火花点火機関性能に及ぼすガソリン, メタノール およびプロパン燃料の比較*

金子靖雄**, 藤本司郎**, 小島攝治郎**
金内由紀夫**, 望月繁治**

A Comparison of Gasoline, Methanol and Propane on S. I. Engine Performances

Yasuo KANEKO, Shiroh FUJIMOTO, Setsujiro KOBATAKE,
Yukio KANAUCHI, and Shigeji MOCHIZUKI

Methanol has emerged as a near-term alternative to hydro-carbon fuel. On the one hand, in Japan, LPG fuel has been utilized for the Taxi as an alternate to gasoline in respect of economy.

This paper reports a comparison of methanol and propane as LPG fuel to base gasoline on S. I. Engine performance. The results obtained are as follows: (1) the compression ratio is as high as 12:1; the maximum methanol and propane engine output is higher by approximately 20 % and 8 % respectively than the base gasoline engine. (2) brake thermal efficiency of the methanol and propane engine is better than the base gasoline engine, but the difference becomes smaller as the engine output becomes lower. (3) engine out emission levels of methanol fuel are lower than gasoline, especially for NO_x and THC; but the NO_x level of propane fuel is higher than that for gasoline.

Key Words: Thermodynamics, Combustion, Internal Combustion Engine, Automobile, Methanol, Propane

1. 緒 言

二度にわたる石油危機以来, 石油資源の有限時代を迎えエネルギー源の多角化が真剣に考えられている。

輸送機関の中でも, 多量に消費される自動車用燃料は, 安価でしかも安定供給されることが必要条件であり, その意味において石油に代替するアルコール燃料が注目されている。アルコール燃料はメタノールまたはエタノールが主体となるが, エタノールは水との分離に大量のエネルギーを必要とするためにコスト高となり, メタノール燃料が将来の石油代替燃料の主流になるものと考えられる。

燃料としてのメタノールはガソリンと比較すると, オクタン価のうち RON 値は極めて高いが, MON 値は RON 値ほど大きな差はない, 単位重量当たり発熱量は $1/2$ 以下である, 気化潜熱は約 3.5 倍大きい, 熱面点火を非常に起こしやすい, 動粘度が大きいなどが特徴的な差としてあげられる。

現在, 火花点火機関用燃料としては, ガソリンならびに LPG が用いられているが, これらの燃料とメタ

ノール燃料が火花点火機関の全開出力, 熱効率ならびに排気ガス特性に及ぼす影響については, これまで必ずしも明らかにされていない。

本研究は, 圧縮比が通常の 8.5 ならびに高圧縮比の 12.0 の機関をメタノールならびに LPG 燃料としてプロパンを用いて運転した場合の上記性能を, 従来のガソリン機関を基準として比較したが, メタノールはガソリンより熱効率ならびに排気ガス特性が良く, 最高出力は圧縮比の向上もあって, 20 % 程度向上する。一方プロパンはガソリンより熱効率は良くなるが, 排気ガス特性は, ガソリンの NO_x 値より高く清浄な排気ガス特性と言えない。興味あることは, 燃料あるいは圧縮比を上げることによる熱効率の向上率が同一機関回転速度において, 絞り弁全開の最大出力から出力の低下とともに減少していくことである。

2. 主 要 記 号

N : 機関回転速度

η_e : 正味熱効率

b_e : ガソリン等価燃料消費率

WOT: 絞り弁全開

MBT: 最適点火時期

A/F 比: 空燃比

* 昭和 61 年 7 月 18 日 東海支部豊橋地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 7 月 18 日。

** 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)。

Equi A/F 比：ガソリン等価空燃比

ε : 圧縮比
 γ_m : メタノールの比重
 γ_p : プロパンの比重
 a_m : メタノールの消費量
 a_p : プロパンの消費量
 t_m : メタノールの消費時間
 t_p : プロパンの消費時間
 H_{ug} : ガソリンの発熱量
 H_{um} : メタノールの発熱量
 H_{up} : プロパンの発熱量

3. 実験の装置と方法

3.1 供試機関の仕様 実験に使用した機関仕様を表1に示している。

点火栓は、ガソリンの場合 BP 6 ES を使用し、メタノールおよびプロパンの場合は熱価の高い BP 9 ES を用いている。特にメタノールに対しては熱面点火を防ぐ意味をもっている。

3.2 燃料の特性 使用した燃料は、レギュラガソリン、メタノールおよびプロパンであり、各燃料の特性値を表2に示している。

3.3 実験の装置 機関性能試験は、図1に示すように通常用いられるレイアウトであり、図はプロパン使用時のものを示している。この場合は通常用いられるペーパーライザならびにベンチュリ径 30 φ のガス空気混合器を気化器の上部につけてプロパンガスの供給を行っている。ガソリンならびにメタノールの場合

は、ガス空気混合器を取り除いている。

排気ガス分析は、通常ガソリン自動車の排気ガス連続測定に用いられる分析器を使用した。

空燃比は排気ガス空燃比を求めた。排気ガス空燃比は、排気ガス中に含まれる一酸化炭素、二酸化炭素および全炭化水素濃度 [CO], [CO₂] および [THC] がわかれば、次式によって求められる⁽¹⁾。

$$A/F = \frac{208.8}{[CO] + [CO_2] + [THC]} + 0.96 - \frac{1.83[CO] + 3.05[THC]}{[CO] + [CO_2]} \quad (1)$$

ただし、ガソリンの炭水比を 1.85 と仮定して求めた関係式である。排気ガス中のモル分率は一酸化炭素、二酸化炭素の%に対して、全炭化水素は ppm であり、次式のように簡略化しても精度は十分である。

$$A/F = \frac{208.8 - \{1.83[CO] + 3.05[THC]\}}{[CO] + [CO_2] + [THC]} + 0.96 \quad (2)$$

この実験では、式(2)で示される空燃比計を用いた。当然、炭水比が 1.85 以外の燃料を使用する場合は炭水比が 1.85 としてのガソリン等価空燃比が表示される。したがって炭水比が 2.67 であるプロパンおよび乾き排気ガス成分を対象とする場合の炭水比が 2.00 になるメタノールの場合には、空燃比計に表示される数値を修正しなければならない。すなわちそれぞれの燃料に対する排気ガス成分 [CO], [CO₂] および [THC] から、式(2)と同様にしてそれぞれの空燃比 A/F の式が得られるのでメタノール、プロパンのそれぞれの修正値が求められる。メタノール、プロパンの空燃比はこのようにして求めたガソリン等価空燃比で示すことにする。

3.4 実験の方法 メタノールおよびプロパンは表2に示すように高オクタン価燃料であるから、当然圧縮比を高くすることが可能である。この実験においては、高圧縮比として表1に示すように 12.0 としたが、気化器を用いる場合は、混合気が火花点火以前に圧縮行程で圧縮され、圧縮比の上昇とともに熱面点火

表 1 供試機関の仕様

	low E engine	high E engine
Engine configuration	In-Line-4 cylinders	In-Line-4 cylinders
Bore × Stroke (mm)	76.9 φ × 86	76.9 φ × 86
Displacement (cc)	1597	1597
Intake manifold	Water jacket	Water jacket
Compression ratio ε	8.5	12.0
Carburetor	Dual venturi	Dual venturi

表 2 燃料の特性値の比較

	Gasoline	Methanol	Propane
Chemical equation	C_8H_{18}	CH_3OH	C_3H_8
Specific gravity (293K) γ	~0.75	0.79	0.50
Stoichiometric ratio A/F	14.7	6.47	15.6
Lower calorific value (MJ/Kg) H_u	44.0	20.1	46.4
Octane number	RON 91 MON 82	109 92	125 111
Latent heat of vaporization (MJ/Kg)	-0.335	1.18	0.34

図 1 実験の装置

が起こりやすくなり、気化器を用いる機関の圧縮比の限界は 13.0 程度であると考えられる。

メタノールに対しては、メタノール仕様の気化器を用いて実験を行った。またガソリンならびにメタノールによる運転の場合に、空燃比の任意の調整は気化器浮子室圧力を調圧して行った。

実験はまず(1)それぞれの圧縮比機関に対して、各燃料を用いた場合の機関回転速度 2 000 rpm におけるガソリン等価空燃比が、機関の絞り弁全開性能に及ぼす影響について調べた。(2)その結果、各燃料に対して軸出力がほぼ最高になるガソリン等価空燃比 13.0 の場合について、各圧縮比の機関に対して、機関回転速度と機関性能の関数に及ぼす燃料の影響について試験した。以上は絞り弁全開時の機関性能に関する試験であるが、(3)部分負荷時の特性を比較するために、各圧縮比機関に対して、機関回転速度 2 000 rpm における各燃料のフィッシュ・フック曲線を取り、それらの包絡線を求めて、各燃料が部分負荷特性に及ぼす影響を調べた。(4)排気ガス特性に及ぼす各燃料の影響を調べるために、それぞれの圧縮比機関に対し、機関回転速度 2 000 rpm、軸出力 14.7 kW、点火時期を MBT とした場合のガソリン等価空燃比と排気ガス特性の関数について試験した。

4. 実験の結果と考察

4.1 圧縮比 8.5 機関の機関回転速度 2 000 rpm における絞り弁全開性能 図 2 にガソリン、メタノールおよびプロパンを使用したときの、ガソリン等価空燃比に対する正味平均有効圧力、正味熱効率、MBT ならびに排気ガス温度の関数を示している。

各燃料の正味熱効率は、各燃料のガソリン等価燃料消費率の関数として次式のようになる。

$$\eta_e = \frac{860 \times 4.19}{H_{ug}} \times \frac{1}{b_e} \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、メタノールのガソリン等価燃料消費率 b_{em} は、

$$b_{em} = \frac{3600 \times \gamma_m \times a_m}{t_m \times W} \times \frac{H_{um}}{H_{ug}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

プロパンのガソリン等価燃料消費率 b_{ep} は同様にして、

$$b_{ep} = \frac{3600 \times \gamma_p \times a_p}{t_p \times W} \times \frac{H_{up}}{H_{ug}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

正味平均有効圧力については、ガソリンの場合は、空燃比が 13 で最大値を示すが、メタノール、プロパンは、ガソリン等価空燃比がそれぞれ 12 および 14 で

最大値となり、その値は 0.93~0.95 MPa である。図 2 から明らかなようにガソリン等価空燃比 13 の場合に、いずれの燃料を使用してもほぼ出力最大値になるとみなせるので以後の実験においては、出力最大の試験は、ガソリン等価空燃比 13 を採用することにした。

正味熱効率の最大値は、各燃料に対してほぼガソリン等価空燃比 16 で得られ、ガソリンの約 31 % に対し、メタノール、プロパンの場合はほぼ等しく、約 33 % で、ガソリンに対し約 6 % の正味熱効率向上となる。一方、出力最大になるガソリン等価空燃比が 13 の正味熱効率は、ガソリン 27 % に対し、メタノールは約 30 % でほぼ 11 % の向上となり、プロパンは約 28.5 % でほぼ 6 % の向上である。

最適点火時期は、燃焼速度が最大となり出力最大に相当するガソリン等価空燃比 13 付近で最も遅くなり、ガソリンおよびプロパンは 19~20° BTDC であるが、メタノールは、それらの燃料に比較して燃焼速度が速い⁽²⁾ことからほぼ 16° BTDC になる。

排気ガス温度の最高値は、いずれの燃料に対してもガソリン等価空燃比がほぼ 14.7 の理論空燃比で得られ、ガソリンとプロパンはともに 950 K 前後となり、

図 2 $\epsilon=8.5$, $N=2000$ rpm 全開性能

メタノールはそれより低温度でほぼ 910 K となる。

絞り弁全開における運転可能過薄ガソリン等価空燃比は、ガソリンの場合にほぼ 17、メタノールは 18.5 とやや過薄混合気の運転が可能となり、プロパンの場合は 21 以上の運転が可能である。これは、メタノールはガソリンより、より過薄混合気の運転が可能であることを示すと同時に、プロパンのようにガス燃料を用いる場合は、燃焼前の混合気を液体燃料を用いる場合より均一化することが容易に行われ、燃焼を安定にする効果があるものと考えられる。

4.2 圧縮比 12.0 機関の機関回転速度 2 000 rpm における絞り弁全開性能 図 3 は、圧縮比 12.0 の場合について図 2 と同じ関係の特性を示している。レギュラガソリンはオクタン価の関係で運転不可能のために、図には基準とした圧縮比 8.5 におけるガソリンによる性能を示している。

正味平均有効圧力あるいは軸出力と空燃比の関係は圧縮比が 12.0 に対しても、メタノールおよびプロパンの場合に、ガソリン等価空燃比 13 で軸出力が最大になる。正味平均有効圧力は図 2 と比較すると、圧縮比が 8.5 から 12.0 に上がることで、機関回転速度 2 000 rpm で約 5 % の向上になる。

図 3 $\epsilon = 12.0$, $N = 2000$ rpm 全開性能

正味熱効率については、最大値はガソリン等価空燃比がほぼ 16 で得られ、出力最大に相当するガソリン等価空燃比 13 における正味熱効率の値は、メタノールが 32.7 %、プロパンは 31.3 % であり、基準ガソリンエンジンの場合の 27 % に対して、メタノールは約 21 %、プロパンは約 16 % の正味熱効率の向上になる。図 2 で述べたように、同一圧縮比において、ガソリンに対し、メタノールは 11 %、プロパンは 6 % の正味熱効率の向上になり、圧縮比を上げたときのそれぞれの向上率との差 10 % は、圧縮比を 8.5 から 12.0 に上げることで、熱サイクル論から得られる熱効率の向上率 10.2 % によく一致する。

最適点火時期は、高圧縮比の場合は、燃焼前の混合気温度が高くなるために、燃焼速度の上昇によって、遅くなっていく。圧縮比 12.0 の場合は、8.5 に比較して、ガソリン等価空燃比 13 近傍において 5° 程度の遅角になるが、ガソリン等価空燃比 16 以上の過薄混合気においてはその差が大きくなり、たとえばガソリン等価空燃比 22 におけるプロパンの最適点火時期は、圧縮比 8.5 のとき 35° BTDC であるが、圧縮比 12.0 の場合は、 21° BTDC と 14° も遅くなる。

ガソリン等価空燃比に対する排気ガス温度特性は、定性的には図 2 と全く同じであるが、排気ガス温度は圧縮比が高くなれば当然低くなり、圧縮比 12.0 の場合は、メタノールおよびプロパンともにほぼ等しく圧縮比 8.5 の場合より約 10 K 低くなる。

4.3 圧縮比 8.5, ガソリン等価空燃比 13.0 における絞り弁全開性能 図 4 に機関回転速度に対する軸出力、ガソリン等価燃料消費率ならびに最適点火時期の関係を示している。

軸出力の最高値は、機関回転速度がほぼ 5 000 rpm で得られ、ガソリン機関の 53 kW に対し、メタノールの場合は 54.5 kW と約 3 % の出力向上になるが、プロパンの場合は 47 kW で約 11 % の出力低下となる。プロパンによる出力低下は、ガス空気混合器のベンチュリ部の空気抵抗によるもので、図 4 から明らかなように機関回転速度 3 000 rpm 以上の高速回転速度域で顕著に現れている。

ガソリン等価燃料消費率は、機関回転速度 3 000 rpm において最低値を示し、ガソリン機関の場合には、 $302 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 、メタノールは $275 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ で約 9 % の低減となり、正味熱効率ではほぼ 10 % の向上に相当する。プロパンの場合は $287 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ で約 5 % の燃料消費率低減となり、正味熱効率ではほぼ 5 % の向上になる。このような関係は 1 000 rpm から 5 500 rpm の機関回転速度の全域にわたって成立する。

最適点火時期については、ガソリンに対し、メタノールの場合機関回転速度が1000 rpmにおいては、両者の差がないが、2000 rpm以上の高速回転速度域においては、ほぼ5°の遅角になる。一方プロパンに対しては、ガソリンより常に2°前後の進角になる。

4・4 圧縮比 12.0, ガソリン等価空燃比 13.0 における絞り弁全開性能

図5に圧縮比12.0の場合のメ

図4 $\epsilon=8.5$ の全開性能

図5 $\epsilon=12.0$ の全開性能

タノールおよびプロパンの絞り弁全開特性を示している。圧縮比8.5のガソリンによる特性値を基準として示した。

軸出力については、基準ガソリンの53 kWに対して、メタノールの場合機関回転速度5500 rpmで最高出力を示し64 kWと約21%の出力向上になり、プロパンは57 kWで約8%の出力向上になる。

ガソリン等価燃料消費率の最低値は、機関回転速度3000 rpm前後で得られ、ガソリンの燃料消費率302 g/(kW·h)に対して、メタノールの場合に249 g/(kW·h)となり、約18%の減少になる。すなわち正味熱効率でほぼ21%の向上に相当する。この関係は機関回転速度1000 rpmから5500 rpmの全域にわたって成立する。一方プロパンの場合は、260 g/(kW·h)で、ガソリンに対して燃料消費率は約14%の減少になり、正味熱効率は約16%の向上に相当する。

最適点火時期は、機関回転速度1000 rpmの低速において、いずれの燃料に対してもほぼ10° BTDCであるが、3000 rpm以上の高速運転においては、基準ガソリンに対するメタノール、プロパンの遅角が圧縮比8.5の場合より大きく、メタノールは10~11°、プロパンは6~7°となる。

4・5 圧縮比 8.5, 2000rpmにおけるフィッシュ・ブック特性

図6に各燃料の圧縮比8.5、機関回転速度2000 rpmにおける、正味平均有効圧力とガソリン等価燃料消費率、最適点火時期、ガソリン等価空燃比の関係を示している。

図6から明らかなように、絞り弁全開は前述のようにいずれの燃料に対してもガソリン等価空燃比がほぼ13.0で出力最大となり、最大出力のほぼ90%におい

図6 $\epsilon=8.5$ の部分負荷特性

てはいずれの燃料に対してもガソリン等価空燃比が16.5前後で最低燃料消費率になる。出力比が90%以下の部分負荷では、出力の低下とともに最適空燃比は過薄空燃比側に移ってゆく。ガソリンとプロパンは部分負荷の最適空燃比がほぼ等しくなるが、メタノールはそれらよりより最適空燃比が過薄側になる。

最適点火時期については、ガソリンの場合には、全開出力時20° BTDCから、25%出力比で44° BTDCと混合気の過薄化および吸入系負圧の増大とともに、出力の低下に比例してMBTは進角する。メタノールはガソリンのMBTより約5°出力に対して平行的に遅角されたMBT特性を示し、プロパンのMBTは、ガソリンのそれより1~2°の遅角になる。

ガソリン等価燃料消費率は、ガソリンの場合に、出力比90%前後で最低となり263 g/(kW·h)、50%で283 g/(kW·h)、25%で355 g/(kW·h)と出力の減少につれて増加する。メタノールの場合、全開出力では、前述のようにガソリンに比較して9%程度のガソリン等価燃料消費率の減少になるが、出力比90%では5%、50%で4%、25%で3%と出力の低下につれて燃料消費率の減少率は小さくなる。プロパンの部分負荷におけるガソリン等価燃料消費率はメタノールにほぼ等しい値になる。このようにガソリンに比較して、メタノール、プロパンの熱効率の向上は、全開出力状態では極めて大きく、負荷の減少につれて、その向上率が減少する特性をもっている。それらの関係を図7に示している。

出力がBMEPで0.2 MPa以下の低出力においては熱効率の差はほとんどあられない。

4.6 圧縮比12.0, 2000rpmにおけるフィッシュ・フック特性 図8に圧縮比12.0における図6と同様の特性の比較を示している。なおガソリンによる特性値は圧縮比8.5のものを基準として示している。

部分負荷における最適ガソリン等価空燃比は圧縮比の向上とともにより過薄混合気側に移ってゆく。燃料

消費率が最低になるほぼ出力比90%において、メタノールはガソリン等価空燃比が17.5、プロパンはほぼ17.0であり、出力の低下とともにより過薄混合気になり、BMEPが0.2 MPaにおいて、メタノールは約21.0、プロパンは20.5前後と圧縮比8.5の場合と比較するとかなり過薄側にずれる。

圧縮比の向上につれて最適点火時期はより遅角になり、しかも出力の低下とともにその傾向が大きくなる。すなわち圧縮比8.5のガソリンの場合には、BMEPが0.2 MPaでほぼ45° BTDCであるが、メタノール、プロパンともに30° BTDCと約15°の遅角である。

ガソリン等価燃料消費率については、図6と比較すると、圧縮比の向上による燃料消費率の低下は、出力比50%以上の高出力側では顕著であるが、出力比が50%以下の低出力側では圧縮比の影響がほとんどあられていないことがわかる。この現象は、圧縮比の向上によって図示熱効率は良くなるが、一方機械損失はむしろ大きくなり、両者のバランスからこのような

図8 $\epsilon=12.0$ の部分負荷特性

図7 $\epsilon=8.5$ の熱効率

図9 $\epsilon=12.0$ の熱効率

関係になると考えられる。

図9は圧縮比12.0の場合の正味平均有効圧力と正味熱効率の関係を示している。実線は図7に示した圧縮比8.5のガソリンの場合で基準として示している。メタノール、プロパンの正味熱効率の差は、最大出力に近いところを除けばほとんどあられわれず、正味平均有効圧力が0.4 MPaと出力比として約50%より低い出力の場合は図7と比較すると圧縮比8.5と12.0の差があらわれていないことがわかる。

4・7 圧縮比8.5の排気ガス特性 図10に、 $\epsilon=8.5$ の機関のガソリン等価空燃比に対するガソリン、メタノールならびにプロパンの窒素酸化物(NO_x)、一酸化炭素(CO)および未燃炭化水素(THC)の排気ガス特性を示している。

運転条件の軸出力14.7 kW、機関回転速度2000 rpmは、10モード運転における排気ガス値を評価する定常運転の代表点の一つとして選んだ。なお、排気ガス分析は NO_x についてはケミルミネッセンス(CLD)、COについては非分散形赤外分析計(NDIR)、THCについては水素炎イオン化形分析計(FID)を用いている。

NO_x については、燃料のいかにかわらず、ガソリン等価空燃比16でほぼ最大値を示し、ガソリンの場合に3450 ppm、メタノールは2400 ppmと減少するが、プロパンは3700 ppmとなりガソリンより高い濃度となる。メタノールの NO_x 濃度がガソリンより低くなる理由は、メタノールの気化潜熱が大きくまた燃焼生成ガス中の H_2O 濃度が高いためメタノール

の燃焼ガス温度が低いことが理由の一つとして考えられる。過濃空燃比側の NO_x 濃度は、燃料による影響があまりあらわれないが、ガソリン等価空燃比が16以上の過薄空燃比においては燃料の影響が大きくあらわれる。たとえばガソリン等価空燃比20において、ガソリンはほぼ2600 ppmであるが、メタノールは1300 ppmと半減する。

COガスについては、過薄混合気側では燃料のいかにかわらずほぼ零を示すが、過濃空燃比側では、メタノールおよびプロパンのCO濃度はガソリンに比較して低くなる。

またTHCに関しては、メタノールはガソリンよりきわめて低く、一方プロパンはガソリンとほぼ等しい濃度である。なお前述のようなメタノールのTHCは通常ガソリン機関の排気ガス分析に用いられる水素炎イオン化形分析計による測定結果である。

なお、各測定点の点火時期は最適点火時期MBTとした。

4・8 圧縮比12.0の排気ガス特性 図11に $\epsilon=12.0$ の機関のガソリン等価空燃比に対するメタノールならびにプロパンの排気ガス特性を示している。なお基準として $\epsilon=8.5$ のガソリンの排気ガス特性も示している。

NO_x については、圧縮比12.0の場合も圧縮比が8.5の場合と同様にガソリン等価空燃比がほぼ16でいずれの燃料に対しても NO_x 濃度が最大値を示し、ガソリン等価空燃比が14よりも過濃混合気に対する NO_x 濃度は、図10に示されている圧縮比8.5の場合

図10 $\epsilon=8.5$ の排気ガス特性

図11 $\epsilon=12.0$ の排気ガス特性

とほぼ等しい値になる。この現象は、このような過濃混合気火炎の火炎帯内での NO の生成による、いわゆる prompt NO の火炎温度に対する依存性が小さい特性⁽³⁾によるものと考えられる。一方ガソリン等価空燃比が 16 以上の過薄混合気に対する NO_x 濃度は、メタノールは圧縮比 8.5 に比較して約 20 %, プロパンは 10 % 前後高くなる。このような過薄混合気火炎による NO の生成は火炎帯後流で行われるいわゆる、Zeldovich NO がそのほとんどをしめ、Zeldovich NO は火炎温度に大きく影響される特性⁽³⁾があるために、圧縮比 12.0 の過薄空燃比に対する NO_x 濃度が圧縮比 8.5 の場合より高い濃度を示すと考えられる。

CO ガスについては、過薄空燃比側では燃料のいかににかかわらずほぼ零を示すが、過濃空燃比側のガソリン等価空燃比に対する CO 濃度は、図 10 に示されている圧縮比 8.5 の場合の CO 濃度とほぼ等しい値になる。すなわち CO 濃度は圧縮比の影響はあまり受けず空燃比によって一義的にきめられる特性をもっている。

THC に関しては、メタノールならびにプロパンともに図 10 と比較すると、圧縮比を高くすると、ガソリン等価空燃比の過薄および過濃空燃比領域で THC 濃度が高くなる。未燃燃料である THC は、往復動内燃機関の燃焼室壁の表面温度がただか 580 K 前後と燃焼ガス温度の 2800 K 前後に対してきわめて温度が低く、したがって燃焼室壁の表面に消炎領域が存在することと、燃焼時間が 10 ms 前後かあるいはそれ以下の時間できわめて短時間であるなどの理由による本質的な問題である。THC については、それらのこと以外にも、混合気の均一性などいろいろ THC に影響を与える原因が考えられるが、圧縮比を上げることによって THC が増加するのは、圧縮比向上によって燃焼最高温度は上昇するが、排気温度がかえって下がるために、排気系における燃焼が行われにくいことも原因の一つと考えられる。

5. 結 言

圧縮比 8.5 のガソリンによる機関性能を基準として、圧縮比 8.5 ならびに 12.0 に対するメタノールおよびプロパンの機関性能の比較を行ったが、結論として次のようにまとめられる。

5・1 最高出力 圧縮比のいかににかかわらず、いずれの燃料においてもガソリン等価空燃比が約 13 で最高出力となり、圧縮比 8.5 の基準ガソリン最高出力に対して、圧縮比 8.5 の場合メタノールは約 3 % 増

加し、プロパンは約 11 % 減少する。プロパンはガス空気混合器を使用するのでやむを得ない関係である。また圧縮比 12.0 の場合は、メタノールは約 21 %, プロパンは約 8 % の出力向上となる。

5・2 正味熱効率 まず最高出力状態すなわちガソリン等価空燃比 13 の場合は、基準ガソリンに対して、圧縮比 8.5 のメタノールの正味熱効率は約 11 % プロパンは約 6 % の向上であり、圧縮比 12 の場合はメタノール約 21 %, プロパンは約 16 % の正味熱効率の向上となる。それぞれの燃料の圧縮比の差による正味熱効率の違い約 10 % は、熱サイクル論から、圧縮比を 8.5 から 12 に上げることにより理論的に得られる 10.2 % ときわめてよく一致する。同じ絞り弁全開でも、燃料消費率を最低にするガソリン等価空燃比 16 においては、メタノールの正味熱効率は基準ガソリンに対して、圧縮比 8.5 で 6 %, 圧縮比 12 では 16 % の向上となり、その差 10 % は圧縮比の差によるものであるが、メタノールによる正味熱効率の増加はこのように運転条件によって異なる。部分負荷における、たとえばメタノールの基準ガソリンに対する正味熱効率の増加は、出力の低下とともに低くなり、出力比 25 % で 3 % 前後となる。プロパンも定性的には同じである。一方圧縮比の影響は、絞り弁を閉じるに従って小さくなり、ほぼ 1/2 負荷以下でその影響があらわれない。

5・3 点火時期 メタノールはガソリンに比較して燃焼速度が速く、メタノールの MBT は基準ガソリンより、圧縮比 8.5 の場合 2~5° の遅角、圧縮比が 12 の場合は、5~15° の遅角となるが、機関回転速度の上昇、ならびに空燃比の過薄化にともなって遅角の程度が大きくなる。プロパンも定性的にはメタノールと同様である。

5・4 排気ガス NO_x については、基準ガソリンエンジンに対して、メタノールは大幅に低下するが、プロパンは増加する。CO については、過濃混合気の場合にメタノール、プロパンはガソリンより低い濃度になる。また THC に関しては、FID で測定するとメタノールはガソリンより低く、プロパンはガソリンとほぼ等しい濃度になる。

文 献

- (1) Holl, W. H., SAE, 730533 (1973), 8.
- (2) Gülder, Ö. L., *Proc. 19th Symp. Combust.*, (1982), 275.
- (3) 大竹, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, (昭 55), 47, 日本機械学会.

討 論

〔質問〕 伊藤 献一〔北海道大学工学部〕

排気ガス測定に関し、つぎの点をお教え願いたい。

(1) THC を ppm で表示しておられるが、キャリブレーションの方法はどのようにしたのか。

(2) 一般に、ガソリン運転時の THC とメタノール運転時のそれとは大きな差はないと考えられている。ところが、図 10 および図 11 においては、メタノール運転時の THC が、他の場合にくらべ、著しく低くなっている。これには、排気ガスの測定前の処理、あるいは使用した FID 分析計に固有の問題があるようにも思える。メタノール運転の場合、THC のほとんどは未燃のメタノールであることから、THC 測定値をメタノール濃度に換算するとどうなるか。

〔回答〕 (1) THC のキャリブレーションは、ガソリンと同様にプロパンガスで行っている。分析器メーカーによれば、このようなキャリブレーションによるメタノールの表示値は約 20% 低く出るといわれるが、今回の測定は本文に述べたようにすべてガソリンエンジンと同一方法で測定したものである。

(2) したがって、ご指摘の THC 測定値をメタノール濃度に換算すると約 1.2 倍のメタノール濃度ということも考えられる。しかし、現在メタノールエンジンの排気ガス測定法が確立されていない段階では、測定法を明記して、その条件下での測定結果が工学的に意味のあることと考えている。