

特集 高温高圧場におけるディーゼル噴霧の蒸発特性の研究*

Research of the DI Diesel Spray Characteristics under High Temperature and High Pressure Ambient Condition

-Diesel Spray Vaporization Analysis of Fuel Properties-

松岡弘芝

Hiroshi MATSUOKA

山下勇人

Hayato YAMASHITA

林 朋博

Tomohiro HAYASHI

北野康司

Koji KITANO

増田 誠

Makoto MASHIDA

In order to investigate the spray characteristics of diesel fuel under high temperature and high pressure ambient condition, a surrogate LIEF fuel was developed, which was mixed with various organic matter to realize diesel fuel properties. Using this test fuel, the effects of the fuel properties on the spray and vaporizing characteristics were investigated in a high temperature and high pressure chamber. Furthermore, the effects of these characteristics on the emission and flame behavior were also studied using a PCCI engine.

Key words: Diesel engine, Fuel injection, Spray, Laser, Vapor phase/Liquid phase, Visualization, Laser induced exciplex fluorescence, Quantitative analysis

1. まえがき

乗用車用の小型ディーゼルエンジンにおいて比出力・静粛性・排気性能等の向上が要求され、これらの要求に対し、燃料噴射装置にはコモンレール噴射システムが普及している。ディーゼルエンジンでは、その噴霧の質がエンジン性能（比出力・静粛性・排気性能等）に大きく影響するため、エンジン・噴射系開発において、エンジン筒内または同等環境場での噴霧挙動の詳細解析（蒸気濃度分布解析、混合気形成過程の解析など）が求められている。また近年、GTL、バイオ燃料に代表されるような燃料種の多様化から燃料性状の噴霧・燃焼への影響が着目されており、それらを含めた噴霧の定量的な解析が望まれている。これまでにディーゼル噴霧の混合気形成過程の解析としては、LIEF (Laser Induced Exciplex Fluorescence) 法 (Fig. 1) を用いた噴射系の蒸気濃度の解析例¹⁾³⁾がある。しかし、そのLIEF用燃料についての開発例⁴⁾は少なく燃料性状の違いを考慮した噴霧計測を困難にしている。

そこで本研究では、コモンレール噴射システムを搭載した小型ディーゼルエンジンにおける混合気形成過程の解明および、これを考慮したエンジン・噴射系への開発指針・方向性提案を目指し、燃料性状を考慮したLIEF用模擬燃料を試作した。そしてプレ燃焼式の高圧容器⁴⁾を用い、エンジン筒内と同等の環境場での、ディーゼル噴霧の混合気形成過程について考察を行った。

本稿では、開発したLIEF用模擬燃料技術の概要と、この技術を適用し燃料性状によるディーゼル噴霧蒸発特性の特徴とPCCI燃焼におけるエンジン排気性能および輝炎観察結果とを比較した事例を紹介する。

2. LIEF用模擬燃料の試作

2.1 LIEF試験装置及び多成分燃料への適用時の課題

Fig. 1に試験装置の概略図を示す³⁾。プレ燃焼式の高圧容器中に燃料を噴射し、所定時間後にレーザーを照射し、そのときの発光状態をバンドパスフィルタを通して分光することで、液相・気相を同時に撮影する。また発光強度から蒸気濃度を準定量的に解析できる³⁾。その解析した一例としてFig. 2は噴孔径の違いを調査したものである。小噴孔径からの噴霧は液相ペネトレー

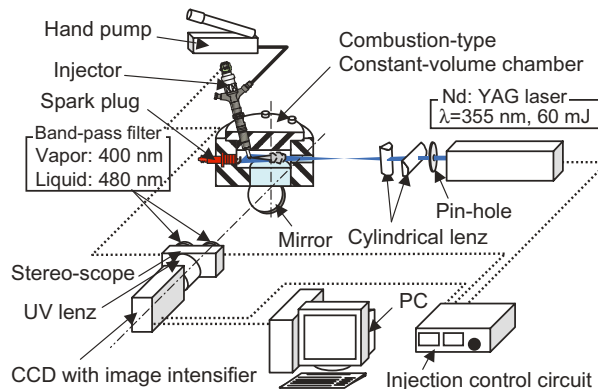


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 2008年2月13日 原稿受理

ションが短く（黒色部）蒸気相の形状（カラー部）、混合気分布に違いが見られるなど、噴孔諸元や噴射条件による相対的な比較に有効な技術である。

LIEF法で一般的に使用するテスト燃料は、蛍光を発しない直鎖系燃料（*n*-ドデカンなど）に、蛍光剤（TMPDとナフタレンなど）を溶解させて用いる。このLIEF用燃料を多成分燃料へ適用した場合の問題点を Fig. 3 を用いて説明する。ハンドリングの良さや相対的な比較のために用いている *n*-ドデカンはディーゼル燃料と蒸留曲線が異なる。*n*-ドデカンより沸点の高い *n*-テトラデカンと低沸点の *n*-ヘキサンおよび *n*-ドデカンを 5 MPa - 873 K の高温高圧場環境に噴射させたときの液相部の写真を右図に示す。未蒸発部の長さが高沸点成分では長く、低沸点成分では短くなり、成分ごと

に蒸発挙動が異なる。そのため蒸発特性を合わせこんだ LIEF 用燃料が必要である。また一般的な軽油そのものはレーザー照射により発光する成分を含有するため、レーザー照射により発光しない基材を選択する必要がある。これより、燃料性状の違いを考慮した噴霧計測に用いる LIEF 用模擬燃料の特徴として、

- (1) 照射レーザーにより自発光しないこと
- (2) その噴霧特性が対象燃料性状の噴霧特性を模擬すること

の二つを満たすことを狙い、自発光しない直鎖系飽和炭化水素であるアルカンを数種組合せることで、噴霧特性を模擬する LIEF 用模擬燃料の試作を行なった。

2.2 LIEF 用模擬燃料への要求物性値の選定

Fig. 4, Table 1 に示すように燃料性状の異なる燃料を用い、それぞれの燃料特性を模擬する模擬燃料を試作する際に求められる物性値の選定を行なった。代表的な噴霧特性として、高温高圧場（5 MPa, 873 K）における液相ペネトレーション、常温高密度場（0.88 MPa, 室温）におけるザウタ平均粒径（東日コンピュータアプリケーションズ：LDS1400A）および噴霧角の三つに着目し、軽油を含む五つの燃料について噴霧特性を評価し、物性値の蒸留点 T_{90} （単成分は沸点）および動粘度に対してプロットした。使用したノズルは噴孔径 $\phi 0.14$ mm, 噴孔数 6, 噴射条件は燃圧 80, 40 MPa, 噴射量 $30 \text{ mm}^3/\text{st}$, 解析点は着火遅れ相当の噴射開始後 0.5 ms 後とした。その結果を Fig. 5 に示す。実機筒内と同等な高温高圧場環境における液相のペネトレーションは T_{90} で、常温高密度場における噴霧角は動粘度で、ザウタ平均粒径はどちらの物性値でも単調変

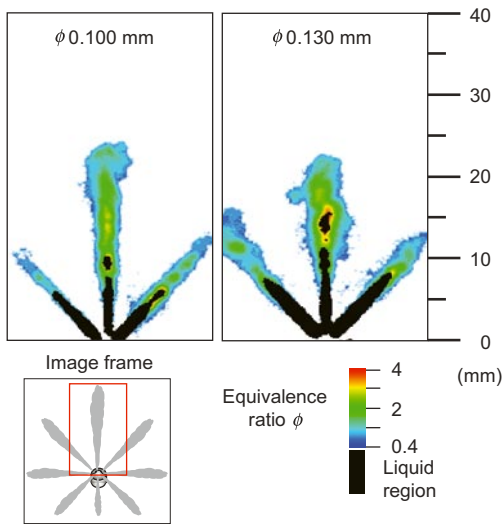


Fig. 2 Equivalence ratio distribution of spray on hole diameter

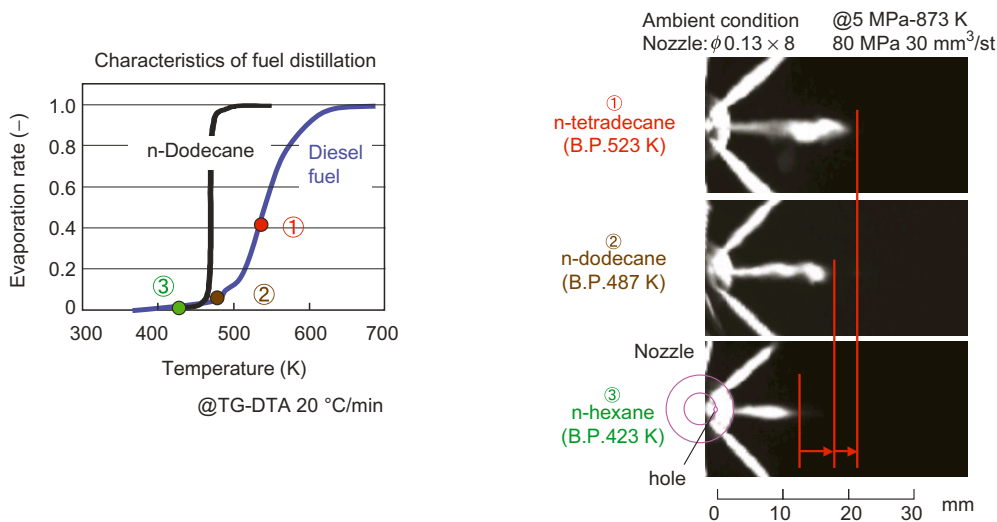


Fig. 3 Effects of boiling points on spray tip penetration

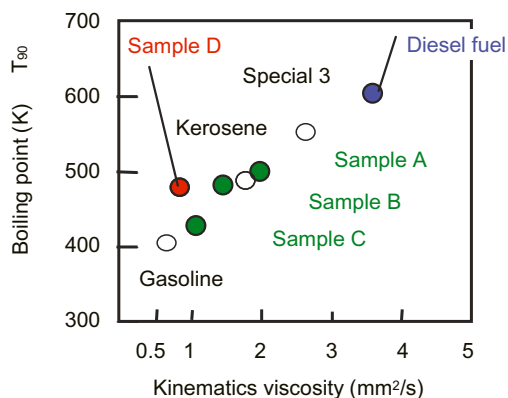


Fig. 4 Property of fuel oils

Table 1 Test fuels

Property Fuels	Kinematic viscosity (mm ² /s)	B.P. (T90) (K)	Density (g/cm ³)
Diesel fuel	3.5	603 K	0.843
A	2.0	503 K	0.873
B	1.4	510 K	0.783
C	1.0	426 K	0.818
D	0.84	492 K	0.756

Injection condition
Nozzle: φ0.14 × 6 Pcr: 80, 40 MPa Quantity: 30 mm³/st

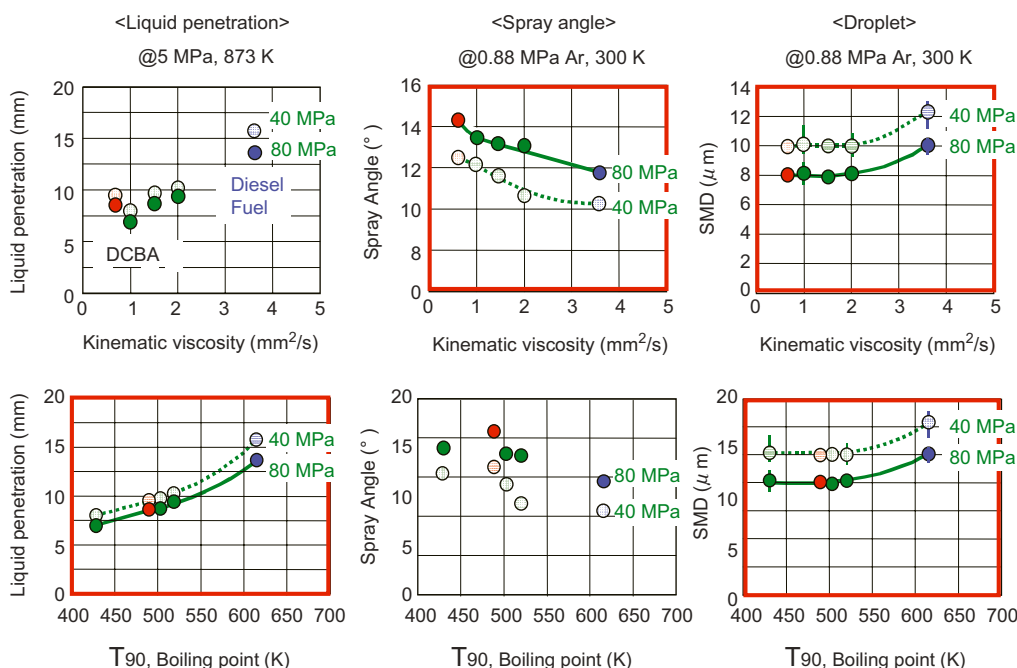


Fig. 5 Effects of fuel property on spray characteristics

化する傾向が得られた。これより、噴霧特性を模擬するために考慮すべき LIEF 用模擬燃料への要求物性値は、動粘度および蒸発特性を選定した。

2.3 動粘度の合わせ込み

Fig. 6 に単成分アルカンと動粘度との関係を示す。動粘度の計測はプラグ式粘度計（ジャパンコントロール製）を用いた。アルカンの動粘度は、常温で液体の n-ヘキサデカンまではカーボン数増により単調増加しており、炭素鎖の長さの影響が大きいと考える。ここで多種燃料の混合物の目標カーボン数を設定するため、試験軽油および Sample D の動粘度を当てはめ（矢印）、

その交点から目標のカーボン数を試験軽油：C15.6, Sample D：C9.8 とした。次に目標カーボン数を得るための混合方法について検討した。Fig. 7 は n-テトラデカン及び n-ドデカンに n-ヘキサデカンを溶解させていったときの動粘度を計測したものである。軽油の動粘度 3.5 mm²/s と交わる点の n-ヘキサデカンの比率をもとめ、簡易的なカーボン数の計算を行なった。

n-テトラデカンと n-ヘキサデカン：

$$C14 \cdot 0.19 + C16 \cdot 0.81 = C15.6$$

n-ドデカンと n-ヘキサデカン：

$$C11 \cdot 0.11 + C16 \cdot 0.89 = C15.5$$

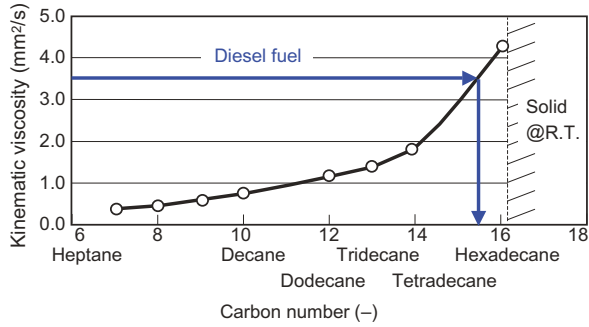


Fig. 6 Effect of carbon number on kinematic viscosity

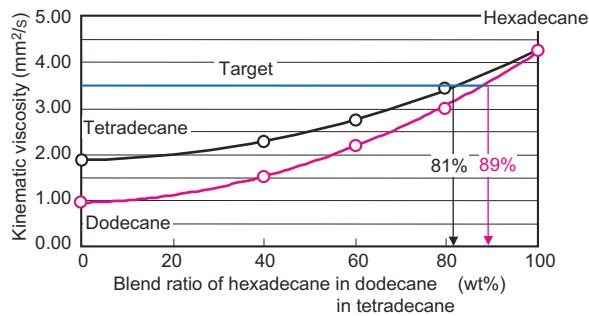


Fig. 7 Effects of blend ratios on kinematic viscosity

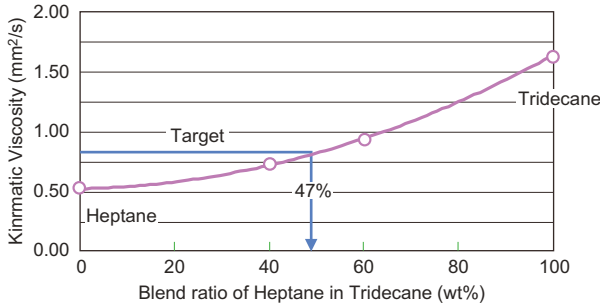


Fig. 8 Effects of blend ratios on kinematic viscosity

その結果は、いずれも C15.6, C15.5 と目標のカーボン数とほぼ一致した。

次に別の系についても検討を加えた。Fig. 8 は n-トリデカンと n-ヘプタンの混合割合を変えたときの動粘度を示す。Sample D と動粘度が一致したときの配合比から平均のカーボン数を計算すると

$$C13 \times 0.47 + C7 \times 0.53 = C9.8$$

となり、異なる系においても目標カーボン数 C9.8 に調整できるとともに、T₅₀ 相当の単成分 C10 と近い値となった。これより、単成分アルカンを用い目標カーボン

Table 2 Blend ratios of arcane

	Arcane	B.P.		No.1	No.2	No.3
①	Do decane	489 K	T ₁₀	50	10	30
②	Tetra decane	524 K	T _{50a}		40	20
③	Hexa decane	553 K	T _{50b}		40	20
④	Eicosane	610 K	T ₉₀	50	10	30

Target carbon number 15.6 (wt%)

数を混合により満たせば動粘度は合わせられると推定した。

2.4 蒸発特性の合わせ込み

軽油の気化曲線に対し、その蒸発率が 10%、50%、90% に (T₁₀, T₅₀, T₉₀) 相当する温度を沸点を持つアルカン (直鎖飽和炭化水素) を選び出し混合させた。配合比率は前節での動粘度合わせの手法を用い決めた。その結果を Table 2 に示す。なお試験した軽油燃料における T₅₀ 相当アルカンは融点が常温に近いので、溶解性を重視し n-テトラデカンと n-ヘキサデカンの 2 種の混合とした。

Fig. 9 に試験軽油および配合分率を変えた混合燃料の気化曲線を示す。蒸発特性の評価は TG-DTA (リガク機器製) に行なった。T₁₀ および T₉₀ 成分のみを混合した燃料 No. 1 は初溜点および終溜点が T₁₀ 成分および T₉₀ 成分で近似できるが二段の気化曲線となり中間が合わない。また T₅₀ 成分を加えた試料 No. 2 では、中間温度付近の蒸発が急峻となりすぎ試験軽油の気化曲線と合わない。これらに対して試料 No. 3 のように T₁₀, T₅₀, T₉₀ 各成分をほぼ均等に混合させた場合、気化曲線は試験軽油と良い一致を示した。そこで、動粘度および気化曲線を試験軽油に合わせこんだ LIEF 用模擬燃料 No. 3 を LIEF Fuel H と命名した。

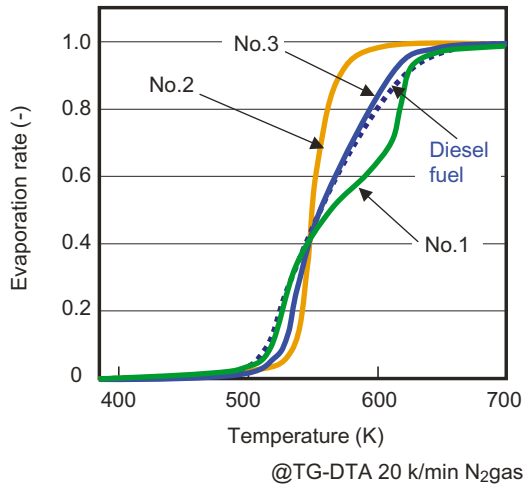


Fig. 9 Effects of blend ratios of arcane on evaporation rate

2.5 LIEF 用模擬燃料の噴霧特性評価結果

Fig. 10 に試験軽油, LIEF Fuel H および一般的に LIEF 用燃料として用いられている n-ドデカン⁴⁾ の高温高圧場における液相ペネトレーションを比較した結果を示す. 動粘度合わせおよび蒸発特性合わせを行なった LIEF Fuel H は, 実機筒内を想定した高温高圧場環境において, 液相ペネトレーションが軽油と似た特性を示しており, これを用いることで, 軽油の蒸発特性をより詳細に評価可能であると考えられる.

次に Fig. 11 に LIEF Fuel H と n-ドデカンを試験したときの蒸発挙動の撮影画像を示す. なお蛍光剤は

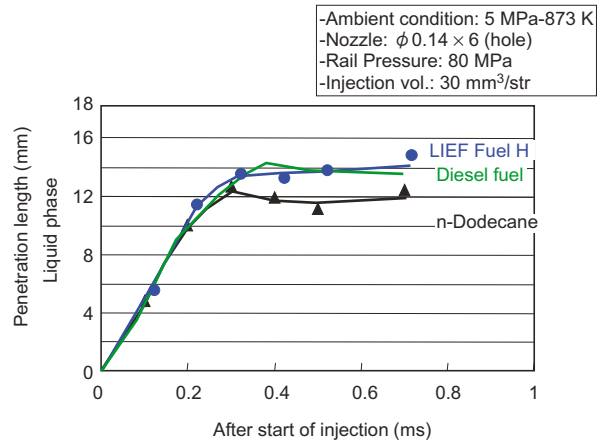


Fig. 10 Spray tip penetration of diesel and surrogate LIEF fuels

TMPD 1%と錯体形成剤としてナフタレン9%を溶解させた. LIEF Fuel H は, 噴射初期の液相が長く, 気相も狭角で強ペネトレーション噴霧であった. 次いで時刻 0.5 - 0.7 ms 付近では沸点の低いドデカンの蒸発が活発であり, 混合気の当量比も高くなっている. その後, 気相ペネトレーションは伸びる. 噴射終了時期 1.2 ms 以降においても, 高沸点成分の多い LIEF Fuel H は蒸発が遅れ, その後の拡散も悪い挙動がみられる.

Fig. 12 に Fig. 11 の取得画像から算出した各時刻における噴霧の当量比ごとの蒸発量を示す. 噴射初期である時刻 0.3 - 0.5 ms は蒸発量の当量比分布に大きな差は見られないが, その後 1.0 - 1.5 ms ではドデカンは蒸

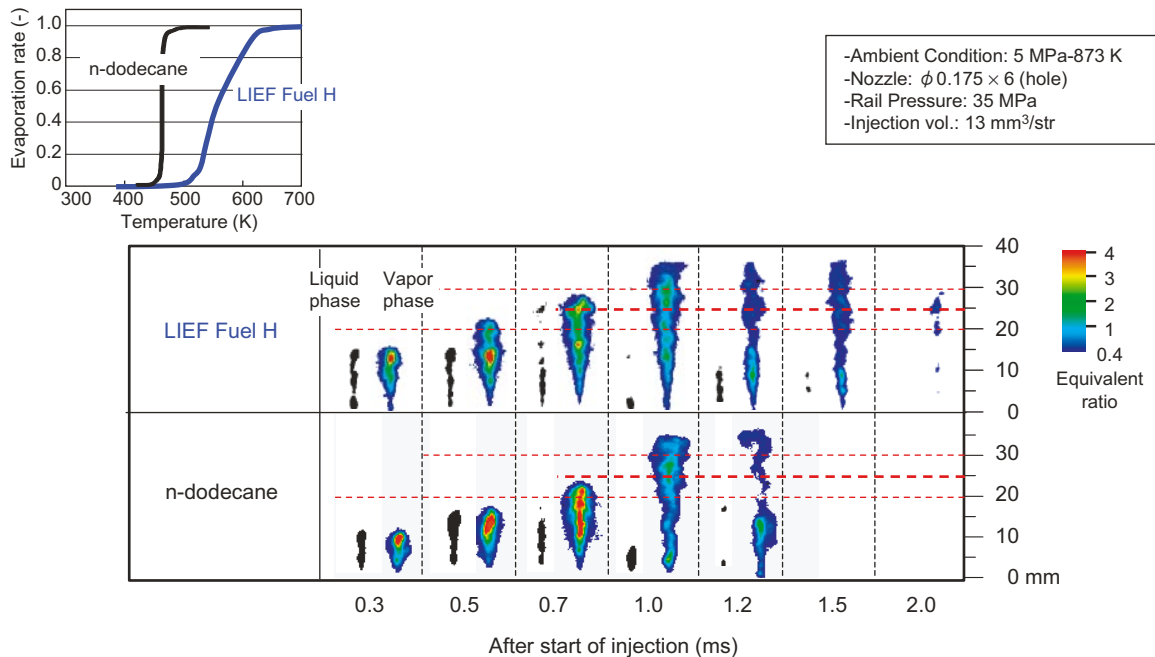


Fig. 11 Liquid and mixture distribution of surrogate LIEF fuels

発が早く、拡散が良いのに対して、LIEF Fuel Hは蒸発が遅く拡散が悪いことが分かる。

その関係の詳細を見るために、ドデカンと気化特性が交わる別のLIEF用模擬燃料LIEF Fuel Lを準備した。この蒸気量を算出し Fig. 13 にプロットした。噴射初期0.3 msでは大きな差はないが、0.5 msでは低沸点成分の多いLIEF Fuel Lの蒸発が活発、ついで1.0 msでは中沸点成分のみのドデカンの蒸発が活発、最後に1.5

msでは高沸点成分を含むLIEF Fuel Lの蒸発が活発であることが分かる。以上のようにLIEF用模擬燃料は蒸留曲線の異なる燃料の蒸発挙動を表現できたと考える。

3. 混合気形成過程の解析

種種の燃料をPCCI燃焼（早期噴射の予混合圧縮着火燃焼）で評価しスモークに差の見られた一つの燃料例を Table 3 に示す。そのときの燃料性状は、動粘度が

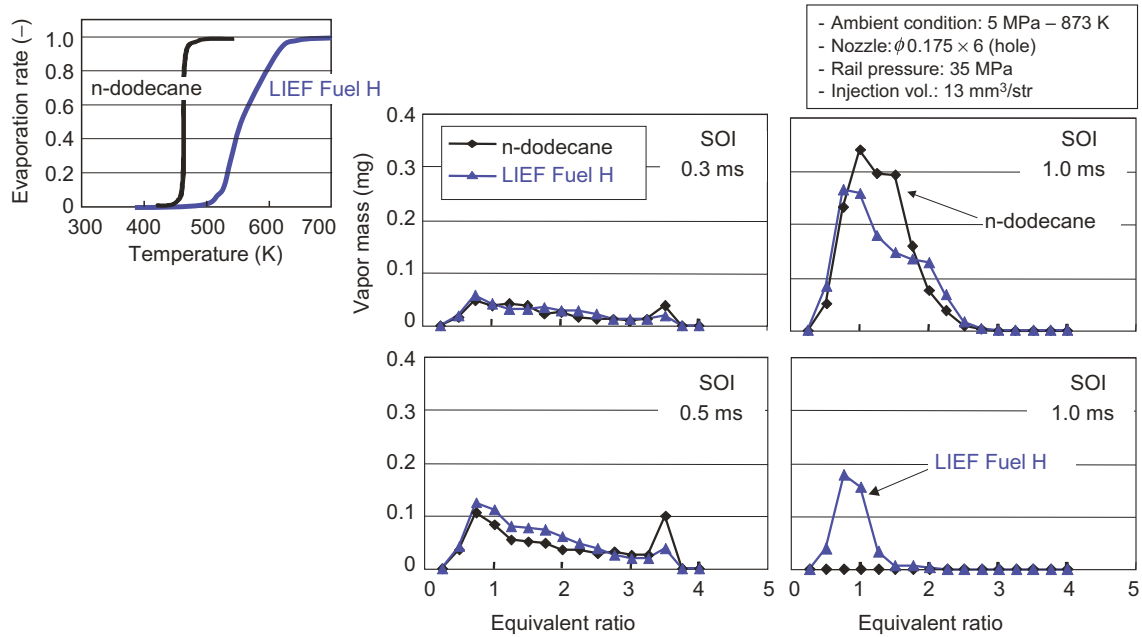


Fig. 12 Vapor mass distribution of surrogate LIEF fuels

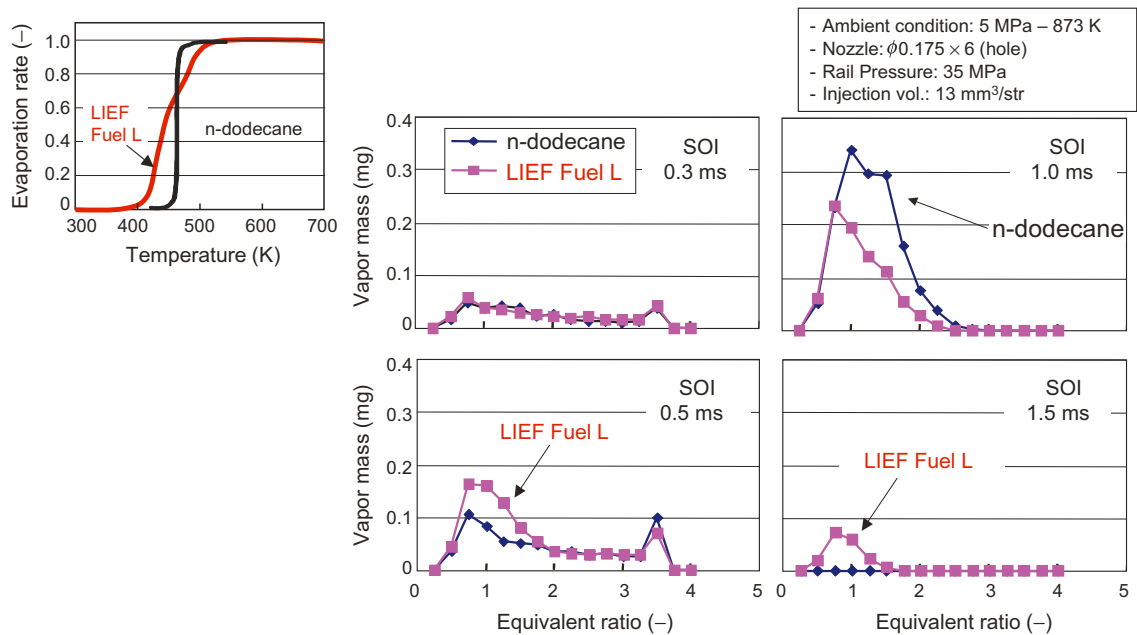


Fig. 13 Effect of evaporation rate on vapor mass

低く高沸点成分が少ない燃料特性であった。その排気特性は Fig. 14 に示したように等 NO_x で評価したときにスモークの排出が少ない排気特性を示し、燃焼観察においても輝炎の発生状況が異なった。そこで、確立した模擬燃料技術を用いて考察を加えることとした。

3.1 評価エンジンおよび試験条件と噴霧評価条件

試験エンジンは、2L直4（圧縮比15）、ノズル噴孔径φ0.14、噴孔数6孔である。エンジン運転条件は1650 r/min/40 Nm、燃圧35 MPa、噴射時期-25° ATDC

Table 3 Physical property of diesel test fuels for engine

Property	Diesel fuel	Test fuel for PCCI
Density (g/cm ³)	0.837	0.756
Kinematic viscosity (mm ² /s)	3.54	0.843
T ₉₀ (K)	614	492
T ₅₀ (K)	543	411
T ₁₀ (K)	469	378
Cetane number	55	40
Aromatics (%)	20.2	13.3

- Engine: 2L DI, Nozzle: φ0.175 × 6 (hole)
- Engine speed: 1650 r/min
- Injection vol.: 13 mm³/str
- Injection timing: 25° BTDC

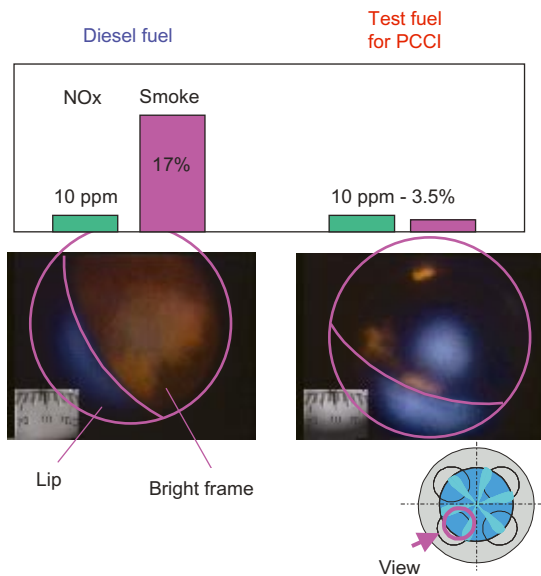


Fig. 14 Effect of fuel properties on pre-mixed charge compression ignition (PCCI) combustion

である。噴霧試験は Fig. 1 に示したプレ燃焼式高温高压容器にて実機筒内相当の環境場 Pa = 5 MPa, Ta = 873 K, ρa = 23 kg/cm³ で液相・気相データを取得し、解析した。燃料は前章で選定した模擬燃料を用い、そこに TMPD (1 wt%) とナフタレン (9 wt%) を溶解させた。

3.2 模擬燃料特性

先章の手順に従い試験軽油および PCCI 用の試験油の気化曲線を取得し、T₁₀, T₅₀, T₉₀ に相当するアルカンを選定し配合、それぞれに対応する LIEF 用模擬燃料を試作した。Fig. 15 に気化特性を示す。どちらの LIEF 用模擬燃料も初溜点から終溜点までほぼ近似していることが分かる。次に Fig. 16 に動粘度の温度特性を示す。模擬燃料（破線）の粘度は対象燃料（実線）の粘度とよい一致を示しており、また燃料温度が変化してもその傾向は変わらない。

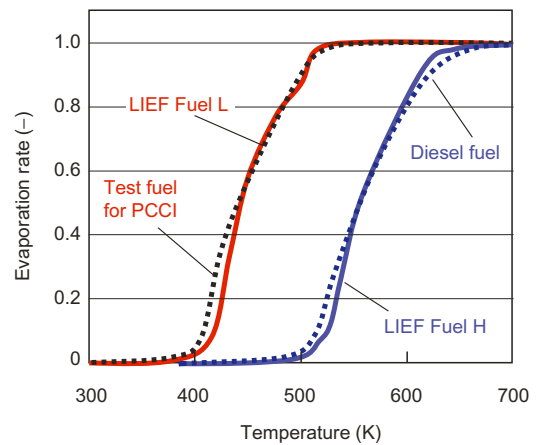


Fig. 15 Evaporation rates of surrogate LIEF and diesel test fuels

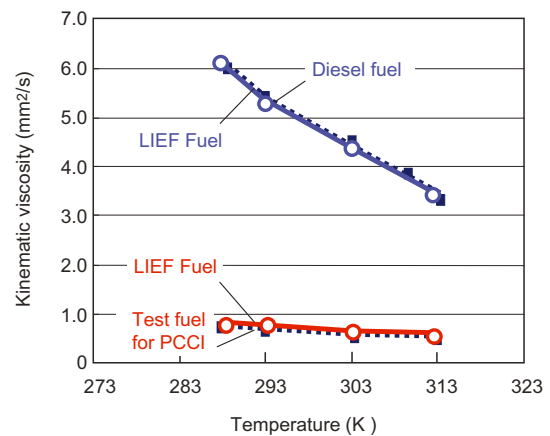


Fig. 16 Kinematic viscosity of surrogate LIEF and diesel test fuels

3.3 結果および考察

Fig. 17 に噴射時期固定で EGR 量を増減して (EGR 率を図中の添数字に示す) 着火時期を変えたときの排ガス特性を示す。EGR 量を増すと NO_x は低減するが、試験軽油ではスモークが急増する。これに対して軽質化された PCCI 用の試験油ではスモークが抑制され TDC 燃焼においても NO_x, スモークの両立が図れた。Fig. 18 に噴射開始から着火時刻相当までの試験軽油および PCCI 用の試験油に合わせこんだ模擬燃料の LIEF

噴霧画像を示す。図から LIEF Fuel H は LIEF Fuel L に比べ気相、液相ともに強ペネトレーションであり、液相が噴射開始後 0.7 ms 後で実機燃焼室キャビティ壁位置 (20 mm) に到達した。また気相は拡散が悪く、噴射終了後も濃い当量比域が先端まで広がるとともに、着火直前 (噴射開始後 2.0 ms) まで拡散が遅れている。これに対し LIEF Fuel L では液相ペネトレーションが短く、キャビティ壁位置まで到達しない。気相は初期 (0.3 - 0.7 ms) 噴霧幅が広く、その後気相ペネトレーション

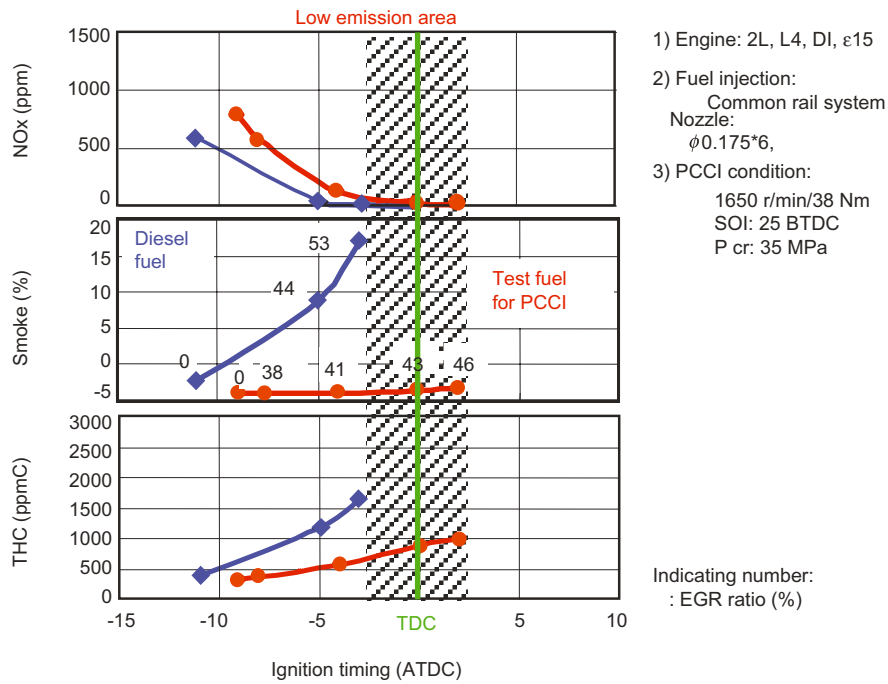


Fig. 17 Exhaust emission

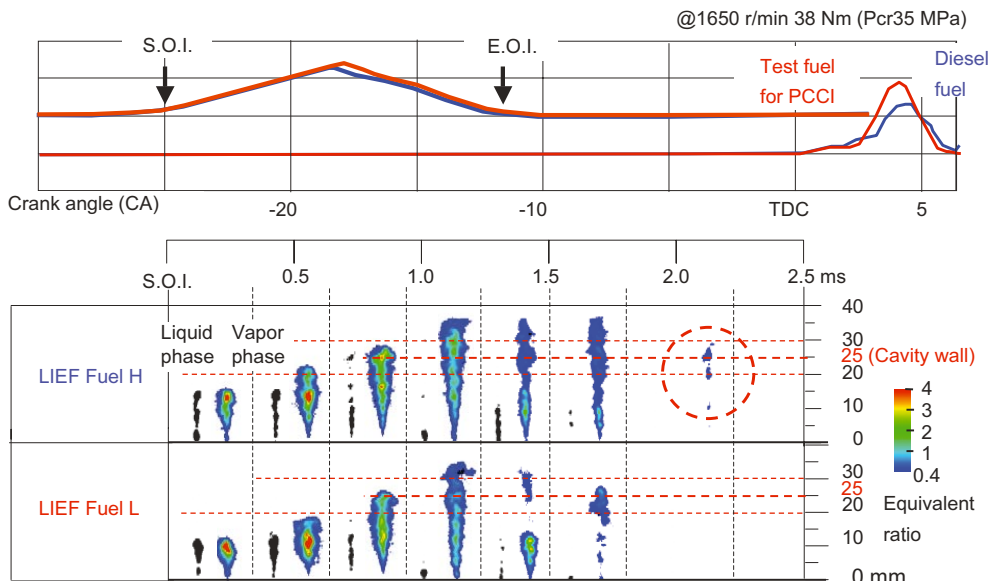


Fig. 18 Liquid and mixture distribution on surrogate LIEF fuels

は成長するが、噴射終了後 (1.2 ms) 以降では拡散が良く、着火時期直前 (2.0 ms) では撮影できないほど (当量比 0.4 以下) まで希薄化している。Fig. 19 に上記画像をもとに、時間における各当量比ごとの蒸気量を算出した。軽油相当に比べて LIEF Fuel L は早い時間から蒸発量は多いが、濃い等量比が少なく、特に噴射終了後の当量比 1 以上 (桃色部、黄色、青色部を示し、EGR 50%換算では当量比 2 以上に相当する) の蒸発量が多いことを確認した。

以上のことから、PCCI 用の試験油は試験軽油に比べ拡散が良いことから、EGR を多くしても、着火時期 (TDC) までに十分に空気と混合できるため低スモークとなったと考える。Fig. 20 に実機筒内の噴霧、燃焼可視化画像を示す⁵⁾。-20°、-15° ATDC の噴霧画像から軽油は噴霧解析と同様、PCCI 用試験燃料より噴霧ペネトレーションが長く、キャピティ壁に衝突の可能性が

あることが分かる。また、5°~20° ATDC の燃焼画像から、拡散の悪い試験軽油では、大きな輝炎塊が燃焼室全体に観られ、模擬燃料の解析で観られた拡散の悪さを裏付けられた。このように、本手法は、燃料の違いが混合気形成過程に及ぼす影響を明らかにすることに有効である。

4. むすび

(1) ディーゼル燃料 (多沸点成分) における蒸発特性の影響を把握するための LIEF 用模擬燃料の作製指針を示した。

- ・ 動粘度は対象燃料に近いアルカンのカーボン数と同等になるように配合することで近似できる。
- ・ 気化曲線は T₁₀, T₅₀, T₉₀ 成分のアルカンを均等配合することで近似できる。

(2) 模擬燃料を用いることにより、蒸留性状の異なる燃料の蒸発挙動を把握可能とした。本手法により、PCCI 燃焼において燃料の軽質化は、噴射終了後の燃料の蒸発・拡散を促進することが明らかになった。

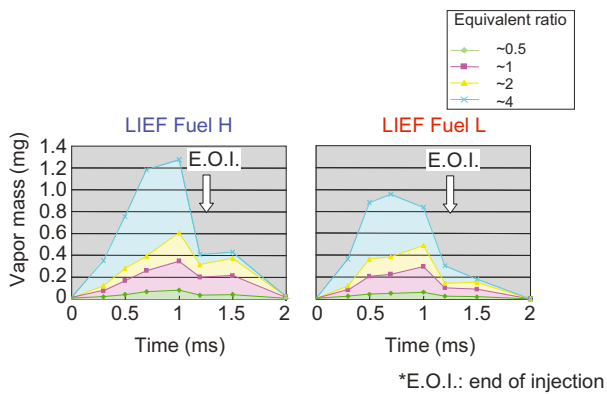


Fig. 19 Vapor mass distribution of surrogate LIEF fuels

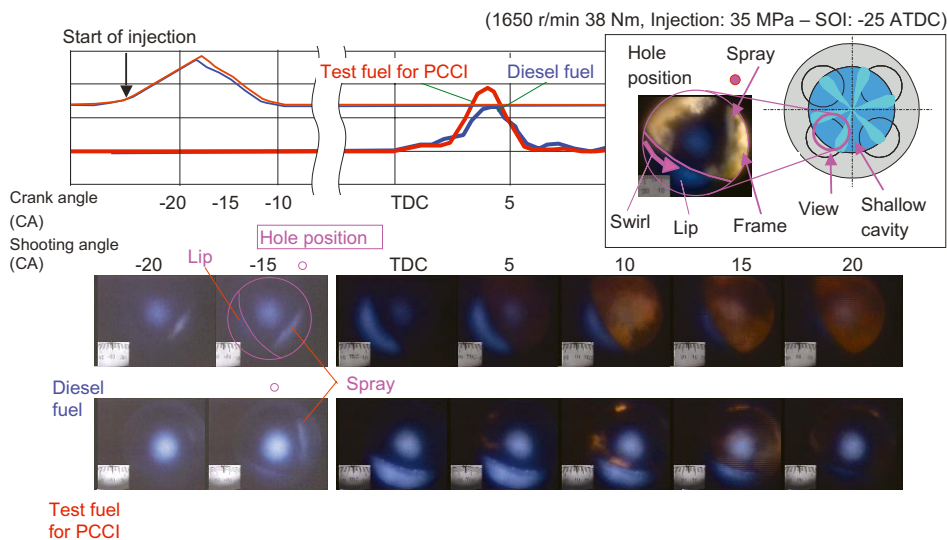


Fig. 20 Spray and combustion image inside cylinder on diesel test fuels

<参考文献>

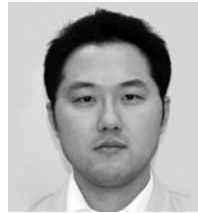
- 1) T. Kim, et al., SAE Paper 2001-01-3495.
- 2) 千田二郎, 他, 機論 B 63 卷 607 号 (1997-3).
- 3) 山下 勇人, 他, 2004 春季学術講演会前刷集, No. 48-04 (2004), pp. 7-10.
- 4) 山下 勇人, 他, 2005 春季学術講演会前刷集, No. 46-05 (2005), pp. 23-26.
- 5) 田中 武裕, 他, 2000 秋季学術講演会前刷集, No. 95-00 (2000), pp. 5-10.



<著 者>



松岡 弘芝
(まつおか ひろし)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
ディーゼル噴霧燃焼分野の研究に
従事



山下 勇人
(やました はやと)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
パワートレイン分野の研究に従事



林 朋博
(はやし ともひろ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
パワートレイン分野の研究に従事



北野 康司
(きたの こうじ)
トヨタ自動車(株)
パワートレイン本部
第2パワートレイン開発部
ディーゼルエンジン代替燃料の
燃焼技術開発に従事



増田 誠
(ましだ まこと)
パワートレイン機器事業グループ
特定開発室
噴霧燃焼解析(CFD)と新燃料対応
技術に従事