

希薄燃焼に及ぼす水素添加の効果*

(第2報, 管状火炎の特性と輸送過程に及ぼす回転強さの影響)

山本和弘*¹, 丸山昌幸*², 小沼義昭*¹Effects of Hydrogen Addition on Lean Combustion
(2nd Report, Effects of Rotation on the Characteristics and Transport Process
of Tubular Flames)

Kazuhiro YAMAMOTO, Masayuki MARUYAMA and Yoshiaki ONUMA

Lean combustion has the advantage of low pollutant emission levels, but its combustion rate is very low and the lean mixtures are difficult to ignite and form stable flames. To improve these disadvantages, we have focused on hydrogen addition to a premixed mixture. In this study, we have experimentally observed the characteristics of tubular flames for methane/air mixtures with hydrogen, and have investigated the effects of hydrogen addition on lean combustion in a swirling flow. We have measured the flame diameter, flame temperature and extinction limit, and tried to obtain the burning velocity. We have discussed the flame characteristics and transport process based on the flame and flow configurations. Results show that, as the concentration of added hydrogen is increased, (1) the flame diameter monotonically increases, (2) the fuel concentration at the extinction linearly decreases and effective equivalence ratio also decreases, (3) the radial temperature distribution becomes an M-shaped profile and the flame temperature increases, and (4) the burning velocity increases. As the rotational intensity is increased, these phenomena are more prominent. In a swirling flow, the pressure decreases around the rotational axis due to the centrifugal effects. The pressure gradient is formed, and there is mass transport due to pressure gradient (pressure diffusion), which changes kinetic process in flames. The reaction rate is changed through these phenomena, and the rotational effects appear. The present results provide the basic, useful information on practically important lean combustion.

Key Words: Premixed Combustion, Swirling Flow, Stability, Extinction, Mass Transfer, Lean Combustion, Hydrogen Addition, Tubular Flame

1. 緒 論

環境問題やエネルギー有効利用の観点から希薄燃焼が近年注目され、自動車のエンジンなどに応用されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、希薄燃焼は燃焼速度が小さく、火炎安定性が悪いため、不完全燃焼や火炎の吹消えが起り、また、燃焼負荷を高くすることができないなどの欠点をもつ⁽³⁾⁽⁴⁾。したがって、希薄燃焼には何らかの対策が必要となる。著者らはこれまでの研究において、非常に反応性の高い水素に着目し、水素を予混合気に添加して実験を行い、その効果について検討してきた。

第1報⁽⁵⁾では、伸長・回転流中に形成される管状火炎を対象に、火炎直径、消炎限界、温度分布を測定し、水素添加の影響を調べた。その結果、水素を添加すると、(1)燃焼速度が増加し、火炎直径は大きくなる、(2)消炎時のメタン濃度は減少する、(3)半径方向温

度分布において、高温の内部領域が広がり、温度こう配と火炎温度が増加する、ということが明らかとなった。

しかしながらこれらの実験は、単に水素添加の効果調べたものであり、伸長・回転流れ場が火炎の特性に及ぼす影響については、まだ検討していない。特に、回転流れは実用燃焼器に幅広く応用されており、水素を添加したメタン・空気混合気において、回転強さが火炎の構造と安定性にどのような影響を及ぼすのかを調べ、また、その機構を明らかにすることは実用上有用であると思われる⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。

そこで本研究では、回転強さの異なる3種類のバーナを用いて、回転強さが火炎の構造とその安定性に及ぼす影響を調べ、希薄燃焼に及ぼす水素添加の効果について検討を行った。

2. 実験装置

本研究で用いたスワール型伸長火炎バーナの概略を図1に示す。混合気を一様な速度で接線方向にスリット全体から吹出すと、バーナ内には回転してかつ軸方向に伸長する流れ場が形成される。可燃性混合気吹出

* 原稿受付 1998年4月20日。

¹ 正員、豊橋技術科学大学(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。² 豊橋技術科学大学大学院。

E-mail: yamamoto@mech.tut.ac.jp

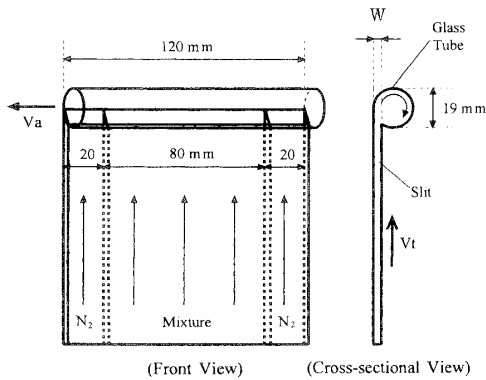


Fig. 1 Schematic of the swirl-type burner

し部のスリット長さ L は 80 mm, 窒素の吹出し部は両端各 20 mm, 石英管内径は 19 mm である. 回転強さの影響を調べるため, スリット幅 W が 4.5 mm, 3.0 mm, 1.5 mm の三つのバーナ (Weak, Moderate, Strong バーナ) を用いた⁽¹²⁾. これにより, それぞれのバーナに供給する混合気の体積流量 F を同じにすれば, 伸長に関する軸方向速度 $V_a [= F/(2\pi R^2)]$ を一定にして, 回転強さに関する接線方向速度 $V_t [= F/(W \cdot L)]$ のみを変えることができる. それぞれのバーナにおける軸方向速度 V_a と接線方向速度 V_t の関係は, 回転の弱い順に以下ようになる.

$$V_t = 1.70 V_a \text{ (Weak)}$$

$$V_t = 2.55 V_a \text{ (Moderate)}$$

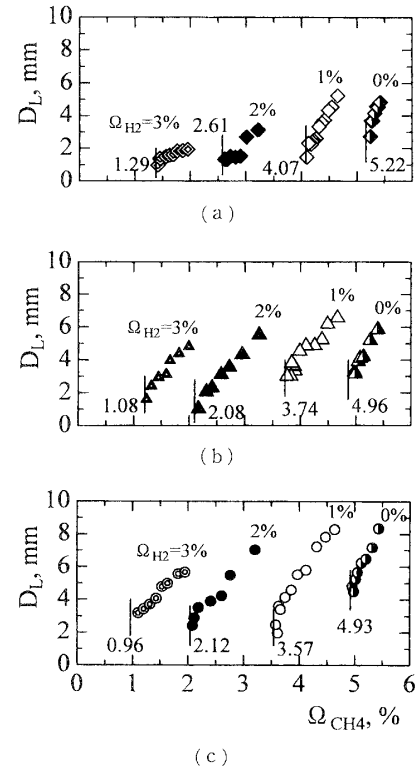
$$V_t = 5.11 V_a \text{ (Strong)}$$

なお今回用いた座標系では, 原点をバーナ長手方向中央の円形断面内の中心とし, 半径方向を r 軸, バーナの長手方向を z 軸とした.

燃料にはメタンを用い, 混合気にも水素を添加した. 火炎直径の測定には直接写真法を用い, 火炎温度の測定には, 触媒反応を防ぐため SiO_2 で被覆した Pt/Pt-13%Rh (素線径 100 μm) の熱電対を用いた. ただし, ふく射による熱損失の補正は行っていない.

3. 実験結果

3.1 火炎直径 可燃性混合気を適当な流量で吹出すと, バーナ内には円形の断面をもち, 軸方向に直径がほぼ一定の管状火炎が形成される⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. 混合気の流量を一定のまま燃料濃度を減少させると, 火炎直径は徐々に減少し, やがて消炎する. 第1報において, 軸方向速度 V_a とメタン濃度 Ω_{CH_4} (体積濃度: =メタン流量/[メタン流量+水素流量+空気流量]) を一定にして水素濃度 Ω_{H_2} (体積濃度: =水素流量/[メタン流量+水素流量+空気流量]) を増加させると, 発光帯が大きくなり火炎直径が増大することが明らかとなっ

Fig. 2 Variations of flame diameter with the methane concentration, $V_a = 1.0 \text{ m/s}$; (a) Weak, (b) Moderate, (c) Strong burners

た⁽⁵⁾.

そこで, 回転強さが火炎直径に及ぼす影響を調べるため, 軸方向速度 V_a を 1.0 m/s と一定にし, 添加する水素濃度を 0, 1, 2, 3% としたときのメタン濃度による火炎直径の変化を調べた. 火炎直径 D_L は, 火炎の直接撮影により得られた発光帯の中心間距離で定義した. この結果を図2に示す.

これによると火炎直径は, いずれのバーナにおいてもメタン濃度の減少とともに単調に減少すること, また, 同じメタン濃度における火炎直径を見積もると, 水素を添加することにより火炎直径が増大することがわかった. 次に, これら三つのバーナで得られた結果を比較すると, メタン濃度が同じであれば, 回転が強いものほど火炎直径は大きくなることがわかった. なお, 図2中の数字は消炎時のメタン濃度を示すが, 回転が強いものほど消炎したときのメタン濃度が小さくなることがわかった. また, 消炎時の火炎直径は, メタン濃度が小さいにもかかわらず, 回転が強いものほど大きくなる傾向にあることがわかった.

3.2 消炎限界 次に, 火炎の安定性を調べる目的で, 消炎時のメタン濃度 (消炎限界) を測定した.

まず, 添加する水素濃度 Ω_{H_2} を 1% と一定にして軸

方向速度を変化させ、消炎時のメタン濃度 Ω_{CH_4} を測定した。それぞれのバーナで得られた結果をまとめて図3に示す。これによると今回の測定範囲内では、いずれのバーナにおいても、軸方向速度を減少させると消炎時の燃料濃度はわずかに変化するもののほぼ一定であり、その値は Weak, Moderate, Strong バーナと回転強さが大きくなるにつれて約 3.9, 3.6, 3.5% と小さくなることがわかった。このことは、回転が強くなるほど可燃範囲が広がることを意味し、メタン・空気の希薄混合気において得られた結果⁽¹²⁾ と定性的に一致した。ただし、これまでに行われた燃料がメタンのみの実験⁽¹²⁾ では、消炎時のメタン濃度がそれぞれ約 4.1, 3.8, 3.7% であることが明らかとなっており、したがって、水素を添加することにより消炎時のメタン濃度がいずれのバーナでも小さくなることがわかった。

そこで、軸方向速度 V_a を 1.0 m/s と一定にし、添加する水素濃度 Ω_{H_2} を変化させて消炎限界を測定した。この結果を図4に示す。ただし今回の実験では、

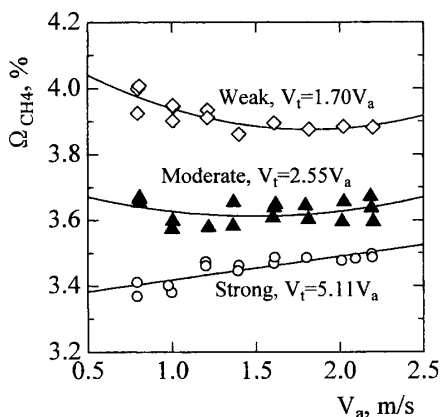


Fig. 3 Extinction limits of a methane/air mixture obtained by the three burners as functions of the axial velocities, $\Omega_{H_2}=1.0\%$

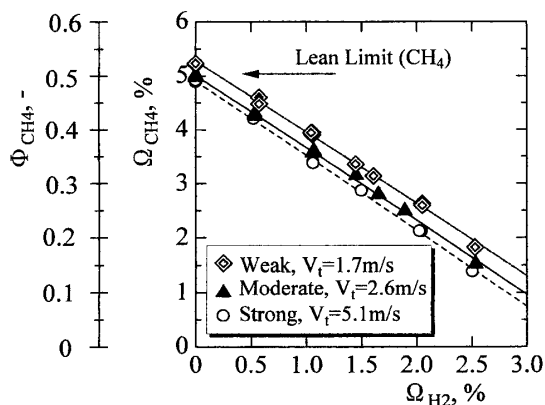


Fig. 4 Extinction limits and effective fuel/air ratio ($V_a=1.0$ m/s)

燃料としてメタンと水素の2種類を用いている。そこで第1報と同様、Yuらによって定義されたメタンの有効当量比 Φ_{CH_4} ⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾ も同時に求め図示した。その結果、いずれのバーナにおいても、水素濃度を増加させると消炎時のメタン濃度と有効当量比がほぼ直線的に減少することがわかった。

ここで、回転強さの影響を定量的に比較するため、水素濃度に対する消炎時のメタン濃度を最小二乗法により求めた。その結果、以下のような関係式が得られた。

Weak burner :

$$\Omega_{CH_4}=5.23-1.27\cdot\Omega_{H_2},$$

$$\Phi_{CH_4}=0.534-0.128\cdot\Omega_{H_2},$$

Moderate burner :

$$\Omega_{CH_4}=4.98-1.30\cdot\Omega_{H_2},$$

$$\Phi_{CH_4}=0.504-0.131\cdot\Omega_{H_2},$$

Strong burner :

$$\Omega_{CH_4}=4.87-1.32\cdot\Omega_{H_2},$$

$$\Phi_{CH_4}=0.493-0.135\cdot\Omega_{H_2}.$$

これによると、水素を加えることにより、いずれのバーナにおいても消炎時のメタン濃度が小さくなることがわかる。ただし、回転が強くなるほど消炎時のメタン濃度と有効当量比が下がっており、水素添加の効果が、回転により促進されていることが明らかとなった。そこで、この水素添加の効果が回転により増加する機構を調べるため、次に温度場の測定を行った。

3.3 半径方向温度分布 火炎まわりの温度場を調べるため、まず半径方向温度分布を求めた。第1報⁽⁵⁾の結果から、(1)温度場は単一の燃料と同じく、高温の内部領域と低温の外部領域に分かれている、(2)水素を添加することにより高温の内部領域が広がる、(3)発光帯付近の極大値 T_f と中心付近の極小値

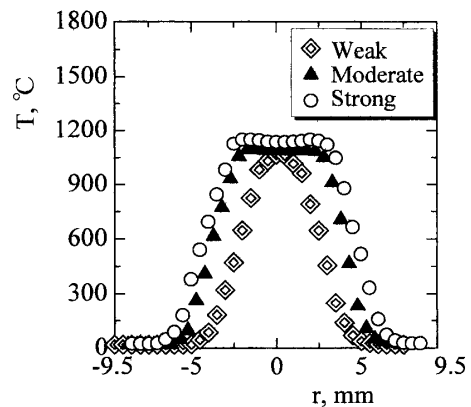


Fig. 5 Radial temperature distribution, $\Omega_{CH_4}=4.0\%$, $\Omega_{H_2}=1.0\%$, $V_a=1.0$ m/s, $z=30$ mm

T_c が現れ M 形の温度分布となる, (4) 水素を添加することにより温度こう配が大きくなり, 最高温度が高くなる, などが明らかとなっている。

そこで, 回転強さが異なる場合の違いを調べるため, それぞれのバーナについて同様の測定を行った。メタン濃度 $\Omega_{CH_4}=4.0\%$, 水素濃度 $\Omega_{H_2}=1.0\%$, 軸方向速度 $V_a=1.0\text{ m/s}$, バーナ中心から軸方向距離 $z=30\text{ mm}$ において得られた半径方向温度分布の結果を図5に示す。ここで r は中心軸からの半径方向距離で, $r=-9.5\text{ mm}$ と 9.5 mm がバーナ壁にあたり, 可燃性ガス吹出しのスリットは $r=-9.5\sim-5.0\text{ mm}$ の位置に存在する。

これによると温度場は対称であり, 分布の中心は約 0 mm の位置, すなわちバーナ中心にある。回転強さの異なるそれぞれのバーナで得られた分布を比較すると, Weak バーナでは火炎直径が小さいために, T_f と T_c が一致する Δ 形の分布となったが, Moderate バーナと Strong バーナでは M 形の温度分布となった。また, 回転が強いものほど, 火炎直径が大きくなることに対応して, 温度の高い内部領域が広がった。火炎温度は, 回転の強いものほど高い値となることがわかった。ただし, 高温の内部領域と低温の外部領域の間の温度こう配は, 回転強さによらずほぼ同じであった。

3.4 火炎温度 半径方向温度分布の測定により, 温度の高い内部領域には, 発光帯付近の極大値(火炎温度: T_f)と中心付近での極小値(中心ガス温度: T_c)があることがわかった。しかしながら, 軸方向の温度変化を調べた結果, これまでに得られた結果⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾と同様, 可燃性混合気の吹出し部に対応する $z=0\sim 40\text{ mm}$ の範囲では, これらの温度が軸方向にほぼ一定で

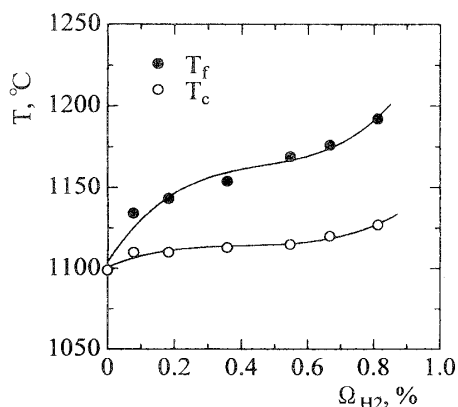


Fig. 6 Variations of flame temperature with the hydrogen concentration obtained by the Strong burner, $V_a=1.0\text{ m/s}$, $\Omega_{CH_4}=4.9\%$

あることがわかった。

そこでまず, 温度場に及ぼす水素添加の影響を調べるため, 軸方向速度を 1.0 m/s , メタン濃度を 4.9% と一定にし, 水素濃度を変化させて, 火炎温度と中心ガス温度を測定した。軸方向距離 $z=30\text{ mm}$ において, Strong バーナで得られた結果を図6に示す。これによると, 中心ガス温度 T_c はそれほど変化しないものの, 火炎温度 T_f は水素濃度が増加するのに伴い徐々に増加し, 分布が顕著な M 形の温度分布となることがわかった。

次に, 回転強さが火炎温度に及ぼす影響を調べるため, 軸方向距離 $z=30\text{ mm}$ において, それぞれのバーナで火炎温度 T_f を測定した。軸方向速度を 1.0 m/s , 水素濃度 $\Omega_{H_2}=0, 1, 2, 3\%$ と一定にし, メタン濃度を変化させて得られた火炎温度 T_f の結果を図7に示す。

これによるといずれのバーナにおいても, Ω_{CH_4} を減少させると単調に火炎温度が減少した。それぞれのバーナで得られた結果を比較すると, 回転による温度変化は比較的小さいものの, 消炎時の火炎温度は, 回転が強いものほど小さくなることがわかった。

3.5 燃焼速度 最後に, 半径方向速度 V_r を半径方向距離 r に比例すると仮定し, 半径方向温度分布

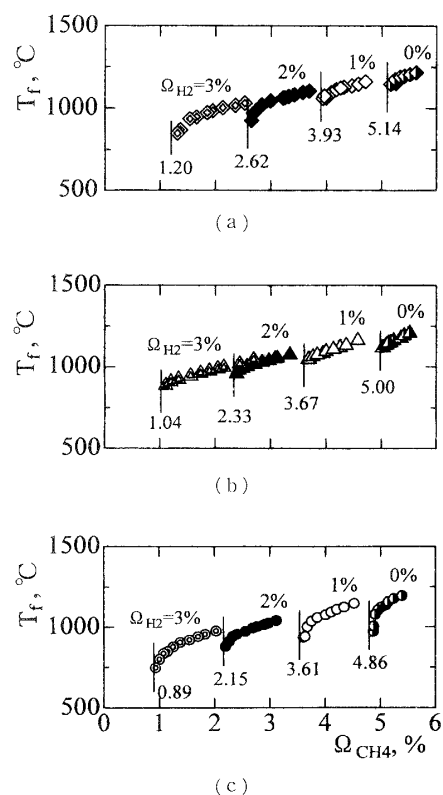


Fig. 7 Variations of the flame temperature T_f with the methane concentration, $V_a=1.0\text{ m/s}$; (a) Weak, (b) Moderate, (c) Strong burners

における温度の立上りの位置で燃焼速度と半径方向速度が釣り合うとして、管状火炎の燃焼速度を求めた⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。ただし管状火炎は、伸長・回転流中で形成されるので、今回求めた値は、通常の非伸長一次元火炎の層流燃焼速度とは異なる。軸方向速度を1.0 m/sと一定にし、メタン濃度 Ω_{CH_4} を変化させて、燃焼速度 S_L を求めた結果を図8に示す。

まず、三角の点で示した Moderate パーナにおいて、水素濃度を0, 1, 2, 3%と変化させたときの結果を比較する。メタン濃度を減少させると、燃焼速度は単調に減少することがわかる。また、水素を添加することにより、燃焼速度が大きくなることがわかった。なお、図8中の数字は消炎したときのメタン濃度を示すが、消炎時の燃焼速度を比較すると、添加する水素が多くなるほど燃焼速度が小さな値でも燃焼が可能であることがわかった。

次に、水素濃度が1%の場合に Weak と Strong パーナで得られた結果をそれぞれ丸とひし形の点で示す。それぞれのパーナで得られたこれらの結果を比較すると、回転強さによらず、メタン濃度の減少とともに燃焼速度は単調に減少した。また、回転が強いものほど燃焼速度が大きくなるという興味深い結果が得られた。ただし、消炎時の燃焼速度を比較すると、回転が強いものほど燃焼速度が高い値で消炎することがわかった。

以上の結果から、メタン濃度が同じであっても、水素を添加するか回転の強さを増加させると、燃焼速度が増加することが明らかとなった。

4. 考 察

希薄燃焼に及ぼす水素添加の効果を調べるため、伸

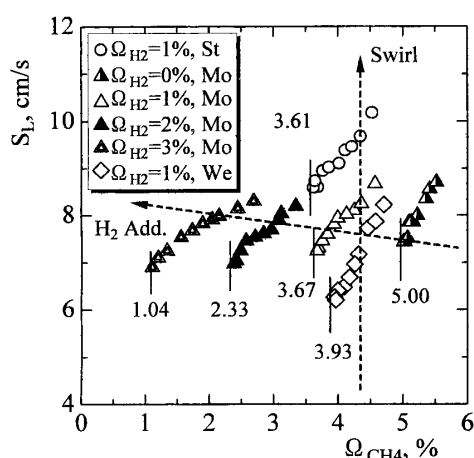
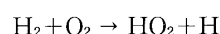


Fig. 8 Variations of burning velocity with the methane concentration, $V_a=1.0$ m/s

長・回転流中に形成される管状火炎を対象に、回転強さの異なる3種類のパーナを用いて、水素をメタン・空気混合気添加到して実験を行った。その結果、水素を添加することにより、(1)火炎直径は大きくなる、(2)消炎時のメタン濃度が減少する、(3)顕著なM形の温度分布となり、火炎温度が上昇する、(4)燃焼速度が増加する、という結果が得られた。また、回転によりこれら水素添加の効果がより顕著となることがわかった。

ただし、今回求めた燃焼速度については、実験において詳細な速度分布を測定しておらず、したがって、実際の値と異なることが考えられるが、メタン・空気の予混合気中に形成される対向流火炎を用いて得られた燃焼速度は、メタン濃度が約5.5%で7~9 cm/s程度であり⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、図8における Moderate パーナで得られた結果に近い値となった。したがって、今回求めた管状火炎の燃焼速度は妥当な値であり、少なくとも、水素添加や回転強さによる燃焼速度変化の定性的な議論はできるものと思われる。

水素添加の効果については、第1報⁽⁵⁾でも検討している。おそらく水素の高い反応性にあり、水素を添加した場合は、反応の早い段階で



などの素反応によりHラジカルが作り出され、このラジカルにより反応機構が変化したものと思われる。このため、水素を添加すると燃焼速度が増加して火炎直径が増加し、また、火炎温度が上昇して火炎安定性が増したものと思われる。ただし回転により、水素添加の効果がより顕著となった。

回転強さが火炎の構造と安定性に及ぼす影響については、これまでの研究において調べられている⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。この中で、メタン・空気もしくは水素・空気の希薄混合気においては、回転により、(1)火炎の構造(温度分布と濃度分布)が変化する、(2)火炎温度が上昇する、(3)消炎限界での燃料濃度が減少し、可燃範囲が広がる、ということがわかっており、回転強さが火炎の特性に影響を及ぼすことが明らかとなった⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾。このメカニズムについてもすでに検討を行っており、回転遠心効果による圧力拡散がこれら回転の影響を説明する有力な候補となっている⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾。そのメカニズムを説明すると、回転により中心の圧力が低下し圧力こう配が生じる。これにより圧力拡散が生じ、分子量の小さな水素やメタンは、圧力の低い側である中心に向かって輸送される。希薄混合気では、不足成分が燃料であることから、反応帯に燃料が輸送されれば、燃焼が強められることになる。この結果、水

素やメタンの希薄混合気では、圧力拡散により燃料濃度が増加して、火炎温度が上昇する。また、反応帯におけるラジカル分布が回転により変化すること、特にHラジカルが増加することが、素反応を考慮して行った数値計算⁽²²⁾により明らかとなっている。

したがって、本研究により明らかとなった回転による水素添加の効果の促進は、回転遠心効果により生じた圧力拡散により説明されるものと思われる。すなわち、この圧力拡散により、添加した水素や反応によって生成されたHラジカルが反応帯に輸送されて、反応機構が変化する。この結果、回転により反応が促進され、燃焼速度が増加したものと思われる。またこのラジカルの輸送により、回転が強いものほど火炎温度が小さな値でも反応が維持され、より低い燃料濃度でも燃焼が可能となったものと思われる。

ただし、温度分布がM形となることについては、回転流中におけるRanque効果^{(25)~(27)}、圧力拡散、浮力、ふく射などの影響が考えられるが、まだ詳細は明らかとなっていない⁽¹⁶⁾。今後、さらなる研究が必要と思われるが、今回得られた回転による水素添加の効果の促進は、実用上重要な希薄燃焼に対して有用な知見となるものと思われる。

5. 結 論

伸長・回転流中に形成される管状火炎を対象に、回転強さの異なる3種類のバーナを用いて、水素をメタン・空気混合気に添加して実験を行った。その結果、以下のような結論を得た。

(1) いずれのバーナにおいても水素を添加することにより、燃焼速度が増加して、火炎直径は増加する。また、火炎温度は上昇して、消炎時のメタン濃度は減少する。これは水素の高い反応性のためであり、水素の添加はメタンの燃焼を促進させる。

(2) 回転が強くなると、水素添加の効果がより顕著となる。また、火炎温度が低下しても反応が維持され、より低い燃料濃度でも燃焼が可能となる。これは、回転遠心効果により生じる圧力拡散により水素やHラジカルが反応帯に輸送され、反応機構が変化したことにより説明される。

本研究の一部は住友財団の基礎科学研究助成により行われた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Chomiak, J., *Combustion*, (1990), 304-318, Gordon & Breach Science Publishers.
- (2) 水谷幸夫, 燃焼工学, (1997), 209-222, 森北出版.
- (3) Balles, E. N., Ekchian, J. A. and Heywood, J. B., *SAE Paper*, No. 841379(1984).
- (4) Lewis, J. M., *SAE Paper*, No. 860067(1986).
- (5) 山本和弘・丸山昌幸・小沼義昭, 機論, **64**-622, B(1998), 1919-1924.
- (6) Lewis, G. D., *Proc. 13rd Symp. (Int.) Combust.*, (1971), 625-629.
- (7) Svred, N., Chigier, N. A. and Beer, J. M., *Proc. 13rd Symp. (Int.) Combust.*, (1971), 617-624.
- (8) Lewis, G. D., *Proc. 14th Symp. (Int.) Combust.*, (1973), 413-419.
- (9) Matsushita, S., Inoue, T., Nakanishi, K., Okumura, T. and Isogai, K., *SAE Paper*, No. 850046(1985).
- (10) Weinberg, F. J., *Combust. Flame*, **78**(1989), 121-127.
- (11) Zhang, D. and Hill, P. G., *Combust. Flame*, **106**(1996), 318-332.
- (12) Yamamoto, K., Ishizuka, S. and Hirano, T., *Proc. 25th Symp. (Int.) Combust.*, (1994), 1399-1406.
- (13) Ishizuka, S., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 287-294.
- (14) Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **75**(1989), 367-379.
- (15) Yu, G., Law, C. K. and Wu, C. K., *Combust. Flame*, **63**(1986), 339-347.
- (16) 山本和弘・石塚悟・平野敏右, 機論, **62**-600, B(1996), 3185-3190.
- (17) 山本和弘・浅井寛志・小沼義昭, 機論, **64**-624, B(1998), 2677-2682.
- (18) Takeno, T. and Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **64**(1986), 83-98.
- (19) Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **19**(1993), 187-226.
- (20) Wu, C. K. and Law, C. K., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1231-1250.
- (21) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1883-1892.
- (22) Yamamoto, K., Ishizuka, S. and Hirano, T., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, (1996), 1129-1135.
- (23) 山本和弘・石塚悟・平野敏右, 燃焼の科学と技術, **3**(1996), 199-211.
- (24) Yamamoto, K. and Ishizuka, S., *Proc. 10th Int. Symp. Transport Phenomena (ISTP-10)*, (1997), 577-582.
- (25) Hartnett, J. P. and Eckert, E. R. G., *Trans. ASME*, **79**-4(1957), 751-758.
- (26) 高浜平七郎, 機誌, **68**-560(1965), 1255-1263.
- (27) Syred, N., Chigier, N. A. and Beer, J. M., *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, (1971), 671-624.