

## 報 文 1

## 分解軽油 (LCO) の着火特性に関する考察

中央技術研究所 燃料研究所  
燃料技術グループ  
はせがわ たかゆき  
長谷川 貴将



国立研究開発法人海上・港湾・  
航空技術研究所 海上技術安全研究所  
環境・動力系  
たかぎ まさひで  
高木 正英



国立研究開発法人海上・港湾・  
航空技術研究所 海上技術安全研究所  
環境・動力系  
いまい やすお  
今井 康雄



国立研究開発法人海上・港湾・  
航空技術研究所 海上技術安全研究所  
環境・動力系  
かわうち さとし  
川内 智詞



国立研究開発法人海上・港湾・  
航空技術研究所 海上技術安全研究所  
環境・動力系  
はやし としあき  
林 利昭



## 1. はじめに

国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) は、2016年10月に開催されたMEPC 70 (Marine Environment Protection Committee) にて、2020年1月1日から一般海域で使用される燃料油中の硫黄分の上限値を、従来の3.5質量%から0.5質量%に下げることを取り決めた<sup>1)</sup>。現在の船用燃料油は硫黄分の高い残渣油に硫黄分の低い分解軽油 (LCO: Light Cycle Oil) を混合して製造しているが、今後は硫黄分規制の強化に対応するために、低硫黄基材であるLCOの混合量が増加する可能性がある。

現在の留出油系船用燃料油はISO8217:2012<sup>2)</sup>で規定されており、そのISO規格において着火指標はセタン指数 (Cetane Index; ISO4264<sup>3)</sup>に規定) によって35以上と決められている。そのほか、40℃における動粘度は2.0~11.0mm<sup>2</sup>/s、15℃における密度は900kg/m<sup>3</sup>以下と規定され、残渣油とLCOはその規定を満足するように混合されている。LCOは低硫黄ではあるが芳香族分が多く、着火性の低い燃料基材であり、運転条件によっては燃料の着

火性が機関トラブルの原因になる可能性が考えられる。そのため基材として混合されているLCO単体の着火特性を知ることは重要なことである。

そこで本検討では、LCOの着火特性を評価するために、9種類のLCOの着火特性に対して急速圧縮装置を用いた着火遅れを測定し、セタン指数との相関について検証した。

## 2. 供試燃料および実験条件

## 2.1 供試燃料

表1に本検討で使用した9種類のLCOの主な性状を示す。着火指標であるセタン指数は、ISO4264 (JIS K 2280-5<sup>4)</sup>)で規定されており、式1で求められる(以下、「新式」とする)。供試燃料の番号は新式で算出したセタン指数の順番に並べており、概ね20~35程度となっている。なお、セタン指数は1996年に改定されており、改定前のセタン指数はASTM D976-66 (JIS K 2204:1983<sup>5)</sup>)で定義されていた。その式を式2に示す(以下、「旧式」とする)。

表1 供試燃料

Fuel No.	セタン指数 (新式)	セタン指数 (旧式)	密度 (@15°C) g/cm <sup>3</sup>	動粘度 (@30°C) mm <sup>2</sup> /s	留出温度		
					T <sub>10</sub> °C	T <sub>50</sub> °C	T <sub>90</sub> °C
1	34.5	36.0	0.893	3.43	208.5	278.5	348.5
2	29.4	28.5	0.908	3.08	213.5	267.0	327.5
3	27.8	25.5	0.910	2.63	203.5	258.5	322.0
4	27.4	22.0	0.914	2.48	210.0	249.5	319.5
5	26.2	22.5	0.938	3.98	235.0	279.0	345.0
6	25.9	21.5	0.924	2.74	208.5	258.5	327.0
7	24.7	24.0	0.919	2.80	224.5	263.0	304.0
8	22.5	13.0	0.927	2.10	177.5	229.0	305.5
9	19.8	15.0	0.932	2.17	204.5	243.0	291.5

<セタン指数新式> (JIS K 2280-5<sup>4)</sup>)

$$CI\_New = 45.2 + 0.0892 (T_{10} - 215) + (0.131 + 0.901B) (T_{50} - 260) + (0.0523 - 0.420B) (T_{90} - 310) + 0.00049 ((T_{10} - 215)^2 - (T_{90} - 310)^2) + 107B + 60B^2$$

・・・式 1

但し  $B = \exp[-0.0035(1000D - 850)] - 1$

<セタン指数旧式> (JIS K 2204 : 1983<sup>5)</sup>)

$$CI\_Old = 0.49083 + 1.06577X - 0.0010552X^2$$

・・・式 2

但し  $X = 97.833 (\log A)^2 + 2.2088B_0 \log A + 0.01247B_0^2 - 423.51 \log A - 4.7808B_0 + 419.59$

$$A = (9/5) T_{50} + 32$$

ここで、

$T_{10}$  : 体積分率 10% 留出温度 °C

$T_{50}$  : 体積分率 50% 留出温度 °C

$T_{90}$  : 体積分率 90% 留出温度 °C

$B_0$  : API 度

$D$  : 15°Cにおける密度 g/cm<sup>3</sup>

これら2つの式を比較すると、セタン指数新式は燃料の  $T_{10}$ 、 $T_{50}$ 、 $T_{90}$  を使用することで蒸留性状全体を反映していることが分かる。なお本研究では、燃焼性とセタン指数の関係を評価する上で、9種類の燃料の他に、ノルマルセタン (セタン価 100) と 2,2,4,4,6,8,8-ヘプタメチルノナン (セタン価 15) を混合して調製した3種類のセタン価 (Cetane Number) の標準燃料 (CN20、CN27.5、CN35) を用いた。

## 2.2 実験条件

図1に本検討で用いた実験装置の概略図を示す。本検討では、1気筒1サイクルの燃焼を模擬できる、海上技術安全研究所所有の急速圧縮装置を使用した。ストロークは120mm、ピストン径は100mmである。図2にピストン形状を示す。通常の船舶エンジンではピストン径の中心から側面に向かって燃料が噴射されるが、本急速圧縮装置では、燃料が燃焼室側面から反対側面に向けて噴射されるため、実質200mmの実エンジンピストン径を想定した実験が可能である。また燃料噴射ノズルには、自動車用途で使用されるコモンレール用ソレノイドインジェクタを使用した。

急速圧縮装置前面は石英ガラス製の窓とし、ピストン冠面の燃料噴射領域は鏡面になっている。これにより反射式のシャドウグラフ撮影 (燃焼時の屈折率の変化を、明暗の差に変えて観測する) が可能となり、燃料噴射から着火・燃焼までの観察を行える。さらに着火遅れの計測および熱発生率の解析を行うために、ピエゾ式圧力センサを設けている。

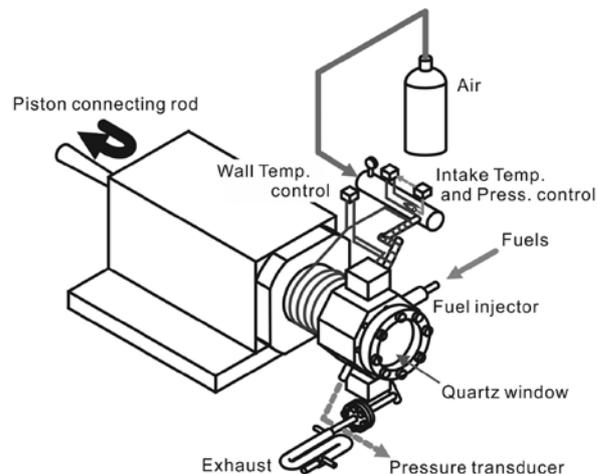


図1 実験装置の概略図

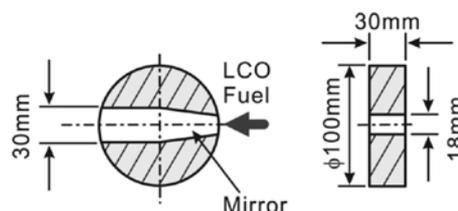


図2 ピストン形状

表2に実験条件を示す。筒内にはボンベから供給される圧縮空気を充てんし、すべての供試燃料に対して、2種類の筒内条件を設定して実験を行った。低温・低圧条件は、燃料油着火性試験装置 (FCA) の筒内条件 (775K、4.5MPa) を目指して、785K、4.3MPaとした。また、Sitkei<sup>6)</sup> によると 700 ~ 900K と 900K 以上では着火における反応過程が変化するため、高温・高圧条件は 910K、4.9MPaとした。燃料噴射圧力は 130MPa とし、燃料噴射期間はすべての LCO で着火が確認できた 7ms に設定した。インジェクタの噴孔は単孔とし、噴孔径は 0.2mm である。

また、燃焼性の評価指標としては着火遅れを確認した。着火遅れは燃料噴射開始を原点とし、圧力が燃料噴射による減圧から復帰した点までの時間を測定したものである。

表2 実験条件

		低温・低圧条件	高温・高圧条件
筒内圧力	MPa	4.3	4.9
筒内温度	K	785	910
燃料噴射圧力	MPa	130	
燃料噴射期間	ms	7	
噴孔径	mm	0.2 (単孔)	

## 3. 実験結果

### 3.1 LCO のセタン指数の評価

LCO のセタン指数の評価として、セタン指数新式、旧式に対する着火遅れについて調査した。図3に各実験条

件におけるセタン指数に対する着火遅れを示す。図にはセタン指数の基準として用いたセタン価標準燃料の着火遅れも記している。いずれの実験条件においてもセタン指数が28～35までは、セタン指数新式、旧式ともセタン価標準燃料の着火遅れに近い値を示した。しかし、セタン指数が28を下回ると、セタン指数新式の値で整理したLCOの着火遅れは、セタン価標準燃料の着火遅れと比較して大きくかい離した一方で、セタン指数旧式で整理したLCOの着火遅れは、セタン価標準燃料の着火遅れと概ね近い値となった。したがって、セタン指数新式の値は、セタン指数の適用推奨範囲(32.5～56.5)の下限を下回るLCOでは、本試験条件における着火特性を正しく評価できないことが示唆される。

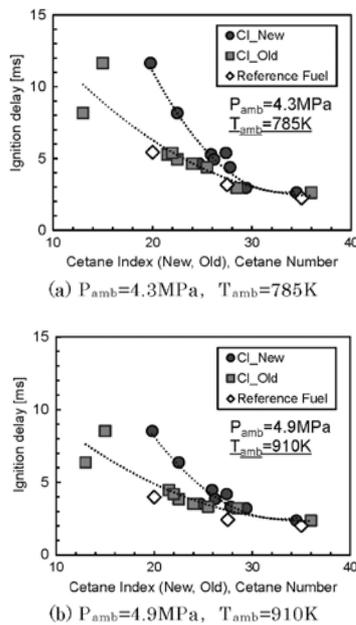


図3 セタン指数(新式、旧式)およびセタン価と着火遅れの関係

この要因を分析するために、セタン指数新式を基に、セタン指数旧式と一致するように係数  $A_1 \sim A_8$  を最小二乗法で決定し、式3を作成した。セタン指数新式と最小二乗法で決定した改良式の各係数の比較を表3に、各係数のセタン指数新式に対する改良式の変化率を図4に示す。

$$CI\_Imp = 45.2 + A_1(T_{10} - 215) + (A_2 + A_3B)(T_{50} - 260) + (A_4 - A_5B)(T_{90} - 310) + A_6((T_{10} - 215)^2 - (T_{90} - 310)^2) + A_7B + A_8B^2 \quad \dots \text{式3}$$

表3 セタン指数新式(式1)と改良式(式3)の各係数の比較

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
新式の各係数 $A_{i\_New}$	0.0892	0.131	0.901	0.0523	0.42	0.00049	107	60
改良式の各係数 $A_{i\_imp}$	0.02	0.493	1.2	-0.149	0.704	-0.000293	86.829	-72.312

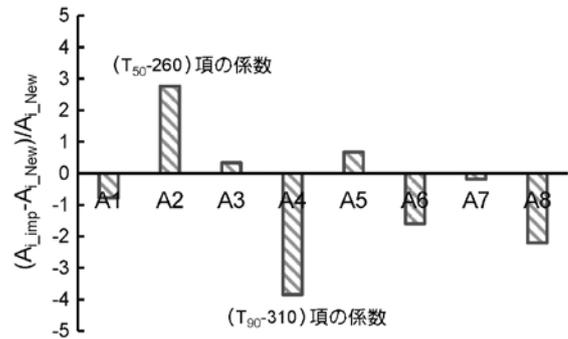


図4 各係数のセタン指数新式に対する改良式の変化率

新式に対する改良式の係数の変化率を見ると、 $A_2$  ( $T_{50}$  が関係) ではプラス側に、 $A_4$  ( $T_{90}$  が関係) ではマイナス側に変化率が大きく、これが新式では着火特性を評価できていない要因と考えられる。すなわち新式においては、おもに  $T_{50}$ 、 $T_{90}$  に関する係数の重みを変更することで、より実際の着火性能を表現できる可能性が示唆される。

本報では次節から、低着火性燃料に合わせて係数の補正を行ったセタン指数改良式(式3)を用いてセタン指数を表記する。

### 3.2 低着火性燃料の着火・燃焼特性

図5に各供試燃料の熱発生率を筒内条件別に示す。いずれの筒内条件においても、セタン指数の低下に伴って着火遅れが増加する傾向が確認された。また、すべての供試燃料において、低温・低圧条件とすることで着火遅れが長くなった。この温度、圧力条件の違いによる着火遅れの変化は、セタン指数が小さい供試燃料で顕著となっていた。

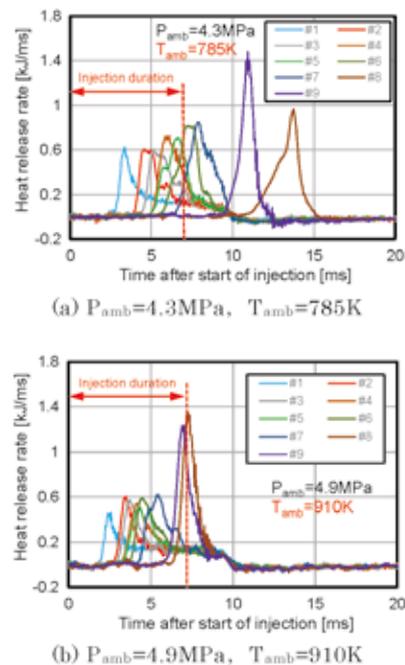


図5 筒内条件別における各供試燃料の熱発生率

次に空間的な着火・燃焼状態を比較 (観察) するために、供試燃料 1、3、6 を用いてシャドウグラフ撮影を行った。時系列結果を図 6 に示す。すべての燃料で、燃料噴霧が発達する過程で着火条件に至った点から着火 (濃い黒い影が発生) し、その後、輝炎が発生して燃焼する現象が確認された。セタン指数の高い供試燃料 1 は、燃焼室のほぼ中心で着火したが、セタン指数が低い供試燃料 3 では着火遅れが長いために、着火位置はインジェクタに対し対向壁面側にシフトし、供試燃料 6 においてはさらに対向壁面に近い位置で着火した。

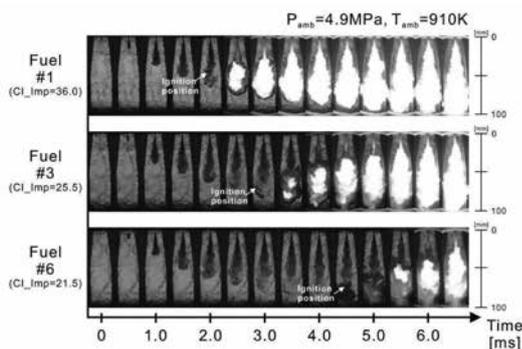
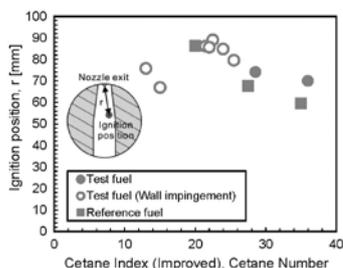
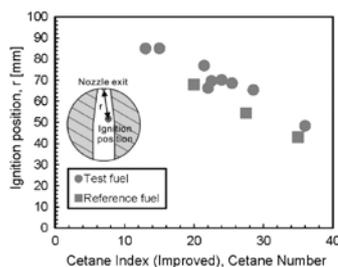


図 6 供試燃料 1, 3, 6 におけるシャドウグラフ撮影の時系列結果

そこでセタン指数に対し、各供試燃料におけるインジェクタ噴孔から着火位置までの距離を、実験条件別にプロットしたものを図 7 に示す。筒内温度が高い条件ではセタン指数の増加に伴い着火位置までの距離が短くなった。セタン指数の低い燃料では、筒内温度が低くなると着火遅れが長くなるために噴霧先端が対向壁面に衝突してから着火した。壁面衝突噴霧になると、壁面衝突後の燃料噴霧は巻き上がり、複雑な混合気分布が形成されることになるため、セタン指数と着火位置までの距離との関係に明確な規則性は認められない。



(a)  $P_{amb}=4.3MPa, T_{amb}=785K$



(b)  $P_{amb}=4.9MPa, T_{amb}=910K$

図 7 各供試燃料におけるインジェクタ噴孔から着火位置までの距離

#### 4. まとめ

現行セタン指数 19.8 ~ 34.5 の 9 種類の LCO について着火特性を検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) LCO における着火特性をセタン指数新式と旧式で整理した結果、セタン指数旧式のほうが着火特性を良く表していた。これは新セタン指数算出式で考慮されている T50 に関する係数が過小評価され、T90 に関する係数が過大評価されていた可能性が示唆される。
- (2) セタン指数の低下に伴って着火遅れが増加する傾向が確認された。
- (3) セタン指数が着火遅れに与える影響は、低温・低圧の方が大きくなる傾向が確認された。

本報は、第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会にて発表した内容<sup>7)</sup>に、加筆・修正したものである。

#### — 参考文献 —

- 1) <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MEPC/Pages/MEPC-70th-session.aspx>
- 2) ISO 8217: 2012 Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels, International Standard Organization (2012)
- 3) ISO 4264: 2007 Petroleum products – Calculation of cetane index of middle-distillate fuels by the four-variable equation, International Standard Organization (2007)
- 4) JIS 2280 - 5, 石油製品 - オクタン価, セタン化及びセタン指数の求め方 - 第 5 部: セタン指数, 日本工業規格 (2013)
- 5) JIS K 2204: 1983 軽油, 日本工業規格 (1983)
- 6) G. Sitkei (坪内為雄訳); ディーゼル機関の燃料噴射と燃焼, 朝倉書店 (昭和 41 年) 136-137
- 7) 今井康雄他; 低セタン指数燃料の着火特性と評価手法の検証, 第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.127-128 (2015)