



汎用火花点火メタノール機関におけるNO_x低減対策 が機関性能に及ぼす影響

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 林, 重信, 久保田, 譲, 澤, 則弘 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/773

汎用火花点火メタノール機関における NO_x 低減対策が機関性能に及ぼす影響

林 重信・久保田 譲・澤 則弘*

The Effect of Reducing Methods for NO_x Concentration on the Property of Spark-Ignition Methanol Engines

Shigenobu HAYASHI, Yuzuru KUBOTA, Norihiro SAWA *

Abstract

Methanol as a fuel of internal combustion engine, it can be burnt in lean mixture region from a oxygenic fuel, and it should have high theoretical efficiency because it is high Octane Number.

There are hopful methods and activitily investigated for reducing the NO_x concentration, that are the water-fuel blend method and the exhaust gas recirculation method (EGR). But, they raised a new questions on engine property, that these methods make worse the combustion character in cylinder.

In this report, to examine the effects of above methods for reducing the NO_x concentration on the engine performance and combustion variance of Methanol Fueled Four-Cycle Spark Ignition Engines, with carburetor and with electronically controiled fuel injection into the intake manifold. Moreover, their results were compared with gasoline fueled ones. The results obtained as follows:

Methanol fuel is useful for the improvement of exhaust emission without loss of engine performance, if select the optimum operating conditions.

1. まえがき

メタノール (CH₃OH) は含酸素燃料のため可燃範囲が広く、希薄混合気運転が可能なので排気対策のうえでは有利となり、オクタン価が高いため高圧縮比運転ができ、サイクル論的に高熱効率が得られる。排気ガス中で低減が最も困難な窒素酸化物 (NO_x) に関しては、

- (1) 水の添加によってシリンダ内の熱容量を増大させ、さらに気化潜熱を利用する。
- (2) 排気再循環 (EGR) をさせてシリンダ内ガスの熱容量を増大させると燃焼温度の低下を招き、低減が期待できる。

内燃機関に水を注入した場合の熱力学的考察や実験的研究はガソリン機関のノッキングに関連して古くから行われ不活性ガスとしての作用、熱損失の減少、吸気温度の低下などの様相が解明されている¹⁾。EGR についても、ガソリン機関やディーゼル機関で実用化されている。筆者の一

*茨城大学工学部

人は、気化器式メタノール機関に水添加や EGR を実証した結果を報告²⁾したが、それは実験結果を示し、定性的考察を試みたに過ぎない。そこで、本報では水冷 4 サイクル頭上弁式機関を改造し、純メタノール、含水メタノール燃料を気化器で供給した場合と純メタノールを気化器または電子制御燃料噴射弁 (EFI) から吸気管内噴射し、EGR を試み、水添加および EGR の効果をより明確にしたので報告する。

2. 実験装置及び方法

2. 1 実験装置

供試機関は横型水冷 4 サイクル火花点火機関で、メタノール運転するため気化器の主ジェットを大きく (面積比 $(15/6.5)^2$ 倍)、圧縮比を高く (6.2を8.4に) 改造した。その主要諸元を表-1 に装置の概略を図-1 に示す。吸入空気量計測系統 (サージタンク 1、丸形ノズル 2、マノメータ 3、温度計 4)、燃料供給系統 (燃料タンク 5、燃料流量計 9、管壁加熱器 10、)、供試機関 11、動力計 12、回転計 13、排気管系統 (排気温度計 14、消音器 15)、EGR 系統 (冷却器 16、サージタンク 17、温度計 18、マノメータ 19、丸型ノズルとマノメータ 20)、排気分析系統 (NO_x および HCHO 計測抽出孔 21、排気抽出孔 22、ガスクロマトグラフ 23、同記録計 24、CO メータ 25)、燃焼解析系統 (パルスマーカー 26、27、指圧計 28、イオンプラグ 29、増幅器 30、モニタ CRT 31、データレコーダ 32、統計解析器 33、同記録計 34) などから構成されている。

2. 2 排気分析

一酸化炭素 CO 濃度は NDIR、全炭化水素 THC 濃度は FID を用いてともに連続測定した。このとき THC 濃度はメタン CH₄ を校正に用い ppmC で表した。NO_x 濃度は亜鉛還元ナフチルエチレンジアミン法 (JIS K0104)、アルデヒド類 R・CHO 濃度はその概略値を知るためにホルムアルデヒド H・CHO 検値管法、そして排気中の未燃の CH₃OH および CH₄ 濃度はスクワラン カラムを用い、FID 付きガスクロマトグラフによってそれぞれ分析した。

2. 3 燃焼特性値

シリンダの燃焼圧を正確に計測するため、シリンダヘッドを加工し、燃焼室壁面に直接指圧計を取り付け、指圧波形、上死点マーク及びイオン電流値をデータレコーダへ記録した。これを必要に応じてモニタしながら再生し、400チャンネルの統計解析器に通して各種の燃焼特性値を求

表-1 供試機関の諸元

項目	略号	OHV Eng.
形 式		横形水冷単筒 4サイクル、頭上弁式
シリンダ径×行程 mm		φ85 x 85
行 程 体 積 l		0.482
圧 縮 比		8.4
連続定格出力 PS/rpm		6/2,000(改造前)
弁時期 °CA	吸 気	開 -10、閉 +54
	排 気	開 -49、閉 +15

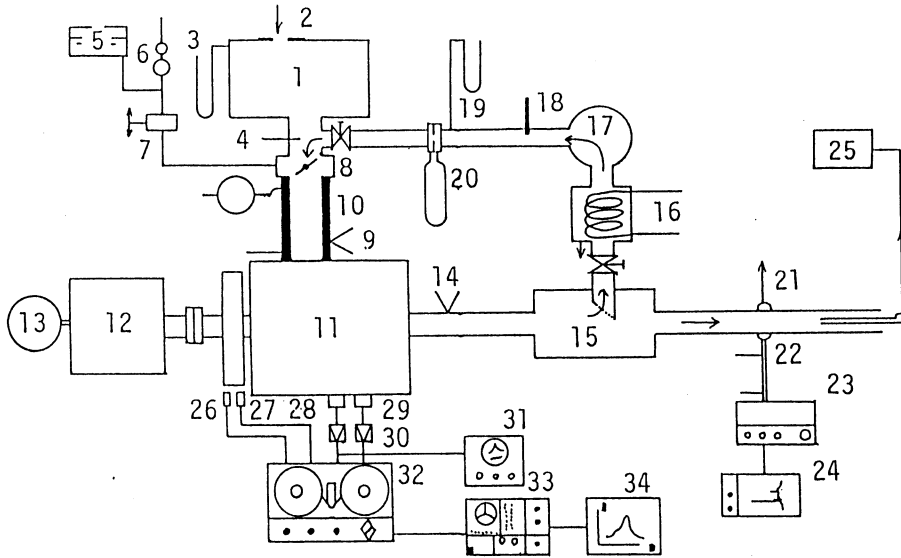


図-1 実験装置の概略図

めた。

2. 4 実験方法

λ を0.7から機関の運転可能な希薄混合範囲 ($\lambda = 1.3 \sim 1.5$) まで、気化器式機関では気化器浮子室を上下動させることによって変化させ、EFI 機関では噴射期間を変えて変化させ、その時の出力 Le 、排気温度 te 、CO、THC、NO_x、H・CHO、排気中の未燃の CH₃OH および CH₄ の各濃度を測定した。また、代表的条件につき運転状態が安定するのを (約15分) 待ってシリンダ燃焼圧、イオン電流及び TDC マーク等をデータレコーダに記録し、直ちに駆動運転に切り替えてシリンダ圧力を同一条件で記録する。その記録を再生し、統計解析器に通して1000サイクルの平均燃焼圧力 P と平均駆動圧力との差 ΔP 、平均圧力上昇率 $dp/d\theta$ および平均イオン電流 I_g を X-Y レコーダに記録した。この記録から燃焼最高圧力 P_{max} 、 P_{max} を示すクランク角 $\theta (P_{max})$ 、 ΔP の最大値 ΔP_{max} 、 ΔP_{max} を示すクランク角度 $\theta (\Delta P_{max})$ 、最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ 、着火遅れ τ 、燃焼期間 θ_b および火炎伝播速度 V_f を求めた。また、統計解析器の解析方法を切り替えて P_{max} の頻度分布、標準偏差 S および変動率 S/P_{max} を求め、これらの相関関係を調べた。

3. 実験結果および考察

3. 1 水添加（含水メタノール）の影響

メタノールは水と容易に混合溶解するので、混合燃料を気化器から供給した。しかし燃料の気化による温度低下を防ぐため吸気管壁を加熱した。実験結果の代表例を図-2に示す。図において得られた結果をまとめると、過濃混合気範囲（ $\lambda = 0.6 \sim 1.0$ ）における機関出力 Le は水を添加すると幾分増加し、それにつれて熱効率 η_e も高くなっている。しかし、希薄混合範囲（ $\lambda > 1.1$ ）では含水率 $y = G_w/G_f$ （ G_w ：添加水量、 G_f ：燃料供給量）が高いほど Le 、 η_e は低下し、可燃範囲も狭くなっている。この傾向は、 $y = 0$ の値を基準として、 $Le/(Le)_0$ 、 $\eta_e/(\eta_e)_0$ で表示した図-3によるとより明確であり、点火進め角 θ が小さいほど顕著になることがわかる。また、ガソリン機関と比較するとメタノール機関の方が Le 、 η_e の低下割合は小さい。一酸化炭素 CO 濃度は $\lambda > 1.0$ の範囲では y に関係なく一定値を示すが、 $\lambda < 1.0$ では y が大きいと多少減少することが分かる。これは化学平衡式から得られる結果³⁾と定性的によく一致する。THC 濃度はいずれの場合も y に比例して増加し、とくに $\lambda = 1.0$ から遠くなるほどその影響は大きい。これは難燃焼条件になるほど、水添加による燃焼温度の低下シリンダ壁面の過冷による消炎層の厚さが増加するなどに起因するものと思われる。メタノールはガソリンよりも発熱量が低いので前述の影響も大きく、THC 濃度の増加割合は大きい（図-3）。この場合、燃料の発熱量に対する気化熱の割合を考えガソリン機関の含水率 y_g に対して、メタノール機関では $2y$ で表示してある。

窒素酸化物 NO_x 濃度は、大気温度、湿度などにも左右されるので再現性にやや劣る点があるが y が大きいほど著しく減少し、 NO_x 低減対策として有用であることがわかる。勿論、 θ を小さくしても NO_x は低減するが（図-2・a）、 Le 、 η_e の低下も大きいので θ の選定のみで NO_x の低減を図ることは好ましくない。水添加による NO_x の低減割合はメタノール機関もガソリン機関も同じである（図-3）が、 θ が小さく、 η_v が小さいほど y の効果は大きい。しかし、その効果が大きい条件ほど Le 、 η_e の低下も大きくなることに留意することが必要である。

いま、定性的考察を目的として、2分子反応説を用い、Marteney が示した⁴⁾ように NO の発生速度が近似的に

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \quad (1)$$

で表される。ただし、 $[NO]$ 、 $[N_2]$ 、 $[O]$ はそれぞれのモル濃度。また、メタノールは含酸素燃料なので酸素分子は十分あり

$$\frac{1}{2}O_2 \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} O \quad (2)$$

の平衡反応によって主に酸素原子が供給されるとし、その平衡定数を $K (= k_2/k_{-2})$ とすれば $[O] = K [O_2]^{1/2}$ で与えられる。 k_1 と K はそれぞれ温度の関数で Arrhenius の反応式で与えられるものとする、シリンダ内の NO 生成量は

$$[NO] = \int \int A \cdot e^{-E/RT} [N_2] [O_2]^{\frac{1}{2}} dt dv \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 t ：時間、 V ：体積、 T ：絶対温度、 R ：ガス常数、 A ：頻度因子、 E ：活

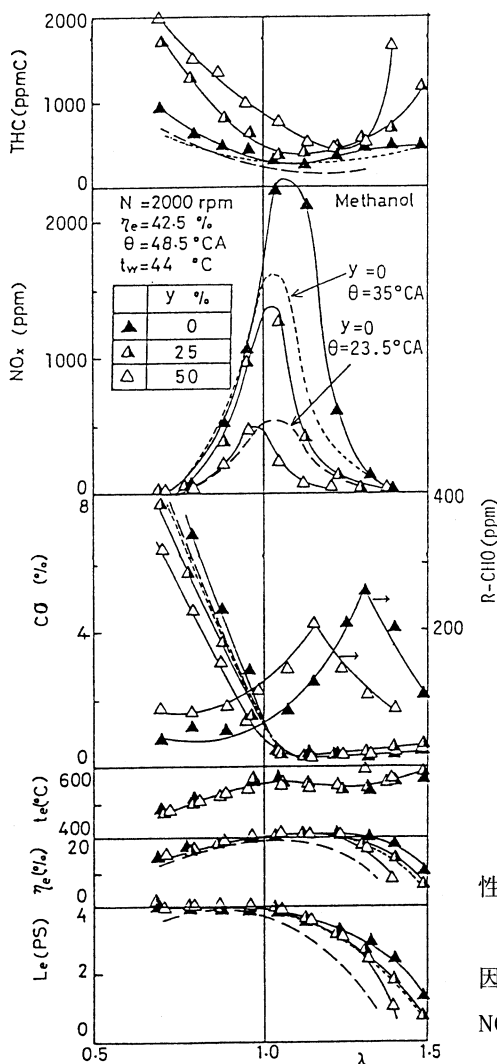


図-2・a 含水率が機関出力および排気特性に及ぼす影響

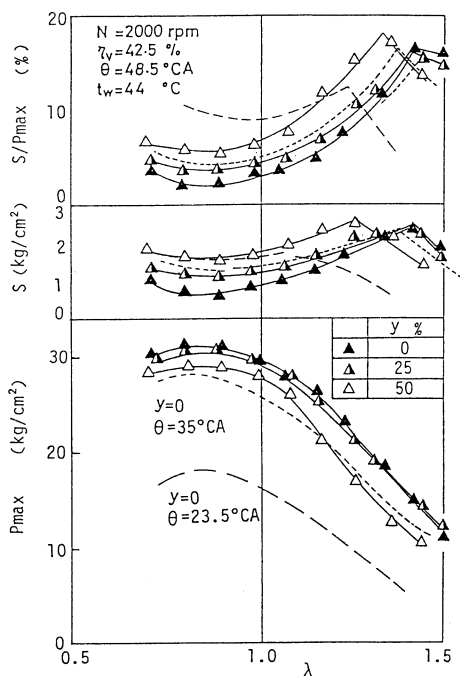


図-2・b 含水率が燃焼特性に及ぼす影響

性化エネルギーである。

いま、NO の生成において時間的、空間的要因が変わらず、しかも燃焼最高温度 Tmax で NO の発生が凍結するものとする、

$$\frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}]_0} = \frac{[\text{N}_2]}{[\text{N}_2]_0} \sqrt{\frac{[\text{O}_2]}{[\text{O}_2]_0} \cdot \frac{e^{E/RT_{\text{max}}}}{e^{E/RT_{\text{max}0}}}} \quad (4)$$

となる。そこで、メタノール燃料機関のサイクルを近似的にオットーサイクルと見なし熱力学

の関係から Tmax、空気過剰率 λ から N₂、O₂ 濃度を求め、上式から算出した [NO]/[NO]₀ の値を併記しているが、実験結果よりもかなり大きい値である。この場合、y に比例して着火遅れが増加するので、実質的には θ を小さくした場合の効果と水添加による蒸発潜熱と熱容量の増加による効果とが重複するにもかかわらず前者の影響を考慮せずに計算したためと考えられるが、定性的傾向を知るには十分と思われる。メタノール機関の R-CHO 濃度は高く (y=0)、しかも水添加 (y=0.5) により過濃側では増加している (図-2)。いずれの場合も λ の影響が大きく、

特定の λ で最大値を示している。 y が高いほど平均燃焼最高圧力 P_{max} は減少し、 S と S/P_{max} は増加する (図-2・b)。また、 P_{max} が極大、 S および S/P_{max} が極小になるときの λ は y に関係なくほぼ一定であるが S および S/P_{max} が極大になる λ は y によって変わっている。この S および S/P_{max} は点火進め角を小さくするほど増加するが、含水メタノールを使用した方が Le の低下が少なく、 NO_x 低減は大きく、 S/P_{max} の増加割合も小さいことがわかる。

3. 2 EGR の影響

気化器式機関及び EFI 式機関に EGR を実施した実験結果を図-4、図-5 に示す。

図-4 には NO_x 低減効果が大いといされている点火時期を遅らせた ($\theta = 35^\circ CA$, $23.5^\circ CA$) 実験結果を併記し、図-5 には燃料温度 t_f を高めた場合の結果を併記して比較している。また、図-6 には $\lambda = 1.0$, 1.2 における $EGR = 0$ の値をそれぞれ基準として表示してある。図において、 $\lambda > 1.14$ の範囲で L_e および η_e は順次増加し、 $\lambda < 1.14$ の範囲では逆に低下の傾向が認められる。しかし $EGR < 15\%$ であれば低下は無視できる程度である。これに対し θ を遅らせた場合 ($EGR = 0$)、 L_e および η_e の低下はかなり大きい (点線、一点鎖線)。この EGR の効果は EFI 機関の場合も同様であるが希薄領域における L_e および η_e の低下、可燃範囲の縮小などは気化器式機関よりも顕著である (図-4、図-5)。

CO 濃度は EGR 率に関係なく、 λ のみに左右される (図-4、図-5)。

THC 濃度は $0.9 < \lambda < 1.15$ の範囲では EGR 率を変えてもさほど差はないが、これよりも過濃または希薄の難燃範囲になると、EGR 率に比例して増加

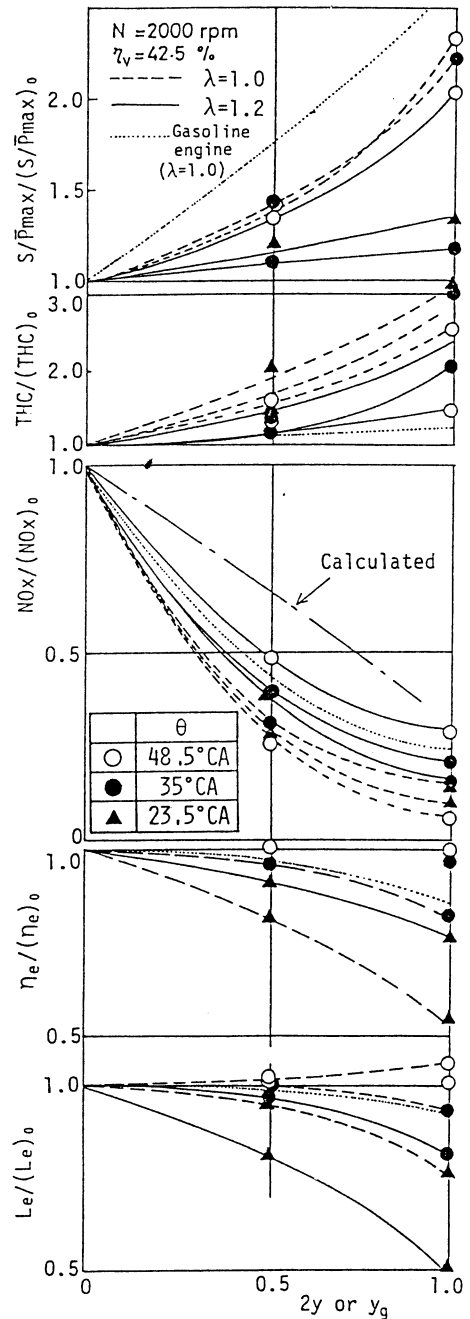


図-3 含水率が機関出力、排気特性および燃焼変動に及ぼす影響 (ガソリンとメタノールの比較)

する傾向が認められ、とくに EGR=25% で $\lambda > 1.20$ になると不完全燃焼を誘発し THC 濃度が急増する様子がみられる (図-4)。これに対し、EGR=0 で θ を遅らせた場合には全域にわたって THC 濃度はかなり低減する (図-4)。一方、EFI 機関では燃料の大部分が液滴状態でシリンダに供給されるので、EGR の影響は比較的大きく、THC 濃度は全域にわたって EGR 率に比例して増加している (図-5)。しかし、燃料を加熱して噴射後の蒸発を促進すると THC 濃度は低減する。

NOx 濃度は、 $\lambda = 1.0 \sim 1.2$ で最大値を示し、全般的に EGR の増大とともに減少している。また、 θ を遅らせると NOx 濃度は減少する。いま出力に重点をおき $\lambda = 0.95$ 、EGR=25% (図-4) で運転すると、熱効率も高く、CO=1%、THC=800ppm、NOx=200ppm の排気特性を示す。 $\lambda = 1.14$ の場合、EGR=15% としても Le および η_e は低下せずに CO=0.3%、THC=400ppm、NOx=300ppm へと改善される。NOx 濃度に対する θ の影響は大きく、 θ を遅らせると NOx 濃度は減少するが、 Le や η_e も低下するので EGR の方が有利であることがわかる。図-6 には水添加の場合と同様な手法で計算した $NO/(NO)_0$ の値と実験値を比較しているが、定性的に符合している。

R-CHO 濃度は EGR 率に比例して順次増加する (図-4 参照)。EGR 率が高くなると P_{max} 値は低下し S 値は増加、すなわち S/P_{max} は増大する。この増加割合は気化器式でも EFI 式でも同様であるが (図-6)、EGR を行わず θ を遅らせた場合、例えば $\theta = 48.5^\circ CA$ の場合を基準とすると $\theta = 35^\circ CA$ では $(S/P_{max}) /$

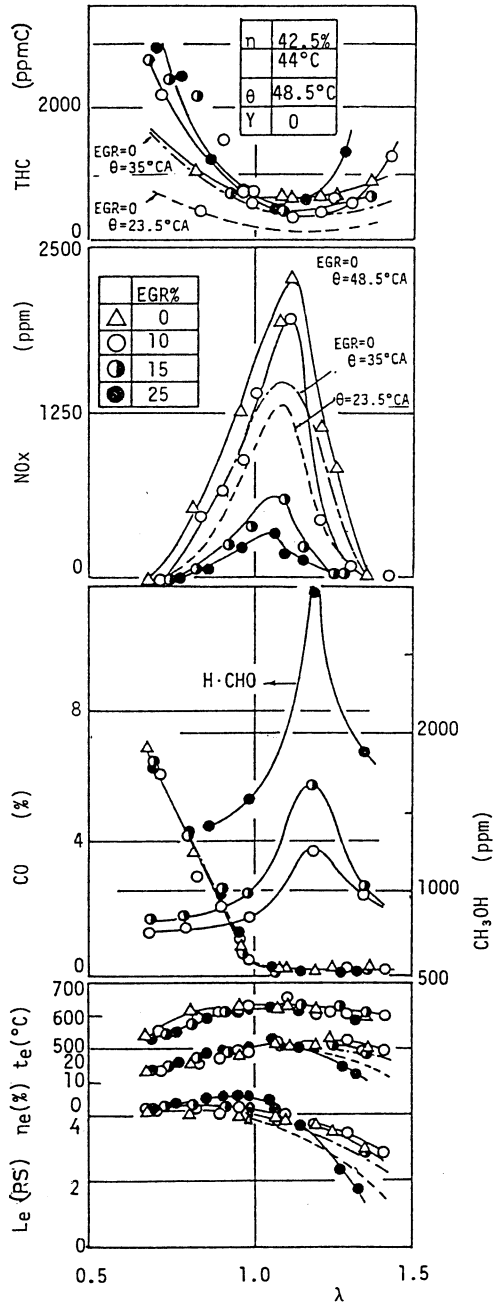


図-4 EGR が機関出力および排気特性に及ぼす影響 (気化器機関)

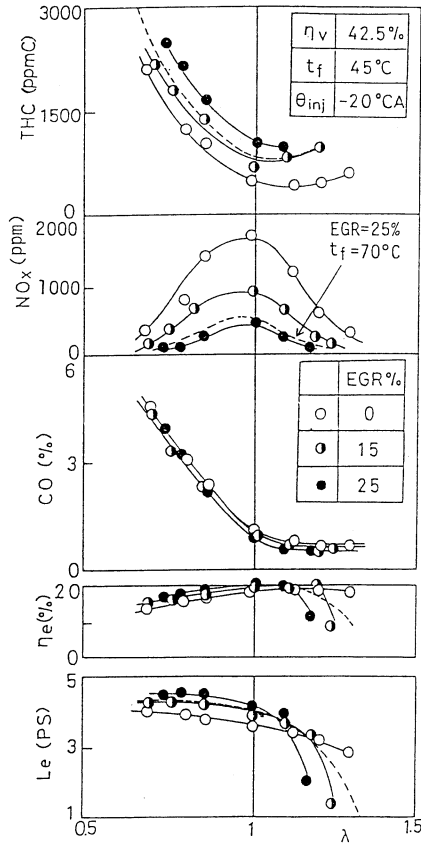


図-5・a EGRが機関出力および排気特性に及ぼす影響 (EFI機関)

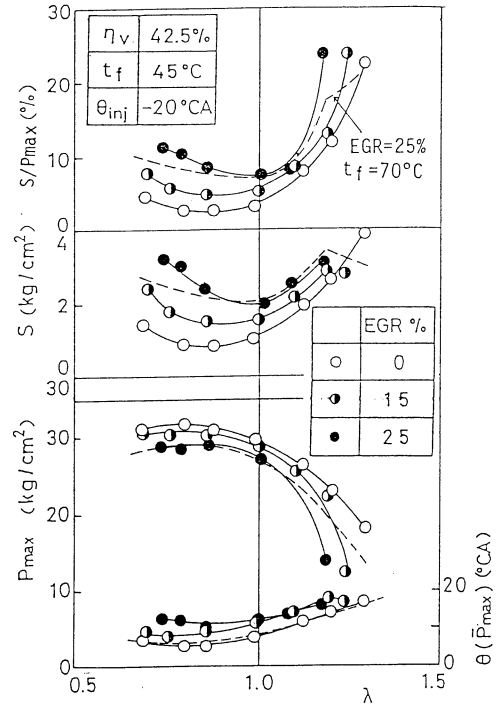


図-5・b EGRが燃焼特性に及ぼす影響 (EFI機関)

(S/P_{max})₀ = 1.66 ($\lambda = 1.0$ の場合)、 $\theta = 23.5^\circ\text{CA}$ では 3.33 となるのに対して、EGR = 20% では 1.6 となり、比較的小さい。

4. まとめ

汎用機関にメタノール燃料を使用する場合、NO_x 濃度の低減対策として水添加及び排気再循環の効果について実験的に解明したが要約すると以下の通りである。

1) 火花点火機関 (メタノール燃料) に吸気管から水を添加供給する場合、水添加率 y が大きいほど過濃領域の機関の機関出力 Le 、熱効率 η_e は増加し、逆に希薄領域では減少し、連続運転が可能な希薄混合気範囲は狭くなると同時に燃焼変動率 S/P_{max} は全般的に増加する。また、過濃領域における CO 濃度は減少し、THC 濃度は全域にわたって増加する。一般に CO 濃度はガソリン燃料時よりも低いが THC 濃度および R-CHO 濃度はかなり高く、しかも y の影響は大きい。これに対し、NO_x 濃度の水添加による低減は顕著である。この場合、点火進め角 θ が小

いほど、体積効率 η_v が小さいほど y の影響は大きい。燃料の発熱量に対する気化熱の割合を考慮して y_g の代わりに $2y$ を用いて整理すると NOx 濃度の低減割合はガソリン燃料を用いた場合とほぼ同じ値となる。

2) メタノール燃料機関にガソリン燃料機関と同様な EGR を実施すると EGR 率が大きいほど過濃領域の Le 、 η_e は増加し、逆に希薄領域では低下する。一般に NOx 濃度を減少させることはできるが、THC 濃度や R-CHO 濃度および燃焼変動率 S/P_{max} は増加する。

3) θ を遅らせることは、THC 濃度や NOx 濃度の低減に効果はあるが、 Le や η_e の低下も大きい。同一出力で比較するとき θ をさほど遅らせずに EGR や水添加を併用した方が THC 濃度や R-CHO 濃度および燃焼変動率 S/P_{max} を増加させることなく、NOx 濃度の大幅な低減が可能である。さらに、EFI 機関においても EGR 率と燃料温度の最適条件を選択するならば、機関出力 Le および熱効率 η_e の低下を最小限度にとどめて排気特性の改善が可能である。

参考文献

- 1) W. Riedel: Beeinflussung der Wirtschaftlich von verbrennungs motoren druch kraft-stofzusatz, Autom. techn. Z. 43(1940)125
- 2) 堀昭三、沢則弘：メタノール機関の排気と燃焼特性に及ぼす EGR 影響、自動車技術会論文集、NO. 17(1979)124
- 3) 宮本登、石谷博美：燃料性状が火花点火機関の熱効率ならびに排出ガスに及ぼす影響、日本機械学会北海道支部講演論文集、NO. 732-3(1973)
- 4) P. J. Marteney: Analytical Study of the Kinetics of Nitrogen Oxides in Hydrocarbon-Air Combustion, Comb. and Tech., 1(1970)461

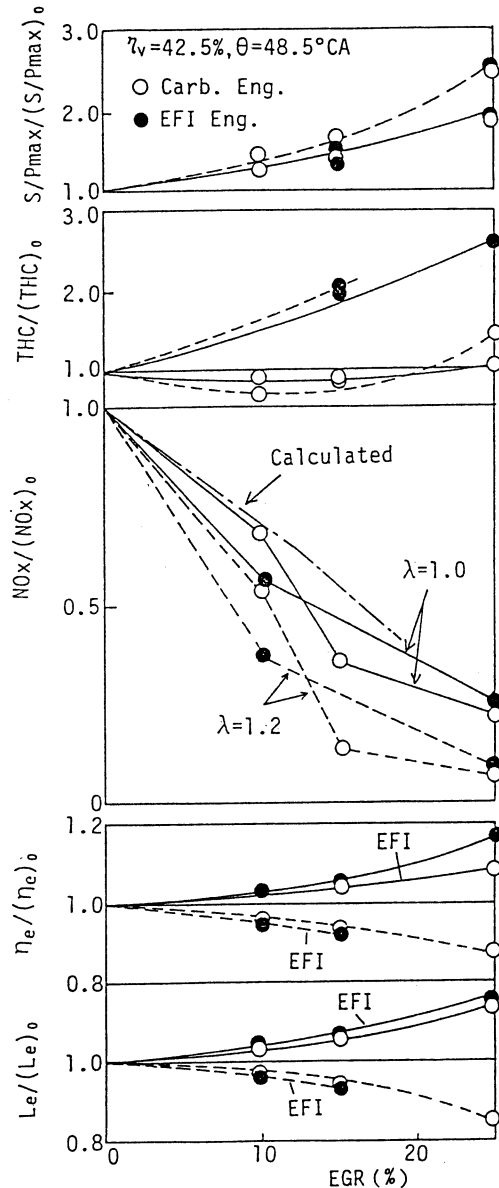


図-6 EGRが機関性能、排気特性および燃焼特性に及ぼす影響 (EFI機関)