

メタノール・水補助噴射によるディーゼル機関の
NO_x・排煙同時低減*石田 正 弘*¹, 植 木 弘 信*¹
坂 口 大 作*¹, 黒 川 清 司*¹Simultaneous Reduction of NO_x and Smoke based on Port Injection of
Methanol/Water Blend in a DI Diesel EngineMasahiro ISHIDA*², Hironobu UEKI,
Daisaku SAKAGUCHI and Kiyoshi KUROKAWA*² Dept. of Mechanical Systems Engineering, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-Machi, Nagasaki 852-8521, Japan

The auxiliary port injection system was built up using low pressure injectors installed on a common rail. Methanol/water blend was injected into each suction port of a four cylinder turbocharged DI diesel engine by controlling the injection timing and duration electronically. The optimum conditions of the injected amount of methanol/water blend and the blending ratio of methanol and water were investigated to obtain simultaneous reduction in both NO_x and smoke without increasing fuel consumption. In the theoretical study, the effect of methanol/water blend on combustion and NO formation was analyzed by using the two-zone model. The proposed auxiliary port injection of methanol/water blend combined with the pilot fuel injection could be a feasible countermeasure.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, NO_x, Smoke, Water, Methanol, Port Injection

1. まえがき

厳しい排ガス規制に対処するため、自動車用小型直噴ディーゼル機関では燃焼室内での燃料の均質化、希薄化が強く指向され、従来の燃焼改善技術との組合せによる実用化を目指した排ガス対策が検討されている。早期噴射による希薄予混合燃焼 (PREDIC)⁽¹⁾、希薄予混合燃焼に後期噴射による拡散燃焼を組合せた二段燃焼 (MULDIC)⁽²⁾、上死点後噴射と高スワールおよび大量EGRを組合せた低温予混合燃焼 (MK燃焼)⁽³⁾、コモンレールを用いた多段噴射予混合化燃焼⁽⁴⁾などの低NO_x・低微粒子燃焼法が提案されている。一方、水添加乳化油⁽⁵⁾、吸気加湿⁽⁶⁾、独立直接水噴射⁽⁷⁾、水/燃料層状噴射⁽⁸⁾、水選択排気再循環⁽⁹⁾など、水を積極的に利用した研究も従来に引き続き数多くなされている。筆者ら⁽¹⁰⁾の吸気ポート水噴射に関する実験的・理論的研究によれば、等価絶対湿度0.03kg/kgの水噴射により燃費の増加を伴うことなくNO_xが半減できている。また、含酸素燃料を用いれば、その種類によらず燃料中に含まれる酸素割合にほぼ比例してすすや排気微粒子

の低減率が増加することが示され⁽¹¹⁾、メタノール早期噴射予混合圧縮着火⁽¹²⁾の効果も調べられた。

本研究では、ディーゼル機関におけるNO_xと排煙の大幅な同時低減を目指して、混合媒体ポート噴射による部分的予混合化燃焼法を提案する。すなわち、高い比熱を有する水を吸気行程中にポート噴射することによってNO_xを、また低沸点かつ含酸素燃料であるメタノールを吸気行程中にポート噴射することによって排煙を同時低減する。かつてガソリン機関でノッキング対策として検討されたメタノールと水の混合媒体を、筆者ら⁽¹⁰⁾が構築している電子制御式ポート噴射システムを用いて吸気行程初期にポート噴射し、メタノール・水の混合比率およびその噴射量がディーゼル機関の燃焼、排気および性能に与える影響を実験的に調べた。また、2領域モデル⁽¹³⁾を用いて燃焼解析を行い、メタノール・水混合媒体のポート噴射によるNO_x・排煙同時低減効果を追究し、さらにメタノール・水混合媒体ポート噴射とパイロット燃料噴射の組合せによる最適化および複合効果について実験的に調べた。

2. 供試機関および実験条件

供試機関は、自動車用水冷4サイクル直接噴射式ターボ過給ディーゼル機関 (ボア100 mm, ストローク

* 原稿受付 2000年1月20日。

*¹ 正員, 長崎大学工学部 (〒852-8521 長崎市文教町1-14).
E-mail: hiro@net.nagasaki-u.ac.jp

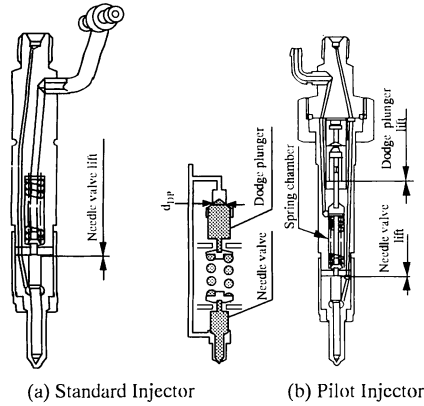


Fig.1 Section of tested injectors

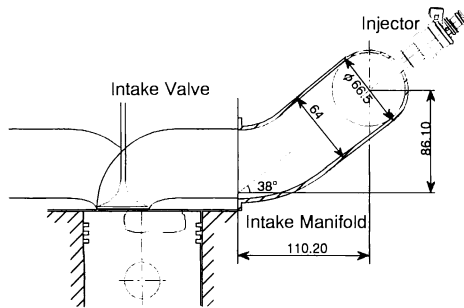


Fig.2 Location of port injector

105 mm, 4気筒, 圧縮比16, 最大出力95.6 kW(130 PS)/3,500.rpm : 三菱自動車工業(株)製4D31-T型)を用い, 水冷式インタークーラを別途装着することにより吸気温度を一定に保った. 噴射ポンプは, 燃料噴射時期を自由に設定できるハンドタイマーを装着した分配型ポンプを, また燃料噴射弁として図1に示す通常型噴射弁と吉津ら⁽¹²⁾によって開発されたドッジプランジャ式パイロット噴射弁を用いた. なお, パイロット噴射弁のドッジプランジャのシート径 d_{dp} は3.7 mmを選定し, パイロット噴射と主噴射の間隔はクランク角で5°とした. 使用したノズルは, 噴孔径0.26 mm, 噴孔数5, 等ピッチの多噴孔ノズルで, 開弁圧は18.5 MPaである. 図2に示すように, 吸気マニホールドの各気筒毎に吸気ポートへ向けてガソリンインゼクタを装着し, 電子式制御システムを用いて吸気弁開時期からメタノール・水混合媒体を0.5 MPaで噴射した. なお, 噴射期間を調整することによって混合媒体の必要噴射量を確保した.

実験は機関回転速度を1,750 ± 5 rpm, 機関入口での過給機入口吸気圧力を電動のプロワを用いて標準大気圧に, また機関入口吸気温度をインタークーラを動作することによって45 ± 1°Cに保ち, 正味平均有効圧を

Table 1 Injected amount of water and methanol

P_{me} (MPa)	(1) Water 100 %vol.		(2) Methanol 100 %vol.	
	$\Delta x_w = G_w / G_{air}$ (kg/kg)	G_w / G_{fuel} (kg/kg)	$\Delta x_M = G_M / G_{air}$ (kg/kg)	G_M / G_{fuel} (kg/kg)
0.40	0.010	0.459	0.006	0.284
	0.020	0.922	0.011	0.583
	0.029	1.341	0.016	0.971
0.83	0.010	0.313	0.009	0.288
	0.020	0.629	0.016	0.603
	0.030	0.915	0.026	1.169
			0.034	1.783

P_{me} (MPa)	(3) Water 75 %vol. Methanol 25 %vol.		(4) Water 50 %vol. Methanol 50 %vol.	
	$\Delta(x_w + x_M)$ (kg/kg)	$(G_w + G_M) / G_{fuel}$ (kg/kg)	$\Delta(x_w + x_M)$ (kg/kg)	$(G_w + G_M) / G_{fuel}$ (kg/kg)
0.40	0.011	0.539	0.011	0.531
	0.022	1.107	0.022	1.198
	0.033	1.673	0.033	1.990
	0.045	2.344	0.041	3.033
0.83	0.017	0.529	0.017	0.565
	0.034	1.106	0.033	1.235
			0.044	1.767
	0.040	1.341		

$P_{me} = 0.40$ MPaおよび0.83 MPa, 燃料噴射時期を上死点とした場合について, それぞれメタノールおよび水の混合比率および噴射量を表1に示すように変化させた. Δx_w は噴射された水の重量 G_w と吸入空気重量 G_{air} の比, Δx_M は噴射されたメタノール重量と G_{air} の比を表し, 表中には噴射されたメタノール・水混合媒体の重量と噴射された燃料重量との比も示した. なお, Δx_w は噴射された水の等価絶対湿度を表す. 供試燃料はセタン価約57のJIS2号軽油, メタノールは純度99.9%の工業用アルコール, 水は薬品用精製水を使用した. 筒内燃焼圧力, 燃料噴射圧力および針弁リフトの時間履歴をそれぞれのセンサーで検出し, 4チャンネル過渡燃焼解析装置CB-467 (小野測器製)を用いてクランク角度1/4°毎のデータとして同時サンプリングした. 得られたデータはパーソナルコンピュータへ転送されフロッピーディスクに収録された. 燃焼解析には, 連続した350サイクルに亘って計測されたアンサンプル平均の時間履歴を用いた.

3. 実験結果および考察

3.1 排気エミッションの低減 図3(a)および(b)は, 未燃炭化水素THC, 窒素酸化物NO_x, 排煙Smokeの各排出率および燃料消費率 b_e の混合媒体噴射量 $\Delta(x_w + x_M)$ による変化を示す. パラメータは混合媒体中のメタノールと水の体積混合割合(%)で, 縦軸の値は混

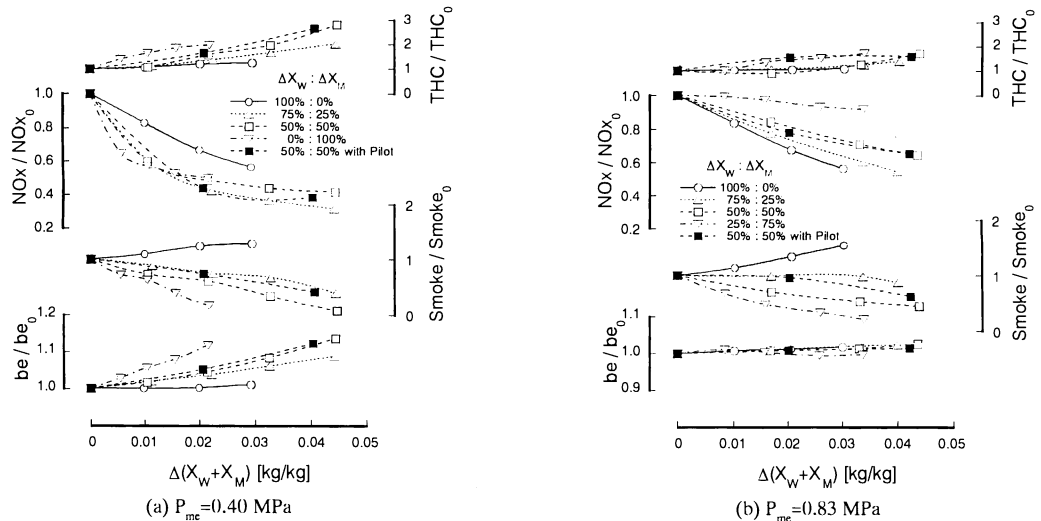


Fig.3 Change in exhaust emissions due to methanol/water (Without or with pilot fuel injection; $\theta_{inj} = TDC$)

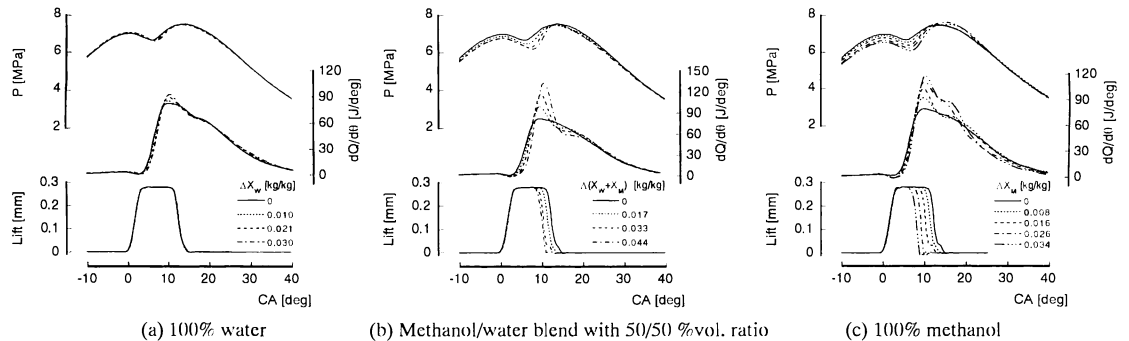


Fig.4 Change in combustion history due to methanol/water ($P_{me} = 0.83$ MPa; $\theta_{inj} = TDC$)

合媒体噴射量がゼロの場合の値で無次元化している。なお、燃費はメタノールの発熱量を考慮し、軽油換算燃費で示した。なお、図中の黒四角印はパイロット燃料噴射を行った場合で、詳細は後述する。

図3(a)に示す低負荷の場合、水・メタノール混合媒体の少量噴射によって、メタノールの混合比率に殆ど関係なくNO_xが顕著に低減され、吸気1kg当り約0.02kgの混合媒体噴射でNO_xがほぼ半減される。同時に排煙も低減され、メタノール混合比率が大きいくほどその低減率は大きい。ただし、噴射されたメタノールが完全には燃焼しないために、THCおよび換算燃費が増加している。低負荷において、NO_xと排煙の同時50%低減を得るためのメタノール/水体积混合比率は、THCおよび燃費の両増加率を考慮すると、25/75%vol.程度であろう。一方、図3(b)に示す高負荷の場合は、低負荷の場合とは異なり、メタノール混合比率を増加するほどNO_x低減率が小さくなる。ただし、排煙低減率は低負

荷の場合と同様で、メタノール混合比率とともに大きくなる。高負荷ではメタノールがほぼ完全に燃焼されるため、メタノール混合に基づくTHCの増加は低負荷の場合と比べてかなり小さいし、また、換算燃費の増加も殆どない。高負荷でNO_xと排煙の50%同時低減を達成するためのメタノール/水体积混合比率は50/50%vol.程度である。

3.2 燃焼履歴解析 図4(a), (b)および(c)は混合媒体噴射量 $\Delta(x_w + x_m)$ の増加に基づく燃焼時間履歴の変化を、筒内圧力 P (MPa)、熱発生率 $dQ/d\theta$ (J/deg)、主噴射ノズル針弁リフト $Lift$ (mm)について、(a)水100%の場合、(b)メタノール/水混合比率が50/50%vol.の場合、(c)メタノール100%の場合をそれぞれ示す。ここでは高負荷の場合に限定して燃焼挙動を示した。吸気中へのメタノール噴射量が増加するほど、圧縮行程終りの筒内圧力が低下し着火遅れが顕著に増大する。このため予混合燃焼期の最高熱発生率が増加し、燃焼が促進されて

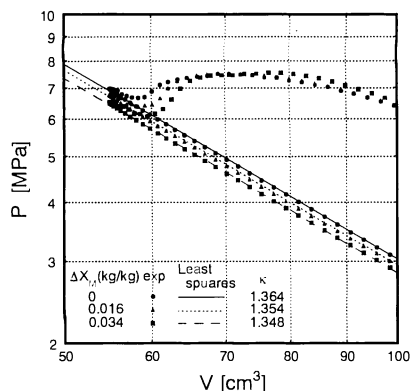


Fig.5 Decrease in compression polytropic index due to methanol ($P_{mc}=0.83$ MPa, $\theta_{inj}=TDC$)

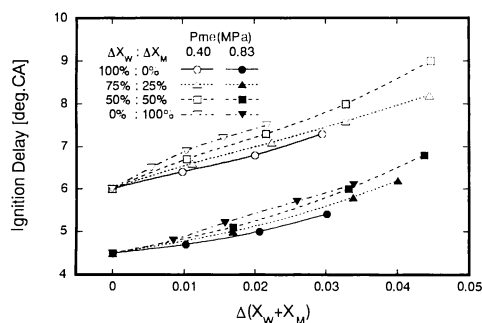


Fig.6 Ignition delay due to methanol/water blend ($P_{mc}=0.40, 0.83$ MPa, $\theta_{inj}=TDC$)

燃焼期間が短縮される。主噴射弁のリフト曲線から明らかのように、メタノール噴射量の増加とともに燃料噴射期間が短縮され主燃料噴射量が減少していること、および図3(b)に示した燃費の増加がほとんどないことから判断すると、吸気中に噴射されたメタノールはほとんど完全に燃焼しており、したがってTHCの増加も小さいし、排煙も減少する。すなわち、着火後の熱発生率の顕著な増加は、燃料噴霧周囲のメタノール予混合気の同時着火によることを示している。高負荷の場合、メタノール噴射量の増加によってNO_x低減率が悪化する理由がここにある。

図5はlogP-logVで示す指圧線図の圧縮行程終り部分であり、メタノール噴射量 Δx_M の増加とともに圧縮行程のポリトロブ指数 κ が顕著に減少している。このことは、メタノールの比熱が空気と比べて約3倍ほど大きく、筒内予混合気中のメタノール割合が増すほど比熱比が小さくなることに起因している。メタノール噴射量 Δx_M の増加によって圧縮行程終りの筒内圧力および温度が低下すること、およびメタノールの着火温度

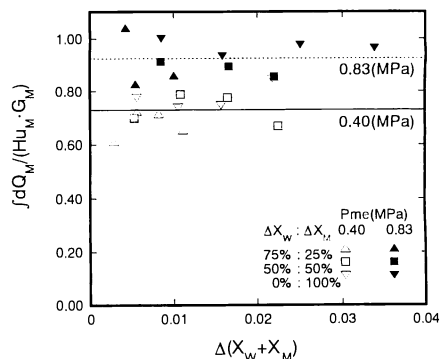


Fig.7 Burned fraction of injected methanol ($P_{mc}=0.40, 0.83$ MPa, $\theta_{inj}=TDC$)

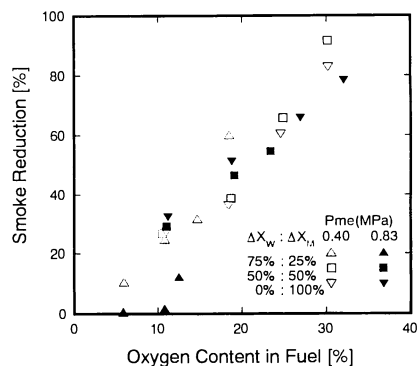


Fig.8 Smoke reduction due to oxygen content ($P_{mc}=0.40, 0.83$ MPa, $\theta_{inj}=TDC$)

が軽油よりはるかに高いことにより、図6に示すように着火遅れが増大する。着火遅れの増加は水噴射量 Δx_W の増加によっても生じるが、メタノール噴射量 Δx_M の割合が大きいほど顕著である。

図7は噴射されたメタノールの燃焼割合を示す。実測の筒内燃焼圧力時間履歴から1次元解析によって算定された熱発生率曲線において、軽油の積算熱発生率は混合媒体の噴射によって影響を受けないと仮定して算定されたメタノールの積算熱発生率である。推定値にはかなりのバラツキが見られるが、図7の点線および実線で示すように、推定されるメタノールの平均的燃焼割合は、高負荷で約92%、低負荷で約72%である。低負荷において、メタノールの燃焼割合がかなり低いことが、図3(a)に示したように、低負荷におけるTHCおよび燃費の顕著な増加原因になっている。

図8は燃料中の酸素含有割合と排煙低減率の関係を示す。この場合の燃料は噴射された主燃料およびメタノールの総和としている。図から分かるように、排煙は酸素含有割合にほぼ比例して低減され、低負荷およ

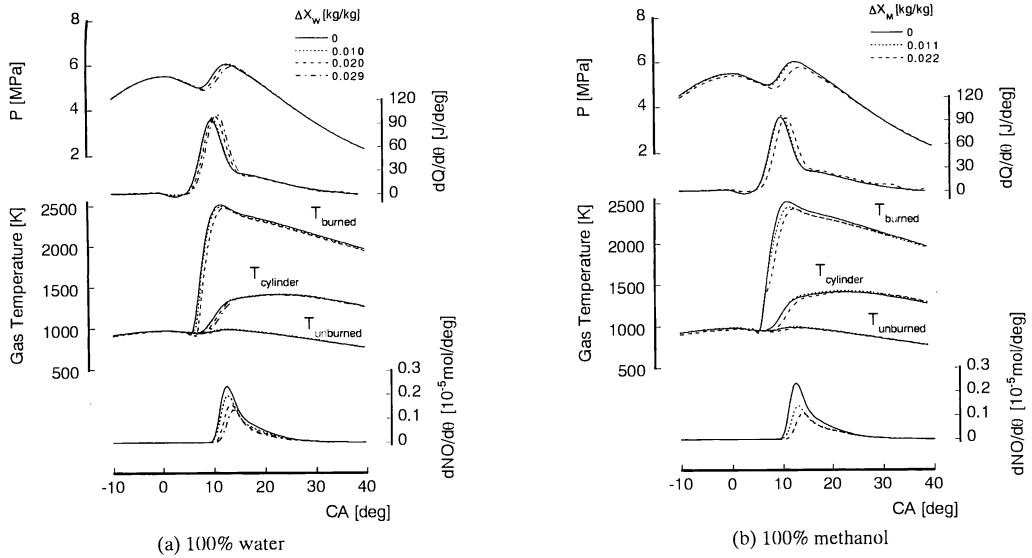


Fig.9 Combustion gas temperatures and NO formation rate based on two-zone model analysis (P_{me}=0.40 MPa; θ_{inj}=TDC)

び高負荷いずれにおいても、酸素含有割合30%のとき排煙は約80%低減される。なお、この場合の排煙の低減は、メタノールが含酸素燃料であること、低沸点のために予混合気形成され易いこと、低セタン価であるため着火遅れが増大し予混合燃焼割合が増加すること、さらに、高沸点の軽油の噴射量が減少することなどが総合された結果である。

図9(a)および(b)は、2領域モデルを用いて計算されたNO生成率の時間履歴を低負荷の場合について示す。図中のT_{burned}は燃焼域ガス温度、T_{cylinder}は筒内平均ガス温度、T_{unburned}は未燃域ガス温度およびdNO/dθはNO生成率(mol/deg)である。ポート噴射量の増加とともに着火遅れが増大するが、図4(a)および(c)に示した高負荷の場合と比べて、この低負荷では予混合燃焼の最高熱発生率の増加がかなり小さい。また、燃焼域の最高温度が低下し、最高燃焼圧力も低下するためNO生成率が顕著に低減される。その要因は、筒内未燃混合気中に空気よりも比熱の大きいメタノールおよび水の蒸気が存在することにある。なお、水より比熱の大きいメタノールの方がこの効果が大きいことが、図9の(a)と(b)の比較から分かる。吸気中のメタノールが完全燃焼しないで未燃メタノール蒸気として残存することが低負荷の場合の特徴であり、高負荷の場合と異なる。

3.3 冷却損失および体積効率 供試機関の冷却損失は、主機冷却水流量および機関出入口の冷却水温度を計測することによって算定した。図10はメタノール・水混合媒体の補助噴射に伴う機関冷却損失の

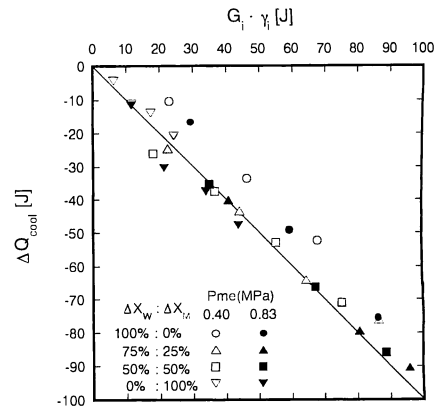


Fig.10 Relationship between cooling loss and the heat for evaporation of injected methanol/water blend (P_{me}=0.40, 0.83 MPa, θ_{inj}=TDC)

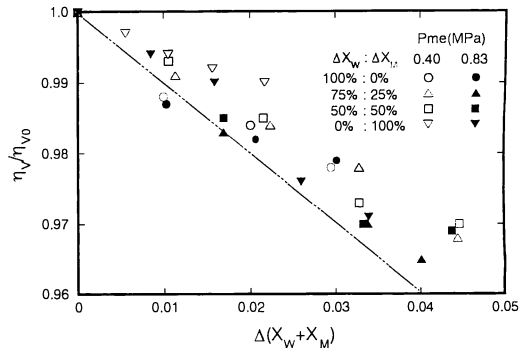


Fig.11 Volumetric efficiency of intake air alone excluding methanol/water blend (P_{me}=0.40, 0.83 MPa, θ_{inj}=TDC)

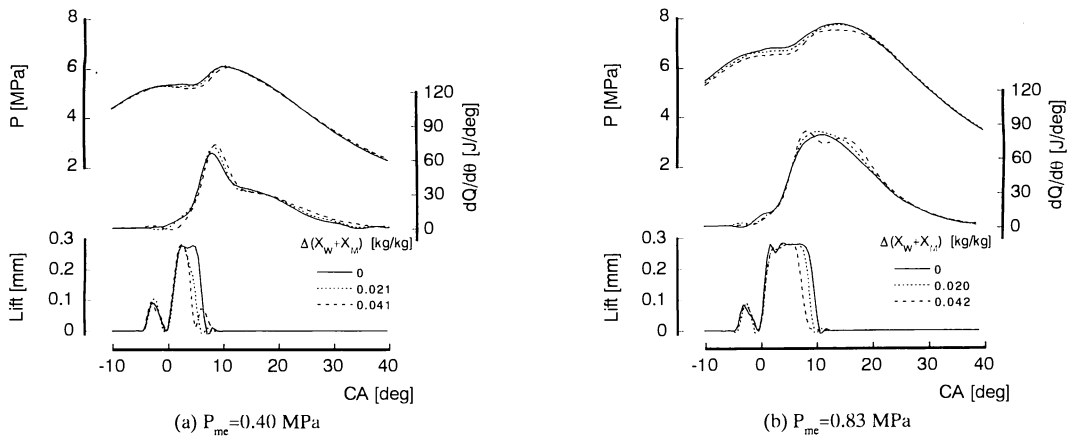


Fig.12 Change in combustion history due to methanol/water blend with pilot fuel injection (Methanol/water=50/50 vol. ratio; θ_{inj} =TDC)

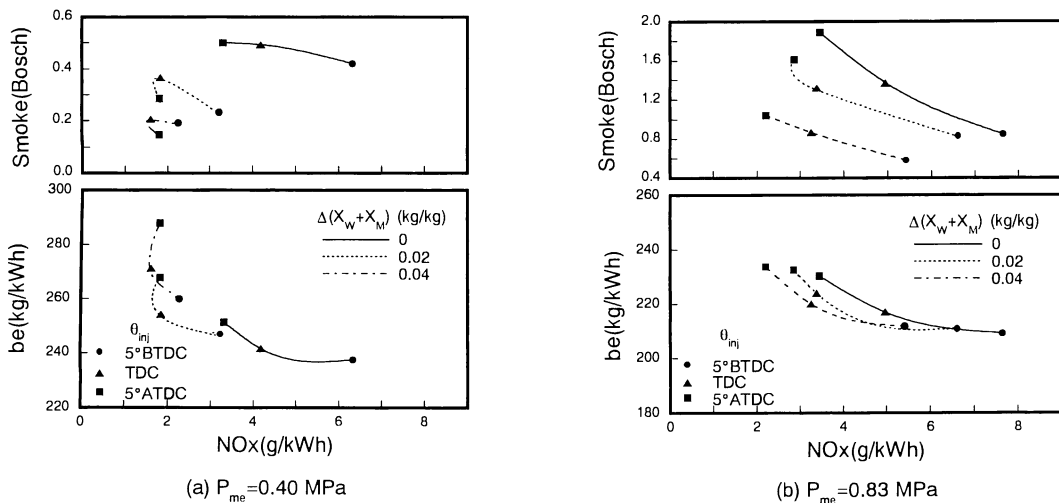


Fig.13 Improvement in trade-off due to methanol/water blend with pilot fuel injection (Methanol/water=50/50 vol. ratio)

低下量 $\Delta Q_{cool}(J)$ とポート噴射されたメタノールおよび水を全て蒸発させるに必要な熱量 $G_1 \cdot \gamma_1(J)$ との相関を示す。殆どのデータが直線の近傍にあることから、両者の値がほぼ等しい関係にあることが分かる。なお、 G_1 は1気筒1サイクル当りに噴射された混合媒体の重量であり、 γ_1 は混合媒体の蒸発潜熱である。すなわち、ポート噴射された混合媒体の殆ど全てが、吸気ポート壁、吸気弁、ピストン表面、シリンダー壁面などの燃焼室壁からの熱により気化していることが分かる。一方、多くのデータが直線より僅かに上側に位置していることから推定すると、補助噴射媒体の気化によって吸気が冷却されることが考えられる。

図11はポート噴射に基づく体積効率の変化を示す。なお、 η_{v0} は混合媒体をポート噴射しない場合を基準

にした体積効率であり、体積効率はポート補助噴射媒体を除いた空気のみ吸気効率で定義している。図中の実線は、補助噴射媒体を含む総吸気量がポート噴射量によらず一定と仮定した場合の空気のみ推定体積効率である。空気のみ吸気効率はポート噴射量の増加と共にほぼ直線的に減少するが、多くのデータは僅かではあるが実線の上側に存在し、総吸気混合気量が増加している。このことから前述の吸気冷却効果が推定される。

3.4 パイロット噴射の影響 図12(a)および(b)は燃焼時間履歴に及ぼすパイロット燃料噴射の影響を示す。図はメタノール/水体積混合比率が50/50% vol.の場合で、混合媒体噴射量を変化している。パイロット噴射に基づく燃焼が主燃焼に先立って熱発生率曲線上に

明確に現れており、主噴射開始時期にパイロット火炎が存在するために主噴射の着火遅れが短縮され、低負荷、高負荷とも、主燃焼開始時期は混合媒体噴射量の増加によって殆ど影響を受けない。また、パイロット燃料噴射により、予混合燃焼の最高熱発生率の値が図4あるいは図8に示した値より顕著に低くなっている。

なお、図3の黒四角印で示したように、THC、NO_xおよび燃費の混合媒体噴射量による低減率はパイロット燃料噴射によって殆ど影響を受けていない。ただし、パイロット燃料噴射によって予混合燃焼量が減少し、相対的に拡散燃焼量が増加するため、排煙低減率は白四角印に比べて小さくなっている。

図13(a)および(b)は、メタノール・水混合媒体ポート噴射にパイロット燃料噴射を併用した場合の排煙・NO_xおよび燃費・NO_xの背反関係を示す。50/50 %vol.の混合媒体噴射によってNO_xと排煙が同時に低減され、低負荷および高負荷いずれにおいてもNO_x・排煙の背反関係が顕著に改善されることが分かる。また、高負荷ではTHCおよび燃費の増加がないので、燃費・NO_xの背反関係も同時に改善されるが、低負荷ではメタノールの不完全燃焼のためTHCが増加し、そのために換算燃費が増加する。なお、これらの背反関係の改善は主としてメタノール・水補助噴射に基づくもので、パイロット燃料噴射に基づく背反関係の改善割合は小さい。パイロット噴射は混合媒体噴射に基づく着火遅れの顕著な増大を抑制するため、機関の振動・騒音を抑制することに寄与する。

4. むすび

メタノール・水の混合比率およびその噴射量がディーゼル機関の燃焼、排気および性能に与える影響を実験的に調べ、以下の結果を得た。

(1) メタノールの補助噴射によって、低・高負荷とも排煙は顕著に低減される。燃料中の酸素含有率30%で約80%の排煙が低減され、酸素含有率にほぼ比例して低減される。

(2) 高負荷では、メタノール予混合気がほぼ完全燃焼するためTHCの増加は小さく、換算燃費の増加もない。一方、低負荷では、メタノール予混合気の燃焼が不完全なため、メタノール噴射量とともにTHCが増加し換算燃費が増加する。

(3) 未燃メタノール蒸気が存在する低負荷では、NO_x低減効果が水単独噴射の場合より大きく、僅か0.02kg/kgの混合媒体補助噴射によりNO_xが半減される。NO_xおよび排煙の50%同時低減のためのメタノール/水体积混合比は25/75程度である。

(4) 高負荷では、メタノールの混合によりNO_x低減効果が水単独噴射の場合より抑制される。NO_xおよび排煙の50%同時低減のためのメタノール/水体积混合比は50/50程度である。

(5) メタノール、水およびそれらの混合媒体のポート噴射により着火遅れが増加するが、パイロット燃料噴射により、混合媒体補助噴射に基づくNO_x・排煙同時低減効果を損なうことなく着火遅れを短縮できる。

(6) メタノール・水混合媒体の殆どは燃焼室壁から熱を奪って気化するため、機関の冷却損失が低減される。また、混合媒体補助噴射量の重量割合だけ吸入空気の体積効率が減少する。

(7) いずれの負荷においても、メタノール・水混合媒体補助噴射により排煙・NO_xおよび燃費・NO_xの背反関係が顕著に改善された。

終りに、本研究の実施に当り、(株)ゼクセルよりパイロット噴射弁の提供があったこと、(財)矢崎科学技術振興記念財団から研究助成があったこと、また、当時長崎大学大学院学生であった今地久夫君(現在、ダイハツディーゼル(株))の協力があったことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 宮本武司・ほか2名, 自技論, 29-4 (1998), 35-40
- (2) Hashizume, T., ほか3名, SAE Paper, 980505 (1998)
- (3) 木村修二・ほか2名, 自技論, 29-3 (1998), 55-60
- (4) Uchida, N., ほか3名, SAE Paper, 982679 (1998)
- (5) Yoshimoto, Y., ほか3名, SAE Paper, 982490 (1998)
- (6) Boot, P., Proc. 20th CIMAC, Paper No.D67 (1993)
- (7) 田山経二郎・ほか5名, 機論, 61-590, B(1995), 3548-3553
- (8) 土佐陽三・ほか2名, 機論, 64-624, B(1998), 2744-2749.
- (9) 福田昌准・ほか3名, 機論, 61-586, B(1995), 2320-2326
- (10) Ishida, M., ほか3名, Proc. 22nd CIMAC, Vol. 4, 879-893
- (11) 宮本登・ほか4名, 機論, 64-620, B(1998), 1274-1280
- (12) Seko, T., ほか2名, SAE Paper, 980531(1998)
- (13) 石田正弘・ほか4名, 機論, 60-573, B (1994), 1845-1851
- (14) 吉津文嗣・中山満茂, 機論, 95-559, B(1993), 880-885