定容燃焼室内くさび形火炎の発生機構*

若井 和憲**, 志水 昭史**
日比野 靖***, 田中 力****

The Mechanism of Wedge Shaped Flame Formation in a Closed Vessel

Kazunori WAKAI, Shoshi SHIMIZU,
Yasushi HIBINO, and Chikara TANAKA

To predict the shape of a flame in a vessel is one of very important problems in the field of combustion. But it is difficult because the shape is strongly influenced by the flow which is affected not only by the surrounding walls but also by the expansion of gas due to combustion. The mechanism of formation of a wedge shaped flame in a constant volume combustion chamber has longtime been a target of many researchers since Ellis pointed it out in 1928. Several hypotheses have been proposed but they do not clearly present a complete mechanism. Modern techniques of measurement are giving new data about the combustion gases. In this report, a two dimensional LDV and some other measuring techniques are used to check the hypotheses mentioned above, and a new idea on the mechanism of formation of a wedge shaped flame is proposed.

Key Words: Combustion, Laser Doppler Velocimeter, Wedge Shaped Flame, Shock Wave, Schlieren Photograph

1. ま え が き

保炎器を持つバーナとくらべ、内燃機関の燃焼室内の火炎形状はガスの流動状態に大きく依存し、またその流動状態は壁面により強い制約を受けるばかりでなく、火炎面の発達に伴う大幅な体積膨張の影響を受ける。そのため、火炎形状を正確に決定するのは容易ではない。しかし、内燃機関における火炎面の挙動は燃焼時間に強い影響を与えるものであるが、たとえば排气組成の実験的研究や、エンジンサイクルの熱力学的モデルなどでは平面火炎と仮定して研究が行われることが多く^{(1)~(4)}、そのモデルの妥当性を調べることは重要な課題である。

一方、内燃機関の燃焼室で生ずる現象の理解を容易にするため、しばしば定容燃焼室を用いた実験が行われている。円形またはく形の一様断面形状を持ち、火炎伝ば方向に長い燃焼室の一端で静止混合気に点火すると、火炎は半球状→半だ円体状→平面状→くさび形火炎面へと変化することが多くの研究者^{(2)(4)~(15)}によ

って観察されている。このような変化過程のうち、特にくさび形火炎への移行過程は興味深く、いくつかの説が提案されているが、現在のところ定説となっていないものはない。

ここでは、従来行われてきたシュリーレン写真による火炎形状の観察に加え、レーザドップラー流速計による燃焼室内速度分布測定などを行い、検討を加えた。

2. 従 来 の 研 究

2・1 既燃ガス流動説

2・1・1 冷却説 この問題に関する先駆的研究である Ellis⁽⁵⁾の代表的な実験結果を図1に示す。Ellisは火炎面が半だ円体状になったとき急激な火炎面面積の増大を伴っており、そのため放熱面積が増大して逆流が発生するからであるとしている。

2・2・2 粘性説 Lewisら⁽¹⁶⁾は、Ellis⁽⁵⁾の結果を引用して考察を加えている。未燃ガスは平均的には常に対向壁へ押され、既燃ガスは常に点火側へ押し戻される。いずれも速度境界層が発達しようとするが粘性は未燃ガスより既燃ガスのほうが大きいため、火炎の発熱膨張過程に伴う壁面近傍の既燃ガスの流動が少なく、中央部が点火側へ陥没するとしている。

* 昭和61年11月24日 関西支部第246回講演会において講演、原稿受付 昭和61年5月1日。

** 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

*** 正員、トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町)。

**** 学生員、岐阜大学大学院。

2.2 未燃ガス流動説

2.2.1 うず輪説 Tabaczynski⁽¹⁷⁾あるいは Sawyer は、エンジンの圧縮過程でピストン前方シリンダ壁近傍にうず輪が形成されることを示している。火炎がピストンの役をなすと考えればこの場合もそれにより局所的に燃焼速度が上昇し、くさび形に移行する原因となりうると考えられる。

2.2.2 振動説 Leyer⁽¹⁰⁾はくさび形に移行する火炎について議論しているわけではないが、半だ円体状火炎と壁面にはさまれたガスが急速に燃焼するとき乱れ、振動燃焼が発生することを示している。この部分が乱ればやはり壁面近傍の燃焼速度が上昇し、くさび形に移行すると考えられる。

2.3 圧力波説

2.3.1 衝撃波説 Strehlow⁽¹⁸⁾は、筒内を伝ばする火炎によりその前方に衝撃波が発生すること⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、および進行方向に凸の火炎に前方から衝撃波が衝突すると火炎面がくぼむこと⁽²¹⁾を引用し、Ellis⁽⁵⁾の結果も火炎から発生した衝撃波が対向壁で反射し、戻ってきて火炎に衝突するためとしている。

Egerton ら⁽⁷⁾も弱い衝撃波が原因としており、燃焼室内に紙片を入れて点火実験を行い、それが舞い上がるのは衝撃波がある証拠であるとしている。

2.3.2 希薄波説 Guénoche⁽²²⁾は、半だ円体状→平面状となるとき急激な火炎面面積の減少に伴う減速が希薄波が発生し、その往復で火炎面が変形するとしている。しかし、中央がくぼむ理由について言及しておらず、またこの説に固執しているわけでもなく、一つの考え方として示している。

3. 実験装置

燃焼室は断面 30 mm×28 mm×長さ 90 mm の直方体(図 2)のものをおもに使用した。図 2 には本報で扱う x, y, z 座標についても示してある。30 mm×90

mm の両壁面はガラス窓となっており、シュリーレン写真撮影、レーザドップラー流速計(以下 LDV と略記)による流速測定などが可能である。燃焼室内に多孔板を組みこみ、点火栓側から対向壁に向かって定速駆動装置⁽²³⁾により走行させ、初期乱れを発生させてから燃焼実験を行うことも可能である。そのほか、必要に応じて図 2 と同一燃焼空間を持ち火炎伝ば方向の火炎形状の観察ができるもの、および長さが 2 倍の燃焼室も用いた。

未燃ガスの流れの様子を調べるため燃焼室内の任意の位置に細線を張り、通電によるジュール熱によりそのまわりのガスを高温にし、火炎像とともにそのシュリーレをとらえた。これをホットガストレース法(HG 法、また使用した細線を HGW と略記)と称する⁽²⁴⁾。この HGW に薄く流動パラフィン塗布し通電せず燃焼実験を行うと、その流動パラフィンが火炎通過時に加熱され蒸発、分解、遊離炭素を生じ発光しながら既燃ガスとともに流れることを利用し、流跡線を可視化できる。

また、間げき 1 mm で対向する 2 本の細線を電極とした点火栓により、火炎伝ば途中の任意位置で任意時刻に点火し、局所燃焼速度を調べた(これを局所遅延点火法と呼び、LDI と略記する)。

燃焼室内の速度(V)分布を調べるためには、二色式二次元 LDV をプリンジモードで使用した。光源は Ar イオンレーザ(出力 3 W)、光学系は焦点距離 250.2 mm、交差角 11.03° の後方散乱法で、40 MHz のシフトを用いている。さらにミキサにより 2 MHz に調整し、正負の速度を測定した。散乱粒子は平均粒径 0.5 μm の SiC、信号処理にはトラッカ(KANOMAX 1090 A)を用いた。

燃料には市販の純プロパン(99%以上)または水素、酸化剤には空気または酸素を用い、種々の燃焼速度の混合気を作成して使用した。初期圧力 P_0 は 0.10 MPa、初期温度 T_0 は LDV 測定時は 100°C、その他の場合は

図 1 くさび形火炎

図 2 燃焼室

20~25°Cである。

4. 実験結果

4.1 くさび形火炎の形成 図3はプロパン空気混合気 $\phi=1.0$ を燃焼させたときのシュリーレン写真である。圧力が最大値 ($P_{\max}$) に達する時間 ($t_{\max}$) で時間 t を無次元化した時間を t_r とし、それが点火から 0.1 間隔となるよう順に示したものであり、図3(a)は横 (z 方向) から、図3(b)は火炎伝ば方向 (x 方向) から見たものである。後者は見やすいように白黒を反転させて撮影した。図3(a)は図1(b)の円筒形燃焼室の場合⁽⁶⁾の経過とよく似ている。図3(b)を見ると、 $t_r=0.1\sim0.2$ と時間が進むにしたがって火炎球は成長して上下壁面に近づき、 $t_r=0.3$ では壁面いっぱいに広がった火炎が写っている。 $t_r=0.5$ になると糸巻形のシュリーレンが見られる。この後、図3(a)の火炎で最も進んで写っているのは四隅であり、実際にも燃焼室の四隅で火炎が先行して進んでいると考えられる。このことは、壁面にとりつけたイオン探針の火炎検出時刻からも確認している。 $t_r=0.6$ になると、図3(b)では対角線方向にシュリーレンが現れており、それから数本の枝状のシュリーレンが写っている。時間の経過につれ、このしわが伸びつつ、火炎は対向壁へ接近していく。火炎は $t_r=1.0$ になっても消滅せず、放熱量に見合う発熱が続いていることがわかる。

図3 くさび形火炎の形成 ($t_{\max}=42$ ms)

図4 HG法による未燃ガス流の可視化

4.2 HG法による観察 図3の条件においてHG法を適用した結果を図4に示す。図4(a)はHGWを燃焼室の中心 ($x=45$ mm) に張った場合、図4(b)はそれを18.4 mmとした場合である。いずれも火炎が非常に接近してくるまで混合気は層状に圧縮されていく様子を示しており、火炎が接近して初めてその形状に近い形となる。壁面近傍の挙動を見てもとくに変わった様子は見られず、ほとんど発生時の状態であらわれていく。

4.3 LDI法による観察 図5は H_2-O_2 -air ($t_{\max}=4$ ms) の火炎が平面状になったところ、そのわずかな前方 ($x=69$ mm) の壁面近く ($y=2$ mm) および上下壁面の中央 ($y=15$ mm) の2箇所での点火し、その火炎がわずかに成長した時のシュリーレン写真である。二つの火炎はいずれもほぼ同じ割合で成長しており、中央とくらべて壁面近傍の燃焼速度がとくに速くなっているような様子は見られない。また図6には同じく H_2-O_2 -air ($t_{\max}=4$ ms) 火炎が平面状になったところ、対向壁から5.1, 18.4 mm離れた2箇所の中央部で点火し、その火炎の成長の様子を見たシュリーレン写真を示す。局所遅延点火の時期をこれより進めた場合を含め、火炎の成長の様子が急変したり形状がひずむこともなく、これらに大きく影響するような流動的外乱があるとは考えにくい。

4.4 燃焼速度の影響 図7には混合気の組成を変えることにより、図3とくらべて燃焼速度を上げた場合(a)と遅らせた場合(b)の火炎形状の推移を示す。図7(b)では非常に燃焼が遅く、燃焼室を水平に置くと浮力の影響を受けるためここでは垂直にして実験を行っている。 $t_{\max}$ は図7(a)と図7(b)では2けたの異

図5 LDI法 (y 方向)

図6 LDI法 (x 方向)

図7 燃焼速度の影響 (z 方向に見た火炎形状)

なり、図7(a)ではLeyer⁽¹⁰⁾の報告と同様圧力振動(周波数から、燃焼室内の気柱振動と考えられる)が現れ $t_{\max}$ が決定しにくいこと、図7(b)では選択拡散の影響と思われるが初期火炎の進行が全体の進行とくらべて速いため、似た火炎形状を示す時刻 t_r は異なっているが、図3の場合も含め $t_{\max}$ の広い範囲にわたり、明確なくさび形火炎を形成している。図8には x 方向シュリーレン写真を示す。図8(a)の場合は図3より明確にX字形に移行している。一方、図8(b)の条件ではシュリーレン写真以外に可視域の直接写真も調べたが、シュリーレン像に対し45°回転した十字形火炎構造を示した。

4.5 初期乱れの影響 図9に多孔板を駆動し、停止時に燃焼室全体にほぼ1 m/s程度の乱れを与えたあと、点火までの時間 t_d を増大することにより初期乱れを減衰させた場合の燃焼終わり近くの火炎を示す。混合気はプロパン-空気、 $\phi=1.0$ である。 $t_d=0$ msでは $t_{\max}$ は静止混合気($t_d=\infty$)の場合の約40%に短縮される⁽²³⁾が、火炎発達初期の半球状、半円体状火炎への移行経過は乱れによる火炎面のしわが見られる以外は $t_d=\infty$ とよく似ている。しかし、その後 t_d が小さく初期乱れが強いほど平面状にはなりにくく、凸形の火炎のまま対向壁に向かい、くさび形火炎を形成しなくなる。 $t_d=80$ msあたりを境としてそれより t_d が小さい場合には明確なくさび形火炎が現れない。この $t_d=80$ msでは $t_{\max}$ は $t_d=\infty$ の74%に短縮されただけで、混合気組成によって $t_{\max}$ を大きく変えてもくさび形となるのとは様相を異にする。図10は横軸には無

次元時間 t_r 、縦軸には圧力上昇 $\Delta P=P-P_0$ をその最大値 $\Delta P_{\max}$ で無次元化した圧力を用いた指圧線図である。 $t_d=\infty$ は図3に見られる $t_r=0.2\sim 0.3$ の火炎面積の増大に伴う圧力上昇率の増大から、 $t_r=0.3\sim 0.4$ におけるその減少、いわゆる中だるみが特徴的であるが、 $t_d=80$ ms $\rightarrow 0$ msとなるにつれて上述の火炎面積の変化が少なくなるため、指数関数に近い圧力上昇を示している。

4.6 対向壁の影響 図11は、図2の2倍の長さの燃焼室を用い図3と同じ混合気に両端面中央で同時点火したものである。図3(a)と同じ t_r における図を比較すると、対向壁までの距離はくさび形火炎形成に影響しないようである。燃焼速度がこの10倍近い混合気でも試みたが、結果は同様であった。

4.7 上下壁面の影響 図12には、図2の燃焼室の点火位置を点火側壁面上部($y=28$ mm)の手前($z=2$ mm)と奥($z=26$ mm)の2箇所に変えた場合の火炎を示す。この火炎の初期の様子は、図3(a)の火炎を中心で水平に二分した下半分に相当する。上壁面の影響が少なければ、時間の経過につれ下ががせり出し、くさび形火炎の下半分に似た形になると考えられるが、実際は上壁面の影響を受け、その方向へ偏ってはいるもののくさび形火炎を形成している。図3の燃焼室中

図8 燃焼速度の影響(x 方向に見た火炎形状)

図10 初期乱れの影響(指圧線図)

図9 初期乱れの影響(z 方向に見た火炎形状)

図11 対向壁の影響

央に、点火栓との間を5 mmほど離して奥行きいっぱい厚さ0.5 mmの板を水平にそう入した場合も、ほぼ同様に上下でくさび形火炎が形成された。

4・8 流動パラフィンによる既燃ガスの流れの可視化 図13は図4(a)と同じ位置に細線を張り、流動パラフィンを塗布しシャッターをバルブにして撮影したものである。火炎面は任意時刻のシュリーレン写真である。図13より細線位置で発生した遊離炭素(既燃ガス)が、点火栓方向へ押し戻されつつ一度中央へ集むように集まったあと、再び上下壁面方向へ広がっており、うずを形成しているように見える。

4・9 LDVによる速度ベクトルマップ LDVにより火炎伝ば方向(x 方向)と上下方向(y 方向)の速度履歴を中心軸を通る x - y 平面(以下垂直断面と称する)内の135点、および中心軸と y - z 平面对角線にそった面(対角断面と称する)内の下半分72点について測定し、それらの点における任意時刻の速度から、速度ベクトルマップを作成した。光学系の関係で、垂直断面の $y=1$ mmと29 mmでは V_y の測定ができなかった。燃焼条件は、LDV測定がしやすいように混合気を C_3H_8 -空気の $\phi=1.6$ とし、 $T_0=100^\circ\text{C}$ 、 $P_0=0.10$ MPaである。図13にはLDV測定とは別に測定したシュリーレン写真による火炎像が重ねて示してある。装置の都合により、燃焼室は水平に置いて実験したため浮力の影響が見られる。そのため垂直断面では、ベクトルマップと火炎像は上下非対称になっている。なお、ベクトルマップは個々の点において測定した速度履歴から同一時刻のものを読み出してプロットしたものであり、シュリーレン写真もすべての写真を1回の燃焼により得たものではない。したがって、燃焼時間のばらつきに伴うずれが生じうる。そこで、すべてのデータに $t_{\max}$ が一致するように補正を加え、そのばらつきによるずれを極力少なくしている。また対角断面では中心軸より下($y=1\sim 15$ mm)についてのみ測定し、中心軸より上方は下と対称としてプロットした。そのほか、シュリーレン写真の火炎位置は z 方向の光線に

よるシュリーレをもとにしているため、それぞれの断面における火炎位置とは限らないので注意を要する。

火炎が半球状である $t=9.0$ msでは、ベクトルの向きには火炎面からガスが膨張している様子が見られるが、逆流を示すところはほとんどない。HG法でも示したように、未燃ガスは層状に近い圧縮を受けている。火炎が平面的に進行した断熱的であれば、既燃ガスは点火側へ戻り、未燃ガスは対向壁へ向かう流れとなっているべきであるが、 $t=18$ msまではほとんどのベクトルは対向壁へ向かっている。これは火炎が平面でなく、点火壁側に発熱部分が存在することを意味する。 $t=22.5$ msになると既燃ガスがほとんど逆流を始めており、火炎面が上下壁面に急激に接し始めたことを示している。またこの時刻の $x=25, 35$ mmの壁面近傍では、壁面に接しつつある火炎により膨張するガスが中央に向かう流れを生じている。 $t=31.5$ ms

図12 上下壁の影響

図13 流動パラフィンによる既燃ガス流跡線の可視化

図14 LDVによる速度ベクトルマップ(垂直断面)

で火炎が平面状になると、 $x \leq 45$ mm では速度境界層に似た分布を示している。一方、未燃ガスは火炎面積の急激な減少に伴い膨張量が減るため、速度がほとんど零に近くなる。 $x = 45$ mm では火炎が壁面近くにあると考えられ、中央に向かう流れがあり、また $x = 55$ mm でも同様に壁面から中央に向かう流れが観察される。火炎が典型的なくさび形となる $t = 54.0$ ms になると、火炎面から生ずる既燃ガスは壁面方向を向くため、 $t = 31.5$ ms と異なり中央が遅く壁面側で速い逆流の速度分布を示している。しかし、壁面のごく近傍では境界層が発達しているかのごとき様子を見せている。火炎から遠い $x = 25$ mm では、 $t = 31.5$ ms ころ $x = 45$ mm 付近にあった流れの分布がここへ達する時刻でもあり、中央ほど速い分布を持続している。 $x = 5$ mm では速度が急減しており、 $x = 15$ mm 流れが連続性を保つには点火壁へ向かっていたガスのベクトルが壁面方向へ向いていることからわかるように、中央から点火側へ逆流した後、壁面に沿って再び前方に流れている。図 15 の $t = 54$ ms における対角断面ではその様子が強く現れており、中央を流れてきたガスが隅部へまわりこんでいくことがわかる。このことは、図 13 の流動パラフィンによる流れのパターンからも言える。さて、この対角断面では $x = 65$ mm 付近にある壁面近傍の火炎から生ずる既燃ガスの流れの V_y 成分は、垂直断面の場合よりはるかに大きくなっている。このことは、ほとんどの時刻について言いうる⁽²⁴⁾。いずれの断面についても、 $t = 54$ ms のくさび形火炎につつまれた未燃ガス ($x = 65$ mm, $y = 10, 15$ mm) は点火側へ逆流しており、Ellis⁽⁵⁾の結果を裏付けている。

5. 検 討

5.1 くさび形火炎の形状 z 方向から見た形はもちろん Ellis⁽⁵⁾の報告以来認められてきたものと同じであるが、今までに立体的構造について調べた報告はなかった。本研究で調べた範囲では、くさび形断面の燃焼室においては、燃焼時間が速いものは x 方向に見て X 字形に谷を持つくさび形で、燃焼時間が長くなると 45° 回転した十字形に移行すると言えるようであ

図 15 LDV による速度ベクトルマップ (対角断面)

る。

5.2 冷却説の吟味 火炎面自体が失う冷却熱は一般に火炎に接する未燃ガスを加熱し、超過エンタルピーとなり、それが燃焼室全体の流動に直接影響することはない。火炎面が壁面で消滅し、既燃ガスが壁面に接することによって冷却収縮し、逆流する駆動力になることはありそうである。しかし、くさび形火炎が形成される頃の指圧線図は圧力が上昇中 (図 10) であり、既燃ガスの逆流は冷却によるというより火炎帯で未燃ガスが膨張し既燃ガスになるための効果が大きく、さらに中央部だけにその効果が及ぶという特別な理由は無く、中央部を逆流させる直接の原因ではないであろう。

5.3 粘性説の吟味 図 4 の HG 法や図 14 のベクトルマップで示したように、未燃ガスはほとんど層状に流されている。一方、図 14 の $t = 31.5$ ms では既燃ガスの速度分布に境界層があるように見られる。また図 12 により既燃ガスが粘性の影響で壁面近傍を流れるにくく、そこより流れやすい中央部を流れた後対向壁の影響で流れが曲げられたと考えられる。したがって、この説を裏付けているように見える。しかし粘性境界層厚さの成長は $\sqrt{\nu \cdot t}$ (ν : 動粘性係数) が指標となり、既燃ガス側で中央まで境界層が発達するのに、例えば図 2 の燃焼室では 0.7 s 程度要することとなり、くさびに関係する火炎直後ではほとんど発達していないことになる。また燃焼時間に関係なくくさび形火炎に移行している事実も合せて考えると、粘性が直接の原因とは考えにくい。図 14 の $t = 31.5$ ms の境界層に似た分布も、 x が小さいほど逆流を開始してから時間が長く境界層が発達しているべきであるが、実際には火炎面に近い x の大きいほうでよく発達しているように見え、結局この分布はその前の火炎形状の影響を受けてきたものと考えるべきであろう。

5.4 うず輪・振動説の吟味 図 4 (a) の $t = 20$ ms や、図 4 (b) の 12 ms でわかるように、壁面近傍で火炎到達直前の未燃ガスが中央部のガスとくらべ特別変わった挙動をとっている様子も見られず、また図 5 においても壁面近傍に非常に細かい振動が発生し、燃焼速度が増加している様子も見られない。

5.5 圧力波説の吟味 Strehlow⁽¹⁸⁾の引用した Oppenheim⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾の実験は燃焼速度が非常に速く強い衝撃波を発生し得た。それとくらべ、Ellis⁽⁵⁾の実験は燃焼速度が 1 けた以上遅い。また図 7 (a), (b) は燃焼時間が 2 けたも異なるにもかかわらず、よく似たくさび形火炎を形成する。一方、図 7 の燃焼時間の範囲

にあっても、初期乱れを与えると、進行方向に凸の火炎形状を持っているにもかかわらず強い乱れで燃焼速度が速く圧力波の効果が大きいと考えられる方がくさび形に移行しない。また、反射衝撃波の影響が図3とは異なる図11も、くさび形火炎はその影響を受けていないようである。さらに図12では、Strehlowの説に従えば最初にくぼみ始めるのは火炎の先端であると思われるのに、実際にはずれた位置から始まっている。また、凸形火炎形状を変えるほどの圧力波があるならば、図6の球形火炎の形状も崩れることが予想されるが、点火用細線の影響が現れている程度で大きな形状の変化は見られない。

以上から、圧力波の影響は少ないと考えてよいであろう。

5・6 LDVによる速度ベクトルマップからの検討
以上により、従来考えられたいくつかの説はどれも有力な説とは考えにくいことがわかった。そこで、本研究で測定したデータからくさび形火炎を発生させる原因について新たな検討を試みる。

図4や図14の $t=9, 18\text{ ms}$ を見ると、未燃ガスは火炎の直前まで層状に、すなわち同じ x の位置のガスはほぼ同じ速度で対向壁へ進んでいる。その最大速度は $t=18\text{ ms}$ において 2 m/s 弱に達している。半だ円体状火炎と上下壁面の間にある未燃ガスもこれに近い速度を持っている。時間の経過とともに上下壁面近傍火炎は壁面に接し、発熱割合が急減するにつれ速度も急に減少し、 $t=27\text{ ms}$ では 0.5 m/s 程度になっている。この時、火炎はまだ進行方向に凸であり、中心部とくらべ壁面近傍とくに隅部では減速される密度の高い未燃ガスが多くあるため、運動量変化のバランスを保つためにその近くのガスはそれほど減速されず、反対に中央付近のガスが強く減速される。結局中央部では図14の $t=22.5, 27\text{ ms}$ に見られるように、壁面近くの流動分を吸収するために逆流さえ起こりうる。その結果未燃ガスに乗って火炎が進むため、壁面近傍では中央部より火炎がせり出してくることとなる。初期乱れを与えた場合は、指圧線図(図10)からわかるように、火炎面積の急減少に伴う圧力上昇の中だるみが少なくなるため、この効果が現れにくく、くさび形に移行できないのであろう。

この運動量のバランスにより一度くさび形火炎が形成された後、図3からわかるようにその形状を最後まで維持しており、その駆動力が必要である。

図14の $t=27\text{ ms}$, $x=45\text{ mm}$ を見ると、 $y=2\text{ mm}$ および $y=28\text{ mm}$ で燃焼室中心方向へ向くベクトルが見られ、次の $t=31.5\text{ ms}$ でもベクトルの方向が中

心を向いている。このころは点火壁面側での発熱はほとんどなく、全体で既燃ガスは逆流が始まっている。図14には火炎直後のデータは不足しているが、以上のことから壁面近傍では火炎面は消炎などの影響でわん曲し点火側へすそを引いており、その部分の燃焼が中心部より遅れているが、圧力上昇および火炎ストレッチの減少により後から燃焼するため、中心部にくらべ壁面近傍での発熱量が多くなり、結局火炎面、未燃ガスを前方へ押し出すことになる。中央部分では平面状の火炎があるだけであり膨張量が少なく、壁面近傍の膨張分を吸収する形となり、点火側へ未燃ガスが流れる。 $t=54\text{ ms}$ ではこの効果により、くさび形火炎内にある未燃ガスは逆流している。

この考えによれば、粘性説と異なり、壁面近傍火炎の直後における燃焼に伴うガスの膨張による逆流が制約されることになり、粘性説で説明できなかったことも十分説明が可能となる。燃焼速度が異なる場合も、壁面近傍火炎はわん曲することによりストレッチを受けており、中央部火炎より遅れて燃焼するためと考えられる。初期乱れがあると、そのわん曲した火炎が乱されるため壁面近傍でとくに遅れて発熱がおこることがなくなり、くさび形火炎を形成しないと考えられる。上下壁面の影響についての図12の結果についても、 $t=8.4\text{ ms}$ では上壁面のごく近傍では後退していた火炎が、 $t=16.8\text{ ms}$ で消炎層の後燃えによりわずかにせり出し、これが成長して $t=25.2\text{ ms}$ ではくさび形火炎の上部を形成しているとすれば説明できる。図13の流動パラフィンの結果も、壁面近傍の後燃えで中央へ押し寄せられ、点火栓のある壁側で再び上下壁面方向へ押し戻される流れを示したものである。図14の垂直断面とくらべ対角断面での V_x の変化の様子が顕著であるという結果についても、図3(b)で見られるような隅部での火炎面の曲がりが大きく、他の部分とくらべ相当多くの火炎面が単位空間あたりに存在しており、それが後燃えすると考えられるので十分説明できる。

6. 結 論

Ellis⁽⁵⁾が1928年に問題を提起して以来、多くの研究者により説明が試みられた定容燃焼室内のくさび形火炎の発生機構につき、LDVなどを用いた種々の実験を行い、従来の説を吟味するとともに新しい検討を加えた。その結果、まず半だ円体状火炎が上下壁面に接し減速を受け始めたとき、進行方向に凸で低密度の既燃ガスと上下壁面間にはさまれた高密度の未燃ガスが中央部と運動量のバランスを保つため中央より減速

が弱く、平面から凹形へと変形する。その後壁面近傍に消炎、ストレッチで中央部の燃焼から取り残された火炎が、圧力上昇、ストレッチ効果の減衰により後から燃焼し膨張することにより、前へ進んでいる火炎をさらに押し出し、壁面近傍が中央部よりせり出すことによりくさび形火炎に移行し維持すると考えられる。

一方、く形断面形状の燃焼室でのくさび形火炎の三次元的構造については、今後さらに検討を深めたい。

なお、本研究を進めるにあたって実験に協力された岐阜大学工学部卒業生 坂野吉則君、岐阜大学大学院生 園部正法君に謝意を表します。

文 献

- (1) Newhall, H. K. and Shahed, S. M., *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, (1970), 381.
- (2) 田坂・ほか2名, 機論, 48-435, B (昭57), 2355.
- (3) 小笠原・ほか3名, 日本自動車研究所速報, No. 61 (昭52), 27.
- (4) 若井・ほか3名, 機論, 50-454, B (昭59), 1624.
- (5) Ellis, O. D. de C., *Fuel Practice*, 7 (1928) 449, 502, 526.
- (6) Schmidt, E. H. W., ほか2名, *Proc. 4th Symp. (Int.) Combust.*, (1953), 658.
- (7) Egerton, A. C., ほか3名, 文献(6)の396ページ.
- (8) Everett, A. J. and Minkoff, G. J., *Fuel*, 33 (1954), 184.
- (9) Popov, V. A., *Izvest. Akad. Nauk, SSSR, Otdel Tekh. Nauk*, 3 (1956), 116.
- (10) Leyer, J. C., 文献(1)の551ページ.
- (11) 飯沼, 内燃機関, 11-131 (昭47), 17.
- (12) Iinuma, K., *AECSSG Rep.*, (1977), 1.
- (13) 若井・ほか2名, 機論, 47-417, B (昭56), 872.
- (14) Steinert, W., ほか2名, *Lawrence Berkley Laboratory Rep.*, LBL-14965 (1983).
- (15) Dunn-Rankin, D., ほか2名, *Lawrence Berkley Laboratory Rep.*, LBL-18150 (1984).
- (16) Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 2nd Ed. (1961), 298, Academic Press.
- (17) Tabaczynski, R. J., ほか2名, *J. Fluid. Mech.*, 42 (1970), 249.
- (18) Strehlow, R. A., *Fundamentals of Combustion*, (1968), 274, International Textbook Company.
- (19) Oppenheim, A. K., *Proc. OAR Res. Appl. Conf.*, (1966).
- (20) Oppenheim, A. K., *Proc. R. Soc. (London)*, Ser. A 268 (1965), 153.
- (21) Markstein, G. H., *Proc. 6th Symp. (Int.) Combust.*, (1956), 387.
- (22) Guénoche, H. (Markstein, G. H., ed.) *Nonsteady Flame Propagation*, (1964), 107, Pergamon Press.
- (23) 志水・ほか3名, 機論, 52-476, B (昭61), 1965.
- (24) Shimizu, S., ほか2名, *Proc. 3rd Int. Symp. Appl. L. A. Fluid Mech.*, (1986), 13-5.

討 論

〔質問〕 浜 本 嘉 輔 (岡山大学工学部)

(1) 図14に示されたLDV測定結果の説明によると、点火後18ms、火炎の先端が燃焼室長さ(90mm)の1/2程度にまで達してもなお、点火側(燃焼ガス側)に発熱部があるとのことだが、もしそうであるならば、発熱部はどのあたりにあるのか。

燃焼ガス側の流れが、火炎伝ば方向と同一方向になっていることから、燃焼ガス側に発熱部があると推定しておられるが、LDV測定用の粒子の慣性の影響とは考えられないか。

(2) LDV測定がしやすいように、 $\phi=1.6$, $T_0=100^\circ\text{C}$ とされた理由をご教示いただきたい。また、LDV測定時だけ、混合気の初期温度 $T_0=100^\circ\text{C}$ とし、ほかの実験では $T_0=20\sim 25^\circ\text{C}$ のことだが、混合気温度がこれだけ変わると、層流燃焼速度が異なり、火炎伝ばのようすが異なっていないか。

〔回答〕 (1) 燃焼ガス側に発熱部の存在することは図3の $t_r=0.2\sim 0.3$ の(b)の隅部に火炎のシュリーレが強く残っていることからわかる。また、条件の異なる場合もイオン探針でも確認し、さらに隅部の未燃ガスの少ないと考えられる初期乱れを与えた場

合⁽²⁴⁾には、既燃ガスの逆流が図14より早く発生することからも裏付けられる。この残留未燃ガスの燃焼により、火炎先端部より後方の既燃ガスが前方におし出されることになる。火炎伝ば理論から、火炎前後の未既燃ガス速度の差は燃焼速度の(密度比-1)倍になる。そのようすを種々の x における中心軸上の速度履歴で、付図1に示す。たとえば、 $x=15\text{ mm}$ では $t=7\text{ ms}$ ごろ火炎が通過(シュリーレン写真から判定)し、

付図 1

その後一時的に減速している。しかし、直前の未燃ガス速度は前述の速度差（この図の条件では 1 m/s 弱）より大きくなっているため火炎が通過しても逆流せず、隅部の燃焼により押し出され加速さえ受けている。なお、この火炎通過に伴う減速はもっと短時間に行われるべきだが、ご指摘の散乱粒子の慣性の影響（計算上は十分追従する）やトラッカの追従性のため遅れたものと考えられる。

(2) 対象が容器内非定常燃焼であり、窓ガラスを有し、しかも隅部に近い測定をするため後方散乱を選んだが、そのためとくに対角断面の場合の窓ガラス付近の測定では強い雑音が入り、フィルタにより大幅にカットする必要があった。したがって高速を避けて $\phi = 1.6$ を選んだ。また、 $T_0 = 100^\circ\text{C}$ とし、既燃ガス中の水蒸気の窓での凝縮による雑音の発生を避けた。

図 14, 15 だけ $\phi = 1.6$, $T_0 = 100^\circ\text{C}$ であり、 $t_{\max}$ で見て $\phi = 1.0$, $T_0 = 20 \sim 25^\circ\text{C}$ の 2 倍だが、図 7 やその他の実験でもくさび形火炎が同じように形成され、その発生機構が基本的に変ってしまうとは考えていない。

〔質問〕 河野 通方〔東京大学工学部〕

火炎がくさび状に変形する機構に関して以下のことについてご教示願いたい。

(1) 管内火炎伝ばのシミュレーション(付1)によれば、火炎近傍の未燃ガスに渦状の流れが形成され、それが火炎面を変形させることが明らかにされている。このような流速分布は貴実験結果でも認められるのか。

(2) 火炎の変形については、四隅の部分の気体の流動が重要な働きをすると思われるが、この働きが支配的であるのかそうでないのかについて、対角断面の速度ベクトル図、火炎面の x 方向の動きなどを考慮してご説明いただきたい。また、隅のない。例えば円形断面の燃焼容器では貴実験結果とかなり異なった結果が予想されるのか。

〔回答〕 (1) 質問で引用された Awn(付1)らのシミュレーションで渦が予測されたのはとくに点火側開放、対向壁閉鎖端の長いダクト内燃焼に関するものであり、重力加速度の影響を強く受けており、本報が対象としたくさび形火炎の場合とは相当に条件が異なる。本実験では、火炎面から遠い部分ではほとんど層状に圧縮されるが、火炎面にごく近いところでは火炎

の影響を受け、たとえば $t_{\max} = 54.0\text{ ms}$ では、くさびの中心のかん没した部分に含まれる未燃ガスは逆流し、壁面に近いところは反対の流れとなっており、全体では渦が形成されているといえる。しかし、これはすでにくさび形火炎が形成されてからのことであり、この渦がくさび形火炎の原因というより、火炎形状に伴う結果と考えるのが正しいと思う。くさび形に移る前の未燃ガスについては対向壁への流動が大きく、たとえ渦があってもそれに埋没していると思われ、確認は不可能だった。

(2) 運動量の効果や壁面近傍に取り残されたガスが遅れて燃えるのがくさび形火炎の発生と維持に貢献すると考えられるので、もちろん四隅があったほうがその効果は強調される。それは壁面近傍すなわち $y = 0.30\text{ mm}$ 近傍での V_y 成分が垂直断面(図 14)より対角断面(図 15)でより強く現れていることからわかる。しかし、Ellis⁽⁵⁾の円形断面の場合、あるいは奥行(図 2 の z) 方向に長く、四隅の影響の少ない場合⁽⁴⁾も明確なくさび形火炎を形成するので、四隅だけが原因ということではない。

〔質問〕 平野 敏右〔東京大学工学部〕

貴研究においては、運動量のバランスで火炎の動きを論じている。LDV を初めとする速度測定の結果をそ

付図 2

付図 3

付図 4

(付1) Awn, A. and Spalding, D.B. (ed Pezk, A.M.A.), *Heat and Fluid Flow in Power System Components*, (1979), 259, Pergamon Press.

の議論の根拠の一つとしているものと思われる。新しい計測法を用いて詳細な現象解釈を行うという本研究の主旨からすれば、当然、火炎面前後の運動量バランスを確かめられているはずであるが、論文中には、具体的な数値を用いた検討結果が示されていない。火炎面前後の速度の測定値と運動量および連続の方程式が満足されていることを示す具体的な例をお示しいただきたい。

〔回答〕 運動量のバランスや連続の式を定量的に調べるためには本報の垂直、対角断面だけのデータでは十分といえない。

運動量バランスについては、ある断面のガスに一樣に圧力こう配が生じ、減速力が働けば、未・既燃部では5～7倍の減速度の差が生じ、場合によっては逆流さえ起こる。図14、 $t=27\text{ ms}$ の火炎面直前の速度分布やその対角断面の付図2⁽²⁴⁾、あるいは燃焼速度のやや速い条件の速度分布(付図3)、さらにホットガストレースの結果(付図4)などから火炎面直前では壁面近傍の未燃ガス速度が中央部のそれより速くなっていることや、火炎面を離れた部分のベクトルマップから運動量

のバランスによると述べたものである。

〔質問〕 飯 沼 一 男〔法政大学工学部〕

燃焼によるガスの膨張は、当該火炎が容器内のどこにあるかによって当然違ってくる。例えば壁面付近で燃焼が起これば、壁面方向には膨張できないので、容器内部の方向に流れができ、火炎形状が複雑になるほどガス流動も複雑になる。非常にいいないな測定をされて流れのようすもかなり明確になったといえるが、数値シミュレーションである程度流動を含めた火炎形状の変化を知ることが可能なのではないか。

〔回答〕 ご指摘のとおり、数値シミュレーションでさらに確認するのが妥当と考えている。本報告では、くさび形成の要因と考えられてきた種々の効果を検討し、それらのうち除外して良い効果をかなり明らかにすることができ、数値シミュレーションのモデル化を容易にする一助になったと考えている。

一方、図8で示したように、三次元的構造もいろいろの特徴をもつようで、実験的にもさらに検討を深めたいと思う。