

令和3年(第21回)海上技術安全研究所研究発表会

## 船用低硫黄燃料の着火性指標

# Ignitability Index of Low Sulfur Marine Fuel



環境・動力系  
高木 正英



# 目次

1. はじめに, 目的
2. 留出油, 残渣油の規格になっているセタン指数とCCAIの概説
3. これまで実施してきた検討内容の報告
  - 留出油 セタン指数の問題点と修正
  - 残渣油 CCAIの問題点と修正

# はじめに 背景

現在の船舶：ディーゼルエンジン+留出油，残渣油

燃料に関する課題の一つ：

留出油，残渣油の規格にある着火性指標はバラツキあり（右図）

↓ **着火性のモノサシが脆弱**

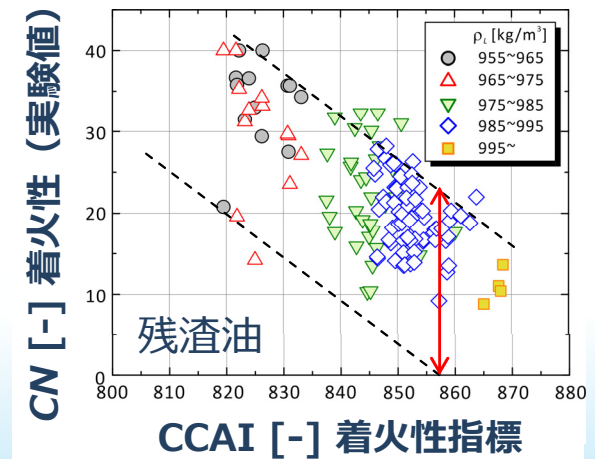
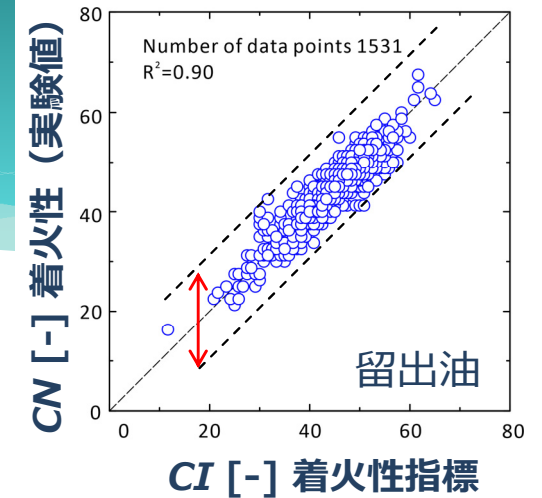
想定される問題：

想定していない燃焼が生じる  
(着火して欲しい時に着火しない)

⇒ 機関の不安定性，排気の悪化，機関トラブル？



- ・着火性を正確に判断できる指標が必要
- ・より良い，着火性指標の改良・作成



# はじめに 物理現象と燃料の関係

## ディーゼルエンジン内の燃料噴霧・燃焼

- ・微細噴孔からの燃料の噴出
- ➡️・液柱, 液滴の運動, 微粒化
- ➡️・乱流拡散 (燃料の広がり)
- ➡️・**液滴の蒸発**
- ➡️・燃料蒸気と空気の混合
- ➡️・**化学反応**による燃料の着火・燃焼

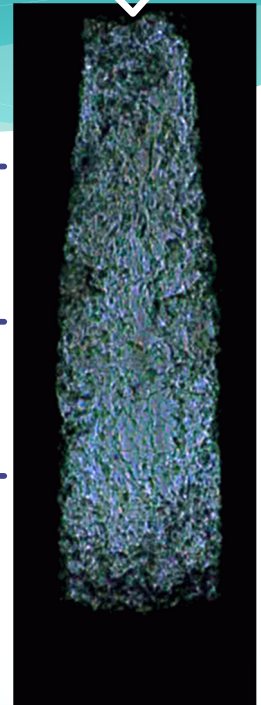
燃料の着火には,  
蒸発 (混合) + 化学反応  
が重要

燃料ごとに各現象の起こる時間, 状況が異なる



- ・燃料が多種多様な炭化水素の混合物  
(全混合物の同定は現実的には不可能)
- ・完全に混合物が一致する燃料がない

100 [mm]



# はじめに ディーゼル燃料の着火性

## ディーゼルエンジン内の燃料噴霧・燃焼

ディーゼルエンジンのために必要な燃料の特徴

➡ 望んでいる時に着火すること

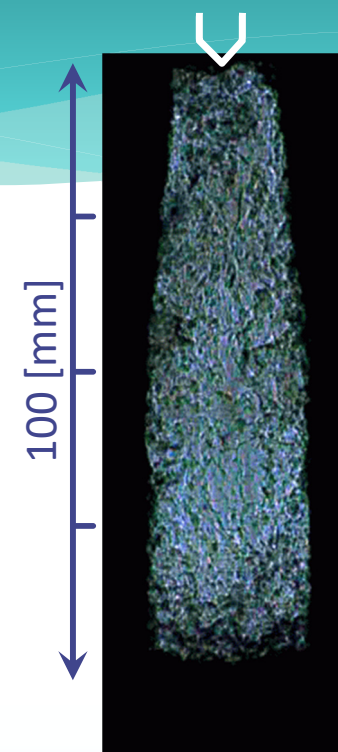
用いている燃料の燃料成分，混合割合によって  
着火時期が異なる

➡ { ① 燃やして確認  
② 燃料の物性値から，成分・混合割合を推定して着火性を推算

成分・混合割合と関係する物性値

- ・船用留出油 ➡ セタン指数（蒸留温度，密度）
- ・船用残渣油 ➡ CCAI（密度，動粘度）

蒸留温度；常温・常圧場でフラスコ内の燃料を加熱し続け，あるフラスコ内  
燃料体積（x%）になった時の温度



# はじめに 現在の船用燃料の状況

現在の船用燃料 Global Sulphur Cap 2020  
硫黄分 3.50%以下 0.5%以下 (2020.1~)

## 低硫黄燃料の作製

燃料基材の種類, 混合量の変更 ➡ 高硫黄燃料基材の混合量制限  
例えば, 減圧残油 (VR: Vacuum Residue)  
高硫黄燃料基材 高粘度

➡ 粘度の低下

一方で,  
**様々な低硫黄基材による作製方法の多様化**



**燃料成分・混合量と着火性の関係が不明確**

# 目的

## 着火性を正確に判断できる，より良い着火性指標の作成

・舶用留出油

➡ セタン指数の改良

- ・蒸発現象との関係
- ・基準燃料との比較，式の変更

・舶用残渣油

➡ CCAIの改良

- ・CCAIの要因の解明
- ・モデル燃料による修正式の構築

# 目次

1. はじめに, 目的
2. 留出油, 残渣油の規格になっているセタン指数とCCAIの概説
3. これまで実施してきた検討内容の報告
  - 留出油 セタン指数の問題点と修正
  - 残渣油 CCAIの問題点と修正



# セタン価

ディーゼル噴霧燃焼における着火性  
「燃料が噴射されてから着火するまでの時間」

➡ セタン価 (Cetane Number) : ISO 5165

**ディーゼル燃料の着火性を表す基準指標**

- CFR (Cooperative Fuel Research Committee) エンジン
- 実験方法

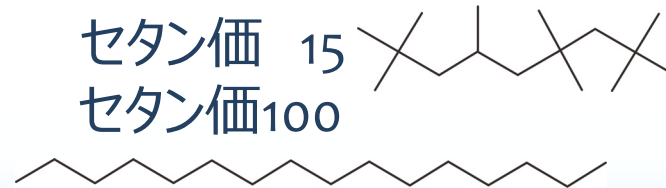
試験燃料の着火性 = 二成分混合燃料 (標準燃料) の着火性

ヘプタメチルノナン

セタン価 15

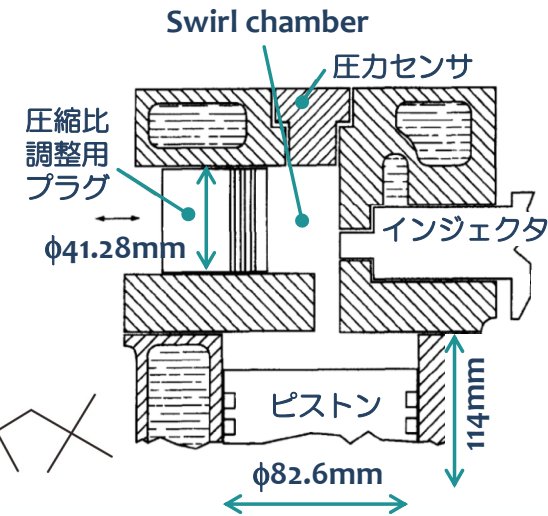
n-ヘキサデカン

セタン価100



**セタン価 = ヘキサデカン [vol. %]**

**+0.15×ヘプタメチルノナン [vol. %]**



CFRエンジンの概念図  
(N. Ladommatos, et. al., Fuel, 75-1 (1996)8-14)



# 船用燃料の着火性代替指標

ディーゼル噴霧燃焼における着火性  
「燃料が噴射されてから着火するまでの時間」

船用留出油，船用残渣油の場合

- ・CFRエンジン試験条件を満たすことができない
- ・一定量の燃料確保
- ・簡便性の要求



セタン価の代替手法：ISO 8217

留出油 **セタン指数** (CI: Cetane Index)

残渣油 **CCAI** (Calculated Carbon Aromaticity Index)

# 着火性評価指標 セタン指数

セタン指数：船用留出油の着火性指標

**セタン指数（新） JIS K 2280-5 : 2013 (ISO 4264 : 2018) 現在の規格**

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

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

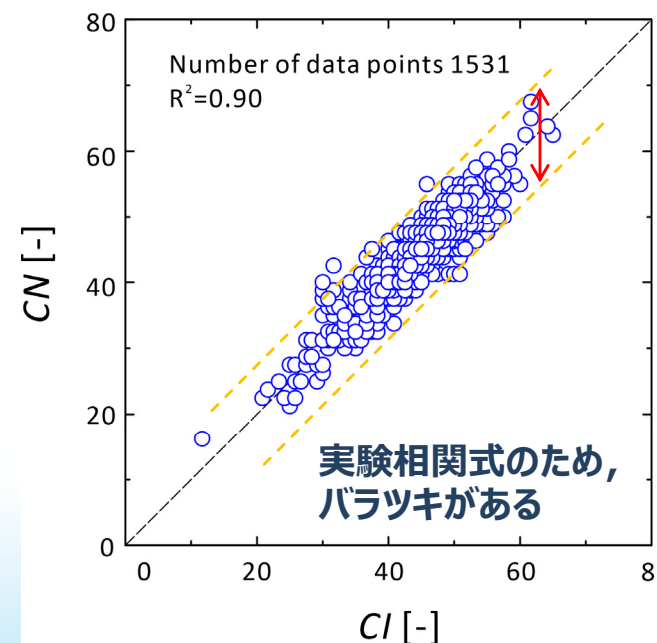
変数

•10, 50, 90%留出温度  
•密度

四変数方程式（上式）

約1500種類の燃料の結果からInghamらによって算出

M.C. Ingham, et. al., Improved Predictive Equations for Cetane Number, SAE paper No. 860250(1986), pp. 1-14.



# 着火性評価指標 CCAI

CCAI：船用残渣油の着火性指標 **ISO 8217:2017 現在の規格**

A. P. Zeelenberg, et. al., The ignition performance of fuel oils in marine diesel engines, CIMAC 1983 Paris, D13.2, pp. 1455-1469.

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

$\rho_L$  ; 密度@15 [kg/m<sup>3</sup>]

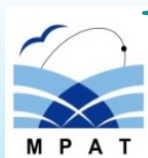
$\nu_L$  ; 動粘度 [mm<sup>2</sup>/s]

T ; 動粘度計測時の温度 [K]

Zeelenbergが提案した着火性の関係



- 燃料の芳香族性と着火性の結び付け
- 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た指数 (CCAI) から燃料の着火性を簡易に予測、推定できるツール

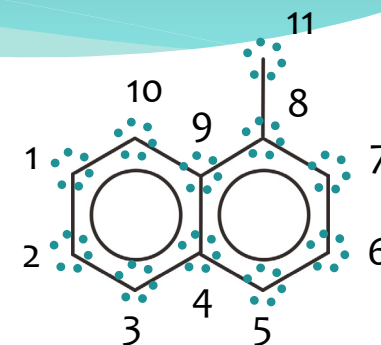


# 着火性評価指標 CCAI

## 芳香族性 (Aromaticity) の意味

燃料中の総炭素原子のうち、芳香族の環状構造を構成している炭素原子の割合

例えば、メチルナフタレン C<sub>11</sub>H<sub>10</sub> の場合、 $\frac{\text{環状構造の炭素原子数}}{\text{総炭素原子数}} = \frac{10}{11} = 0.91$



## 適用燃料

- (1) Zeelenbergの原著論文 (19種類中、留出油8種類) から、残渣油以外 (留出油) にも適用可
- (2) Soudersの粘性係数推算式との相似性から、分子構造が既知の炭化水素 (単成分、複数混合成分) にも適用可

$$k \frac{M}{l} = \rho_L \times 10^{-3} - \frac{M}{l} \log_{10} \left[ \log_{10} (\mu_L \times 10^4) \right]$$

$\mu_L$  ; 粘性係数 [Pa s]  
 $M$  ; 分子量 [g/mol]  
 $l$  ; 原子・構造定数  
 $k$  ; 定数 (2.9)



# 目次

1. はじめに, 目的
2. 留出油, 残渣油の規格になっているセタン指数とCCAIの概説
3. これまで実施してきた検討内容の報告  
留出油 セタン指数の問題点と修正  
残渣油 CCAIの問題点と修正

# セタン指数と蒸発性の関係

セタン指数に使う「蒸留曲線」と、着火現象に関係がある「蒸発特性」の関係を評価  
実在燃料に適用できる蒸発モデル（物性値推算モデル）がない



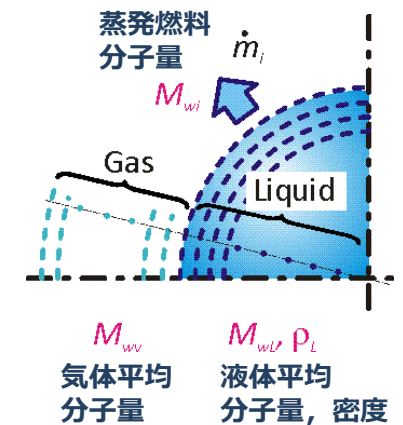
実在燃料のセタン指数の変化に対応できる蒸発モデルの作成

時々刻々と変化する液体燃料，蒸気の物性値が必要

➡ 物性値推算モデル（蒸発開始から終了まで  
連続的に蒸発する分子量が変化）

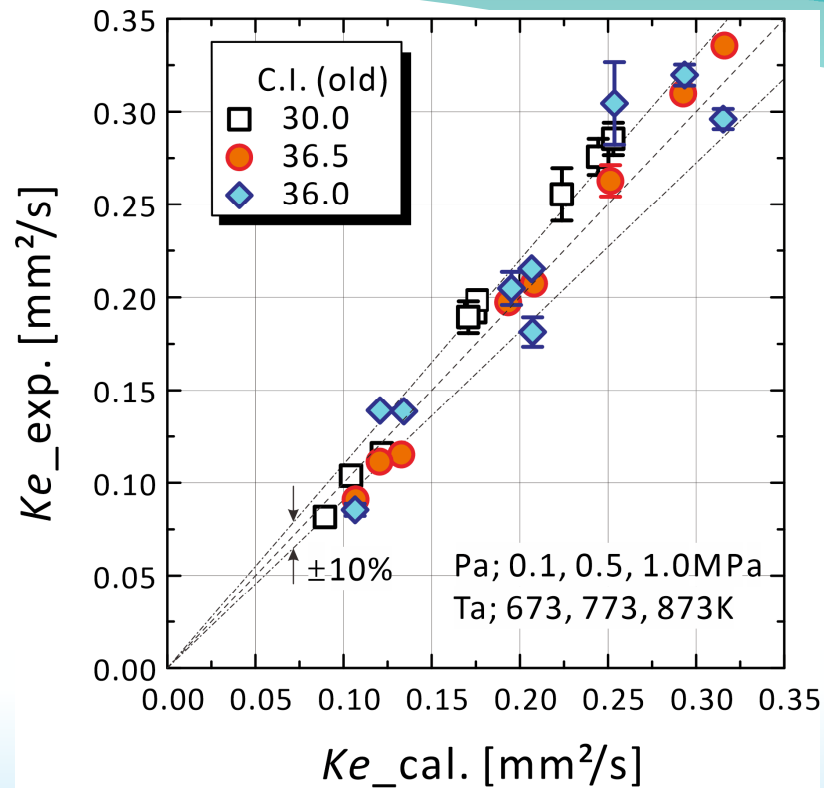
物性決定に必要なもの

- ・蒸留曲線
- ・分子成分タイプ；HPLCによる5成分分析値  
(飽和分，オレフィン，一，二，三環芳香族)

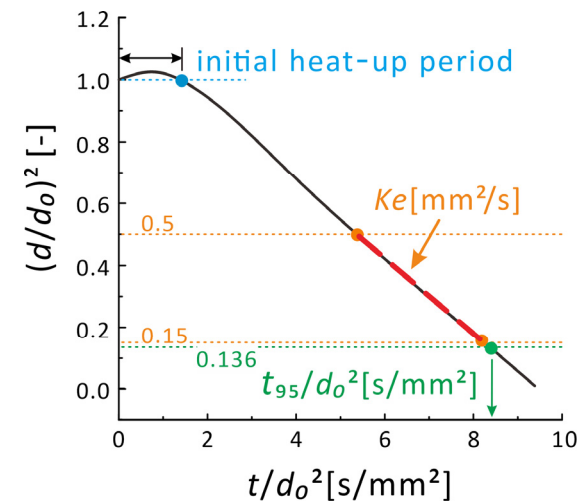


# セタン指数と蒸発性の関係

## 液滴蒸発モデル検証（蒸発速度定数）



実験結果と同一傾向を示す



$d_0$  初期液滴径 [mm]

$Ke$  蒸発速度定数 [ $mm^2/s$ ]

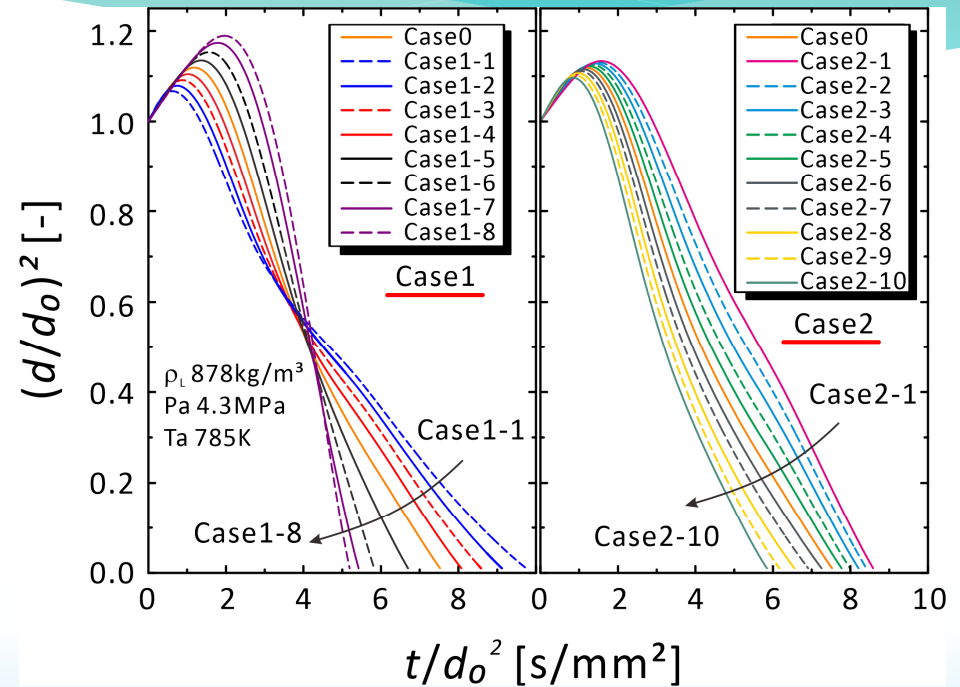
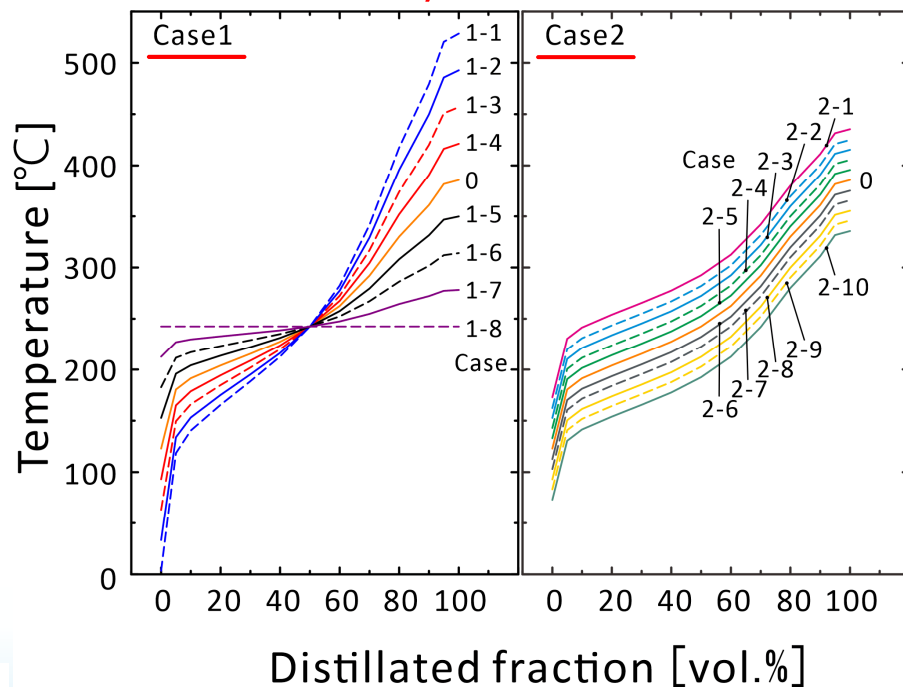
$t_{95}/d_0^2$  95%液滴寿命 [ $s/mm^2$ ]



# セタン指数と蒸発性の関係

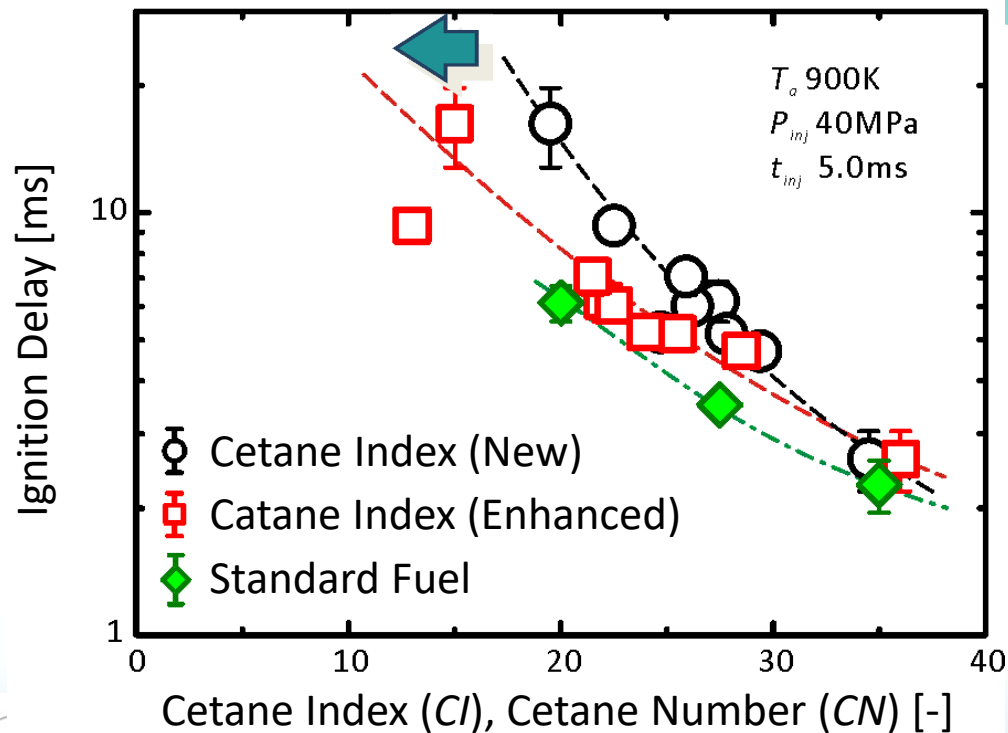
セタン指数と蒸発性の関係 (セタン指数 蒸留温度と密度の関数)

密度を固定し, 蒸留曲線を変更



指標に使われる「蒸留曲線」と着火現象の要因である「蒸発曲線」は相似

# セタン指数の修正



目標：

標準燃料と実在燃料が同一線上にのる

標準燃料 (◆) と比べて, 実際の燃料 (○) の着火遅れが長い

➡ セタン指数の定数 (赤字) を修正

**セタン指数\_修正 (□)**

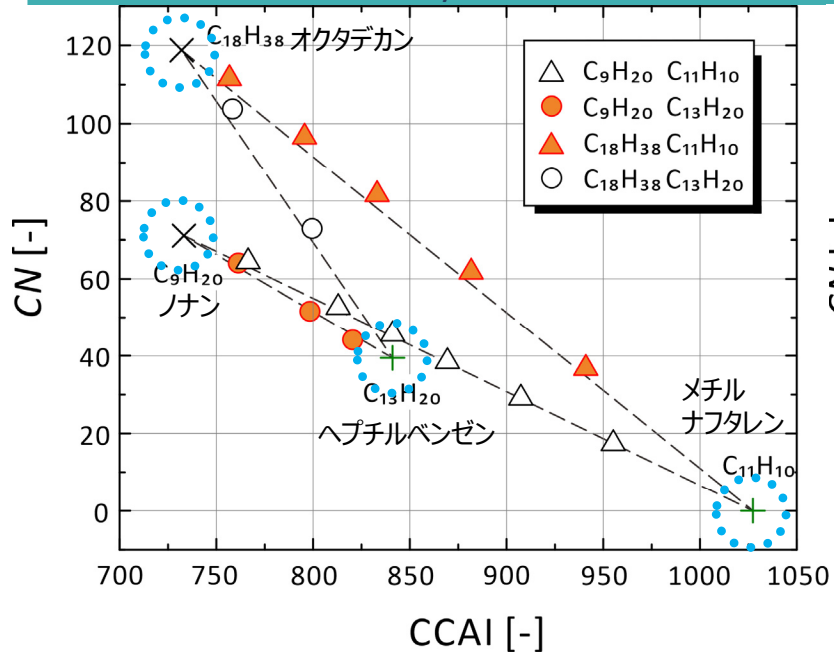
$$\begin{aligned}
 &= 45.2 + 0.020 (T_{10} - 215) \\
 &\quad + (0.493 + 1.20B)(T_{50} - 260) \\
 &\quad + (-0.149 - 0.704B)(T_{90} - 310) \\
 &\quad - 0.000293\{(T_{10} - 215)^2 - (T_{90} - 310)^2\} \\
 &\quad + 86.829B - 72.312B^2
 \end{aligned}$$

# 目次

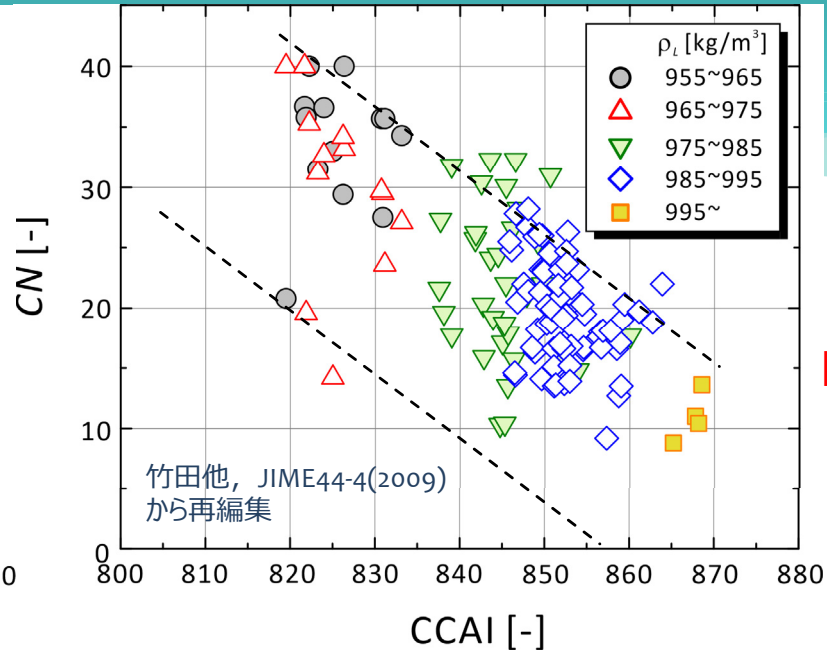
1. はじめに, 目的
2. 留出油, 残渣油の規格になっているセタン指数とCCAIの概説
3. **これまで実施してきた検討内容の報告**
  - 留出油 セタン指数の問題点と修正
  - 残渣油 CCAIの問題点と修正

# CCAIと燃料成分の関係

単成分, 二成分



船用残渣油

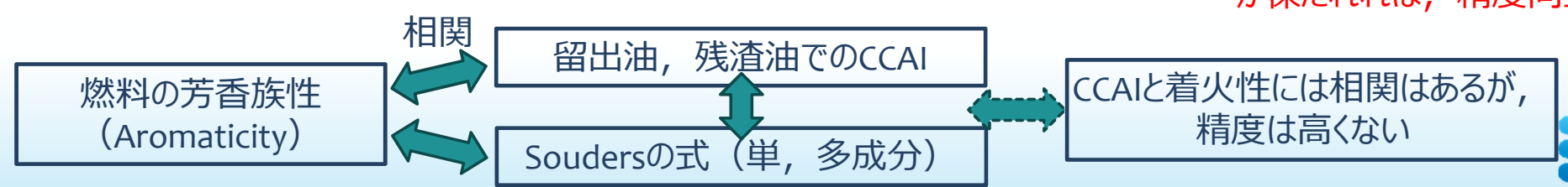


・混合比の変更の場合、  
CCAI-CNの線形性有り  
・同一CCAIでもCNは異なる



目標：多成分の船用燃料の  
CCAI-CNが同一直線上に  
のる（線形にする）

先ず、バラツキ抑制方法として、  
「単成分でのCCAI-CNで線形性  
が保たれば、精度向上？」



# CCAIと燃料成分の関係

## CCAIの問題点 (単成分)

- ・アルカン：CCAIが変わらない
- ・芳香族：環数ごとに傾向が異なる

↓ 分子構造ごとに修正

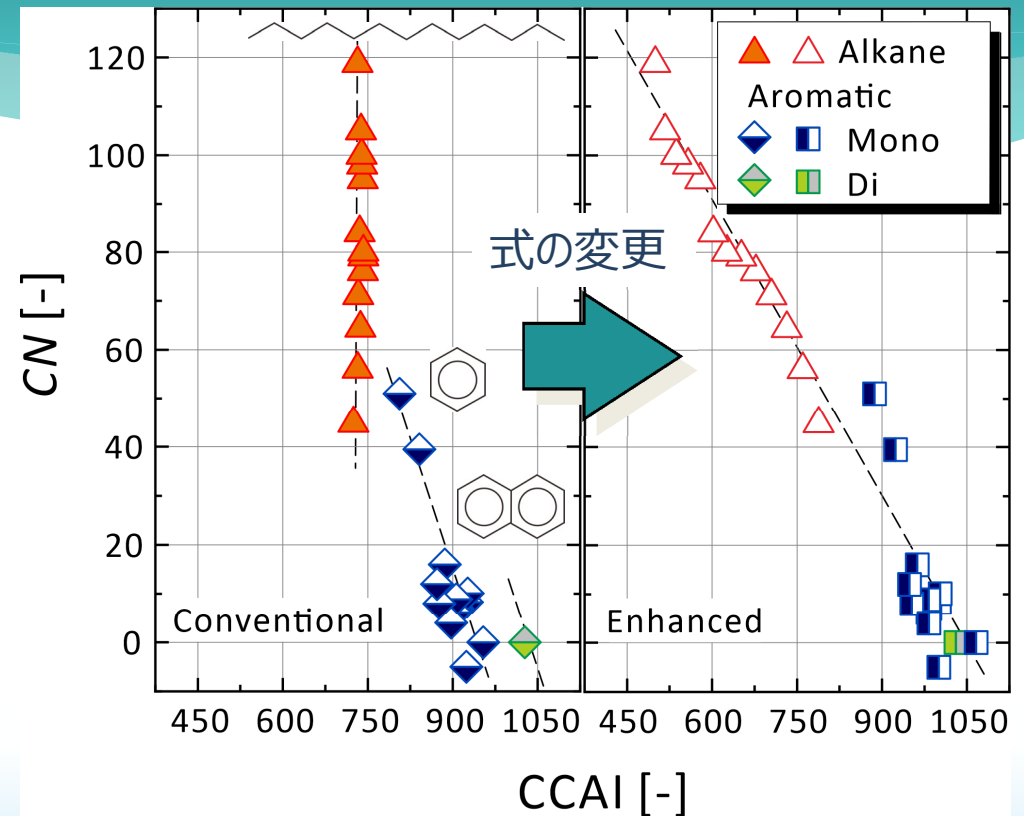
アルカン

$$CCAI_s = 2.768\rho_L - 1861 - 807.6\log_{10}[\log_{10}(v_L + 0.85)]$$

芳香族

$$CCAI_a = \rho_L - 81\{1 - 2.486\exp(-0.1603\alpha)\} - 141\log_{10}[\log_{10}(v_L + 0.85)]$$

$\alpha$  ; 環状構造の炭素原子数



単成分のアルカン，一環，二環芳香族のCCAI-CN関係がほぼ線形化

# CCAIと燃料成分の関係

修正CCAI (二成分系への拡張)

$$CCAI_l = V_{f_s} CCAI_s + V_{f_a} CCAI_a$$

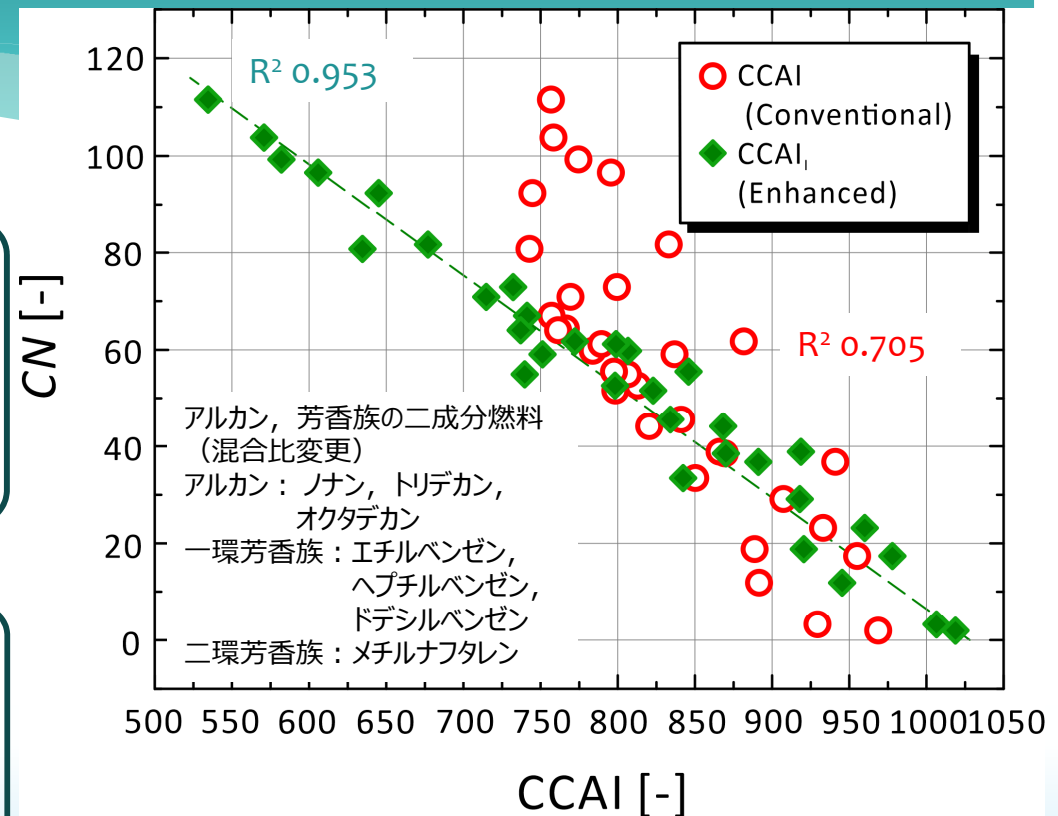
$V_f$ ; 体積分率

二成分系燃料 (成分, 混合比が既知)

- ・単成分燃料で求めた線形関係を維持
- ・アルカン, 芳香族のそれぞれの体積分率から CCAI-CNの高い線形性を実現

今後の課題:

実際の燃料では成分, 混合比は不明であるため, この手法を適用するための成分, 混合比の推定算出法の確立



## まとめ

留出油，残渣油の着火性規格になっているセタン指数とCCAIの概説と，着火性指標の高精度化のために，これまで実施してきた検討内容について報告した。

モデル燃料による検討から，

- ・セタン指数は，**現行の係数を標準燃料に一致するように修正，**
  - ・CCAIは，**燃料成分ごとにCCAIを修正，**
- することによって，より高精度になることを例示した。

低硫黄化に伴い，様々な成分の燃料が作製できるようになったことから，成分が異なる実燃料に適用できる「より精度の高い着火性指標の構築」を目指し，引き続き検討していく。

本報告の「セタン指数の検討」については，ENEOS株式会社，北海道大学（橋本望准教授）との共同研究により実施しました。「CCAIの検討」については，JSPS科研費18K04588の助成を受けたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

