圧縮着火機関における燃焼室壁面金属とメタノール燃料の着火安定性*

侯 志新^{*1}, 原田 明^{*2}, 小川 英之^{*3}
近久 武美^{*3}, 宮本 登^{*3}, 村山 正^{*3}

Effects of the Metals of the Combustion Chamber Wall on Methanol Ignition in Compression Ignition Engines

Zhixin HOU, Akira HARADA, Hideyuki OGAWA,
Takemi CHIKAHISA, Noboru MIYAMOTO, and Tadashi MURAYAMA

This paper investigates methanol combustion behavior with different metals in the combustion chamber wall, and determines means to improve ignitability. The results indicate that among the metals tested iron is the most effective in improving methanol ignition. In IDI engines, ignition is affected more by the metal in the chamber wall than in DI engines, as in the case of combustion systems where more unburnt methanol tends to remain longer. The in-chamber concentration of formaldehyde, an intermediate product of methanol combustion, appears to be an important determinant for methanol ignition. To achieve smooth ignition without misfiring, a specific formaldehyde concentration is necessary immediately prior to methanol injection in the combustion chamber.

Key Words: Internal Combustion Engine, Compression Ignition Engine, Methanol Fuel, Ignitability, Catalytic Combustion, Formaldehyde

1. 序 論

近年、内燃機関においては、高効率かつクリーンなメタノール燃焼を実現するための広範な研究が行われてきている。

本研究は、とくに圧縮着火機関におけるメタノールの着火促進を主眼として、その燃焼室壁面の各種金属が触媒としてメタノールの着火あるいはその安定性に及ぼす効果について検討したものである。

その結果、燃焼室壁面における金属材質の相異がメタノールの着火性に及ぼす影響は必ずしも大きくはないが、その着火性は供試金属の中でも鉄において、直噴式よりも予室式において、また予室式では未燃メタノールが多く残る燃焼系においてそれぞれ良好であり、またこの場合、燃料噴射直前におけるホルムアルデヒド濃度が着火の安定性に対する評価因子になっていることなどが明らかになった。

なお、金属触媒を使用して燃焼を促進させようとする

る研究あるいは実例は数多くみられ、例えば、自動車あるいは工場からの排気処理に対しては、白金、パラジウム、ロジウム、コバルトあるいはニッケル系の触媒利用がある⁽¹⁾。また、ガスタービン燃焼器、あるいは水管ボイラなどにおいても触媒が積極的に用いられ、燃焼効率の向上を図った例⁽²⁾のほか、ジェットエンジンのアフタバーナ火炎の安定化のために触媒が用いられたものなども報告されている⁽³⁾。これらはいずれも定常燃焼に対するものであり、反応物質の反応時間を十分にとり得る燃焼系である。これに対し、本研究の対象である圧縮着火機関においては、非定常噴霧燃焼であるため、触媒による反応時間が極めて短いのが特徴であって、その燃焼室内での触媒利用に関する系統的な研究は少ないようである。

2. 実験装置、および方法

供試機関は、横形、水冷、単気筒、ボア・ストローク 102×106 mm、行程容積 866 cm³、定格出力 11kw/2400 rpm の四サイクル予室式圧縮着火機関（圧縮比 21.0）であり、シリンダヘッドおよびピストンの交換によって直噴式（圧縮比 20.6）にもなり得るものである。図 1 にそれぞれの燃焼室形状を示す。

実験に際しては、図 2 に示すように供試機関に固有

* 昭和 62 年 8 月 20 日 第 65 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 2 月 5 日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院（〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目）。

^{*2} 准員、日野自動車工業（株）（〒191 日野市日野台 3-1-1）。

^{*3} 正員、北海道大学工学部。

の「予室 A」のほか、圧縮比および副室容積比は同一であるが連絡孔を長くした「予室 B」、および予室壁面の加熱および温度測定を行うために予室 B を改造した「予室 C」をそれぞれ用いた。供試燃料は純度 99.5% のメタノールである。

燃焼室内の過酷な温度条件あるいは加工性などを考慮し、予室内の内壁面に、また直噴式ではそのピストン冠部内壁面にそれぞれ膜厚 7~10 μm の金属めっきを施した。供試金属は、メタノールの分解反応を促進すると考えられる二つの金属群の中から選択した。すなわち、メタノールをホルムアルデヒドを介して水素と一酸化炭素へ分解すると言われる⁽⁴⁾ニッケル、白金、タングステン、パラジウムなどの第 1 群の金属中から白金を、一方、メタノールをホルムアルデヒドを介してギ酸メチルに変え、その後水素と一酸化炭素へと変換するところの、銅と銀をそれぞれ選んで実験に供した。なお、基準鉄材として S35C を使用した。

機関の運転に際しては、原則として冷却水温度 90°C、機関回転速度 1000 rpm とし、吸気温度は、吸気管内に電気ヒータを挿入することにより任意の値に設定した。

予室内残留ガス中におけるホルムアルデヒド濃度は、高速ガス採集装置によって、燃料噴射直前のガスを採取し、ガス検知管（日本ドレーゲル社 67 26760）により定量した。

また、排気中の未燃メタノールの測定は、ポラパック Q を充てん剤としたガスクロマトグラフィーに

よって行った。

3. 実験結果、および考察

3.1 燃焼室壁面金属がメタノールの着火性に及ぼす影響 まず、直噴式機関において壁面金属材質の相異がメタノールの着火性および排気特性に及ぼす影響について検討した。本実験では、壁面付近におけるアルコールの反応を重視し、単孔ホールノズルにより燃料を燃焼室キャビティの側面に沿って噴射・付着させる、いわゆる M 燃焼方式を採用することにより、着火に対する壁面金属材質の影響を調べた。

図 3 は、燃料噴射時期 15° CA BTDC、吸気温度 150°C における排出未燃メタノール (UBM)、および着火遅れと各種金属との関係を示したものである。すなわち、未燃メタノールおよび着火遅れは、壁面金属の違いによって大きく変化しておらず、このことからわかるように、直噴式機関においては運転条件のいかにかわからず、メタノールの着火性は、燃焼室金属材質によってほとんど影響されない。

つぎに、供試予室式機関に固有な予室 A の内壁面が鉄と銀の場合を例にとり、壁面金属とメタノールの着火性との関係について検討した。

図 1 供試燃焼室形状

図 2 予燃焼室形状

図 3 直噴式機関における壁面金属と着火性

図 4 燃料噴射時期に対する着火安定性 (予室 A)

図 4 は、吸気温度 115°C 一定において燃料噴射時期を変えた場合の着火性について調べた結果である。図 4 から、銀に比べて鉄においては、着火遅れおよびその変動（標準偏差 $\sigma_{\text{Igni.}}$ ）が若干減少すると同時に、失火が生じ始める噴射時期は著しく遅延しているのがわかる。また、図 4 には示していないが、機関回転速度および空気過剰率の影響について調べた結果、両金属における着火性の差異は回転速度が高くなるほど、さらには空気過剰率が小さくなるほど減少する、すなわち高回転・高負荷ほど壁面材質による着火性への影響は小さくなることがわかった。

一方、図 5 は鉄と銀とにおいて吸気温度がメタノールの着火性に及ぼす影響を示すものである。図 5 から、鉄と銀とにおける着火遅れおよびその変動の差異は、吸気温度が高い場合にはほとんど認められないが、温度が低くなるにしたがって明確に現れ、鉄での着火性が銀に比べて優れているのが明らかである。

以上のように、予室式機関におけるメタノールの着火性は壁面金属の相異によって若干の影響を明らかに受け、その程度は、直噴式機関に比べて著しいと同時に、回転速度が低いほど、空気過剰率が大きいほど、吸気温度が低いほど、さらに燃料噴射時期が遅いほどそれぞれ大きくなる。これらの条件はいずれも、燃焼室内に未燃メタノールあるいはそれに対応するガスがより多量に、またより長時間滞留することに集約して考えることができる。

そこで、この点を確認するために予室連絡孔を長くした予室 B を用いて、予室内に未燃メタノールあるいはそれに対応するガスを積極的に残留させた場合について、壁面金属とメタノールの着火性との関係を再検討した。

壁面金属としては、白金、銀、銅、および鉄を用いた。実験の結果、未燃メタノールを含む残留ガス

が比較的少ない予室 A に比べて、予室 B では、金属材質による着火性の差異がいっそう明確に現れ、その程度は、例えば燃料噴射時期が遅延するほど、あるいは回転速度が低いほど顕著になった。一例として図 6 に各種金属に対する吸気温度と着火性との関係を示す。図 6 において、いずれの金属においても、吸気温度の低下にともなって着火遅れ、およびその変動が増加し、着火安定性が低下する傾向が認められるが、とくに失火により運転が不可能となる温度、すなわち失火限界吸気温度は鉄が最も低く、次いで白金、銀、銅の順に高くなり、最後の銅に至っては、他の金属に比べて著しく高い吸気温度でなければ失火が生じることになる。なお、鉄と銀とにおける失火限界吸気温度および着火遅れの変動についてみると、先に述べた予室 A に比べて残留ガスが多い予室 B では、両金属による差異が顕著に現れているのがわかる。これらの結果から、壁面金属の着火性に対する影響は、未燃メタノールなどが多く残留する燃焼系においてより明確に認められると同時に、その効果については、鉄におけるメタノールの着火性が最も良好であり、他の金属については、通常触媒作用が強いと言われるもののほど着火性が良いことが明らかになった。

なお、これら金属の効果に対しては、金属材質自体による影響のほかに着火性の差異にともなう予室内の壁温変化の影響も同時に作用していることが考えられるため、壁面温度の測定と制御が可能な予室 C を用い

図 5 吸気温度に対する着火安定性（予室 A）

図 6 吸気温度に対する着火安定性（予室 B）

図 7 鉄と銀における壁面温度（予室 C）

図 8 同一壁面温度における吸気温度と着火安定性 (予室 C, 壁温 398°C)

て、壁面温度に対する検討を行った。

図 7 に、壁面金属が鉄と銀とにおける壁面温度の測定値を示す。図 7 中の (a), (b) は、図 2 に示した測定点をそれぞれ示しているが、いずれの測定点においても、銀に比べて鉄のほうが約 20°C ほど壁温が高くなっている。これに対しては、銀に比べて鉄における着火遅れおよびその変動の減少が大きく作用しているものと思われる。

そこで、鉄と銀とにおいて壁面温度を測定点 (a) で 398°C 一定とした場合におけるメタノールの着火性を比較して、図 8 に示す。これまでに得られた結果と同様に、銀に比べて鉄での着火遅れが短縮し、また失火限界吸気温度が低下している。すなわち燃焼室壁面金属材質の相異にともなう燃焼状態の変化によって壁面温度が変化するにしても、金属材質による着火促進効果は明らかに存在することがわかる。

3・2 メタノールの着火を促進する反応物質 金属触媒下におけるメタノール分解の初期過程では、ホルムアルデヒドが中間生成物として生成されるとされている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そこで本実験では、ホルムアルデヒドに注目し、メタノールが予室内に噴射される直前における予室内ガスを採取して、そのホルムアルデヒド濃度を測定した。

図 9 は、吸気温度を変えた場合における残留ガス中のホルムアルデヒド濃度を示したものである。いずれの金属においても吸気温度の低下にともなって、ホルムアルデヒド濃度が単調に減少している。また、同一吸気温度でのホルムアルデヒド濃度は、失火限界吸気温度が低い金属ほど増加しており、着火性と良く対応している。例えば、失火限界吸気温度が低く着火性が良好な鉄および白金においてはホルムアルデヒド濃度が最も高く、一方着火性が最も悪い銅では、ホルムアルデヒド濃度が最も低くなっている。なお、各金属の失火限界吸気温度は、図 6 に見られるように鉄でほぼ 98°C、白金 104°C、銀 107°C および銅 125°C であるが、この吸気温度に対応するホルムアルデヒド濃度は、

図 9 燃料噴射直前におけるホルムアルデヒド濃度

いずれの金属においても 3~4 ppm であることが図 9 から明らかである。

したがって、メタノールの着火に対する金属の触媒作用を支配し、あるいは評価するための一つの化学物質としてホルムアルデヒドを挙げることができると同時に、メタノールの安定した圧縮着火を確保するためには、燃料噴射直前における燃焼室内のホルムアルデヒド濃度をある値以上にしておくことが必要と考えられる。

4. 結 論

メタノールを燃料とする圧縮着火機関において、その燃焼室壁面金属と着火性に関していくつかの有益な知見を得ることができた。すなわち、

(1) 予室内の壁面金属がメタノールの着火あるいはその安定性に及ぼす影響は必ずしも大きくはないが、高速機関においても明らかに認められる。その影響の程度は低回転、低負荷、遅延燃料噴射、および未燃メタノールが多く残留する燃焼系においてそれぞれ著しい。これらの条件は、燃焼室内に未燃メタノールをより多く、かつ長時間滞留させることに集約して考えることができる。

(2) 予室式機関においては、メタノールの着火性は鉄 (S35C) を使用した場合に最も良好であり、白金、銀、銅の順に悪化する。

(3) 予室式機関における壁面金属による着火性の差異は、メタノール噴射直前における予室内ガス中のホルムアルデヒド濃度によって評価し得る。例えば、いずれの金属においても、メタノール噴射直前の予室内ホルムアルデヒド濃度が約 4 ppm 以下になると失火が生じる。

(4) 予室式機関に比べて直噴式機関においては、燃焼室壁面金属がメタノールの着火性に及ぼす影響は比較的少ない。

本研究の遂行に当たって協力を得た日本エンゲルハルト(株)市川研究所, および日本電装(株)岡島寿和君に対して感謝の意を表する次第である。

文 献

(1) Anderson S. J., ほか1名, *ASME Paper*, No. 81-GT-

43(1981).

(2) Kesselring J. P., ほか3名, *PB Rep.*, PB-81-236150(1981).

(3) Angello. L. C., ほか1名, *ASME Paper*, No. 80-GT-56(1980).

(4) 安盛・ほか1名, 日本化学雑誌, 92-8(昭46), 659.

(5) 水野, 表面誌, 19-9(昭56), 513.