

## 軽油性状が青白煙の発生に及ぼす影響\*

林田 和宏<sup>1)</sup> 渡辺 祐貴<sup>2)</sup> 石谷 博美<sup>3)</sup>

## Effect of Diesel Fuel Properties on Generation of Blue and White Smoke

Kazuhiro Hayashida Yuki Watanabe Hiromi Ishitani

Effect of diesel fuel properties on generation of blue and white smoke was investigated experimentally. Three types of diesel fuels (JIS#2, JIS SP#3 and GTL) were evaporated by a simple fuel vaporization device, and the concentration and color of the generated smokes were evaluated by a light transmitting smoke meter and visual observation, respectively. Concentration of blue and white smoke was the highest for the JIS#2, followed by the JIS SP#3 and the GTL. White smoke was observed at a low evaporation temperature, whereas blue smoke was observed under high evaporation temperature conditions. Moreover, relationship between the fuel property and the generation characteristic of blue and white smoke was estimated from a hydrocarbon constituent.

Key Words: (Standardized) heat engine, compression ignition engine, emissions gas  
(Free) Blue and White Smoke, Fuel Properties, Fuel Evaporation (A1)

## 1. はじめに

ディーゼル機関で問題視される排気エミッションの一つに青白煙がある。青白煙は低温条件下でエンジンを始動させた場合に顕著に発生するが、その主な成分は未燃燃料、燃料の熱分解や部分酸化で生成する炭化水素化合物、燃焼中間生成物および水蒸気とされている<sup>(1-3)</sup>。近年では、コモンレールシステムによる多段噴射の効果により、従来に比べるとエンジンアウトの青白煙排出は大幅に低減されている<sup>(4)</sup>。しかしながら、厳しさを増す排ガス規制への対応を考える場合、青白煙の更なる低減は重要な課題であり、そのためには青白煙の発生メカニズムをより詳細に把握する必要がある。

低温始動時における青白煙の発生原因は、燃焼室内に分散した噴霧が完全燃焼しないまま放出されることも一因であるが、低温の壁面に付着した燃料による影響が大きいとされる<sup>(5)</sup>。低温始動時は、クランク中にも多量の燃料が噴射されるため燃料の壁面付着量が増加し、クランクが長引くと燃焼室内に燃料が蓄積され<sup>(6)</sup>、このような燃料が蒸発、排出されると青白煙となる。

シリンダ内の残留燃料が蒸発し青白煙となる場合、燃料が蒸発する際の温度が青白煙の発生に影響するものと考えられる。すなわち、燃焼室内で着火が生じなかった場合や火炎が発生しても成長せずに消滅してしまう場合などは燃料と同様

の成分の青白煙が排出され、火炎がある程度成長してから消滅するような場合だと燃焼室内温度が上昇し未燃分の蒸発温度が高まり、熱分解や部分酸化を受けた成分が増加する。そして、同じ蒸発温度であっても燃料性状により熱分解や部分酸化生成物が異なるため、蒸発成分の凝縮による青白煙の発生の仕方も異なるものと推測される。

このことを実機で確認しようとする、シリンダ内の温度や圧力は時々刻々と変化することから、燃料の受ける熱履歴や発生する青白煙の特徴との関連性を把握することは極めて困難である。そこで本研究では、燃料の蒸発で発生する青白煙についての基礎的な知見を求めめるため、単純な燃料蒸発装置を用い、温度条件を変化させて軽油を蒸発させ、各蒸発温度で発生する青白煙の濃度を調べるとともに、ガスクロマトグラフによる炭化水素成分の分析を行った。実機とは大きく異なる条件ではあるものの、燃料の蒸発や熱分解、部分酸化等の反応は温度に強く依存するものであるため、本研究で得られる知見は実機で見られる青白煙との相関を有するものと考えられる。燃料には性状の異なる3種類の軽油を用い、燃料性状が蒸発で発生する青白煙に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験装置および方法

## 2.1. 実験装置

図1に本実験に用いた実験装置の概略を示す。装置は主に燃料供給ライン、燃料を蒸発させる加熱ブロックおよび発生した青白煙が流れる排気筒より構成される。加熱ブロック本体は直径110mm、厚さ60mmのアルミニウムで、内部には熱

\*2011年10月13日受理、2011年10月13日自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・3) 北見工業大学 (090-8507 北海道北見市公園町165)

2) 北見工業大学大学院 (090-8507 北海道北見市公園町165)

源として 8 本のカートリッジヒータが差し込まれている。加熱ブロックの上には直径 70mm、厚さ 5mm のステンレス製の焼結金属板が埋め込まれており、常温から 500°C の範囲で焼結金属板の温度を変化させることができる。燃料は焼結金属板の中心部に 1.3mL/min の流量で供給され、焼結金属内部に染み込みながら蒸発する。これにより、供給された燃料は速やかに蒸発し、定常的な青白煙を発生させることができる。また、K 型熱電対で焼結金属板内部の温度を測定し、温度調節器とリレーを用いることで焼結金属板の温度が一定となるよう制御した。排気筒は長さが 500mm、断面形状が 70mm 角の正方形であり、煙の発生状況を目視でき、かつ青白煙濃度が測定できるよう、透明なポリカーボネート板で構成した。

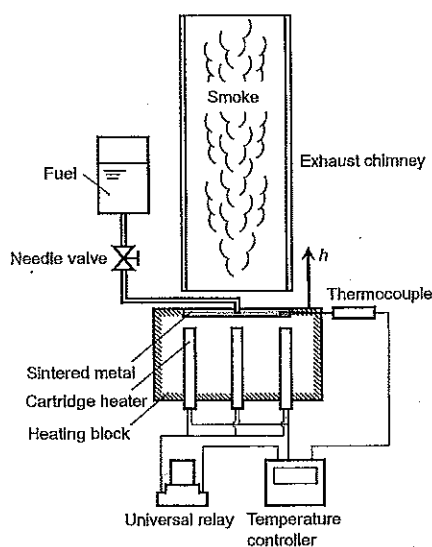


Fig.1 Experimental apparatus

排気筒の各高さにおける青白煙濃度は、透過型スモークメータ (PHS 型) (理化精機工業) の光透過部に排気筒を設置して測定した。青白煙濃度はスモークメータの光の不透過率で表され、煙が存在しない場合が 0%、光が全く透過しない場合が 100% となるよう校正した。ただし、この青白煙濃度と青白煙粒子の質量濃度との相関性は把握できておらず、後述する青白煙濃度の変化に質量濃度の増減がどの程度影響しているかは明確ではない。青白煙の炭化水素成分については、冷却器を用いて集めた青白煙の凝縮液をガスクロマトグラフ質量分析計 (島津製作所, GCMS-QP500) で分析した。また、排気筒から排出されるガスをサンプリングバッグに採取し、ガス中に含まれるホルムアルデヒド (HCHO) の濃度を、ガスクロマトグラフ (日立製作所, 163 型) による還元 FID 法<sup>(7)</sup>により測定した。

2.2. 試験燃料

燃料には JIS2 号軽油, JIS 特 3 号軽油および GTL 軽油を使用した。表 1 に試験燃料の性状を示す。Golothan<sup>(8)</sup>は実機を用

いて青白煙の発生に及ぼす燃料性状の影響について調べているが、燃料性状のうち青白煙への影響が強い因子としてセタン価と蒸発性を挙げている。試験燃料の性状を見ると、セタン価は GTL が 72.3 と特に高く、JIS2 号は 55.5, JIS 特 3 号は 51.9 である。また、蒸発性の指標となる 90vol% 留出温度については GTL が 306.0°C と最も低く、試験燃料の中では蒸発性に優れる燃料といえる。JIS2 号と JIS 特 3 号の 90vol% 留出温度は、それぞれ 330.0°C と 318.5°C である。

Table 1 Properties of test fuels

	JIS#2	JIS SP#3	GTL
Density (15°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	0.8239	0.8084	0.7772
Kinematic viscosity (30°C) [mm <sup>2</sup> /s]	2.882	2.093	3.131
Recovered temperature of 90vol% [°C]	330.0	318.5	306.0
Cold filter plugging point [°C]	-8	-29	-20
Pour point [°C]	-7.5	-35.0	-26.0
Flash point [°C]	58.0	53.0	87.5
Sulfur [mass ppm]	8.0	5.0	<1
Cetane number	55.5	51.9	72.3

2.3. 排気筒内の温度分布

一般に、凝縮性物質の蒸気が過飽和状態にある場合において、蒸気が冷却・凝縮することによって液体の微粒子が発生する<sup>(9)</sup>。蒸気の過飽和度は温度で変化するため、焼結金属板で発生した燃料蒸気の凝縮が生じる排気筒内の温度を予め把握しておく必要がある。

燃料を供給せずに焼結金属板を設定温度  $T_s$  に加熱し、焼結金属板からの高さ  $h$  における排気筒中心の空気温度  $T_a$  を K 型熱電対で測定した。その結果を図 2 に示す。図より、 $T_s$  が上昇すると、加熱ブロックからの熱で排気筒内の空気温度が高くなることが確認できる。また、焼結金属板からの位置が高くなるにつれて空気温度は低下するものの、 $h > 350\text{mm}$  になると温度低下は比較的落ち着いており、 $h = 373 \sim 451\text{mm}$  の温度低下はいずれの  $T_s$  も 2°C 以内であった。なお、本研究では焼結金属板の温度を燃料の蒸発温度  $T_e$  と定義し、以降の実験結果を考察する。

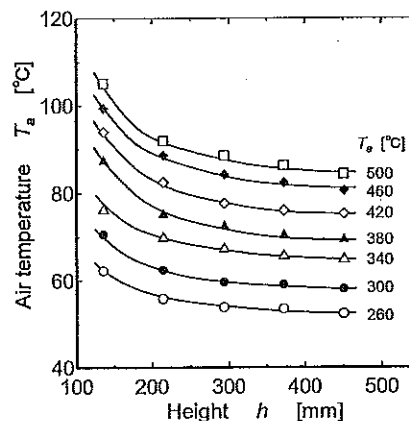


Fig.2 Axial temperature distributions in exhaust chimney

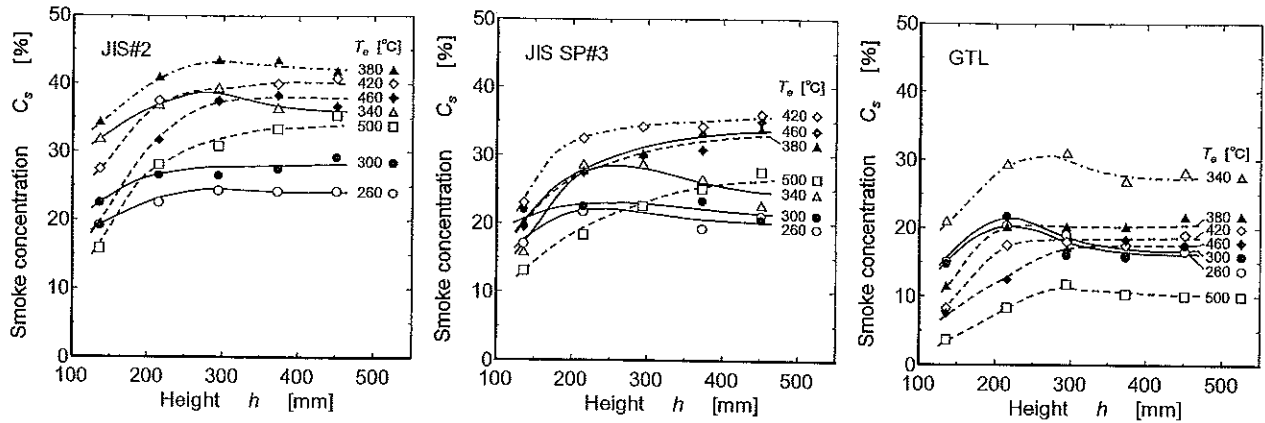


Fig.3 Axial concentration distributions of blue and white smoke

3. 実験結果および考察

3.1. 蒸発温度と青白煙濃度

蒸発温度を260~500°Cの範囲で40°C間隔で変化させ、それぞれの蒸発温度で発生する青白煙濃度  $C_s$  を排気筒の各高さ  $h$  で測定した結果を図3に示す。JIS2号軽油の結果を見ると、いずれの蒸発温度においても、排気筒下部  $h=200\sim 300$ mm程度までは青白煙濃度が急激に上昇する様子が確認できる。排気筒下部は空気温度が大きく低下する領域であるため、蒸気の冷却・凝縮が進んで青白煙粒子が増加するためと考えられる。これより下流になると濃度変化は比較的落ち着いているが、 $T_e=340^\circ\text{C}$ や $380^\circ\text{C}$ の場合は逆に濃度が低下するような傾向も見受けられる。排気筒内における煙の濃度は均一ではなく、測定誤差もあるので濃度が低下していると断定はできないものの、ある位置より下流になると新たに発生する粒子が減少し下流に流れながら粒子が衝突・合体して成長するため、粒子数の減少によりスモークメータの光透過率が上昇した可能性が考えられる。空気温度の低下が落ち着く  $h=350$ mmより下流域の蒸発温度による濃度の違いを見ると、蒸発温度が低い場合は温度が高くなるにつれて濃度が上昇し、 $T_e=380^\circ\text{C}$ を境に、それ以上の温度では濃度が低下することが確認できる。

JIS特3号とGTLについても、上述のJIS2号と同様の傾向が確認できる。なお、青白煙濃度がピークとなる蒸発温度は、JIS特3号が $420^\circ\text{C}$ 、GTLが $340^\circ\text{C}$ であった。全体的な濃度について比較すると、JIS特3号はJIS2号よりも濃度が低く、GTLはさらに低い濃度となっている。表1を見ると燃料の密度はJIS2号よりもJIS特3号の方が低く、GTLはさらに低い。密度より燃料の質量流量を求めると、JIS2号は約 $1.07\text{g}/\text{min}$ 、JIS特3号は約 $1.05\text{g}/\text{min}$ 、GTLは約 $1.01\text{g}/\text{min}$ であり、この違いが燃料による全体的な濃度差に影響している可能性があるものの、質量流量の差はさほど大きいものではなく、その影響は小さいものと考えられる。

空気温度がほぼ同じであり、濃度変化の落ち着く  $h=373$ mmと $451$ mmの平均濃度を蒸発温度に対してプロットしたものを図4に示す。図中、各温度条件で発生した青白煙を目視で観

察し、煙の色を白煙、白煙と青煙の間、青煙の三パターンに分類した結果をシンボルの違いで表した。水蒸気のような白色の煙を白煙に、煙草や線香の煙に似た質感の煙を青煙に、両者が混ざり合ったような煙を白煙と青煙の間として分類した。目視では蒸発温度が低い場合には白煙が見られ、濃度が最も高くなる温度付近において白煙に青煙が混じったような煙となり、以降は蒸発温度が高くなるにつれて青煙色が強くなる様子が確認された。煙の色はその粒子径の違いによる光の散乱を反映したものと知られ、白煙は概ね $1.0\mu\text{m}$ 以上の粒子より、青煙は $0.4\mu\text{m}$ 以下の粒子により構成される<sup>(10)</sup>。

青煙が発生し始める蒸発温度より低い温度領域では、蒸発温度が上昇するに従い白煙濃度が高くなっている。排気筒内の空気温度が上昇するにもかかわらず白煙濃度が高くなった理由として、煙粒子の粒子径の減少が考えられる。すなわち、粒子径が減少した分白煙粒子の個数濃度が増え、その結果スモークメータの光透過率が低下したものと考えられる。白煙粒子で生じる光散乱はミー散乱であるが、ミー散乱は粒子径が小さいほど入射光前方への散乱が弱くなる<sup>(11)</sup>。さらに、粒子濃度が高い場合には多重散乱<sup>(11)</sup>が生じるため、入射光前方への光透過率が低下したと解釈できる。一方、青煙が現れ始

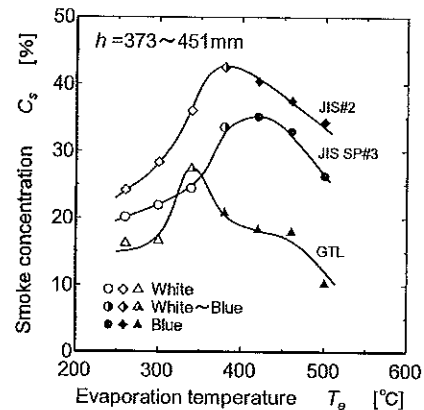


Fig.4 Relationship between smoke concentration and evaporation temperature

めると、温度が上昇すると青煙濃度が減少しているが、これは、蒸発温度が高いために一部の燃料成分に何らかの反応が生じ、凝縮を起こす炭化水素成分が減少したためだと推測される。なお、青煙濃度の減少には、空気温度の上昇による凝縮量の減少も寄与していると思われるが、 $T_e=340\sim 500^\circ\text{C}$ の排気筒上部における空気温度の差は  $20^\circ\text{C}$ 程度であり、このレベルの温度差では青白煙となる炭化水素蒸気の飽和濃度はさほど変化しないため<sup>1)</sup>、その影響は小さいものと思われる。

実際のディーゼル機関を低温始動させた場合、暖機が進むにつれて白煙から青煙へと煙の色が変化することが知られているが<sup>10)</sup>、これは、暖機が進むにつれて壁面付着燃料の蒸発温度が上昇することも重要な要因と考えられる。

### 3.2. 青白煙粒子の炭化水素成分の分析

燃料によって青白煙濃度や白煙から青煙へと移行する蒸発温度が異なるのは、燃料性状の違いに起因するものと考えられる。そこで、白煙、白煙から青煙へと移行する際の煙および青煙をそれぞれ冷却して集めた凝縮液を、ガスクロマトグラフ質量分析計で分析した。なお、凝縮液は排気筒から排出される青白煙を冷却器に通して凝縮させたものであるが、凝縮時の温度は約  $10^\circ\text{C}$ であるため、排気筒内では気体であった成分も凝縮液に含まれている可能性がある。

JIS2号軽油を  $T_e=260, 380$  および  $500^\circ\text{C}$ の条件で蒸発させて発生する青白煙の分析クロマトグラムを図5に示す。参考に、燃料自体のクロマトグラムも併せて示す。強いピークはn-パラフィンの検出によるもので、本研究で使用したJIS2号軽油には主に炭素数が9~22のn-パラフィンが含まれていることが分かる。図6はJIS特3号の結果であるが、燃料のクロマトグラムを見ると、比較的炭素数の少ない成分のピークが強く、JIS2号よりも軽質な燃料であることを確認できる。GTL

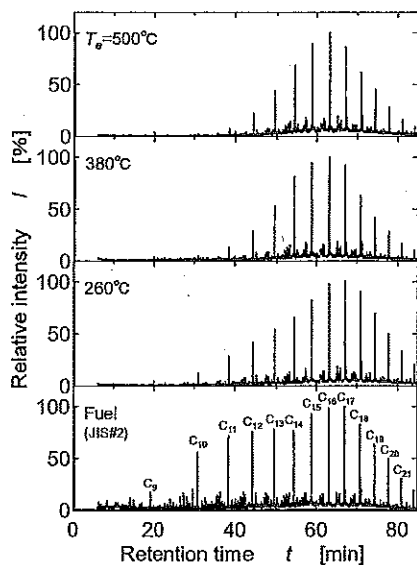


Fig.5 Comparison of hydrocarbon constituent of blue and white smoke (JIS#2)

の結果(図7)を見ると、炭素数が12~19の成分が中心であり、蒸留沸点範囲の狭いナローカットな燃料であることが分かる。各燃料の燃料自体のクロマトグラムと青白煙成分のクロマトグラムを比較すると、いずれもプロファイルが一致しておらず、また、各蒸発温度によってもプロファイルが異なることが確認できる。

蒸発温度によるn-パラフィンのピーク強度の変化に注目し、各クロマトグラムの最大ピーク強度を100%とした相対強度を、n-パラフィンの炭素数ごとにプロットしたものを図8に示す。JIS2号の場合、 $T_e=260^\circ\text{C}$ の白煙成分は燃料と比較して $C_{16}$ 以上のピーク強度にほとんど変化は見られないものの、 $C_{13}$ 以下ではピーク強度の低下が顕著である。これは、揮発性成分の

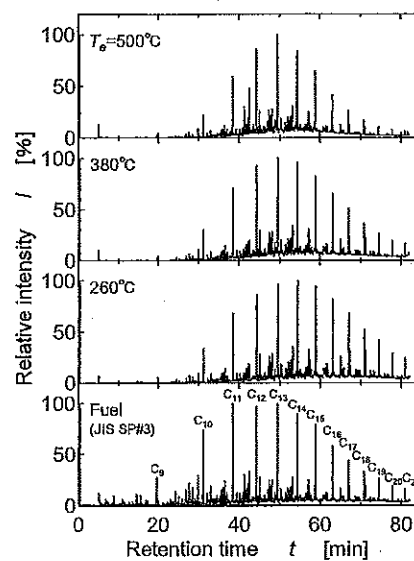


Fig.6 Comparison of hydrocarbon constituent of blue and white smoke (JIS SP#3)

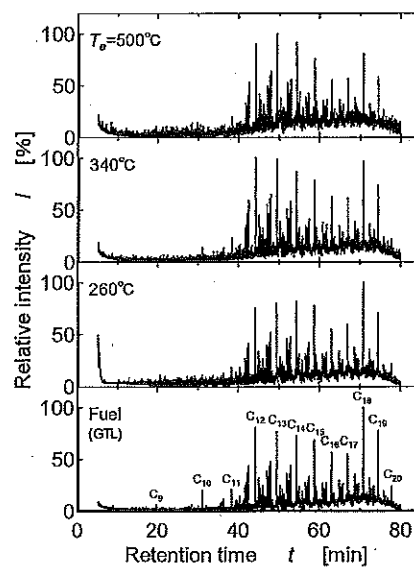


Fig.7 Comparison of hydrocarbon constituent of blue and white smoke (GTL)

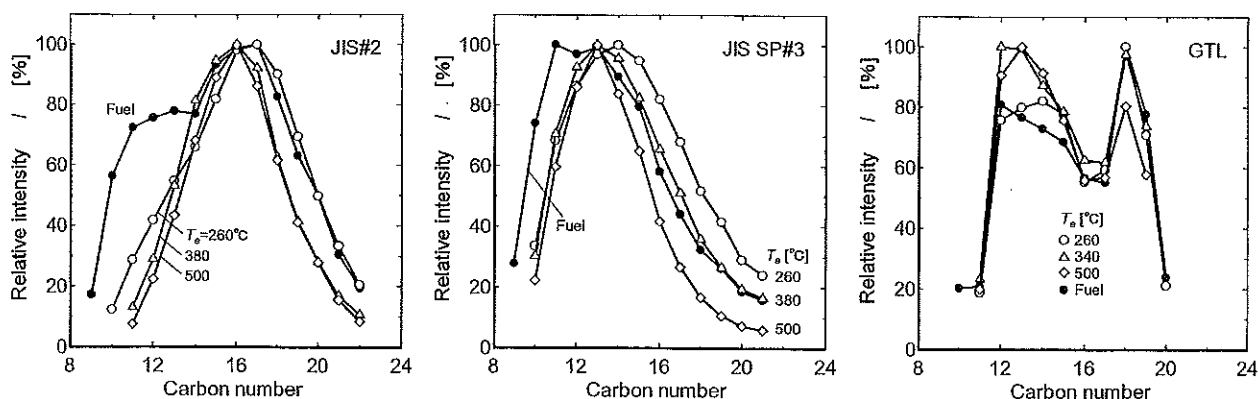


Fig.8 n-paraffin content of blue and white smoke

一部が排気筒内で凝縮せずに排出されるためと考えられ、炭素数の少ない成分ほど凝縮する割合の少なくなる様子が伺える。 $T_e=380^{\circ}\text{C}$ の白煙と青煙の中間の煙では、 $C_{13}$ 以下の低炭素数成分に加え、 $C_{18}$ 以上の成分の減少が顕著であるが、これは、前述の通り蒸発時の加熱を受けて何らかの反応が生じたためと考えられる。なお、各クロマトグラムの最大ピーク強度を100%としているため、 $C_{16}$ は変化していないように見受けられるが、実際には $C_{16}$ も同様に減少しているものの減少率が比較的小さかったと考えるのが妥当である。 $T_e=500^{\circ}\text{C}$ の青煙については、 $T_e=380^{\circ}\text{C}$ の煙よりも炭素数成分の幅がさらに狭くなっていることが確認できる。

図6と図7のクロマトグラムを参照しながらJIS特3号とGTLのデータを見ると、JIS2号と同様の傾向が確認できる。すなわち、 $T_e=260^{\circ}\text{C}$ の白煙粒子では低炭素数成分の減少が顕著であり、蒸発温度が高くなり青煙に移行すると高炭素数成分の減少が大きくなっている。また、この高炭素数成分の減少は、図4において蒸発温度が高いほど青煙濃度が低くなる結果を裏付けるものと言える。

一般に、炭化水素化合物は分子量が大きいくほど蒸気圧が低く<sup>(12)</sup>、粒子化しやすい。このため、蒸気中に炭素数の大きな成分が多く含まれる条件( $T_e=260^{\circ}\text{C}$ )では、凝縮や成長が速やかに生じて比較的粒径の大きな白煙が生じるのに対し、蒸発温度が高くなると高炭素数成分が減少し、凝縮時の粒子が小径化して白煙から青煙に移行すると解釈できる。また、低炭素数成分の割合が多い軽質な燃料ほど凝縮の生じる蒸気量が少なくなるため、図4においてJIS2号>JIS特3号>GTLの順で青白煙濃度が低くなったものと考えられる。

### 3.3. 蒸発温度とホルムアルデヒド濃度

ディーゼル機関から排出される青白煙は、目や鼻を刺激する臭気成分を伴うことが知られている<sup>(13)</sup>。臭気成分の排出と蒸発温度との関連性を調べるため、排気筒出口から排出されるガスをサンプリングし、ディーゼル排気臭の代表的な臭気成分であるホルムアルデヒド(HCHO)<sup>(14)</sup>の濃度 $C_h$ を測定し

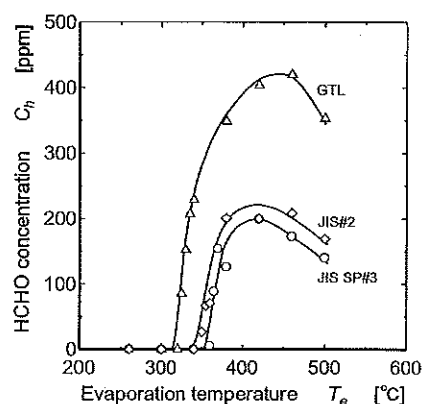


Fig.9 Relationship between HCHO concentration and evaporation temperature

た、各燃料の蒸発温度とHCHO濃度の関係を図9に示す。いずれの燃料も、ある蒸発温度を超えるとHCHOが発生しており、その温度はJIS2号が $350^{\circ}\text{C}$ 、JIS特3号が $365^{\circ}\text{C}$ でGTLが $325^{\circ}\text{C}$ であった。これらは、煙が白煙から青煙に移行する蒸発温度よりもやや低い温度であることが注目される。すなわち、煙の色が変化するような温度条件において比較的分子量の大きなn-パラフィンが減少し、同様の温度条件よりHCHOが検出され始めることから、このHCHOは冷炎反応<sup>(15)</sup>で生成されたものと判断できる。炭化水素化合物のうち冷炎反応の起きやすい成分はn-パラフィンであるため、n-パラフィンの多く含まれるGTLのHCHO濃度が特に高かったのは妥当といえる。そして、冷炎反応に凝縮性成分が消費された結果、GTLの青煙濃度(図4)が顕著に低くなったものと考えられる。

セタン価の高い燃料にはn-パラフィン分が比較的多く含まれるが、試験燃料のセタン価はGTLが72.3、JIS2号が55.5、特3号が51.9であり、HCHO濃度の高さに対応している。このことは、ディーゼル機関の低温始動時でクランクが長引く燃焼室内に蓄積した燃料が始動後に蒸発し青白煙となり排出されるような場合、セタン価の高い燃料の方がHCHO排

出量が多くなる可能性を示唆するものと考えられる。しかしながら、図9に示した結果は実際のエンジンとは大きく異なる実験条件で得られたものであるため、実際のエンジンを用いて検証する必要がある。なお、常温におけるディーゼル機関の試験では、GTLは他の燃料よりもHCHOの排出量が低くなると報告<sup>(16-18)</sup>がなされている。

#### 4. おわりに

温度条件を変化させて軽油を蒸発させ、各蒸発温度で発生する青白煙とHCHOの濃度を調べるとともに、ガスクロマトグラフによる炭化水素成分の分析を行った。以下に得られた主な知見を述べる。

- (1) 蒸発温度が低い場合には白煙が見られ、蒸発温度を上昇させていくと白煙に青煙が混じったような煙が見られるようになり、それ以上の蒸発温度では青煙が観察される。
- (2) 青白煙濃度はJIS2号>JIS特3号>GTLの順で低くなる。
- (3) 白煙粒子は燃料より低炭素数のn-パラフィン分が減少したような炭化水素成分で構成され、青煙粒子はそれに加え高炭素数のn-パラフィン分が減少したような成分で構成される。
- (4) 白煙から青煙に移行する蒸発温度よりもやや低い温度から、ガス中にHCHOが含まれるようになる。
- (5) HCHO濃度は、GTL>JIS2号>JIS特3号の順で低くなる。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、北見工業大学学生 関根弘之君(現：株式会社日本除雪機製作所)と猪野翔太君の協力を得た。実験装置の製作および運用では、北見工業大学技術部 橋本晴美氏と山田忠永氏にご助力いただいた。また、本研究で使用したGTL軽油は、昭和シェル石油株式会社より提供を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) T. Tanaka, S. Yasunishi, N. Watanabe and K. Kobashi : Development of a Measuring Meter and a Control Device for Diesel White Smoke, SAE Paper 892044 (1989)
- (2) 張瓏, 南利貴, 高月俊昭, 横田克彦: 直噴ディーゼル機関の白煙に関する基礎的研究(火炎特性と白煙, HCの関連), 日本機械学会論文集(B編), Vol.59, No.559, p.899-904 (1993)
- (3) M.K. Yassine, M.K. Tagomori, N.A. Henein and W. Bryzik : White Smoke Emissions Under Cold Starting of Diesel Engines, SAE Paper 960249 (1996)
- (4) I. Osuka, M. Nishimura, Y. Tanaka and M. Miyaki : Benefits of New Fuel Injection System Technology on Cold Startability of Diesel Engines -Improvement of Cold Startability and White Smoke Reduction by Means of Multi Injection with Common Rail Fuel System (ECD-U2), SAE Paper 940586 (1994)
- (5) 常本秀幸, 山田貴延, 石谷博美 : 急速停止機関を用いた直

接噴射式ディーゼル機関の研究(第1報, 低温の壁面に付着する燃料の研究), 日本機械学会論文集(B編), Vol.52, No.479, p.2746-2752 (1986)

- (6) H. Liu, N.A. Henein and W. Bryzik : Simulation of Diesel Engines Cold-Start, SAE Paper 2003-01-0080 (2003)
- (7) 常本秀幸, 石谷博美, 工藤隆司 : 直接噴射式ディーゼル機関の排気臭気の評価方法について, 日本機械学会論文集(B編), Vol.62, No.604, p.4268-4274 (1996)
- (8) D.W. Golothan : Diesel Engine Exhaust Smoke: The Influence of Fuel Properties and the Effects of Using Barium-Containing Fuel Additive, SAE Paper 670092 (1967)
- (9) 奥山喜久夫, 吉沢昭宣 : 気相における粒子の生成・成長の機構, エアロゾル研究, Vol.3, No.1, p.6-22 (1988)
- (10) 村山正 : 圧縮着火機関の青煙, 白煙, において, 内燃機関, Vol.14, p.50-59 (1975)
- (11) 鈴木孝司, 齊藤朗, 藤松孝裕, 林田和宏 : 簡易粒径計測システムの開発(第1報: 開発の経緯とシステムの概要), 微粒化, Vol.16, No.54, p.34-46 (2007)
- (12) 大江修造 : 蒸気圧, 物性推算法, 東京, データブック出版社, 2002, p.57-76
- (13) M.M. Roy, H. Tsunemoto and H. Ishitani : Effects of Injection Timing and Fuel Properties on Exhaust Odor in DI Diesel Engines, SAE Paper 1999-01-1531, (1999)
- (14) 塩崎忠一, 大谷哲也, 上光勲, 大西孝博 : 直噴式ディーゼルエンジンの白煙と臭いの研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.912247, p.57-60 (1991)
- (15) A. Naidja, C. R. Krishna, T. Butcher and D. Mahajan : Cool Flame Partial Oxidation and Its Role in Combustion and Reforming of Fuels for Fuel Cell Systems, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.29, No.2, p.155-191 (2003)
- (16) J.C. Ball, C. Lapin, J. Buckingham, E. Frame, D. Yost, J. Garbak, M.A. González, E. Liney, M. Natarajan and J.P. Wallace : Dimethoxy Methane in Diesel Fuel: Part 1. The Effects of Fuels and Engine Operating Modes on Emissions of Toxic Air Pollutants and Gas/Solid Phase PAH, SAE Paper 2001-01-3627, (2001)
- (17) J.C. Ball, C. Lapin, J. Buckingham, E. Frame, D. Yost, J. Garbak, M.A. González, E. Liney, M. Natarajan and J.P. Wallace : Dimethoxy Methane in Diesel Fuel: Part 2. The Effects of Fuels on Emissions of Toxic Air Pollutants and Gas/Solid Phase PAH Using a Composite of Engine Operating Modes, SAE Paper 2001-01-3628, (2001)
- (18) J.C. Ball, C. Lapin, J. Buckingham, E. Frame, D. Yost, J. Garbak, M.A. González, E. Liney, M. Natarajan and J.P. Wallace : Dimethoxy Methane in Diesel Fuel: Part 3. The Effect of Pilot Injection, Fuels and Engine Operating Modes on Emissions of Toxic Air Pollutants and Gas/Solid Phase PAH, SAE Paper 2001-01-3630, (2001)