

本調査は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構が
トライボテックス株式会社に委託して実施したものである。

船舶におけるバイオディーゼル燃料の活用に向けた 潤滑特性等に関する調査

報 告 書

<本報告書の利用についての注意・免責事項>

・本報告書の内容は、作成時点で入手した情報や試験当時に使用した試料等に基づくものであり、その後の仕様変更、製品改良等によって本報告書の内容とは状況が異なる場合があります。また、掲載した情報・コメントは受託企業の判断によるものが含まれ、一般的な情報・解釈がこのとおりであることを保証するものではありません。本報告書を通じて提供される情報に基づいて何らかの行為をされる場合には、必ずご自身の責任で行ってください。

・利用者が本報告書を利用したことから生じる損害等に関し、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構及び受託企業は、いかなる責任も負いかねます。

目次

1. タイトル.....	1
2. 調査目的.....	1
3. バイオ燃料の油種等に関する調査.....	2
3.1. 試験用バイオ燃料の候補選定.....	2
3.1.1. 試験用燃料油候補の絞り込み.....	2
3.2. 試験用燃料油候補の油分析.....	4
3.3. 試験用燃料油候補の比較.....	5
3.3.1. 各試験用燃料油の特性比較.....	5
3.3.3. 試験用燃料油候補の市場性評価.....	7
3.4. 試験用燃料油の選出.....	8
3.4.1. 各油種の選定理由.....	8
3.5. 試験油の作製(酸化劣化油生成).....	8
3.5.1. 「経年劣化による性状変化(スラッジ発生状態)確認」を目的とする酸化劣化油の作製.....	8
3.5.2. RPVOT 装置を用いたすべり摩擦試験用酸化劣化油の作製.....	12
3.6. 性状変化(スラッジ発生状態)確認用サンプルの分析.....	14
3.7. 潤滑特性試験用サンプルの試験前分析.....	16
3.7.1. 潤滑特性試験用サンプルの性状評価.....	16
4. 燃料油を用いた潤滑特性(トライボロジー特性)試験.....	18
4.1. 試験装置の概要.....	19
4.2. 試験条件.....	21
4.2.1. 試験ディスク・ブロックの仕様.....	21
4.2.2. 試験機の設定.....	22
4.2.3. 試験回数.....	23
4.2.4. 各種取得データ.....	26
4.3. 試験データまとめ.....	29
4.3.1. すべり試験データの取得.....	29
4.3.2. 試験油分析.....	29
5. 評価・考察.....	31
5.1. 各試験データの比較と評価.....	31
5.1.1. 摩擦係数の比較と評価.....	32
5.1.2. 試験面温度の比較と評価.....	32
5.1.3. 表面粗さの比較と評価.....	34
5.1.4. 比摩耗量の比較と評価.....	36
5.1.5. 油中金属濃度の比較と評価.....	37
5.1.6. フェログラフィ(定量フェログラフィ)の比較と評価.....	38
5.1.7. 電子顕微鏡写真およびX線組成解析データの整理.....	41
6. 結論.....	43

6.1.	単一パラメータ内での相対比較	43
6.2.	複合的なパラメータ比較による潤滑特性の評価.....	46
6.3.	バイオディーゼル燃料の適用性.....	47

1. タイトル

船舶におけるバイオディーゼル燃料の活用に向けた潤滑特性等に関する調査

2. 調査目的

脱炭素に向けた動きが加速するなか、内航海運についても CO₂ 排出削減に向けた取組を戦略的に進めていくことが求められている。このような中、既存船における CO₂ 削減対策の一つとして従前の機関部へ大規模改修をすることなく使用可能な燃料（ドロップイン燃料）として、バイオディーゼル燃料（以下「バイオ燃料」という。）が注目され、海事局では令和 5 年に「船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン」を策定するなど枠組み整備等が進んでいる。

一方、バイオ燃料は、燃料として利用する場合に送油系統の各種ポンプや燃焼室に噴霧する噴射ノズル等の摺動部等において、燃料油としてのトライボロジー特性（潤滑・摩擦・摩耗特性。以下「潤滑特性」という。）や、熱的環境下における劣化特性を有しているのか等について、内航海運事業者等が利用できる情報が限定的な状況である。

バイオ燃料は、CO₂ 削減効果を期待しつつも、原動機の心臓部である燃料噴射ポンプ等に使用するには、従来燃料と同等のトライボロジー特性や劣化特性を有するかを確認する必要がある。そのため、本取組みではバイオ燃料の、基本的性状等を調査するとともに、摩擦試験等を実施し潤滑特性等の評価を実施する。

3. バイオ燃料の油種等に関する調査

3.1. 試験用バイオ燃料の候補選定

3.1.1. 試験用燃料油候補の絞り込み

燃料油を用いた潤滑特性調査試験を実施するにあたり、試験用燃料油の候補となるバイオ燃料油種の絞り込みを、次の表 1 の検討内容および使用実績を参考に実施した。

表 1. 試験用燃料油候補の検討

油種	区分	検討内容および使用実績
バイオ燃料	FAME	<ul style="list-style-type: none"> • Fatty Acid Methyl Ester：脂肪酸メチルエステル • 植物油等を原料に、メタノールとのエステル交換反応で製造されるバイオディーゼル燃料 • 製造設備がシンプルで、製造コストは HVO に勝るが SVO に劣る • 製造過程での CO₂ 低減効果は SVO に劣る
	HVO	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrotreated Vegetable Oil：水素化処理油 • 植物油等を原料とし、水素添加して製造される高性能バイオディーゼル燃料 • 水素添加により酸素が除去され、パラフィン系炭化水素となり、軽油と構造が近く、燃料油としての品質に優れる • 水素化処理の工程から、製造コストが割高となり、製造過程での CO₂ 排出問題も発生する • SAF の連産品として生産量が増大する可能性もある
	SVO	<ul style="list-style-type: none"> • Straight Vegetable Oil：粗植物油 • 化学処理をせず植物油等をそのまま、または軽油等と混ぜて製造されるバイオディーゼル燃料 • 製造過程における CO₂ 排出量が低く、CO₂ 低減対策に寄与 • 製造コストが安価であり、FAME や HVO に勝る • 製造品質が原材料に依存しムラがある
重油	A 重油	<ul style="list-style-type: none"> • 従来燃料
	C 重油	<ul style="list-style-type: none"> • 従来燃料

その結果、船舶での使用を前提とした場合、品質が比較的安定していることや、製造コストが安価であることを踏まえ、バイオ燃料の試験油候補として FAME を選択の上、表 2 に示す「3.1.2. 試験用燃料油候補リサーチの条件」を元に、表 3 に示す 9 種類の燃料油を試験油候補として選定した。

表 2. 試験用燃料油候補のリーサーチ条件

燃料油種	選定条件
バイオ燃料油 (FAME)	廃食油を原料として精製された FAME (脂肪酸メチルエステル) およびポンガミア、テリハボク、藻類、ジャトロファ、トールロジン等の非食用・非可食油脂植物を原料として精製された FAME から選定
従来燃料油 (重油)	日本産業規格 (JIS 規格) K2205 (重油) に規定される A 重油及び C 重油の内、硫黄分 0.5 質量%以下の船用燃料油として用いられる燃料から各 1 種類以上を選定

表 3. 試験用燃料油候補

油種	サンプル名	メーカー又は購入先
FAME	FAME①	A 社
	FAME②	B 社
	FAME③	C 社
	FAME④	D 社
	FAME⑤	E 社
重油	LSA①	F 社
	LSA②	G 社
	LSC①	H 社
	LSC②	I 社

3.2. 試験用燃料油候補の油分析

前項で選定した 9 油種から、実際に試験に使用する油種を選定するために、次の表 4 の No.1～5 に示す項目および金属濃度分析を実施した。

表 4. 試験油の選定用分析・比較項目

No.	項目	規格	備考
1	動粘度	JIS K 2283	摺動特性に影響する粘性変化の調査
2	粘度指数	JIS K 2283	摺動特性に影響する粘度と温度変化の特性調査
3	引火点	JIS K 2265	PM(ペンスキーマルテンス)法等による燃焼特性の調査
4	全酸価	JIS K 2501	摺動面の酸化と燃料劣化に与える酸化特性の調査
5	酸化安定性	JIS K 2514-1	RPVOT (水有り、水無し)
6	潤滑特性等	--	--
7	耐摩耗性	--	--
8	使用実績	--	--
9	経済性	--	--

3.3. 試験用燃料油候補の比較

3.3.1. 試験用燃料油の特性比較

燃料油候補の中から実際に試験に使用する燃料油を選出するため、「3.2. 試験用燃料油候補の油分析」で実施した分析結果を次の表 5 にまとめ、各分析結果から試験用燃料油候補の潤滑特性および性状特性の比較評価を行った。

表 5. 試験用燃料油候補の性状分析結果

油種	サンプル名	動粘度		粘度 指数	引火点	酸価	酸化安定性	
		40°C	100°C				水有	水無
		mm ² /s	mm ² /s	--	°C	mgKOH/g	min	min
FAME	FAME①	4.58	1.78	158	146.0	0.49	11	11
	FAME②	4.10	1.69	169	174.0	0.07	16	18
	FAME③	4.24	1.69	158	180.0	0.19	13	20
	FAME④	4.23	1.69	159	182.0	0.14	15	15
	FAME⑤	4.47	1.73	151	186.0	0.08	14	14
重油	LSA①	2.65	1.12	106	68.0	0.00	40	40
	LSA②	3.64	1.35	338	80.0	0.01	43	68
	LSC①	45.97	6.24	75	112.0	0.02	85	255
	LSC②	218.70	13.44	23	132.0	0.02	83	180

※ 粘度指数の計算は「JIS K2283」に基づいて実施されるが、本規格内では計算の対象となる粘度は2mm²/s以上となるため、測定結果が2mm²/sを下回る試料の粘度指数については参考値となる。

① 動粘度および粘度指数

「動粘度」は円滑な潤滑に必要な不可欠な基本性状であり、適正な油膜を形成するための大切な指標で、全ての潤滑油の基本指標であることから、表 5 に示す燃料油候補の物理性状分析結果をもとに、各燃料油の40°Cおよび100°Cにおける動粘度を比較した。

その結果、A重油では「LSA①」、C重油では「LSC①」がそれぞれ別の候補燃料油に比較し、温度の変化による動粘度の変化が小さい(=粘度指数に優れる)ことが判明した。また、FAMEの比較では、FAME②の動粘度の変化が小さく、若干の優位性が見られるものの、その他4種との間に大きな差は生じなかった。

② 引火点

引火点は油（サンプル）の引火しやすさを示す指標であるため、その値を以って潤滑特性を直接的に評価することはできないが、潤滑油として用いる際の取り扱いやすさの指標であると言える。

このような前提で分析結果を見てみると、A 重油では「LSA②」、C 重油では「LSC②」の引火点がやや高く、若干ではあるが取扱いやすいことが確認された。また FAME においては、「FAME①」がやや低いものの、全油種で同等の引火点であり、A 重油、C 重油に比較すると取り扱いやすいことが確認された。

③ 酸価

酸価は、試料油中に含まれる酸性物質の総量を示す指標であり、試料油の酸化劣化に伴い増大する。また、油自身の酸性分の量も反映されるため、新油分析においても検出される。

本試験の候補となる各試料油を分析した結果、重油は4種とも酸価の低いタービン油相当（0.01～0.04程度）であることが分かった。FAME については、FAME②のみ、重油に近い酸価となったが、FAME③、FAME④、FAME⑤はそれらに比較しやや高い値であった。他方、FAME①は9種の試料油の中では最も高い値が検出された。

④ 酸化安定性

酸化安定性は、試料油を強制的に酸化劣化させた際の耐酸化性を示す指標であり、数値が高いほど耐酸化性が良好な油といえる。本試験の結果では、FAME においては廃食用油、非可食用油に大きな違いはなく、同程度の耐酸化性を持つことが確認された。これに対し、A 重油で、酸化触媒となる水を入れない場合の試験において、LSA①、LSA②共に FAME に比較し3～5倍程度の耐酸化性を持つことが判明した。また、C 重油でも同様に、水を入れない場合では、LSC①、LSC②共に、FAME に比較し10倍以上の耐酸化性があり、より長く潤滑油として使用できる可能性が確認された。

3.3.2. 試験用燃料油候補の潤滑特性・耐摩耗性比較

潤滑油における耐摩耗性とは、主に耐摩耗剤や極圧添加剤といった摩耗を防止するための添加剤の機能に依存する。本試験の対象となる試料油は燃料油であり、いわゆる同じ油であっても潤滑油とは使用目的が異なることもあり、リン（P）や亜鉛（Zn）、といった、代表的な耐摩耗添加剤や極圧剤の成分含有が見られない。また、硫黄（S）も摩耗防止の添加剤の成分となるが、前述の耐摩耗剤成分が検出されていないことから、今回検出された硫黄分は燃料油そのものの成分であると推察できる。そのため、本項では耐摩耗に対する性能の事前比較評価が困難であることから、実際の摩耗試験の結果から各油種の耐摩耗性の違いを評価することとした。

3.3.3. 試験用燃料油候補の市場性評価

各試験用燃料油候補の経済性（各燃料の購入額）は次のとおりであった。

表 6. 試験用燃料油候補の経済性

油種	サンプル名	販売単価（円/L）
FAME	FAME①	【削除】
	FAME②	【削除】
	FAME③	【削除】
	FAME④	【削除】
	FAME⑤	【削除】
重油	LSA①	【削除】
	LSA②	【削除】
	LSC①	【削除】
	LSC②	【削除】

表 7. 油種・区分別の特徴と導入実績(参考資料)

油種	サンプル名	特徴と導入実績
FAME	FAME①	FAME は船舶用の燃料油としての活用が模索されており、機構による回収・保管に関する調査等が実施されている。
	FAME②	
	FAME③	
	FAME④	
	FAME⑤	
重油	LSA①	軽油の代替燃料として一部の船舶用エンジンや発電機等の燃料として利用されている
	LSA②	
	LSC①	船舶、ボイラー、一部発電機用の燃料として世界中で広く利用されている
	LSC②	

3.4. 試験用燃料油の選出

各試験用燃料油候補の潤滑特性、耐摩耗性、市場性等を比較・評価した結果、本試験に使用する試料油は、表 8 に示す 5 種類の燃料油とした。

表 8. 潤滑特性（トライボロジー特性）試験に用いる燃料油

油種	サンプル名	
FAME	FAME①	
	FAME②	
	FAME⑤	
重油	LSA①	
	LSC①	

3.4.1. 各油種の選定理由

機構等との検討の結果 FAME①、FAME②、FAME⑤、LSA①、LSC①を選定した。なお、試験に使用する A 重油及び C 重油は各 1 種類となるため、以後は LSA①を「LSA」、LSC①を「LSC」の名称（サンプル名）で記載する。

3.5. 試験油の作製（酸化劣化油生成）

燃料油を潤滑油とし、その潤滑特性を評価するためには、新油状態での潤滑だけではなく、潤滑油（燃料油）が劣化した場合の性状変化の状態や、潤滑特性への影響も調査する必要がある。

そのため、本試験では、試料油となる 5 つの燃料油に対し、「経年劣化による性状変化（スラッジ発生状態）確認」を目的とする酸化劣化油と、「酸化劣化程度の違いによる潤滑特性への影響の確認」を目的とする潤滑特性試験用の酸化劣化油をそれぞれ作製した。

3.5.1. 「経年劣化による性状変化（スラッジ発生状態）確認」を目的とする酸化劣化油の作製

性状変化を調査するサンプルの作製には、内部の温度を長時間一定に保つことが出来る恒温槽を用いて実施した。



図 1. 恒温槽の外観

① 試験条件

夏季(高温側)での影響を考慮して「35℃」へ設定し、同温度における「1 ヶ月」、「2 ヶ月」、「3 ヶ月」、「6 ヶ月」、「12 ヶ月」の5つの条件での保管を想定し、各期間に相当する酸化劣化油を作製した。

表 9. 燃料油の想定保管温度と期間

想定保管温度 [°C]	想定保管期間 [月]
35	1
	2
	3
	6
	12

なお、試料油の作製に際し、35℃の保管温度にて、最長で12ヶ月間をかけ酸化劣化油を生成することは現実的ではないことから、化学反応の速度が温度により変化する「アレニウスの法則^{*1}」に基づく「10°C2倍則（10°C半減則）^{*2}」を利用して適切な試験時間を求め、加速試験による手法で実施した。その結果、表10に示すように、試験温度は115°Cが妥当であると判断してサンプルを作製した。

表 10. アレニウスの法則に基づく試験温度と時間

保管温度 (°C)	劣化速度 (倍)	試験時間(時間)				
		想定保管期間(月)				
		1	2	3	6	12
0	0.125	5,840.0	11,680.0	17,520.0	35,040.0	70,080.0
15	0.25	2,920.0	5,840.0	8,760.0	17,520.0	35,040.0
25	0.5	1,460.0	2,920.0	4,380.0	8,760.0	17,520.0

35	0	730.0	1,460.0	2,190.0	4,380.0	8,760.0
45	2	365.0	730.0	1,095.0	2,190.0	4,380.0
55	4	182.5	365.0	547.5	1,095.0	2,190.0
65	8	91.3	182.5	273.8	547.5	1,095.0
75	16	45.6	91.3	136.9	273.8	547.5
85	32	22.8	45.6	68.4	136.9	273.8
95	64	11.4	22.8	34.2	68.4	136.9
105	128	5.7	11.4	17.1	34.2	68.4
115	256	2.9	5.7	8.6	17.1	34.2
125	512	1.4	2.9	4.3	8.6	17.1
135	1,024	0.7	1.4	2.1	4.3	8.6
145	2,048	0.4	0.7	1.1	2.1	4.3



図2. 恒温槽を使用した強制酸化劣化油生成の様子

※1 アレニウスの法則

アレニウスの式	$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$
k : 反応速度定数	T : 温度 (絶対温度K)
E : 反応の活性エネルギー	A : 定数
R : 気体定数 (1.987 calK ⁻¹ mol ⁻¹)	

※2 10°C2倍則 (10°C半減則)

反応の活性エネルギーを20kcal/molとし、2つの温度条件 T_1 、 T_2 とした場合の反応速度定数を k_1 、 k_2 とおくと、 k_2/k_1 は以下の通りとなる。

$$\frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

T_1 から T_2 に10°C上昇した場合の反応速度定数の比 k_2/k_1 を求めると下表のように、おおよそ2倍程度となるため、10°C2倍則が成り立つことがわかる。

温度°C		速度比
T1	T2	k_2/k_1
50	60	2.5
60	70	2.4
70	80	2.3
80	90	2.2
90	100	2.1
100	110	2.0

3.5.2. RPVOT 装置を用いたすべり摩擦試験用酸化劣化油の作製

酸化劣化程度による潤滑特性への影響を調査するための酸化劣化油の生成には、「JIS K 2514-1」に規定される RPVOT (Rotating Pressure Vessel Oxidation Test) 法を利用した。



図 3. RPVOT 装置外観

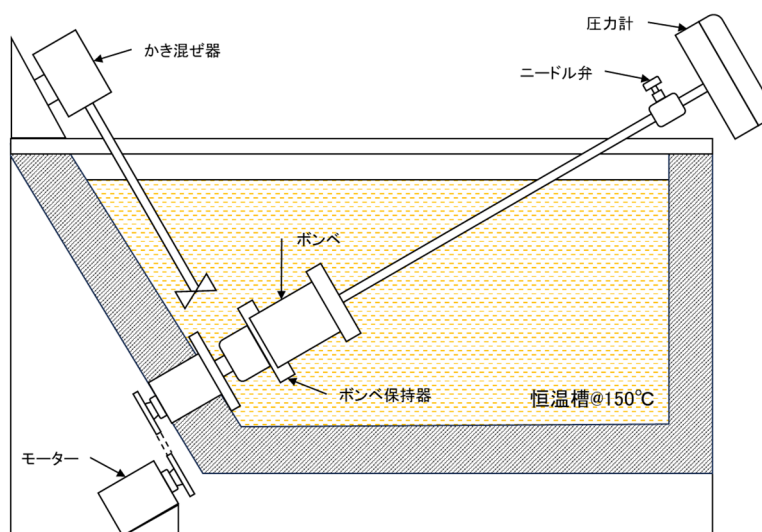


図 4. RPVOT 装置概略図

① 試験条件

RPVOT の試験 (JIS K 2514-3) には、試料油の酸化劣化調査方法として、「試験油の酸化が進み、圧入した酸素が消費され、試験圧力が最高圧力 (始点) から 175kPa 低下するまでの時間測定する」と規定されている。この規格から、本試験では、150℃の温度下において試験圧力が 175kPa 低下した時間を試料油の寿命 (劣化度 100%) と定め、劣化度 100%に至るまでの時間を「四等分割」し、新油を含め 5 種類の試料を作製した。なお、これら試料は各降下点 (4 分の 1、4 分の 2、4 分の 3、4 分の 4) における酸化値を測定し、各劣化度における各試験油の酸化値が可能な限り同一になるように調整し、作製した。

表 11. 試験用酸化劣化油一覧

サンプル名	劣化度			
	25%	50%	75%	100%
LSA	25%	50%	75%	100%
LSC	25%	50%	75%	100%
FAME①	25%	50%	75%	100%
FAME②	25%	50%	75%	100%
FAME⑤	25%	50%	75%	100%

3.6. 性状変化（スラッジ発生状態）確認用サンプルの分析

経年劣化による燃料油の性状変化（スラッジ発生状態）の調査を行うため、恒温槽を用いて作製した性状変化（スラッジ発生状態）確認用サンプルに対し、スラッジ発生量を確認するため「ISO 10370-1（石油製品－残留燃料油の総沈積量、実在全セジメント）」による分析を実施した。その結果を表 12 に示す。

表 12. ISO 10370-1 によるスラッジ発生量分析結果

単位：質量%

サンプル名	スラッジ 区分	想定保管期間					
		新油	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	12ヶ月
FAME①	油溶性	1.44	1.70	1.66	1.26	1.16	1.12
	非油溶性	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
FAME②	油溶性	1.27	1.68	1.86	1.18	1.12	1.10
	非油溶性	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
FAME⑤	油溶性	1.16	1.56	1.23	1.10	1.14	1.09
	非油溶性	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
LSA	油溶性	0.94	0.78	0.68	0.52	0.44	0.48
	非油溶性	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
LSC	油溶性	1.78	2.06	1.98	2.30	1.80	2.28
	非油溶性	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03

※ 油溶性スラッジ：通常は油内に溶け込んでいるスラッジ前駆体、劣化の進行によりスラッジ化する可能性のある物質

※ 非油溶性スラッジ：油中に析出している物質、通常のスラッジ量分析で測定するのは非油溶性の物質となる

分析の結果、5種いずれの試料油も、油溶性のスラッジ（前駆体）では保管期間の違いによりの数値の変動は見られるものの、その量に増加傾向は見られず、また、非油溶性スラッジの値は全期間を通して変動が見られなかった。

しかし、「3.7. 潤滑特性試験用サンプルの試験前分析」にて後述するように、重油（LSA、LSC）では、表 14 に示すように、酸化触媒となる水分や金属（本試験では銅）等の劣化要因が加わることで非油溶性スラッジ量の増加が見られるため、温度負荷以外の要因が加わることで、保管時にも酸化劣化が発生する可能性が示された。

表 13. RPVOT にて作製された劣化油のスラッジ量（非油溶性）

サンプル名	劣化度	非油溶性スラッジ量 (%)
FAME①	0%	<0.01
	25%	<0.01
	50%	<0.01
	75%	<0.01
	100%	<0.01
FAME②	0%	<0.01
	25%	<0.01
	50%	<0.01
	75%	<0.01
	100%	<0.01
FAME⑤	0%	<0.01
	25%	<0.01
	50%	<0.01
	75%	<0.01
	100%	<0.01
LSA	0%	<0.01
	25%	0.08
	50%	0.10
	75%	0.04
	100%	0.03
LSC	0%	0.01
	25%	0.76
	50%	1.19
	75%	1.20
	100%	1.86

3.7. 潤滑特性試験用サンプルの試験前分析

燃料油の酸化劣化が潤滑特性に与える影響を調査するため、RPVOT を用いて作成したすべり摩擦試験用酸化劣化燃料油（試験用試料油）およびこれらの新油に対し、摩擦試験実施前の性状を確認するために、次の表 14 に示す分析項目を実施した。

表 14. 試験前酸化劣化油分析項目

分析項目	単位	規格
動粘度	mm ² /s	JIS K 2283
色相	--	ASTM D1500
スラッジ量（非油溶性）	%	--
酸価	mgKOH/g	JIS K 2501
FT-IR	--	--

3.7.1. 潤滑特性試験用サンプルの性状評価

① 動粘度

ISO 粘度分類では 40°Cにおける粘度を中心として「10%の許容範囲」が設定されていることに鑑み、各試験用試料油について、新油時の 40°Cの動粘度に対し、各劣化度における動粘度の数値が、±10%の変化率（90%～110%）以内に収まっているかを評価した。

その結果、LSA では粘度変化率が最大で「+3.5%」と、全ての試料油の劣化度は±10%の許容範囲内の粘度変化となっていた。また、FAME①、FAME⑤においては、劣化度 75%までの試料では、それぞれ「104.7%～109.6%」、「104.8%～110.8%」の変化率と、概ね許容範囲内での粘度変化であった。

他方、両試料共に劣化度 100%では変化率が「112.4%～113.2%」となり許容値を若干超過した。また、FAME②では劣化度 50%から 100%の試料でも、「111.2%～114.3%」の変化率を示し、許容範囲を超えた粘度変化を示した。

これらに対し、LSC では劣化度 25%の時点で「+36.2%」の変化率を示し、劣化度 100%では「+71.2%」と他の 4 油種に比較し、大きな粘度変化が確認された。この変化は後述するスラッジの発生量に起因するものであると推測される。

② 色相

ASTM D1500 による色相分析では、試料油の色に応じて 0.5～8.0 の数値にて 0.5 刻みで評価されるが、本試験油は全てのサンプルでの最大変化が、色相評価における最小変化値である「+0.5」であったことから、燃料油の著しい酸化劣化は発生しなかったことが確認された。

③ スラッジ量

RPVOT を用いて強制的に酸化させた各油種に対し、劣化により析出したスラッジ（非油性）量を、「3.6.性状変化（スラッジ発生状態）確認用サンプルの分析」と同様に、ISO 10370（石油製品—残留燃料油の総沈積量、実在全セジメント）に基づき、分析・調査した。

その結果、LSC（C 重油）では劣化度に比例した明確なスラッジ量の増加が見られ、また LSA（A 重油）でも、新油に比較し若干の増加傾向が見られた。

これに対し、FAME ではスラッジ量の増加は見られなかった。しかしいずれのサンプルも酸価の値が劣化度に応じて上昇していることから、「④酸価および FT-IR」で後述するように、非油性のスラッジの発生はなかったものの、酸化劣化は進行していたと考えられる。

④ 酸価および FT-IR

JIS K 2501 に基づく酸価分析では、5 油種すべてで劣化度に比例して酸価が高くなることが確認された。特に LSA および LCS では、「油の主成分の化学変化（酸化）により発生するカルボン酸」の吸収（ $1,700\text{cm}^{-1}$ ）が、劣化度が大きくなるほど顕著にみられ、劣化度合いに応じて酸化が進んでいたことが確認された。

なお、FAME においては、原材料にエステルが含まれており、赤外線吸収スペクトルによる吸収帯がカルボン酸の吸収帯と同様であることから、FT-IR によるカルボン酸の発生有無を確認することはできないが、既述のとおり、酸価が FAME①で「 0.49mgKOH/g （新油）」から「 2.13mgKOH/g （劣化度 100%）」へ、FAME②で「 0.07mgKOH/g （新油）」から「 2.03mgKOH/g （劣化度 100%）」へ、FAME⑤で「 0.08mgKOH/g （新油）」から「 2.00mgKOH/g （劣化度 100%）」へ、それぞれ増加していることから、LSA および LSC 同様に劣化度合いに応じて酸化が進んでいたと考えられる。

4. 燃料油を用いた潤滑特性（トライボロジー特性）試験

船内で燃料油は、船体付タンクから移送ポンプでの移送等を経て燃料噴射ポンプや燃料噴射弁を介し、内燃室へ送られる。ポンプの種類は様々あるが、そのいずれも燃料の移送・噴射（圧送）には金属部品の摺動を伴い、燃料油は摺動部位への潤滑油としての役割も果たす。

近年、船用エンジンでは、温室効果ガス（GHG）排出の抑制を目的とし、その稼働に必要な燃料を化石燃料（C重油およびA重油）からバイオディーゼル燃料（以下、BDFと記載）へと転換が図られている。BDFには植物の非可食部を原料とした燃料や、動植物油や廃食用油を原料とする燃料など様々あるが、いずれも化石燃料とは根本的に異なる燃料油種となる。

先に記載したように、船舶の機関部において燃料油は燃料油系統の各ポンプ内の潤滑油の役割も果たしている。潤滑油には機械摺動部の金属接触を防止する重大な役割があり、潤滑性の良否は潤滑油自体に備わる基本性能（あるいは後天的に添加された機能）に左右される。

このように、従来使用されてきた化石燃料とBDFとでは、潤滑油として機能する際の性能に差が生じる可能性が考えられることから、「3.バイオ燃料の油種等に関する調査」「3.4.試験用燃料油の選出」にて選定された各燃料油の新油、および「3.5.2.RPVOT装置を用いたすべり試験用酸化劣化油の作製」にて生成された各劣化油を用い、すべり軸受を模した試験機にて潤滑性能の比較・評価を行った。

4.1. 試験装置の概要

試験装置は、回転する試験ディスクと固定された試験ブロックからなる装置とした。試験油はチューブポンプにて 20ml/min の流量で摺動部へ供給されるが、試験部へは 25°C前後で供給されるよう調整するため、循環油槽内でヒーターにて予め 40°Cへ加熱されている。試験に使用した試料は、試験油槽を介してサンプリング油槽（分析用クリーンボトル）へ収集した。また試験油槽からサンプリング油槽への移送の間には、油中の固形粒子数をリアルタイムに測定できるオンライン測定装置を設置した。

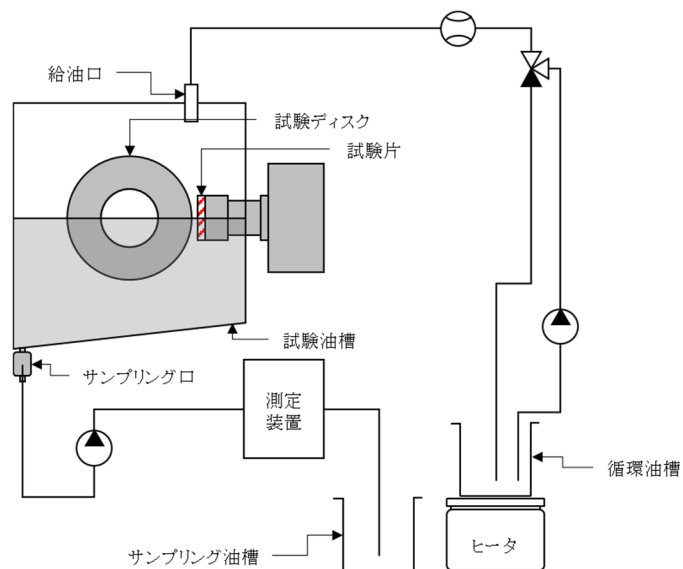


図 5. 試験機概略図①

図 6. 試験機概略図②【削除】



図 7. 試験機外観

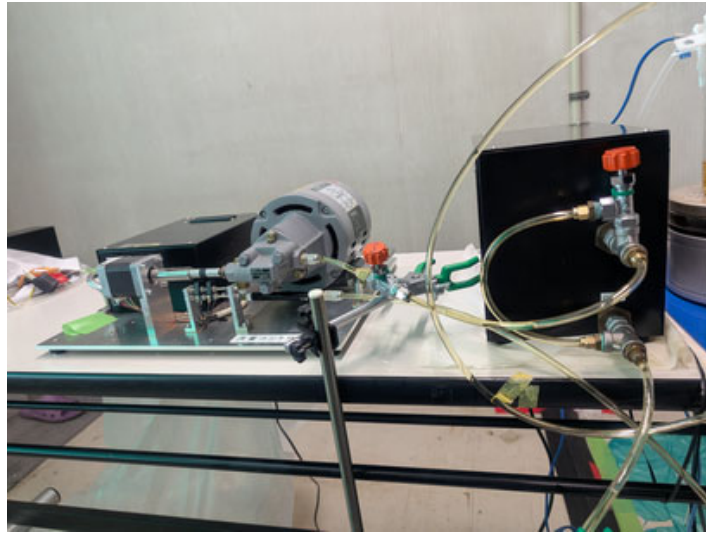


図 8. オンライン油中粒子測定装置の外観

4.2. 試験条件

4.2.1. 試験ディスク・ブロックの仕様

すべり試験に使用するディスクおよびブロックは、発注者との協議の上、実際の燃料噴射ポンプの摺動部に使用される材質等を考慮したうえで選定した。

。

表 15. 試験ディスクの仕様

形状	リング型
材質	材質 A
外径	65mm
内径	30mm
幅	20mm
試験面加工精度	0.08 μ m \pm 0.02 μ m

表 16. 試験ブロックの仕様

形状	直方体
材質	材質 B
長さ	72.5mm
高さ	10.0mm
幅	10.0mm
試験面加工精度	0.08 μ m \pm 0.02 μ m

4.2.2. 試験機の設定

すべり試験は、次の条件により実施した。

表 17. すべり試験機の設定条件

項目	単位	条件
回 転 数	rpm	300
す べ り 速 度	m/s	1.02
押しつけ荷重	kgf	90 [*]
面 圧	MPa	55.13
試 験 油 量	ml	約 300

※荷重 90kgf=約 882N

図 9～13. 油膜厚さ－温度曲線【削除】 表 18. 各試験油の試験時の最小油膜厚さ【削除】

4.2.3. 試験回数

すべり試験は、試験油の劣化度別に各3回（n3）実施をした。試験に用いた油およびディスク、ブロックの一覧を次の表19にまとめる。

表 19. 試験油および試験ディスク・ブロック一覧表

ロット No.	試験 ID①	試験 ID②	試験油名	劣化度	試験 No.
1	T11	01	FAME①	0%	n-1
	T12	01	FAME②	0%	n-1
	T13	01	FAME⑤	0%	n-1
	T14	01	LSA	0%	n-1
	T15	01	LSC	0%	n-1
2	T21	01	FAME①	25%	n-1
	T22	01	FAME②	25%	n-1
	T23	01	FAME⑤	25%	n-1
	T24	01	LSA	25%	n-1
	T25	01	LSC	25%	n-1
3	T31	01	FAME①	50%	n-1
	T32	01	FAME②	50%	n-1
	T33	01	FAME⑤	50%	n-1
	T34	01	LSA	50%	n-1
	T35	01	LSC	50%	n-1
4	T41	01	FAME①	75%	n-1
	T42	01	FAME②	75%	n-1
	T43	01	FAME⑤	75%	n-1
	T44	01	LSA	75%	n-1
	T45	01	LSC	75%	n-1
5	T51	01	FAME①	100%	n-1
	T52	01	FAME②	100%	n-1
	T53	01	FAME⑤	100%	n-1
	T54	01	LSA	100%	n-1
	T55	01	LSC	100%	n-1
6	T61	01	FAME①	0%	n-2
	T62	01	FAME②	0%	n-2
	T63	01	FAME⑤	0%	n-2
	T64	01	LSA	0%	n-2
	T65	01	LSC	0%	n-2

ロット No.	試験 ID①	試験 ID②	試験油名	劣化度	試験 No.
1	T11	02	FAME①	25%	n-2
	T12	02	FAME②	25%	n-2
	T13	02	FAME⑤	25%	n-2
	T14	02	LSA	25%	n-2
	T15	02	LSC	25%	n-2
2	T21	02	FAME①	50%	n-2
	T22	02	FAME②	50%	n-2
	T23	02	FAME⑤	50%	n-2
	T24	02	LSA	50%	n-2
	T25	02	LSC	50%	n-2
3	T31	02	FAME①	75%	n-2
	T32	02	FAME②	75%	n-2
	T33	02	FAME⑤	75%	n-2
	T34	02	LSA	75%	n-2
	T35	02	LSC	75%	n-2
4	T41	02	FAME①	100%	n-2
	T42	02	FAME②	100%	n-2
	T43	02	FAME⑤	100%	n-2
	T44	02	LSA	100%	n-2
	T45	02	LSC	100%	n-2
5	T51	02	FAME①	0%	n-3
	T52	02	FAME②	0%	n-3
	T53	02	FAME⑤	0%	n-3
	T54	02	LSA	0%	n-3
	T55	02	LSC	0%	n-3
6	T61	02	FAME①	25%	n-3
	T62	02	FAME②	25%	n-3
	T63	02	FAME⑤	25%	n-3
	T64	02	LSA	25%	n-3
	T65	02	LSC	25%	n-3

ロット No.	試験 ID①	試験 ID②	試験油名	劣化度	試験 No.
1	T11	03	FAME①	50%	n-3
	T12	03	FAME②	50%	n-3
	T13	03	FAME⑤	50%	n-3
	T14	03	LSA	50%	n-3
	T15	03	LSC	50%	n-3
2	T21	03	FAME①	75%	n-3
	T22	03	FAME②	75%	n-3
	T23	03	FAME⑤	75%	n-3
	T24	03	LSA	75%	n-3
	T25	03	LSC	75%	n-3
3	T31	03	FAME①	100%	n-3
	T32	03	FAME②	100%	n-3
	T33	03	FAME⑤	100%	n-3
	T34	03	LSA	100%	n-3
	T35	03	LSC	100%	n-3

4.2.4. 各種取得データ

各試験油の潤滑特性を比較・評価するため、すべり試験中は次の表 20 に示す項目のデータを取得した。

表 20. すべり試験取得データ項目

No.	項目	備考
1	摩擦係数	<ul style="list-style-type: none"> ※ 摺動面の潤滑性を示す指標。 ※ 数値が低いほど摩擦抵抗（≒金属接触）が少なく、優れた潤滑性となる。
2	試験面温度	<ul style="list-style-type: none"> ※ 摺動面の摩擦抵抗（≒金属接触）の程度を示す指標。 ※ 温度が低いほど金属接触が少なく、優れた潤滑性となる。
3	表面粗さ (Ra : 算術平均粗さ) (Rz : 最大高さ粗さ)	<ul style="list-style-type: none"> ※ 試験前後での表面粗さ測定による潤滑特性調査。 ※ 試験前後での数値の差が小さいほど金属接触が少ないことを示す。
4	表面写真	<ul style="list-style-type: none"> ※ 試験前後での表面状態の定性確認。 ※ 金属接触による摩耗を観察し評価。
5	比摩耗量	<ul style="list-style-type: none"> ※ 金属接触により発生した摩耗の定量評価。 ※ 数値が低いほど摩耗量が少ないことを示す。

① 試験ディスク・ブロックの表面粗さ測定方法

試験前

[ディスク]

- ブロックとの接触面の Ra および Rz をアキシャル方向へ 2 箇所測定

[ブロック]

- ディスクとの接触面の内、実際に接触する面ではない位置にて、ディスクの回転の垂直方向に Ra および Rz を 2 箇所測定

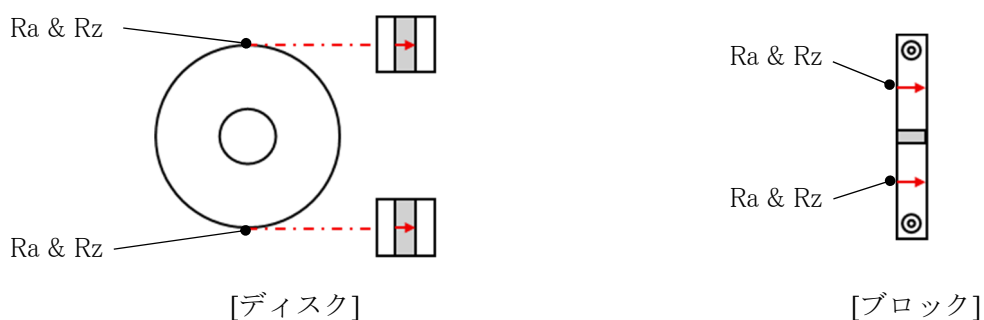


図 14. 試験前のディスクおよびブロック測定箇所

表 21. 粗さ測定条件 (試験前)

対象	ディスク	ブロック
項目	粗さ	粗さ
規格	JIS2001/ISO097	JIS2001/ISO097
触針 R	2 μ m	2 μ m
送り速さ	0.500mm/s	0.500mm/s
カットオフ λc	0.250mm	0.250mm
測定長さ	1.250mm	1.250mm

試験後

[ディスク]

- ブロックとの接触面の Ra および Rz を、アキシャル方向へ 1 箇所測定

[ブロック]

- ディスクとの接触面の Ra および Rz を、ディスクの回転の垂直方向に 1 箇所測定

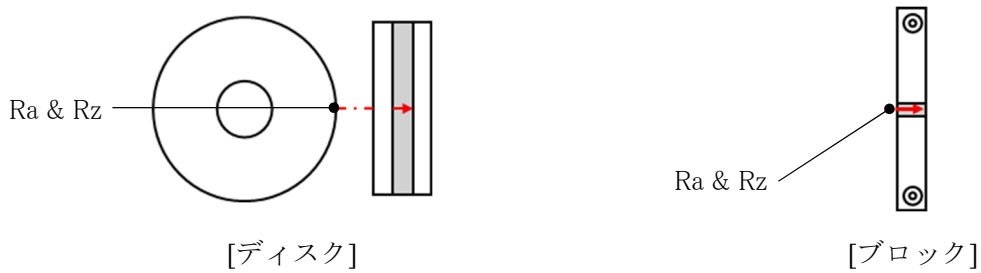


図 15. 試験後のディスクおよびブロック測定箇所

表 22. 粗さ測定条件（試験後）

対象	ディスク	ブロック
項目	粗さ	粗さ
規格	JIS2001/ISO097	JIS2001/ISO097
触針 R	5 μ m	5 μ m
送り速度	0.500mm/s	0.500mm/s
カットオフ λ_c	0.250mm	0.250mm
測定長さ	1.250mm	1.250mm

4.3. 試験データまとめ

4.3.1. すべり試験データの取得

すべり試験では試験油（燃料油）の違いによる潤滑特性の違いを調査するため、「4.2.4.各種データ取得」の表 17 に示す各項目のデータ取得を行った。

4.3.2. 試験油分析

本試験では、試験片（ディスク/ブロック）の直接的な測定・観察を行いながら、試験油のラボ分析およびオンラインセンサー等を用いた油中粒子数の測定を実施した。

① ラボ分析

各試験油に対し、次の表 23 に示す分析項目を実施した。

表 23. すべり試験後の試験油分析項目

No.	項目	規格	備考
1	油中金属濃度 (SOAP-T 法)	--	※ ICP 発光分光分析により、試料油に含まれる金属元素の同定と、その量を調査
2	フェログラフィ (定性・定量)	--	※ 試料油中に含まれる磁性体粒子(摩耗粒子)の観察による摩耗形態の調査および摩耗程度の定量評価
3	電子顕微鏡観察 X 線組成解析	--	※ 試料油中に含まれる粒子(摩耗粒子)の観察による摩耗形態の調査および X 線を用いた粒子の組成解析

② オンライン油中粒子測定

すべり試験機の油槽にオンライン油中粒子測定装置を接続し、試験中の油中粒子数の変化をリアルタイムに監視、記録した。

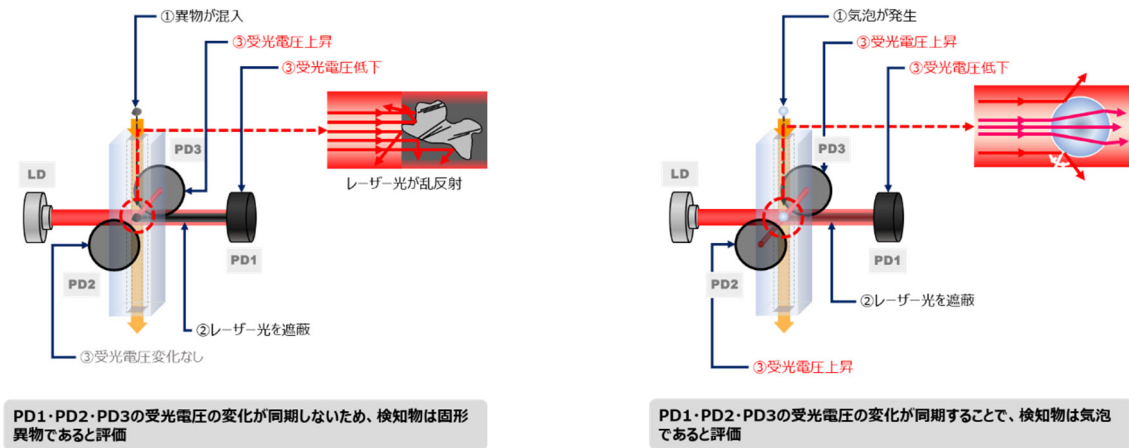


図 16. オンライン油中粒子測定的气泡識別原理イメージ (特許番号：4719587)

LSC (C 重油) については、燃料油自体の色相が濃く、別途処理等を実施の上計測した。

5. 評価・考察

5.1. 各試験データの比較と評価

冒頭に述べたように、本試験の目的は、“船舶へのバイオ燃料の導入に際し、バイオ燃料の潤滑特性が燃料油系統の各種ポンプの摺動部等に与える影響について、従来燃料である A 重油および C 重油のデータと比較し評価すること”である。

そのため本項では、「3.5.2. RPVOT 装置を用いた潤滑特性試験用酸化劣化油の作製」の項目にて作製した試験油を用いて実施したすべり試験のデータを比較し、単一パラメータにおける各油種の劣化度別の潤滑特性の評価を行う。

なお、各試験油の潤滑特性の比較にあたり最も注視すべきは油の動粘度である。動粘度は適切な油膜厚を保ち、良好な潤滑状態を得るための最も基本的な性状である。

動粘度（40℃）のデータのみを次の表 24 に再掲載し、各試験油の潤滑特性比較評価に用いる。

表 24. 潤滑特性試験用サンプルの粘度@40℃（単位：mm²/s）

劣化度	FAME①	FAME②	FAME⑤	LSA	LSC
新油	4.58	4.10	4.47	2.65	45.97
25%	4.79	4.49	4.69	2.71	62.61
50%	4.96	4.56	4.84	2.69	64.71
75%	5.02	4.64	4.95	2.72	73.40
100%	5.15	4.69	5.06	2.74	78.70

5.1.1. 摩擦係数の比較と評価

各試験油を用いた試験時の摺動面の摩擦係数の相違について、各試験油における劣化度別の試験開始時および終了時の摩擦係数（n1～n3）を平均してグラフ（図 17～21）にまとめ、比較評価を行った。

その結果、FAME3 種では、試験開始時と試験終了時の摩擦係数の差分が「-0.004～+0.011」であったのに対し、LSA では「+0.034～+0.042」と、他の試験油に比較し高い値であり、また全ての劣化度で摩擦係数が上昇傾向にあることが確認された。これは、前項の表 22 に示すように、LSA は動粘度が他に比べて低く、加温によりさらに油膜が薄くなったことで他の試験油よりも厳しい潤滑状態となったことが原因となり、摩擦係数値の上昇に繋がったと考えられる。また逆に、LSC は動粘度が高く摺動面における油膜が他油種に比較して十分に形成されて潤滑されていたため、摩擦係数の変動幅が最大で「0.006」と、他の試験油に比較しても低い値になったと考えられる。

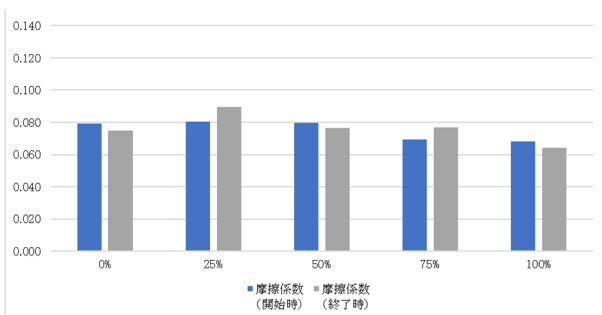


図 17. 摺動面摩擦係数の比較_FAME①

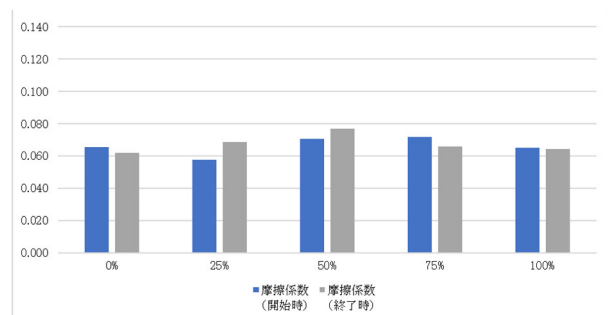


図 18. 摺動面摩擦係数の比較_FAME②

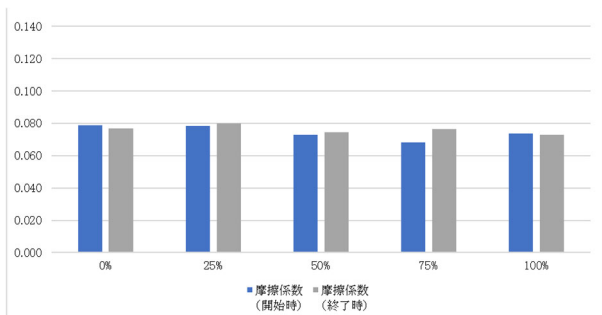


図 19. 摺動面摩擦係数の比較_FAME⑤

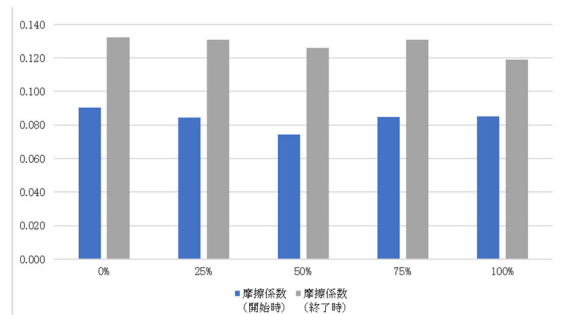


図 20. 摺動面摩擦係数の比較_LSA

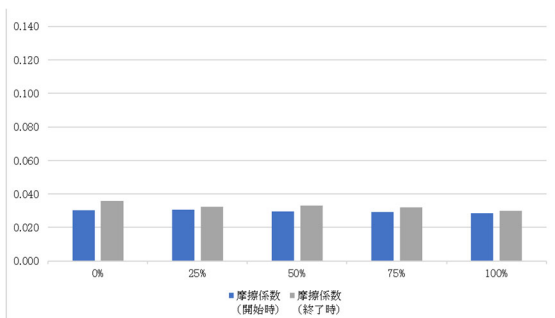


図 21. 摺動面摩擦係数の比較_LSC

5.1.2. 試験面温度の比較と評価

各試験油を用いた試験時の摺動面温度について、各試験油における劣化度別の試験開始時（荷重 90kgf 到達時）および終了時（荷重 90kgf 以下になった時点）の摺動面温度（n1～n3）を平均化して、グラフ（図

22～26) にまとめた。なお、「4.1.試験装置の概要」に示すように、試験油は循環油槽内で 40℃まで加温されたのち、25℃前後で摺動部へ供給されるよう調整されている。

その結果、LSA を除く各試験油では、試験終了時には概ね 10℃～20℃程度の摺動面温度の上昇が見られた。これらに対し、LSA は終了時の温度が 34.5℃～78.5℃の幅で上昇しており、他の試験油に比較し上昇幅が大きかったことが確認された。これは前項でも記載した油粘度の低さ (=油膜厚の薄さ) による金属接触の程度の違いに起因するものと考えられる。

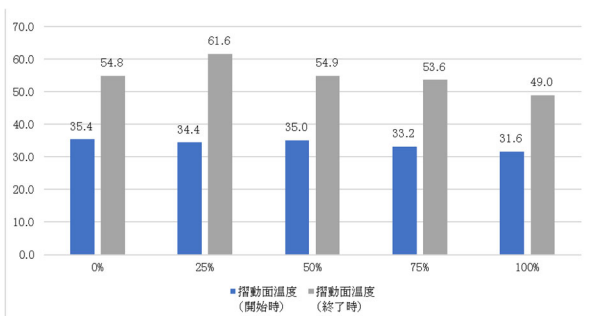


図 22. 摺動面温度の比較_FAME①

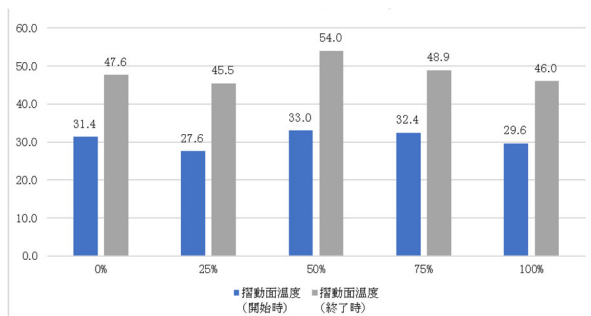


図 23. 摺動面温度の比較_FAME②

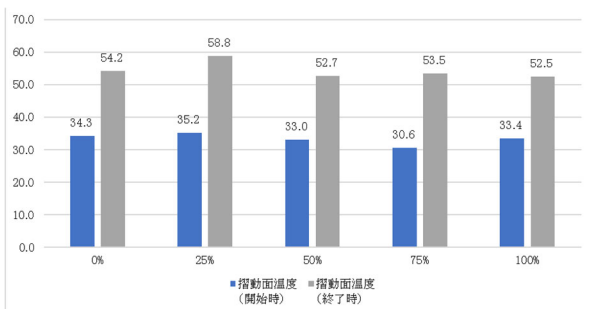


図 24. 摺動面温度の比較_FAME⑤

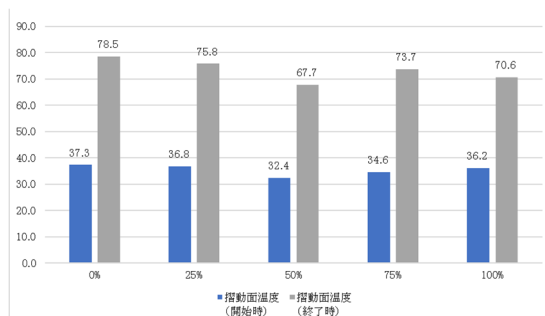


図 25. 摺動面温度の比較_LSA

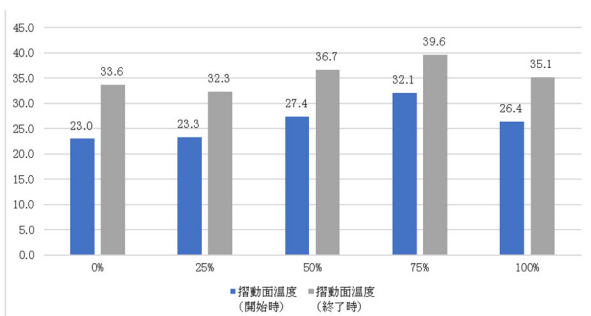


図 26. 摺動面温度の比較_LSC

5.1.3. 表面粗さの比較と評価

本試験で用いた試験片の素材は、ディスクが「材質 A」、ブロックが「材質 B」であり、硬度はともに HRC が 60 代で、ほぼ同等の硬度を有している。これら 2 種の試験片をすべり試験機にて接触させた際の表面粗さ (Ra および Rz) について、劣化度別に試験データ (n1~n3) を平均化して、ディスク、ブロック別にそれぞれ Ra と Rz の試験前後での表面粗さの変化を数値化し、図 27~36 にまとめた。なお、変化値をまとめたグラフ (数値) は、正の数値にグラフが伸びるほど試験片の表面が荒くなり、負の数値にグラフが伸びるほど試験片の表面が平滑化することを表している。

その結果、FAME①、FAME②、LSA のディスクでは試験後の Ra 又は Rz の値増減に、劣化度毎のばらつきが生じた。これは、各試験油の劣化度毎に接触の程度が異なっていることを示すが、特に特徴的な傾向は無く、本試験ではその相違を定量的に評価することは出来なかった。

またブロックでは、Rz の値が LSC の劣化度 25%を除き減少傾向にあることから、いずれの試験油も表面の凸部が摩耗する、所謂「なじみ摩耗」に近い現象が発生していたと考えられる。

なお、全ての試験油を相対的に比較した場合、重油 (A 重油、C 重油) の変化値は FAME に対し低いことから、より潤滑特性 (耐摩耗性) に優れるように見えるが、詳細な比較評価は、「6.結論」の中でその他パラメータを含め総合的に評価する。

[青色棒グラフ : Ra 緑色棒グラフ : Rz]



図 27. FAME①_ディスク変化程度の比較



図 28. FAME①_ブロック変化程度の比較

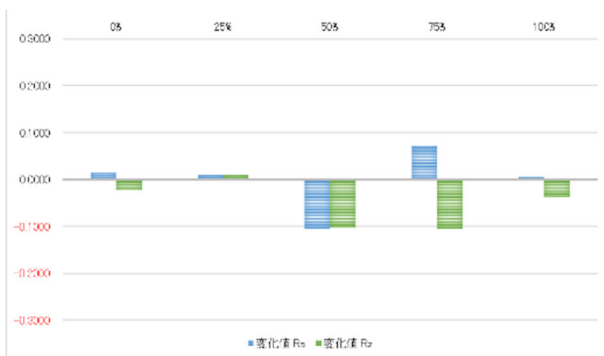


図 29. FAME②_ディスク変化程度の比較



図 30. FAME②_ブロック変化程度の比較

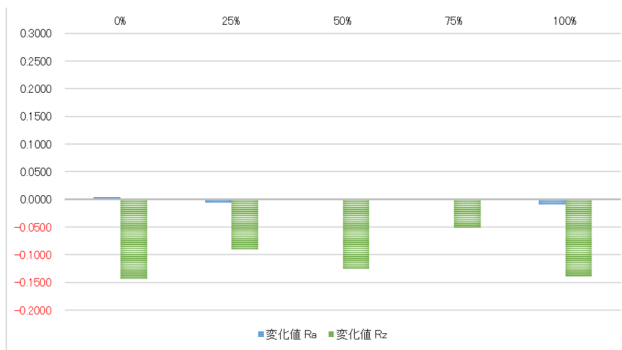


図 31. FAME⑤_ディスク変化程度の比較

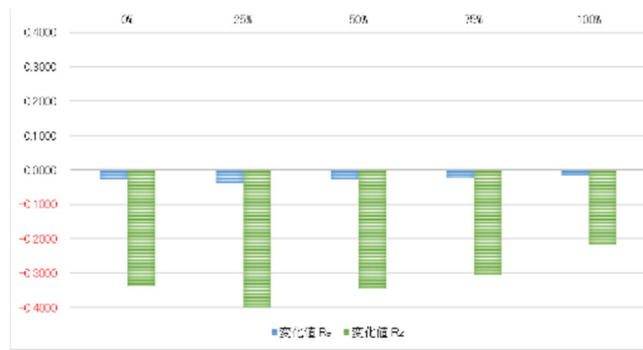


図 32. FAME⑤_ブロック変化程度の比較

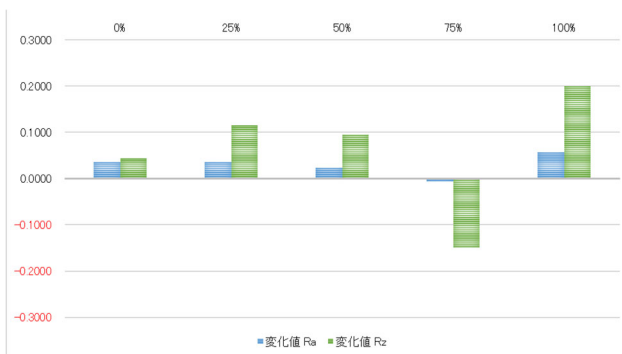


図 33. LSA_ディスク表面変化程度の比較

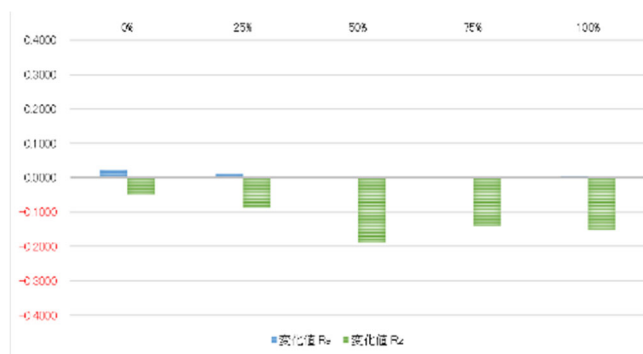


図 34. LSA_ブロック変化程度の比較



図 35. LSC_ディスク変化程度の比較

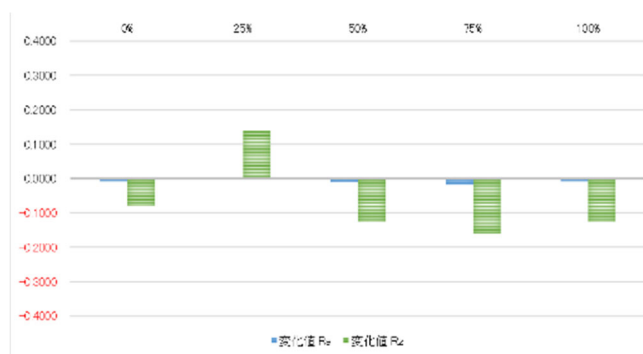


図 36. LSC_ブロック変化程度の比較

5.1.4. 比摩耗量の比較と評価

比摩耗量は、摺動面が摩擦、摩耗により減少する量を、単位荷重（圧力）と単位滑り距離あたりで除して数値化した指標で、加える荷重とすべり速度、そして同等の表面粗さで試験した場合の値の大小で評価するパラメータとして利用するが、比摩耗量が小さいほど摩耗特性が優れていると評価できる。

本項では、すべり試験の摩耗状態について、各試験（n1～n3）の比摩耗量を平均化し、試験に用いた各試料油の潤滑特性（耐摩耗性）比較・評価を行った。

なお、通常は異なる二面間での摺動時に金属接触が発生する場合には、材料の硬度が低い方の表面が摩耗する。この時発生した摩耗量を調査することで比摩耗量を算出するが、本試験で用いた材質 A および材質 B は同程度の硬度を持つため、双方に摩耗が発生する。

今回の試験で使用した試験片は、直径φ65の回転ディスクと一辺が10mmの正方形の矩形断面をもつ長さ70mmのブロック試験片で、ディスク幅が10mmあることから円周面積は約2,000mm²である。一方、ブロックの接触部は約10mm²である。試験は、図6の試験機概略に示すように、回転するディスクにブロック試験片を手動で接触させてから押付け荷重を付加するが、回転ディスクに接触し始めたブロックの接触部は1mm未満の極めて狭い領域であることから、試験油はすべり速度の速い回転ディスク側に供給されやすく、これとは逆に静止側のブロック試験片側は静止している分だけ試料油の供給が相対的に少なくなるため、同程度の硬さでありながらも試料油の供給に僅かな差異が生じたことにより、ブロック側に微小な凹摩耗、いわゆる凝着摩耗が生じた。回転ディスク側に生じた摩耗は、表面粗さ測定にて確認できず、比摩耗量は算出不可であるため、本項ではブロック側の比摩耗量にて潤滑特性を比較評価する。

表 25. 試験油劣化度毎の比摩耗量比較

サンプル名	試験油劣化度				
	0%	25%	50%	75%	100%
FAME①	4.12×10^{-9}	2.25×10^{-8}	3.46×10^{-8}	3.56×10^{-8}	3.33×10^{-8}
FAME②	2.67×10^{-9}	1.50×10^{-8}	2.52×10^{-8}	3.55×10^{-8}	3.32×10^{-8}
FAME⑤	6.83×10^{-9}	3.12×10^{-8}	2.94×10^{-8}	3.42×10^{-8}	2.77×10^{-8}
LSA	6.87×10^{-9}	9.62×10^{-9}	1.34×10^{-8}	1.09×10^{-8}	1.18×10^{-8}
LSC	5.66×10^{-10}	6.34×10^{-10}	4.64×10^{-10}	3.92×10^{-10}	5.50×10^{-10}

その結果、LSCがその他油種に比較し1桁～2桁程度、比摩耗量の値が低かったことが確認された。これは、「5.1.1.摩擦係数の比較と評価」および「5.1.2.摺動面温度の比較と評価」でも述べたように、C重油の粘度の高さに由来する、油膜形成能力の差から生じた結果であると考えられる。

なお、FAME3種およびLSAはいずれも桁数は同様であるものの、劣化度25%～100%では実数値としてLSAが若干低い数値となった。LSAの値がFAME3種よりも優れていた理由は、別途「6.結論」の中でその他パラメータを含め総合的に解析する。

5.1.5. 油中金属濃度の比較と評価

油中金属濃度分析では、試料油中に含まれる金属元素の含有量を分析し、金属系添加剤の成分含有量や、外部混入異物由来の金属元素含有量を調査する。本試験では、“各試験油を用いて摺動試験を行った際に、試験片にどの程度の摩耗が発生したか？”を知ることが目的となるため、金属濃度分析結果の内、各試験片の主原材料である「鉄 (Fe)」の値を抽出、各試験 (n1~n3) の値を平均化し、図 37~41 のグラフにまとめ、比較を行った。

その結果、いずれの試験油も劣化度毎に鉄の含有有無が異なるものの、最小で 0.1ppm、最大で 1.2ppm ほどの鉄分が検出された。この中で、LSA のみ全ての劣化度で鉄の検出が見られたことから、全ての劣化条件で摩耗が発生していたと推察され、摩擦係数の記録や摺動面温度の記録とも一致することから、各種試験油の中では最も厳しい摩耗状態にあったと考えられる。

[単位 : ppm]

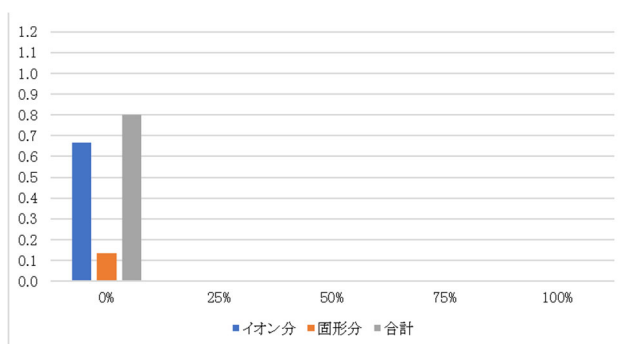


図 37. 試験油劣化度別_鉄含有量_FAME①

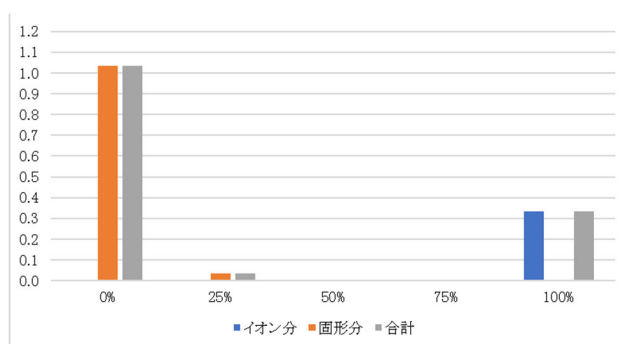


図 38. 試験油劣化度別_鉄含有量_FAME②

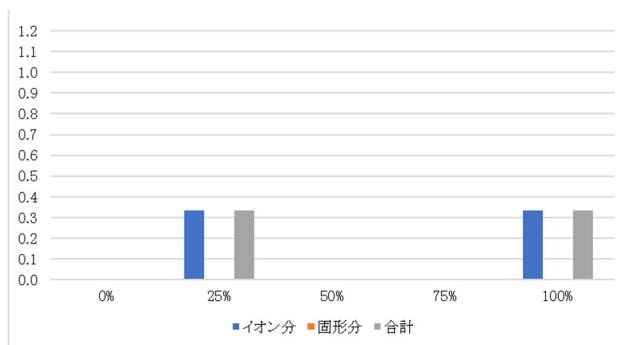


図 39. 試験油劣化度別_鉄含有量_FAME⑤

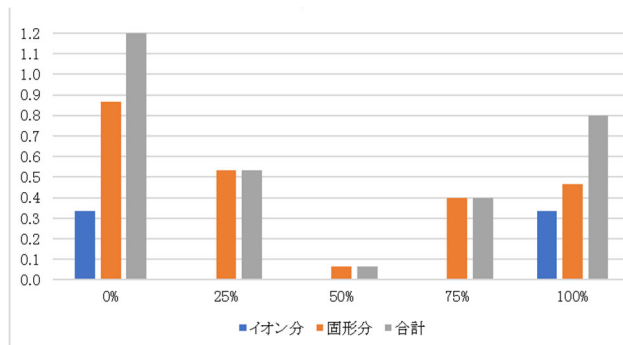


図 40. 試験油劣化度別_鉄含有量_LSA

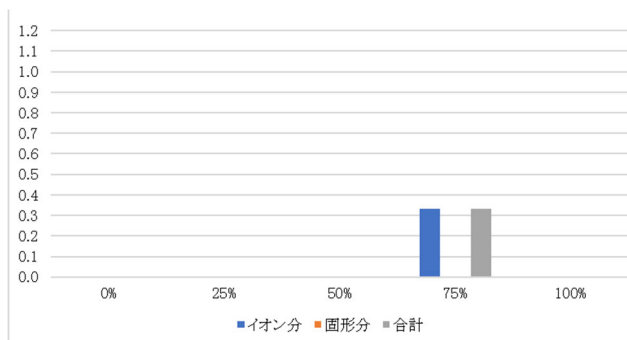


図 41. 試験油劣化度別_鉄含有量_LSC

5.1.6. フェログラフィ（定量フェログラフィ）の比較と評価

フェログラフィは潤滑油（試験油）中に含まれる磁性体粒子（≒摩耗粒子）を、磁力を用いて抽出、配列し、粒子を直接観察し分析する手法*である。フェログラフィには、光学顕微鏡を用いて配列された粒子の大きさや形を直接に観察し評価する「分析フェログラフィ」と、同じく配列された小径粒子と大径粒子との相対比率から摩耗程度を評価する「定量フェログラフィ（Is 値）」とがある。本試験では、意図的に金属接触および摩耗を発生させていることから、本項では、主に摩耗の原因解析を行う分析フェログラフィではなく、摩耗の程度を評価する定量フェログラフィを用いて、各試験油の潤滑特性を比較評価した。なお、定量フェログラフィ（Is 値）は、原則としてその数値（指数の値）が小さいほど潤滑特性に優れる。

その結果、各試験油間での相対評価では、LSC が Is 値の指数部の値が 10 の 0 乗～2 乗と、他の試験油に比較して高い数値であることが確認された。ただし、フェログラフィ写真を確認すると、LSC では磁性体粒子ではないとみられる 20 μ m 前後の粒子（スラッジの塊と推察）が、他の試料に比較し多く捕捉されており、これが Is 値を押し上げた要因と考えられる。これらの結果から、Is 値のみを用いた単純な潤滑特性の比較は困難であるため、別途「6.結論」の中でその他パラメータを含め総合的に解析、評価する。

※磁性体以外の粒子も、捕捉・配列された磁性体粒子の“堰”に引っかかり、捕捉される

表 26. 試験油別定量フェログラフィ（Is 値）

試験油名	劣化度	試験数	Is 値
FAME①	0%	n-1	5.72×10^0
		n-2	9.14×10^{-1}
		n-3	1.80×10^0
	25%	n-1	2.48×10^{-1}
		n-2	5.39×10^{-1}
		n-3	7.20×10^{-1}
	50%	n-1	7.30×10^{-1}
		n-2	1.36×10^{-1}
		n-3	1.03×10^{-1}
	75%	n-1	8.92×10^{-2}
		n-2	3.26×10^{-1}
		n-3	4.41×10^{-2}
	100%	n-1	4.71×10^{-2}
		n-2	7.35×10^{-2}
		n-3	1.17×10^1

FAME②	0%	n-1	1.34×10^3
		n-2	1.25×10^0
		n-3	6.24×10^0
	25%	n-1	1.79×10^0
		n-2	7.84×10^{-2}
		n-3	9.69×10^{-2}
	50%	n-1	2.02×10^{-2}
		n-2	8.82×10^{-2}
		n-3	3.86×10^{-2}
	75%	n-1	9.14×10^{-2}
		n-2	2.45×10^{-2}
		n-3	4.41×10^{-2}
	100%	n-1	3.79×10^{-1}
		n-2	3.06×10^{-3}
		n-3	4.13×10^{-1}
FAME⑤	0%	n-1	5.20×10^{-2}
		n-2	3.93×10^{-1}
		n-3	3.38×10^{-1}
	25%	n-1	1.61×10^0
		n-2	1.80×10^0
		n-3	1.72×10^0
	50%	n-1	2.50×10^{-1}
		n-2	1.17×10^{-1}
		n-3	1.07×10^{-1}
	75%	n-1	1.06×10^{-1}
		n-2	2.49×10^{-1}
		n-3	2.45×10^{-2}
	100%	n-1	3.41×10^{-1}
		n-2	1.14×10^{-1}
		n-3	9.14×10^{-1}

LSA	0%	n -1	9.52×10^0
		n -2	5.68×10^{-1}
		n -3	9.52×10^0
	25%	n -1	1.92×10^0
		n -2	9.98×10^{-1}
		n -3	6.84×10^1
	50%	n -1	3.40×10^{-1}
		n -2	9.60×10^{-1}
		n -3	7.83×10^{-1}
	75%	n -1	3.72×10^0
		n -2	4.96×10^{-1}
		n -3	1.47×10^{-1}
	100%	n -1	1.01×10^0
		n -2	1.62×10^0
		n -3	2.64×10^{-1}
LSC	0%	n -1	2.50×10^2
		n -2	4.34×10^1
		n -3	7.40×10^1
	25%	n -1	8.20×10^0
		n -2	2.75×10^1
		n -3	3.48×10^0
	50%	n -1	8.31×10^{-1}
		n -2	1.07×10^{-1}
		n -3	1.18×10^1
	75%	n -1	7.92×10^1
		n -2	6.74×10^0
		n -3	7.08×10^0
	100%	n -1	2.67×10^1
		n -2	1.09×10^1
		n -3	8.80×10^0

5.1.7. 電子顕微鏡写真およびX線組成解析データの整理

電子顕微鏡（SEM）では、前項のフェログラフィにより捕捉した試験油中の粒子の詳細観察を行い、また、X線組成解析では、電子顕微鏡にて観察された粒子に加速電子を照射し、照射された粒子から発生する特性X線のエネルギー強度を元に粒子の組成を解析する。本項では各試験油に含まれていた摩耗粒子を、フェログラフィの手法を用いて抽出・配列し、電子顕微鏡にて撮影した写真と、X線を用いた粒子の組成割合をまとめ、同データを元に、各試験油に含まれていた摩耗形態を次の表27にまとめる。

表 27. 試験油別含有摩耗粒子の分類

サンプル	劣化度	摩耗粒子（摩耗形態）分類
FAME①	0%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	25%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗） ・球状摩耗粒子（凝着摩耗/疲労摩耗）
	50%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	75%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	100%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
FAME②	0%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	25%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗） ・球状摩耗粒子（凝着摩耗/疲労摩耗）
	50%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	75%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	100%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
FAME⑤	0%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	25%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	50%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	75%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	100%	<ul style="list-style-type: none"> ・シビア摩耗粒子（凝着摩耗） ・切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）

LSA	0%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	25%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	50%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	75%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	100%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
LSC	0%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	25%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	50%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	75%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）
	100%	<ul style="list-style-type: none"> シビア摩耗粒子（凝着摩耗） 切削摩耗粒子（アブレイシブ摩耗）

< 備 考 >

※ シビア摩耗粒子

異なる二面の摺動部の凸部同士が接触し、凝着したものが摺動面の相対運動によって結合部がせん断される、「凝着摩耗」により発生する摩耗粒子。数 μm のものであればなじみ過程で発生する正常な摩耗粒子（マイルド摩耗）となるが、粒径が大きくなるほど厳しい接触が発生していること（シビア摩耗）を示す。

※ 切削摩耗粒子

“異なる二面の摺動面のうち、より硬度の高い材質側の突起に、相手材が削られることで発生”、または“摺動面（油膜内）に、摺動面の材質より硬い異物が混入し摺動面が削られることで発生”する「アブレイシブ摩耗」が原因となる摩耗粒子。硬い材料に相手材が削られる摩耗を「二元摩耗」、混入した硬い異物に削られる切削摩耗を「三元摩耗」と分類される。

※ 球状摩耗粒子

激しい金属接触により剥がれ落ちた表面（＝摩耗粒子）が摩擦熱により熔融し、潤滑剤にて瞬時に冷やされ球状に固まることで発生する摩耗粒子。一般的に球状粒子が多量に観察される場合には、潤滑部では激しい摩耗が発生していると判断される。

本試験では、「4.2.試験条件」で述べたように、意図的に金属接触を発生させていることや、試験油（潤滑油）を循環させずにワンウェイ方式で使用していることから、想定される発生摩耗形態は凝着摩耗とアブレイシブ摩耗となり、試験後の各試料油中にはこれらの摩耗形態を示唆する摩耗粒子が観察された。また、ごく一部ではあるが、FAME①およびFAME②の試料中に球状摩耗粒子がわずかに観察された。

6. 結論

6.1. 単一パラメータ内での相対比較

全ての試験データを総合的に比較評価するため、まずは本試験内で取得した各データの、単一パラメータ内での相対評価を表 28 にまとめた。なお、試験油毎の評価にあたっては、全劣化度の中より最も悪いデータ（数値）を抽出し、実施している。また、各パラメータ内での評価基準は次のとおりとなる。

表 28. 各パラメータの評価基準

項目	評価基準
摩擦係数	最大増加値（試験開始と終了時の差分）
試験面温度	最大増加値（試験開始と終了時の差分）
表面粗さ	Ra（算術平均粗さ）の最大変化率（試験開始と終了時の差分）
表面写真	表面摩耗の程度、テンパーカラーの有無
比摩耗量	最大値
油中金属濃度	鉄の最大含有量
定量フェログラフィ（Is 値）	最大値

比摩耗量	FAME①					●
	FAME②					●
	FAME⑤					●
	LSA			●		
	LSC	●				
油中金属濃度	FAME①			●		
	FAME②			●		
	FAME⑤	●				
	LSA					●
	LSC	●				
Is 値	FAME①				●	
	FAME②	●				
	FAME⑤	●				
	LSA			●		
	LSC					●

6.2. 複合的なパラメータ比較による潤滑特性の評価

本試験では、意図的に金属接触を発生させていることから、試験片同士の潤滑状態は、二面間が油膜によって完全に分離される「流体潤滑」ではなく、油膜で分離される部分と、金属接触が発生する部分とが混在する、「混合潤滑」、または油膜が極めて薄く、金属表面同士が接触する「境界潤滑」となるため、試験実施時の試験片表面の接触面積は、試験油の潤滑特性の優劣に依存する。潤滑特性の評価に有意なパラメータは、摩擦係数と比摩耗量、そして摩擦面の温度であるが、今回の試験では比摩耗量での比較が困難であることから、相対評価を行うにあたり、最も直接的なパラメータとして「摩擦係数」および「試験面温度」を選定する。

本試験の結果では、LSA が摩擦係数、試験面温度共に、試験前後でのデータ（値）の上昇率が最も高かったことから、5 油種の中では最も接触面積が大きく摩耗した（＝油膜による 2 面間の分離能力が低かった）と評価できる。これは試験油中に混入した鉄分濃度分析の結果にも表れており、試験片表面の接触面積が大きいと推察される LSA は、他の試験油と比較すると、全ての劣化度（条件）で潤滑油として他の試験油に劣ることが伺える。

他方、摩耗の程度の評価を行う比摩耗量では、LSA が廃食油 FAME や非可食油 FAME よりも潤滑特性に優れることを示すデータが確認できる。本試験での比摩耗量の算出は、表面粗さ測定により摺動面の減失分を摩耗体積として算出するが、算出には接触部の明確な摩耗量の把握が必要となる。しかし、前述のとおり LSA は油膜形成能力が低く、試験摺動面の接触面積が広いと考えられることから、局所的な表面の減失ではなく、広い範囲での接触による表面全体の摩耗が発生していたと考えられ、従って他の試験油に比較し局所的な摩耗痕の程度が軽微になったことで摩耗体積の数値が低くなり、比摩耗量の値も各種 FAME に比較し良好になったと推察される。これは光学顕微鏡にて試験片の表面を監査した結果において、金属接触時の摩擦熱により発生する「テンパーカラー」が、LSA を用いて試験を実施した試験片は、他の試験油よりも広い範囲で数多く確認されたことから、うかがい知ることが出来る。

なお、同じ重油であっても、LSC（C 重油）は、Is 値とブロック表面観察の一部を除くパラメータで、FAME3 種と同程度か、又は優れた潤滑特性を示した。特に摩擦係数や試験面温度の試験前後の上昇差分が他の試験油に小さく優れているが、これは各パラメータの比較評価の項でも述べた通り、LSC は新油の状態で動粘度が「45.97 mm²/s」と、一般的な軸受用潤滑油に相当する動粘度を有しており、油膜形成能力が他の試験油に比較して明確に優れていることから、試験時の金属接触が少なく、優れた潤滑特性を示す結果になったと考えられる。ただし、表面粗さの測定結果の一部が FAME①より劣り、FAME②と同等であること、また FAME3 種とは異なり、表面写真にて LSA 同様にテンパーカラーが一部確認されることから、局所的に厳しい金属接触は発生していたと考えられ、これが一部のパラメータで FAME3 種よりもデータに劣る原因になったと考えられる。

6.3. バイオディーゼル燃料の適用性

廃食油 FAME2 種、非可食油 FAME1 種、A 重油 1 種、C 重油 1 種の計 5 つの燃料油を試験油とし、それぞれの潤滑特性（耐摩耗性）を調査し、バイオディーゼル燃料と従来燃料の相対比較等をした結果は以下の通り。

- (1) 本調査に使用した FAME の酸化触媒を用いた際の酸化劣化の進行は、LSA①、LSC①と同程度の傾向と推察される。
- (2) 本調査に使用した FAME は、LSC①よりも摺動部へのスラッジ固着等の潤滑条件悪化を招きにくいと推察される。
- (3) 本調査に使用した FAME は、LSA①と比較し、より優れた油膜形成能力および潤滑特性（耐摩耗性）を有すると推察される。
- (4) 本調査に使用した FAME は、LSC①と比較し、粘度の差による油膜形成能力は劣るものの、局所的な厳しい金属接触を防止する能力（耐摩耗性）は優れ、総合的には LSC①に準じた潤滑特性を有すると推察される。

以 上