メタノール分解ガスと軽油の二燃料ディーゼル機関*

是 松 孝 治^{*1}, 雑 賀 高^{*1}, 伊 藤 光 一 郎^{*2}

Dual Fueled Diesel Engine with Dissociated Methanol and Gas Oil

Koji KOREMATSU, Takashi SAIKA, and Koichiro ITO

This paper presents the results of performance testing of a dual fueled diesel engine with dissociated methanol and gas oil. The engine system equipped with a methanol dissociation reactor has a potential for improving the engine system efficiency, because the reaction of methanol dissociation is endothermic and the energy required for the reaction is supplied by the exhaust waste heat. However the presence of knock, misfire and poor combustion of the premixed dissociated methanol-air mixture prevent the extraction of this potential of the engine system. It is concluded from the test results that we can get higher efficiency and a lower smoke level than the original engine if the proper methanol/gas oil ratio and injection timing are selected as operating conditions to avoid the above undesirable phenomena.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Methanol Fuel, Waste Heat Recovery, Dissociated Methanol

1. 緒 言

石油代替あるいは排ガ斯特性の改善という観点から、内燃機関用燃料としてメタノールが注目されている。これに伴って、メタノールの特性に立脚した技術が検討されつつある。その一つに、排気ガスの熱でメタノールを分解した後に、機関で燃焼させる方法がある。メタノールは適切な触媒下で加熱されると、水素と一酸化炭素に分解する。理論的には、1 mol のメタノールから 2 mol の水素と 1 mol の一酸化炭素を生ずる。この分解ガスは、メタノールに比べて 1.2 倍の低発熱量を有している。このことは、分解反応が吸熱反応であることを意味している。したがって大気に放出される排気ガスの熱を反応熱として供給すれば、この分だけ熱効率が改善されることになる。メタノールを、このようなシステムで利用する試みは、火花点火機関に対してはすでに研究が行われてきたが^{(1)~(7)}、ディーゼル機関に対しては、ごく最近になって研究が進められている状況にあり^{(8)~(10)}、多くの実証データが必要であるように見受けられる。

そこで著者らは、排気ガスの熱を利用して発生させたメタノール分解ガスを吸気に混入するとともに、軽油を噴射系で供給し着火させるディーゼル機関システムを試作し、その性能を調べ効果的な運転方法を明らかにしたので報告する。

2. 実験装置と実験方法

図 1 は、実験に用いた機関システムの構成と測定系を示している。メタノールは、燃料ポンプで圧送され噴射弁を通じて蒸発器に供給される。蒸発器は基本的には、排気ガスの熱をメタノールに伝える多管式熱交換器であり、その伝熱面積は 0.64 m² である。メタノール蒸気は反応器で分解され、機関の吸気管に供給される。このとき、各シリンダに供給される混合気のメタノール分解ガス濃度が均一となるようにするため、メタノール分解ガスの流入方向を吸気弁と反対側に選んでいる。反応器も基本的には多管式熱交換器であり、内径 $\phi 13.8$ mm、長さ 246 mm の円管内に封入されているペレット形の Pt-Al₂O₃ 触媒にメタノール蒸気を接触させることにより、水素と一酸化炭素に分解しようとしている。一方、着火源となる軽油は通常の噴射系で与えている。また実験機関の仕様は、表 1 に示すとおりであり、本質的な改造は施していない。

* 昭和 62 年 4 月 1 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 6 月 25 日。

^{*1} 正員、工学院大学 (〒160 東京都新宿区西新宿 1-24-2)。

^{*2} 正員、(株)小松製作所 (〒323 小山市横倉新田 400)。

機関の運転は、回転速度と出力を一定に保ちつつ、軽油とメタノールの比率を変化させる方法を用いる。このように運転されている機関の動力性能、筒内圧力経過ならびに排気ガス特性を調べる。なお実際の測定では、排気系の温度が安定していることを確認するよう特に留意している。

3. 実験結果と考察

3.1 メタノール分解反応器の特性 メタノールの分解に対する Pt-Al₂O₃ 触媒の有効性については、すでに述べられている⁽¹⁾⁽⁴⁾。ここでは、機関に実装された状態における特性を明らかにしておく。供給したメタノールの質量に対する発生ガスの質量の比率を意味するガス化率の測定結果を図2に示す。このガス化率は、以下のようにして求めている。まず機関を軽油のみで運転するとともに、蒸発器にメタノールを送る。反応器から流出するガスは、吸気管に供給するのではなく、別置の水冷却冷却器に導き凝縮分をトラップする。供給したメタノールの質量から、この凝縮分を差し引いてガスの質量を定め、ガス化率を算出する。この実験では、冷却水温 10±2°C で行っており、この温度に対する飽和蒸気圧分がトラップされずに通過することが考えられるが、これに伴う誤差は最大4%程度と見積もれる。また図2の横軸の反応器の代表温度は、反応器の中央部の触媒層の温度をとっている。この温度は、機関の負荷と回転速度を変えることで制御している。

図2の実験結果を見ると、代表温度の上昇に伴って

ガス化率が高くなっている。またメタノール流量を増加させて、空間速度の値を大きくするとガス化率はやや減少しているが、空間速度による支配的な関係は見られない。このことは、実装した反応器は反応を完結するのにほぼ十分な大きさがあり、ガス化率は温度分布や温度の絶対値に支配されることを示している。またガスクロマトグラフィーを用いて、分解ガスの成分分析を行うと表2のようになる。高温になるとメタンの生成量がやや多くなるが、メタノールが水素と一酸化炭素に分解する主反応が支配的であることがわかる。

3.2 機関システムの各種性能 図3は、平均有効圧を 0.28 MPa あるいは 0.51 MPa に保って、低発熱量基準の全燃料中のメタノール率 f_m 、すなわち

$$f_m = \frac{\dot{M}_m q_m}{\dot{M}_m q_m + \dot{M}_o q_o} \quad \dots\dots\dots (1)$$

の値を変化させた場合の各種性能の測定結果である。式(1)中の $\dot{M}_m$ は供給しているメタノールの質量流量 [kg/s]、 $\dot{M}_o$ は供給している軽油の質量流量 [kg/s]、 q_m はメタノールの低発熱量 [MJ/kg]、 q_o は軽油の低発熱量を表している。

3.2.1 熱消費率 機関システム全体のエネルギー経済性の評価は、1 kW の軸出力を発生するのに要する低発熱量基準のメタノールと軽油の単位時間あたりの供給熱量 [MJ/h] を意味する熱消費率 BSHC [MJ/kWh] で行う。単純に考えると反応器温度に支配されるガス化率とメタノール率 f_m の値に応じて、排気熱回収効果が現れ、BSHC の値が下がり性能が向上するはずである。しかし、図3(a)の平均有効圧 0.28 MPa

表 1 供試ディーゼル機関諸元

Model	KOMATSU 4D92
Type of engine	Direct injection
Bore X Stroke	105mm x 125mm
Stroke volume	2600cc
Rated output (diesel oil)	37.3kW/2800rpm

図 1 機関システムと測定系

図 2 メタノール分解反応器の特性

の結果を見ると、 f_m の増大とともに BSHC の値が増加している。このときの反応器温度は 230~250°C であり、ガス化率は 0.1~0.5 程度と見積られる。すなわち、ある程度の排気熱回収効果があるにもかかわらず、熱消費率が悪化したことになる。これに対して、図 3 (b) の平均有効圧 0.51 MPa の場合には、 f_m が 0.45 程度までは確かに f_m の増大に伴って BSHC の値が低下し性能が向上している。しかし、 f_m の値をこれより大きくすると BSHC の値は、急激に増加してくる。これらの実験結果について、以下のように考察する。

(1) メタノール分解ガス-空気混合気の燃焼限界と熱消費率 図 3 (a) のように比較的負荷の低い領域で、BSHC の改善効果が現れなかった理由について考えてみる。排気中の CO 濃度の測定結果に注目してみると、 f_m の増大に伴って CO 濃度が単調に増加していることがわかる。これは、吸気管から供給しているメタノール分解ガス中の CO が、燃焼せずそのまま排出されることを示すものである。熱消費率の悪化の程度は、燃焼室内を単に通過したメタノール分解ガスの量に対応することになり、 f_m の増加とともに単調に

BSHC が増加する測定結果を裏付けている。

一方、負荷が比較的高い図 3 (b) の CO 濃度の測定結果を見ると、 f_m が増加すると初めは CO 濃度は高くなるが、 f_m が約 0.4 になると 0.25 % 程度まで低下し、さらに f_m を大きくすると 0.20 % 程度まで低下していく。CO 濃度の絶対値は、図 3 (a) よりも大きいのが、供給しているメタノール量が多いことと反応器温度が高くガス化率が高いので、吸気中の CO 濃度が 1 オーダ高いことを考慮すると、供給したメタノール分解ガスの大部分が燃焼していると考えられる。このことは、メタノール率 f_m が 0.4 程度までは、 f_m の増加に伴って BSHC が減少している実験結果を裏付けるものである。 f_m をさらに大きくすると、本項(2)で述べるように、ノックの発生によって BSHC は増加してしまう。

いずれにしても、排気熱回収が行われ、しかも予混合供給されるメタノール分解ガスの大部分が燃焼するかどうか、BSHC 改善のポイントとなる。この場合、軽油にエントレインメントされたメタノール分解ガスは容易に燃焼すると考えられるので、それ以外の領域が

表 2 メタノール分解ガスの成分分析結果

Reference reactor temperature °C	Chemical composition of dissociated methanol (only in gas phase)			
	H ₂	CO	CH ₄	Others
250	0.630	0.283	0.025	0.062
350	0.641	0.292	0.037	0.030
450	0.640	0.290	0.046	0.024

図 3 機関システムの各種性能に対するメタノール率の影響

燃焼するかが問題となる。直接噴射式ディーゼル機関において、気体燃料を吸気管から供給した Ohta ら⁽¹¹⁾, Varda⁽¹²⁾, Bro ら⁽¹³⁾の研究によると、軽油噴霧のまわりの気体燃料が燃焼するためには、混合気濃度が下限を超えて可燃範囲に入っていることが必要であると指摘されている。

本実験の場合の下限界は、以下のようにして計算する。メタノール分解ガス中の水素、一酸化炭素、メタンおよびメタノール蒸気のモル比を n_{H_2} , n_{CO} , n_{CH_4} , n_{CH_3OH} とし、それぞれの下限界を L_{H_2} , L_{CO} , L_{CH_4} , L_{CH_3OH} とすると、メタノール分解ガスの下限界 L は、Le Chatelier の式により⁽¹⁴⁾,

$$L = 100 / \left(\frac{n_{H_2}}{L_{H_2}} + \frac{n_{CO}}{L_{CO}} + \frac{n_{CH_4}}{L_{CH_4}} + \frac{n_{CH_3OH}}{L_{CH_3OH}} \right) \dots (2)$$

となる。 n_{H_2} , n_{CO} , n_{CH_4} , n_{CH_3OH} の値はガス化率と成分分析の結果を用いて計算するが、凝縮分はすべてメタノールとし、ガス中の微小他成分は無視している。25°C の L の値 L_{25} は、25°C における各成分の下限界すなわち $L_{H_2}=4.00\%$, $L_{CO}=12.50\%$, $L_{CH_4}=5.00\%$, $L_{CH_3OH}=6.72\%$ を、式(2)に代入して求めることができる。しかし、軽油噴霧着火時のメタノール分解ガス-空気混合気は、圧縮され温度と圧力が上昇しているの、その下限界は L_{25} とは異なる。そこで筒内圧力経過から、噴射開始時のメタノール分解ガス-空気混合気の温度 t を推算する。この値を用いて、 t °C における下限界 L_t を Zabetakis の式⁽¹⁴⁾

$$L_t = L_{25} - \frac{0.18}{\Delta H_c} (t - 25) \dots (3)$$

から求める。ここに ΔH_c は、メタノール分解ガスの燃焼熱である。さらに厳密に言えば、圧力の補正も必要であるが、一般に圧力の効果は小さいことと適正なデータがないので、ここでは省略している。

図4はメタノール率 f_m を一定にして、正味平均有効圧を変化させたときの吸気中の燃料濃度と下限界の計算値を比較したものである。平均有効圧の上昇は燃料の供給量の増大を意味するので、 f_m 一定で平均有効圧が上昇すれば吸気に混入しているメタノール分解ガス濃度は高くなる。これに対して下限界は、平均有効圧の上昇に伴って低濃度側に移っていく。この理由は、平均有効圧が上昇すると排気温度が高くなりガス化率が上がり水素成分が多くなることと、温度が高くなって下限界が拡大するためである。いま図4の吸気中の燃料濃度の曲線と下限界の曲線の交点に注目する。この交点は、問題となっている軽油噴霧の着火・燃焼に続いて、そのまわりの予混合気が燃焼するかどうかの限界を与えている。 f_m の値が大きいと平均有効

圧の値が低くても、予混合供給のメタノール分解ガスが燃焼することになる。図4において、平均有効圧 0.28 MPa の点を見ると、 f_m を 0.5 にしてもメタノール分解ガス濃度は下限界に達しないことがわかる。これは、 f_m の増加とともに BSHC が増加する図3(a)の結果が、軽油噴霧まわりのメタノール分解ガスが燃焼しないためであることを裏付けるものである。これに対して、図4で平均有効圧が 0.51 MPa の点を見ると、 f_m の値が 0.2 であってもメタノール分解ガス濃度は下限界に達する。したがって図3(b)の場合は、軽油噴霧まわりのメタノール分解ガスは燃焼しているものと考えられる。すなわち本機関システムにおいて、軽油噴霧の燃焼に引き続いて、メタノール分解ガス-空気混合気が燃焼するためには、その濃度が可燃範囲に入ることが必要であり、その見積り是指圧図から求めた軽油噴射開始時の温度と式(2), (3)で行うことができる。

(2) ノック限界と熱消費率 吸気に混入する燃料量を増していくと、最高圧力および圧力上昇率が高くなりノックを生じることが知られている^{(11)~(13)}。ノック限界に近づくと、主として熱損失が増大するため熱消費率は悪化する。図3(b)でメタノール率を 0.57 とすると、メタノール分解ガス濃度は下限界を超えているにもかかわらず、BSHC の値が軽油単味運転の場合より高くなったのは、このためである。図5に示すシリンダ内最高圧力 p_{max} 、最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ の測定結果を見ると、メタノール率 f_m の増大に伴って p_{max} , $(dp/d\theta)_{max}$ とともに増加していることがわかる。正味平均有効圧 0.51 MPa の場合、 f_m が 0.5 以上になると $(dp/d\theta)_{max}$ が急激な増加傾向をもち、ノック限界に近づいていることが確認される。

図6は、シリンダ内圧力経過と熱発生率の結果を示

図4 吸気管内の燃料濃度と下限界の計算値

している。軽油単味運転に比べて、着火時期がやや早くなるとともに予混合燃焼の比率が増加していることがわかる。

図7は各平均有効圧に対して、メタノール率を変化させてノックによる運転不調限界を求めたものである。この運転不調限界は、激しいノック音とともにシリンダ内圧力のサイクル変動が大きくなって、これ以上メタノール率を上げると機関の停止に至る限界である。判断はやや定性的なものとならざるを得ないが、再現性は良好である。ノック限界のメタノール率の値は、平均有効圧が高いほど小さくなり、回転速度は2500 rpmよりは2000 rpmの場合のほうが大きくなる傾向がある。回転速度2000 rpmの場合、平均有効圧が約0.4 MPa以下の領域では、メタノール率を高めていくと軽油噴霧が着火しない失火領域が先に現れるため、ノックによる運転限界は隠れてしまう。回転速度2000 rpm一定の条件下で、軽油の噴射時期をBTDC 16°からBTDC 10°に遅らすと、平均有効圧0.57 MPa以外の条件ではノック限界のメタノール率の値は大きくなる。このように噴射時期によってノックの発生が抑制できることは、近久ら⁽¹⁵⁾の指摘にある端ガスの自発火に起因する「火花点火ノック」の発生を暗示している。一方、平均有効圧0.57 MPaでは、メタノール分解ガスおよび軽油とも供給量が多く、初期燃焼の絶対量が多くなって通常のディーゼル機関でお

こるノックが発生しているため、噴射時期を遅らせることがノック限界の拡大につながらなかったと解釈できそうである。

3.3 排ガス特性 CO濃度についてはすでに述べたので、全炭化水素濃度THCとNOおよびスモーク濃度（ボッシュ濃度）について検討する。比較的軽負荷の図3(a)を見ると、スモーク濃度は軽油単味運転の場合でも検出されない程度である。THCは、メタノール率 f_m の増加とともに単調に増加している。この原因は、吸気に混入されたメタノール分解ガスが燃焼せず単に燃焼室を通過して排出され、しかも反応器温度が低く分解反応が十分進まないため分解ガス中にメタノールが含有されているためである。またNO濃度は、 f_m の値を増加させると減少する傾向にある。一方、図3(b)を見ると f_m の増加に伴ってスモーク濃度は減少している。THCとNO濃度は、メタノール率と強い相関は認められない。

3.4 機関システムの適正運転域 この機関システムの適正な運転域は、軽油による着火が可能であり、

図5 メタノール率とシリンダ内最高圧力、最大圧力上昇率、着火遅れ

図6 シリンダ内圧力経過と熱発生率

図7 ノック限界と失火限界

図8 機関システムの適正運転域概念図

吸気に混入するメタノール分解ガスが可燃域にあり、ノックが発生せず、スモーク濃度も一定値以下の領域である。図8は、この運転域を概念的に示している。一般にメタノール率を0.4~0.6にとると、比較的広い負荷範囲で適正運転域となる。

4. 結 論

メタノール分解ガスを吸気に混入するとともに軽油を噴射し着火させるディーゼル機関の特性を調べ、以下の主な結論を得た。

(1) 試作したメタノール分解反応器のガス化率を機関システムに組み込んだ状態で調べたところ、反応器中央部の温度が230℃程度から分解反応がおり、温度が300℃以上になると、ガス化率は約0.6~0.85に達することがわかった。

(2) 吸気に混入するメタノール分解ガス濃度が、軽油噴霧の着火・燃焼時点で可燃範囲に入っていない場合には、軽油噴霧にエントレイメントされない領域の燃焼がおこらないので、排気熱の回収効果はあっても熱消費率は改善されない。

(3) 低発熱量基準の燃料中のメタノール率 f_m を増加させていくとノックが発生する。ノック限界に近づくと熱消費率が悪化するとともに、運転不調となっていく。

(4) スモーク濃度は、メタノール率の増加とともに減少する。THC、CO濃度は、メタノール率の増加とともにやや増加する傾向となるが、軽油噴霧にエントレイメントされない領域で予混合供給のメタノール分解ガスが燃焼すれば増加の程度はわずかとなる。

(5) 熱消費率の改善効果が現れ、安定した運転ができる適正運転域は図8に示される。

文 献

- (1) 広田・ほか2名, 自動車技術会論文集, 20 (昭55), 25.
- (2) Finegold, J. G., ほか2名, *Proc. 4th Int. Sym. Alcohol Fuel Technol.*, (1980), B-11.
- (3) Sjöström, K., ほか2名, *SAE Paper*, 810348, (1981), 1.
- (4) Korematsu, K. and Fukuda, M., *Int. J. Energy Syst.*, 3-2, (1983), 48.
- (5) Lindner, B. and Sjöström, K., *Proc. 5th Int. Symp. Alcohol Fuel Technol.*, (1982), 2-85.
- (6) 齊藤, 内燃機関, 22-276 (昭58), 1.
- (7) 山口・ほか4名, 自動車技術会論文集, 31 (昭60), 29.
- (8) Korematsu, K., ほか4名, *SAE Paper*, 831298, (1983), 1.
- (9) 金・ほか5名, 第5回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (昭60), 253.
- (10) 山口・ほか6名, 自動車技術会講演前刷集, 861 (昭61), 283.
- (11) Ohta, M. and Okayama, S., *Proc. 1983 ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, (1983), 269.
- (12) Varde, K. S., *SAE Paper*, 831354 (1983), 1.
- (13) Bro, K. and Pederen, P. S., *SAE Paper*, 770794 (1977), 1.
- (14) 例えば, 疋田・秋田, 燃焼概論, (昭57), 28, コロナ社.
- (15) 近久・ほか3名, 内燃機関合同シンポジウム講演前刷, (昭55), 139.

討 論

〔質問〕 神本武征〔東京工業大学工学部〕

(1) 高負荷域でメタノール分解ガスを増した場合の燃料消費率の向上は排熱回収によると述べておられるが等容度が増したためではないのか。

(2) メタノール分解ガスを混入した場合、騒音が増すのではないのか。

(3) 貴方式の適用範囲の図で低負荷域での領域はもっと狭いのではないのか。

〔回答〕 (1) 図6のシリンダ内圧力経過と熱発生率の測定例に示したとおり、メタノール分解ガスの混入により等容度はやや上昇している。この実験装置では、排熱回収効果と等容度の上昇効果とを厳密に分

離することは難しいのだが、ここでは図2あるいは表1の反応器の性能から見積もれる排熱回収効果が熱消費率の改善値とほぼ一致することを述べている。

(2) 騒音測定は行っていない。しかし、図5の最高圧力や最大圧力上昇率の測定値がメタノール分解ガスの混入により増加することから、ご指摘のとおり騒音が増すと考えている。

(3) ここで使用した実験機関とその運転条件では、ご指摘のとおりである。機関の圧縮比を高めたり、排気温度のやや高い条件で運転すれば、概念図に示したようになると考えている。