メタノール熱分解ガスを用いた火花点火機関における
燃焼室内空気流動および排気再循環の影響*首藤 登志夫^{*1}, 岩崎 秀之^{*2}, 俵山 亮太^{*3}Influence of In-cylinder Air Motion and Exhaust Gas Recirculation
on Combustion of Methanol-Reformed Gas in an SI EngineToshio SHUDO^{*4}, Hideyuki IWASAKI and Ryota TAWARAYAMA^{**} Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koencho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

This research analyzed characteristics of combustion and emissions in a spark-ignition internal combustion engine fueled with methanol-reformed gas. Experiments were done with a model gas with 67% of hydrogen and 33% of carbon monoxide that corresponds to the thermally decomposed methanol. This research cleared influences of in-cylinder air motion by swirl on thermal efficiency and exhaust emissions. While the enhanced air motion is effective to improve the combustion efficiency, it simultaneously increases the heat transfer from burning gas to the combustion chamber wall. Because of this, the thermal efficiency decreases in some cases. Influence of EGR on NO_x emission and thermal efficiency in the combustion was also analyzed in this research.

Key Words: Methanol-Reformed Gas, Hydrogen, Swirl, EGR, Combustion, Thermal Efficiency, Cooling Loss

1. 緒 言

炭化水素やアルコールを改質したガスを燃料に用いる内燃機関では、機関排気熱を燃料の改質反応に利用することが可能であるため、排熱回収による高い総合システム効率が期待できる。とくにメタノールを用いる場合には、熱分解反応に要する温度が比較的低いことから、メタノール熱分解ガスを用いた内燃機関についての研究がこれまでにいくつか報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

メタノールの熱分解ガスは、水素2モルと一酸化炭素1モルから成るガスである。水素は広い可燃混合比範囲を持ち、希薄燃焼においても比較的高い燃焼速度を維持できる。また、水素が共存することで一酸化炭素の着火性は大きく向上する⁽⁶⁾ため、両者が共存するメタノール熱分解ガスを内燃機関に用いる場合には希薄燃焼による高い熱効率が期待できる。

希薄混合比条件での燃焼状態を改善する方法のひとつとして、スワールやタンブルなどによる燃焼室内空気流動の利用がある。しかし、火炎伝播速度が大きいために燃焼過程での筒内ガスの対流が強い水素の燃焼においては、燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達によ

る冷却損失割合が大きいことが分かっており⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、水素を含むメタノール熱分解ガスの燃焼において空気流動を強化した際の冷却損失の特性は興味深い。一方、メタノール熱分解ガスを用いた機関においては、水素を用いた場合と比べて熱効率が最高となる空気過剰率が小さく、熱効率に対する最適な空気過剰率で運転した場合のNO_x排出量が水素燃焼に比べて若干多いことが分かっている⁽⁵⁾。そのため、より希薄な混合比条件での熱効率向上あるいは熱効率に対する最適な空気過剰率でのNO_x排出量の低減がメタノール熱分解ガスを用いた機関において求められる。

本研究では、メタノール熱分解ガスを燃料に用いた火花点火機関において、燃焼室内空気流動の強化および排気再循環が燃焼、排気、ならびに冷却損失を始めとする各種熱効率影響因子の特性に及ぼす影響について解析を行った。

2. 実験装置および実験方法

本研究には、図1に示すような自動車用4気筒4サイクル火花点火機関(ボアφ89mm, ストローク96mm, 圧縮比14)を使用した。燃料ガスは、メタノールの熱分解ガスを想定した水素67%一酸化炭素33%の模擬ガスであり、ポンペよりレギュレータを介して吸気管内に連続的に供給し、予混合燃焼を行った。また、比較のために水素を燃料に用いた実験を一部の条件におい

* 原稿受付 2004年1月23日。

^{*1} 正員、北見工業大学工学部(〒090-8507 北見市公園町165)。^{*2} 元：武蔵工業大学大学院工学研究科。^{*3} 日産工機(株)(〒253-0105 神奈川県高座郡寒川町岡田6)。

E-mail: shudoto@mail.kitami-it.ac.jp

て行った。燃料ガス流量の測定には熱式気体質量流量計(オーバル MAFLO-OVAL)を用いた。実験において、シリンダーヘッドに取り付けたピエゾ式圧力変換器(AVL GM12D)により燃焼圧力を計測し、各運転条件につき20サイクル分のデータを平均した後に図示熱効率、見かけの熱発生率および冷却損失割合などの解析を行った。排気中のNO_x濃度の測定にはCLD式分析計、CO濃度の測定にはNDIR式分析計、O₂濃度の測定にはMPA式分析計を用いた。燃焼室内空気流動の影響を調べる際には、図2に示すようにスワール制御プレートを機関の吸気ポートと吸気マニフールドの間に取り付けて実験を行った。これにより供試機関の燃焼室内に形成されるスワール比は4.7である。なお全ての実験において、燃料ガスを含めた体積効率を70%、機関回転速度を2000rpmとした。また、排気再循環(EGR)の影響を調べる際には、クールドEGRガスを想定して、窒素および二酸化炭素をポンベからニードル弁および流量計を介して吸気管内に供給して実験を行った。

Fig.1 Combustion chamber of the tested engine

Fig.2 Layout of swirl control plate and ports

3. 結果および考察

3.1 水素燃焼との比較 空気過剰率に対するメタノール熱分解ガス(MRG)燃焼の特性を水素燃焼と比較した実験結果を図3に示す。水素燃焼に比べると、メタノール熱分解ガス燃焼では熱効率が低く、その差は空

気過剰率 λ の増加とともに拡大する傾向があり、CO排出濃度が同時に増加する。この際、何れの燃料を用いた場合にも、空気過剰率の増加とともに最適点火時期MBTが進角する傾向があるが、より大きな点火進角がメタノール熱分解ガスの燃焼においては必要であり、これらの結果にはメタノール熱分解ガスの燃焼速度が水素に比べて小さいことが影響を及ぼしていることが考えられる。このため、メタノール熱分解ガスの燃焼においては図示熱効率 η が最高となる空気過剰率が水素燃焼よりも小さく、機関を最適空気過剰率で運転した場合のNO_x濃度が若干高くなる。したがって、メタノール熱分解ガスを用いた機関において高熱効率と低排気公害を実現するには、より希薄な混合比領域での熱効率向上あるいは最適空気過剰率でのNO_x排出量低減が重要である。この目的のために、燃焼室内空気流動を利用することによる希薄混合比条件での燃焼状態および熱効率への影響について、ならびに排気再循環がNO_x排出特性に与える影響について検討を行った。

Fig.3 Comparison of methanol reformed gas combustion and hydrogen combustion

3.2 燃焼室内空気流動の影響 メタノール熱分解ガスの燃焼においてスワールによる燃焼室内ガス流動が熱効率および排気特性に及ぼす影響について調べた実験結果を図4に示す。点火時期 θ_{ig} はそれぞれの条件における最適点火時期MBTである。ここで発熱等容度 η_{gh} は、Ottoサイクルの理論熱効率 η_h 、1サイクルあたりの見かけの熱発生量 Q 、行程容積 V_h 、隙間容積 V_c 、クランク角 θ における筒内容積 V 、筒内ガスの比熱比 γ および見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ を用いて以下の

式により表される⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾.

$$\eta_{gh} = 1/(\eta_{th} Q) \int (1 - (V_h + V_c)/V)^{1-\gamma} dQ/d\theta d\theta \quad (1)$$

また、見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ は次式により算出し⁽⁹⁾、得られた見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ を積分することで見かけの熱発生量 Q を求めた。

$$dQ/d\theta = V/(\gamma-1) dP/d\theta + \gamma P/(\gamma-1) dV/d\theta - PV/(\gamma-1)^2 d\gamma/d\theta \quad (2)$$

図より、スワールによって希薄混合比での図示熱効率 η_i が増加することが分かる。これにより、図示熱効率が最高となる空気過剰率が燃料希薄側へ移動し、高熱効率と低NOx排出が両立できる条件が存在することが分かる。この際、CO排出濃度が低下するとともに発熱等容度 η_{gh} が増加していることから、スワールによる燃焼室内ガス流動の増加が燃焼速度および燃焼効率の向上をもたらしたことが窺えるが、これらの改善効果は空気過剰率の減少に伴って低下する傾向がある。

Fig.4 Influence of swirl on combustion of methanol reformed gas at MBT ignition timings

図5は、点火時期一定の元で、スワールの有無がメタノール熱分解ガス燃焼における筒内圧力 P 、見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ および見かけの熱発生量 Q に及ぼす影響を調べた結果である。設定した空気過剰率は $\lambda=2.0$ であり、点火時期 θ_{ig} はスワールが無い条件での最適点火時期MBTである。図より、スワールを導入した場合には、見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ の上昇率が増加し燃焼期間が大きく短縮しておりスワールによる燃焼室内の流動が燃焼速度を増加させる様子が明らかである。しかし同時に、スワールが無い場合に比べて見かけの熱発生量 Q が

低下しており、空気流動の増加により燃焼速度だけでなく燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達量も増加していることが窺える。

Fig.5 Indicator diagrams for combustion of methanol reformed gas with or without swirl

Fig.6 Influence of swirl on combustion of methanol reformed gas at fixed ignition timings

図6は、各空気過剰率において、スワールが無い場合の最適点火時期MBTに点火時期を固定したまま、スワールを導入した場合の熱効率影響因子を空気過剰率に対して示している。図は、図示熱効率 η_i とともに発熱等容度 η_{gh} 、燃焼効率 η_{th} 、冷却損失割合 ϕ_w を解析した結果である。燃焼効率 η_{th} は排気中の O_2 濃度およびCO濃度の計測値から算出し、冷却損失割合 ϕ_w は、1サイクルあたりの冷却損失熱量 Q_c および実熱発生量 Q_B により以下のように定義して求めた。

$$\phi_w = Q_c/Q_B \quad (3)$$

冷却損失熱量 Q_c は実熱発生量 Q_B および見かけの熱発生量 Q を用いて以下のように表され、

$$Q_c = Q_B - Q \quad (4)$$

1サイクルあたりの実熱発生量 Q_B は、1サイクルに供給した燃料が持つ発熱量 Q_{fuel} と燃焼効率 η_b の積で表せるため、冷却損失割合 ϕ_w は次式により求められる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$\phi_w = 1 - Q/(\eta_b Q_{fuel}) \quad (5)$$

図より、スワールの導入によって燃焼効率 η_b が向上するものの、冷却損失割合 ϕ_w の大幅な増加のために図示燃焼効率 η は低下する様子が分かる。冷却損失割合 ϕ_w の増加から、空気流動の強化およびそれに伴う燃焼促進による火炎伝播速度の増加が燃焼ガスと燃焼室壁面との間の熱伝達を促進したことが考えられる。また、図5から分かるように、点火時期を固定したままスワールを導入した場合には、燃焼期間の短縮により熱発生重心が進角することで筒内最高圧および筒内ガス平均

温度の最大値が増加することも熱伝達量の増加をもたらしていることが考えられる。そのため、スワールを導入した場合には、熱効率に対する最適な点火時期が遅角する。なお、大幅に希薄な混合比条件において、空気過剰率の増加に伴って冷却損失割合 ϕ_w が増加する傾向がある。これは、混合気の希薄化に伴って、実熱発生量 Q_B はほぼ一様に減少するのに対して、燃焼速度低下に伴う最適点火時期進角により燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達が生じる期間が増加すること等のために、冷却損失熱量 Q_c の減少率が実熱発生量 Q_B の減少率に比べて小さいことによるものと考えられる。

3.3 点火時期特性への影響 空気過剰率 $\lambda=4.0$ の大幅な希薄混合比条件において、スワールの導入がメタノール熱分解ガス燃焼の熱発生率特性に及ぼす影響について点火時期をパラメータとして調べた結果を図7に示す。スワールにより燃焼期間が短縮し、同時に見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ の最大値が増加している。また、

Fig.7 Indicator diagrams for methanol reformed gas at different ignition timings

Fig.8 Indicator diagrams for hydrogen at different ignition timings

Fig.9 Influence of swirl on thermal efficiency factors and CO emission

点火時期遅角側において見かけの熱発生量 Q の最大値が大幅に増加しており、燃焼効率の著しい向上が窺える。図8は、比較のために行った水素燃焼における同様の実験の結果である。メタノール改質ガス燃焼の場合と同様に、スワールにより燃焼期間が短縮するとともに見かけの熱発生率 $dQ/d\theta$ の最大値が増加しているが、スワールを導入しない場合にも燃焼効率が高い水素燃焼では見かけの熱発生量 Q の最大値の増加は小さい。

以上の結果に対して、スワールが発熱等容度 η_{gh} および冷却損失割合 ϕ_w などの熱効率影響因子に与える影響を解析した結果を、CO排出濃度とともに図9に示す。水素燃焼においてはスワールが存在しない場合にも燃焼効率 η_u が比較的高いため、スワールによるその改善は殆ど見られない。発熱等容度 η_{gh} は点火時期の遅角に伴い低下する傾向があるが、スワールによってその低下が抑えられる。この発熱等容度の増加により、点火時期遅角側において図示熱効率が向上し、最適点火時期MBTが遅角側に移動している。また、進角側ではスワールにより熱効率が低下する傾向があるが、これには、燃焼室内の流動の増加に伴う冷却損失の増大が影響していることが考えられる。一方、メタノール改質ガス燃焼では、スワールにより燃焼効率 η_u が大きく増加しており、CO排出量が減少している。この大幅な燃焼改善にもかかわらず、点火時期進角側においては、

冷却損失割合 ϕ_w の増加のために図示熱効率の大きな向上はみられない。このように、スワールが存在しない場合にも冷却損失割合が大きい水素燃焼に比べて、メタノール改質ガス燃焼ではスワールによる冷却損失割合の増加が著しい。しかし、点火時期を遅角した場合には冷却損失割合が低下することに加えて、燃焼促進により発熱等容度が改善されるために、スワールによる熱効率の向上が可能である。

3・4 排気再循環の影響 メタノール熱分解ガスの燃焼において、排気再循環(EGR)が排気特性および熱効率影響因子に及ぼす影響を調べた結果を図10に示す。実験において設定したEGR割合は0, 10, 20%であり、空気過剰率は $\lambda=2.0$ 、点火時期は最適点火時期MBTである。図より、EGR割合の増加に伴って NO_x 排出量が効果的に減少するとともに、冷却損失割合 ϕ_w が同時に低下する様子が明らかである。また、EGR割合の増加に伴って燃焼効率 η_u が若干低下する傾向があり、その傾向はCO排出量の増加からも分かる。また、10-90%燃焼期間 θ_{10-90} が若干拡大する傾向が見られるが、最適な点火時期を選択することで発熱等容度 η_{gh} の低下は僅かに抑えられている。一方、この実験で設定したEGR割合の範囲では、図示熱効率 η_i には変化が見られない。ここで、内燃機関の図示熱効率 η_i と本研究において解析を行った各熱効率影響因子ならびに

Ottoサイクルの理論熱効率 η_{th} の間には次の関係が成り立つ⁽¹⁰⁾.

$$\eta = \eta_{th} \eta_{gih} \eta_a (1 - \phi_w) \quad (6)$$

本実験結果においては、EGR割合増加に伴う混合気中の不活性ガスの増加による燃焼温度の低下が燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達量の減少をもたらす冷却損失割合 ϕ_w が低下する一方で、メタノール熱分解ガス中の水素が持つ高い燃焼速度のために、不活性ガスの導入による燃焼状態の悪化が小さく抑えられたことにより、燃焼効率 η_a および発熱等容度 η_{gih} の低下と冷却損失割合 ϕ_w の低下が相殺したものと考えられる。

Fig.10 Influence of EGR on thermal efficiency and exhaust emissions in combustion of methanol reformed gas

以上、高い燃焼速度を持つ水素を含むメタノール熱分解ガスを燃料に用いた火花点火機関においては、EGRガスを導入した場合にも燃焼状態の悪化が小さく、熱効率を低下させずにNOx排出量の大幅低減が実現できる条件が存在することが示される。

4. 結 言

本研究にて得られた結果を以下に要約する。

(1) メタノール熱分解ガスを燃料に用いた火花点火機関において、スワールによる燃焼室内空気流動の強化は燃焼効率および発熱等容度を増加させるが、同時に冷却損失を増加させる傾向がある。

(2) スワールが存在しない場合にも冷却損失割合が大きい水素燃焼に比べて、メタノール熱分解ガス燃焼ではスワール導入による冷却損失割合の増加率が大きい。この冷却損失割合増加のため、運転条件によっては熱効率が低下する場合がある。

(3) 十分に希薄な混合気濃度および適切に遅角した点火時期においては、空気流動強化による燃焼効率および発熱等容度の増加が冷却損失割合の増加を上回り、熱効率が向上する。

(4) 空気流動強化による熱効率改善効果は希薄混合比条件においてとくに大きいため、熱効率に対する最適な空気過剰率が希薄化し、高熱効率と低NOx排出の両立が可能である。

(5) 高い燃焼速度を持つ水素を含むメタノール熱分解ガスを用いた火花点火機関においては、EGRガスを導入した場合にも燃焼状態の悪化が小さく、熱効率を低下させずにNOx排出量の大幅低減が実現できる条件が存在する。

日産自動車株式会社よりスワール比制御プレートをご提供頂いた。ここに記し謝意を表す。

文 献

- (1) 広田, メタノール改質ガスエンジンの研究, 自動車技術, **34**-10, (1980).
- (2) 田中・佐藤・阿川, メタノール改質ガスエンジンに関する研究, 機論, **52**-484 B, (1986).
- (3) 山口・吉田・長家・鈴木・瀬古・堀・金, メタノール改質ガスディーゼルエンジンの開発研究, 自技論, **36**, (1987).
- (4) 前川・菅原・前田・塩見・大和・土屋・大屋, メタノール改質ガスによる筒内噴射エンジンの研究, 機講論, 97-25, (1997).
- (5) 沼田・中島・首藤・山根・昼間・高木・小松, ハイブリッド自動車用メタノール改質ガス機関に関する研究, 自技前刷, 72-99, (1999).
- (6) Tanford, C., Pease, R., Equilibrium Atom and Free Radical Concentrations in Carbon Monoxide Flames and Correlation with Burning Velocities, *J. Chemical Physics*, **15**, (1947).
- (7) 首藤・二口・中島, 水素予混合燃焼機関の熱効率に関する解析, 機論, **66**-644, B, (2000).
- (8) 首藤・鍋谷・中島, 水素予混合燃焼機関における等容度および冷却損失の解析, 自技論, **31**-4, (2000).
- (9) 首藤・鍋谷・中島, インジケータ線図を用いた水素エンジンの燃焼解析に関する研究, 機論, **67**-654 B, (2001).
- (10) List, H. *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschinen*, Springer, (1939).
- (11) 首藤・津賀・中島, 水素・一酸化炭素混合ガスの内燃機関における燃焼特性, 自技論, **31**-4, (2000).
- (12) 首藤・津賀, メタノールから得られるH₂-CO-CO₂混合燃料の燃焼および冷却損失特性, 自技論, **32**-4, (2001).