

旋回流が流入する細い円管中の 予混合火炎伝播挙動に関する数値解析*

永井秀和^{*1}, 山下博史^{*2}

A Numerical Study on Premixed Flame Propagation in a Narrow Tube with Swirling Flow

Hidekazu NAGAI and Hiroshi YAMASHITA^{*3}

^{*3} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The propagation characteristics of premixed flame in a narrow tube with swirling flow have been examined by the numerical calculation in order to elucidate the cooling effects of the cold tube wall on the flame behaviors. In this calculation, the flame is fixed in the computational domain by adding an axial flow to the unburnt premixed gas so as to obtain the steady state propagation characteristics. The flame is classified into three configurations for angular velocity and tube radius as follows: For the smaller angular velocity, when the inlet velocity is small, the flame is able to stand only near the upstream boundary, and the flame reaches tube wall in the downstream. When the inlet velocity becomes larger, the flame blows off. For the larger angular velocity, the flame is able to stand at any positions in the tube, but the flame does not reach the tube wall so that the unburnt mixture flows out. For the intermediate angular velocity, the flame oscillates axially in the narrow tube.

Key Words: Premixed Flame, Flame Propagation, Swirling Flow, Vortex Bursting, Narrow Tube, Numerical Analysis

1. 緒言

渦運動により渦軸方向への火炎伝播が加速される現象はボルテックス・バースティングとして知られており、その機構の解明は、乱流予混合火炎の燃焼特性を乱流場の微細構造のレベルから把握する上で重要である。この現象については、既に多数の実験および理論解析が行われており、現象の把握および高速伝播機構の解明に対して有益な知見が得られている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。高速伝播機構については、火炎背後における圧力上昇によって生じた火炎前後の圧力差が火炎を加速するという説や、火炎の体積湧出効果により火炎の肩の位置に生じた円周渦度が火炎先端に前向きの速度を誘起するという説が提案されている。しかし、渦軸方向への火炎

の伝播は非常に高速かつ非定常な現象であるため、実験的に観察することも、シミュレーションによる解析も容易ではない。

本研究では、旋回流中の予混合火炎の定常的な伝播特性を解明するために、火炎先端部が計算領域中に定在し伝播速度がゼロとなるように、未燃混合気に軸方向流れを与えることにより予混合火炎の伝播における非定常効果を取り除き、種々のパラメータが火炎伝播に与える影響について検討を行っている。前報⁽⁸⁾では、剛体回転型旋回流およびランキン渦型旋回流において、角速度の増加により火炎の伝播速度は比例して増加し、従来の実験的および理論的研究の傾向と一致することを示した。また、実験では測定が極めて困難な火炎内のすべての速度成分や圧力などの分布を示し、既燃領域では圧力がほぼ均一であること、軸方向速度は流入部から火炎前面に向かってほぼ層流燃焼速度まで減少し、ほとんどの予混合気は火炎面に沿って外側に曲げられ未燃のまま下流に流れ去ることなどを明らかにした。また、伝播速度と火炎前後の圧力差はペルヌーイの式で関係付けられることを示した。

このように、ボルテックス・バースティングに関する

* 原稿受付 2004年9月2日。

*1 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

*2 正員、名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: yamashita@mech.nagoya-u.ac.jp

る研究は高速伝播機構の解明の観点から研究が進められてきたが、近年、実用的な観点からも、旋回流中の予混合火炎の伝播特性により希薄燃焼の可燃限界が広がることに注目して、安定かつ低汚染排出の新型燃焼器の開発が進められている。例えば、安里ら⁽⁹⁾は旋回流中に形成されるV型予混合火炎が希薄側および過濃側ともに広い安定な燃焼限界を持つことを指摘している。中野ら⁽¹⁰⁾は管状旋回火炎をパイロット火炎として用いることにより、層流燃焼速度よりはるかに速い噴出速度でも容易に火炎が保持できることを示している。特に、最近、エネルギーの高効率利用やピンポイント加熱を目的として、旋回流を利用したマイクロ燃焼器の実験的研究⁽¹¹⁾も活発になっている。燃焼器を小型化する場合には、粘性の効果が大きくなり流れ場は層流化され、燃焼強度が小さくなったり、火炎安定特性が変化する可能性がある。さらに、相対的に壁面の影響が大きくなり、冷却効果が火炎伝播現象を支配することになる。

本報では、このような小さなサイズの燃焼器における火炎伝播現象を明らかにすることを目的として数値解析により検討を行った。特に、火炎が円管壁面に到達するような非常に細い円管内での予混合火炎伝播を扱い、円管半径と旋回流の角速度を変化させて、円管の冷却壁面が火炎伝播に与える影響について明らかにした。

2. 解析モデルおよび計算方法

本研究では、メタン・空気系の予混合火炎を対象として、旋回流中の火炎伝播を取り扱った。解析モデルと境界条件を図1に示す。燃焼場を軸対称と考え、半径方向に r 座標、軸方向に z 座標とする。円管半径 R は計算パラメータで $R=1.2\sim9.0\text{mm}$ とし、円管の軸方向長さ L は 32mm で固定した。円管壁面では等温 300K で、すべりなしの条件とした。 $z=0$ を流入境界とする。流入する予混合気の温度は 300K 、当量比は 1.0 とした。また、流入軸方向速度を U 、周方向速度を V_θ とし、ランキン渦型旋回流に基づいて、旋回流の角速度を ω 、ランキン渦の渦核半径を a として与えた。なお、 $a=R/3$ とした。このとき、半径方向位置 $r=a$ における周方向速度は最大周方向速度 $V_{\theta\max}=a\omega$ となる。このように、最大周方向速度は旋回角速度と円管半径に比例する。なお、角速度は $\omega=0\sim10000\text{rad/s}$ の間で変化させた。出口境界では自由流出条件とする。圧力は出口の外側境界位置を大気圧とし、以下ではこの位置との差圧を示す。初期

時刻において、中心軸上の位置 $z=8\text{mm}$ で予混合気に点火し、火炎核が十分形成された後、点火源を取り除くと、火炎は未燃混合気側に伝播し始める。この火炎先端部が計算領域中の $z=8\text{mm}$ に定在し、伝播速度がゼロとなるように、流入速度 U を調整し、これにより非定常効果を取り除いた。この火炎保持位置 $z=8\text{mm}$ は流入境界における温度条件の影響が及ばない上流寄りの位置として選定した⁽⁸⁾。なお、円管半径が小さい場合には、火炎を $z=8\text{mm}$ に保持できなかったり、消炎してしまったりする可能性がある。

支配方程式は、旋回流を伴う軸対称のナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式および各化学種の連続方程式であり、その離散化には有限体積法を用い、圧力と速度の連成には SIMPLE 法を適用した⁽⁸⁾。対流項には 1 次風上差分法、時間方向には 1 次精度の陰解法を適用し、各時間ステップにおいて SOR 法による繰り返し計算を行った⁽⁸⁾。格子数は r 軸方向に等間隔 61 格子、 z 軸方向に流入境界で最小間隔 0.04mm とする不等間隔 161 格子とした。化学反応機構としてはメタン・空気系の総括一段不可逆反応⁽¹²⁾を用いた。

3. 計算結果および検討

3.1 消炎限界

円管の軸方向長さ L を固定した場合に対する本解析の全計算条件における火炎形態を表1にまとめた。火炎形態I、IIおよびIIIについては以下で順次説明する。なお、円管壁面からの冷却による消炎限界について確認するために、 $R=0.9\text{mm}$ 、 $\omega=10000\text{rad/s}$ の場合についても計算を行ったが、点火源を取り除いた後、時間経過とともに火炎温度は低下し消炎に至った。 $R=1.2\text{mm}$ 以上の場合にはどの角速度の場合にも消炎しなかったので、消炎限界の円管半径は $0.9\sim1.2\text{mm}$ 程度と考えられる。

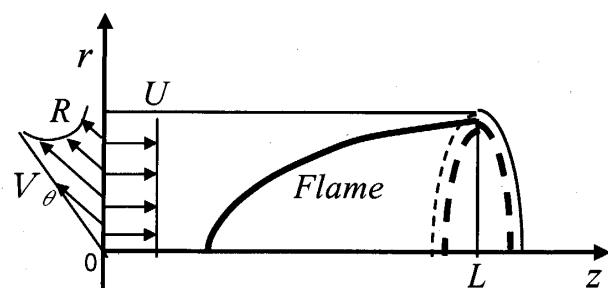


Fig.1 Analytical model and boundary condition

3.2 旋回流がない場合

初期時刻に、 \bar{U} が小さいという条件の下で点火すると、火炎面は点火位置から上流側に伝播する。流入速度が燃焼速度よりも小さい場合には、火炎は流入口まで前進し逆火する。

流入速度が燃焼速度よりも大きい場合には、流入口における境界条件で予混合気が低温度に指定されることの影響が小さくなつたところで火炎が形成できるようになる。さらに流入速度が大きくなると、火炎の形成位置は流入口付近でしだいに下流側に移動する。しかしながら、一定値以上に流入速度を大きくすると、火炎は定在することができなくなり吹き飛んでしまう。吹き飛ぶ直前の流入速度に対する火炎形態の例として、 $R=1.2\text{mm}$, $\omega=0$, $U=0.47\text{m/s}$ および $R=6.0\text{mm}$, $\omega=0$, $U=0.53\text{m/s}$ における温度・面内速度ベクトル分布、圧力分布、中心軸上の z 軸方向速度および圧力分布を図 2 および図 3 に示す。

旋回流がない場合には、遠心力の効果がないので、流れ場は半径方向に一様となり、火炎は管内で半径方向に広がり平面火炎が形成され、燃焼速度とつり合う流入速度の場合に定常状態となるはずである。しかし、壁面での摩擦と冷却の効果により、火炎は平面ではなくなる。壁面付近の火炎面に対して、壁面摩擦による予混合気の速度低下は火炎面位置を前進させ、壁面冷却による予混合気の速度低下は火炎面位置を後退させることになる。通常はこの後者の効果の方が大きいと思われ、円管外壁部で火炎は後退することになる。特に、図 2 のように円管半径が小さい場合には、予混合気は円管外壁方向に流れ込み、火炎は中心軸上で最も上流側に張り出した形状となる。一方、図 3 のように

円管半径が比較的大きい場合には、同様に円管外壁部で火炎は後退するが、すべての予混合気が円管外周部方向に流れ込むことはなく、中央寄りの予混合気は中心軸方向へ流れ込み、中心軸上の火炎も後退すること

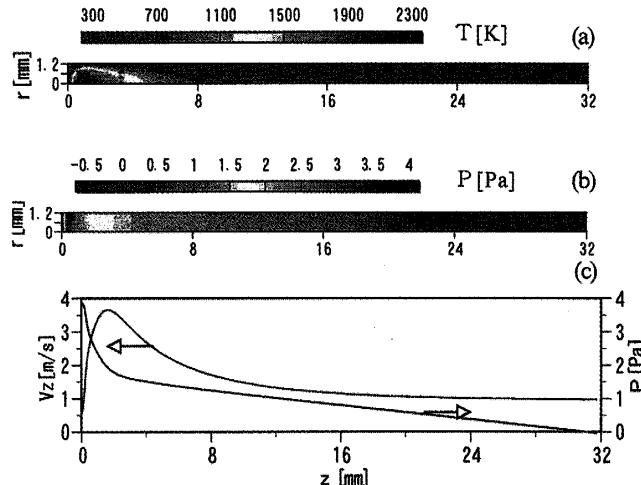


Fig.2 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for flame configuration I
($R=1.2\text{mm}$, $\omega=0$, $U_c=0.47\text{m/s}$)

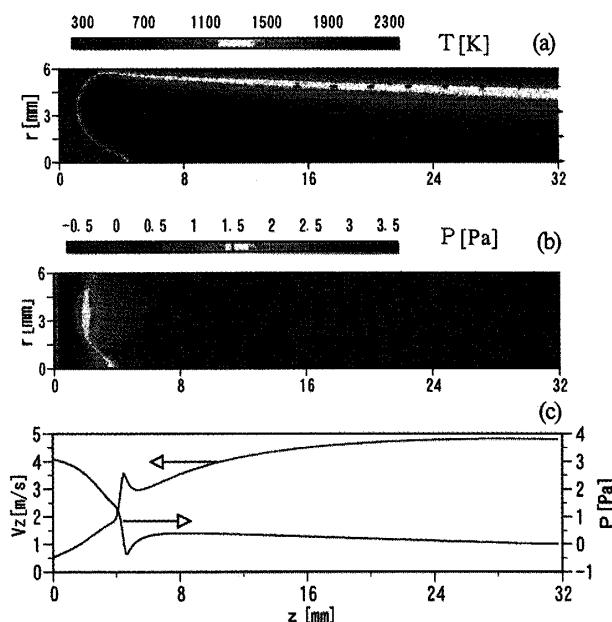


Fig.3 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for flame configuration I
($R=6.0\text{mm}$, $\omega=0$, $U_c=0.53\text{m/s}$)

Table 1 Classification of flame configuration

R [mm]	1.2	1.8	2.4	3.0	6.0	9.0
ω [rad/s]						
0	I	I	I	I	I	II
1000	I	I	I	I	I	III
2000	I	I	I	I	III	II
3000	I	I	I	I	III	II
4000	I	I	I	I	II	II
5000	I	I	I	I	II	II
6000	I	I	I	I	II	II
7000	I	I	I	I	II	II
8000	I	I	I	III	II	II
9000	I	I	III	III	II	-
10000	I	III	III	III	II	-

になる。このように、いずれにしても、火炎面は曲率を持った形状となり、燃焼に伴う膨張による流体力学的效果により、火炎面の曲率の大きさに応じて、火炎は燃焼速度よりも大きな流入速度において定常状態となる。

3.3 旋回流がある場合

円管半径が小さいときや、円管半径が比較的大きくても角速度が比較的小さいとき、旋回流がない場合と同様に、火炎先端が $z=8\text{mm}$ に到達する前に火炎が吹き飛ぶ現象が生じた。このような場合、火炎が吹き飛ぶ直前の U を限界流入速度 U_c とし、火炎の状態を火炎形態 I とした。この火炎形態の例として、 $R=1.2\text{mm}$, $\omega=5000\text{rad/s}$, $U_c=0.64\text{m/s}$ および $R=6.0\text{mm}$, $\omega=1000\text{rad/s}$, $U_c=1.9\text{m/s}$ における温度・面内速度ベクトル分布、圧力分布、中心軸上の z 軸方向速度および圧力分布を図 4 および図 5 に示す。図から分かるように、この場合には、中心軸上では火炎は $z=8\text{mm}$ よりも上流に位置し、下流側では円管壁面に到達する。この中心軸上での火炎面位置を $Z_{c,c}$ 、円管壁面での火炎面位置を $Z_{c,w}$ とした。なお、 $Z_{c,c}$, $Z_{c,w}$ は円管壁面近傍での温度分布により、軸方向に温度が極大となる位置として定義した。これらの火炎位置 $Z_{c,c}$ および $Z_{c,w}$ と最大周方向速度 $V_{\theta \max}$ の関係を図 6 に示す。 $Z_{c,c}$, $Z_{c,w}$ は $V_{\theta \max}$ に依存せずほぼ一定となり、円管半径が大きいほど大きくなる。このような特性となるのは、火炎の形成が、旋回流の旋回強度には関係なく、流入予混合気の低温度と、円管壁面による冷却の影響を強く受けるためであると考えられる。

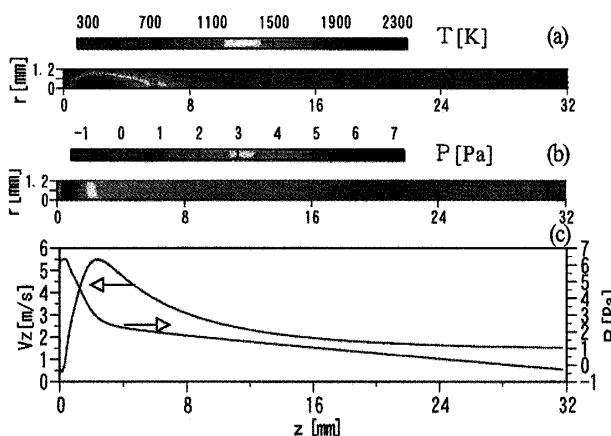


Fig.4 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for flame configuration I
($R=1.2\text{mm}$, $\omega=5000\text{rad/s}$, $U_c=0.64\text{m/s}$)

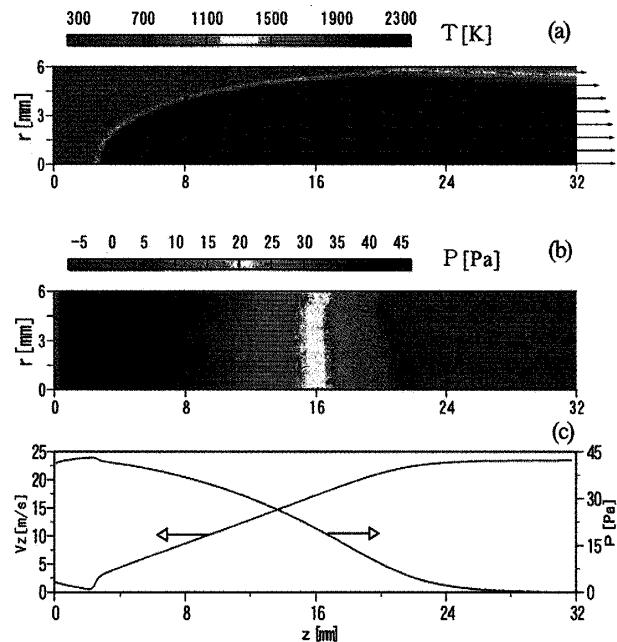


Fig.5 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for flame configuration I
($R=6.0\text{mm}$, $\omega=1000\text{rad/s}$, $U_c=1.9\text{m/s}$)

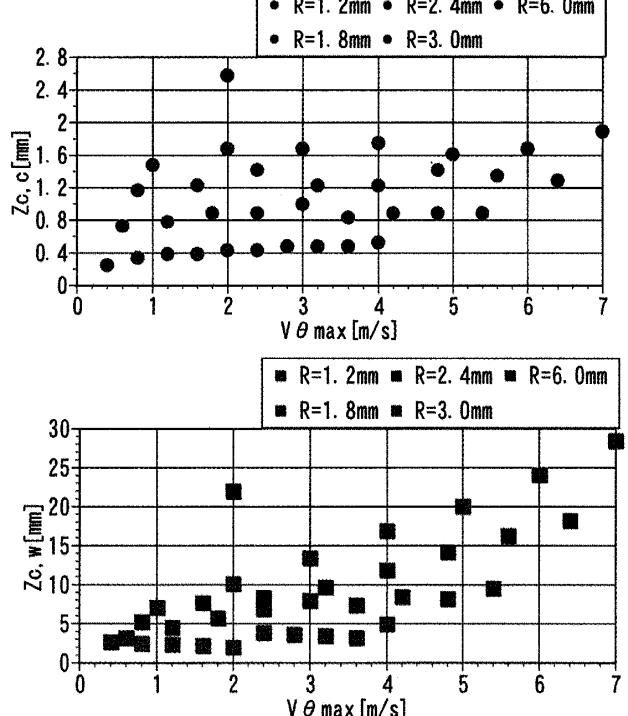


Fig.6 Relationship between $Z_{c,c}$ and $Z_{c,w}$ and maximum tangential velocity for tube radius $R=1.2$ to 6.0mm

一方、 Zc, w は $V_{\theta \max}$ にほぼ比例して大きくなり、その傾きは円管半径が大きいほど大きい。したがって、 Zc, w は円管半径の増加による最大周方向速度の増大分以上に大きくなることになる。なお、火炎は円管半径 $R=6\text{mm}$ では $\omega=1000\text{rad/s}$ の場合のみ壁面に到達し、 $R=9\text{mm}$ では壁面に到達することはない。また、 $R=1.2\text{mm}$ では Zc, w は非常に小さい値をとるため、この変化が不連続的になっている。火炎が円管内で壁面に到達する場合、流入速度を大きくしたとき、火炎が後退しても予混合気が未燃のまま流出することができない。そのため、火炎は下流側に移動し続け、最終的には吹き飛びに至ることになる。また、火炎は壁面に到達した後、壁面からの冷却により、既燃ガスの温度は急速に低下する。

一方、円管半径と角速度が比較的大きい場合、かなり大きな流入速度に対して、火炎を任意の軸方向位置で定在させることができる。中心軸上の $z=8\text{mm}$ に火炎先端を保持することができるときの火炎の状態を火炎形態Ⅱとし、このときの U を伝播速度 V_f とした。この火炎形態の例として、 $R=6.0\text{mm}$ 、 $\omega=5000\text{rad/s}$ 、 $V_f=11.25\text{m/s}$ における温度・速度分布、圧力分布、中心軸上の z 軸方向速度および圧力分布を図 7 に示す。

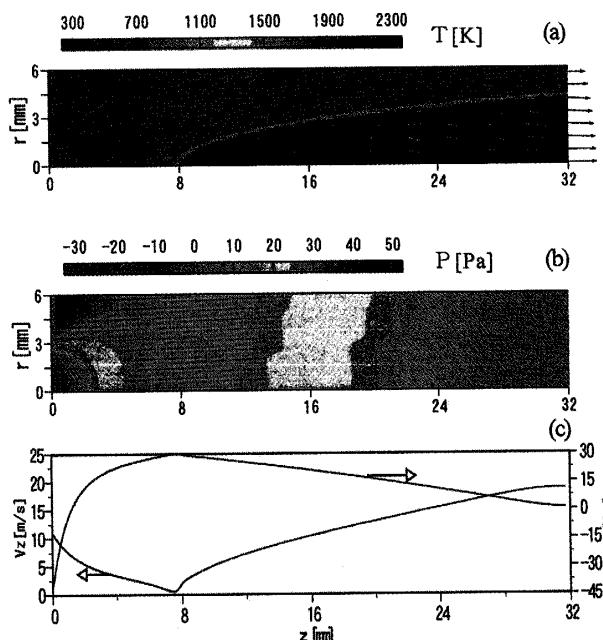


Fig.7 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for flame configuration II
($R=6.0\text{mm}$, $\omega=5000\text{rad/s}$, $V_f=11.25\text{m/s}$)

この場合には、火炎は下流側においても円管壁面には到達しないので、予混合気が未燃のまま円管出口から流出してしまうことになる。流入速度を大きくしたとき、火炎は後退し、未燃側の流出出口が拡大し、未燃のまま流出する予混合気量が増大し、中心軸上の未燃予混合気速度が小さくなる。したがって、燃焼速度とバランスして、火炎が安定して管内に定在することになる。

火炎形態Ⅰにおける U_c および火炎形態Ⅱにおける V_f と最大周方向速度 $V_{\theta \max}$ の関係を図 8 に示す。 U_c および V_f はどちらも最大周方向速度に比例して大きくなるが、その傾きは U_c よりも V_f のほうが大きい。また、 U_c は円管半径が大きいほど大きく、 V_f は円管半径に依存しない。 U_c が円管半径に依存するのは、火炎形態Ⅰでは火炎面が壁面に到達するため、壁面の影響を受けるためと考えられる。

火炎形態Ⅰと火炎形態Ⅱにおける圧力分布を比較すると、円管壁面の摩擦損失による圧力降下量は同程度であるが、火炎形態Ⅰでは、ボルテックス・バースティングに関係する火炎面前方での圧力上昇の割合が非常に小さい。これは火炎形態Ⅰの U_c が火炎形態Ⅱの V_f に比べて非常に小さいことを反映している。このように、下流側の出口近傍で、火炎が円管壁面に到達するかしないかで、安定な火炎が形成できる流入速度がまったく異なる。

円管半径が小さく、角速度が上述の火炎形態ⅠとⅡが生じる場合の中間的な値をとるとき、形態ⅠとⅡが交互に出現し、周期的に火炎面が振動する。これを火炎形態Ⅲとした。この火炎形態の一例として、

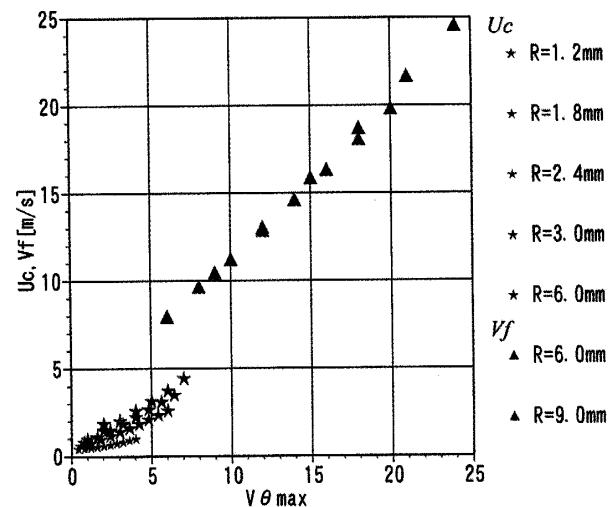


Fig.8 Relationship between U_c , V_f and maximum tangential velocity for tube radius $R=1.2$ to 9.0mm

$R=6.0\text{mm}$, $\omega=3000\text{rad/s}$, $U=6.0\text{m/s}$ における温度分布の時間変化を時間間隔 1ms で図 9 に示す。火炎面は非定常に変化し、火炎面位置は軸方向に振動する。これは、火炎形態 I が出現しているときには U が U_c よりも大きいので火炎は後退し、火炎形態 II が出現しているときには U が V_f よりも小さいので火炎は前進するためである。

3.4 壁面の温度条件の影響

円管壁面の温度条件の影響を検討するために、一例として、 $R=6.0\text{mm}$ および $\omega=1000\text{rad/s}$ で等温冷却壁面（図 5 参照、 $U_c=1.9\text{m/s}$ ）の場合に対応して、断熱壁面の場合について、 $U=1.1\text{m/s}$ における温度・速度分布、圧力分布、中心軸上の z 向速度および圧力分布を図 10 に示す。この場合には、火炎形態 I であり火炎が壁面に到達するが、壁面からの冷却効果がなく、

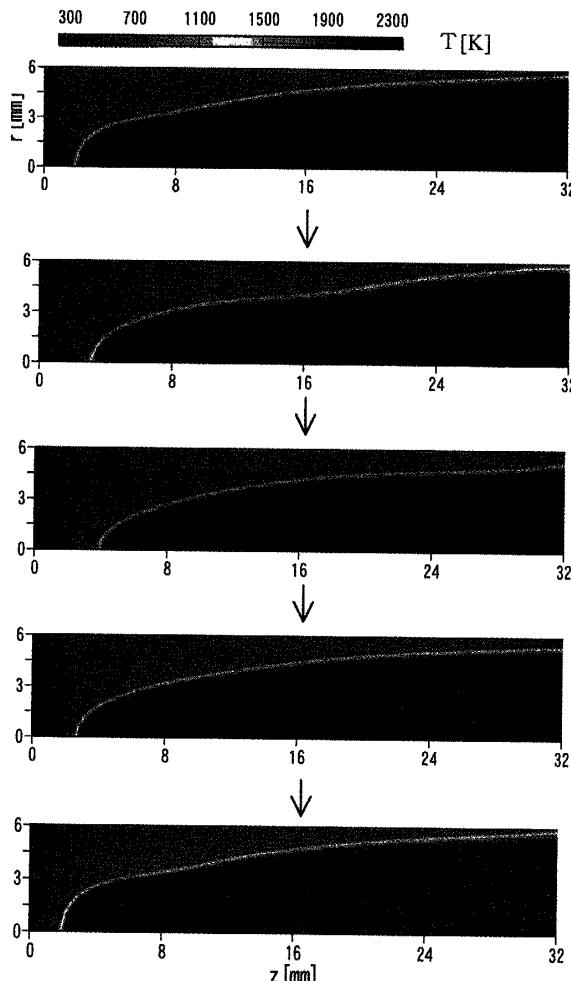


Fig.9 Time history of temperature distributions
($R=6.0\text{mm}$, $\omega=3000\text{rad/s}$, $U=6.0\text{m/s}$)

また壁面では流速が 0 になるために、火炎は上流側に張り出していく。火炎が壁面に到達しない火炎形態 IIにおいては、等温壁と断熱壁とで顕著な差異はなかった。

4. 結 論

旋回流が流入する細い円管中での予混合火炎伝播挙動について数値計算によって検討し、円管壁面の冷却効果の影響を明らかにし、以下の結論を得た。

- (1) 角速度が比較的小さい場合、火炎は流入速度が小さいときに上流境界近傍でのみ定在させることができ、下流側では火炎は円管壁面に到達し、壁面により急速に冷却される。流入速度を大きくすると、火炎は下流側に移動し続け、限界速度を超えると吹き飛ぶ。
- (2) 角速度が比較的大きい場合、火炎を任意の位置で安定に定在させることができるが、下流側では予混合気が未燃のまま円管から流出してしまう。
- (3) 角速度が上記の二つの場合の中間的な値をとるとき、それらの火炎形態が交互に出現し、周期的に火炎面が振動する。
- (4) 円管半径と角速度について火炎形態が分類できる。

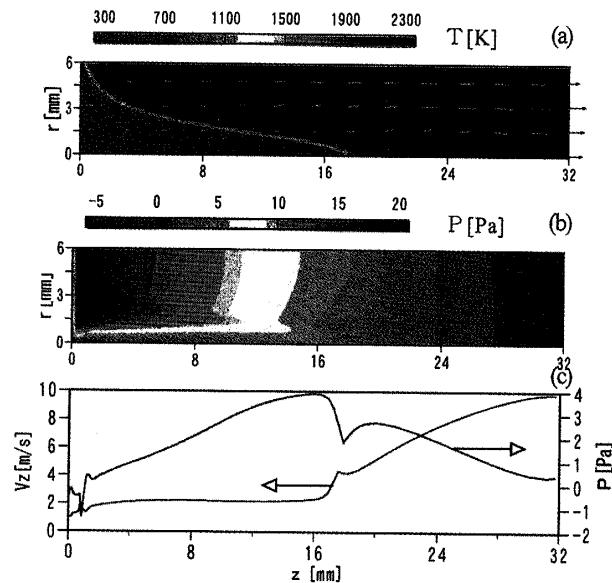


Fig.10 (a) Temperature and velocity distributions, (b) pressure distribution, and (c) axial velocity and pressure profiles along the central axis for adiabatic wall condition
($R=6.0\text{mm}$, $\omega=1000\text{rad/s}$, $U=1.1\text{m/s}$)

参考文献

- (1) Chomiak, J., *Sixteenth Symp. (Int) on Combust.*, 1665-1673 (1977), Pittsburgh.
- (2) 濱崎拳志・石塚悟, 燃焼の科学と技術, 6 (1998), 195-209.
- (3) 梅村章, 燃焼研究, 122 (2000), 35-48.
- (4) Umemura, A. and Tomita, K., *Combustion and Flame*, 125 (2001), 820-838.
- (5) Hasegawa, T., Nakamichi, R. and Nishiki, S., *Combust. Theory Modeling*, 6 (2002), 413-424.
- (6) Asato, K., *Combustion and Flame*, 110 (1997), 418-428.
- (7) Ishizuka, S., *Progress in Energy and Combustion Science*, 28 (2002), 477-542.
- (8) 趙黛青・山下博史, 機論, 67-662, B (2001), 2567-2573.
- (9) 安里勝雄・香川大輔・神谷佳博, 第39回燃焼シンポジウム講演論文集, (2001), 483-484.
- (10) 中野雅志・水口裕之・下栗大右・長友真吾・石塚悟, 第39回燃焼シンポジウム講演論文集, (2001), 191-192.
- (11) 熊野智之・花村克悟・安藤智一, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 125-126.
- (12) Coffee, T. P., Kotlar, A. J. and Miller, M. S., *Combustion and Flame*, 54 (1983), 155-169.