燃料噴霧が混在する可燃混合気中を伝ばする火炎の構造*

吉田 肇^{*1}, 新井 雅 隆^{*2}
廣 安 博 之^{*3}, 横 谷 昌 道^{*4}

Structure of Flames Propagating in Spray Compound Combustible Mixtures

Hajime YOSHIDA, Masataka ARAI,
Hiroyuki HIROYASU and Masamichi YOKOTANI

High speed schlieren movies were taken for detailed observation of the physical structure of flames propagating in propane-air mixtures containing kerosene spray. Effects of an overall equivalence ratio and a mixture ratio of propane/kerosene to the total fuel on the structure were examined. Fractal analysis of the flame structure was also attempted. As a result, two typical flame structures were observed, into which flame structures were classified according to propane concentration. One consisted of droplets ignited successively, the other consisted of flame front propagating in the interdroplet propane-air mixture. In the latter, flame front had fractal character and its fractal dimension increased and decreased with the flame propagation velocity.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion Phenomena, Flame, Gaseous Fuel, Liquid Fuel, Flame Structure, Flame Propagating Velocity, Fractal Analysis, Fractal Dimension

1. ま え が き

噴霧燃焼は、工業用ボイラや自動車用ディーゼル機関など広い分野で従来から利用されている。近年、その優れた燃料経済性と排気清浄性が注目を浴びている筒内直接噴射式火花点火層給気機関⁽¹⁾の燃焼も噴霧燃焼の一つである。噴霧燃焼の場合、着火時はもちろん燃焼時においても燃料の一部が依然として噴霧の状態に混在しているため、基本的には燃料蒸気混合気中に噴霧が混在する場での燃焼と考えられる。そのため燃料噴霧が混在する可燃混合気の燃焼については、噴霧燃焼の基礎研究としてこれまでに多くの研究が行われている^{(2)~(6)}。著者らも灯油噴霧とプロパン-空気混合気を用いてこのような混合気を再現し、火花点火特性⁽⁷⁾や点火時の火炎形成過程⁽⁸⁾について研究を行うとともに、一方では、燃料濃度などの火炎伝ば特性に及ぼす影響を調べた⁽⁹⁾。その結果、灯油噴霧が混在する混合気では火炎面に凹凸が生じ、場合によって

は同じ濃度のプロパン均一混合気を上回る火炎伝ば速度を示すことなどが明らかになった⁽⁹⁾。

そこで本研究では、高速度拡大シュリーレン映像により、このような混合気中を伝ばする火炎の構造を観察し、火炎伝ば速度との関係について考察を加えるこ

図1 実験装置概略

* 平成2年11月26日 第28回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成2年10月1日。

^{*1} 正員、海上保安大学校 (〒737 呉市若葉町)。

^{*2} 正員、群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町1-5-1)。

^{*3} 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

^{*4} 准員、旭硝子(株) (〒100 千代田区丸の内2丁目1-2)。

とを目的とした。また考察にあたっては、最近乱流火炎に対して適用されているフラクタル解析^{(10)~(12)}を用いて、火炎面の凹凸の状況を定量的に表現することをこころみた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置本体は、既報⁽⁹⁾のものと同様である。その概略を図1に示す。頂部の混合部にはガソリン機関用の電磁式燃料噴射弁と、プロパンおよび空気の入入口が設けられている。混合部から噴射された灯油噴霧とプロパン混合気は、助走部で噴霧が流れにほぼ一様に分布した混合気流となり測定部に入る。測定部は全長が1 mで、内部は50 mm×50 mmのく形断面となっている。測定部の一組の側面にはアクリル製の観測窓を設け、もう1組の側面には光学的測定に用いる小孔を設けた。

プロパン混合気の濃度調整は、空気流量を10 L/min(0.01 m³/min)で一定に保ち、プロパンの混入流量を調節した。このため測定部での混合気流の平均流速は、全実験条件を通して0.1 m/s弱でほぼ一定であった。また、実験に用いた灯油噴霧のザウタ平均粒径は60 μmであった。

図2は、高速度拡大シュリーレン撮影を行うための光学系である。撮影は高速度ビデオ(ナック製 HSV-200)と、これに同期発光するストロボスコープ(菅原製 マイクロフラッシュ 発光時間20 μs)を用いて、毎秒200コマで行った。

シュリーレン写真法の光源とするため、ストロボスコープからの光はレンズで集光し、直径3 mmのピンホールを通過させたのち凹面鏡(焦点距離1940 mm, 直径200 mm)で平行光束として観測部に導いた。観測部を透過した光は、受光系の凹面鏡(焦点距離1940 mm, 直径200 mm)で集光される。この光束の一部を

図2 高速度拡大シュリーレン映像撮影光学系

受光系の凹面鏡の焦点位置においたナイフエッジでさえぎり、シュリーレン像を得た。燃料噴霧液滴を拡大してとらえるため、高速度ビデオのレンズには、焦点距離300 mmのものを用了。

また、参考のため火炎の直接像も撮影した。この場合はナイフエッジを取り外し、火炎の自発光による像を8 mmビデオにより電子シャッター(1/1 000 s)を用いて撮影した。

実験はすべて大気圧下において、25°Cでほぼ一定の

図3 火炎伝ば状況観察結果 ($\phi_t=1.4$)

室温のもとで行った。

3. 伝ば火炎の構造

高速度拡大シュリーレン撮影結果の一例を、図3に示す。これは高速度ビデオのモニタ上の映像を、35 mm スチールカメラで転写したものである。灯油噴霧とプロパンを合せた全燃料について求めた当量比（総合当量比） ϕ_t が1.4の場合に、全燃料に対するプロパンの質量割合（プロパン混合割合） R_g を零の灯油噴霧のみの状態から、 $R_g=1.0$ のプロパン均一混合気の状態まで順次変化させたときの火炎伝ば状況を示す。左側は直接撮影の映像から得られた写真（直接写真）で、右側はシュリーレン撮影の映像から得られた写真（シュリーレン写真）である。

プロパン混合割合 $R_g=0$ の灯油噴霧のみの場合、直接写真では噴霧液滴周辺のエンベロープ火炎が密集して、ひとかたまりの火炎を構成して燃焼しているが、その周囲にプロパン均一混合気中を火炎が伝ばする際にみられるような火炎面はみられない。しかし、シュリーレン写真では、密集して燃焼する多数のエンベロープ火炎の上方（火炎の進行方向）に連続した境界面がみられる。

この境界面は、多数のエンベロープ火炎からの熱により前方の混合気流が加熱されることにより生じた密度こう配によるものと考えられる。以後この境界面を熱面と表現し、図3の $R_g=1.0$ のプロパン均一混合気中の火炎伝ばの直接写真にみられるようないわゆる火炎面と区別する。熱面に流入した噴霧液滴は周囲に燃料蒸気を形成しながら降下し、順次着火してエンベロープ火炎を形成する。

プロパン混合割合 R_g を次第に増していくと、 $R_g=0.2$ 付近ぐらいまでは灯油噴霧のみの場合と大きな違いはみられない。しかし、 $R_g=0.33$ 程度になると、直接写真上でところどころに薄い青色の火炎が観察されるようになり、シュリーレン写真においては熱面がはっきりとしてくる。また、プロパン混合割合 $R_g=0.2$ のときには降下する燃焼液滴からの火炎は上方に尾を引くものしか観測されていないのに対し、 $R_g=0.33$ の場合には下方に尾を引く燃焼液滴が観察される。

プロパン混合割合 $R_g=0.33$ の場合、混在するプロパン混合気の濃度（プロパン当量比） ϕ_g は0.4~0.5程度とかなり濃くなるため、局所的に火炎面が形成され、シュリーレン写真上においても火炎面での活発な燃焼による大きな密度こう配が熱面としてとらえられていると考えられる。そのためシュリーレン写真上の熱面の輪郭も明りようになり、また、火炎面直後の燃焼ガ

スの膨張により燃焼液滴周囲の火炎が下方に流されたものとする。

プロパン混合割合 R_g が0.5程度になると、直接写真で燃焼液滴群の上流に、青色の火炎面が形成されているのが確認できるようになる。

さらにプロパン混合割合を増し $R_g=0.67\sim 0.80$ とすると、直接写真上で火炎面がより明確になるとともに火炎面の凹凸が激しくなる。シュリーレン写真においては、燃焼液滴から下方に引く火炎の尾が細くかつ長くなり、燃焼ガスの膨張がより活発であることを示している。しかし、 $R_g=1.0$ すなわちプロパン均一混合気になると、滑らかな凹凸のほとんどない青色火炎面となる。

プロパン混合割合 R_g が0.33以下と小さい場合には直接写真で明確な火炎面がみられず、シュリーレン写真で観察される熱面に取り込まれた噴霧液滴が、次々に着火して火炎伝ばが維持される（噴霧液滴による火炎伝ば）。これに対しプロパン混合割合が0.5以上と大きい場合には、火炎面が噴霧液滴を取り込みながら伝ばする（予混合気による火炎伝ば）様子が直接写真で観察できる。

総合当量比 ϕ_t が1.4以外の場合についても、同様の方法で火炎構造を観察したところ、やはりプロパン混合割合 R_g によって伝ば火炎の構造が変化した。しかし、構造が変化する時のプロパン混合割合は各総合当量比によって異なった。

図4は、既報⁹⁾の実験で得られた火炎伝ばの等速度線図に、構造変化の遷移領域を示したものである。横

図4 火炎伝ばの等速度線図

軸はプロパン混合割合 R_g を、縦軸は総合当量比 ϕ_t を示す。図4中に領域2で示す斜線の部分が、伝ば火炎の構造に変化が生じる遷移領域である。

図5は、図4に示す各領域での代表的な火炎構造を示したものである。図4の領域1では、図5(a)に示す噴霧液滴による火炎伝ばが、領域3では図5(c)に示す予混合気による火炎伝ばが観察された。遷移領域2では図5(b)に示すように、2種類の火炎伝ば形態が混在した状況が観察された。

図4中に示したプロパン当量比 ϕ_g の等濃度線からもわかるように、プロパン混合気の濃度 $\phi_g = 0.5$ 付近、すなわちプロパンの希薄可燃限界濃度⁽¹³⁾ 程度となるような場合に、伝ば火炎の構造に変化が生じる。

4. 考 察

図3に示した各条件のシュリーレン写真の熱面に対し、フラクタル次元 D_{fr} を求め、熱面の乱れの状況および火炎伝ば速度との相関について検討する。フラクタル次元 D_{fr} は、最小単位長さを変化させた場合の、測長回数の変化から求める方法⁽¹⁴⁾ により得た。

図6に総合当量比 ϕ_t を1.4で一定としプロパン混合割合 R_g を変化させた場合の、フラクタル次元 D_{fr} および火炎伝ば速度 V_f の変化を示した。

図6(a)をみると、フラクタル次元 D_{fr} は、プロパン混合割合 R_g を0から0.3付近まで増加するにつれて若干減少するが、さらにプロパン混合割合を増加すると $R_g = 0.4$ 付近から増加しはじめ、 $R_g = 0.8$ 付近で最大値を示したのち減少し、 $R_g = 1.0$ のプロパン均一混合気中で最も小さな値となる。

フラクタル次元 D_{fr} の変化を、図3のシュリーレン写真にみられる熱面の変化状況と比較する。

図5 火炎構造の代表例

図3によると、プロパン混合割合 R_g が0~0.33の間では、噴霧液滴の粗密の程度が凹凸となって熱面の形状に反映されている。 R_g が0.5~0.8の間ではプロパン混合割合の増加とともに火炎面の凹凸が増し $R_g = 0.8$ で最も激しくなるが、さらにプロパン混合割合を増すと逆に凹凸が減少する。

このようにプロパン混合割合 R_g が0.4程度以上では、フラクタル次元 D_{fr} の増大に伴い熱面の凹凸が増し、フラクタル次元が最も大きくなる $R_g = 0.8$ 付近で、熱面の凹凸も最も激しくなる。そしてその後、フラクタル次元 D_{fr} の低下に伴い熱面の凹凸は減少し、フラクタル次元の最も小さい $R_g = 1.0$ で熱面は最も滑らかになる。すなわち、フラクタル次元 D_{fr} は、熱面の凹凸の状況を定量的に表し得るものと考えられる。

図6(b)をみると、火炎伝ば速度 V_f は、プロパン混合割合 R_g を零から0.2付近まで増大しても大きな変化はみられないが、さらにプロパン混合割合を増すと $R_g = 0.3$ 付近から増加しはじめ、 $R_g = 0.8$ 付近で最大値を示したのち再び低下する。

(a) フラクタル次元 D_{fr}

(b) 火炎伝ば速度 V_f

図6 フラクタル次元と火炎伝ば速度 ($\phi_t = 1.4$)

この変化を、図6(a)のフラクタル次元 D_{fr} の変化と比較する。プロパン混合割合 R_p の増加に伴いフラクタル次元 D_{fr} が増加し最大値を示した後低下する変化を示す R_p が 0.4~1.0 の範囲では、火炎伝ば速度 V_f も同様の変化を示し、最大値を示すプロパン混合割合も $R_p=0.8$ 程度と対応している。しかし、プロパン混合割合 R_p が 0~0.3 の範囲では、プロパン混合割合が増すとフラクタル次元 D_{fr} は横ばいかまたは減少の傾向を示すのに対し、火炎伝ば速度 V_f は増加傾向を示す。

プロパン混合割合 R_p が 0.3~0.4 のとき、混在するプロパン当量比 ϕ_p は 0.5 程度となって火炎伝ば機構の遷移域に相当し、プロパン混合割合 R_p が 0.3 以下では噴霧液滴による火炎伝ば、0.4 以上では予混合気による火炎伝ばが燃焼を支配する。 $R_p=0.3\sim0.4$ 付近でフラクタル次元 D_{fr} が一度減少するのは、火炎伝ば機構が変化し、空間に散在する噴霧液滴群の局所的な燃焼状態が緩和されることによると考えられる。すなわち、プロパン混合割合 R_p が 0.3 以下でのフラクタル次元 D_{fr} は、単に噴霧液滴群の分散状況で定まる熱面の形状を示しているにすぎないが、プロパン混合割合が 0.4 以上のときのフラクタル次元は、燃焼速度に影響を及ぼす火炎面の表面積や乱れの大小に対応するため、フラクタル次元 D_{fr} の変化に伴い火炎伝ば速度 V_f が同様の変化をするという相関がみられたと考える。

5. ま と め

灯油噴霧-プロパン-空気混合気を用いて、燃料噴霧が混在する可燃混合気の種々の状況を再現し、このような混合気中を伝ばする火炎の構造を高速度拡大シェリーレン映像により観察した。その結果、次のようなことが明らかになった。

(1) 火炎伝ば機構は、火炎面は観察されないが燃

料噴霧液滴が次々と着火して伝ばを維持するもの（噴霧液滴による火炎伝ば）と、予混合気中を火炎が噴霧液滴を取り込みながら伝ばするもの（予混合気による火炎伝ば）とに分類することができる。

(2) 燃料噴霧を適度に混在させることにより火炎面に凹凸が発生し、その結果火炎面積が増大して同じ燃料濃度のプロパン均一混合気よりも火炎伝ば速度が増加する場合がある。

(3) 噴霧が混在する可燃混合気においても、フラクタル次元により火炎面の凹凸の状態を定量的に表現することができる。

(4) 火炎伝ば機構が予混合気による火炎伝ばの場合は、フラクタル次元と火炎伝ば速度の間に相関がみられる。しかし、火炎伝ば機構が噴霧液滴による火炎伝ばの場合は、相関がみられない。

本実験には、当時本学学部学生 鈴川雅也君が参加しその協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば, Lewis, J. M. and Tierney, W. T., *SAE Paper*, No. 801429 (1980).
- (2) 水谷・中島, 機論, **39**-325 (1973), 2872.
- (3) 水谷・ほか 3 名, 機論, **39**-325 (1973), 2879.
- (4) 水谷・松下, 機論, **39**-326 (1973), 3160.
- (5) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., *Proc. 18th Symp. (Int) Combust.*, (1981), 321.
- (6) Myer, G. D. and Lefebvre, A. H., *Combust. Flame*, **66** (1986), 193-210.
- (7) 吉田・ほか 2 名, 機論, **56**-528, B (1990), 2483.
- (8) 文献 (7) の 2490 ページ.
- (9) 吉田・ほか 3 名, 第 27 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1989), 471.
- (10) 北川・ほか 2 名, 九州支部佐賀地方講演会講演論文集, (1990), 234.
- (11) 竹野・ほか 3 名, 第 27 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1989), 37.
- (12) 安藤・吉田, 第 27 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1989), 389.
- (13) 疋田・秋田, 燃焼概論, (1971), 198, コロナ社.
- (14) 高安, フラクタル, (1986), 朝倉書店, 14.