5. 舶用燃料重油の燃焼性の簡易評価方法に関する研究

舶用燃料重油の燃焼性の簡易評価方法に関する研究

1. はじめに

舶用燃料油の性状は舶用主機の信頼性に大きな影響を及ぼす。世界的な環境問題の高まりの中，舶用重油についてはMARPOL ANNEX VI の排ガス規制強化により SOx 排出規制海域において低硫黄燃料油を使用することが義務づけられている。低硫黄燃料油は，脱硫過程を経た触媒精製により製造される。この場合，舶用燃料油の性状は，従来の高密度，高粘度，高硫黄から高密度，低粘度，低硫黄に変化するとともに，性状変化により船舶の主機には燃焼不良に起因する障害が発生する可能性がある。

本研究は，NK 共同研究の一つとして，舶用燃料重油の燃焼性を簡易的に評価できる装置及び手法を検討したものである。まだ製品化には至っていないが，プロトタイプ装置について実施した試験の結果を紹介し，舶用燃料油の燃焼性判定を実用的な精度で判定できる見通しがついたことを報告する。

2. 研究開発の背景及び目的

舶用燃料油においては，低硫黄燃料油の使用等の影響で，燃焼性が劣る燃料が船舶に供給される可能性がある。燃料油のバンカリング時，燃料油供給者は燃料油供給証明書（Bunker delivery note）を発行する。同証明書には ISO 8217:2010[1] に定める密度，動粘度，引火点，流動点，残留炭素等の項目に関する試験結果が記載されている。ただし，これらの試験項目だけで燃料の燃焼性を判断することは一般に困難である。

表１に燃料油の燃焼性分析手法を示す。同表の燃焼性指標/試験装置の中で，CCAI は 2010 年に発行された ISO 8217 で導入された着火性指標である。今後，燃料油供給証明書にも記載されるようになると考えられるが，燃焼性に起因する最近の機関損傷の実情に合っておらず，参考程度とする見方が一般的である。

表１　燃料油の燃焼性指標/試験装置

燃焼性指標/試験装置	概要
① CCAI （Calculated Carbon Aromaticity Index）	ISO 8217:2010 で定義される（密度と動粘度から算出される）着火性指標。燃焼性の指標としては，精度が比較的悪いと考えられる。
② 定容積型燃焼試験装置（FIA: Fuel Ignition Analyzer）	英国規格 IP541/06 に基づく試験方法。燃焼試験により高精度の燃焼性指標である推定セタン価（ECN : Estimated Cetane Number）を求めることができる。
③ 示差熱分析	炉内に試料と（熱的に変化しない）基準物質とを入れ，炉を加熱し昇温させて温度差を調査する方法。温度差曲線から燃焼性の傾向を見出すことは可能であるが，明確な燃焼性指標が確立していない[2]。

現在のところ，舶用燃料重油の燃焼性を高精度で推定できるのは，定容積型の燃焼試験装置を用いて実際に燃料油を燃焼させてみる方法である。ガソリンや灯油等の燃料の場合は，標準試験エンジンで測定されるセタン価という指標が用いられるが，高粘度の舶用重油の場合は標準試験エンジンを使用することができない。そこで考え出されたのが定容積型の燃焼試験装置である。当該装置を用いて燃焼性指標である推定セタン価（ECN: Estimated Cetane Number）を測定することが可能である。ただし，このような試験装置はそれほど普及しておらず，装置を所有している試験機関も少ない。また，試験費用も一般に高価である。

本研究では，船上で容易に短時間で実施できる燃料油分析装置/燃焼性判定技術の開発を目的としている。このような技術が確立すれば，船上で積込み燃料油の燃焼性を迅速に判断できるようになる。分析の結果，燃焼性不良と判定された場合であっても当該燃料油のデバンカーは困難であるが，適切な対策[2)]を講じて機関を運転することは可能であり，結果として燃焼性に起因するトラブルを未然に防止することができると考えられる。

3. 燃料油簡易分析装置の概要

燃料油簡易分析装置の構造と外観をそれぞれ図 1 及び図 2 に示す。

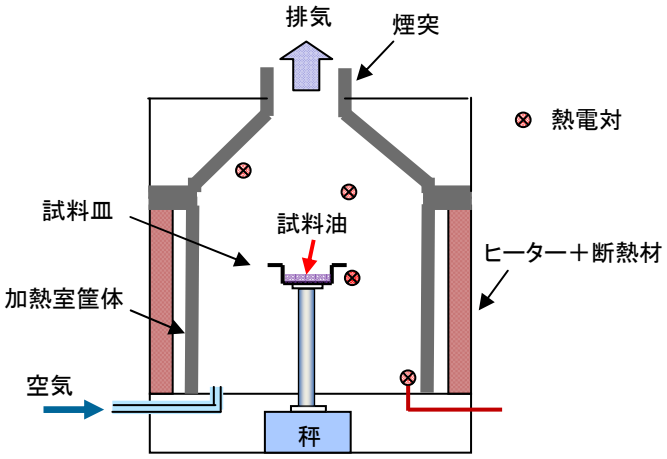


図 1　燃料油簡易分析装置の構造

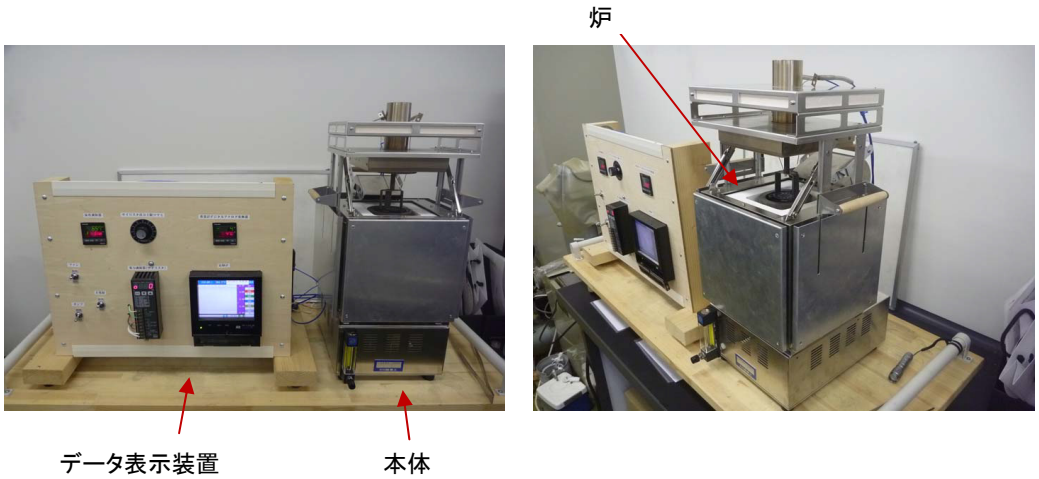


図 2　燃料油簡易分析装置の外観

本装置は，燃料油の試料を加熱し，加熱で得られる燃料油の蒸発（又は燃焼）の特性から試料油の燃焼性を分析するものである。試験の手順としては，はじめに試料油 200mg を計量して試料皿にとり，試料皿を分析装置の炉内にセットする。炉の加熱器のスイッチを入れると，炉の温度は常温から 800℃まで上昇し続ける。昇温速度は最大で約 20℃/分である。試料油は温度の上昇に従って蒸発し，その過程の試料油重量と試料皿周辺の温度がメモリカードに記録される。試料油の燃焼性は，この重量データと温度データから判断される。

温度上昇に伴う試料油重量変化の一般的傾向を図 3 に示す。試料油重量は 300℃前後から減少し始め，発火（燃焼）が生じない場合は 400℃～600℃の範囲で急勾配となる。すなわち，この温度範囲では試料油は盛んに蒸発する傾向を示す。試料油が発火する場合は通常 500℃前後で発火する。発火現象は試料皿上部の温度で用意に識別できる。また，発火が生じた場合は試料油重量が急激に減少するので，このことからも発火現象を識別できる。

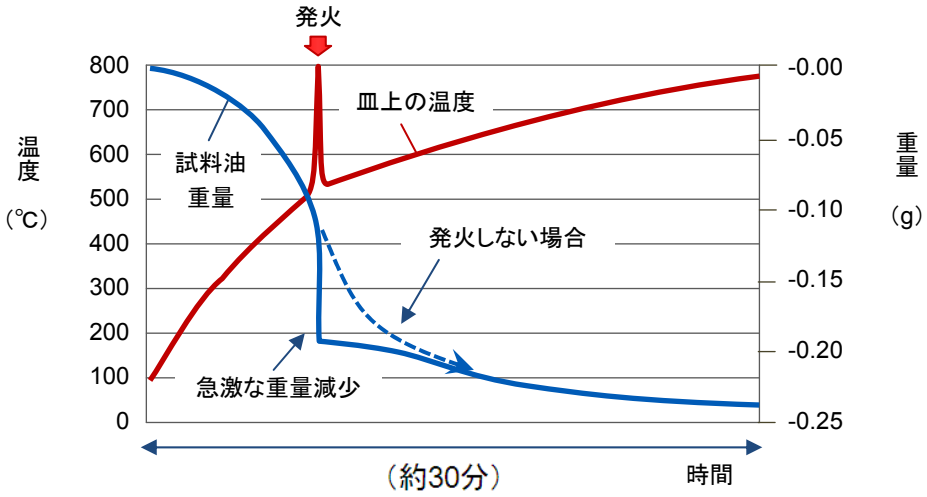


図 3　温度上昇に伴う試料油重量の変化

4.　試験方法

前 2 で示したように，舶用燃料重油の燃焼性は ECN で表されることから，本研究では，各種の燃料油の ECN を試験で求め，試作した燃料油簡易分析装置の試験結果との相関を調査することとした。一般に，ECN の値が低いほどその燃料油の難燃性の度合いが高くなり，ECN が 20 以下の燃料油を使用した場合は燃焼不良が生じる可能性があると言われている [2)]。従って，ECN の値がわかっている燃料油を試料として燃料油簡易分析装置で温度上昇に伴う蒸発カーブを測定し，蒸発カーブから燃焼性に関係すると考えられる部分をパラメータ化し，回帰分析により ECN 推定式を導くこととした。

燃料油簡易分析装置からの出力データの分析については，発火温度と蒸発特性に基づく方法とした（詳細については 6 の「燃焼性評価方法の検討」を参照）。

試料燃料油としては，A 重油と C 重油を対象とし，C 重油については 3 種類の動粘度（180cSt，380cSt 及び 500cSt）ごとに試験を行った。試料燃料油のリストを表 2 に示す。

表 2　試料燃料油

燃料油の種類（動粘度）	サンプル数	ECN
A 重油	3	35.9 ～ 46.9
C 重油（180cSt）	9	14.0 ～ 37.4
C 重油（380cSt）	8	14.7 ～ 21.7
C 重油（500cSt）	6	8.1 ～ 21.0

表 2 で，動粘度 180cSt の C 重油は主に内航船の主機用として使用されている。380cSt の C 重油は外航船の主機用として一般に使用されており，外航海の中で大型コンテナ船のような大型高出力の主機には 500cSt のＣ重油が使用されている。

5.　試験結果

温度 vs.試料油重量のグラフを図 4 に示す。燃焼性については，ECN の値が低いほど（燃焼性が悪いほど）赤側のラインとして示した。以下，測定結果に見られる特徴を示す。

- 温度上昇に伴う試料油重量の変化は，A 重油と C 重油とで明らかに特性が異なり，A 重油では 400℃に至るまでに試料油の全てが蒸発している。A 重油の場合，測定した ECN の値も全般的に高い値を示していることから，蒸発カーブからの ECN 推定は C 重油に限定することとした。
- C 重油の場合は，燃焼性の良い燃料であるほど 400℃付近から急勾配で重量が減少し始め，そのまま減少し続けるか，あるいは 480℃～520℃の温度範囲で発火が生じている。発火が生じた場合，発熱の影響により重量は急激に減少している。
- 180cSt と 380cSt の C 重油の場合，特に燃焼性が悪い試料油（180-9 及び 380-8）は，300℃程度のかなり早い段階から目立った蒸発が生じ，蒸発カーブの勾配が緩い状態で発火となる。逆に，燃焼性の良い試料油の蒸発カーブは，それまで緩やかだったものが，400℃付近から急に勾配が大きくなり，発火となっている。
- 500cSt の C 重油の場合は，燃焼性が悪い試料油（500-6）は全般的に蒸発カーブの勾配が緩く，約 510℃で発火している。燃焼性の良い燃料（500-1，500-2）は 400℃付近から急勾配となり，発火は生じていない。

6.　燃焼性評価方法の検討

以下，燃料油の燃焼性を評価する方法について検討した結果を示す。

6.1　発火温度による ECN 推定

図 4 より，一般に ECN 測定値が低い値であるほど，すなわち難燃性の高い燃料油であるほど発火温度が高くなる傾向が見られる。ただし，図 4 には示していないが，同じ燃料油であっても，低温域（500℃以下）で発火する場合と，高温域（500℃以上）で発火する場合があることが観測されたので，このようなケースの取り扱いについて次に示す。

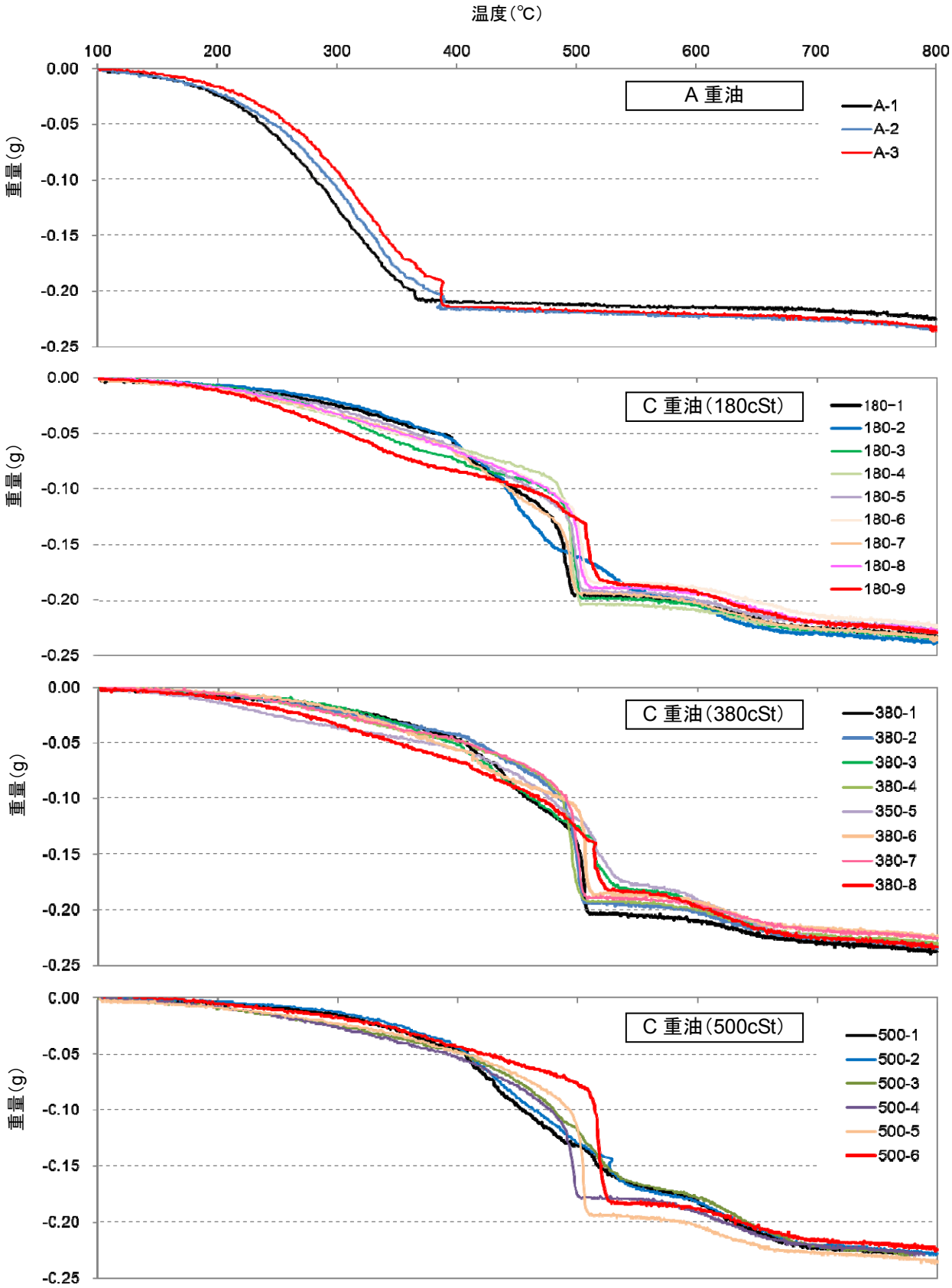


図 4　温度 vs. 試料油重量カーブ

図 5 は，C 重油の試料油 180-1 で計測された 2 つの発火点の概略を示したものである。当該試料油においては，同じ燃料油ではあるが低温域で発火する場合と高温域で発火する場合とがあることがわかった。

2 ケースの発火のうち高温域で発火する原因は，次のように考えられる。すなわち，高温域での発火は，何らかの原因で蒸発ガスが低温（479.1℃）かつ高濃度という条件で発火せず，そのまま蒸発し続け，その後，ガス濃度は低くなったが，より高温（520.1℃）となって発火条件を満たすようになったため発火したものと考えられる。

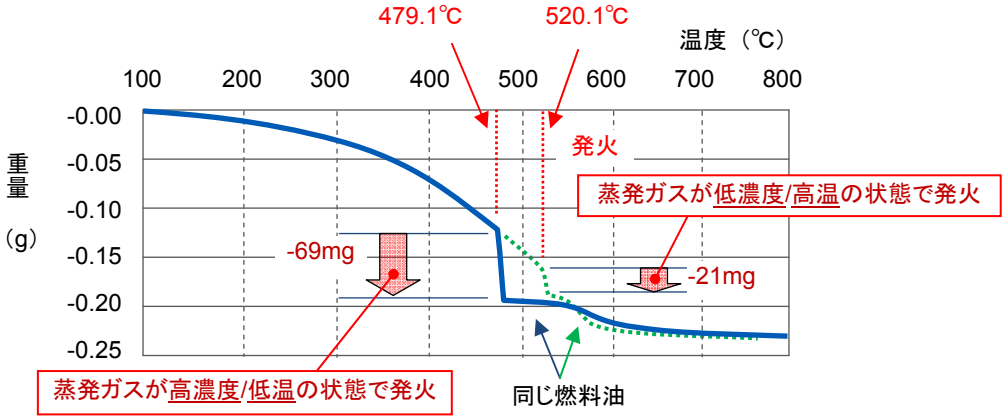


図 5　異なる温度での発火の例（試料油 180-1）

発火温度を燃焼性のパラメータとする場合，上記のような現象が起こると，1 つの試料油に対して 2 つの発火温度が存在することになるので，取り扱いが困難である。そこで本研究では，図 5 の事例を基に，次式で発火温度を補正することにした。すなわち，

> 発火温度 T（℃）が 510℃以上で，かつ，発火による重量変化 W（mg）が 50mg 以下の場合，発火温度を次式で補正する。
>
> $$T' = T - 1.8\,(50 - W) \quad (℃)$$

上記の式で，50mg という値や 1.8 という係数は，試料油 180-1 のデータを基に，高温域での発火温度が低温域での発火温度に近くなるように調整したものである。発火温度が 510℃を超える場合であっても，発火による重量変化が 50mg を超える場合は，難燃性の燃料油であるものとみなし，補正は行わない。

発火が生じた試料油について，（補正後の）発火温度と ECN との関係を図 6 に示す。同図より，発火温度と ECN との間にはばらつきはあるものの，ある程度の相関が見られることがわかる（相関係数 R=0.78）。

図 6 のデータを動粘度ごとに整理した結果を図 7 に示す。図 7 より，発火温度と ECN との関係は動粘度により傾向が異なり，データ数は少ないが特に 500cSt の燃料油においては強い相関が得られる可能性があることがわかる。動粘度ごとに近似式を求めて ECN を推定した場合，相関係数は R=0.88 であった。

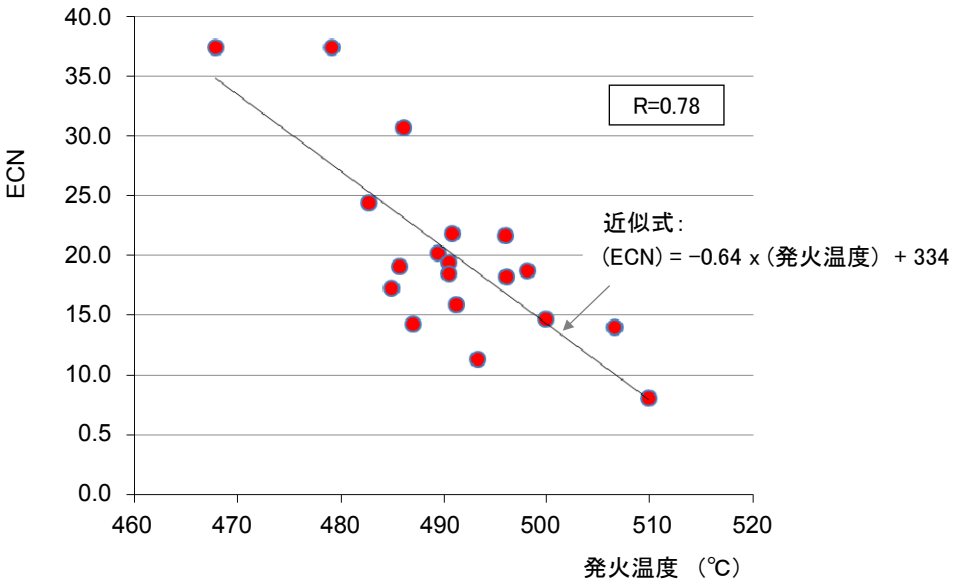


図 6　発火温度と ECN との関係（C 重油）

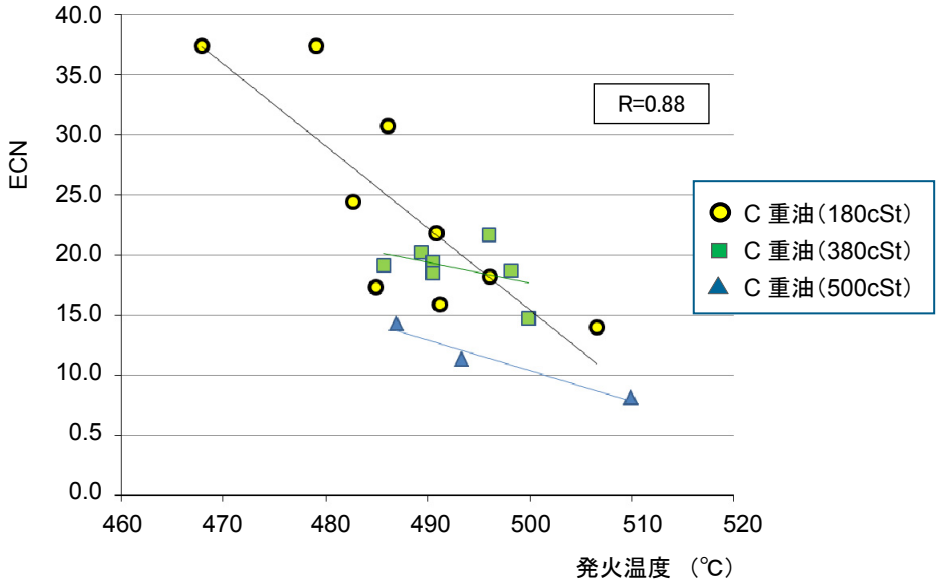


図 7　発火温度と ECN との関係（C 重油，動粘度ごと）

なお，以上は試料油が試験中に発火した場合に，その発火温度から試料油の ECN を推定する方法を示したものであるが，当然のことながら，この方法は発火した燃料油にしか適用できない。発火しなかった場合は，次の蒸発特性を用いた方法で ECN を推定することになる。

6.2　蒸発特性による ECN 推定

燃料油の燃焼性は，その燃料油に固有の蒸発特性から求めることができると考えられるが，本分析装置を用いた試験では試料油が発火する場合もあれば，発火しない場合もある。ただし，図 8 に示すように，

W1 = 300℃~450℃の温度範囲における試料油の重量減少（g）
W2 = 450℃~600℃の温度範囲における試料油の重量減少（g）
とすれば，600℃以降の発火後の重量カーブは蒸発のみのときのカーブに近いので，発火の影響を極力おさえることができる。

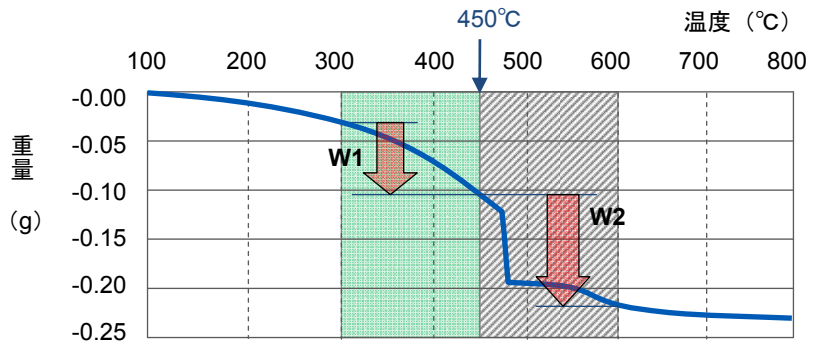


図 8　蒸発量 W1，W2 の定義

W1 は，燃料がエンジン内で主燃焼となる前の蒸発量を示すものである。呼び水的な効果により，この数値が高いほど一般に燃焼性が良いと考えられる。W2 はエンジン内での主燃焼による燃料の減少に対応する。本来はこれよりも温度範囲を狭めたいところであるが，本装置の場合は起こりうる発火の影響を考慮し 450℃～600℃の範囲とした。

データ解析は動粘度ごとに行い，W1 及び W2 を説明変数（独立変数），ECN を目的変数（従属変数）として重回帰分析を行った。重回帰分析による ECN の推定式を表 3 に示す。また，W1 及び W2 と ECN との関係を，それぞれ図 9 及び図 10 に示す。

表 3　ECN 推定式

動粘度（cSt）	ECN 推定式	相関係数 R
180	ECN(推定値) = – 63.9 + 578.3 x W1 + 489.0 x W2	0.79
380	ECN(推定値) = – 5.57 + 118.9 x W1 + 152.1 x W2	0.72
500	ECN(推定値) =　33.0 +　66.2 x W1 – 197.4 x W2	0.96

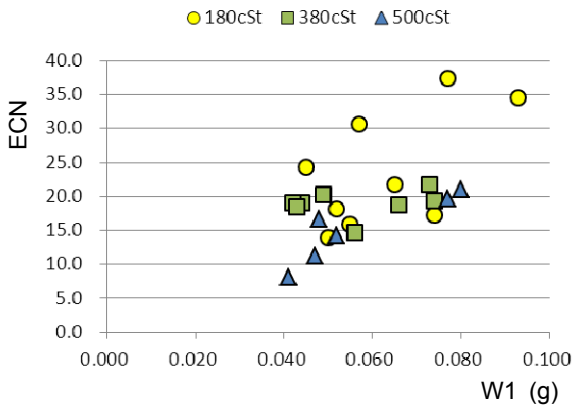


図 9　W1 と ECN との関係

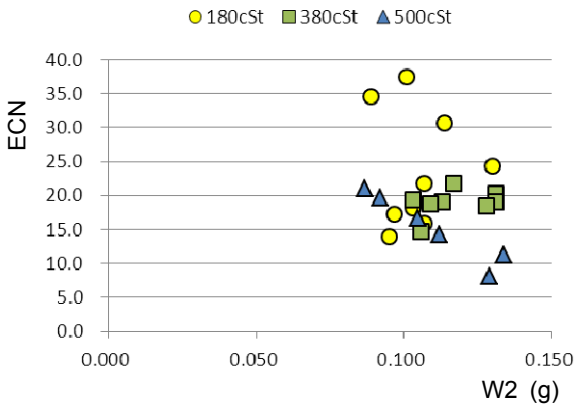


図 10　W2 と ECN との関係

表 3，図 9 及び図 10 より，W1 と ECN とは明らかに正の相関があり，主燃焼となる前の蒸発量が多いほど燃焼性が良好であることがわかる。W2 については，500cSt の燃料油の場合は ECN との間に負の相関が見られるが，180cSt 及び 380cSt の燃料油の場合は，ばらつきが大きく明確でない。このデータのばらつきは，W2 の温度範囲を大きくとったことが原因と考えられる。

ECN 測定値と表 3 の式で計算した ECN 推定値との相関を図 11 に示す。図 11 によれば，380cSt 及び 500cSt の燃料油の場合は推定精度が比較的よく，180cSt の燃料油の場合は特に ECN=15.0～30.0 の範囲で大きなばらつきが見られる。相関係数は R=0.87 であった。

蒸発特性に基づいて ECN を推定する方法については，全般的には比較的良好な精度で ECN を推定できるが，特に 180cSt の燃料油の場合に大きな誤差を生じる可能性があることから，簡易分析装置の空気流量，昇温速度，排気口径など，または，解析手法についても改善の余地は十分あると考えられる。

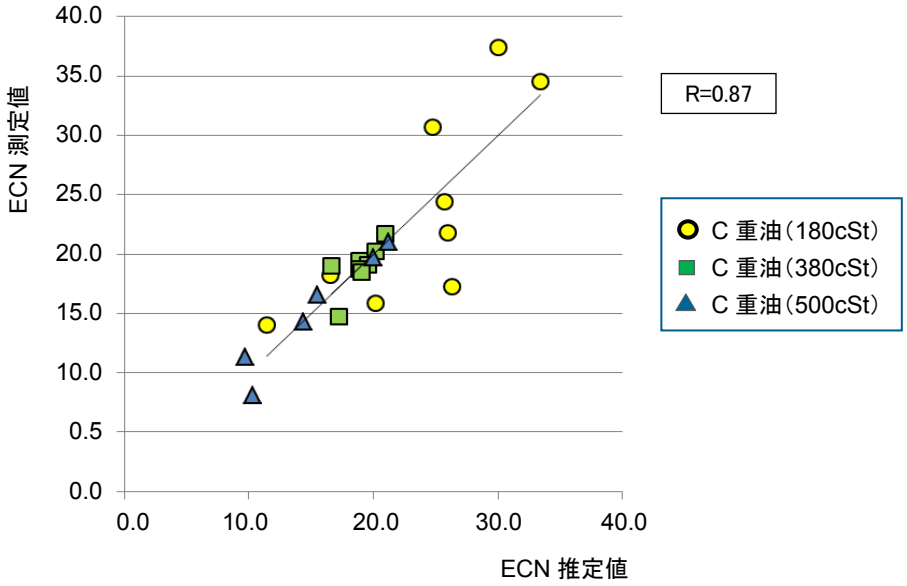


図 11　蒸発特性による動粘度ごとの ECN 推定

7.　まとめ

本研究では，試作した燃料油簡易分析装置を使用し，燃焼性が予めわかっている 26 種類の試料燃料油の試験を行った。その結果，次の知見を得た。

- 燃料油簡易分析装置の開発
  本装置にて，加熱温度に対する燃料油重量変化のカーブを取得でき，得られた重量変化カーブをその燃料油の特性カーブとして使用できる。すなわち，特定の温度範囲において燃料油が蒸発又は燃焼する状況を，燃料油特性データとして記録/蓄積できる。
- 分析手法/燃焼性推定方法の検討
  本装置による試験で得られる燃料油の発火温度や特定温度範囲における燃料油重量変化から，燃料油の ECN に相当する値を導出することができる。ECN 値の推定精度に

ついては，現在行っている簡便な分析手法においても概略値を推定できることから，今後，装置や分析手法を改良することで高精度の推定値を得ることができるという見通しがついた。

今後の課題を次に示す。

- 燃料油簡易分析装置及びソフトウェアの改良
  燃料油重量の測定精度向上，装置の一体化，ソフトウェアの改良を図る。また，製品化に向けて装置の小型・軽量化や操作性についても考慮する。
- 燃焼性判定技術の精度向上
  さらに多様な燃料油のサンプルを入手し，試験を実施することで，多数の燃料油特性データを蓄積し，ECN 推定の精度向上を図る。

参考文献

1) ISO 8217: “Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels”, 2010
2) 一般財団法人 日本海事協会 :「舶用燃料重油の低質化対策指針 Version II – 難燃性燃料油対策 –」

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

2013 ClassNK 春季技術セミナー

舶用燃料重油の燃焼性の簡易評価方法に関する研究

1

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

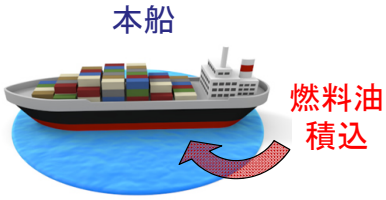
2

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

研究開発の背景及び目的

【背景】

- 舶用燃料油においては、低硫黄燃料油の使用等の影響で、燃焼性が劣る燃料油が供給される可能性あり。
- バンカリング時、燃料油供給者は燃料油供給証明書（Bunker delivery note）を発行するが、同証明書に記載されている試験項目で燃料の燃焼性を判断することは一般に困難。



密度
動粘度
引火点
…

燃料油供給証明書

3

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

研究開発の背景及び目的

【背景】

燃料油の燃焼性指標又は分析方法：

- **CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index)**
  ISO8217:2010で定義される着火性指標値（密度と動粘度から算出）
  ☛ 燃焼性の指標としては、精度が比較的悪い。
- **燃焼試験装置FIA（Fuel Ignition Analyzer）による方法**
  英国規格IP541/06に基づく方法。推定セタン価（ECN: Estimated Cetane Number）が得られる。
  ☛ 高精度な方法。試験機関が行う。
- **示差熱分析（DTA）による方法**
  炉内に試料と（熱的に変化しない）基準物質とを入れ、炉を加熱し昇温させて温度差を見る。
  ☛ 判断指標が確立していない。試験機関が行う。

4

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

研究開発の背景及び目的

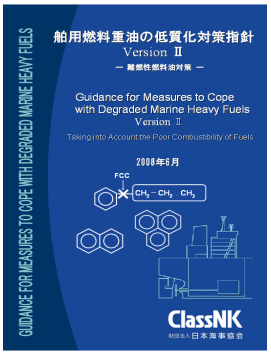
【背景】

- 燃焼性を判定するには、燃焼試験装置FIAで推定セタン価（ECN: Estimated Cetane Number）を測定する方法が最も高精度であるが、特殊な試験装置であるため普及していない。また、試験費用も一般に高価。

☛ **船上での分析が理想的**

※ 分析の結果、燃焼性が不良と判定された場合

- 燃料のデバンカーは困難であるが、適切な対策を講じて機関を運転することは可能。
- 対策についてはNK発行の「舶用燃料重油の低質化対策指針 VERSION II」を参照。



5

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

研究開発の背景及び目的

【NK共同研究】

「舶用燃料油初期判定用簡易分析装置及びそれによる判定技術の研究開発」

目的	船上で容易に短時間で実施できる燃料油分析装置/燃焼性判定技術の開発
実施者	● 川重マリンエンジニアリング株式会社 ● 一般財団法人 日本海事協会
研究期間	2011年1月1日～2012年9月30日

効果

- □ 積込み燃料油の燃焼性の迅速な判断
- □ （結果として）燃焼性に起因するトラブル減少

6

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

7

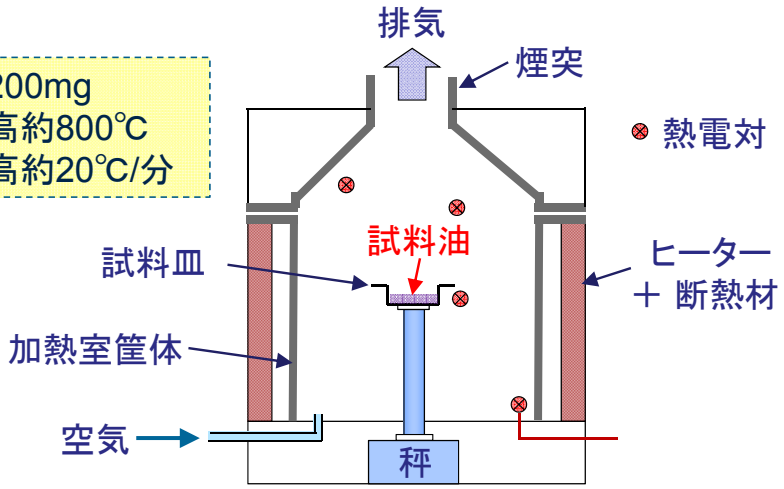
ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

燃料油簡易分析装置の概要

【プロトタイプ構造の概略】

一定量の燃料油を炉内で温度を上昇させながら蒸発/燃焼させ、常温から800℃付近までの加熱温度と重量減少量との関係を計測できる小型電気炉

試料重量：約200mg
加熱温度：最高約800℃
昇温速度：最高約20℃/分



8

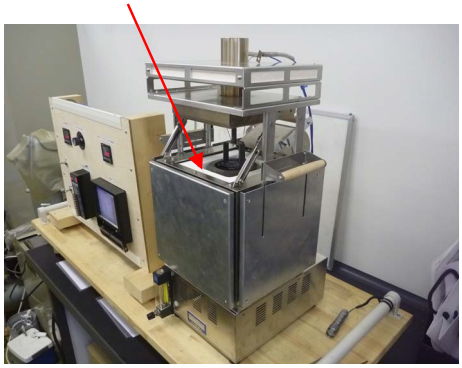
ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

燃料油簡易分析装置の概要

【プロトタイプ外観】

データ表示装置　　本体

炉

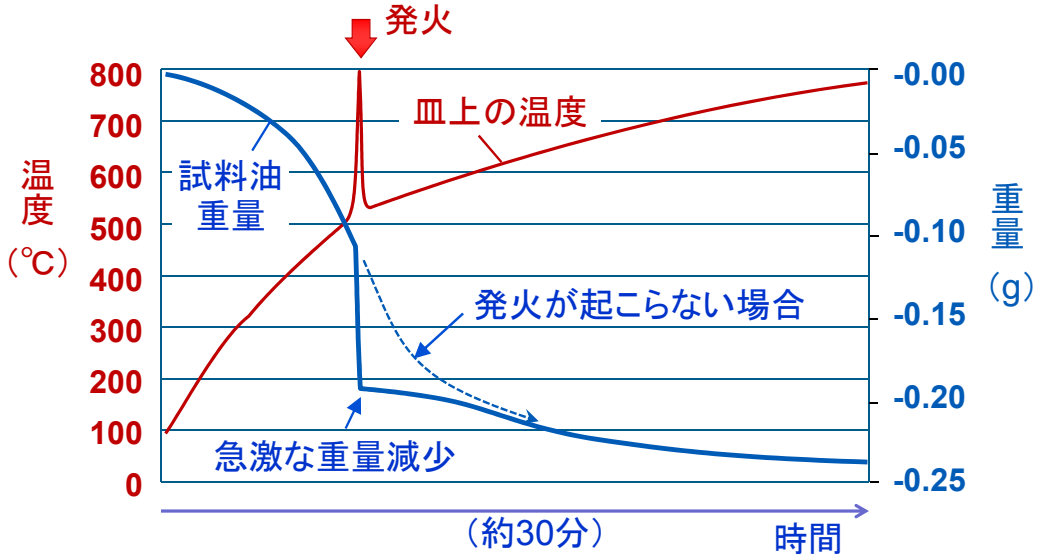


9

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

燃料油簡易分析装置の概要

【出力データ(C重油の例)】



10

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

11

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

試験方法

【試験の方針】

- 舶用燃料重油の燃焼性は推定セタン価（ECN）で表され、一般にECNの値が低いほど難燃性の度合いが強くなる。
  - ☛ 一般に、ECNが20以下の場合、燃焼不良の可能性あり。（NK「舶用燃料重油の低質化対策指針」）
- 本研究では、はじめに試料油のECNを試験で求め、燃料油簡易分析装置による試験の結果から、回帰分析により、次の2つの方針でECN推定式を導く。
  - （A）発火温度によるECN推定
  - （B）蒸発特性によるECN推定

12

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

試料燃料油

【試料燃料油】(26種類)

燃料油の種類(動粘度)	サンプル数	ECN
A重油	3	35.9 ～ 46.9
C重油(180 cSt)	9	14.0 ～ 37.4
C重油(380 cSt)	8	14.7 ～ 21.7
C重油(500 cSt)	6	8.1 ～ 21.0

注) C重油の用途:
180cSt:内航船の主機用燃料
380cSt:外航船における一般的な主機用燃料
500cSt:大型コンテナ船等の大型主機で使用される燃料

13

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

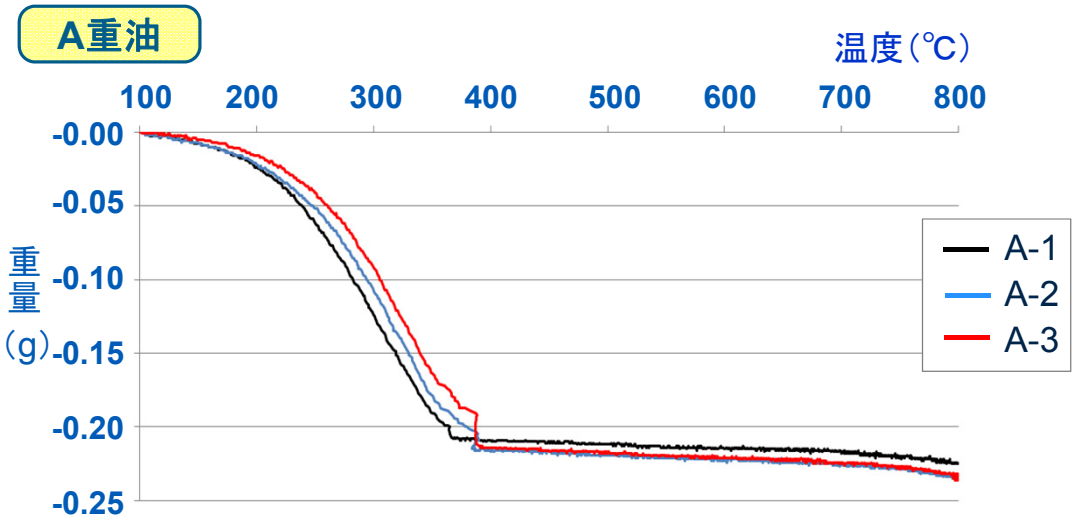
目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

14

温度 vs. 試料油重量

A重油



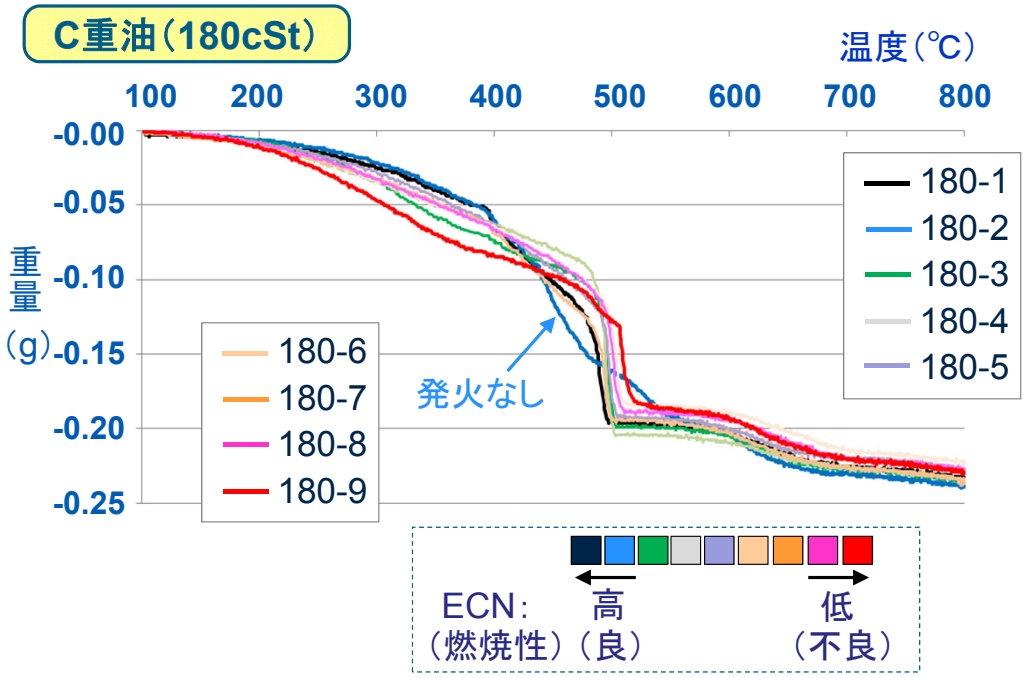
400℃に至る前に、試料油のすべてが蒸発

☛ 明らかに良好な燃焼性 ⇒ C重油のみを検討対象とする。

15

温度 vs. 試料油重量

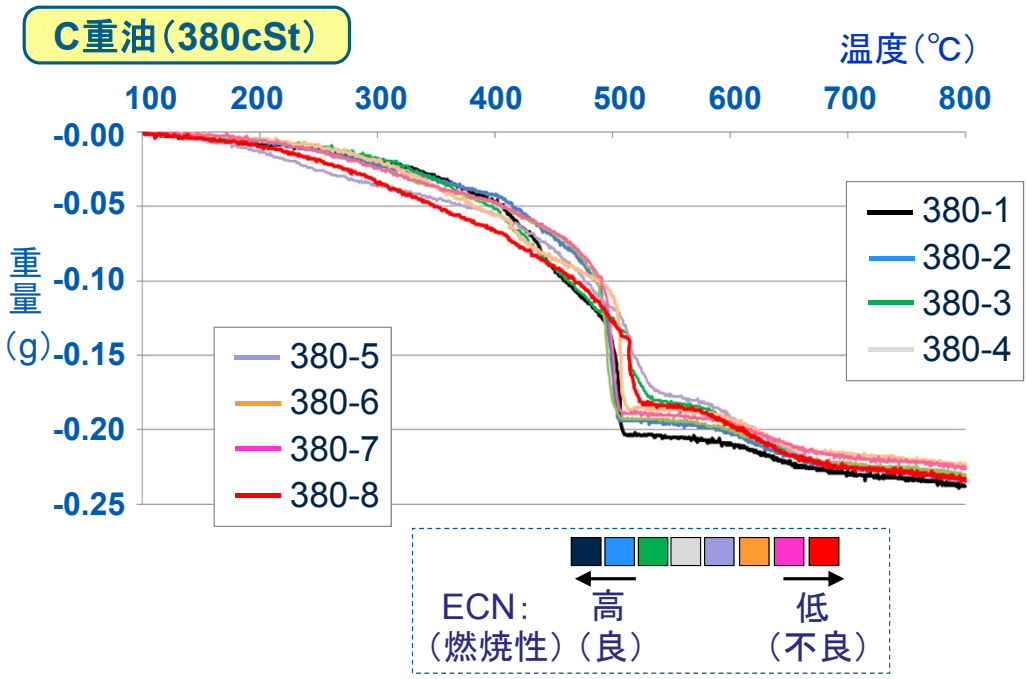
C重油(180cSt)



16

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

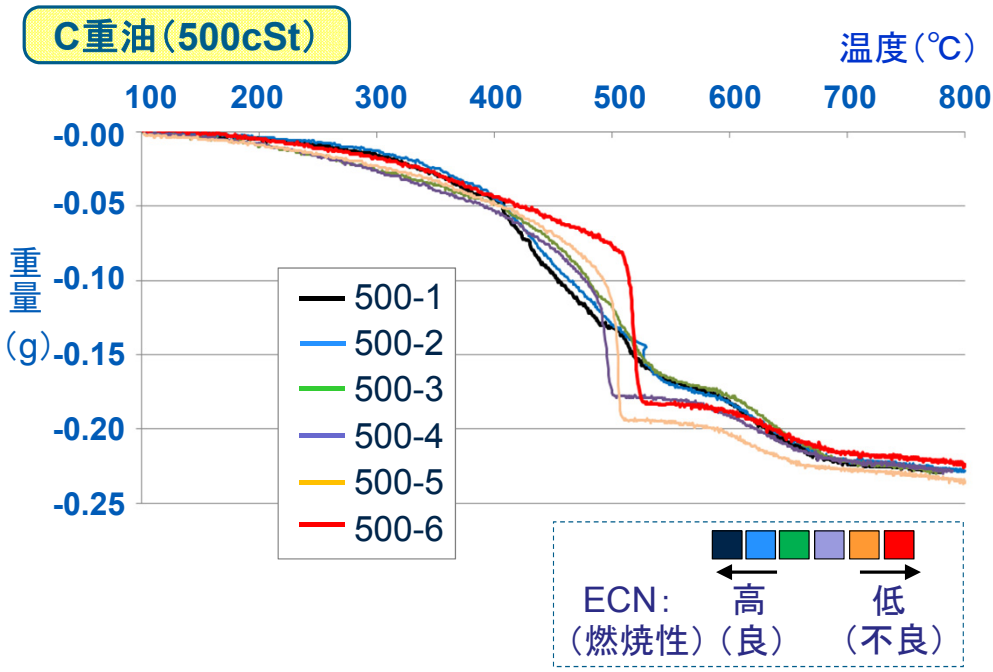
温度 vs. 試料油重量



17

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

温度 vs. 試料油重量



18

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

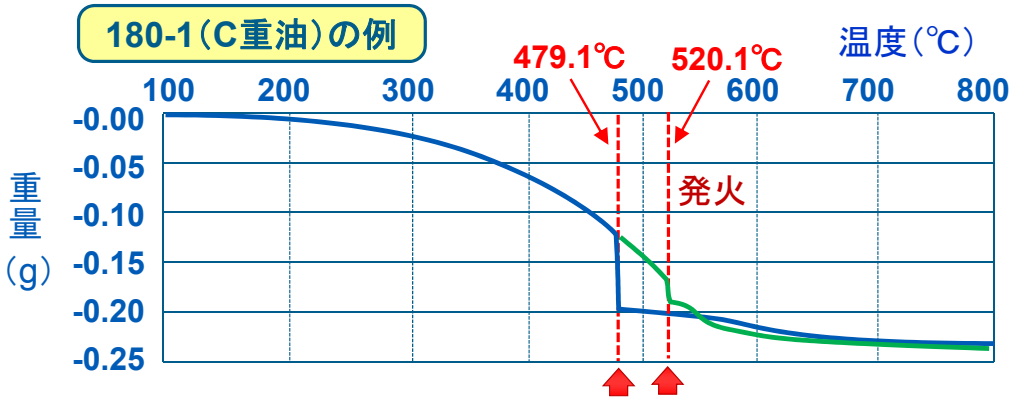
19

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

発火温度によるECN推定

【発火温度】

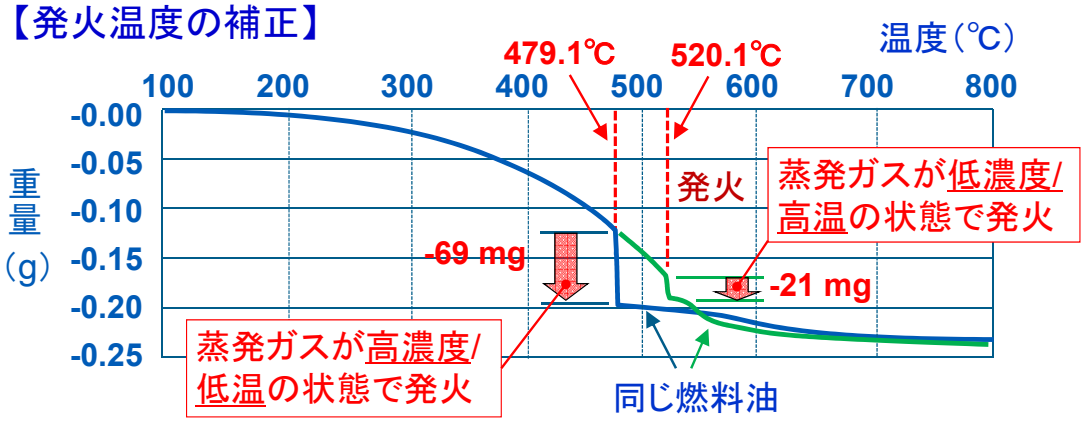
- 一般に、ECNが低い（難燃性が高い）ほど、発火温度が高くなる傾向あり。
- ただし、同じ燃料油でも、低温域（500℃以下）で発火する場合と高温域（500℃以上）で発火する場合とがある。



20

発火温度によるECN推定

【発火温度の補正】



☛ 高温域で発火し、かつ、発火による重量減少が小さい場合、低温域での発火を想定して発火温度を補正：

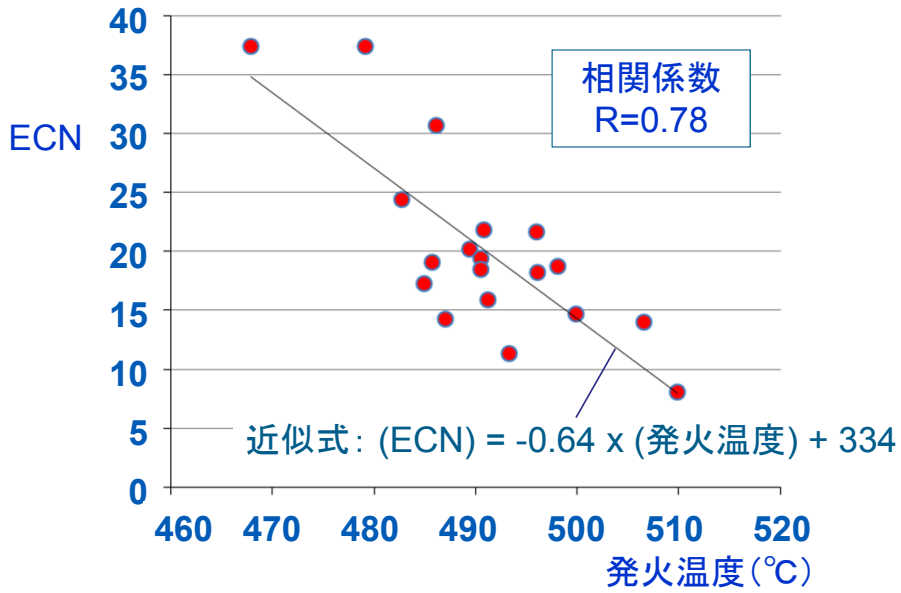
発火温度T(℃)が510℃以上で、かつ、発火による重量減少W(mg)が50mg以下の場合、次式で発火温度Tc(℃)を算出：

Tc = T -1.8 (50-W)

21

発火温度によるECN推定

【発火温度とECNの相関】

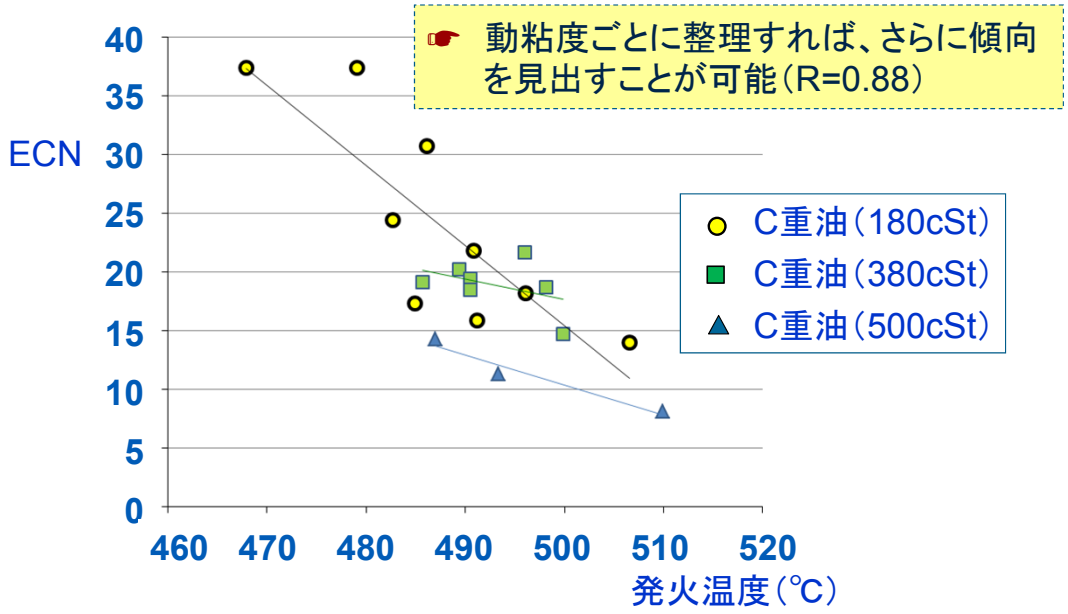


22

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

発火温度によるECN推定

【発火温度とECNの相関】

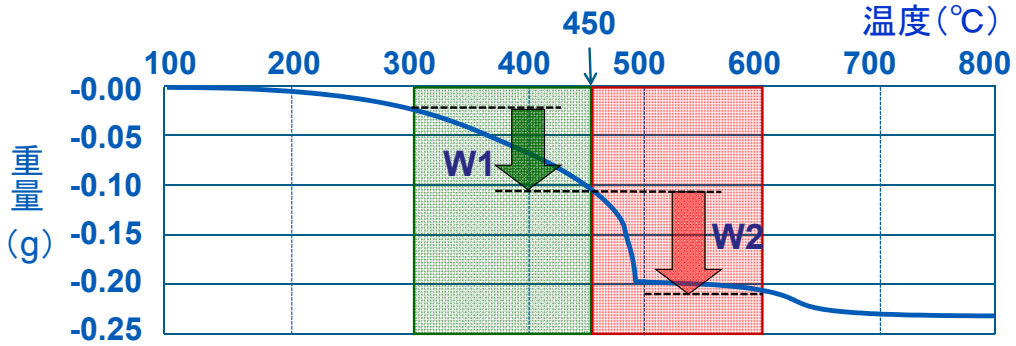


23

ClassNK NIPPON KAIJI KYOKAI

蒸発特性によるECN推定

「温度 vs. 試料油重量」の特性カーブより、特定温度範囲における蒸発量（W1, W2）を求め、試料油のECNを推定：



W1	300℃～450℃の範囲における重量減少（g）	エンジンで主燃焼となる前の蒸発量。呼び水的な効果により、この数値が大きいほど燃焼性は良好。
W2	450℃～600℃の範囲における重量減少（g）	エンジンの主燃焼による燃料の減少に対応

24

蒸発特性によるECN推定

【重回帰分析によるECNの推定】

ECN = a1 + a2 x W1 + a3 x W2

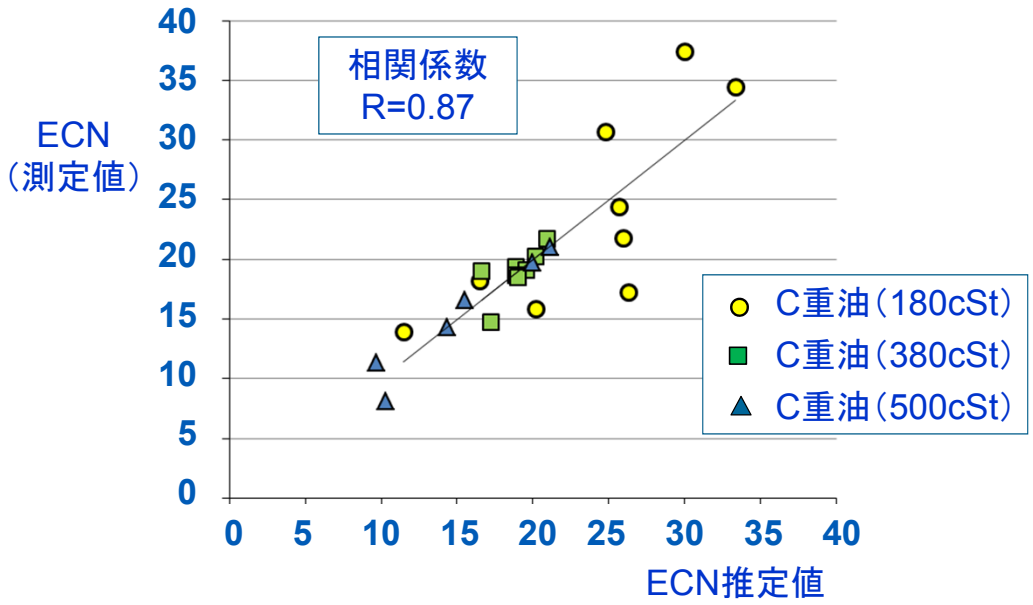
☛ 動粘度ごとにECN推定式を作成（係数a1, a2, a3 を定める）

動粘度 (cSt)	ECN推定式	相関係数R
180	ECN = -63.9 + 578.3x**W1** + 489.0x**W2**	0.79
380	ECN = -5.57 + 118.9x**W1** + 152.1x**W2**	0.72
500	ECN = 33.0 + 66.2x**W1** – 197.4x**W2**	0.96

25

蒸発特性によるECN推定

【蒸発特性によるECN推定】



26

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

目　次

1. 研究開発の背景及び目的
2. 燃料油簡易分析装置の概要
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 燃焼性評価方法の検討
6. まとめ

27

ClassNK
NIPPON KAIJI KYOKAI

まとめ

1. 燃料油簡易分析装置の作成

✓ 燃料油簡易分析装置を試作し、加熱温度に対する燃料油重量カーブをその燃料油の（燃焼性に関する）特性カーブとして使用できることを確認した。

2. 燃焼性評価方法の検討

✓ 本装置で得られる発火温度又は特定温度範囲における燃料油重量変化から推定セタン価（ECN）の概略値を得ることができる。さらなる改良により高精度の推定値を得ることができる見通しがついた。

【今後の課題】

✓ 燃料油重量の測定精度向上、装置の一体化、ソフトの改良 等

✓ さらに多様な燃料油サンプルを入手・試験実施

⇒ ECN推定の精度向上

28