

# 難燃性船用燃料油に関する分析・解析手法および 運用指針の研究確立(実施完了書)

株式会社ClassNKコンサルティングサービス

株式会社商船三井 技術部技術研究所

JX日鉱日石エネルギー株式会社

一般社団法人 日本海事検定協会 理化学分析センター

# 目次

1. はじめに
2. 研究目的
3. 事業内容
4. サンプルの収集
5. サンプルの特殊分析
  - 5.1 分析項目と分析手法
    - 5.1.1 特殊分析項目
    - 5.1.2 適用した特殊分析項目
  - 5.2 分析結果と解析
    - 5.2.1 分析結果
    - 5.2.2 解析の流れ
    - 5.2.3 LSGOの分析結果
    - 5.2.4 油社出荷タンクサンプルと補油サンプルの識別
    - 5.2.5 着火性の評価と燃焼障害油
    - 5.2.6 燃焼障害油の識別
    - 5.2.7 重回帰分析による重回帰式の作成
6. エンジン試験
  - 6.1 試験用燃料油の設計コンセプト
  - 6.2 試験用燃料油の調合
    - 6.2.1 船用燃料油(硫黄分1.0質量%以下)の製造方法
    - 6.2.2 調合用基材
    - 6.2.3 調合用基材の分析と評価
    - 6.2.4 燃焼障害油の分析結果と解析
    - 6.2.5 試験用燃料油の調合

# 目次

- 6.3 試験用燃料油の分析と解析
- 6.4 テストエンジンによる実機試験
  - 6.4.1 テストエンジンの仕様
  - 6.4.2 試験概要及び試験項目
- 6.5 テストエンジンによる実機試験結果
  - 6.5.1 振動計計測値
  - 6.5.2 DPA P-A線図
  - 6.5.3 着火遅れ
  - 6.5.4 開放結果
  - 6.5.5 実機試験の考察
- 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法
- 8. 難燃性船用燃料油の運用指針
- 9. まとめ

## <添付資料>

- ① 難燃性船用燃料油に関する分析・解析手法  
および運用指針の研究確立(実施完了報告書)

# 1. はじめに

・海洋上の大気環境汚染が問題

➡ 船舶から排出される大気汚染物質の抑制

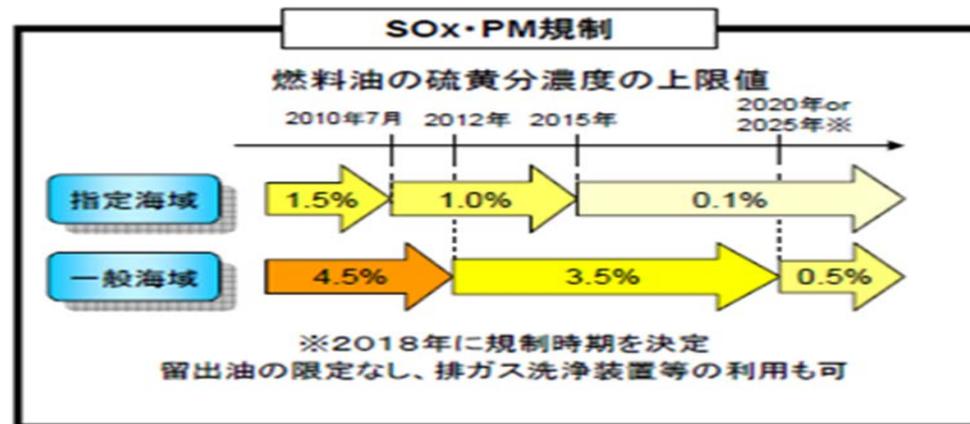
## ECAの現状及び動向



図1. バルティック海・北海ECA



図2. 米国・カナダ沿岸ECA



## 2. 研究目的

- ・世界的に供給されている低硫黄燃料油の性状・燃焼性が不明確
- ・燃焼性が及ぼす船用ディーゼル機関等への影響に対する危惧
- ・有効な分析・解析手法の確立が急務



1.0wt%低硫黄燃料油をターゲットとし、

- ・分析・解析手法の確立
- ・運用指針の策定

を研究目的とする。

### 3. 事業内容

#### ① 世界各地域で補油された船用燃料油収集

- ・世界各地域の補油サンプル，油社出荷タンクサンプル  
船舶で発生したトラブル時のサンプル.

#### ② 収集したサンプルを用いての分析

- ・収集サンプルの分析による性状把握及び解析

#### ③ テストエンジンによる実機試験での燃焼性確認

- ・テストエンジン運転データと分析及び解析結果の整合性確認

#### ④ 分析手法の選定，確立および運用指針の策定

## 4. サンプルの収集

### ・LSGO(硫黄分0.10質量%)－32サンプル

油社出荷タンクサンプル	補油サンプル	
#01 SINGAPORE(A社)	#07 ROTTERDAM	#20 SINGAPORE
#02 BRETAGHE(A社)	#08 ROTTERDAM	#21 SINGAPORE
#03 LE HAVRE(A社)	#09 ROTTERDAM	#22 BARCELONA
#04 SIGAPORE(B社)	#10 ROTTERDAM	#23 LONG BEACH
#05 ROTTERDAM(B社)	#11 ROTTERDAM	#24 ROTTERDAM
#06 NY(C社)	#12 ROTTERDAM	#25 NAGOYA
	#13 NAGOYA	#26 TOKYO
	#14 TOKYO	#27 LONG BEACH
	#15 TOKYO	#28 ROTTERDAM
	#16 KAWASAKI	#29 ROTTERDAM
	#17 TOKYO	#30 LONG BEACH
	#18 SINGAPORE	#31 SINGAPORE
	#19 SINGAPORE	#32 KOBE

## 4. サンプルの収集

### ・LSFO (硫黄分1.0質量%) – 39サンプル

油社出荷タンクサンプル	補油サンプル		トラブル発生時のサンプル
#01 SINGAPORE (A社)	#09 ROTTERDAM	#23 BARCELONA	T01 YOKOSUKA
#02 KOREA(A社)	#10 ROTTERDAM	#24 HONG KONG	T02 ZONA COMUN
#03 BRETAGNE(A社)	#11 ROTTERDAM	#25 HUNTERSTON	T03 ZONA COMUN
#04 VANCOUBER(C社)	#12 ROTTERDAM	#26 OAKLAND	T04 ZEEBRUGGE
#05 LA(C社)	#13 ROTTERDAM	#27 ROTTERDAM	T05 HONG KONG
#06 SINGAPORE(B社)	#14 ROTTERDAM	#28 HONG KONG	T06 HONG KONG
#07 ROTTERDAM(B社)	#16 LONG BEARCH	#29 ROTTERDAM	
#08 NY(C社)	#17 LA	#30 ROTTERDAM	
	#18 SINGAPORE	#31 OAKLAND	
	#19 BALBOA	#32 SINGAPORE	
	#20 KAWASAKI	#33 ZEEBRUGGE	
	#21 YOKOHAMA	#34 BUENOS AIRES	
	#22 CHIBA		

\* 補油サンプル#15は、硫黄分1.0質量%を超えていた為除外

# 4. サンプルの収集

油社出荷タンクサンプル	補油サンプル		トラブル発生時のサンプル
#01 SINGAPORE (A社)	#09 ROTTERDAM	#23 BARCELONA	T01 YOKOSUKA
#02 KOREA(A社)	#10 ROTTERDAM	#24 HONG KONG	T02 ZONA COMUN
#03 BRETAGNE(A社)	#11 ROTTERDAM	#25 HUNTERSTON	T03 ZONA COMUN
#04 VANCOUBER(C社)	#12 ROTTERDAM	#26 OAKLAND	T04 ZEEBRUGGE
#05 LA(C社)	#13 ROTTERDAM	#27 ROTTERDAM	T05 HONG KONG
#06 SINGAPORE(B社)	#14 ROTTERDAM	#28 HONG KONG	T06 HONG KONG
#07 ROTTERDAM(B社)	#16 LONG BEARCH	#29 ROTTERDAM	
#08 NY(C社)	#17 LA	#30 ROTTERDAM	
	#18 SINGAPORE	#31 OAKLAND	
	#19 BALBOA	#32 SINGAPORE	
	#20 KAWASAKI	#33 ZEEBRUGGE	
	#21 YOKOHAMA	#34 BUENOS AIRES	
	#22 CHIBA		

補油港	地域	サンプル採取箇所	トラブル報告内容
T01 YOKOSUKA	日本	補油サンプル	主機黒煙発生
T02 ZONA COMUN	南米	主機入口	フィルタ閉塞/主機排ガス温度上昇
T03 ZONA COMUN	南米	主機燃料油タンク	フィルタ閉塞/主機排ガス温度上昇
T04 ZEEBRUGGE	欧州	主機燃料油タンク	主機ピストンリング折損
T05 HONG KONG	アジア	主機燃料油タンク	フィルタ閉塞
T06 HONG KONG	アジア	主機入口	フィルタ閉塞

燃焼性に起因するようなトラブル発生時のサンプルT04を本研究の燃焼障害油と定義

## 4. サンプルの収集

### 燃焼障害油の詳細

背景:

2013年5月(株)商船三井 関係会社の運航船(傭船)にて  
主機ピストンリング損傷事故発生

>>補足:

①メーカーによる上記事故要因コメント

“Quality of fuel oil such as combustibility”  
(エンジンライセンサーコメントより抜粋。)

②他の分析機関のコメント

“HFO with POOR Ignition & combustion properties”

## 5. サンプルの特殊分析

- 5.1 分析項目と手法
- 5.2 分析結果と解析

## 5.1 分析項目と手法

## 5.1 分析項目と手法

ISO8217の試験結果からでは、燃焼障害の予測は困難である

→他の要因が関係している

→要因が分かれば、分析可能



最終的に燃焼障害油を統計解析し識別

・・・多変量解析の材料として、なるべく多くの項目について試験分析を行う

一般項目；ISO8217項目

特殊分析；沸点分布，炭化水素タイプ，FCAなど

## 5.1.1 特殊分析項目

### LSFOの重質分の分析

#### 重質重油の特徴

- ・・・一般論として分解系基材, アスファルテンなどの  
高沸点成分は燃焼性が悪い



#### GC蒸留

- ・・・沸点分布の評価(GC蒸留で750°Cまで推定可能)

#### アスファルテン分

- ・・・最も重質な成分(量)の把握(重量法)  
分子量の相対評価(GPC法)

## 5.1.1 特殊分析項目

### LSFOの炭化水素タイプ分析

- ・芳香族・・・燃料中の芳香族あるいは多環芳香族分と燃焼性の相関

①軽質な芳香族：1環，2環および3環以上の芳香族

②重質な芳香族：アスファルテン分



マルテン液の芳香族分析(HPLC)を実施し，  
1環，2環および3環以上の各芳香族組成比を評価

- ・レジン分・・・極性物質量の評価



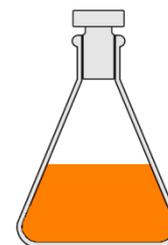
カラムクロマト法で実施

## 5.1.1 特殊分析項目

### LSFOの炭化水素タイプ分析



アスファルテン



マルテン液

重量法による定量

分子量をGPC  
で相対評価

液クロ法で1環, 2環および  
3環以上の芳香族分析

カラムクロマト法  
でレジンを分析

## 5.1.2 適用した特殊分析項目 (ISO8217以外)

要因	燃焼障害因子	試験項目		試験方法	油種	
					LSGO	LSFO
沸点分布	重質成分	沸点分布	GC蒸留	ASTM D 2887	●	—
				ASTM D 6352	—	●
			熱分析 (TG-DTA)	TG-DTA法	—	●
組成	芳香族量	芳香族分	芳香族 (1, 2, 3環以上)	IP391	●	—
				IP391 modified (HPLC法)	—	●
	難燃性成分	重質成分	アスファルテン	IP143	—	●
			分子量分布	GPC分析	—	●
	その他	炭化水素タイプ	レジニン分	JPI-5S-22	—	●
		金属分	金属元素	ICP-ES	—	●
	BDF	酸化劣化	FAME	EN14078	●	—
分解系基材	オレフィン	臭素価	JIS K 2605	●	—	
性状	着火性	着火性の指標	FCA	IP541	●	●
	その他	潤滑性	HFRR	JPI-5S-22	●	—

## 5.2 分析結果と解析

## 5.2.1 分析結果

### LSGO (32検体)

LSGOは難燃性燃料油が無かった

油社出荷タンクサンプル: 6検体 (LSGO1~6)

補油サンプル : 26検体 (LSGO7~32)

→ (全試験結果は実施完了報告書参照)

### LSFO (39検体)

燃焼障害油1検体 (T04), 非燃焼障害油38検体

油社出荷タンクサンプル : LSF01~8

補油サンプル : LSF09~34 (LSF015は欠番)

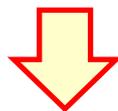
トラブル発生時サンプル : T01~T06

→ (全試験結果は実施完了報告書参照)

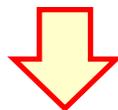
## 5.2.2 解析の流れ



それぞれの測定データを収集する



主成分分析を用いて分離できる条件を求める



主成分分析得点と分析値との関係を重回帰分析で見出す

燃焼障害の確認



重回帰分析の  
妥当性を検証

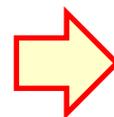
試験用燃料油を調合し、実機試験を実施する

## 5.2.3 LSGOの分析結果

試料	試料No.	試料詳細	試験結果の特徴
LSGO	LSGO01~17 LSGO22~32	油社出荷タンクサンプル及び補油サンプル(シンガポール補油サンプル1件を含む)	—
BDF入り LSGO	LSGO18~21	補油サンプル(補油地:シンガポール)	・HFRRが低い:潤滑性が良い ・FCA(ECN)高い:着火性が良い ・臭素価が高い:不飽和分が高い (BDF由来)

海外補油サンプルの一部にバイオ由来の成分検出された

LSGO18~21のFAMEを定量  
(EN14078準拠)

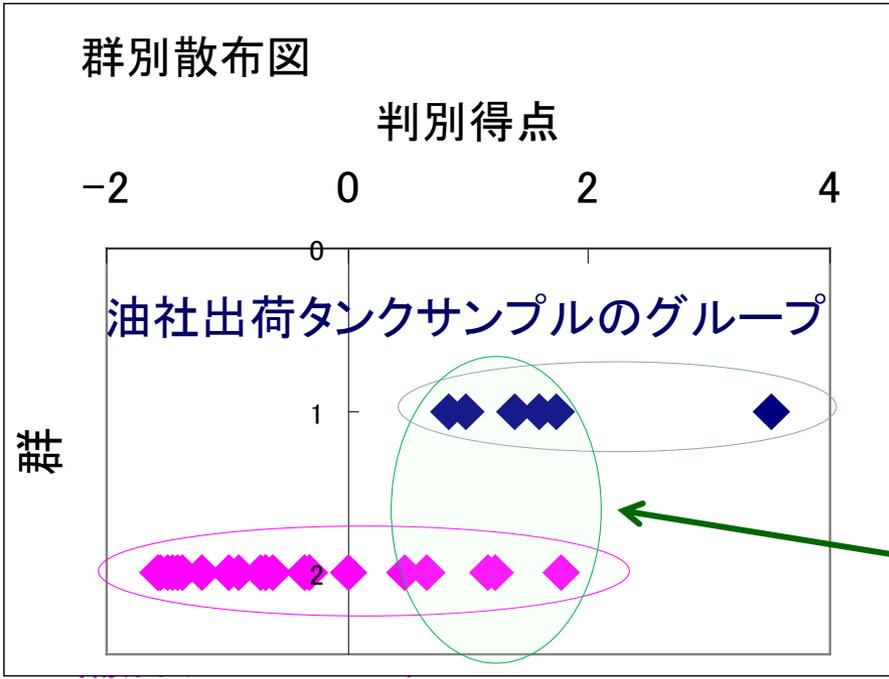


42~46容量%

# 5.2.4 油社出荷タンクサンプルと補油サンプルの識別

## LSGO

BDF非混和のLSGO26検体において、油社出荷タンクサンプルと補油サンプルの識別が可能かどうか判別分析を実施した



- ◆ 油社出荷タンクサンプル
- ◆ 補油サンプル

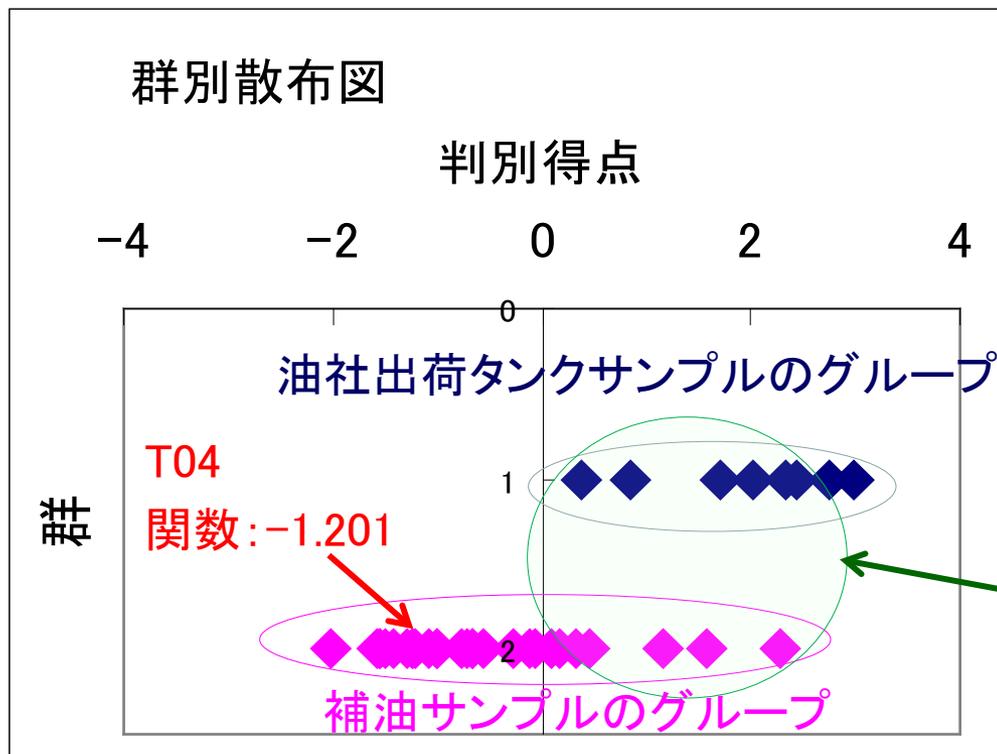
性状が近く、殆ど判別不可

殆どの油社出荷タンクサンプルは補油サンプルと判別が重なっており、両者は識別されなかった

## 5.2.4 油社出荷タンクサンプルと補油サンプルの識別

### LSFO

LSFOの分析結果で、油社出荷タンクサンプルと補油サンプルまたは  
燃焼障害油の識別が可能かどうか判別分析を実施した



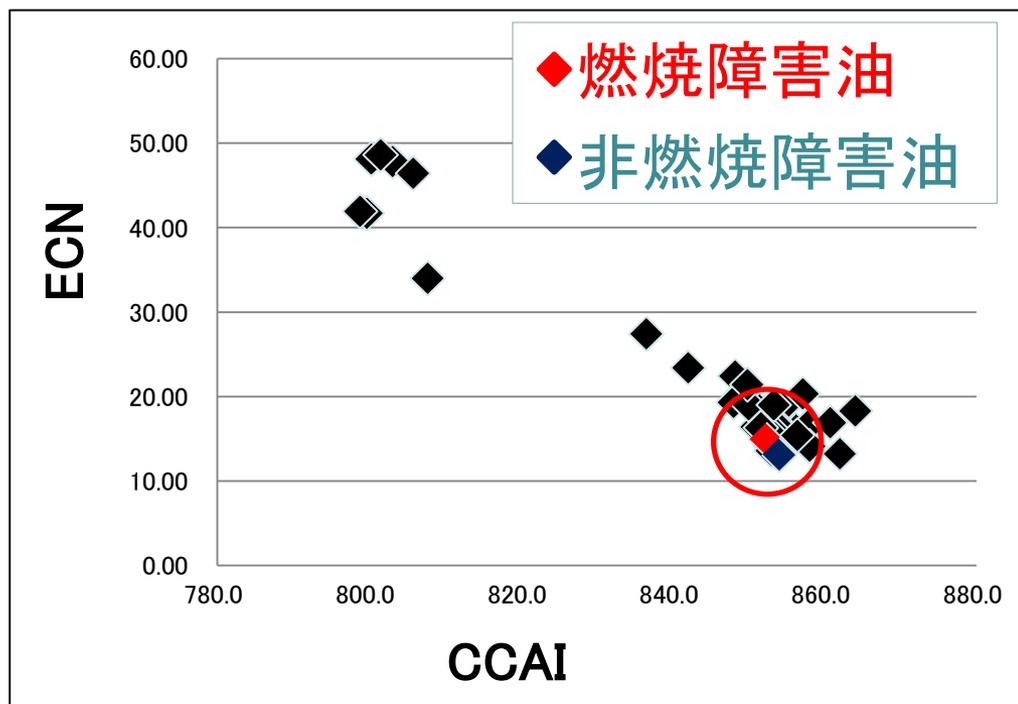
- ◆ 油社出荷タンクサンプル
- ◆ 補油サンプル

性状が近く、殆ど判別不可

- ①ほとんどの油社出荷タンクサンプルと補油サンプルで判別が重なっており、両者は識別されなかった
- ②燃焼障害油も補油サンプルと重なっている

## 5.2.5 着火性の評価と燃焼障害油

着火性の指標であるCCAI及び推定セタン価(ECN)を用いて燃焼障害油の識別を試みた。



CCAIやFCA (ECN) だけでは、必ずしも燃焼障害油の識別はできない

プロット図の例: FCAおよびCCAIの相関

## 5.2.6 燃焼障害油の識別

### LSFOの解析

解析に用いたデータ

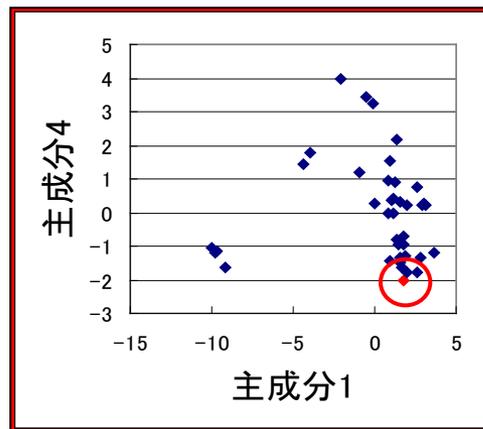
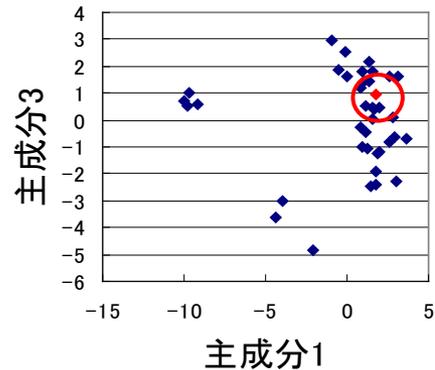
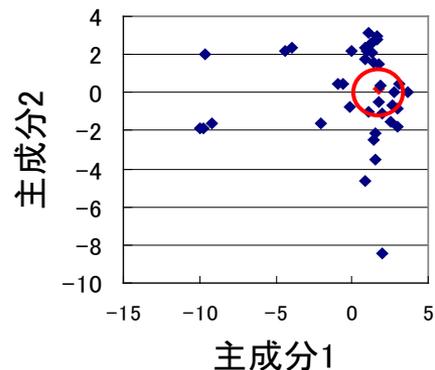
- ・LSFOサンプル39検体\*1
- ・全試験項目(データが揃っていない項目は除く)
- ・温度はケルビン温度に変換
- ・試験結果のレンジが大きい項目は対数をとる  
(温度の結果\*2, 動粘度, アスファルテン分子量)

\*1 #1~34(15は欠番)およびT01~06

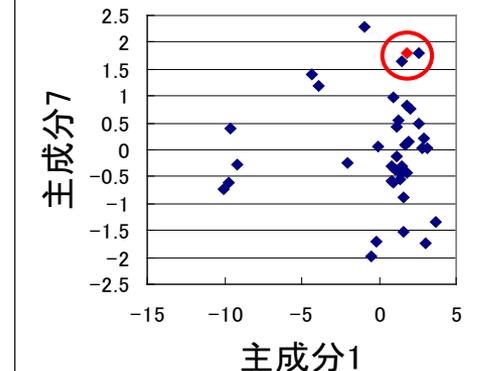
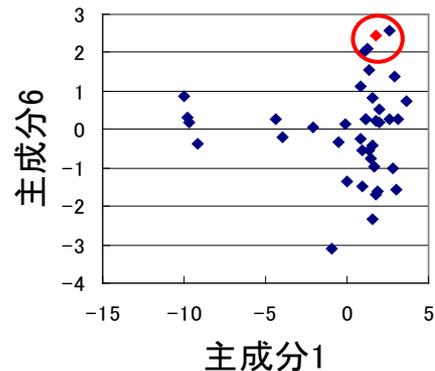
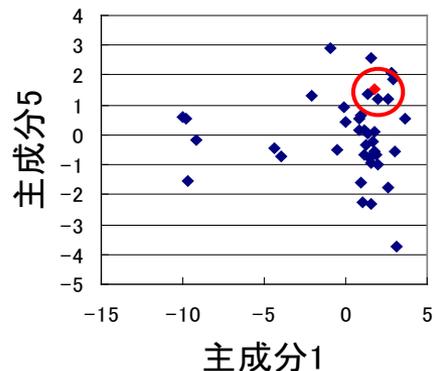
\*2 例:  $-10^{\circ}\text{C} \Rightarrow \text{Log}(-10+273) = 2.419956$

## 5.2.6 燃焼障害油の識別

### 主成分分析①



◆ 燃焼障害油  
◆ 非燃焼障害油



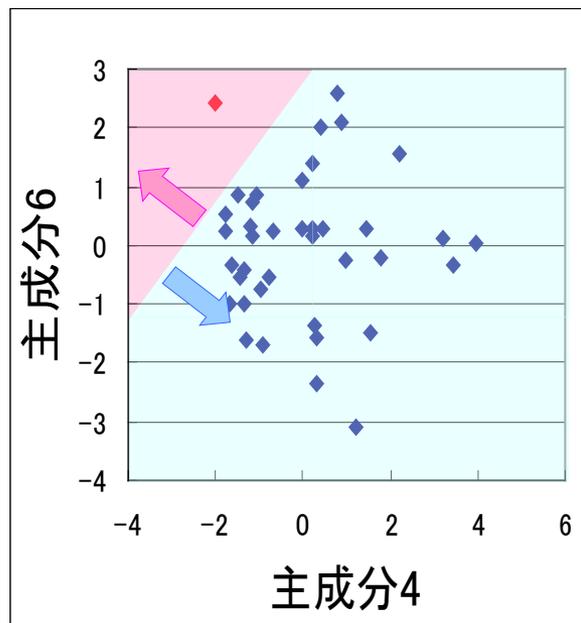
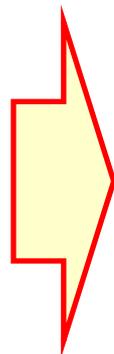
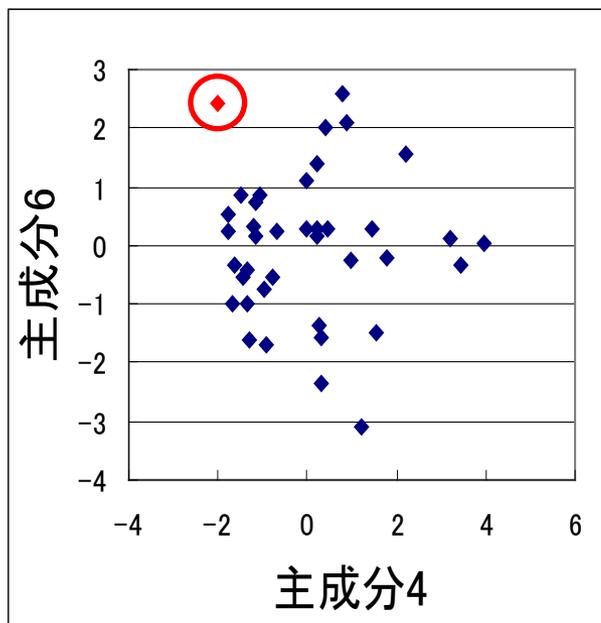
主成分4で燃焼障害油と非燃焼障害油の識別が

可能であることが示された

⇒より分離・識別するため主成分4および主成分6で散布図を作成

## 5.2.6 燃焼障害油の識別

### 主成分分析②



主成分4および主成分6  
の散布図

グループ分けの一例

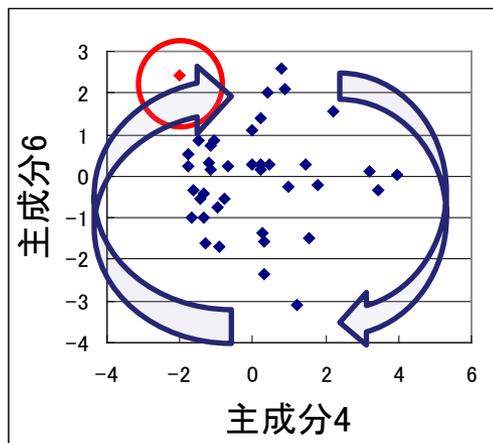
主成分4と主成分6をプロットすることで、  
燃焼障害油とその他のLSFOを分離した

## 5.2.6 燃烧障害油の識別

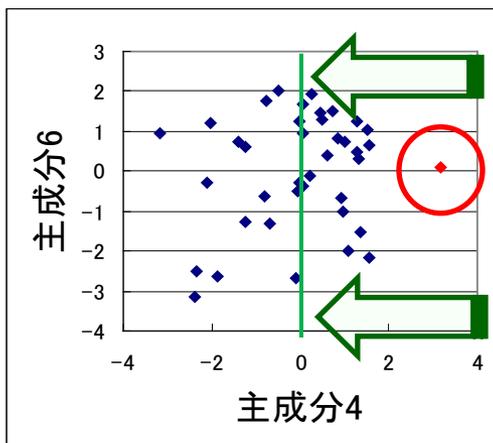
### 主成分4および主成分6の散布図

◆ 燃烧障害油

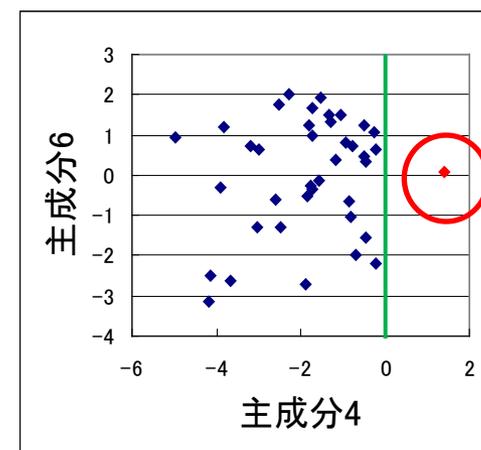
◆ 非燃烧障害油



回転前



128° 回転後



平行移動後

燃烧障害油1点をプラス側に，非燃烧障害油をマイナス側に  
識別するために散布図を回転および平行移動した  
⇒以後，合成主成分という

(注)回転の向きおよび角度は，燃烧障害油1検体からのみ判断した

## 5.2.7 重回帰分析による重回帰式の作成

合成主成の得点を目的変数とし、重回帰分析を行った。

⇒ 説明変数として以下の性状・物性が選択された

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| ① 全芳香族分     | ⑤ 流動点           |
| ② 2環芳香族分    | ⑥ アスファルテン分      |
| ③ 3環以上の芳香族分 | ⑦ 灰分            |
| ④ FCA(ABP)  | ⑧ GC蒸留の700°C留出量 |

(注)上記の説明変数は、燃焼障害油1検体をその他のLSFOと分別するためのものであり、今後異なる性状の燃焼障害油を追加し再解析をした場合、選択される説明変数も異なる可能性がある

## 5.2.7 重回帰分析による重回帰式の作成

### 合成主成分の得点を予測する重回帰式(1)

$$\begin{aligned} \text{予測値} = & 0.1263 \quad \times \quad \text{全芳香族分} \\ & +0.3406 \quad \times \quad \text{2環芳香族分} \\ & -0.1784 \quad \times \quad \text{3環以上の芳香族分} \\ & +0.3431 \quad \times \quad \text{FCA(ABP)} \\ & -20.7182 \quad \times \quad \text{Log}_{10}(\text{流動点} + 273) \\ & +0.1461 \quad \times \quad \text{アスファルテン分} \\ & -15.7141 \quad \times \quad \text{灰分} \\ & +0.0466 \quad \times \quad \text{GC蒸留(700°C留出量)} \\ & +37.0343 \end{aligned}$$

## 6. エンジン試験

- ・6.1 試験用燃料油の設計コンセプト
- ・6.2 試験用燃料油の調合
- ・6.3 試験用燃料油の分析および解析
- ・6.4 テストエンジンによる実機試験
- ・6.5 テストエンジンによる実機試験結果

## 6.1 試験燃料油の設計コンセプト

## 6.1 試験用燃料油の設計コンセプト

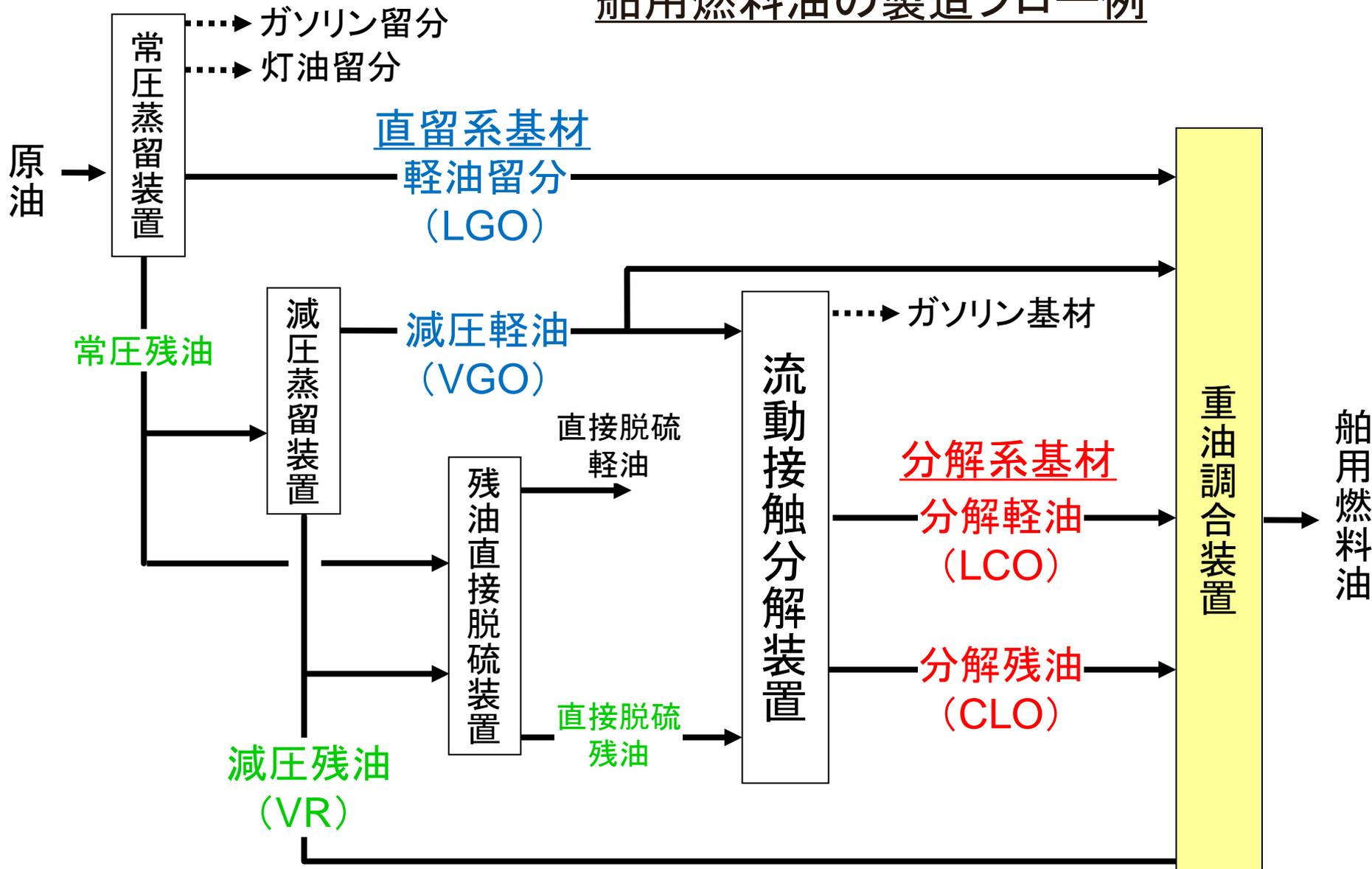
以下、3種類の燃料油を作成することとした。

- 試験用燃料油1: 燃焼障害油(T04)より燃焼性が優れた燃料油.
- 試験用燃料油2: 燃焼障害油(T04)相当の燃料油.
- 試験用燃料油3: 燃焼障害油(T04)より燃焼性が劣る燃料油.

## 6.2 試験用燃料油の調合

# 6.2.1 船用燃料油(硫黄分1.0質量%以下)の製造方法

## 船用燃料油の製造フロー一例



## 6.2.2 調合用基材

基材名		LCO (残油処理無)	LCO (残油処理有)-1	LCO (残油処理有)-2	CLO (残油処理無)	CLO (残油処理有)-1	CLO (残油処理有)-2
基材種別番号		①	②		③	④	
密度	15°C g/cm3	0.8956	0.9413	0.9110	0.9937	1.071	1.080
動粘度	50°C mm2/s	2.292	2.175	1.811	52.5	69.1	112
	100°C mm2/s						
残留炭素分	質量%				2.9	6.15	5.77
硫黄分	質量%	0.056	0.21	0.14	0.13	0.70	0.95
セタン指数	JISK2204	35.0	22.0	23.5			
CCAI					880	953	955
試験用燃料油1			○				
試験用燃料油2		○	○			○	
試験用燃料油3				○			○

基材名		減圧残油 (低硫黄)-1	減圧残油 (低硫黄)-2	減圧残油 (高硫黄)-1	減圧残油 (高硫黄)-2	減圧残油 (高硫黄)-3	直接脱硫軽油	直接脱硫残油
基材種別番号		⑤		⑥			⑦	⑧
密度	15°C g/cm3	0.987	0.993	1.040	1.039	1.040	0.8671	0.9137
動粘度	50°C mm2/s						3.247	90.6
	100°C mm2/s	283	476	3410	3590	3430		
残留炭素分	質量%	10.7	12.0	24.4	24.3	24.5		3.05
硫黄分	質量%	0.30	0.28	4.65	4.36	4.94	0.02	0.28
セタン指数	JISK2204							
CCAI		819	820	852	845	847	816	792
試験用燃料油1			○		○		○	○
試験用燃料油2		○		○				
試験用燃料油3			○			○		

## 6.2.3 調合用基材の分析と評価

試験用燃料油を調合するため、使用する基材についても分析し、基材の特徴について調べた

→（全試験結果は実施完了報告書参照）

表 調合用基材の試験結果

調合用基材	減圧 残油 低硫黄	減圧 残油 高硫黄	常圧 残油 低硫黄	常圧 残油 高硫黄	CLO	脱硫 減圧 軽油	直接 脱硫 残油	LCO	未脱硫 軽油	脱硫 軽油
アスファルテン 最大分子量	27262	40665	-*1	40665	15667	-	-	-	-	-
アスファルテンピークトップの 分子量	7180	17123	-*1	18268	252	-	-	-	-	-
全芳香族分	26.0	14.9	18.1	28.1	45.1	47.2	46.1	81.9	26.7	17.5
1環芳香族分	21.6	12.4	15.9	23.6	13.0	40.6	40.8	34.9	14.8	15.9
2環芳香族分	2.1	0.9	0.7	1.9	3.1	2.7	2.2	40.4	9.6	1.3
3環以上の芳香族分	2.4	1.6	1.5	2.6	29.0	3.9	3.0	6.6	2.3	0.3

\*1 アスファルテン分が微量のため測定不能

## 6.2.3 調合用基材の分析と評価

各基材の試験結果から考えられる特徴

- ①高硫黄残油のアスファルテン最大分子量は、  
低硫黄残油に比べ大きい
- ②CLOは3環以上芳香族分, LCOは2環芳香族分  
が他の基材に比べ多い

JX殿提供試料	減圧 残油 低硫黄	減圧 残油 高硫黄	常圧 残油 低硫黄	常圧 残油 高硫黄	CLO	脱硫 減圧 軽油	直接 脱硫 残油	LCO	未脱硫 軽油	脱硫 軽油
アスファルテン 最大分子量	小	大	-	大	小	-	-	-	-	-
全芳香族分		少			多	多	多	極多		少
1環芳香族分							多	多		
2環芳香族分								多		
3環以上の芳香族分					多					

## 6.2.3 調合用基材の分析と評価

配合用基材	減圧残油 (低硫黄)	減圧残油 (高硫黄)	常圧残油 (低硫黄)	常圧残油 (高硫黄)	CLO	脱硫減圧 軽油	直接脱硫 残油	LCO	未脱硫 軽油	脱硫軽 油	燃焼 障害油 T04
アスファルテン最大分子 量	27262	40665	-*1	40665	15667	-	-	-	-	-	44364
アスファルテンピーク トップ分子量	7180	17123	-*1	18268	252	-	-	-	-	-	17598
全芳香族分	26.0	14.9	18.1	28.1	45.1	47.2	46.1	81.9	26.7	17.5	40.2
1環芳香族分	21.6	12.4	15.9	23.6	13.0	40.6	40.8	34.9	14.8	15.9	14.3
2環芳香族分	2.1	0.9	0.7	1.9	3.1	2.7	2.2	40.4	9.6	1.3	14.8
3環以上の芳香族分	2.4	1.6	1.5	2.6	29.0	3.9	3.0	6.6	2.3	0.3	11.0

\*1 アスファルテン分が少なすぎるため測定不可

### 推定される燃焼障害油の特徴

- ① アスファルテンの分子量が高い …… 減圧残油(高硫黄)又は、  
常圧残油(高硫黄)が含まれている
- ② 2環芳香族の値が高い …… LCOが含まれている
- ③ 3環芳香族の値が高い …… CLOが含まれている

## 6.2.3 調合用基材の分析と評価

分析・解析結果から見えた燃焼障害油の調合方法

- ①重回帰式による合成主成分得点の予測値が高くなるように各性状を合わせる。
- ②含まれるアスファルテン最大分子量が大きくなるよう、高硫黄の減圧残油または常圧残油を配合する。
- ③LCOおよびCLOを配合する。

## 6.2.4 試験用燃料油の調合

混合割合, vol%			試験用燃料油1	試験用燃料油2	試験用燃料油3
①LCO(残油処理無)				14	
②LCO(残油処理有)			14	14	37
③CLO(残油処理無)					
④CLO(残油処理有)				11	21
⑤減圧残油(低硫黄)			47	47	30
⑥減圧残油(高硫黄)			14	14	12
⑦直接脱硫軽油			15		
⑧直接脱硫残油			10		
密度	15°C	g/cm <sup>3</sup>	0.9657	0.9839	0.9887
動粘度	50°C	mm <sup>2</sup> /s	237	159	48.2
CCAI			832	855	876
残留炭素分		質量%	9.11	8.27	7.42
硫黄分		質量%	0.86	0.95	0.94

\* 残油処理の有無はFCCの原料に残油を用いているかどうか。

## 6.3 試験用燃料油の分析と解析

## 6.3 試験用燃料油の分析と解析

試験用燃料油の分析値を重回帰式(1)に代入し、  
合成主成分得点の予測値を求めた。  
→ (全試験結果は実施完了報告書参照)

試料	合成主成分 得点予測値	推定される燃焼性
試験用燃料油1	-0.062	非燃焼障害油に分類
試験用燃料油2	0.791	燃焼障害油と非燃焼障害油の中間に分類
試験用燃料油3	3.887	燃焼障害油に分類
燃焼障害油T04	1.339	実際の運航でトラブルが発生した燃料油

## 6.4 テストエンジンによる実機試験

## 6.4.1 テストエンジンの仕様

- ・テストエンジン(商船三井技術研究所)の仕様

メーカー	ダイハツディーゼル
型式	3DK-20(4サイクル過給機付きトランクピストン型)
機関回転数	900min <sup>-1</sup>
発電機出力	320kW(機関出力:353kW)
シリンダ径	200mm
ストローク	300mm
気筒数	3気筒

## 6.4.2 試験概要及び計測項目

### ・試験概要

- ・総運転時間96時間
- ・エンジン負荷は、1日毎交互に85%、50%で実施  
→ 85%負荷、50%負荷の運転時間は各48時間
- ・2時間ごとに運転データ採取

### ・計測項目

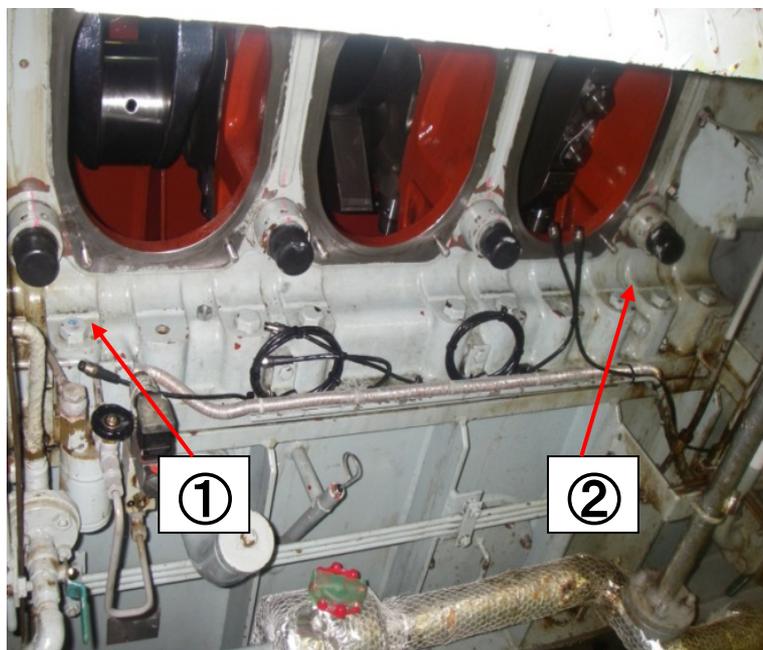
- ・テストエンジン機側計測結果(各種圧力、温度等)
- ・機関振動値
- ・DPA(Diesel Performance Analyzer)データ

## 6.5 テストエンジンによる実機試験結果

## 6.5.1 振動計計測値

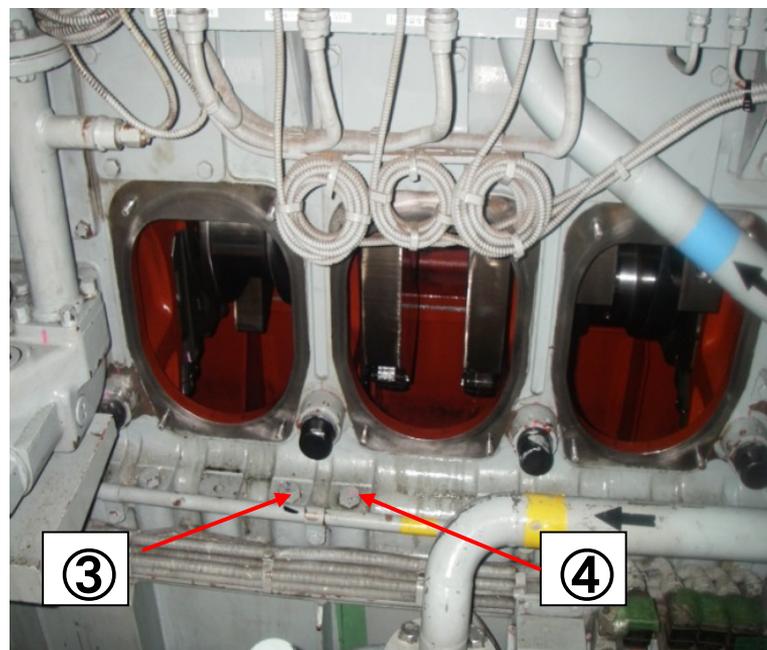
### 振動値計測箇所

CYL.#3    CYL.#2    CYL.#1



フライホイール側

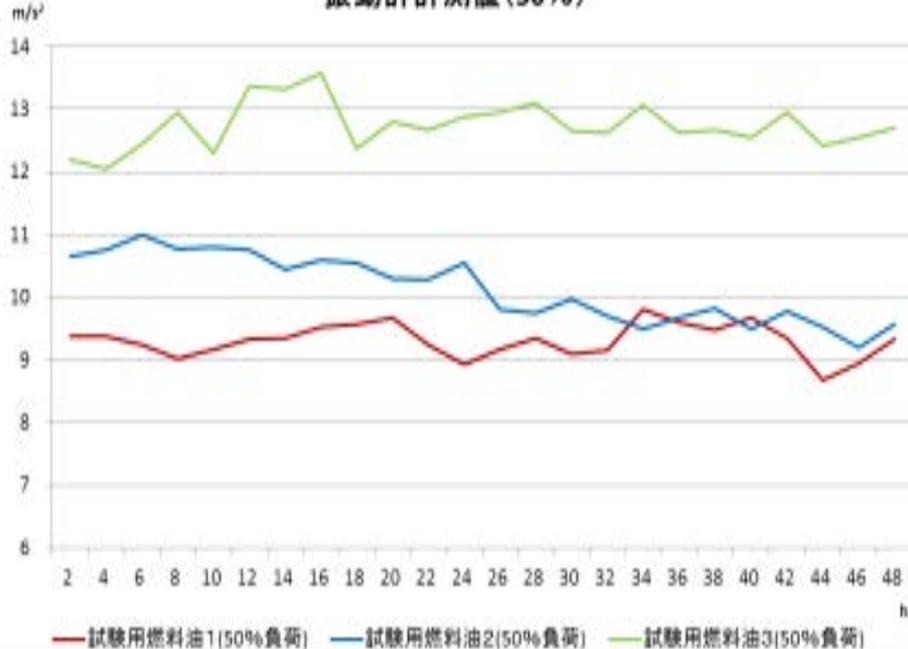
CYL.#1    CYL.#2    CYL.#3



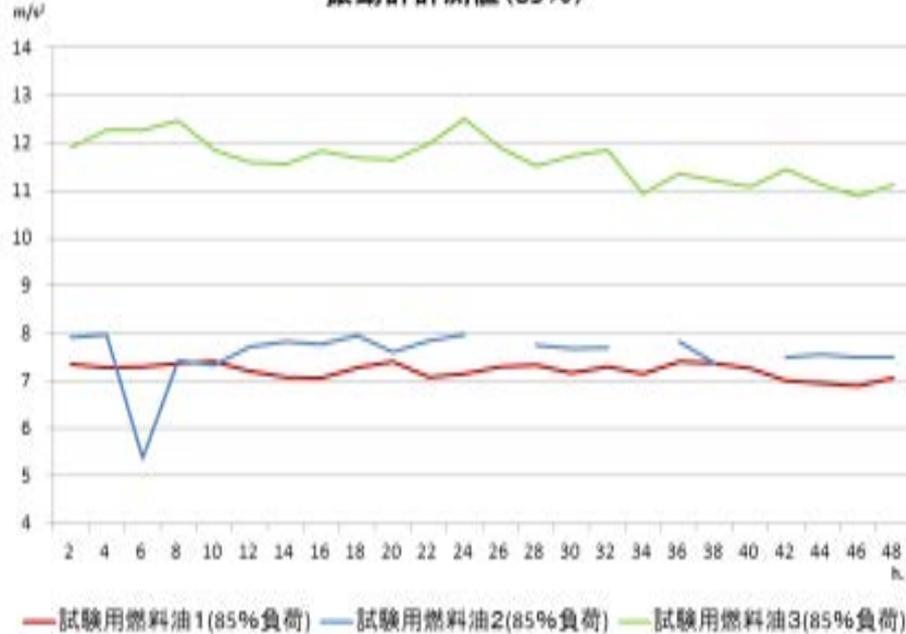
- ・①～④エンジン架構High Tensionボルト.
- ・計測間隔は1日3回、2時間ごとにデータ採取.

# 6.5.1 振動計計測値

振動計計測値(50%)

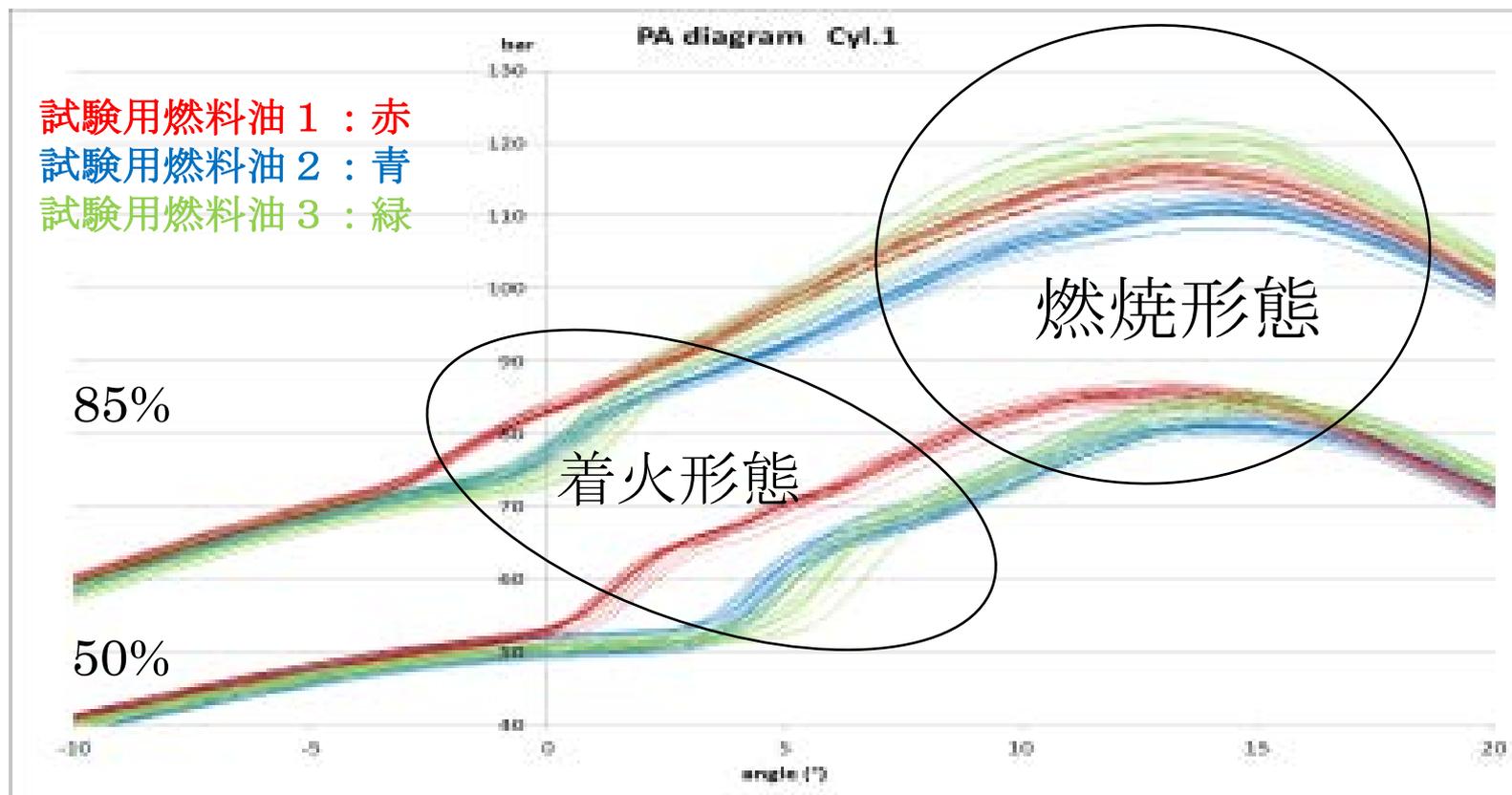


振動計計測値(85%)



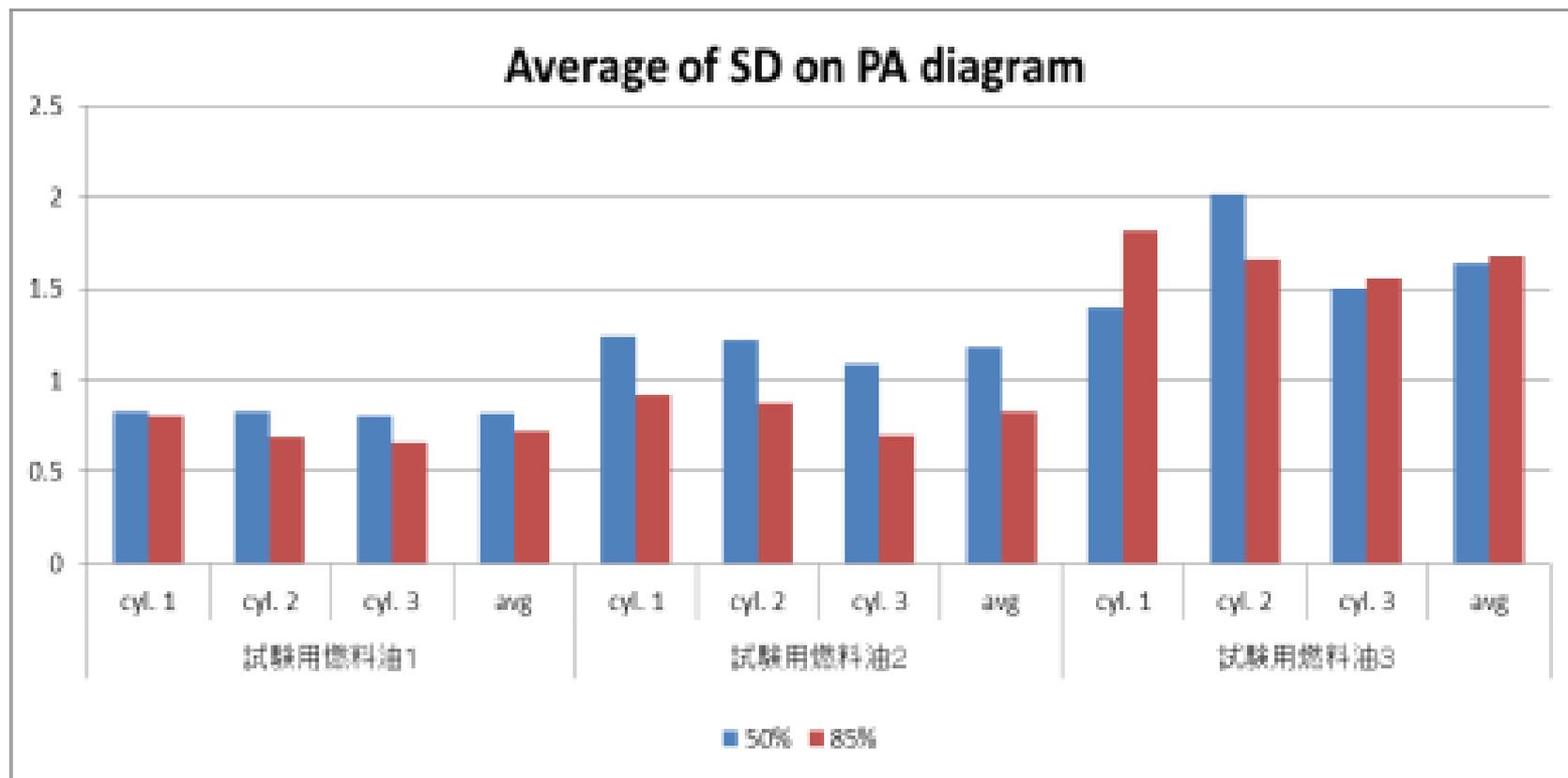
・振動値 : 試験用燃料油2, 3 > 試験用燃料油1  
: 50%負荷 > 85%負荷

## 6.5.2 DPA P-A線図



- 着火形態 : 試験用燃料油2, 3のは同様傾向.
- 試験用燃料油3 : 85%負荷において、Pmaxが125bar付近に達する  
圧力で他よりも高い.

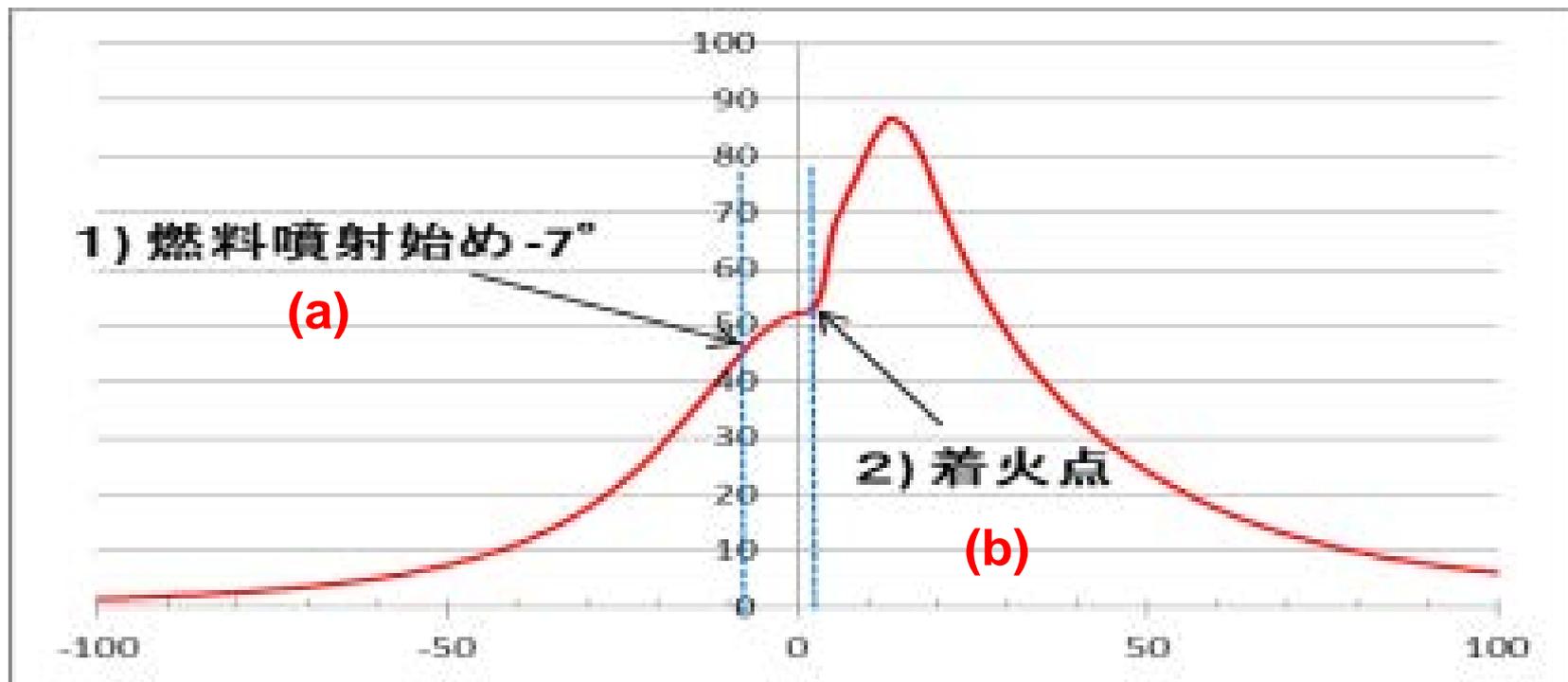
## 6.5.2 DPA P-A線図



### ・P-A線図のばらつき

圧力の標準偏差： 50%負荷時の方が高い傾向。  
試験用燃料油3が最も高い。  
試験用燃料油1が最も低い。

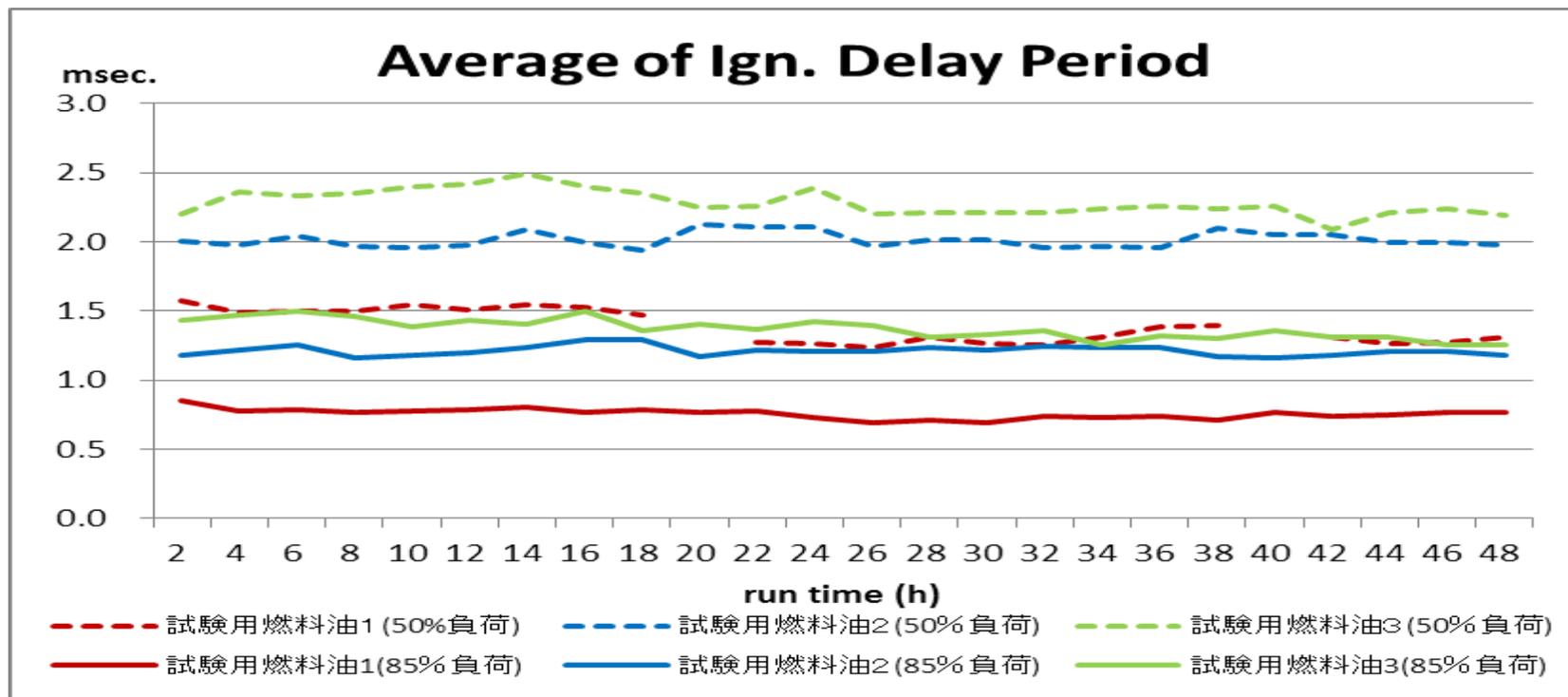
## 6.5.3 着火遅れ



### ・着火遅れ時間(msec)

DPA P-A線図上でTDC前7° を燃料噴射始めとし(a)、回転角度が0.2° 進んだ際に、Pressureが0.5bar以上上昇した所(b)を着火点と決め、(b)-(a)の角度より着火遅れ時間を算出。

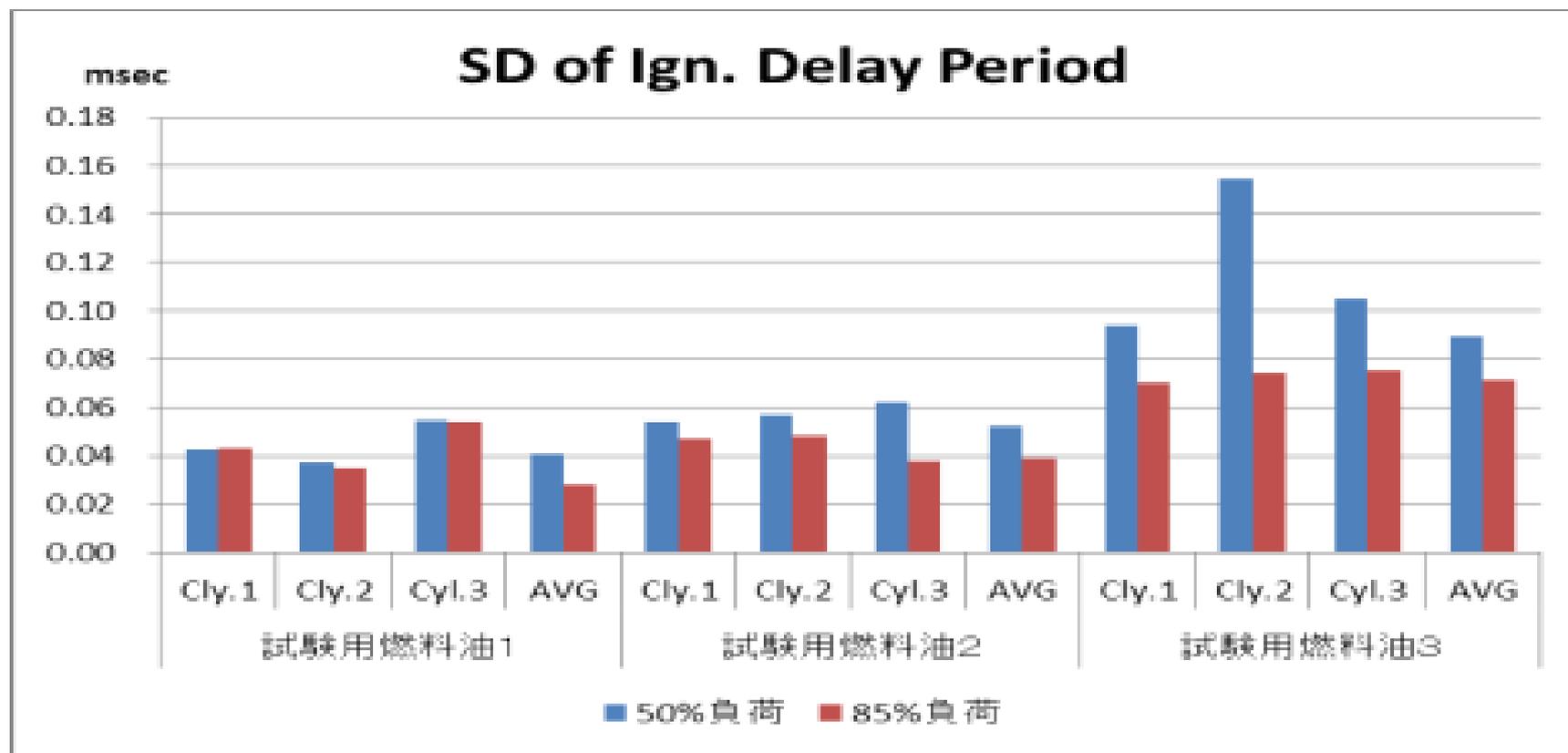
## 6.5.3 着火遅れ



(各負荷における全シリンダの着火遅れ時間の平均値)

着火遅れ時間： 試験用燃料油3 > 燃料油2 > 燃料油1

## 6.5.3 着火遅れ



### ・着火のばらつき

着火遅れ時間の標準偏差： 50%負荷時の方が高い傾向。  
試験用燃料油3が最も高い。  
試験用燃料油1が最も低い。

## 6.5.4 開放結果

### ・試験用燃料油3 実機試験後の開放結果

#### シリンダライナ、ピストンリング

下表1 シリンダライナ上部内径摩耗量(mm)

計測箇所		Cyl.1	Cyl.2	Cyl.3
シリンダーライナー内径 プロテクトリング下部より20mm	P-S	0.02	0.04	0.03
	F-A	0.01	0.03	0.03
平均値		0.02	0.03	0.03

カタログ値 : シリンダライナ摩耗量限度:1mm

下表2 トップリング幅摩耗量(mm)

計測箇所		Cyl.1	Cyl.2	Cyl.3
ピストンリングにつき3カ所で計測	V	0.04	0.05	0.02
	W	0.05	0.06	0.02
	Z	0.05	0.06	0.01

## 6.5.4 開放結果

### ・実機試験後の燃料噴射弁 噴射テスト

下表1 シリンダライナ上部内径摩耗量(mm)

Cyl.1燃料噴射弁		噴射/後ダレ	弁の動き	備考
試験燃料油1	試験前	○/○	○	新品ノズル
	試験後	○/○	×	ノズル不良
試験燃料油2	試験前	○/○	○	新品ノズル
	試験後	○/○	×	ノズル不良
試験燃料油3	試験前	○/○	○	新品ノズル
	試験後	○/○	×	ノズル不良

## 6.5.5 実機試験の考察

機関振動値：試験用燃料油3が最も高く、他の試験結果より最大で約1.5倍.

### 原因

- ① 燃料油の不安定な着火による着火遅れ時間のばらつき.
- ② 着火後のクランク角度当たりの急激な圧力上昇.
- ③ 着火不安定性による燃焼行程における燃料油未燃性分の発生.
- ④ ③による次燃焼に対する悪影響.

①～④が累積的、複合的に作用したものと考えられる.

上記に加え

- ・Pmaxが、123bar程度と他の試験に比べて高い.
- ・燃焼のばらつき他の試験と比べて多い.
- ・開放結果から短時間の運転での異常摩耗.

これらより、試験用燃料油3は燃焼障害油である考えられる.

- ・試験用燃料油1: 安定した燃焼性を持つ燃料油
- ・試験用燃料油2: 非燃焼障害油であるが、着火傾向や機関振動値より、燃焼障害油の危険性を持っている.

## 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 重回帰式による予測値と燃料油の評価

試験燃料油2で燃焼障害が確認されなかったことを踏まえ

下記の評価が可能となった

重回帰式による予測	燃料油の評価
0.791以下	非燃焼障害油である。
0.791～1.339	燃焼障害油の危険性を持っており運転時に注意が必要である。
1.339以上	燃焼障害油と予測され、特に注意が必要である。

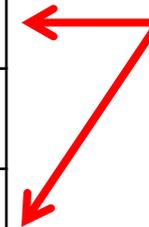
# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 解析結果の評価

固有値\*が1以上あった主成分の寄与率

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
主成分1	13.724	39.21%	39.21%
主成分2	5.797	16.56%	55.77%
主成分3	3.162	9.03%	64.81%
主成分4	2.326	6.65%	71.45%
主成分5	1.881	5.37%	76.83%
主成分6	1.582	4.52%	81.35%
主成分7	1.018	2.91%	84.25%

燃焼障害油の  
識別に用いた  
主成分4および6



\* 主成分方向の情報量の総和から算出した標準偏差を2乗したもの

# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 解析結果の評価

- LSFOサンプル39検体の母集団の対し,  
燃焼障害油を識別するのに使用した主成分4および6の  
累積寄与率は11.17%(=6.65%+4.52%)である。  
⇒ 燃焼障害を引き起こす要因の寄与度は低い  
⇒ 燃焼障害の原因追究が困難にさせている理由である
- 燃焼障害油の推定に8項目の分析結果が必要である  
... 6項目は特殊分析で実施した試験項目  
⇒ ISO8217の試験結果だけでは燃焼障害を予測することは  
困難であることが改めて確認された

# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 重回帰式に必要な試験項目と要因

項目	編回帰 係数	調合用基材 について	推測される要因
全芳香族分	正	CLO LCO	着火性が悪くなることから、従来から燃焼障害に寄与していると予想される。
2環芳香族分	正	LCO	芳香族分は着火性が劣る成分であり、燃焼障害油には多く含まれている可能性がある。
3環以上の 芳香族分	負	CLO	係数は負となったが、燃焼障害油T04の分析結果からCLOは基材のひとつと判定されていることと矛盾する。 燃焼障害油が1検体しか手に入らなかったこともあり、重回帰式がまだ完全なものではない可能性がある。
FCA(ABP)	正	重質成分 高芳香族 系基材	従来から燃焼障害を疑う油の指標の一つとされる。重質成分や多環芳香族成分が多いとABPの値が高くなる。

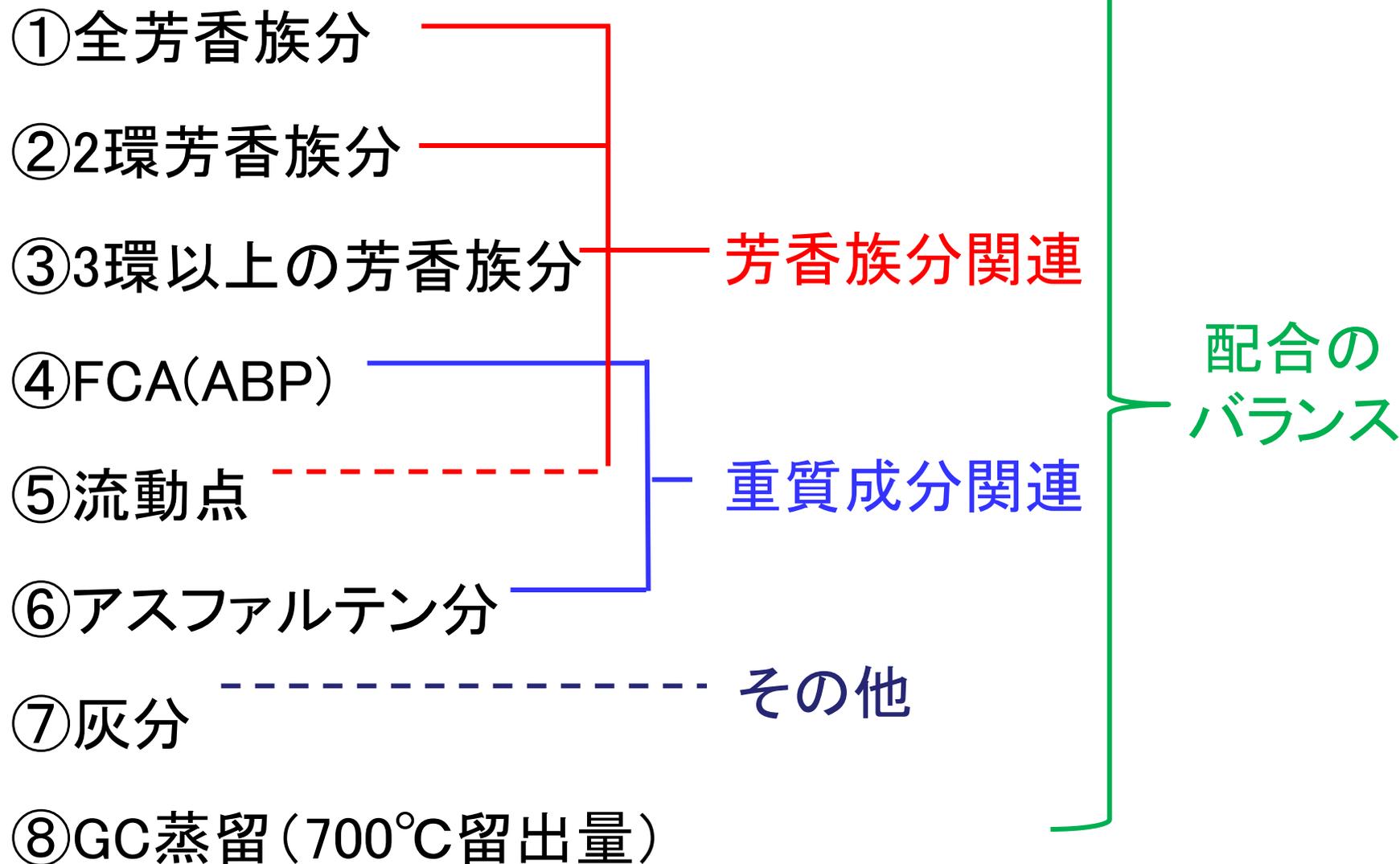
# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 重回帰式に必要な試験項目と要因

項目	重回帰係数	調合用基材について	推測される要因
流動点	負	配合のバランス	低流動点は、パラフィニックな基材が少ないことを意味していることから、芳香族分が多いことを示す。
アスファルテン分	正	高硫黄の減圧残油 常圧残油	最も重質な成分であり、炭素含有率が高いことから燃焼性は極めて低く、燃焼障害への寄与は大きい。
灰分	負	—	余程多く含まれていなければ、灰分と燃焼障害との因果関係は薄い。燃焼障害との関連が低い項目のため負の相関となったものと思われる。
GC蒸留 700°C留油量	正	配合のバランス	高沸成分の多寡あるいは重質度を示す指標である。

# 7. 難燃性船用燃料油の分析・解析手法

## 重回帰式に必要な試験項目と要因(まとめ)



## 8. 難燃性船用燃料油の運用指針

## 8. 難燃性船用燃料油の運用指針

“7.2 重回帰式による予測値と燃料油の評価”より、以下のような対策を取る必要がある。

重回帰式 (1) による予測値	使用時の対策
0.791 以下	対策の必要なし。
0.791～1.339	助燃剤を投入, 短い間隔での運転諸元の確認, 機関振動の計測。
1.339 以上	助燃剤を投入, 短い間隔での運転諸元の確認, 機関振動の計測, 100～150 時間での運転機切替, 運転諸元確認時の Pmax 計測。

## 8. 難燃性船用燃料油の運用指針

重回帰式(1)で燃焼障害油と予測された燃料油を使用した場合、以下のような対策を取る必要がある。

開放整備(シリンダヘッド, シリンダライナ, ピストン)間隔の短縮.  
: シリンダライナ, ピストンリング, 排気弁シート部の計測・点検.

→メーカー推奨時間(8,000~12,000時間)の1/4時間での実施.

燃料噴射弁の点検間隔の短縮.

: 噴射試験, 噴射弁ノズル部のカーボン除去.

→メーカー推奨時間(1,000~1,500)の1/10時間での実施.

過給機の開放整備間隔の短縮.

: ノズルリングの点検清掃.

## 9. まとめ

## 9. まとめ

- 本研究においては、世界各地域で供給されている燃料油のサンプル(補油サンプル、油社出荷タンクサンプル)を収集し、サプライチェーンの過程で何らかの汚染物質が混入する可能性を検証したが、LSFO,LSGO共に補油サンプルと油社出荷タンクサンプルは同等の性状であり、混入は認められなかった。
- 本研究においては、トラブル発生時のサンプルであるT04 を燃焼障害油と定義した。燃焼障害油T04は、ISO8217に規定された試験項目では識別は出来なかったが、特殊分析の実施及び統計解析の手法を導入することにより、非燃焼障害油と分離することが出来た。
- テストエンジンによる実機試験によりテストエンジン運転データと分析及び解析結果の整合性が確認された。これにより、低硫黄の難燃性船用燃料油の分析・解析手法が確立された。
- 確立された低硫黄の難燃性船用燃料油の分析・解析手法を基に、船用ディーゼル機関における運用指針を策定した。