

## PS-11 液体代替燃料評価に向けた現状と課題

環境・動力系 \* 高木 正英

### 1. はじめに

船舶からの温室効果ガス (GHG) 削減は急務の課題であり、代替燃料の使用なしに対応できない状況にある。現在、次世代の船用燃料と考えられている水素とアンモニアは、常温常圧では気体であり、低エネルギー密度でもあることから、船内に加圧した大容量燃料タンクが必要になる。一方、2050年に向けたカーボンニュートラル社会への過渡的な対応としては、様々な方法で作製される GHG 削減対応液体代替燃料を既存燃料と混合して使用することも手段の一つになる。混合利用の想定から、この液体代替燃料をドロップイン燃料と称する。気体燃料と比べた時の液体燃料の持つ利点は二つある。一つは高エネルギー密度による航行持続距離の維持、もう一つは既存インフラによる適用の容易性、高ハンドリング性である。しかし、想定される燃料が含酸素燃料であることから排気、とりわけススの排出抑制に寄与できる一方、作製燃料ごとの着火性能が幅広いことと発熱量で既存の船用燃料の約半分であることなどが大きな欠点となる。なお、水素、アンモニアの気体燃料の発熱量は 35MPa に加圧した場合でも液体燃料より小さく、船用燃料の 1/10, 1/3 になる。ここでは重点研究「GHG 削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」の小項目「次世代燃料使用における安全・環境評価技術」の内容について、これまでの液体燃料の着火性に関する研究および、候補に挙がっているドロップイン燃料の紹介と、今後の実施内容について報告する。

### 2. これまでの液体燃料の研究内容

#### 2.1 規格における着火性指標

ディーゼルエンジンに用いる液体燃料の着火性は、セタン価が基準であり、この定義や試験方法は ISO5165 にある。船用燃料の規格である ISO8217 では、A 重油相当、C 重油相当に対して、それぞれ異なる着火性指標を記載している。A 重油ではセタン指数、C 重油では CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) が着火性指標に当たるが、両者とも燃料物性からその燃料の着火性を推定、算出している。セタン指数はセタン価と相関のある指標として、約 1500 種類の燃料の結果から Ingham ら<sup>1)</sup>によって求められた。セタン指数は以下の式で計算される。

$$CI = 45.2 + 0.0892(T_{10} - 215) + (0.131 + 0.901B)(T_{50} - 260) + (0.0523 - 0.42B)(T_{90} - 310) + 0.00049\{(T_{10} - 215)^2 - (T_{90} - 310)^2\} + 107B + 60B^2 \quad (2.1)$$

$$B = \exp\{-0.0035(D - 850)\} - 1 \quad (2.2)$$

$T_{10}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{90}$  は燃料の 10, 50, 90 容量%留出温度[°C],  $D$  は燃料密度[kg/m<sup>3</sup>]である。なお、ISO 4264:2018 ではセタン価が 32.5~56.5 で 4 つの変数が推奨範囲にある時、65%の燃料でセタン価とセタン指数が、±2%未満で一致したとしている。

もう一つの着火性指標である CCAI は Zeelenberg<sup>2)</sup>によって提案され、その論文では、燃料の動粘度  $\nu_L$  [mm<sup>2</sup>/s]と密度  $\rho_L$  [kg/m<sup>3</sup>]から求められる CCAI と着火性の相関が求められている。CCAI は以下の式で計算される。

$$CCAI = \rho_L - 81 - 141 \log_{10} [\log_{10} (\nu_L + 0.85)] - 483 \log_{10} \frac{T + 273}{323} \quad (2.3)$$

$T$  は動粘度計測時の燃料温度 [°C]である。CCAI は、物理的には燃料の芳香族性と着火性を結び付け、実用的には燃料の着火性を計測項目に制約のある重油で計測可能な密度と動粘度から求められる簡易な予測、推定ツールである。

#### 2.2 これまでの実施内容

2020年の船用燃料の硫黄分規制に対して、船用燃料の作製方法が変更されることを考え、燃料成分に着目した A, C 重油ごとの研究を実施してきた。A 重油に関しては、比較的低硫黄で、一二環芳香族を含む低着火性基材（原油の蒸留、分解等を経て得られた炭化水素混合物）である分解軽油 (LCO) の A 重油への混合比率の増加を考慮し、着火性との関係と改善方法を検討した<sup>3)</sup>。図-1 は急速圧縮装置にて行った、LCO 混合の有無による燃料噴射から着火が開始するまでの時間  $\tau_{ign}$  とセタン指数の関係を示している。また、この時間の短縮方法として、主たる燃料噴射の前に少量の燃料を噴射する pilot 噴射による効果も併せて示している。これらの結

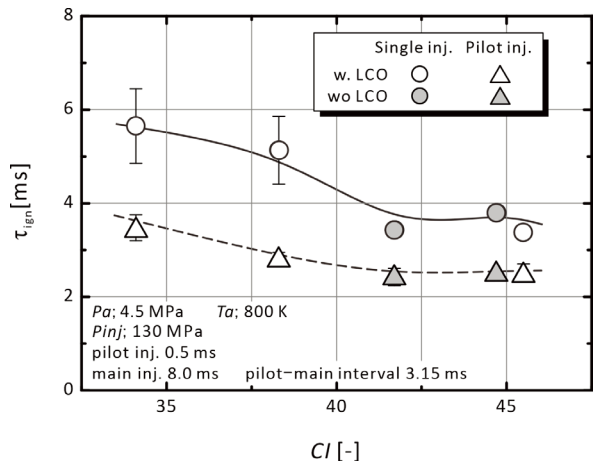


図-1 A 重油相当燃料の LCO 混合の有無による着火性への影響

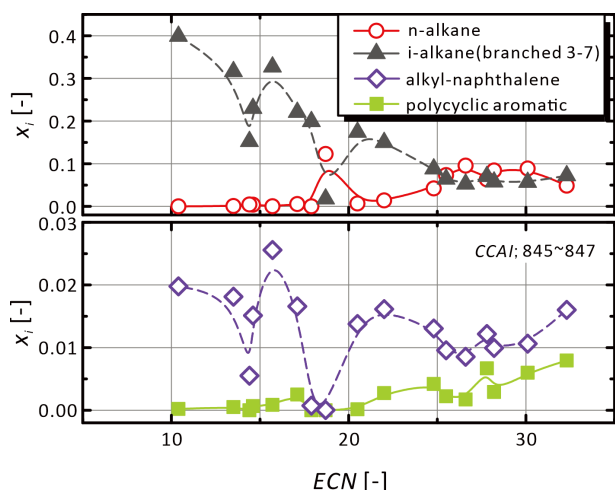


図-2 C重油相当燃料の同一 CCAI 下での各炭化水素量の推定

果から、LCO 混合は、セタン指数による着火性評価に影響を及ぼさず、*pliot* 噴射による効果も LCO 混合の有無に関わらず同等に得られることが明らかになった。C 重油に関しては、89 種類の炭化水素の混合物に置き換えた上で、各成分の推定方法を構築し、それぞれのモル分率  $x_i$  を最大エントロピ原理によって推定した。図-2 に CCAI が 845~847 で実測された着火性 (ECN: 推定セタン価と呼ぶ) が異なる 17 燃料の分子構造ごとのモル分率を示す<sup>4)</sup>。同一 CCAI でも燃料の成分構成が異なり、本対象燃料では ECN が高くなると、*n*-アルカン、多環芳香族は増加、分枝数 3-7 の *i*-アルカンは減少傾向になり、アルキルナフタレンは傾向が見られなかった。

### 3. 重点計画の概要

これまで、A, C 重油を対象に研究を実施してきたが、この重点研究小項目の中の一つでは、液体代替燃料 (ドロップイン燃料) と既存燃料の混合を検討する。新たに想定されるドロップイン燃料と既存燃料に含まれる炭化水素を分子構造ごとに分けて、ドロップイン燃料と炭化水素の混合比と着火性の効果を調べることを目的とする。現状想定しているドロップイン燃料は、アルコール (メタノール, エタノール), バイオ系燃料 (オレイン酸メチル, パルミチン酸メチル), OME (オキシメチレンエーテル) である。表-1 にこれらドロップイン燃料と水素, アンモニアのセタン価  $CN$ , 低位発熱量  $H_l$  を示す。ドロップイン燃料は含酸素燃料になっており、軽油に比べて発熱量はバイオ燃料で 8 割, アルコール, OME で 5 割になる。ドロップイン燃料は、どれも発熱量が小さく、同一エンジンで同出力を得るためには噴射期間が長期化することになる。また、セタン価は軽油と比べてアルコールは小さく、その他は大きくなる。つまり、全てのドロップイン燃料に対応しようとすると、着火性の幅はこれまで以上に大きくなる。

アルコール燃料として選定したメタノールとエタノールは製造方法が異なり、メタノールは化学合成によって、エタノールはバイオマスから生成される。バイオ燃料としては、

表-1 代替燃料の着火性と発熱量 (参考文献<sup>5),6)</sup> などから)

| Compound |                            | Formula                                        | CN [-]         | $H_l$ [MJ/L] |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------|----------------|--------------|
| Liquid   | Methanol                   | CH <sub>3</sub> OH                             | 2              | 16.8         |
|          | Ethanol                    | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH               | 2              | 21.9         |
|          | methyl oleate              | C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> | 56             | 32.7         |
|          | methyl palmitate           | C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> | 74.3           | 29.5         |
|          | OME3 (tetraoxanonane)      | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>  | 78             | 19.5         |
|          | OME6 (heptaoxapentadecane) | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O <sub>7</sub>  | 104            | 19.8         |
|          | diesel fuel                | -                                              | >45            | 36.7         |
|          | Gas                        | hydrogen (35MPa)                               | H <sub>2</sub> | -            |
| Gas      | ammonia (35MPa)            | NH <sub>3</sub>                                | -              | 11.8         |

飽和, 不飽和炭化水素を選定した。OME は沸点, 融点を考えて、OME2~6 (オキシメチレン基 CH<sub>2</sub>-O の数が 2~6) を選定した。OME2 の沸点は 105 °C, OME6 の融点は 48 °C である。なお、再生可能エネルギーから作られた水素と回収された二酸化炭素を反応、合成させた燃料は *e-fuel* と呼ばれ、化学合成による需要対応性の高さが利点となる。

混合する既存燃料の炭化水素としては、直鎖, 一環, 二環芳香族などを想定する。これらとドロップイン燃料を混合し、着火性試験装置 (FCA) によって着火性や燃焼状態に関するデータを取得する。その上で、混合比と着火性の関係、およびアルコール燃料のような低着火性燃料に対する着火性能向上に資する炭化水素の組み合わせの探索、セタン指数や CCAI のような簡易的な着火性評価手法の検討を行う。

### 4. まとめ

本稿では着火性指標、これまでの研究内容並びに、今後重点研究で実施していく液体代替燃料と炭化水素の混合によるカーボンニュートラル社会への漸近的措置を想定した、燃料と着火性の評価手法について紹介した。今後、新たな代替燃料候補が挙げられた際には、そちらも検討対象にしていく予定である。本報告の一部は、JSPS 科研費 18K04588 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) M.C. Ingham, et. al. : Improved Predictive Equations for Cetane Number, SAE paper No. 860250(1986), pp. 1-14.
- 2) A. P. Zeelenberg, et. al. : The ignition performance of fuel oils in marine diesel engines, CIMAC 1983 Paris, D13.2, pp. 1455-1469.
- 3) 高木他 5 名 : 分解軽油の船用燃料への混合がディーゼル噴霧の着火・燃焼特性に及ぼす影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.55, No.4(2020), pp.513-521.
- 4) 高木, 川内 : 船用燃料の着火性評価のための燃料成分推定-推定手法の構築と多成分燃料 (残渣油) への適用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.58, No.1(2023), pp.117-124.
- 5) J. Yanowitz, et. al. : Compendium of Experimental Cetane Numbers, NREL Technical Report, NREL/TP -5400-67585.
- 6) NIST Chemistry WebBook, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>