

バンカー重油の着火性評価

中央技術研究所 燃料研究所 燃料油・バイオ燃料グループ みつい ゆうた
三ツ井 裕太



1. はじめに

日本国内の石油製品の需要は、図1に示すように2000年代前半をピークに減少に転じている¹⁾。特に船舶用燃料、ボイラー用燃料などの産業用に使用されるC重油の減少が大きい。重油需要の減少に比べて、ガソリンや軽油等の白油需要の減少は小さく、需要構造が大きく変化しており、その対応として原油の精製過程で連産品として得られる重質留分を分解装置で軽質留分へ転換し対応してきた。その役割を果たしている主な装置が流動接触分解装置(FCC: Fluid Catalytic Cracking)で、ガソリン留分と同時にLCO(Light Cycle Oil)やCLO(Clarified Oil)といった分解系基材が得られる。LCO、CLOは、主に重油用基材として利用されているが、芳香族量が多いため混合比率が高くなると着火性の悪化が懸念される。

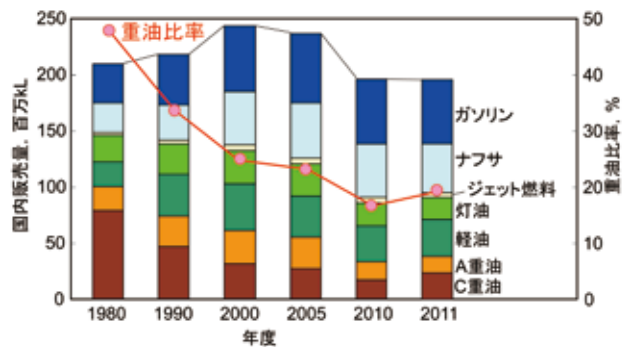


図1 石油製品の国内販売量推移

また、2009年7月には「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」(「エネルギー供給構造高度化法」)が成立し、日本全体の重質油分解装置の装備率を10%から2013年度に13%程度に引き上げることを目標とする基準が示された²⁾。このように石油製品の需要構造の変化と石油精製設備の高度化が進めば、C重油中の分解系基材の割合がさらに高くなる可能性がある。

C重油の中でも、特に内燃機関である船舶用エンジンに使用されるバンカー重油は、分解系基材の割合が着火性の変化に与える影響が大きい。これは、ボイラー等の

燃焼形態が連続燃焼であるのに対して、エンジンの燃焼形態が間欠的で、燃焼のために時間的制約があるためである。このことから、分解系基材の比率増加等のバンカー重油の製造方法の変化が着火性に与える影響を把握し、管理することは、船舶の安全・安定航行のために非常に重要である。本稿では当研究所で実施しているバンカー重油の着火性評価結果と、その品質を確保するための検討結果を報告する。

2. バンカー重油の製造方法概要

代表的なバンカー重油の製造フローを図2に示す。バンカー重油には、メイン基材として減圧蒸留装置のボトムである減圧残油(Vacuum Residue: VR)を6~7割程度使用する。重油の需要が多かった時代は、常圧残油を直接バンカー重油の基材として使用していた。しかし、現在常圧残油は脱硫装置を経てFCC装置等の2次装置で処理され、需要比率の高いガソリン、軽油等の軽質留分を生産するための原料となっている。減圧残油は、常温では流動性がほとんどないため、ハンドリング性向上のため、装置出口で未脱硫軽油、減圧軽油、LCO等の低粘度基材をカッター材として混合し、動粘度を下げている。その後、バンカー重油のグレードに合わせ、ガソリンや灯油の製造に使用されない各種製品調合基材により動粘度を調整する。

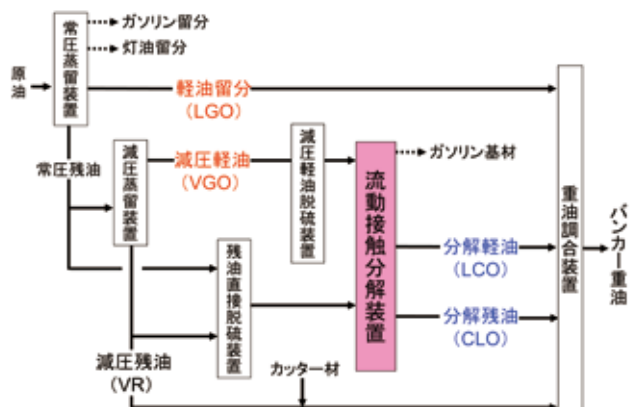


図2 代表的なバンカー重油の製造フロー

3. バンカー重油の着火性

バンカー重油の着火性についてディーゼルエンジンの燃焼過程から説明する。エンジンのシリンダ内に導入された空気は、ピストンで圧縮され高温、高圧状態になる。そこにノズルから燃料が噴射される。噴射された燃料は、すぐには燃焼せずに軽質留分から蒸発しながら周囲の空気と混合された後着火に至る。燃料の噴射開始から着火するまで期間を着火遅れと呼び着火性の指標として用いられている。着火遅れが長くなると、急激にシリンダ内の圧力が上昇し、異常燃焼(ディーゼルノック)を引き起こす。この状態が続くと、ピストン破損等の重大なトラブルにつながる可能性がある。各ロットのバンカー重油の着火遅れを補油する前に把握することが望ましいが、船用エンジンで都度測定することは困難である。そこで、バンカー重油の着火性を表す指標として、CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) が使われてきた。CCAIは1983年にZeelenbergら³⁾が発表した指標で、バンカー重油の芳香族性を表し、式1に示すように密度と動粘度より算出される。CCAIは、図3に示すように実機エンジンの着火遅れとの高い相関性が確認されている。

(式1) $CCAI = d - 140.7 \log \log (\nu + 0.85) - 80.6$
 d : 15°Cにおける密度 (kg/m³)
 ν : 50°Cにおける動粘度 (mm²/s)

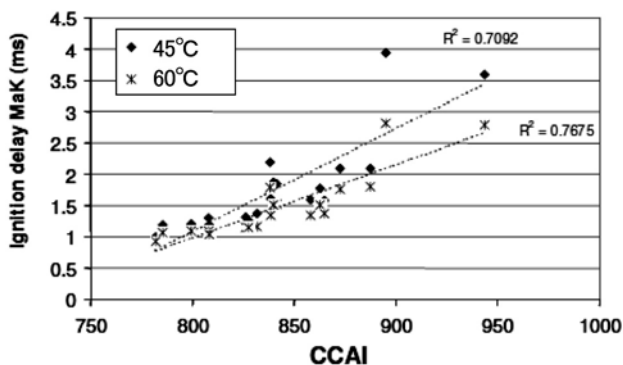


図3 CCAIと実機エンジンの着火遅れの関係 (吸気温度2条件で実施)

密度、動粘度は、製造管理に使用され、使用者に渡される性状表にも記載される項目である。このことから、CCAIは簡易的に着火性を推定する指標として広く利用されている。図4に示すように、CCAIは密度が高いほど、また動粘度が低いほど大きくなる。芳香族量が多い燃料は、高密度、低粘度になるためCCAIが大きくなる傾向にある。CCAIは、船用燃料規格ISO8217の2010年版からバンカー重油の規格として新たに規定され、最も需要の多いRMGグレードで870以下とされている。しかし、この規格値では動粘度が極端に低いサンプル以外はほぼ

すべて満たしてしまうため、実質的にはほとんど着火性の制限がない状態である。

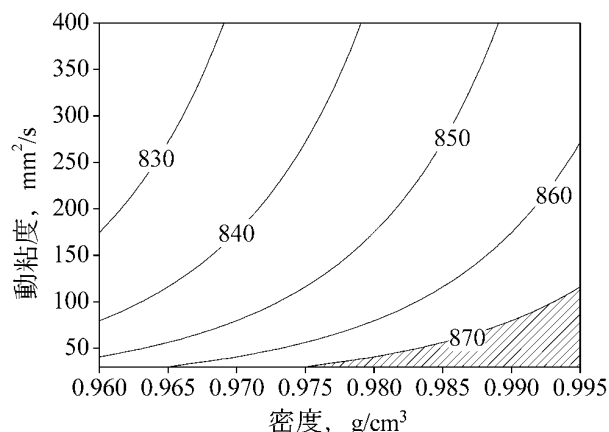


図4 密度、動粘度とCCAIの関係 (図中等高線がCCAI)

4. 試製燃料の評価

4.1 実験装置

バンカー重油の着火遅れの評価は、FIA (Fuel Ignition Analyzer) と呼ばれる簡易評価装置を用いた。FIAは、定容燃焼容器内の高温・高圧雰囲気中に、試験燃料を1回噴射し、燃焼時の容器内の圧力の経時変化から着火遅れ、燃焼時間、熱発生率等を測定する装置である。噴射時の条件は、温度450°C、圧力4.5MPaに設定した。容器内の圧力が初期圧力から0.02MPa上昇するまでの時間を着火遅れと定義し、燃料の着火性を評価した。

4.2 評価燃料

表1に示す5種類の燃料基材を用いて、試験に使用するバンカー重油を試製した。VRは、バンカー重油のメイン基材として用いられる。LGO (Light Gas Oil) は、常圧蒸留装置から得られる軽油留分である。VGO (Vacuum Gas Oil) は、減圧蒸留装置から得られる減圧軽油である。LCOおよびCLOは、VGOや残油を原料とするFCC装置から得られる軽質留分および重質留分である。以降、LGOとVGOを直留系基材、LCOとCLOを分解系基材と称する。

CLOは、VRと比較して低硫黄で残留炭素分が少ないという特徴があるが、芳香族量が多く、高密度、低動粘度なためCCAIが大きい基材である。また、CLOにはFCC装置で使用される硬質な触媒が混入しているため、エンジンのピストンリングやシリンダライナ等に異常摩耗が発生する懸念がある。今回の検討では、着火性に焦点を絞るため、CLO中の触媒はあらかじめ除去し、触媒の主成分であるSi + Alを低い値に抑えた(RMGグレードの規格Si+Al ≤ 60massppm)。LCOは、同等の蒸留性状であるLGOと比較すると低動粘度、低硫黄で、VRのカッ

ター材として適しているが、CLOと同様に芳香族量が多いため CCAI が大きい基材である。VGO は、CCAI が小さく着火性の良い基材であるが、現在は直接バンカー重油に混合されず、分解装置の原料油として利用されている。

試製したバンカー重油の配合基材の概略を図 5 に示す。VR に対して直留系基材、分解系基材の混合割合を調整し、動粘度 $380\text{mm}^2/\text{s}$ のバンカー重油を計 21 サンプル試製した。性状の範囲は、CCAI: 824 ~ 884、密度 (15°C): 0.963 ~ 1.024、その他の性状はバンカー重油の規格 (RMG) 内とした。図 5 中の「直留系のみ」と記載したサンプルは、VR 以外の基材は LGO、VGO である。「分解系のみ」と記載したサンプルは VR 以外の基材は LCO、CLO である。「直留 + 分解」は上記の混合系である。例えば、図中の○で囲ったサンプルの混合割合は、VR: 57%、分解系: 24% (LCO: 14%、CLO: 10%)、直留系: 19% (LGO: 19%) である。

表 1 使用基材性状

	VR	直留系基材		分解系基材	
		LGO	VGO	LCO	CLO
密度 (15°C), g/cm^3	1.04	0.85	0.93	0.93	1.07
動粘度 (50°C), mm^2/s	680000	3.6	37.9	2.1	166
蒸留 (終点), $^\circ\text{C}$	—	365	590	357	595
硫黄分, mass%	4.9	1.1	2.7	0.18	0.67
残留炭素分, mass%	24.6	0.0	1.0	0.0	6.2
芳香族分, mass%	51	27	27	75	53
CCAI	847	804	817	910	941
Si + Al, massppm	<1	<1	<1	<1	15

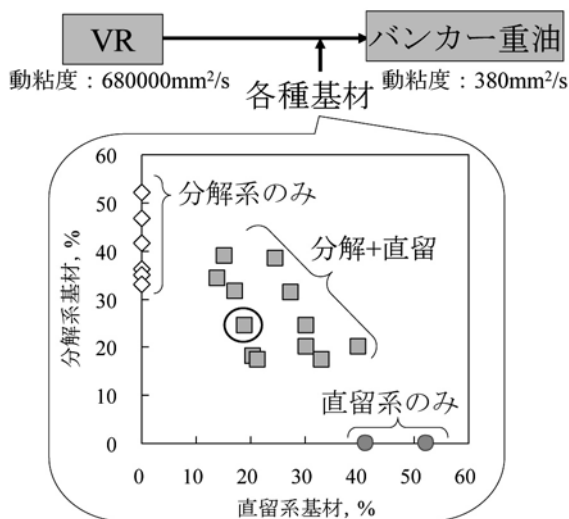


図 5 試製燃料の配合基材概略

4. 3 FIA 評価結果

図 6 に試製燃料の CCAI と FIA で測定した着火遅れの関係を示す。CCAI が大きいほど着火遅れが長くなるという傾向はあるものの、相関は高くない ($R^2=0.69$)。CCAI が 855 付近でほぼ同じ値のサンプル同士を比較すると、着火遅れで 6ms の差があった。CCAI のみでバンカー重油の着火性を評価することは難しいとの報告がある⁴⁾が、本検討においても同様な傾向であった。また、分解系みのサンプルと直留系のみ、分解系 + 直留系で CCAI と着火遅れの関係が異なり 2 種類のグループに分けられ、分解系みのサンプルは同一 CCAI でも着火遅れが長くなる傾向にあることが分かった。

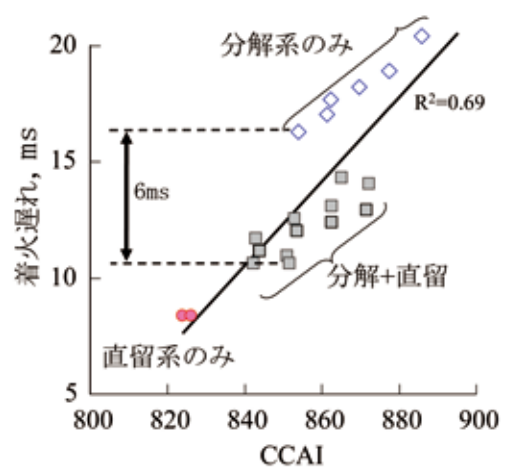


図 6 試製燃料の FIA 評価結果

5. 新たな指標検討

前述したように分解系基材みのサンプルは CCAI では着火遅れの予測が不十分であった。これは、CCAI がバンカー重油全体の芳香族量のみを表した指標であることが一因と考えられる。そこで CCAI で表わされる芳香族量に、芳香族の分布 (言い換えれば蒸留性状) を組み合わせることで、CCAI の補正が可能か検討を行った。評価装置として TG-DTA (Thermogravimetry Differential Thermal Analysis; 示差熱重量測定装置) を用いた。TG-DTA は、熱分析の分野で広く利用されている簡易評価装置である。

バンカー重油の燃焼性を評価する目的で、試料 10mg を空気雰囲気下、昇温速度 $100^\circ\text{C}/\text{分}$ の燃焼条件で測定した。その結果、図 7 に示すような温度に対する重量減少を表す TG 曲線と熱量変化を表す DTA 曲線が得られた。 300°C 付近の DTA 曲線の立ち上がりの温度を着火開始温度、 700°C 以降の立ち下りの温度を燃え切り温度と定義し、燃焼性を判定する項目の一つとして用いた。図 8 に示すように、TG-DTA で測定した着火開始温度と FIA で測定した着火遅れの相関は比較的高い⁵⁾。しかし、着火開始温度や着火遅れは、着火性自体を把握することは可能

であるが、燃料製造時の使用基材に関する情報を得ることはできない。

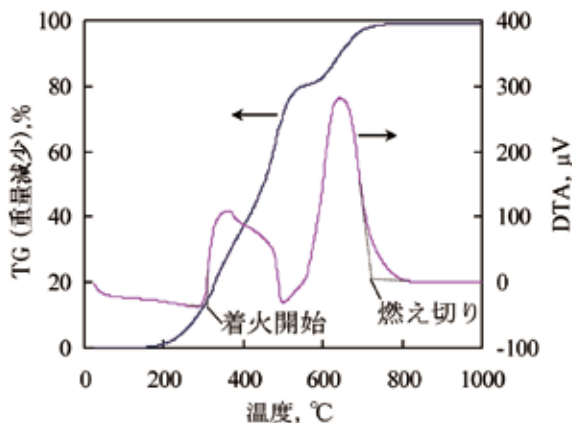


図7 TG-DTAの燃焼結果例

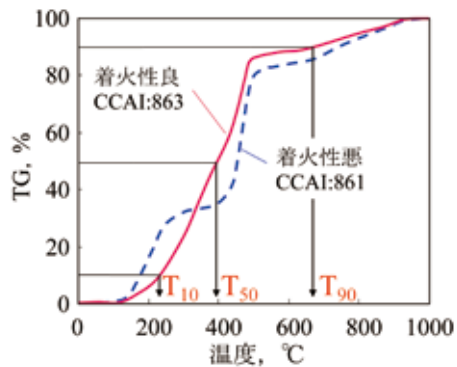


図9 TG-DTAの非燃焼結果

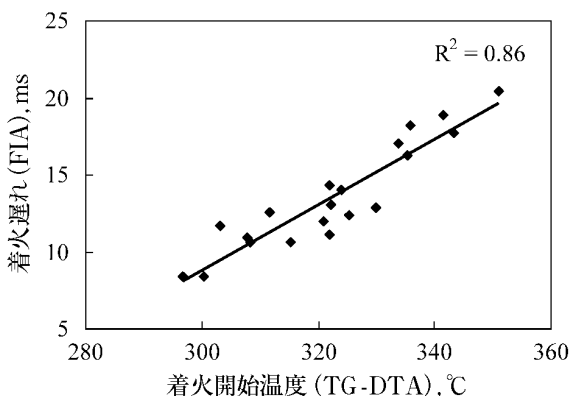


図8 TG-DTAとFIAの相関

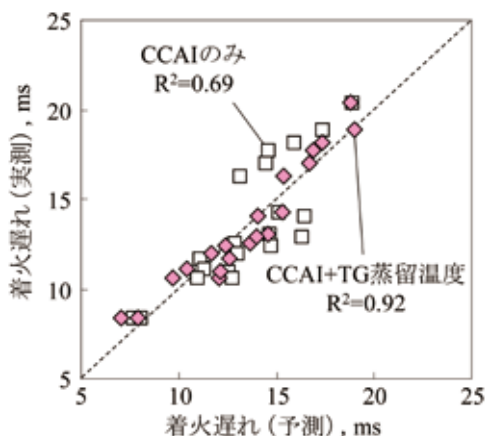


図10 着火遅れの予測値と実測値の関係

そこで、TG-DTAの非燃焼条件での検討を行った。TG-DTAを窒素雰囲気下、昇温速度20°C/分の条件で測定した場合、非燃焼状態での温度に対する重量減少、すなわち蒸留性状に相当する結果が得られる。図9に測定結果の一例を示す。ほぼ同一のCCAIで着火性の異なるサンプルを比較すると、重量減少の傾向が異なることが分かる。この特徴を表す値として10%重量減少温度をT10、50%重量減少温度をT50、90%重量減少温度をT90とし、TG蒸留温度を定義した。着火性が悪い燃料は、T10とT90の温度差が大きく、蒸留性状がいびつな形状(階段状)になるという特徴がある。これらの特徴を含んだ新たな指標を構築するため、CCAIに加えて、TG蒸留温度(T10、T50、T90)を説明変数に用い、FIAで測定される着火遅れを目的変数として重回帰分析を行った。得られた着火遅れの予測値と実測値の関係を図10に示す。CCAIのみから着火遅れを予測した場合にはR2 = 0.69であるのに対して、CCAI+TG蒸留温度の場合にはR2=0.92と高精度に実測値を予測することが可能であることが分かった。

6. 最後に

本稿では、バンカー重油の着火性評価結果と新たな指標の検討結果について報告した。バンカー重油は、ガソリンや軽油等の軽質留分を原油から精製する過程で得られる副産物を主な基材として製造される。このためバンカー重油の品質は、それ以外の石油製品の需要構成や製油所の装置構成に大きな影響を受ける。さらに2020年または25年からは、一般海域で船用燃料の硫黄分規制(3.5mass% → 0.5mass%)が導入される予定であり、今後もバンカー重油の品質は変化する可能性がある。実船でのトラブル防止と船用燃料の安定供給を両立させるため、今後も検討を続ける。

— 引用文献 —

- 1) 経済産業省 資源・エネルギー統計
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁 Press Release「エネルギー供給構造高度化法について」、2010年11月
- 3) A.P.Zeelenberg, et al., CIMAC, D13.2, 1455-1469 (1983)
- 4) 日本海事協会、船用燃料重油の低質化対策指針 Version2, 37-43 (2008)
- 5) 三ツ井他4名、マリンエンジニアリング学術講演会、82回講演論文集、155-156 (2012)