220203 エタノール噴霧の既燃ガスジェット着火現象
Ignition Phenomena of Ethanol Spray by Burnt Gas Jet

○ 野原 健司(芝浦工大) 正 斎藤 寛泰(芝浦工大)

Kenji NOHARA, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku Tokyo, 135-8548, Japan
Hiroyasu SAITOH, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku Tokyo, 135-8548, Japan

In this study, we experimentally investigated the effects of burnt gas jet ignition on ethanol spray combustion using a constant volume combustion vessel with a sub chamber. The ignition and combustion phenomena were observed by using a high-speed video camera, and combustion pressure history was measured as well. In case of burnt gas jet ignition, compared with a conventional spark plug ignition, stronger luminous flames were observed, and rate of pressure rise and maximum overpressure much increased. Moreover, it was confirmed that measured HCHO concentration of the burnt gas in the combustion vessel remained at low level although the amount of ethanol related to combustion reaction increased. It is mainly due to the strong turbulent mixing effects of the hot burnt gas jet and the spray flows.

Key Words: Burnt Gas Jet Ignition, Ethanol, Spray, Hydrogen, HCHO

1. 諸言

近年、燃焼器から排出される有害物質による環境汚染や化石燃料枯渇の問題により、燃焼器のさらなるクリーン化や燃費の向上、非石油由来の代替燃料への移行が急務とされている。有害物質の排出低減や燃費向上の有効な手段として、希薄燃焼方式がある。しかし、内燃機関等の燃焼器の多くが採用するスパークプラグは“点”での着火であるため、混合気の着火はスパークプラグ周囲の混合気濃度や流速等の条件に大きく依存し、確実な希薄燃焼を行うためには、燃焼器内の流れを制御して成層燃焼を行わせるなどの工夫を必要とする。近年、このスパークプラグに変わる新たな着火方法がいくつか提唱されており、そのうちの一つに、高温の既燃ガスジェットの吹き込みによる着火方法がある。これは、主燃焼室に隣接して設けた“副燃焼室”に、安定して着火・燃焼できる少量の混合気を充填し、その混合気の燃焼によって生成した高温の燃焼ガスジェットの吹き込みにより、主燃焼室の燃料を“体積的”に着火させ、混合気の安定した着火と燃焼促進を図る方法である。これまで、このような体積的着火に着目した研究が森・吉川ら⁽¹⁾⁽²⁾や村瀬ら⁽³⁾⁽⁴⁾により行われ、その効果が調べられているが、燃料に噴霧状の液体燃料を使用した例はほとんど報告されていない。そこで、本研究では、既燃ガスジェットを生成する装置を用い、定容燃焼器内における液体燃料噴霧の既燃ガスジェット着火現象、および、その燃焼特性について調べた。本研究では、主燃焼室に充填する燃料に、代替燃料として期待されているエタノールを使用し、副燃焼室内には可燃範囲が広く、燃焼速度の速い水素-空気混合気を充填した。エタノールは、特に低温環境における始動が悪く、また、人体に有害なアルデヒド類を排出する⁽⁵⁾など課題も多い燃料である。そこで、簡易的な計測ではあるが、燃焼ガス中のHCHO濃度を検出器によって計測し、排

出特性を調べた。

2. 実験装置および方法

図1に、本実験で用いた実験装置の概略を示す。主燃焼室はφ110 mm×106 mmの容積約1000 cm³の円筒形状、副燃焼室はφ24 mm×40 mmの容積約30 cm³の円筒形状である。主燃焼室下部の副燃焼室は、比較実験を行うため、スパークプラグ取り付け用のフランジと取り換えられるようになっている。主燃焼室の両側面には強化ガラスの観察窓、上部に液体燃料微粒化用のインジェクタ（DENSO、トヨタ3S-FSEエンジン用インジェクタ）、下部に副燃焼室を配置し、側面に圧力センサ（共和電業、PHL-A-5MP）、および、吸気・排気のためのポートを設けている。副燃焼室上部には、噴出口直径を変更するために脱着可能としたオリフィス（直径d:3.6 mm, 5.4 mm, 7.2 mm, 9.6 mm, 12 mm）、下部には、スパークプラグと副燃焼室内の圧力モニター用圧力センサ（共和電業、PHL-A-3MP）、および、ガス充填用のポートを2つ設けている。本実験では、気体燃料用インジェクタ（ケーヒン、06164-PDN-J00）を用いて副燃焼室側面からガスを充填させた。また、副燃焼室充填ガスには、乾燥空気および水素を使用した。また、オリフィスは、直径d=12 mmのものを用い、オリフィスなしの場合と比較実験を行った。さらに、スパークプラグ着火との比較も行った。

Fig.1 Experimental setup

Fig.2 TTL signal

次に、実験手順を概説する。まず、主・副燃焼室内部および配管内を空気により十分に掃気する。その後、真空ポンプにより真空引きを行い、乾燥空気を所定の初気圧力 P_0 になるようにボンベから充填する。本実験では、 P_0 を0.1 MPa、初期温度 T_0 を室温（23℃程度）とした。その後、手動ポンプ（RIKEN, WP-1B-255）により、エタノールに圧力をかけておき、レギュレータにより水素および空気の噴射圧を設定する。設定後、パルスディレイジェネレータ（STANFORD RESERCH SYSTEMS, DC535）から出力されるTTL信号により、エタノール、水素、空気の各噴射量（噴射期間）およびスパークタイミングを制御し、各噴射および着火を行う。上昇する燃焼室内圧力を主・副燃焼室に取り付けた圧力センサで検知し、燃焼の様子を高速カメラ（フォトリオン、FASTCAM-NEO）により観測する。圧力センサからの圧力信号は、アンプ（ユニパルス、AM32 共和電業、DPM-602A）により増幅され、デジタルオシロスコープ（横河電機、DL750P）に取り込まれ、記録される。画像撮影のフレームレートは、条件に応じて、1500 fpsおよび2000 fpsとした。オシロスコープのサンプリング周波数は25kHzである。撮影画像は、PCに送られ保存される。燃焼完了後、容器内の燃焼ガスをサンプリング容器に移し、燃焼ガスを計測可能範囲まで希釈した後、ホルムアルデヒド検知器（理研計器、FP-30）によりHCHO濃度を計測する。なお、本研究では、最大過圧力（ゲージ圧）を ΔP_{max} 、副燃焼室に取り付けられたプラグが放電を開始する時間（ $t_{spark}=50$ ms）を基準に燃焼室の圧力が最大値をとるまでの時間を Δt と定義する。各機器の同期をとるために用いたTTL信号のタイミングを図2に、実験条件を表1に示す。着火実験は、各条件10回ずつ行った。

3. 実験結果および考察

各実験条件における、時系列画像を図3(a)～(d)に示す。画像は火炎発光が確認された時刻付近のもので、8msおきに示している。(a) エタノールのみ、および、(b) 副燃焼室内に充填したのと同量程度の水素を予め添加し、スパークプラグで着火・燃焼を行った場合に比べ、既燃ガスジェットの吹き込みで着火させた(c)、(d)の条件では、強い火炎発光が広範囲に発生していることが確認できる。これは、高温の既燃ガスジェットとエタノール噴霧流が乱流混合し、エタノール噴霧の分散、蒸発、混合が促進された結果であると考えられる。このときの燃焼圧力履歴の例を比較したものを図4に示す。投入エタノール量は同じであるが、既燃ガスジェット着火はスパークプラグ着火に比べて圧力上昇が大きく、最大過圧力も増大することが見てとれる。この圧力履歴から、 ΔP_{max} および Δt を求めたものを図5(i)、(ii)に示す。既燃ガスジェット着火により発生する ΔP_{max} はスパークプラグ着火の数倍となり、 Δt がおおよそ半分以下となっていることがわかる。既燃ガスジェット着火の燃焼促進効果は、オリフィス径にも依存すると考えられ、口径の最適化を行えば、着火・燃焼促進効果のさらなる向上を図ることができると考えられる。図6は、燃焼ガス中HCHO濃度の比較である。図6より、各条件でのHCHO濃度は(a) < (d) < (b) < (c)の順に少なくなる結果が得られた。スパークプラグ着火の(a)、(b)の条件はエタノールの燃焼量が少ないため、(c)、(d)の条件とは比較できないが、より多くのエタノールを燃焼させたと考えられる条件(d)のHCHO濃度レベルが低くなった。過圧力、燃焼時間、および、HCHO濃度を考慮すれば、これらの条件の中では条件(d)が最も良好な燃焼状態であり、既燃ガスジェットによる燃焼促進の効果が大きかったと推測できる。

4. まとめ

既燃ガスジェットがエタノール噴霧の着火および燃焼に

及ぼす影響を、定容燃焼容器を用いた着火実験により検討した。その結果、噴霧燃料においても、高温の既燃ガスジェットの吹き込みによって強い燃焼促進効果が得られることがわかった。また、燃焼量が増加するにも関わらずHCHO排出量を減少させることが可能であることもわかった。これは既燃ガスジェットとの乱流混合により、噴霧の分散、蒸発、混合が進み、燃焼が良好になったためであると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、文部科学省科学研究費（研究代表者：斎藤寛泰、若手研究(B)、H17-18、課題番号17760163および研究代表者：斎藤寛泰(B)、H20-21、課題番号20760131）の支援を受けた、ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 森, 燃焼の科学と技術, 5, 103-111(1997), (2) 吉川, 日本燃焼学会誌, 49-148, 112-117, (2007), (3) 村瀬, 機論(B 編), 59-568, 294-300(1993), (4) 村瀬, 機論(B 編), 64-617, 312-319(1998), (5) 矢野, 機論(B 編), 32-473, 238-247(1986).

Fig.3 Time-series images of the flame

Fig.4 Comparison of pressure history

Fig.5 Comparison of (i) ΔP , (ii) Δt

Fig.6 HCHO concentration