セラミックス遮熱形
メタノール ATAC エンジンの燃焼と排気*飯田 訓正^{*1}, 細沼 伸司^{*2}, 吉村 謙一^{*2}
高瀬 繁寿^{*2}, 藤原 康博^{*3}Combustion and Emission of Low Heat Rejection,
Ceramic Methanol ATAC EngineNorimasa IIDA, Shinji HOSONUMA, Ken'ichi YOSHIMURA,
Sigehisa TAKASE and Yasuhiro FUJIWARA

When methanol is used as fuel, a hazardous unburned methanol, aldehyde, is exhausted. To solve this, a low heat rejection engine with an ATAC (active thermo-atmosphere combustion) system was adopted. By using a ceramic combustion chamber, the surface temperature of the combustion chamber is kept at high temperatures of 200 to 250 K. The characteristics of the combustion process and emissions from the ceramic methanol-fueled ATAC engine are examined. widening of the ATAC operation region with the use of methanol, and reduction of Formaldehyde emission due to the adoption of the ceramic combustion chamber are achieved experimentally. When the temperature of the combustion chamber wall becomes high, the thermal efficiency is reduced because the ignition timing is too early in ATAC operation. Supplying a lean fuel mixture to the engine yields a good result in both exhaust emissions and fuel consumption.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion, Two-Stroke Engine, Methanol, Ceramics, Low Heat Rejection Engine, Formaldehyde, NO_x, ATAC

1. はじめに

従来の2サイクル機関においてそのほとんどはクラークケース圧縮方式を用いており、低負荷時の異常燃焼、失火現象が大きな問題となっている。大西らは、これらの問題の解決のために ATAC(Active thermo-atmosphere combustion: 活性熱雰囲気燃焼)を取り入れたエンジンを開発した⁽¹⁾。ATACとは、比較的残留ガスの多く存在する中・低負荷時における自己着火による燃焼であり、従来の火花点火による燃焼に比べ安定した、炭化水素の排出の少ない燃焼であることが知られている⁽²⁾。

メタノールを燃料として用いた場合、特に始動・低負荷時において多く排出される未燃メタノール、ホルムアルデヒドといった有害物質をいかに低減し得るかが問題となる。これを解決する方法として、この ATAC 方式のエンジンを用い、さらに、その燃焼室壁面構成部材にセラミックスを用いることにより燃焼室

壁の断熱、高温化を図るという手法が考えられる。

本研究は、セラミックス遮熱形 ATAC エンジンのメタノール燃料への適合性を検討することを目的として、その燃焼特性および排気特性について実験検討を加えたものである。まず、ATAC方式の2サイクルエンジンを供試機関とし、燃料にガソリンおよびメタノールを用いた場合についての ATAC 運転領域を、機関回転速度、平均有効圧をパラメータとして比較検討し、燃料の差異が ATAC へ及ぼす影響について検討した。次に、燃焼室構成部材にセラミックス(窒化けい素)を用い、燃焼室内の断熱、高温化による諸特性への影響、排気改善効果について検証したので報告する。

2. 実験装置および実験方法

図1に供試機関の断面図とセラミックス化部分を示す。図2に本実験の測定システムを示す。供試機関には、日本クリンエンジン研究所の ATAC 方式 NiCE-10 形エンジン(空冷2ストローク直立単気筒、排気量 98 cc, 圧縮比 6.0)を用いた。掃気通路の絞りがその特徴であり、これにより ATAC を実現している。本実験では、燃焼室壁面構成部品であるシリンダヘッドの材質をセラミックス(窒化けい素)に変更し、従来のアルミニウム合金のシリンダヘッドと併せて使用した。燃

* 原稿受付 平成5年4月8日。

*¹ 正員、(財)神奈川科学技術アカデミー (〒213 川崎市高津区坂戸3-2-1)、慶應義塾大学理工学部 (〒221 横浜市港北区日吉3-14-1)。*² 慶應義塾大学大学院。*³ 正員、(財)神奈川科学技術アカデミー、北海道工業大学工学部 (〒006 札幌市手稲区前田7条15-4-1)。

料はガソリン(オイル 100:1 混合)およびメタノール(ひまし油 100:1 混合)を用い、回転速度、平均有効圧をパラメータとして実験を行い、ATAC 運転領域の調査、熱発生率(単領域法:着火時期、燃焼期間)、最高筒内圧力変動の解析により、燃焼、排気特性について検証した。また、当量比をパラメータとして同様の測定、解析を行った。ATAC 運転領域については、エンジン運転中に一時的に点火栓の火花放電を止めた際にその後も安定した運転が維持可能か否かで判断し、

運転が維持できない領域は通常燃焼運転領域と定義した。

排気中のホルムアルデヒド、未燃メタノールの測定は、Ni 触媒還元法によりメタンに還元してから FID で検出する方法によった⁽³⁾。

3. 実験結果および考察

3・1 燃料の違いによる ATAC 運転領域、燃焼過程、排気特性への影響

ここでは、供試機関のシリンダヘッド材質にアルミニウム合金(図中では Al と表記)を用い、燃料(ガソリン、メタノール)を変えた際の諸特性について比較検討する。

図 3, 4 に燃料としてガソリン、メタノールを用いた場合の ATAC 運転領域を平均有効圧、回転速度をパラメータとして示す。メタノールを燃料に用いると、ガソリンに比べその ATAC 運転領域は大幅に拡大する。特に回転速度の低い領域および平均有効圧の小さい領域への拡大が見られ、2000 rpm から 3500 rpm の範囲で ATAC による無負荷のアイドル運転が可能となる。また、ガソリンの場合のグラフ上の▲の領域、つまり、ATAC と通常燃焼が混在する領域が多く存在するのに対し、メタノールでは、ATAC と通常燃焼の領域が明確に分かれるという特徴がある。

図 5, 6 に燃料としてガソリン、メタノールを用いた場合の燃料消費率を示す。なお、比較のためメタノールの燃料消費量は、低位発熱量ベースで相当するガソリンの消費量に換算した値で示す。さて、ガソリン、メタノール燃料時の ATAC 運転領域を示した図 3, 4 によれば、平均有効圧 0.05 MPa において、ガソリンの場合通常燃焼運転領域が存在するのに対し、メタノールの場合試験した回転速度範囲のすべてで ATAC 運

図 1 供試機関の断面図とセラミックス化部分

図 2 本実験で用いた測定システム

図 3 ガソリン燃料時の平均有効圧、回転速度と ATAC 運転領域の関係

図 4 メタノール燃料時の平均有効圧、回転速度と ATAC 運転領域の関係

図5 ガソリン燃料時の平均有効圧、回転速度と燃料消費率の関係

図6 メタノール燃料時の平均有効圧、回転速度と燃料消費率の関係

転領域となる。そして、図5, 6に示したガソリン、メタノール、それぞれの燃料消費率より、上述の条件においては、すべてがATAC運転領域となるメタノールのほうが燃料消費率は少ない値を示している。また、図5で示されるガソリン燃料時における燃料消費率によれば、平均有効圧が0.05 MPaである領域に着目すると、ATAC運転領域である回転速度3500 rpmにおける燃料消費率は、他の回転速度に比べて著しく少ない。このことから、本供試機関においては、低負荷領域におけるATACは燃料消費率の少ない燃焼と推測できる。

図7, 8に燃料としてガソリン、メタノールを用いたとき、回転速度3000 rpm、平均有効圧0.05 MPaにおける連続した50サイクルの指圧線図およびくし形線図を示す。また、図9, 10にガソリン、メタノールを用いたときの筒内圧力の最高値の変動を二乗平均値(RMS)として示す。図7, 8より、平均有効圧が同じ場合、最高筒内圧力はメタノールのほうが高い。この条件では、ガソリンの場合は通常燃焼運転で、メタノールではATAC運転となるが、ATACでは通常燃焼(火花点火燃焼)時に見られるような点火後の急激な圧力上昇は見られず、圧力は緩やかに上昇する。図8~10より、通常燃焼運転領域と比較すると、ATAC運転領域において指圧線図のサイクル変動が極めて少ないことがわかる。これはメタノールにおいて特に顕著である。すなわち、ATAC運転領域ではサイクルごとの熱発生率経過の変動が極めて少ない安定した燃焼が行われていることを示している。前述の低負荷におけるATAC運転領域において燃料消費率が少ない傾向を

図7 ガソリン燃料時の指圧線図およびくし形線図

図8 メタノール燃料時の指圧線図およびくし形線図

もつことは、ATACによる燃焼の安定化が寄与しているものと考えられる。

燃料としてガソリン、メタノールを用いたとき、ともにATAC運転領域である回転速度3500 rpmにおいて平均有効圧0.05 MPaにおける熱発生率経過の解

図 9 ガソリン燃料時の平均有効圧, 回転速度と最高筒内圧力変動の関係

図 10 メタノール燃料時の平均有効圧, 回転速度と最高筒内圧力変動の関係

析例を図 11 に示す。また、熱発生率経過の解析結果から定めた着火時期、および燃焼の特性時間を図 12 に示す。図 12 中の t_i , t_{50} , t_{90} , t_{100} は、それぞれ着火時期および燃焼が 50, 90, 100% 進行した時刻を示している。平均有効圧が同じであるとき、メタノールは、ガソリンに比べその着火時期は早く、燃焼期間は短い。また、メタノールのほうが最大熱発生率は大きく、燃焼が急激に進む。本供試機関の火花点火時期は上死点前 21° であるが、図 12 によるとメタノールの場合、熱発生開始時期は点火時期以前の上死点前 30° 付近であると判断され、明らかに自己着火による運転であることが確認できる。

図 11 熱発生率経過の解析例

図 13 に指圧線図を基に単領域モデルを用いた熱発生率の解析により、燃焼室内のガスの温度は一樣として求めた着火時期における燃焼室内混合ガス平均温度と最高燃焼室内混合ガス平均温度を示す。メタノールのほうが着火時期における燃焼室内混合ガス平均温度は低く、最高燃焼室内混合ガス平均温度は高い。

図 14 に排気特性として燃料としてガソリン、メタノールを用いたとき、ともに ATAC 運転領域である回転速度 3500 rpm において、各平均有効圧での排気中の一酸化炭素、窒素酸化物の体積濃度を示す。メタノールのほうが、窒素酸化物は増える傾向にあるものの、未燃成分である一酸化炭素の排出は著しく減少する。メタノールの場合に窒素酸化物が増加する傾向があるが、図 13 に示すとおりメタノールの場合、着火が早期に行われる関係で、ガソリンに比べサイクル中における火炎および燃焼ガスの最高到達温度が高くなり、これにより窒素酸化物が増加するものと思われる。

図 12 各燃料における平均有効圧と着火時刻, 燃焼期間の関係

3・2 燃焼室壁面の高温化の効果 図 15, 16 にシリンダヘッド材質にアルミニウム合金, セラミックス (図中では SiN と表記) を用いたときの各回転速度, 平均有効圧における燃焼室壁面温度を示す。シリンダヘッドをセラミックス化することにより, 燃焼室壁面

温度を 100~250 K 高い条件で供試機関を運転することが可能となる。本項では, メタノールを燃料として, シリンダヘッドの材質にアルミニウム合金およびセラミックスを用いた場合について比較実験を行い, この燃焼室壁面の高温化がもたらす諸特性への影響について述べる。

シリンダヘッド材質にアルミニウム合金およびセラミックスを用いたときの ATAC 運転領域を図 17, 18 に示す。燃焼室壁面を高温化すると, 回転速度の低い領域で ATAC 運転領域が拡大することが確認できる。また, 平均有効圧が約 0.20 MPa 以上では, 始動後, 燃焼室壁面温度の上昇とともに過早着火が発生し, 定常運転が得られなかった。この現象は燃焼室壁面温度が約 800 K 以上になる領域で生じることから, メタノールの予混合気の熱面着火によるものと判断される。

図 19 に回転速度 3500 rpm において, 掃気温度をほぼ同一の温度に保ちつつ運転した場合の着火時期, 燃焼期間を示す。燃焼室壁面の高温化により, 着火時期は早まるが, 燃焼期間はほとんど変わらない。着火時期の早まる理由として, 燃焼室壁面での断熱化がもたらす残留ガスの高温化 (高温の熱雰囲気) により自己着火にいたる時間が短縮されたものと考えられる。

図 20, 21 にシリンダヘッド材質にアルミニウム合金およびセラミックスを用いたときの各回転速度, 平均有効圧における燃料消費率を示す。燃焼室壁面の高温化により, 燃料消費率は全条件で若干大きくなるのがわかる。理由として, 燃焼期間はほとんど変わらないものの, 自己着火時期が早くなりすぎて, サイクル効率が低下したことが考えられる。

図 22 に回転速度 3500 rpm においてシリンダヘッド

図 13 着火時期における燃焼室内混合ガス平均温度と最高燃焼室内混合ガス平均温度

図 14 各燃料における平均有効圧と排気特性の関係

図 15 Al 合金ヘッド使用時の平均有効圧, 回転速度と燃焼室壁面温度の関係

図 16 セラミックスヘッド使用時の平均有効圧, 回転速度と燃焼室壁面温度の関係

図 17 Al 合金ヘッド使用時の平均有効圧、回転速度と ATAC 運転領域の関係

図 18 セラミックスヘッド使用時の平均有効圧、回転速度と ATAC 運転領域の関係

ド材質にアルミニウム合金、セラミックスを用いたとき、各平均有効圧で掃気温度が同程度の場合における排気中のホルムアルデヒド、未燃メタノールの分析結果を示す。燃焼室壁面の高温化により、ホルムアルデヒドの排出は高負荷範囲で著しく減少する。これは燃焼室壁面の高温化により、燃焼室壁表面の消炎作用により生じるホルムアルデヒドの発生が減少したものと考えられる。

3・3 当量比をパラメータとした場合の燃焼室壁面の高温化が燃焼に及ぼす影響 メタノール燃料による運転時、燃焼室壁面の高温化による、ATAC 運転領域の拡大、ホルムアルデヒド、未燃メタノールの排出の低減が確認できたが、着火時期が著しく早くなり、燃料消費率の増加が見られた。その対策として、予混合気を希薄化して、着火を適正な時期まで遅延させ、運転する方法が考えられる。そこで本項では、当量比をパラメータとして供試機関の運転を行い、燃焼室壁面の高温化を持続しつつ、高効率化を得る方策について検証した。

図 23 にシリンダヘッド材質にアルミニウム合金、セラミックスを用いたとき、当量比をパラメータとして筒内圧力の最高値の変動を二乗平均値(RMS)として示す。燃焼室壁面を高温化(+100~250 K)することにより、吸気予混合気が希薄な条件でも ATAC 運転が可能で、サイクル変動の少ない安定した燃焼が得られることがわかる。そして、運転可能限界も希薄側に拡大しており、燃焼室壁面の高温化による高温の残留ガスが燃焼を促進していることが考えられる。

図 24 にシリンダヘッド材質にセラミックスを用いたときの各当量比における給気比および燃料消費率について示す。当量比が 0.7 付近を除けば給気比はほぼ

図 19 平均有効圧と着火時刻、燃焼期間の関係

一定のまま、燃料消費率は当量比が小さくなるにつれて少なくなることがわかる。これより、燃焼室壁面を高温化することにより、より安定した希薄燃焼が得られ、かつ希薄燃焼により給気比を変えることなく燃料消費率も低減し得ることを示している。

図 25 に当量比と着火時期および燃焼期間の関係を示す。吸気予混合気を希薄化することで、燃焼室壁面を高温化した条件においても ATAC 運転領域における自己着火時期が遅延化され、最適化が図れる。しかしながら、当量比 0.7 まで希薄化すると、燃焼の長期化が生じる。これが上述の当量比 0.7 で燃料消費率が增大する理由と考えられる。

図 26 に排気特性を示す。窒素酸化物は、吸気予混合気の希薄化により、極めて低いレベルまで減少することができる。ホルムアルデヒド、未燃メタノールは、燃

焼の長期化と、指圧線図のサイクル変動の増加が見られる当量比0.7の条件を除けば低減する。

4. 結 論

ATAC方式の2サイクルエンジンを供試機関として、まず燃料にガソリン、メタノールを当量比1で用いた場合の供試機関のATAC運転領域を、機関回転速度、平均有効圧をパラメータとして比較検討し、アルコール燃料のATAC方式への適合性について調べた。次に燃焼室構成部材にセラミックス(窒化けい素)を用い、燃焼室壁の高温化による諸特性への影響について検証した。さらに高温壁面条件において最適のATAC運転を実現するために、吸気予混合気の希薄化を行い着火を適正な時期まで遅延化して運転、コントロール方法について検証した。本研究で得られた知見は以下に要約される。

(1) メタノールを用いるとガソリンの場合に比べ、回転速度と平均有効圧で表したATAC運転領域

が大幅に拡大する。特に低負荷領域への拡大効果が著しく、高速アイドリングにおいてATACによる自発火運転が可能である。

(2) メタノール燃料によるATAC運転は、筒内指圧線図のサイクルの変動が極めて少ない安定した燃焼が得られ、また、排気中の未燃ガス成分である一酸

図 22 平均有効圧とホルムアルデヒド、未燃メタノールの排出の関係

図 20 Al合金ヘッド使用時の平均有効圧、回転速度と燃料消費率の関係

図 23 当量比と筒内最高圧力変動の関係

図 21 セラミックスヘッド使用時の平均有効圧、回転速度と燃料消費率の関係

図 24 セラミックス遮熱形エンジンにおける当量比と給気比、燃料消費率の関係

図 25 セラミックス遮熱形エンジンにおける
当量比と着火時期および燃焼期間の関係

化炭素の低減に効果的である。

(3) 燃焼室壁面の高温化により、排気中のホルムアルデヒドの排出量は高負荷領域において減少する。壁面境界での消炎層で生じるホルムアルデヒドを大幅に減少させたことによるものと考えられる。

(4) 燃焼室壁面温度が約 800 K 以上となると、メタノール予混合気の熱面着火が生じ、安定運転が不可能となる。

(5) 燃焼室壁面の高温化に伴い ATAC 運転時の着火時期が早期化する現象が見られ、燃料消費率が増加する。

(6) 吸気予混合気の希薄化により着火時期が遅延され、燃料消費率の改善が図れる。また、同時に窒素酸化物、ホルムアルデヒド、未燃メタノールが低減される。

(7) セラミック遮熱形にした本供試機関では、当量比で 0.75 付近まで希薄化しても ATAC 方式の安定した燃焼が実現可能であり、同時に運転可能限界も

図 26 セラミックス遮熱形エンジンにおける
当量比と排気特性の関係

希薄側に拡大する。

本研究を進めるにあたり日本クリンエンジン研究所の大西 繁氏にご協力をいただいた。また、実験に際し当時、北海道工業大学学生 田中 健司、大木 勲の両君の協力をいただいた。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Onishi, S., Souk Hong Jo, Shoda, K., PanDo Jo and Kato, S., ATAC-A New Combustion Process for Internal Combustion Engines, SAE Paper, No. 790501 (1979).
- (2) AFT 国内委員会編, 平尾監修, 燃料アルコールの問題, 5 (1984), 13, 開発社.
- (3) 加地・秋山・五十嵐, メタノール, ホルムアルデヒド自動分析装置の開発, 自動車技術会学術講演会前刷り集, 892(1989), 49.