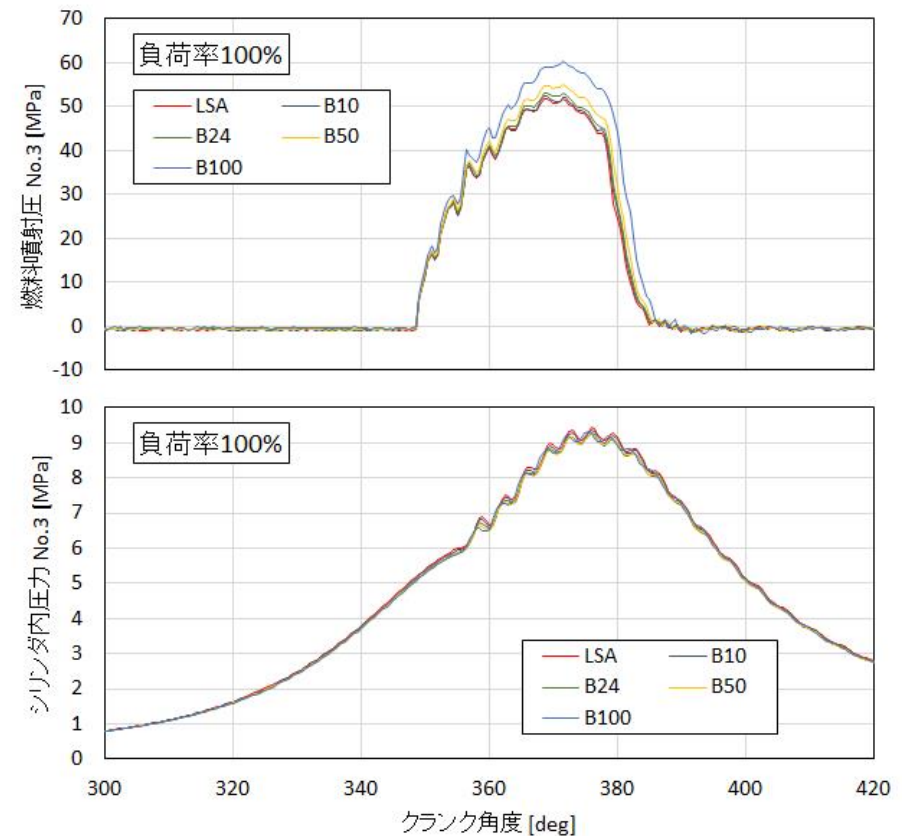
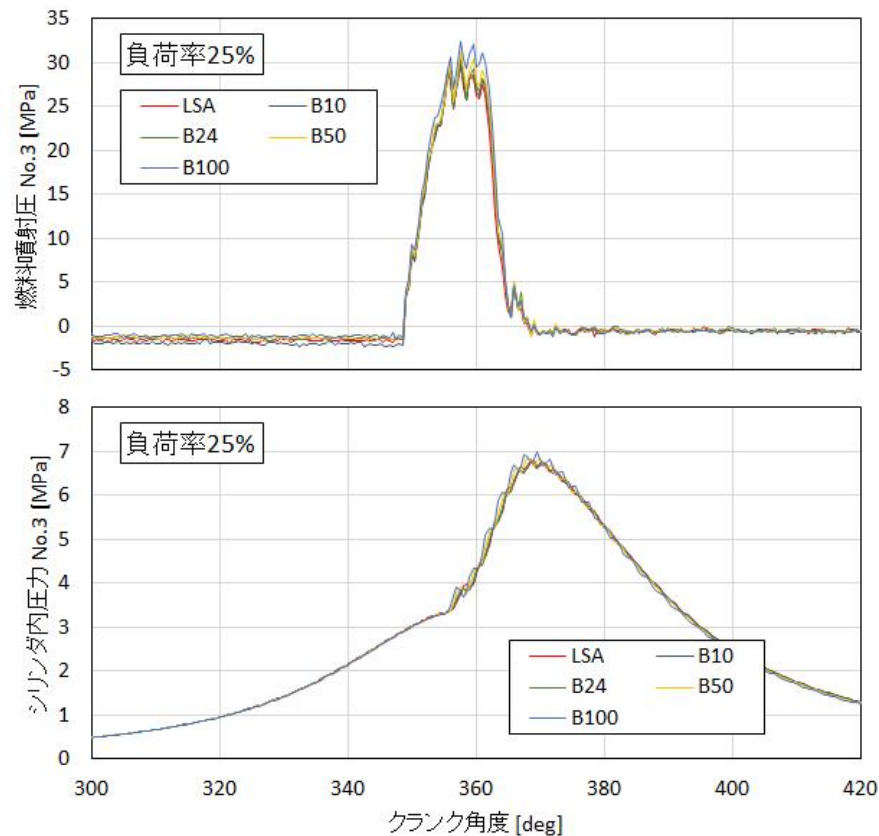
※ 規格上、ECNの適用範囲は40までのため、40を超えたECN値は参考値である。

## (3) バイオ混合油の定容燃焼装置 (FCA) による試験



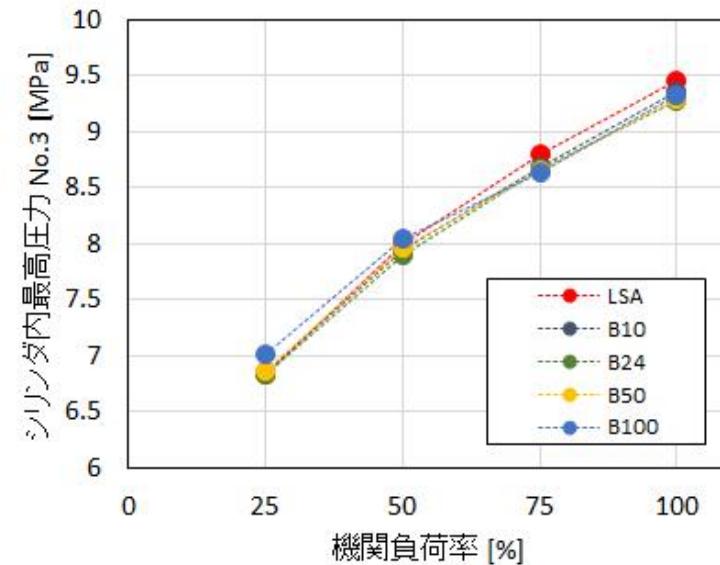
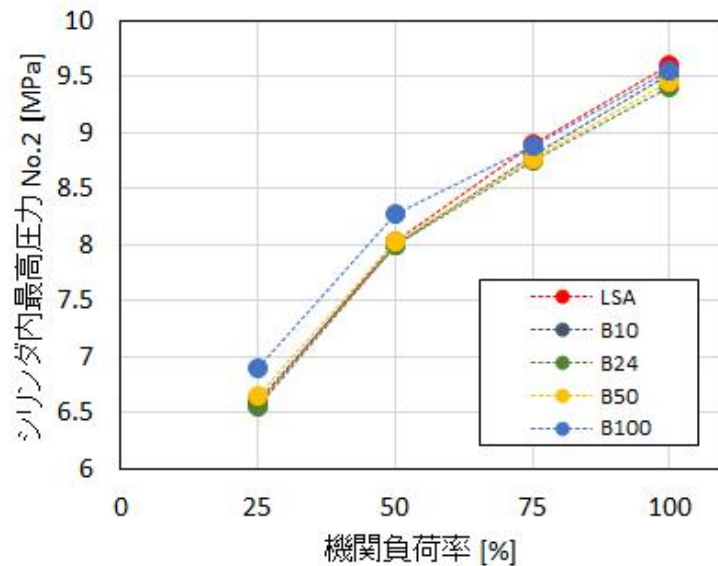
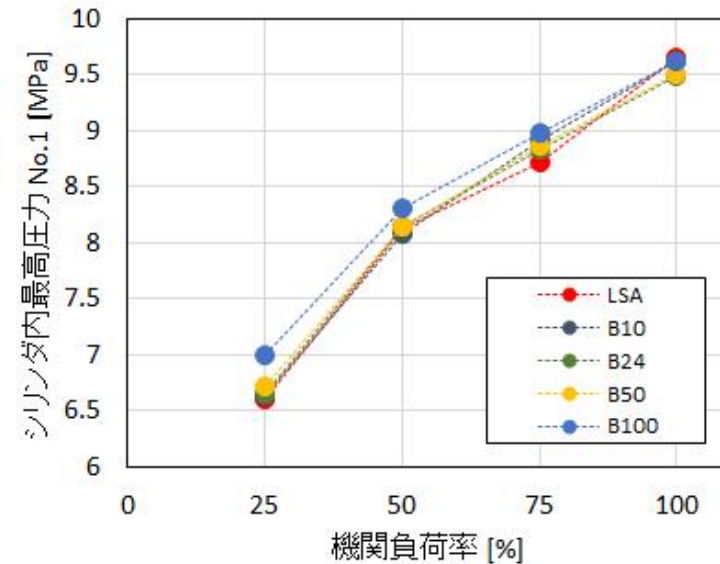
## (4) 燃料噴射圧および筒内圧力波形

- B0 (LSA) ~ B100において, 筒内圧力波形はほぼ変わらない。
- 燃料噴射圧は, バイオ燃料混合比が高まるに従ってわずかに増加する。



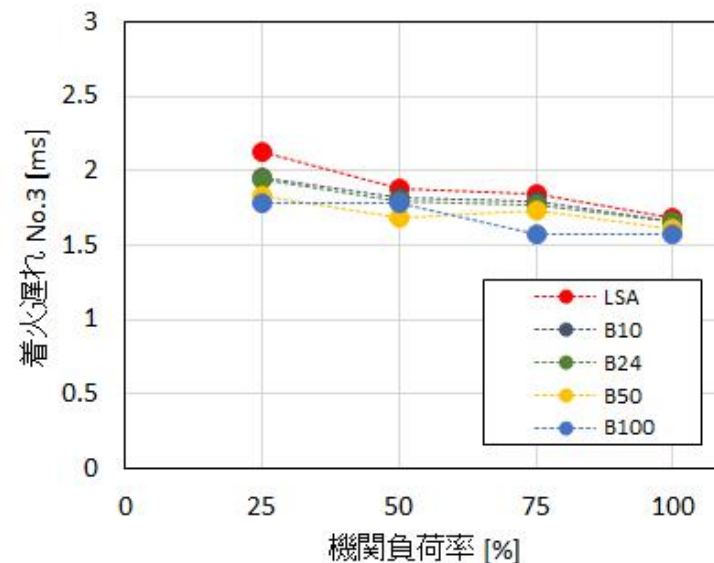
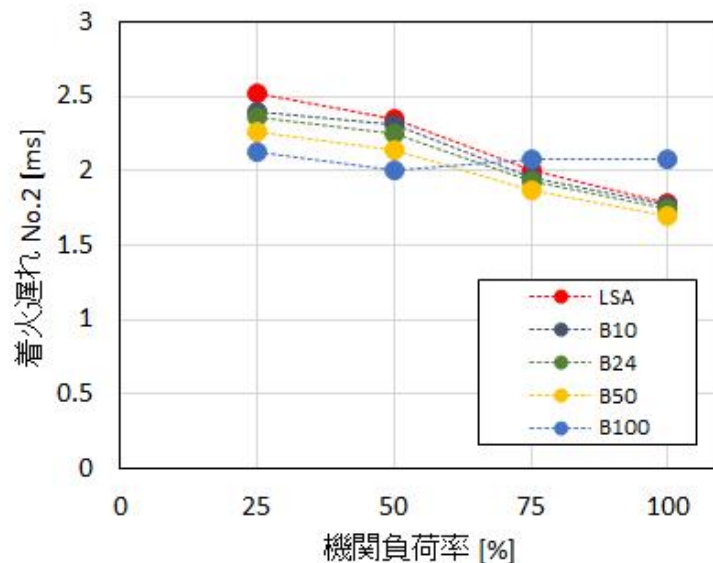
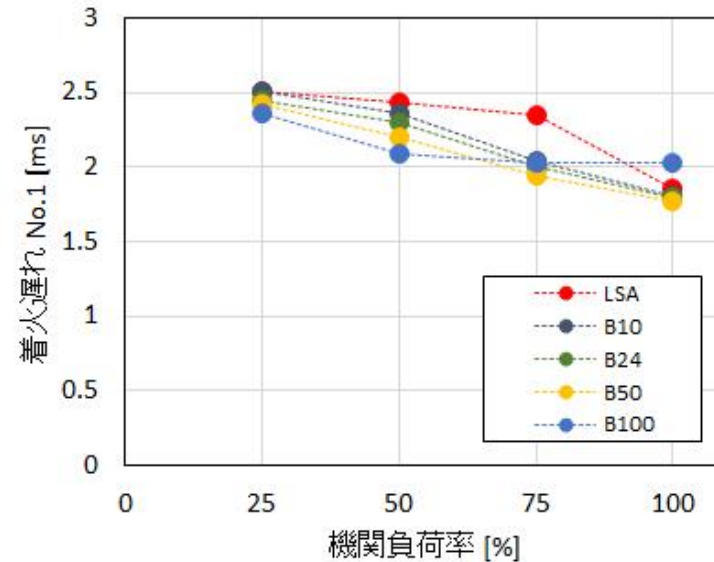
## (5) 最高筒内圧力

- ジャトロファFAME-LSA混合油 (B100を含む) の最高筒内圧力は、No.1～No.3シリンダともに、LSAとほぼ変わらない。



## (6) 着火遅れ

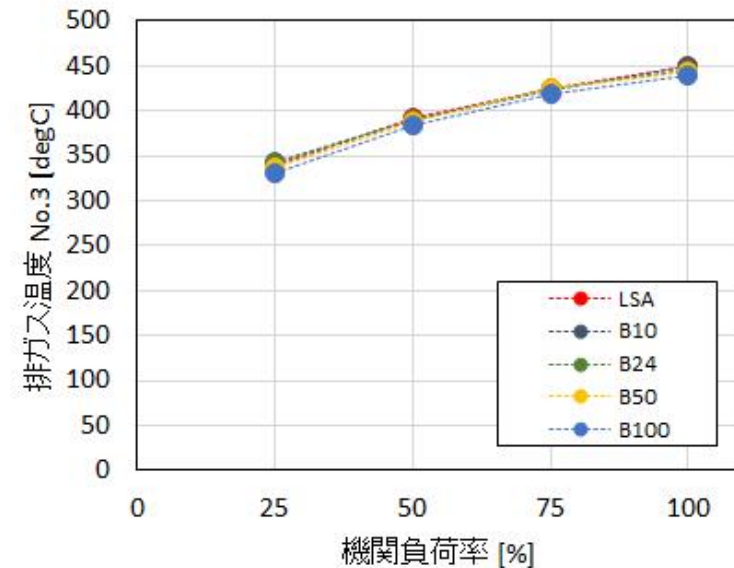
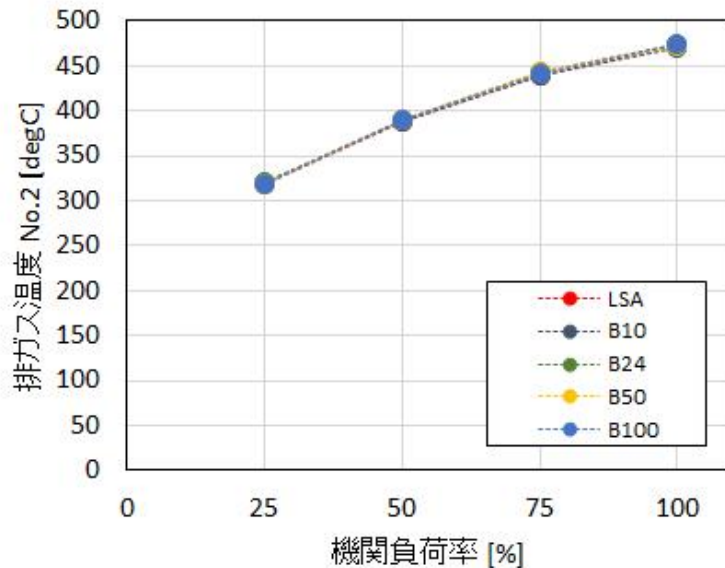
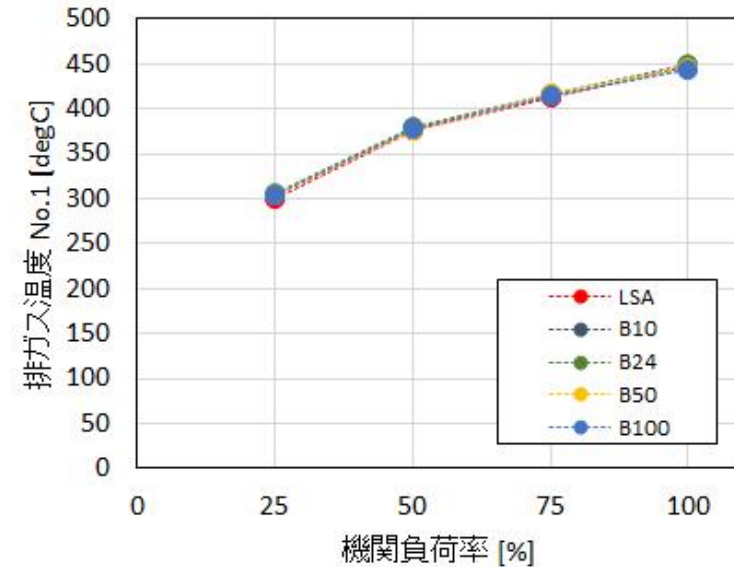
- 着火遅れの計測結果はばらつきがやや大きい。
- 着火遅れは，バイオ燃料混合比が高まるに従ってわずかに短くなる傾向が確認される。



# 10. 陸上エンジン試験

## (7) シリンダ出口排ガス温度

- ジャトロファFAME-LSA混合油 (B100を含む) のシリンダ出口排ガス温度は, No.1~No.3シリンダともに, LSAとほぼ変わらない。

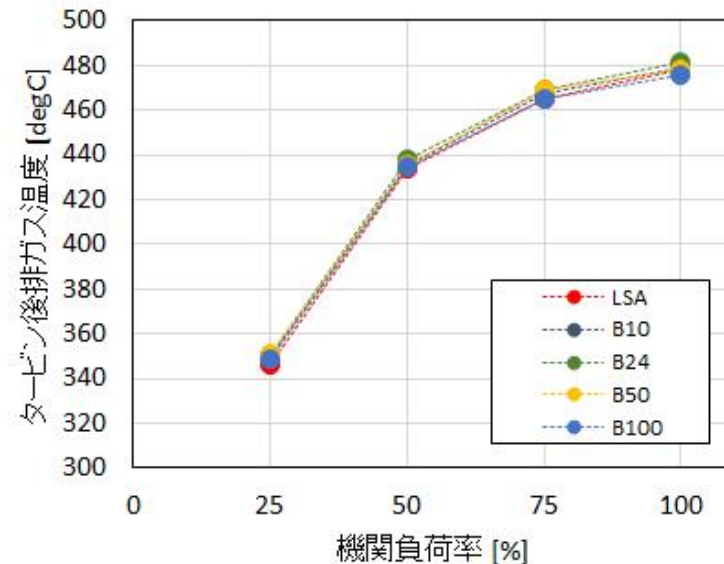
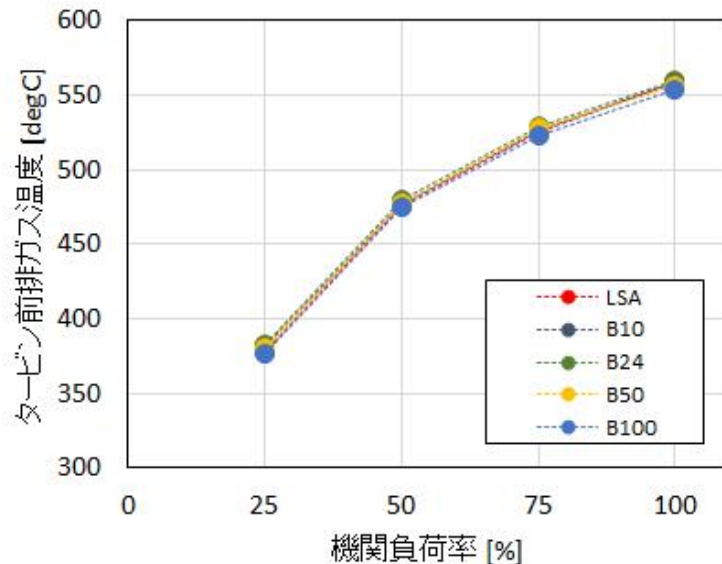
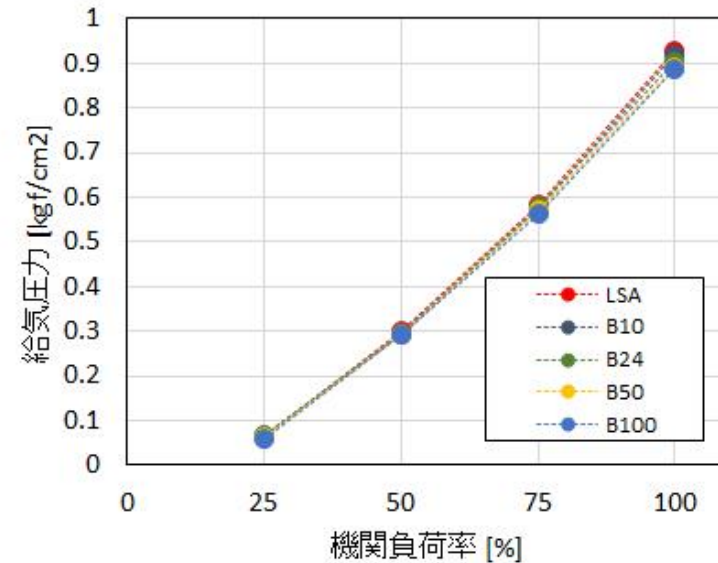




# 10. 陸上エンジン試験

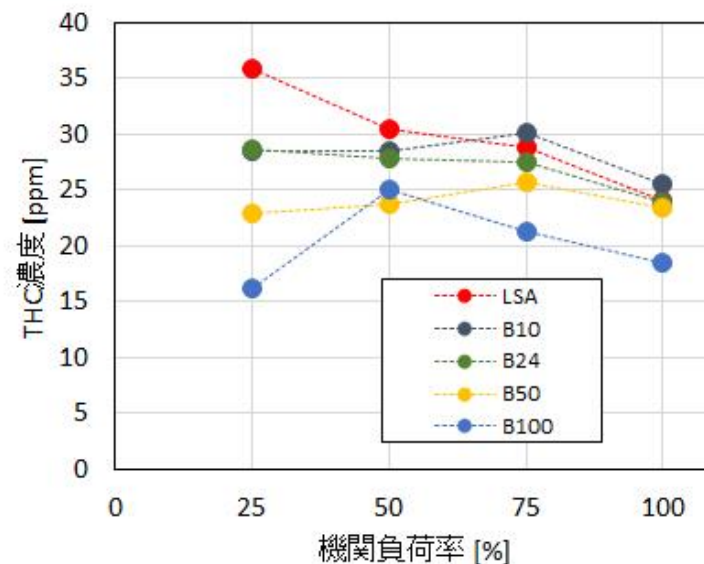
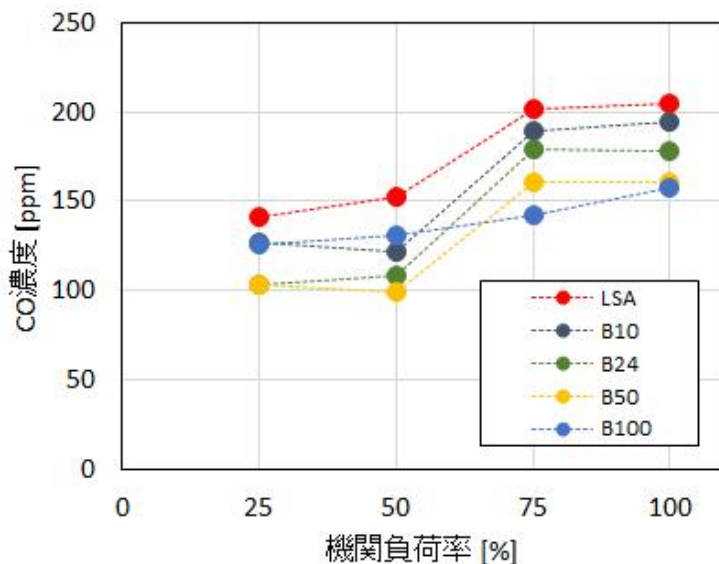
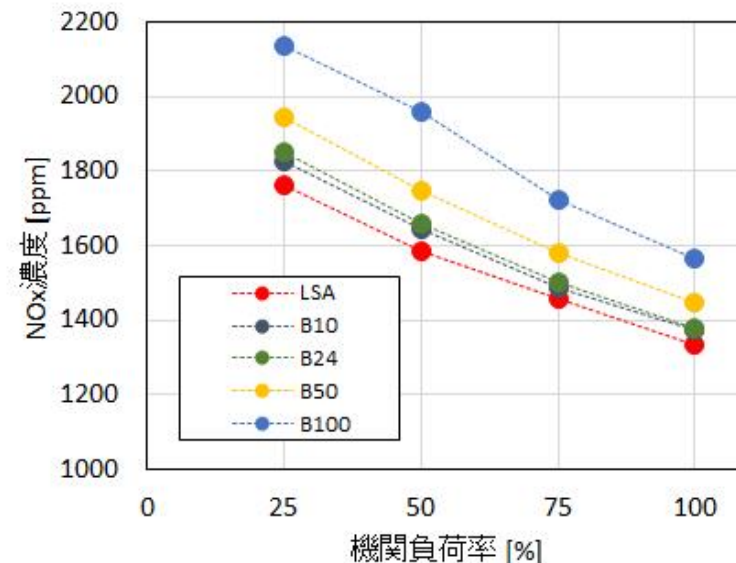
## (7) 給気圧力および過給機前後排ガス温度

- ジャトロファFAME-LSA混合油 (B100を含む) の給気圧力および過給機前後排ガス温度は, LSAとほぼ変わらない。



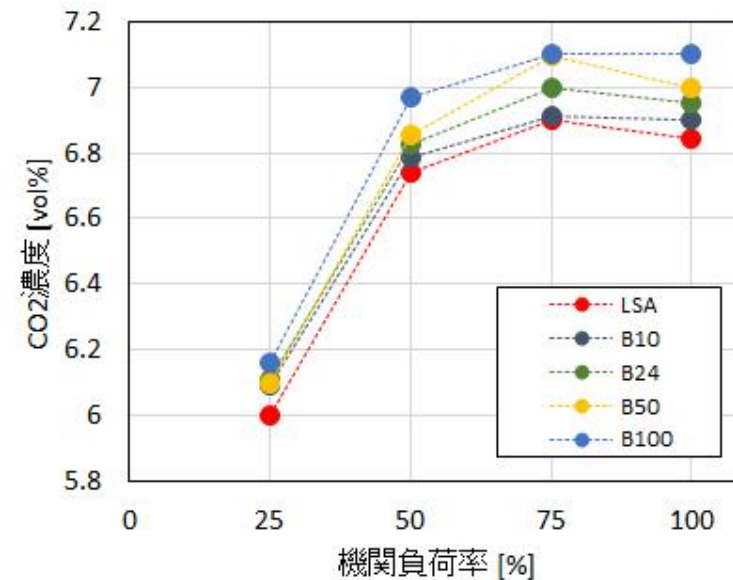
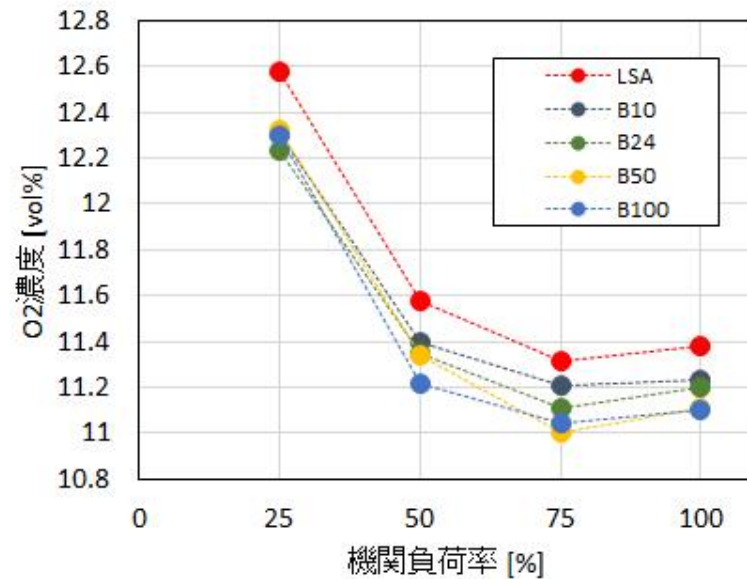
## (8) 排ガス性状

- 排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度は、バイオ燃料混合比が高まるに従って増加する。
- 排ガス中のCO濃度およびTHC濃度は、バイオ燃料混合比が高まるに従って低下する傾向がある。



## (8) 排ガス性状

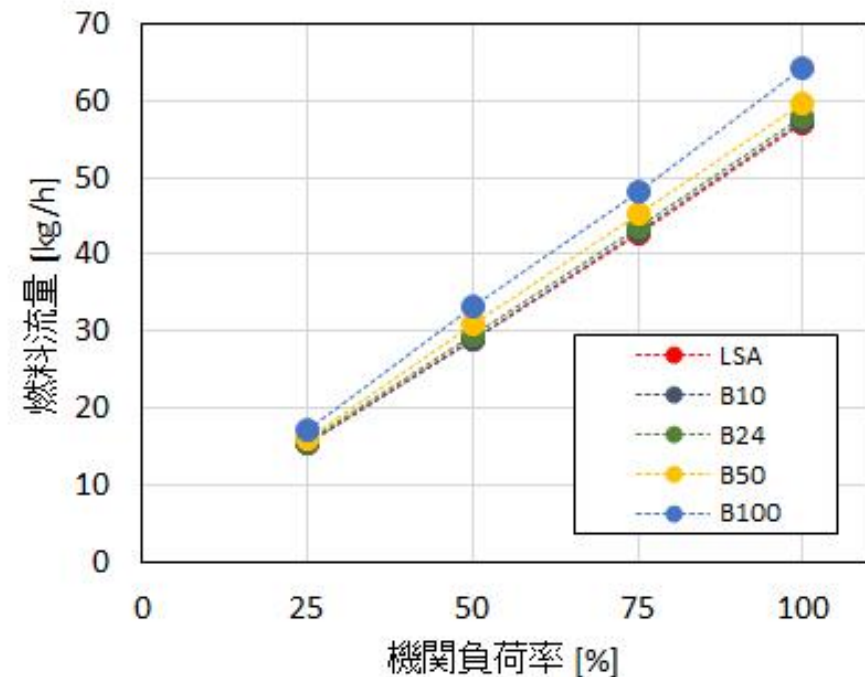
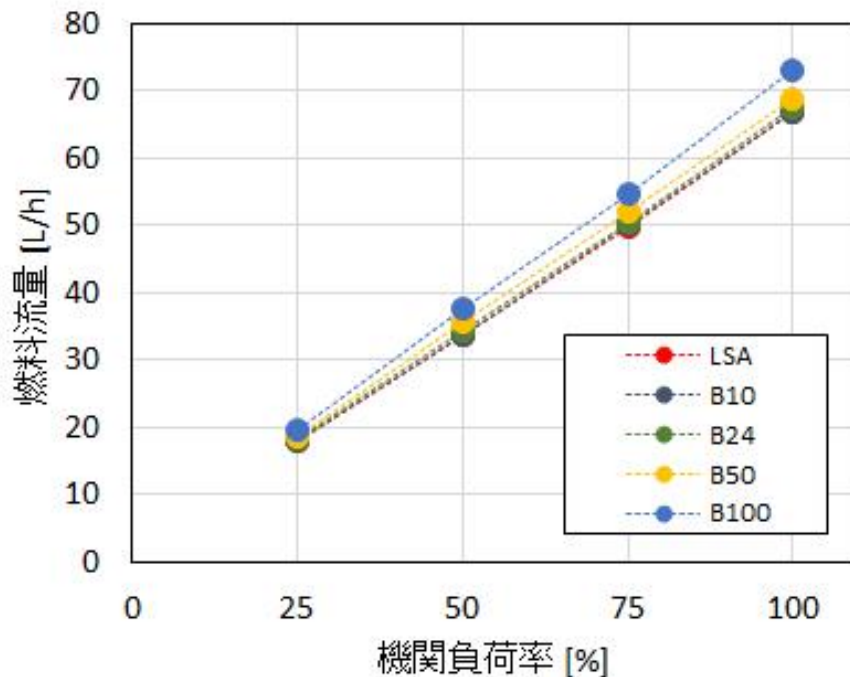
- 排ガス中の $O_2$ 濃度は、バイオ燃料混合比が高まるに従って、わずかに低下する傾向がある。
- 排ガス中の $CO_2$ 濃度は、バイオ燃料混合比が高まるに従って、わずかに増加する傾向がある。



## (9) 燃料消費量

- 燃料消費量は、バイオ燃料混合比が高まるに従って、増加する。
- バイオ燃料の発熱量がLSAと比べて低いためであると考えられる。

※ 本試験に使用した燃料油の発熱量は計測していない。ただし、上記のFCA試験において、燃料油の発熱量の影響を受ける熱発生量ARは、A重油の方が大きい値を示している。



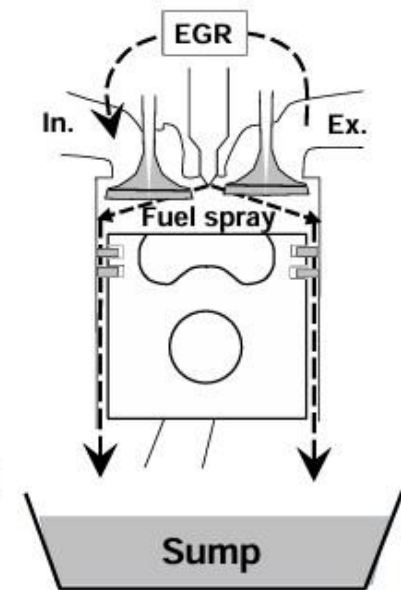
## (10) 陸上エンジン試験のまとめ

- ① ジャトロファFAMEとLSAの混合油（B10～B100）を用いて、陸上エンジン試験（トータル10時間程度の連続運転）を行った結果、エンジン運転の不具合は確認されなかった。
- ② バイオ燃料を使用した場合の筒内圧力波形や最高筒内圧、着火遅れ、排ガス温度などはLSA運転時とほぼ同等であり、燃焼性の違いは確認されなかった。
- ③ 排ガス性状について、NO<sub>x</sub>濃度はバイオ燃料混合比が高まるに従って増加すること、CO濃度やTHC濃度はバイオ燃料混合比が高まるに従って低下する傾向があることなどが確認された。
- ④ 燃料消費量は、バイオ燃料混合比が高まるに従って、増加する。バイオ燃料の発熱量がLSAと比べて低いためであると考えられる。今回の試験に用いたディーゼルエンジンでは問題は生じなかったが、燃料流量に制限があるエンジンでは、燃料の供給不足による出力低下が生じ得るので注意が必要である。

## (1) バイオ燃料によるエンジン潤滑油への影響

- 主に自動車用ディーゼルエンジンにバイオ燃料を使用する場合、バイオ燃料による潤滑油希釈が課題となることがある（文献(6)，(15)-(19)）。
- 軽油や重油と比べて気化性が低いバイオ燃料を使用する場合、エンジン内に噴射された燃料の一部が未燃のまま潤滑油に混入する現象であり、燃烧室温度が比較的低いエンジン始動時や低負荷運転時において起こりやすい。
- 船用ディーゼルエンジンへの影響は明確ではないが、この現象はエンジン形式の影響を大きく受けると考えられるため、バイオ燃料使用時は潤滑油の交換時期などをエンジンメーカーに確認することを推奨する。

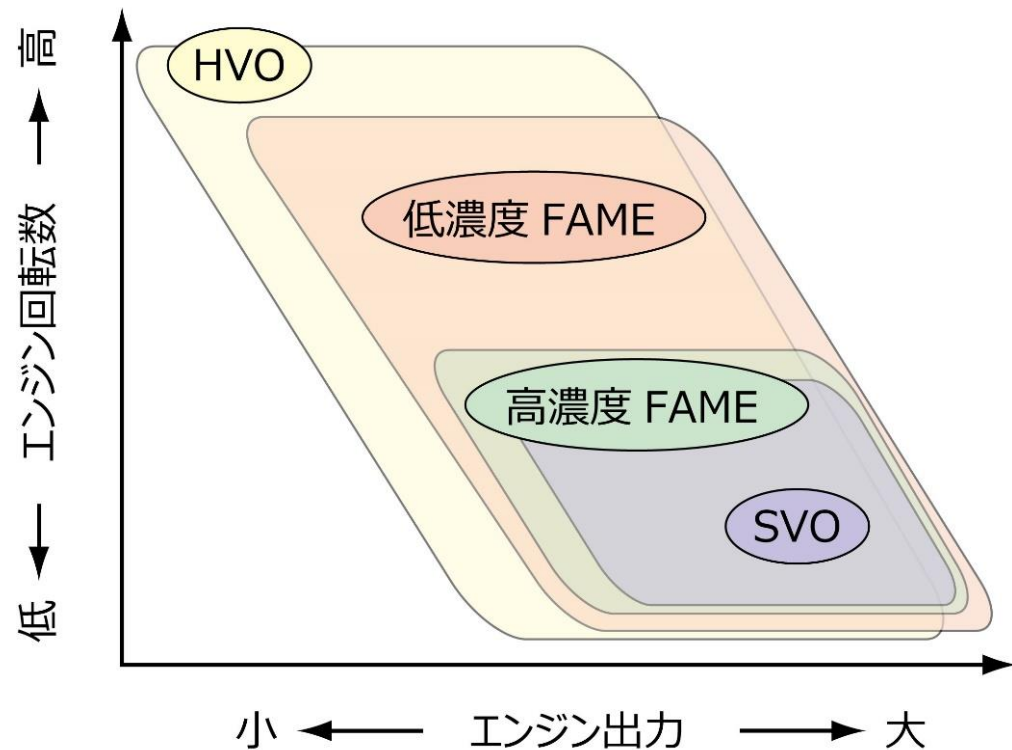
- Low temperature in cylinder at low load
  - Penetration of fuel spray to cylinder wall
  - Mixture of unburned fuel with EGR gas to intake air
- Absorption of fuel in oil layer
- Dropping into sump of oil mixed fuel



燃料油希釈のイメージ（文献(6)）

## (2) エンジン形式とバイオ燃料の使用

- 船用ディーゼルエンジン以外でも、自動車用、鉄道用、陸上発電用などで様々な分野においてバイオ燃料に対する取り組みや実証試験が行われている（文献(20)～(22)など）。
- エンジンの特性上、特に小型で高速のエンジンはバイオ燃料の種類や混合割合の制限を受けることが多い。バイオ燃料使用時は、使用可能なバイオ燃料の種類や混合割合をエンジンメーカーに確認することを推奨する。



各種エンジンにおけるバイオ燃料適用のイメージ

## 12. まとめ

---

2023年度の調査研究において実施したバイオ燃料関連の陸上試験より、以下の結果が得られた。

- ① 数種類のバイオ燃料の動粘度・密度の計測を行い、LSC重油またはA重油と混合して使用する場合のヒーティングの必要性などを考察した。
- ② 数種類のバイオ燃料の燃焼性や陸上エンジン試験を行った。いずれのサンプル油においても、着火性は良好であり、問題は確認されなかった。
- ③ 数種類のバイオ燃料とLSC重油の混合安定性試験並びに異なるバイオ燃料を継ぎ足した場合の混合安定性試験を行った結果、高温状態で長時間保管した場合であっても、安定性の悪化は確認されなかった。ただし、混合安定性に問題がない場合であっても、バイオ燃料または混合油をより長期に保管した場合、あるいはバイオ燃料を低温状態とした場合など、バイオ燃料由来の固形物が析出することがある。
- ④ 酸価計測および酸化安定性試験を行い、酸化防止剤の効果や混合油の酸化劣化特性についての知見を得た。バイオ燃料の長期保管や高温保管を避け、少なくとも誘導期間に至るまでに使用することが重要である。



## 12. まとめ

---

- ⑤ 銅板腐食試験を行った結果、厳しい高温・長時間の条件下においては、銅板表面の変色や腐食が確認された。また、バイオ燃料に水分が含まれると鉄鋼材料を腐食させることがあり得ることを確認した。
- ⑥ 文献調査を行い、バイオ燃料によるエンジン潤滑油への影響などを調べた。バイオ燃料による潤滑油希釈はエンジン形式の影響を大きく受けると考えられるため、バイオ燃料使用時は潤滑油の交換時期などをエンジンメーカーに確認することを推奨される。
- ⑦ エンジンの特性上、特に小型で高速のエンジンはバイオ燃料の種類や混合割合の制限を受けることが多い。バイオ燃料使用時は、使用可能なバイオ燃料の種類や混合割合をエンジンメーカーに確認することを推奨する。

# 参考文献

---

1. 中村他, バイオディーゼル燃料の品質性状と車両影響及びその対策, エネルギー・資源, Vol.27, No.5, p.366-370, 2006.
2. 中村他, バイオディーゼル燃料の酸化安定性とその改善, エネルギー・資源, Vol.27, No.6, p.426-430, 2006.
3. 太田他, 食用油脂の酸化防止剤, 油化学, Vol.28, No.10, p.747-759, 1979.
4. 井上, バイオ燃料の実用性評価技術, こべるにくす, No.36, p.20-22, 2009 .
5. 小宮, 山根他, FAMEへの酸化防止剤と低温流動性向上剤の添加が燃料特性およびディーゼル排気特性に及ぼす影響, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.2, p.269-274, 2013.
6. 森, バイオディーゼル燃料の性状改善とその効果に関する研究, 滋賀県立大学大学院, 博士学位論文, 2017.
7. JIS K 2390「自動車燃料－混合用脂肪酸メチルエステル（FAME）」
8. ASTM D 4740, Standard Test Method for Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test
9. 全国バイオディーゼル燃料利用推進協議会, バイオディーゼル燃料の製造・利用に係るガイドライン, 2023.
10. EN 14122, Fat and oil derivatives Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test)
11. ASTM D664, Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration
12. JIS K 2513「石油製品-銅板腐食試験方法」
13. ASTM D 130, Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test
14. ISO 8217, Fuel Standard for Marine Distillate Fuels

# 参考文献

---

15. 北崎, コージェネレーション機関におけるバイオディーゼル燃料の使用開発-廃食油バイオディーゼルの利用技術開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.47, No.1, p.71-76, 2012.
16. 長谷川他, 廃食油 B D F の船舶利用における潤滑油への影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.47, No.1, p.77-82, 2012 .
17. 日本内燃力発電設備協会, バイオ燃料等の自家発電設備への適合性調査⑧, [https://nega.or.jp/publication/press/2015/pdf/2015\\_12\\_14.pdf](https://nega.or.jp/publication/press/2015/pdf/2015_12_14.pdf)
18. Robert Ian Taylor, Fuel-Lubricant Interactions: Critical Review of Recent Work, Lubricants, 9, 92, 2021.
19. 経済産業省, 石油精製・利用関連分野に係る技術に関する施策・事業, 評価報告書案, [https://www.meti.go.jp/policy/tech\\_evaluation/c00/C0000000H25/140307\\_sekiyu2/s ekiyu2\\_siryu4\\_2.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H25/140307_sekiyu2/s ekiyu2_siryu4_2.pdf)
20. 田貝 (IHI原動機) , 4サイクルディーゼル機関の環境対応技術に関する取り組み, シップデータセンター, 第2回内航船デジタルセミナー, ～内航デジタルの先進的取り組みと外航デジタルの活用可能性を検討～ 2024.
21. 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 軽油使用ディーゼルエンジンを搭載する内航船舶におけるバイオ燃料の導入試験, 2021, [https://www.jrft.go.jp/ship/asset/beca0c2d4d85afb117ac5786e4a08414\\_1.pdf](https://www.jrft.go.jp/ship/asset/beca0c2d4d85afb117ac5786e4a08414_1.pdf)
22. 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, A重油使用ディーゼルエンジンにおけるバイオ燃料の利用可能性に関する検証, [https://www.jrft.go.jp/ship/heavyoilA\\_biofuel\\_detail.pdf](https://www.jrft.go.jp/ship/heavyoilA_biofuel_detail.pdf)