

管状火炎の構造*

(第1報, 回転伸長流中に形成される
希薄メタン-空気混合気火炎の構造)酒井 幸夫*¹, 石塚 悟*¹Structures of Tubular Flames
(1st Report, Structures of the Tubular Flames of Lean
Methane/Air Mixtures in a Rotating Stretched-Flow Field)

Yukio SAKAI and Satoru ISHIZUKA

The tubular flames of lean methane/air mixtures in a rotating-flow field have been analyzed for their concentrations of stable species and temperature distributions, and their structures have been investigated. The results show that the tubular flame consists of an inner hot gas core of burned gas and an outer region of the unburned mixture, and that the flame structure is essentially the same as that of the one-dimensional, flat, premixed flame. As the extinction limit is approached, the flame diameter decreases and the concentrations of carbon monoxide and hydrogen behind the flame zone increase. Hence, the extinction of the tubular flame of lean methane/air mixtures is caused by incomplete combustion with stretch as it is with other stretched flames. As the density inside the flame is lower than that outside, the flame front is rendered smooth and cylindrical by the rotational motion of the flow.

Key Words: Combustion, Premixed Combustion, Tubular Flame, Flame Structure, Lean Mixture, Stretch, Rotating Flow Field

1. ま え が き

最近, 簡単な2種類のバーナを用いて軸対称の流れ場における火炎の挙動が調べられ, 回転および非回転軸対称伸長流場では, 対称軸長手方向に一定の円形断面をもつ管状火炎(Tubular flame)が形成されることが見いだされた⁽¹⁾. この火炎は, 曲率をもつという点で, 他のバーナで得られる平面状の伸長火炎⁽²⁾⁻⁽⁵⁾とは本質的に異なっており, 燃焼学的に非常に興味深い. さらにまた, 乱流燃焼のモデリングに関連して, その基本要素としてコルモゴロフスケールの渦管がテイラーのマイクロスケールの間隔でランダムに伸長される流れ場⁽⁶⁾が取り上げられ, この伸長された渦管で複雑に構成される乱流中での燃焼が重要視されているが⁽⁷⁾, 管状火炎が形成される流れ場は, ちょうどこの流れ場に相当しており, 管状火炎の特性を調べることは, 乱流燃焼を理解する上からも興味深いものとなっている. それゆえ, 近年, この管状火炎について多くの実験的・理論的研究が行われ, 消炎限界や火炎直径に及ぼす流れの伸長率や混合気の燃料濃度, ルイス数の

影響などが調べられている⁽⁸⁾⁻⁽¹⁷⁾. しかしながら, この火炎は発見されて日も浅いため, その構造, 特に濃度場の様子が調べられていない.

そこで著者らは, 管状火炎の構造を詳しく調べる第1段階として, 回転した軸対称伸長流場に形成される希薄メタン-空気混合気の管状火炎を対象に, 従来, 火炎構造を調べる方法として用いられているマイクロプローブによるサンプリングとガスクロマトグラフによる分析法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を用いて安定化学種の濃度分布を測定したので, ここに報告する.

2. 実験装置および実験方法

図1に, 本実験に用いた装置の概略を示す. バーナとしては, 前回⁽¹⁾と同様, いわゆるスワール形伸長火炎バーナ⁽²⁰⁾を用いたが, サンプリングプローブを挿入する関係でガラス管の内径は19 mmと前回(13.4 mm)⁽¹⁾より大きくなっている. ただし, スリット幅(3 mm), バーナ長(120 mm)は前回⁽¹⁾と同じである. ちなみに, バーナ形状から概算で得られるスワール数⁽¹⁾は約1.3で, 前回のバーナのスワール数(0.6)より大きく, いわゆるスワール効果による再循環流の発生が懸念されるが⁽²¹⁾, 目視による観察によれば再循環流はバーナ両端部に限られており, 一応, バーナ内には理論

* 平成元年11月17日, 熱工学講演会において講演, 原稿受付昭和63年12月5日.

*¹ 正員, 埼玉工業大学工学部 (〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690).

解析⁽⁸⁾で示されたような単純な回転伸長流場が形成されているものと考えられる。

さて、燃料であるメタン(純度:99.8%以上)および空気は、それぞれ高圧ポンプ・小形圧縮機により供給され、流量測定用オリフィス、流量制御弁を経た後に一様に混合され、バーナ内に導かれる。オリフィスの検定には湿式ガスメータ(測定範囲:0.83~50 L/min)および石けん膜流量計(測定値:0.2~1.0 L/min)を用いた。

バーナ内に形成される火炎の形状は直接写真撮影法で、また温度分布の測定には二酸化けい素で被覆した熱電対(Pt/Pt-13% Rh, 素線径:0.1 mm)を外径1.6 mmの二つ穴がい子より片持ばり式に25 mmつきだして保持し使用したが、伝導およびふく射による熱損失の補正は行っていない。

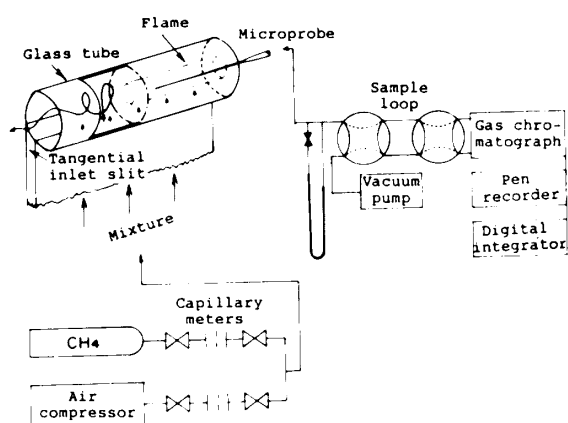


図1 実験装置系統図

一方、安定化学種の濃度は、先端部外径約0.3 mmの石英製マイクロプローブにより試料ガスを採取し、オリフィス部(オリフィス径:20~30 μm)で反応を凍結させてサンプリンググループ内に収集し、ガスクロマトグラフ(日立163形および島津3BT)により分析し求めた。

分析用カラムとしてはモレキュラシーブ(Type 13 X & 5 A)、活性炭、ポラパック(Type S & N)を使用し、またキャリアガスとしては、ヘリウムおよびアルゴンを使用して、水素、酸素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素、水、および炭化水素の測定を行った。水の凝縮を防ぐため、プローブから分析計に至る管路はリボンヒータで十分保温した。なお、キャリアガスにヘリウムを用い、またカラムでの分離が悪いため、測定された酸素の値には空気中のアルゴンも含まれている。

なお、プローブは火炎帯に垂直に挿入すると吸引速度とのかね合いでプローブ先端位置と採集ガス位置とが異なる恐れがあるため⁽¹⁸⁾、図1に模式的に示すようにプローブ先端を火炎中央部付近において微動装置で半径方向にわずかずつ移動させて半径方向の濃度分布を測定した。このとき、プローブ挿入による火炎のじょう乱はほとんど認められず、また、対象とした火炎の温度が低いと加熱によるプローブ内での再反応もほとんどないと思われる。

3. 実験結果および考察

3.1 火炎安定範囲 希薄メタン-空気混合気を、適当な燃料濃度 Ω [%体積], 流速 V_f [混合気体積流

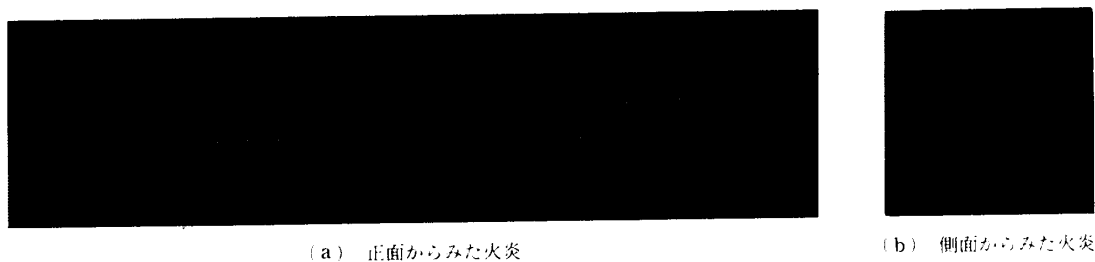


図2 管状火炎の直接写真($V_f=3.3 \text{ m/s}$, $\Omega=5.59\%$)

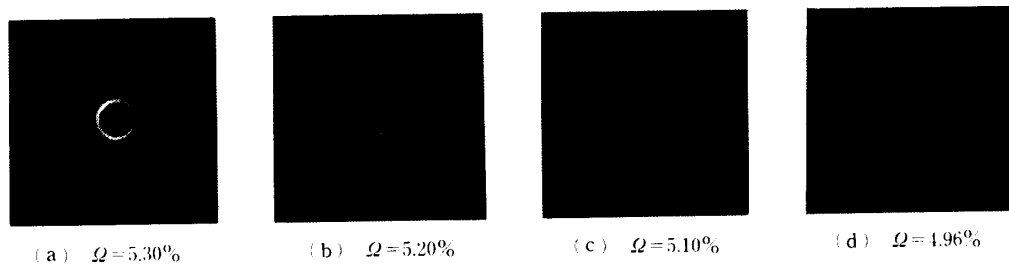


図3 火炎形状の変化($V_f=3.3 \text{ m/s}$)

量/スリット出口面積, m/s) でガラス管接線方向よりバーナ内に吹き出すと, 図2に示すように回転軸方向にほぼ均一な円形断面をもつ管状火炎が形成される。ただし, バーナ両端付近においては, いわゆるスワール効果のため火炎はチューリップ状に膨らんでいる。この火炎は, 流速を一定に保ちつつ燃料濃度を増加させると直径が増大し, あるところで火炎面が乱れて凹凸状となる。一方, 逆に燃料濃度を減少させると火炎直径は図3(a)~(d)に示すように徐々に減少し, 火炎の発光も弱まり, ついには消滅してしまう⁽¹⁾。

これら火炎面が不均一となる限界および消滅する限界における燃料濃度 Ω と吹出し速度 V_t の関係を求めると図4のようになる。火炎面が不均一となる限界の燃料濃度は, V_t の増加につれてほぼ直線的に増加し, 一方, 消滅限界における燃料濃度は V_t の増加に対しわずかに増大するものの, ほぼ一定値(4.8~5.0%)をとる。この値は, 前回, 内径 13.4 mm のバーナで得られた値(約 5.3%)⁽¹⁾ や希薄可燃限界の値(5.0%)⁽²²⁾ より小さく, 対向流二重火炎で得られた燃料濃度の最小値(約 4.8%)⁽⁴⁾ に近い。これは, もともと管状火炎はその温度の対称性により火炎背後の熱損失が極めて少ないこと⁽¹⁾ に加え, 今回用いたバーナの直径は前回のものに比べて大きく, バーナ壁への熱損失が極めて少なくなったためと考えられる。したがって, 今回用いたバーナは, スワール数の大きいことによる再循環流の発生の恐れはあるものの, 熱的には極めて熱損失の少ない理想的な場を与えているものと思われる。

る。

以上の結果より, 代表的な火炎として, まず, $V_t \approx 3.3$ m/s 一定の条件下で, 直径の大きな $\Omega \approx 5.59\%$ の火炎(図2)と直径の比較的小きな $\Omega \approx 5.10\%$ の火炎(図3(c))を選びその構造を調べるとともに, 伸長率の増加による消滅機構を考察するため, 燃料濃度 $\Omega \approx 5.0\%$ の火炎に対し, 伸長の弱い場合($V_t = 2$ m/s)と強い場合($V_t = 6$ m/s)について火炎帯近傍における中間生成物(水素および一酸化炭素)の濃度を調べることにした。

3・2 各種成分濃度および温度の分布 図5および図6に $V_t = 3.3$ m/s における $\Omega = 5.59\%$ と $\Omega = 5.10\%$ の火炎の半径方向の測定結果をそれぞれ示す。ここで, $r = 0$ mm は回転中心軸(この場合, バーナ管中心軸と

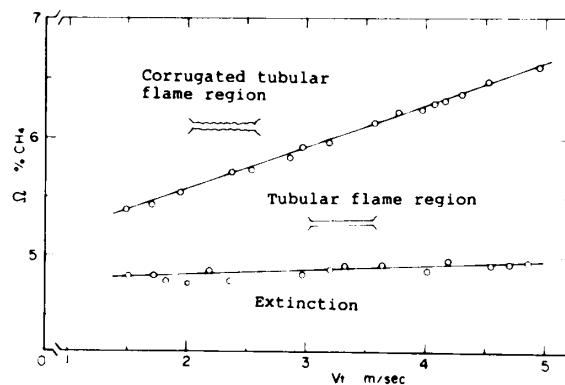


図4 火炎安定曲線図

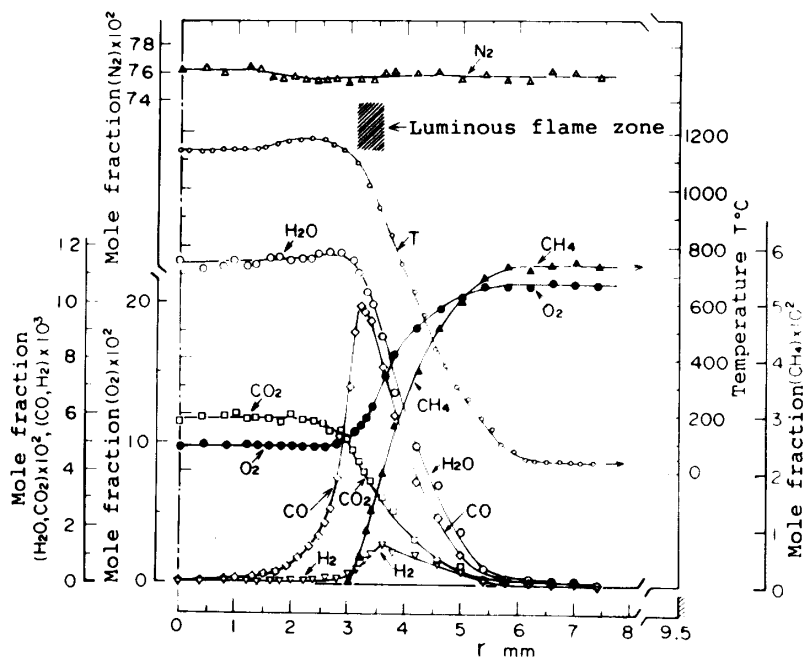


図5 濃度および温度の分布($V_t = 3.3$ m/s, $\Omega = 5.59\%$)

ほぼ一致)に対応し、 $r=9.5\text{ mm}$ は管壁の位置に対応する。

$\Omega=5.59\%$ (図5)の場合、火炎発光帯は $r=3.15\sim 3.60\text{ mm}$ の位置に存在する。ただし、この発光帯位置は写真撮影の結果より求めており、使用するフィルムや露光条件で特にその幅は変わってくるので、だいたいの目安にすぎない。この発光帯を境に、濃度場は大きく外側の未燃混合気(常温のメタン-空気混合気)の領域と内側の既燃焼ガス(高温の二酸化炭素、水、余剰酸素および窒素からなる混合気)の領域に分けられていることがわかる。燃料であるメタンの濃度は、外側から発光帯に向かって減少し、発光帯内側ではほぼ零となってメタンは消滅し、酸化剤である酸素の濃度も外側から発光帯に向かって減少し、発光帯内側あたりから中心部で一定値 9.5% (ただし、空気中のアルゴンを含む)となる。中間生成物である水素と一酸化炭素は、外側から発光帯に近づくにつれ増加し、水素は発光帯外側で最大値約 0.14% 、一酸化炭素は発光帯内側で最大値約 0.98% をとった後、内側に向けて減少し、中心軸($r=0\text{ mm}$)では、両者の濃度はごく微量(水素： 0.005% 、一酸化炭素： 0.006%)であった。最終生成物である水と二酸化炭素の濃度は、外側から発光帯に近づくにつれ増加し、水は発光帯内側付近で最大値に達した後火炎内部ではほぼ一定値(約 11.4%)を、二酸化炭素は発光帯のかなり内側に入ったところでようやく最大に達し火炎内部で一定値(約 5.7%)をとる。これに対応して温度は、外側から発光帯に向けて

上昇し、発光帯のかなり内側に入ったところで最高値 1180°C に達し、その後、わずかに減少して一定値 1140°C をとる。このような火炎内部での温度の低下は前回⁽¹⁾の測定ではみられず、また、次に述べる火炎(図6)でもみられなかったが、この火炎の直径が大きいことから、回転遠心効果により高温の、したがって、密度の小さな燃焼ガスが内部に引き込まれやすくなり、挿入した熱電対が管子周囲に常温の空気が引込まれて、伝導による熱損失が増加するためと考えられる。なお、この火炎の場合、拡散火炎中でよく検出される C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 といった成分はカラムの種類(活性炭とポラパック type-N)を変えても全く検出できなかった。また、不活性ガスである窒素は、全体にわたり、ほぼ一定値をとるが、メタンの総括反応ではモル数が変わらないためと思われる。

以上の結果より、この管状火炎は回転伸長場に形成されているという特徴はあるものの、メタンが一度水と一酸化炭素に酸化された後、一酸化炭素がゆっくり二酸化炭素に酸化されるという二段燃焼の構造になっており、その火炎構造は他の一次元ないし準一次元(平面状)予混合火炎の構造⁽¹⁸⁾⁽²³⁾に極めて類似していることが明らかとなった。火炎背後の $r=0\text{ mm}$ における燃焼ガスの組成および温度(H_2O : 11.4% 、 CO_2 : 5.7% 、 O_2 : 9.5% (Ar含む)、 T : 1140°C [文献(24)にあるふく射補正式を用いると補正値は約 70°C となる])は、平衡計算から求めた値(H_2O : 11.2% 、 CO_2 : 5.53% 、 O_2 : 8.5% 、 T : 1317°C)⁽²⁵⁾に比べ温

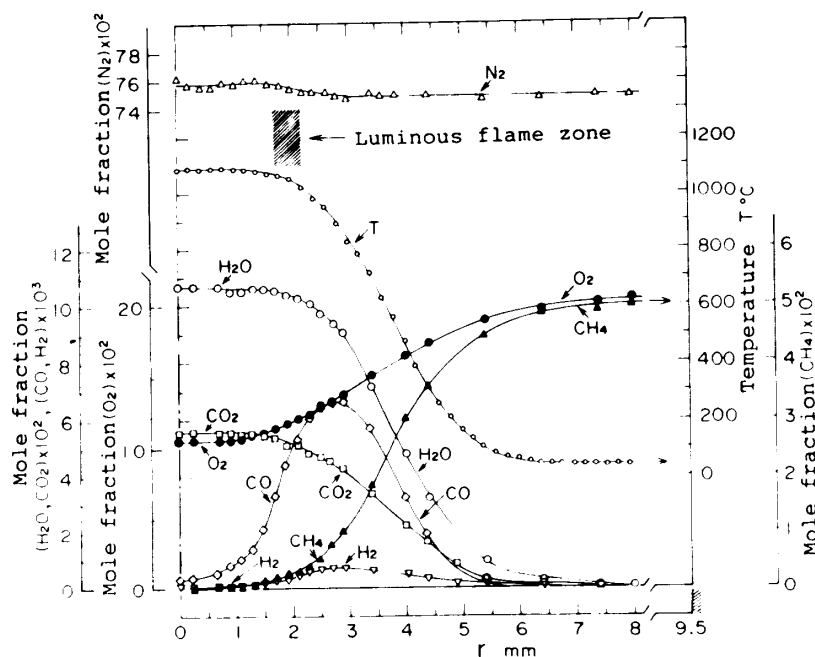


図6 濃度および温度の分布($V_f=3.3\text{ m/s}$, $\Omega=5.10\%$)

度が100°Cぐらい低いもののほとんど一致し、中心部における水素と一酸化炭素の濃度が非常に低いことを考え合せて、この火炎では一次元火炎と同様にほとんど完全燃焼が行われていると考えることができると思われる。

一方、 $\Omega=5.10\%$ (図6)の場合、火炎発光帯は $r=1.7\sim 2.2$ mm付近に存在し、前の場合(図5)に比べ火炎は細くなっている。しかし、火炎構造そのものは $\Omega=5.59\%$ の場合と類似しており、メタンが分解されて水素と一酸化炭素が生成され、火炎帯内側で一酸化炭素がゆっくり二酸化炭素に酸化される構造をもっていた。しかし、水素や一酸化炭素の濃度が最大となる位置は発光帯のやや外側に位置しており、それらの最大値($H_2:0.08\%$, $CO:0.68\%$)は $\Omega=5.59\%$ の火炎に比べ小さいものの、中心軸($r=0$ mm)上での値は水素:0.006%, 一酸化炭素:0.048%で、特に一酸化炭素の濃度が高く、十分に酸化されていないことがわかる。ちなみに、中心軸上における燃焼ガスの状態は、 $H_2O:10.6\%$, $CO_2:5.55\%$, $O_2:10.2\%$ (Ar含む), $CO:0.048\%$, $H_2:0.006\%$, $T:1090^\circ C$ (ふく射補正值:60°C⁽²⁴⁾)で、平衡計算から求めた値($H_2O:10.1\%$, $CO_2:5.1\%$, $O_2:9.7\%$, $CO:0.80$ ppm, $H_2:0.63$ ppm, $T:1232^\circ C$)⁽²⁵⁾に比べやはり温度が80°Cぐらい低いものの最終ガスの成分(水と二酸化炭素)はほぼ一致した。したがって、一酸化炭素の値が高く十分に完全燃焼しているとはいえないが、火炎直径が小さい(約4 mm) $\Omega=5.10\%$ の火炎もその燃焼ガスの組成は一次元火炎⁽¹⁸⁾のそれとほぼ同様であることが明らかとなった。

引き続き、火炎直径のさらに小さな火炎に対して濃度場の測定を試みたが、マイクロプローブを挿入すると部分的ないし全体的な消炎が生じてしまい、測定が

できなかった。考えるに、火炎曲率の影響が現れるのは、火炎直径が火炎帯厚み程度になるころと思われるが、管状火炎の場合、その幾何学的形状のため平面状二重火炎に比べ著しく小さくなり、マイクロプローブによる熱損失や流れ場に対するじょう乱が無視できなくなった。したがって、火炎直径の小さな管状火炎の構造を調べるには分光などの非接触法が必要であると思われる。

3.3 火炎構造に及ぼす流れの伸長の影響 管状火炎は、完全な軸対称の場合、火炎長手方向に伸長される⁽¹⁾⁽⁸⁾。この伸長の影響を調べるため、 $\Omega=4.99\%$ の火炎に対し、伸長の弱いと思われる $V_i=2$ m/sの場合と伸長の強いと思われる $V_i=6$ m/sの場合とについて、特に火炎帯近傍における水素と一酸化炭素の濃度を調べ、燃焼の完全度を調べた。その結果を図7に示す(ここで r' は一方の壁からの距離で、 $r'=9.5$ mmは回転中心に相当する)。ちなみに、近似的に、ガラス管接線方向の吹出し速度 V_i と半径方向の吹出し速度 V_n との間に $V_n \cdot (\pi \cdot D_{id} \cdot l) \approx V_i \cdot A_i$, D_{id} : ガラス管内径(19 mm), l : パーナ長さ(120 mm), A_i : スリット出口面積(3×120 mm²)の関係が成り立つと仮定すると⁽¹⁵⁾, 伸長率の目安である V_n/D_{id} の値は $V_i=2$ m/sでは 5.3 s⁻¹, $V_i=6$ m/sでは 15.9 s⁻¹となっている。

図7(a)から、速度こう配が小さい場合には、発光火炎帯近傍でCO, H₂濃度は高いが回転中心付近ではこれらの濃度は低く、不完全燃焼の程度は低い。これに対して図7(b)によれば、速度こう配が大きい場合には回転中心でもこれらの濃度は高く、不完全燃焼がいちだんと強まっていることがわかる。ただし、火炎直径については、速度こう配の大きい場合のほうがごくわずかに燃料濃度が高いことも影響して、若干火炎

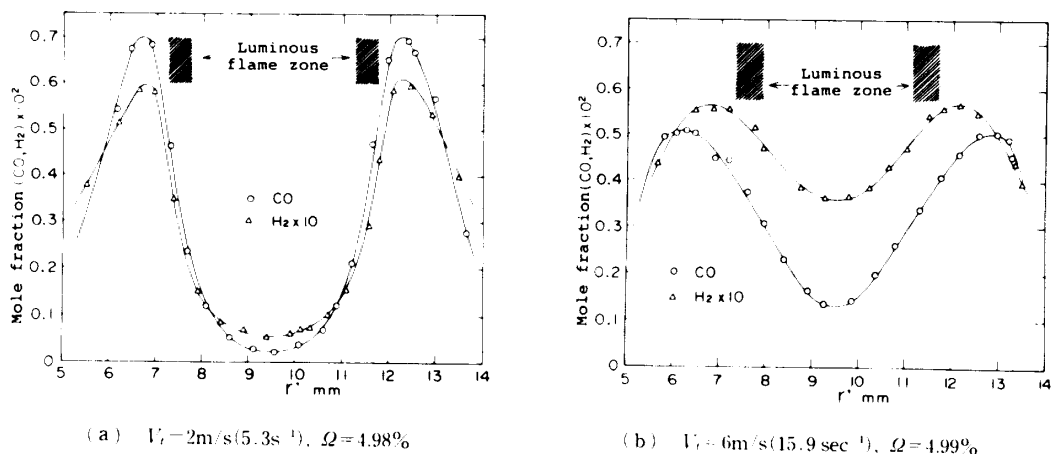


図7 COおよびH₂濃度の変化

直径が小さい程度にとどまった。

以上の結果から、希薄メタン-空気混合気の管状火炎の消炎は、他の伸長を受けた平面状火炎と同様⁽²⁾⁻⁽⁴⁾に、伸長により不完全燃焼の結果生ずるものと考えられる。

つまり、管状火炎では回転中心に向かって流管が広がっており、火炎帯を横切る流管は広がっている。消炎に近い火炎では火炎直径は小さいので、この広がりには特に大きい、したがって反応帯で生成された熱の一部は近接した外側の流管に伝導によって散逸し、一方、近接した外側の流管からは不足成分が拡散によって流入する⁽¹⁾。今の場合、不足成分は燃料であるメタンであり、そのルイス数は1よりやや小さい⁽²⁾。したがって反応帯からの熱の流出よりも反応帯への不足成分の供給がまさり、燃焼反応は強められる傾向がある。この結果、少々不完全燃焼が生じていても火炎は、その火炎直径が小さくなるまで消炎せず、最終的には流れの速さと化学反応の速さの均衡がくずれたところで消炎が生ずるものと考えられる。

3・4 密度分布 最後に、図5および図6の結果をもとに、火炎帯を横切る密度の変化を求めた。その結果を図8に示す。密度は、火炎帯の内側で小さく、外側に向かって増大して内側の約4.5倍程度となる。Rayleighの判定基準⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾によれば、このような密度分布は流れの回転運動に対し空気力学的に安定である。したがって、火炎が回転軸中心付近の強制渦の領域に存在するときはもちろん、安定基準によれば中立にすぎない自由渦中に存在するときでも火炎の存在する場合は流れの回転に対してすこぶる安定であることがわかる。ちなみに、回転のない軸対称伸長流場に形成される管状火炎は、高温燃焼ガスに働く浮力や選択拡散によるセル状不安定性により火炎断面形状が変形するが、⁽¹⁾⁽²⁾、回転流中の管状火炎は、比較的断面形状

が円形である。これは、流れの回転運動と図8のような密度分布の相互作用により、火炎断面形状が円形かつ一様化されるためと考えられる。図4で、 V_t が大きくなるほど、均一な火炎面をもつ管状火炎の領域が増加したが、これは単に V_t の増加に伴う火炎伸長の増大で火炎面が一様化されること⁽²⁸⁾のほか、上述の回転速度の増加による一様化が行われたものと思われる。

4. ま と め

軸対称伸長流場に形成される管状火炎の構造を調べるため、その第1段階として、スワール形伸長火炎バーナにより形成される希薄メタン-空気混合気の管状火炎についてマイクロプローブによるサンプリングとガスクロマトグラフによる分析法を用いて安定化学種の濃度分布の測定を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 従来、温度分布から推測されるにすぎなかった管状火炎の構造が、発光帯を隔てて外側の常温未燃ガス領域と内側の高温既燃ガス領域からなることが明確に示された。

(2) 発光帯付近では、中間生成物である水素と一酸化炭素が生成され、一方、火炎内部では、一酸化炭素が二酸化炭素に酸化されており、他の火炎の場合と同様に典型的なメタンの二段燃焼の構造がみられた。

(3) また、火炎直径 D が発光帯厚みに比べ大きい二つの火炎(① $\Omega=5.59\%$, $V_t=3.3\text{ m/s}$, $D\approx 6.8\text{ mm}$) (② $\Omega=5.10\%$, $V_t=3.3\text{ m/s}$, $D\approx 4\text{ mm}$) の燃焼ガスの状態は、温度が約 $80\sim 100^\circ\text{C}$ ぐらい低いものの平衡計算により求められた燃焼ガス組成とほとんど一致し、通常の火炎の燃焼ガス組成と極めて類似していることが明らかとなった。

(4) ただし、曲率の影響が著しく現れてくると思われる直径の小さな管状火炎の場合、その幾何形状から火炎は非常に細く、マイクロプローブの挿入により部分的ないし全体的消炎が生じ、構造が調べられなかった。したがって、火炎直径が火炎帯厚み程度となる管状火炎の構造を調べるには、分光などの非接触法が望まれる。

(5) 希薄メタン-空気混合気の管状火炎は、燃料濃度を減らしたり混合気吹出し速度を速くすると火炎直径が小さくなり、消炎する。このとき、火炎帯付近における水素や一酸化炭素の濃度は、平衡濃度に比べ著しく大きく、これらの濃度は消炎限界に近づくにつれ増大した。したがって、希薄メタン-空気混合気の消炎は、他の平面状伸長火炎と同様、不完全燃焼によるも

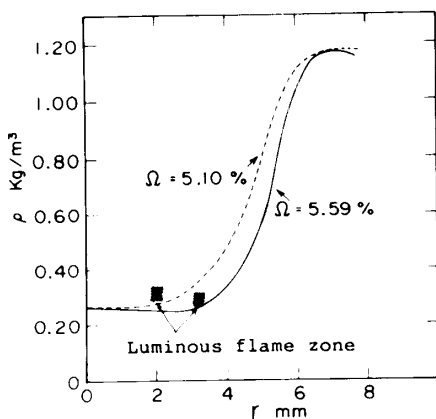


図8 密度の変化 ($V_t=3.3\text{ m/s}$)

のと考えられる。

(6) 測定結果から求められた密度の分布は、単調に内側から外側に向かって約4.5倍程度増大した。したがって、この火炎は、空気力学的に流れの回転に対しすこぶる安定で、回転速度が速くなるほど、浮力やセル状不安定性のため現れる火炎面の変形が抑制されるものと考えられる。

燃焼ガスの化学平衡計算値をご提供いただいた都立科学技術大学助教授 湯浅三郎先生に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Ishizuka, S., *Proc. 20th Int. Symp. Combust.*, (1984), 287.
- (2) Tsuji, H. and Yamaoka, I., *Proc. 19th Int. Symp. Combust.*, (1982), 1533.
- (3) Sato, J., *Proc. 19th Int. Symp. Combust.*, (1982), 1541.
- (4) Ishizuka, S. and Law, C. K., *Proc. 19th Int. Symp. Combust.*, (1982), 327.
- (5) Kitano, M. and Otsuka, Y., *Combust. Sci. Technol.*, **48** (1986), 257.
- (6) Tennekes, H., *Phys. Fluids*, **11**(1968), 669.
- (7) Chomiak, J., *Proc. 16th Int. Symp. Combust.*, (1977), 1665.
- (8) Takeno, T. and Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **64**(1986), 83.
- (9) Takeno, T., ほか2名, *Combust. Flame*, **66**(1986), 271.
- (10) 小林・ほか2名, 機論, **52**, A, B, C(1986), 3811.
- (11) Takeno, T., ほか3名, *Proc. 2nd Workshop Model Chem. React. Syst.* (1987), .
- (12) Ishizuka, S., *Lecture Notes in Physics*, 299(1988), 93, Springer-Verlag.
- (13) Nishioka, M., ほか2名, *Combust. Flame*, **73**(1988), 287.
- (14) Kobayashi, H., ほか2名, *Combust. Sci. Technol.*, **57**(1988), 17.
- (15) Ishizuka, S., An Experimental Study on Extinction and Stability of Tubular Flames, to appear in *Combust. Flame*.
- (16) Kobayashi, H. and Kitano, M., Extinction Characteristics of a Stretched Cylindrical Premixed flame, to appear in *Combust. Flame*.
- (17) Kitano, M., ほか2名, A Study of Cylindrical Premixed Flames with Heat Loss, to appear in *Combust. Flame*.
- (18) Fristrom, R. M., ほか2名, *J. Phys. Chem.*, **64**(1960), 1386.
- (19) Tsuji, H. and Yamaoka, I., *Proc. 12th Int. Symp. Combust.*, (1969), 997.
- (20) 石塚, 第22回燃焼シンポジウム前刷集, (1984), 127.
- (21) Syred, N. and Beer, J. M., *Combust. Flame*, **23**(1974), 143.
- (22) Zabetakis, M., *Bull. US Bureau Mines*, 627(1965).
- (23) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 17th Int. Symp. Combust.*, (1979), 843.
- (24) Mizomoto, M., ほか3名, *Proc. 20th Int. Symp. Combust.*, (1984), 1933.
- (25) 湯浅, 都立工科大報告, 8(1985), 71.
- (26) Lord Rayleigh, *Proc. Soc., London, Ser. A*, **93**(1916), 148.
- (27) Chigier, N. A., ほか3名, *Combust. Flame*, **14**(1970), 171.
- (28) Ishizuka, S., ほか2名, *Combust. Flame*, **45**(1982), 293.

討 論

〔質問〕 辻 廣〔東京電機大学工学部〕

まず最初に、非常に狭い空間で測定が難しいとされている管状火炎の構造を詳細に測定されたことに対し敬意を表す。

ご指摘のように、管状火炎の特性を調べることは、乱流燃焼を理解するうえからも興味深いものと思うが、今回測定されて解明された管状火炎帯の内部構造(特に化学的構造)を、乱流燃焼のモデリングを行う場合に、どのように組みこんでゆけば、今回の研究成果が有意義に生かされるか、ご意見をいただければ幸いです。

図4では Tubular Flame Region は Ω の希薄なごく狭い範囲にかぎられており、より濃度の広い範囲では Corrugated Tubular Flame が形成されることがわける。このようなより一般的な濃度の乱流燃焼において Chomiak の考えはどのように修正する必要があるか。

〔回答〕 管状火炎は乱流燃焼においていわゆる

Flamelet Model の領域で重要となるわけだが、このような場合、その乱流燃焼の確率論的な取扱いには、既燃ガスの状態とか反応帯の厚さといったものを明確にする必要がある。今回の測定で、その既燃状態は温度は 100°C ぐらい低いものの化学的組成は平衡組成のそれで考えて差し支えないことが明らかになった。

なお、ご指摘のように、管状火炎が回転伸長場で無条件で必ず形成されるわけではないので、乱流燃焼が即、管状火炎の集合体として燃えていると考えるのは早計と思われる。つまり、ある乱流燃焼状態に対しては、平面状火炎が乱れたものを考える必要があり、また、あるときは管状火炎の集合ととらえたほうが妥当なときもあるわけである。本研究は後者の場合についてその基本となる管状火炎の特性を明らかにしようとしたものである。

〔質問〕 北野 三千雄・小林 秀昭

〔東北大学工学部〕

(1) 図1によるとマイクロプローブがかなりの距

離にわたって高温燃焼ガスにさらされている。プローブ内での反応はほとんどないと述べておられるが、消炎限界に比較的近い条件(図6)においても伸長の効果が現れず、平衡濃度に近い値をとっているのは、反応がプローブ内でも進行している可能性を示してはいないか。また、図7(b)の条件(図4によるとほとんど消炎限界曲線上の条件と思われる)での平衡計算値との比較を行っておられるならばお示し願いたい。

(2) 管状火炎は半径方向に速度こう配がある流れ場に安定化され、その火炎直径は、速度こう配の大きさと燃焼速度との関係で決まると思われる。図7(a)および図7(b)では、吹出し速度 V_i を3倍まで変化させているにもかかわらず、火炎直径はあまり変化していない(混合気濃度の違いは誤差の範囲と考えられる)。このことは、 V_i の増大によって伸長率の目安となる V_n/D_{id} は増大しても、必ずしも半径方向速度こう配は大きくなっておらず、したがって、火炎伸長率は増大していないことを意味しているように思われるが、バーナ内の流れ構造はどのようになっているとお考えか。また、 V_i の増大は流れの回転速度を明らかに増大させるが、回転が図7(a)および図7(b)に示されるような不完全燃焼の増大に与える影響はないのか。

〔回答〕 (1) 直径の大きな管状火炎では、ご指摘のようにマイクロプローブのかかなりの部分が赤熱されるが、消炎限界近くの、直径の小さな管状火炎ではプローブのごく先端を除いて、プローブが赤熱するよ

うなことはなかった。したがって、図6の結果についてプローブ内の再反応の影響はないと考えられる。

なお文献(25)と比較すると図7(b)の中心軸上における H_2 と CO の濃度は最低でも平衡濃度の 10^2 倍程度大きい値となっている。

(2) 常識的には、流速が増大すれば管状火炎の直径は減少するはずだが、図7(a)および図7(b)に示すように実験ではあまり大きく変化しなかった。これは、貴殿らが示されているように(付1)消炎限界近くで火炎直径の変化が複雑な挙動を示すことによるかもしれないと考えられる。しかし、直径が一定でも、流速が大きくなれば、滞在時間は短くなるわけで、このため反応が不完全となって CO および H_2 の中間生成物の濃度が中心軸上で上昇したと考えられる。したがって、火炎直径は V_i を3倍に上げてもしほとんど変わらないが、滞在時間が短くなるという点から、やはり火炎伸長の値は大きくなっていると考えられる。

なお、流れ場の構造は、文献(8)、(13)で示したように、軸方向に伸長された軸対称の伸長流れ場が回転しているものとなっていると思われる。また、回転速度の不完全燃焼の増大への影響だが、ラジカルを含めた各化学種に働く回転の遠心力の違いから、火炎構造が変化し、これが総括的に見た反応の進行に影響するという可能性はあると思われる。

(付1) Kobayashi, H. and Kitano, M., *Combust. Flame*, **76** (1989), 285.