火花点火機関の燃焼室角部における火炎挙動*

(第1報, ブローバイガス流のない場合の定容燃焼容器実験)

雑 賀 高^{*1}, 是 松 孝 治^{*1}

Flame Behavior at the Combustion-Chamber Corner of a Spark Ignition Engine

(1st Report, Combustion-Bomb Experiments without Blowby Gas Flow)

Takashi SAIKA and Koji KOREMATSU

This paper describes the effects of a combustion-chamber corner on flame propagation into the ring crevice of a spark ignition engine. Because hydrocarbons from the engine can be reduced by flame propagation into the crevice, it is necessary to reveal flame behavior at the corner which dominates the flame propagation. We have conducted optical experiments of the flame propagation process toward the corner by the schlieren photography method. We have, furthermore, measured methane concentration at the corner and also at the side wall to calculate quenching distances. We have concluded the effect of the corner is greater than that of the side wall under a lean condition, based on the fact that the corner is about four times larger than the side wall in quenching distance when the equivalence ratio is 0.60.

Key Words: Combustion, Wall Quenching, Quenching Distance, Hydrocarbons, Spark Ignition Engine

1. ま え が き

内燃機関のシリンダ壁面とピストントップランドおよびピストンリング面とで囲まれたリング状の空間をリングクレビスあるいはピストントップランド間げきという。火花点火機関のリングクレビス内に火炎が進入しないと、ここから流出する未反応燃料が機関から排出される未燃焼炭化水素の発生原因の一つとなり、進入すれば未燃焼炭化水素が減少することが指摘されている^{(1)~(3)}。火炎がクレビスに進入しない原因として、次の二つの理由が考えられる。一つは、クレビス入口まで火炎は到達しても、進入できない場合であり、もう一つは、燃焼室角部の効果によって火炎はクレビスまで到達できずに消滅する場合である。後者の場合には、火炎はシリンダ壁面とピストン面の影響を受け、乱れは減少し温度が比較的低くなるため、クレビスに到達する前に火炎が消滅することが考えられる。

前報⁽³⁾ではクレビスへの火炎伝ばとその進入条件について取扱い、火炎がクレビスに進入するかどうかは、火炎がクレビスに到達したときの消炎距離とクレビス

幅の大小関係によることを明らかにした。本報では角部壁面の影響について検討するために、第1段階としてクレビスのない容器を用いて、ブローバイガス流が存在しない条件に対して角部での火炎挙動を明らかにする。具体的には、角部に近づく層流火炎の挙動をシュリーレン写真によって観察した。次に、角部のガスを瞬間サンプリング弁によってサンプリングし、濃度変化を調べ、消炎層厚みについて角部と単一壁面との比較を行った。

2. 実験装置と実験方法

2・1 可視化実験 図1にシュリーレン実験用の燃焼容器を示す。通路高さが16.5 mm, 通路長さが95 mm, 奥行きが40 mmである。点火位置から30 mmのところに角部を設け、その下流では通路高さを6.5 mmとした。定容燃焼実験を行うと、点火後圧力が上昇し、このため燃焼終了に近い状態での観察が難しくなる。そこで火炎が角部に到達したときの現象を詳細に観察するために、角部の後方に通路を設けて、圧力上昇に伴う密度変化の影響を受けにくくした。光学系は、焦点距離1 mの凸レンズ2枚からなり、光源は水銀灯である。点火装置と同期させた高速度カメラを用いて、角部における火炎の消滅過程を観察する。

* 昭和63年10月18日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月22日。

^{*1} 正員, 工学院大学 (〒192 八王子市中野町 2665-1)。

実験の手順を以下に説明する。まず燃焼容器内の圧力を真空ポンプで下げ、燃料のメタンと酸化剤の空気からなる所定の当量比の混合気を吸入する。混合気吸入の操作を数回行い、最初に容器内に存在していたガスの影響を除去する。燃焼容器内の初期圧力を設定した後、混合気の流動が停止するまで約10 min 間放置してから、点火装置を作動させ点火する。高速度カメラのこま速度は火炎伝ば速度に応じて、400~700 pictures/sとした。

2・2 燃焼容器角部でのサンプリング 図2に、実験に用いた定容燃焼容器と角部でのサンプリング系を示す。容器は、内径120 mm、高さ16.5 mmの円筒形で、黄銅製である。容器には圧力素子、吸・排気用バルブ、点火電極が取付けられている。容器内面は、点火電極以外に凹凸のない構造になっており、中心点火によって発生した火炎がほぼ同心円状に伝ばし角部に到達することができる。角部に取付けられた電磁弁は、ニードル形サンプリング弁で、開弁期間を1.3 msに設定して実験を行う。サンプリング量が少ないので、窒素ガスで希釈する。サンプリングガスの濃度と希釈後の濃度との関係は、あらかじめ種々の条件に対して明らかにしてある。また、同じサンプリング弁を側壁面にも取付けて、側壁面近傍の濃度変化も調べる。

燃料混合気としてメタンと空気の混合気を用い、当量比を変化させて実験を行う。まず、燃焼容器内、希釈室内、およびサンプリング弁の中を真空ポンプで排気する。燃焼容器には所定の当量比の混合気を導入し、希釈室およびサンプリング弁の中には大気圧の窒素ガスを封入しておく。燃焼容器内の初期圧力は大気圧で

ある。サンプリング弁の開弁時期を変化させ、点火後火炎が角部に到達する過程における濃度変化を測定する。濃度測定の際には、サンプリング後希釈室内で約1 h 間拡散させてから、ガスクロマトグラフ (FID) でこの希釈ガスを分析する。

3. 実験結果と考察

3・1 角部での火炎の消滅過程 図3に当量比 ϕ が0.56の場合の火炎挙動を示す。(No.1) 点火後、半球形状の火炎が伝ばしている。(No.2~3) 徐々に角部の影響を受け、通路上部の火炎のほうが早く進行し、下部の火炎は遅れ始めている。(No.4) 通路上部に層流火炎が進入し、角部では直角三角形に近い形状の未燃焼混合気が残されている。(No.5~6) 火炎はさらに角部へ近づき、未燃焼混合気はほぼ同じ形状のまま減少している。(No.7~8) ここで見掛け上、火炎は停滞し、以降の写真では消滅していると考えられる。このように希薄燃焼の場合、燃焼室角部で火炎が消滅する現象が観察される。

写真から火炎面の位置を読取るために、火炎と角部頂点との距離を図4に示すように定義する。すなわち、角部頂点から引いた角度の二等分線と火炎面との交点、および角部頂点との間の間隔を d_c [mm]とし、これを火炎と角部との距離とする。図3のNo.7に見られるように、見掛け上火炎が停滞し始めた時点を0 msとして、図5に火炎の位置 d_c の変化を整理する。角部での火炎の停滞現象が顕著に現れる希薄混合気の条件で実験を行うために、当量比 ϕ を0.60, 0.56とした。さらに各当量比について、燃焼前の初期圧力 p_0

図1 可視化用燃焼容器

図2 燃焼容器とサンプリング系

を変えて行った。初期圧力として大気圧, および点火可能な範囲の低い圧力を用いた。初期圧力が大気圧の条件のもとでは, $\phi=0.60$ と $\phi=0.56$ の差はほとんどない。しかし, 初期圧力の影響は大きく, 初期圧力 p_0 が 0.080 MPa のほうが 0.085 MPa に比べて, 時刻零における d_c は大きくなっている。また火炎伝ば速度は火炎が停滞するまでほぼ一定である。

フランジ付き電極法によって測定された消炎距離は, $\phi=0.60$ のときに 5.65 mm (大気圧, $T=288 \text{ K}$)⁽⁴⁾ である。この値は2枚の平行平板間の火炎の通過限界の間隔であるから, 燃焼室などの単一壁面上に形成される消炎層の厚みより大きな値である。この厚みは消炎距離の $0.1 \sim 0.15$ 倍といわれている⁽⁵⁾。また圧力, 温度が高ければ消炎距離はさらに小さくなる。したがって, このときの消炎層の厚みは 0.57 mm より小さいと推定できる。これに対して, このとき火炎が停滞

し始めた時点の位置 d_c は, $\phi=0.60$ ($p_0=0.10 \text{ MPa}$) に対して 1.62 mm である。 d_c の値は壁面上に形成される消炎層の厚みより3倍程度厚いことになる。すなわち, 火炎は角部の形状の影響を大きく受け, 単一壁面上における消炎層よりも未反応領域が大きいと考えられる。

3・2 角部におけるメタン濃度 図6に角部におけるメタン濃度の時間経過を示す。横軸は点火からの時間を, 縦軸はメタン濃度 C_m を燃料濃度 C_{mf} (燃焼前のメタン濃度) で無次元化したものである。点火後 C_m/C_{mf} は, しばらく燃料濃度を示しているが, 火炎が角部に近づくと減少する。当量比が 0.95 のとき, 最も火炎伝ば速度が大きいので, この変化は早く現れ, 減少の程度も急激である。すなわち点火後約 35 ms で急激にメタン濃度は減少し始め, 約 45 ms で最小値を示す。一方, 図6(b)に示すように当量比が最も小さい 0.58 の場合には, 点火後 250 ms で緩やかに減少し始め, 約 350 ms で最小値を示す。

角部での濃度が最小値を示した時点で, 火炎は最も角部に近づき, そのときの値は角部での消炎による未

図3 角部への火炎伝ば過程 (メタン・空気, 時間間隔: 4.5 ms , $p_0=0.1 \text{ MPa}$, $\phi=0.56$)

図4 火炎面の位置の定義

図5 火炎面の位置

燃焼領域を示していると考えられる。そこで、メタン濃度の最小値を当量比で整理し、図7に示す。角部でのサンプリング結果とともに側壁面での結果も掲げている。どちらの場合も当量比が小さくなれば、未燃焼成分の増加が認められる。これは当量比に対して、消炎距離がU字形を示すという良く知られた傾向と一致しており、壁面消炎層が影響していることがわかる。しかし、角部のほうが側壁の場合に比べて値は大きくなっている。

3.3 角部における消炎層の厚み 希薄燃焼の場合、角部の未反応領域はシュリーレン写真によっても観察されるが、ガスサンプリングの結果から消炎層の厚みを算出することも興味深い。そのためには開弁期間中にサンプリングされるガスの境界を求めなければならない。これを三次元非定常流として取扱うのは困難である。簡便な方法としてサンプリング領域を球として取扱うと、消炎層は壁面の近傍にあるため、消炎層厚みを大きく見積もり過ぎることになる。そこで本報では、境界層を考慮した準定常二次元流れによる方

法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を適用することにする。

境界層方程式から、フォルクナ・スカンの相似解を求めることによって、次式が与えられている。

$$\begin{cases} y = -\delta(r/r_0)^{3/2} \ln[1-(r/r_0)^3], \\ (y < \delta) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} r = r_0, \\ (y > \delta) \end{cases} \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\nu t} \quad (3)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (4)$$

ただし、 x, y は図8に示すサンプリング境界の座標、 t は開弁期間、 δ は境界層厚さ、 r_0 はサンプル領域を球面と仮定したときの半径である。側壁面では、図9(a)の断面を持つ回転体とする。角部では、図9(b)の断面が壁面の交線方向に円弧状の分布を示すとして求める。側壁面のサンプリングでは、壁面に平行で均一な厚さの消炎層とした。角部でのサンプリングでは、図3の火炎写真から火炎面は角部で直角三角形に近い形状であるとみなせるので、側壁面の厚み d_q に三角形部分を合わせて角部の厚み d_c とする。それぞれ消炎層内は未燃焼混合気として、測定したメタン濃度と等しくなるように、 d_q および d_c を求める。

図6 角部におけるメタン濃度

図7 角部のメタン濃度の最小値

図8 境界層を考慮したサンプリング領域

討 論

〔質問〕 角 田 敏 一〔広島大学工学部〕

(1) 消炎機構あるいは消炎層の厚さは燃焼室内における圧力の時間履歴と密接な関係があると思われる。また、このようにして得られた消炎層厚さからその質量を求める際に圧力のデータはぜひとも必要となる。その意味で圧力の測定値をお示し願いたい。

(2) ステップより後流側の空間の形状, 大きさが貴実験の値と異なると圧力が異なりその結果消炎層の厚さも違う可能性がある。

〔回答〕 (1) 初期圧力が大気圧の場合の円筒形燃焼容器内の圧力経過を付図1に示す。

(2) 層流火炎によって発生する容器内の消炎層の厚みは, 混合気の種類, 消炎層が生成するときの圧力, および壁温の影響を受ける。ここで用いている燃焼容器では壁温の上昇はたかだか 30 K 程度なので, 混合気を特定すれば, 消炎層生成時の圧力が重要なパラメータになる。ところで消炎層生成時の圧力は, 初期圧力 p_0 , 当量比 ϕ , およびご指摘の容器形状によって変化する。すなわち, 図7や図10で横軸に ϕ をとって整理してあるが, これは単に ϕ の影響ということではなく, 形状と p_0 が与えられているので消炎層生成時の圧力も指定したことになる。ここではこのような整理方法を採用した。

また, ご指摘の消炎層厚みの圧力依存性を考慮することは当然である。本論文では, 容器形状ではなく初期圧力 p_0 を変化させる方法で角部の消炎層厚みの圧

付図1 円筒形燃焼容器内の圧力経過

力依存性を図5に示してある。

〔質問〕 室 木 巧〔千葉大学工学部〕

クレビスや角部の火炎到達などを論ずる場合, 幾何学的条件として S/V を考える必要はないか。貴テストではどの程度の S/V となっているか。

以前質問者の経験では, S/V を変えて未燃 HC の排出を測定してみると両者の間に大きい相関性があった。

〔回答〕 本実験に用いた円筒形燃焼容器の S/V は, 1.55 cm^{-1} である。 S/V は火炎の伝ば過程に影響を及ぼすので, 燃焼室全体の消炎層を調べるときには考慮する必要があると考える。本実験では, 燃焼室角部近傍の現象のみに注目し, 角部における局所的なサンプリングを行っている。したがって, S/V が直接本実験の結果に影響を及ぼすことはない。