

## 21. 新燃焼方式によるディーゼル機関の高効率化・超低公害化に関する研究

担 当 機 関 国土交通省 独立行政法人 交通安全環境研究所 後藤雄一

分 野 大気環境

研究期間 平成 11 年～平成 14 年度

研究予算総額 87,534 千円

### 研究の背景と目的

NO<sub>x</sub> や粒子状物質による大気汚染の状況は依然として厳しい状況にある。これらの汚染物質はディーゼル車からの排出がその主要因の一つであり、ディーゼル車排出ガス的大幅な規制強化を盛り込んだ中央環境審議会の第 5 次答申が出された。一方、地球温暖化への対応から燃料消費効率の向上が求められ、物流輸送の主力であるディーゼル車に対して、排出ガスの低減と更なる高効率化が共に要求される状況である。

これまで、ディーゼル機関の燃焼改善による低公害化、高効率化の試みの大部分は燃焼室や噴射系の改善等、従来技術の延長上にあるものである。しかしながら、上記課題の達成はこれら従来技術の延長ではもはや不可能であり、新たな発想による技術開発を促進することが必要である。

このため、本研究では、理想的な燃焼形態である、均一予混合気の多点着火を、一般的なガソリン燃焼、ディーゼル燃焼の概念にとらわれない新しい燃焼方式で実現するためのコンセプトを追求することにより、ディーゼル機関の超低公害化、高効率化を幅広い運転領域で達成することを目的とする。

### 研究の成果

本研究は、高セタン燃料（高沸点成分）と蒸発特性の良い燃料（低沸点成分）の混合燃料を用い、混合燃料噴射時における低沸点成分の減圧沸騰現象を利用して噴霧の微粒化を促進して均一希薄混合気を形成するとともに、混合燃料に含まれる自己着火特性の良い燃料成分による圧縮多点着火により理想的な均一予混合気の圧縮着火を実現することをめざしている。

燃料噴霧及び混合気を広く拡散化した燃焼を行うことがディーゼル燃焼の低公害化への鍵となる。その究極である予混合圧縮着火燃焼では、着火制御が困難なため大幅な低公害化へのポテンシャルはあるものの実用性は限られる。従って本研究では、従来型ディーゼル燃焼を基本としながら、燃料の最適化等により混合気の均一化・拡散化を向上させることで、ディーゼル燃焼の基本的長所を維持しつつ低公害化を試みた。

直鎖系炭化水素では軽質分ほどセタン価が低い。炭素数の大きく異なる 2 成分を混合すると着火性はその中間値になるが、沸点には軽質側の沸点に近い温度から蒸発を開始、液相と気相が共存する領域がある。その領域では先に気相化した部分が残る液相部分を拡散する効果が期待できる。そのような燃料性状改善による排出ガス改善効果を定性的・定量的に明らかにする。

#### (1) 混合燃料の減圧沸騰特性に関する研究

n-ヘプタン又は n-ノナンと、それらと等価混合比となる n-ペンタンと n-トリデカン混合燃料の着火遅れを着火試験器で比較した結果、混合燃料の着火遅れは単一成分と変わらず、着火安定性を維持できることが分かった。LPG との混合燃料で定容燃焼と RCEM 実験から燃料温度と雰囲気圧力による減圧沸騰噴霧発達過程を調べ、ディーゼル機関への適用可能性を明らかにした。LIF 法により燃料蒸気濃度分布を測定し低沸点燃料を混合すると高沸点燃料の蒸発促進を確認した。

高沸点・低沸点燃料を混合することによる燃料特性への影響を単体燃料と比較することにより調べるために、レーザを用いた LIF 法（Lase-Induced Fluorescence 法）による混合燃料の噴霧特性と RCEM（急速圧縮膨張装置）を用いた混合燃料の着火特性について調べた。その結果、噴霧実験より、低沸点燃料が先に噴霧上流部で蒸発するため、高沸点燃料が噴霧下流部に存在する。また、この傾向は混合燃料の低沸点成分が増加するにつれ、より顕著になること、着火実験より、混合燃料の着火特性は高オクタン価成分の蒸発特性の違いによる影響をほとんど受けないことな

どが明らかになった。低沸点・高沸点混合燃料の噴霧特性を明らかにするために、定容容器およびRCEMを用いて減圧沸騰噴霧の発達過程に関する実験的解析を行なった結果、燃料温度の上昇により減圧沸騰効果が顕著に現れ、噴射直後に急激な蒸発を生じ、噴霧は半径方向に広く分散すること、燃料温度の上昇による蒸発促進により、噴霧先端到達距離は減少すること、霧団気圧力の減少により減圧沸騰効果が得られ、早期の微粒化・蒸気化により液相ペネトレーションは減少すること、噴孔近傍で得られる減圧沸騰効果は液相部全域での液滴濃度の減少を促すことを明らかにした。

### (2)減圧沸騰時のエンジン混合気形成と燃焼特性に関する研究

上記燃料のエンジン実験から同等の熱発生挙動とNO<sub>x</sub>排出が見られたが、PMは混合燃料使用時に同等の着火性の単一成燃料より40%も低減し混合燃料の拡散化向上を示した。単一、混合燃料及び通常軽油について燃焼可視化と二色法から二相領域の確認には不十分であったが拡散化に有効なことを明らかにした。更に実用的な燃料合成のために性状の異なる混合燃料を試作しそれらの燃料拡散効果により混合気形成に影響を与えることを示した。軽油と大幅に異なる混合燃料の蒸発過程ミュレーションモデルの調査・検討を行い、同志社大学のモデルは、定容容器の蒸発噴霧実験と比較的一致し有用であることが分かった。アルゴリズムの検討と運転条件での計算を行い、気筒内圧力、熱発生率の比較から各種経験定数の検討を行った。

高、低沸点成分混合燃料の減圧沸騰による拡散性向上効果を解析するため、n-ペンタンとn-トリデカンの混合燃料を用いてエンジン実験を行い、排出ガス挙動を軽油およびn-ノナン使用時と比較し、その効果を実験的に解析した。その結果、混合燃料による拡散効果は、着火遅れ期間内に均一希薄混合気を生成できるほどではないが、燃料過剰状態を解消する面で大きな効果があること、パイロット噴射によるNO<sub>x</sub>低減効果とあわせて排出ガス改善が可能であることなどが明らかとなった。噴霧の可視化によって減圧沸騰による何らかの効果をはっきりとは確認できなかったが、明確にするためにはエンジンの影響やエンジンで実験を行う際の光学的制約から減圧沸騰を分離することは最も良いと考える。そのためには光学的制約のより少ない定容燃焼器か急速圧縮装置による光減衰法か他の液滴径計測法、シャドウグラフ、シュリーレンに集中する必要がある。C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>:C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>+EHNの結果が含まれないならば、燃料PT図の広い二相領域が燃料蒸発と燃料空気混合にとって有効であることを示している。また、これらの結果はまたかなりよくT50(蒸留カーブの50%点)と相関することが示された。全体の結果は低T50は低PM排出のよい指標であることを示唆している。平行して気筒内における各過程のシミュレーションモデルの調査を行い、燃焼シミュレーションプログラムKIVAに組込モジュールのアルゴリズムを検討した。

### (3)各種運転条件に対応したシステム最適化方策に関する研究

新燃焼方式を実機に適用するために必要な制御方策を検討した結果、EGRの効果と吸排気制御について調べた。EGRによるNO<sub>x</sub>低減効果については燃料によらず同等であった。混合燃料でも、NO<sub>x</sub>を低減するほどの均一化は得られず、ボッシュスモーク濃度でも明確な差は見られなかったものの、吸排気制御では、可変バルブによる効果と過給を検討し、従来、予混合圧縮着火燃焼で課題とされた過早着火を可変バルブを利用することにより圧縮端温度を下げて過早着火を抑える可能性を議論した。あらに、従来の常識を超えた過給圧力で吸入空気をNAエンジンの5倍まで投入し、かつ噴射圧200MPaとの組み合わせで、噴射量を350mm<sup>3</sup>/stまで増加させ、エンジン性能と排出ガスの特性を調べた。空気量を増加させると燃焼が向上し、燃えきりが良くなり熱効率が向上することを示した。空気量を増加させかつP<sub>max</sub>の制約を緩和すると正味熱効率が向上する。また、空気量を増加させて希薄ディーゼル燃焼にしても、出力あたりのNO<sub>x</sub>重量が極端に増加することはない。空気量を増加させると、スモークは大幅に低減するのでPMの低減には好ましいことなどを実験的に明らかにした。

Pilot噴射を行った場合、NO<sub>x</sub>低減効果がみられ、混合燃料によるPM低減効果と併せてNO<sub>x</sub>、PM同時低減の可能性を有することが分かった。二色法による解析からすす排出の低減が期待できることが分かった。

本研究において、実現に際しては燃料性状、未燃燃料の排出対策等の様々な制約はあるものの、予混合圧縮着火方式を用いることにより、従来方式の延長では実現することが困難な低エミッション運転が可能であることを明らかに

した。従来の高圧噴射化による燃料噴霧の微粒化・拡散化を図るだけでは、NO<sub>x</sub> 生成を抑止するレベルの均一化を図ることは不可能である。そこで今後、現状を大きく上回る改善を行うには、従来のディーゼル機関では見られなかったレベルの均一化、燃焼室全体での希薄燃焼化を行うことが必要と考えられる。現在行われている低エミッション化燃焼の研究において、予混合圧縮着火は重要な要素となっており「次世代の低公害燃焼」として本研究が取り上げられた。このように当初目的とした飛躍的な改善を図る燃焼方式として、本研究は一つの有効な可能性を提示し、他への波及効果を含めて目的を達成することが出来た。

## 研究のまとめ

ディーゼル機関の有害排出成分の生成領域である燃焼室内の燃料過剰領域をなくす方法として、予混合圧縮着火方式を提案し、その排出ガス改善効果のポテンシャルとその改善要因および問題点について解析を行った。その結果、本方式はディーゼル排気長期規制以後を見据えた抜本的なエミッション改善に向け、従来方式の延長では実現することが困難な低エミッション運転が可能であり大きなポテンシャルを持つことを明らかにした。実用化には圧縮着火に適した添加剤の使用や従来のディーゼル燃焼における排出ガス改善方策の併用が必要である。

従来の高圧噴射化による燃料噴霧の微粒化・拡散化を図るだけでは、NO<sub>x</sub> 生成を抑止するレベルの均一化を図ることは不可能である。今後、現状を大きく上回る改善を行うには、従来に見られない高レベルの均一化、希薄燃焼化が必要と考えられる。現在行われている低エミッション化燃焼の研究において、予混合圧縮着火は重要な要素となっており「次世代の低公害燃焼」として一分野を作っており、既に既に次世代新型エンジンの燃焼方式として導入され始めている。当初目的とした飛躍的な改善を図る燃焼方式として、本研究は一つの有効な可能性を提示し他への波及効果を含めて目的を達成することが出来た。

研究発表

発表題名	掲載法/学会等	発表年月	発表者
(誌上発表)			
(1)Fundamental Study of Flash-Boiling Ignition by Fuel Ignition Analyzer	第 16 回内燃機関シンポジウム講演概要集 p73-78	2000 年 7 月	Kevin Sholes 小高松男,後藤雄一石井 素 鈴木央一
(2)低・高沸点混合燃料の二相領域を用いたディーゼル燃焼の改善	自動車技術会 2000 年秋季学術講演会講演概要集	2000 年 10 月	鈴木央一 石井 素 後藤雄一 千田二郎
(3)高オクタン価・高セタン価混合燃料によるディーゼル機関の燃焼機構に関する研究	日本機械学会 RC170 研究会研究報告書	2001 年 6 月	鈴木央一 後藤雄一 石井 素
(4)噴射系制御による混合燃料の二相領域を用いた燃焼改善要因の解析	自動車技術会 2001 年秋季学術講演会講演概要集	2001 年 10 月	鈴木央一 石井 素 後藤雄一
(5)新方式 DIディーゼル機関の数値解析に関する研究-格子数等基本計算定数の設定方法-	交通安全公害研究所研究発表会	2001 年 11 月	石井 素、鈴木央一、後藤雄一
(6)高沸点・低沸点混合燃料を用いた低エミッション燃焼法の提案	日本機械学会関西支部第 257 回講演会	1999 年 10 月	川野大輔 千田二郎 川上和也 堀田 勇 藤本 元
(7) Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems	SAE International Congress & Exposition 2000	2000年3月	Jiro Senda Daisuke Kawano Isamu Hotta Kazuya Kawakami Hajime Fujimoto
(8)高沸点・低沸点混合燃料を用いた燃焼過程の解析	日本機械学会関西支部第 75 期定時総会	2000年3月	川野大輔 千田二郎 川上和也 堀田勇 藤本 元
(9)低排気エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト	自動車技術会春季大会	2000年5月	川野大輔 千田二郎 川上和也 堀田 勇 藤本 元
(10)高沸点・低沸点混合燃料を用いた燃焼過程の解析	第 16 回内燃機関シンポジウム	2000年9月	川野大輔 千田二郎 川上和也 堀田 勇 藤本 元
(11)Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems 2 <sup>nd</sup> report : Analysis of combustion characteristics for the mixed fuels	SAE International Congress & Exposition 2001	2001年3月	Daisuke Kawano Isamu Hotta Kazuya Kawakami Hajime Fujimoto Jiro Senda
(12)低排気エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト	自動車技術会春季大会	2001年5月	川野大輔 千田二郎 川上和也 島田敦史 藤本 元
(13)二成分混合燃料における着火特性の実験的解析	日本機械学会年次大会	2001年8月	川野大輔 千田二郎 川上和也 島田敦史 藤本 元
(14)燃焼設計によるディーゼル機関の高効率化、低公害化に関する研究(第2報)噴射系パラメータによる低・高沸点混合燃	交通安全公害研究所研究発表会	2001 年 11 月	鈴木央一 石井 素 後藤 雄一

料の排出ガス改善効果の解析		月	小高 松男
(15)減圧沸騰を利用した拡散性向上による有害排出ガス低減に関する研究	日本機械学会 RC189 研究会研究報告書	2002年6月	鈴木央一 後藤 雄一
(16)Fuel Design Concept Research for Low Exhaust Emissions by use of Mixing Fuels	COMODIA 2001	2001年7月	Jiro Senda, Hajime Fujimoto, Daisuke Kawano, Kazuya Kawakami, Atsushi Shimada, Matsuo Odaka, Yuuichi Goto, Hisakazu Suzuki, Gen Shibata
(17)Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems 3rd report : Analysis of Spray Characteristics for Mixed Fuels	SAE International Congress & Exposition 2002	2002年3月	Daisuke Kawano, Kazuya Kawakami, Atsushi Shimada, Hajime Fujimoto, Jiro Senda
(18)低・高沸点混合燃料の二相領域を用いたディーゼル機関の燃焼および排気改善	自動車技術会論文集 Vol.33, No.2, April 2002	2002年4月	鈴木央一、石井素、後藤雄一、千田二郎
(19)低エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト	1999年自動車技術会春季大会	1999年5月	千田二郎
(20)Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems	The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International) in Seoul	1999年7月	J. Senda
(21)Spray Characteristics of Multicomponent Fuel	The 10 International Symposium on Flow Visualization	2002年8月	D. Kawano
(22)低エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト 第5報: 混合燃料の燃焼・排気特性	自動車技術会秋季大会	2000年11月	和田好充
(23)低エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト 第6報: KIVA3Vによる混合燃料噴霧の数値シミュレーション	自動車技術会秋季大会	2002年11月	川野大輔
(24)Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems 4th Report : Effect of Spray Characteristics of Mixed Fuel on Exhaust Concentrations in Diesel Engine	SAE International Congress & Exposition 2003	2003年3月	D. Kawano
(25)燃料設計によるディーゼル機関の効率化、低公害化に関する研究(第一報) - 試験用エンジンを用いた燃料の蒸発性向上による排出ガス改善効果の解析-	第30回交通安全公害研究所研究発表会講演概要	2000年11月	鈴木、石井、後藤、小高
(26) Comparison of Soot Production from Direct-Injected Single and Two Component n-Paraffins in a Compression Ignition Engine	交通安全環境研究所発表会	2001年11月	Kevin Sholes, Yuichi GOTO, Hajime ISHII, Hisakazu SUZUKI, Matsuo
(27) Study of the Effect of Boiling Point			

on Combustion and PM Emissions in a Compression Ignition Engine Using Two-Component Normal Paraffin Fuels	SAE2002-01-1871	2002年	ODAKA Kevin R. Sholes, Matsuo Odaka, Yuichi Goto, Hajime Ishii, and Hisakazu Suzuki
(28) Experimental and Numerical Analysis of the Impact of Flash-Boiling on Auto-Ignition of Hydrocarbon Fuels	JSAE20025332	2002年	R. M. Montajir, H. Suzuki, H. Ishii, Y. Goto, M. Odaka
(29) Combustion and PM Emission Behavior of 2-Component n-Paraffin Fuels under Flash Boiling	交通安全環境研究所発表会	2002年11月	Rahman M. Montajir, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto, Matsuo Odaka
(30) 沸点混合燃料の二相領域を用いたディーゼル機関の燃焼および排気改善	自動車技術会論文集 Vol.33 No.2	2002年	鈴木 央一、石井素、後藤 雄一、千田 二郎
(31) 燃料設計によるディーゼル機関の高効率化、低公害化に関する研究 (第3報) - 混合燃料の組成がディーゼル機関の排出ガスに及ぼす影響 -	交通安全環境研究所発表会	2002年11月	鈴木 央一, Rahman Montajir, 河合 英直, 石井 素, 後藤 雄一
(32) 単気筒エンジンによる高過給ディーゼル燃焼の研究 (第1報)	2003 春季自動車技術会講演前刷集 No.46-03	2003年	青柳、国島、朝海、栗飯原、小高、後藤

工業所有権

特許等の名称	願書年月日	公告番号	公告期日	登録番号

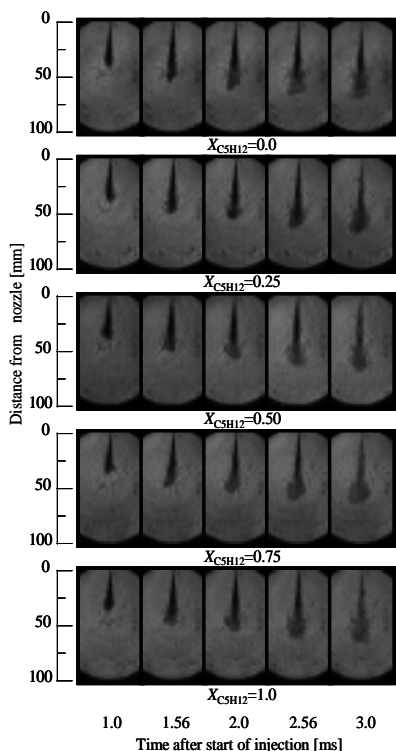


図1 C5/C13混合燃料噴霧のシャドウグラフ撮影画像

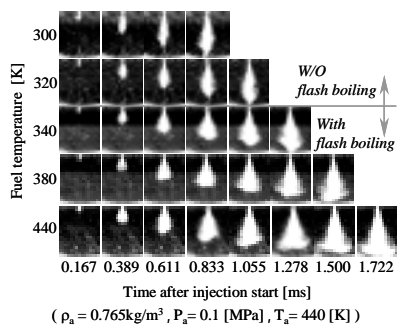


図4 各初期燃料温度におけるC5/C13混合燃料噴霧のシャドウグラフ画像

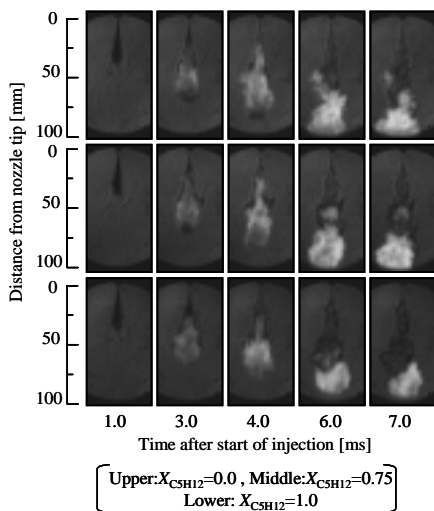


図7 C5/C13混合燃料における火炎のシャドウグラフ画像

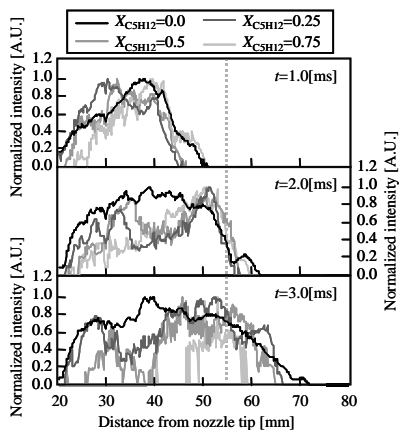


図2 噴霧軸方向における蛍光輝度分布 (テトラリン)

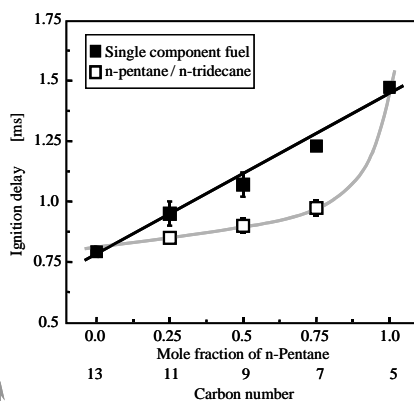


図5 混合燃料と単成分燃料の着火遅れ期間

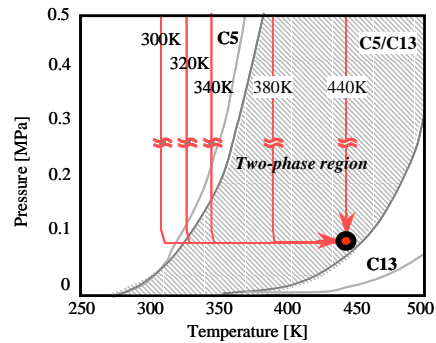


図3 各初期燃料温度とC5/C13混合燃料

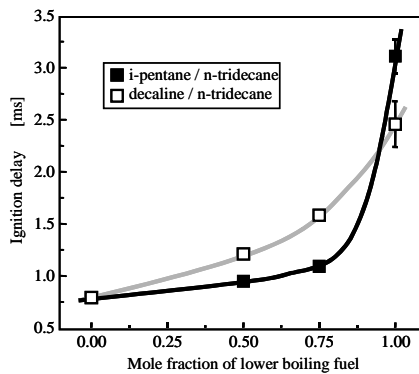


図6 難自着火成分の沸点が着火遅れ期間に及ぼす影響

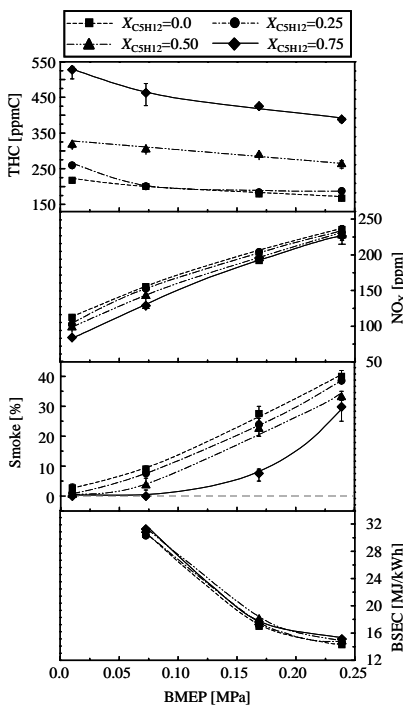


図8 C5/C13混合燃料の排気特性およびエネルギー消費率

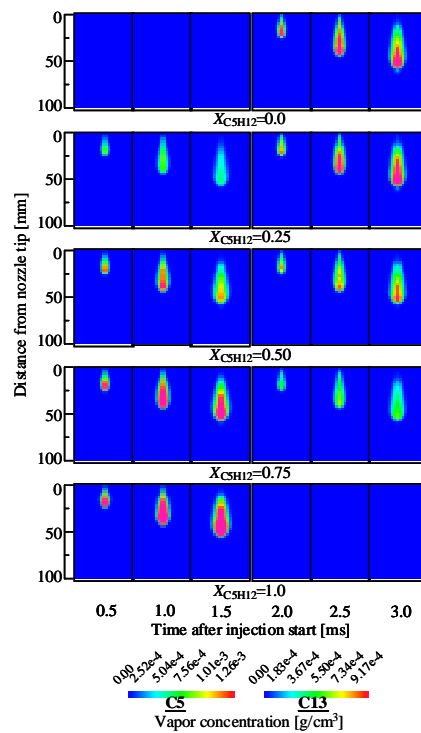


図9 各混合割合におけるn-pentane, n-tridecaneの蒸気濃度分布

表 1 エンジン諸元

Type	Single cylinder, 4 valve
Combustion chamber	Direct injection
Bore x Stroke mm	135.0 x 150.0
Displacement L	2.15
Compression ratio	16
Maximum power kW	25 / 2,000 rpm
Swirl ratio	2.2
Injection pump	Common rail

表 2 燃料諸元

	pure fuel	mixed fuel
component 1	C9H20	C5H12
mole fraction	1	0.679
component 2	-	C13H28
mole fraction	0	0.321
Density kg/L	0.718	0.691
Cetane Index*	58	55**
Vapor point temp. K	424	323
Dew point temp. K	424	463
Lower heating Value kJ/kg	44473	44348
Delta h 298K to 473K kJ/kg	722.29	722.51

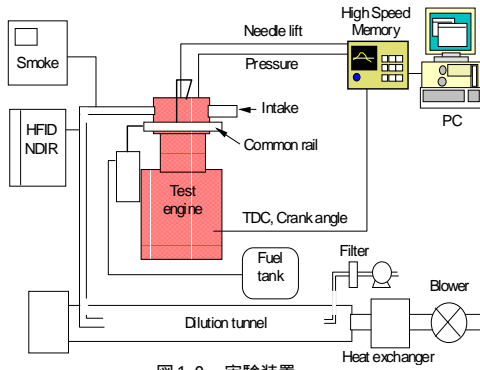


図 10 実験装置

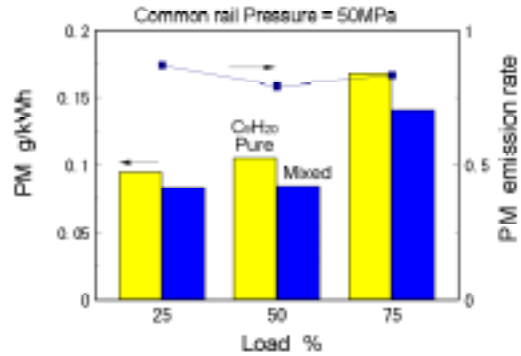


図 11 負荷による単一燃料および混合燃料の PM 排出量と混合燃料時の単一燃料に対する PM 排出率

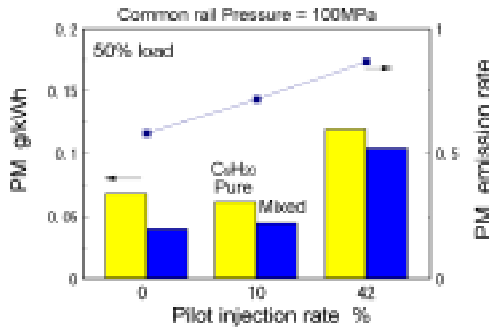


図 12 パイロット噴射割合による単一燃料および混合燃料の PM 排出量と混合燃料時の単一燃料に対する PM 排出率

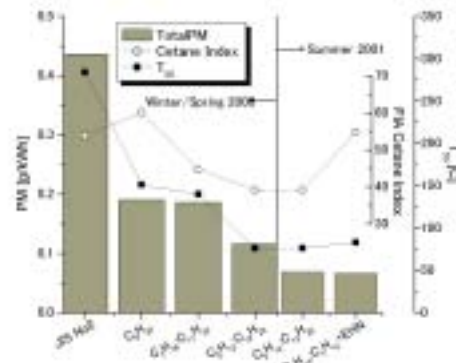


図 13 PM 測定

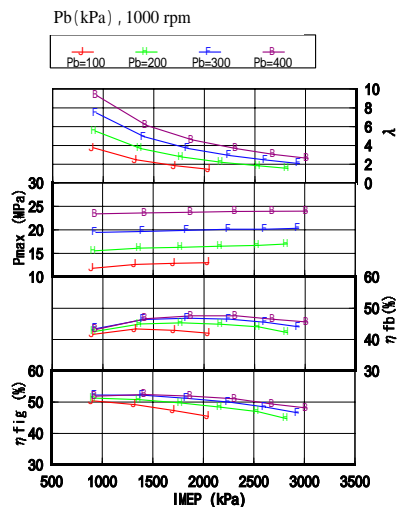


図 14 筒内圧と熱発生率への過給圧の影響 (Pinj = 200 MPa)

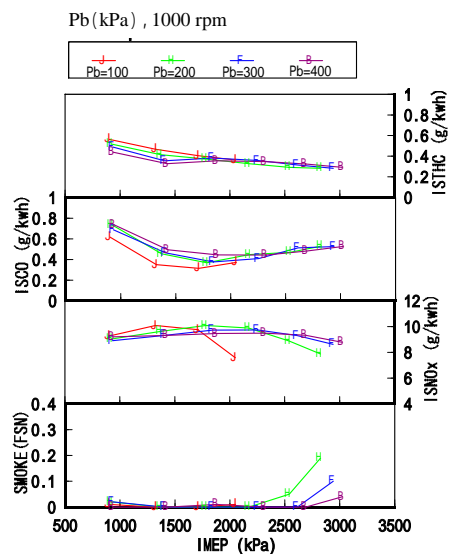


図 15 排気ガスへの過給圧の影響 (Pinj = 200 MPa)