

## 固体壁の小円孔を通過する予混合火炎の消炎に関する数値解析\*

### (水素-空気予混合火炎の消炎機構)

藤田英之\*<sup>1</sup>, 山下博史\*<sup>2</sup>, 中尾友哉\*<sup>3</sup>

## Numerical Analysis on Quenching of Premixed Flame at a Small Circular Hole Made in a Cooled Plate (Quenching Mechanism of Hydrogen-Air Premixed Flame)

Hideyuki FUJITA, Hiroshi YAMASHITA\*<sup>4</sup> and Tomoya NAKAO

\*<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In order to clarify the unsteady behavior and the quenching mechanism of the hydrogen-air premixed flame at a small circular hole made in the cooled plate put in the large container, the numerical calculation was carried out by using the detailed chemical kinetics. In this calculation, the stationary premixed gas is filled in the container at the start, and then the mixture is ignited at the end face and the flame propagates to the hole. At the hole, the flow is induced by the flame propagation and the heat is taken from the cooled wall, so that the flame front changes unsteadily and has the curvature. When the flame front has the curvature, the effects of non-unity Lewis number of the hydrogen fuel lean or rich mixtures appear in the quenching process. The relationship between the quenching diameter and the equivalence ratio are shown for the different thickness of the cooled plate. Moreover, the unsteady flame behavior and the critical quenching process are shown for the fuel lean and rich mixtures, and the quenching mechanism is examined so that the effects of the cooling and the Lewis number are clarified.

**Key Words**: Premixed Flame, Flame Quenching, Lewis Number, Flame Stretch, Quenching Diameter, Numerical Analysis

### 1. 緒 論

燃焼器の設計や火災防止などの安全工学に関連して、古くから消炎距離の測定は行われてきた。消炎距離の一般的な測定法は、スリット間や円筒内で静止した予混合気を着火し、火炎が伝ば不可能な限界のすきま間隔や直径を測定するものである。これらの測定法のように、狭いすきまを伝ばさせた際の予混合火炎の火炎面形状は平面に近く、火炎伸長の効果は小さい。つまり、固体壁からの冷却効果による消炎を対象とするものである。

しかし、実際に工業的な現場で見られる火炎は、火炎面が曲率をもち、伸張を受けている場合が多い。例えば、火災防止のためのフレームトラップのように、予混合気の流路に置かれた金網などの多孔板での消炎では、流れの影響を受け、火炎面は曲率をもち、伸張を受ける。また、火花点火エンジンの燃焼室において、未燃炭化水素のおもな発生源として考えられている、

ピンストリングのすきまのようなクレビス部での燃焼では、火炎は広い燃焼室から小さなすきまに侵入するため、火炎面は曲率をもち、伸張を受ける。そのため、消炎の原因として、固体壁からの冷却のほかに火炎伸張の効果が加わる。よって、これらのような火炎面が曲率をもち、伸張を受ける場合の燃焼器設計に、固体壁からの冷却のみを考慮した、従来の消炎距離測定結果を用いることは適当でないことが示されている<sup>(1)~(4)</sup>。特に、燃料を水素やプロパンにした場合、曲率をもった火炎面にはルイス数効果が現れ、火炎の伝ば特性が当量比 $\phi=1$ を境に変化する。そのため、消炎特性も当量比によって変化するものと考えられる。しかし、このような広い空間から狭いすきまに曲率をもって侵入する火炎の消炎機構について詳細に調べたものは少ない<sup>(5)~(8)</sup>。

そこで本研究では、静止した予混合気が満たされた広い空間で予混合気を着火し、固体壁に設けた小円孔に向かって、予混合火炎を伝ばさせた際の消炎のようすを、素反応機構を用いた数値計算によって解析した。円孔部での火炎面は、非定常的に形状を変えると同時に、伸張を受けかつ曲率を有し、流れ場および固体壁からの冷却の影響を受ける。

著者らは、すでに不足物質のルイス数が希薄側では

\* 原稿受付 2003年1月24日。

\*<sup>1</sup> 学生員, 名古屋大学大学院(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

\*<sup>2</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科。

\*<sup>3</sup> 名古屋大学工学部。

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

$Le=1.025$ , 過濃側では  $Le=1.039$  であるメタンを燃料とした場合について調べている<sup>7)</sup>. その結果, 希薄側と過濃側でレイス数の差が小さく, またほぼ1であるため, 熱発生速度分布に大きな違いは見られなかったものの, 希薄側では円孔部で消炎し, 過濃側では円孔下部の広い空間で消炎するという違いが現れることを明らかにした.

そこで本報では, 特に燃料として水素を用いることによって, レイス数効果が強く現れる火炎の非定常挙動と, 消炎機構について解析を行った. 消炎には, 浮力の影響が重要となるが, 基礎的な現象を理解するために, 重力は考慮せずに計算を行った. また, 消炎距離と圧力には密接な関係があるが, 本研究では, 大気圧下での火炎伝ばについて検討した.

## 2. 解析モデルおよび数値計算法

本研究で用いた解析モデルの概略を図1に示す. 固体壁上面を  $z=0$  とし, 半径方向座標  $r$  と対称軸方向座標  $z$  をとり, 軸対称二次元の計算を行った. 計算領域の大きさは,  $r=0\sim 30$  mm とし, 固体壁の厚さにかかわらず,  $z_{max}$  から固体壁上面間および  $z_{min}$  から固体壁下面間の長さは, それぞれ 5 mm および 38 mm で一定とした. 図1中の太線で示された面は壁面とし, 温度は 300 K の等温壁とする. 破線で示された面は自由流出条件とした.

初期条件として, 計算領域を静止した水素-低酸素空気予混合気で満たしておく. 予混合気の圧力は大気圧, 温度は 300 K とする. 固体壁は冷却壁面(温度一定)あるいは断熱壁とした. Ignition Line の温度は 2300 K でつねに一定とし, 着火源とする. 予混合気は固体壁上方 5 mm の Ignition Line で着火すると, すぐに平面火炎が形成され,  $z$  軸負方向に伝ばし出し, 着火源から離れて固体壁に向かって一様に前進し, 固体壁の 2~3 mm 前方からしだいに円孔の影響を受けて変形し始める. 着火源はその後点火したままであるので, 熱伝導により高温部が火炎面を追いかけるが, その熱伝導現象は極めて遅く, 火炎の消炎挙動には何ら影響しないことを確認した. また, 固体壁下部の空間(固体壁下面から  $z_{min}$ )を十分広く確保してあるため, 火炎はほぼ一定圧力で伝ばし, この空間において, 円孔通過直後の火炎を乱す流れは発生しないことを確認した.

本研究では, 固体壁下部の空間の末端部まで, 火炎が燃え広がらない場合を「消炎」と呼ぶことにする.

本研究で用いた仮定を以下に示す.

- 混合気は理想気体とする.

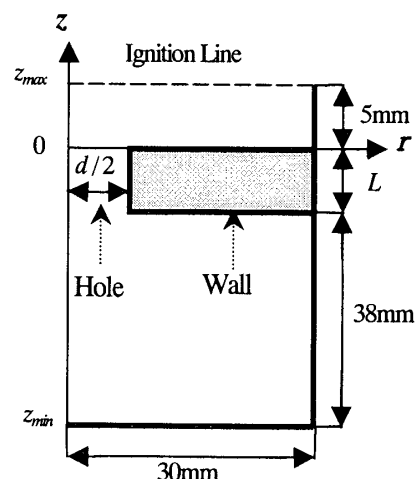


Fig. 1 Schematics of analytical model

- 化学反応機構は Gutheil<sup>9)</sup> らの詳細素反応機構を用いる. 9 化学種について 21 の素反応を考慮する.
- 熱力学定数は, CHEMKIN データベース<sup>10)</sup>を用いる.
- 酸化剤は窒素と酸素の質量比を 12 とした低酸素空気とする.
- 輸送係数の算出には Smooke らの Simplified Transport Model<sup>11)</sup>を用いる. 特に, 不足物質について考えると, 希薄側  $\phi < 1$  で  $Le=0.28$ , 過濃側  $\phi > 1$  で  $Le=1.039$  となる.
- Soret 効果および Dufour 効果, また圧力拡散の効果は無視する.
- 重力, その他外力は考慮しない.
- エネルギー方程式において, 粘性散逸および  $Dp/Dt$  を無視する. また, 消炎現象にはふく射が影響を与えると考えられるが, 火炎の近傍に冷却壁面が存在するような場合には冷却壁面への熱伝導が消炎現象を最も支配すると考えられるので, ここではふく射の影響を無視する.

保存方程式の離散化には有限体積法を用い, 対流項には一次風上法を, 時間展開には陰解法を用いた. 圧力と速度の連成には Patanker の SIMPLE 法<sup>12)</sup>を用いた. 時間刻みは  $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$  s とした. 各時間ステップにおいて, SOR 法による繰返し計算を行った. 格子間隔は, 原点近傍で最小格子間隔  $\Delta r = \Delta z = 0.1$  mm となる不等間隔格子とした. 格子数は  $r$  方向には 150 とした.  $z$  方向には, 固体壁厚さが  $L=0.2$  mm の場合 182,  $L=2$  mm の場合 200,  $L=10$  mm の場合 280 とした. また, 固体壁の円孔直径は, 最小格子間隔の 2 倍の 0.2 mm 間隔で変化させた.

### 3. 計算結果および検討

#### 3.1 消炎距離

**3.1.1 当量比の影響** 壁温  $T_{\text{wall}}=300$  K, 壁厚  $L=0.2, 2$  mm および  $10$  mm における消炎直径と当量比との関係を図2に示す。ここで、消炎直径とは、各当量比において、火炎が消炎する最大の円孔径のことである。窒素と酸素の質量比を12とした空気を用いた場合における、一次元水素-空気予混合火炎の既燃ガス温度、燃焼速度および最大熱発生速度と当量比の関係を図3に示す。

図2から、壁厚の変化にかかわらず、最小消炎直径を示す当量比は、 $\phi=1.0\sim 1.5$  程度であることがわかる。計算上の格子分解能の関係で円孔径が  $0.2$  mm 間隔でしか変化させることができないので、この範囲で消炎直径は一定となっているが、 $\phi < 1.0$  および  $\phi > 1.5$  の領域での傾向を併せて考えると、消炎直径が最小となるのは  $\phi=1.2\sim 1.3$  程度と推定できる。つまり、 $\phi=1.2\sim 1.3$  付近で、火炎が円孔を伝ばしやすい。一方、図3から、一次元予混合火炎で燃焼速度および最大熱発生速度が最も大きくなる当量比は、 $\phi=1.5$  付近であることがわかる。つまり、一次元予混合火炎では、 $\phi=1.5$  付近で火炎が最も伝ばしやすい。この当量比は、小円孔を通過する火炎が最も伝ばしやすい当量比と異なる。このように、円孔を通過する火炎の伝ば特性は、一次元予混合火炎の伝ば特性とは異なる。この原因は、火炎面が曲率をもつ効果、また曲率をもつ火炎面に与えるルイス数効果であると考えられる。

**3.1.2 壁厚の影響** 図2より、壁厚が薄くなると、それによって消炎距離が小さくなることがわかる。これは、壁厚が薄くなることによって、円孔を通過する火炎が受ける円孔内壁からの冷却効果が小さくなるためである。

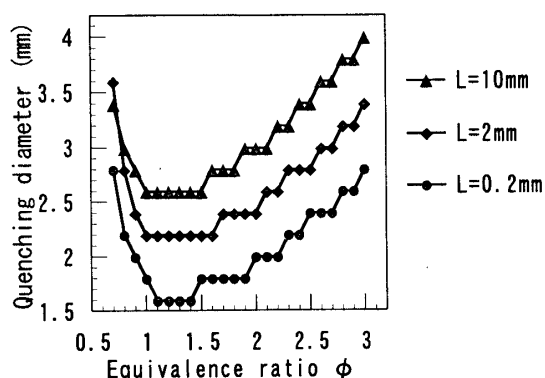


Fig. 2 Effect of equivalence ratio on quenching diameter

当量比  $\phi > 1$  の領域では、いずれも消炎直径は、当量比  $\phi$  とともに、ほぼ同じ傾きで上昇する。当量比  $\phi < 1$  の領域では、壁厚  $L=0.2$  mm および  $L=2$  mm の場合には、消炎直径はほぼ同じ傾きで減少するが、壁厚  $L=10$  mm の場合には、これら二つよりも緩やかな傾きで減少する。これは、 $L=0.2$  mm および  $L=2$  mm の場合には壁厚が薄いため、火炎面が曲率をもって円孔に侵入した直後に、安定して伝ばする間もなく円孔下部の広い空間に広がり、短時間の間に火炎面形状が大きく変化するためである。それに対し壁厚  $L=10$  mm の場合では、円孔に侵入する際は、短時間に火炎面形状は非定常に変化するが、壁厚が厚いため、円孔に侵入してしまえば、しばらくの間、火炎面は一定の曲率をもって安定に伝ばすることが可能となる。この違いにより、グラフの傾きに違いが出たものと考えられる。このことにより、火炎の非定常性の度合いも、消炎を特徴づける要素の一つであると考えられる。

当量比  $\phi < 1$  の領域のみにグラフの傾きの違いがでているのは、当量比  $\phi > 1$  の領域と当量比  $\phi < 1$  の領域でルイス数効果が違うため、火炎の伝ば特性が異なることが原因であると考えられる。

**3.2 消炎の挙動 ( $L=2$  mm の場合)** 壁温  $T_{\text{wall}}=300$  K, 壁厚  $L=2$  mm,  $\phi=0.7$  および  $\phi=3.0$  における消炎時の速度ベクトルと温度および熱発生速度の分布を図4および図5に示す。これらは、それぞれ希薄側および過濃側を代表する消炎限界時のものであり、各当量比において火炎が消炎する条件の中で最大の円孔径  $d=3.6$  mm および  $d=3.4$  mm の場合で

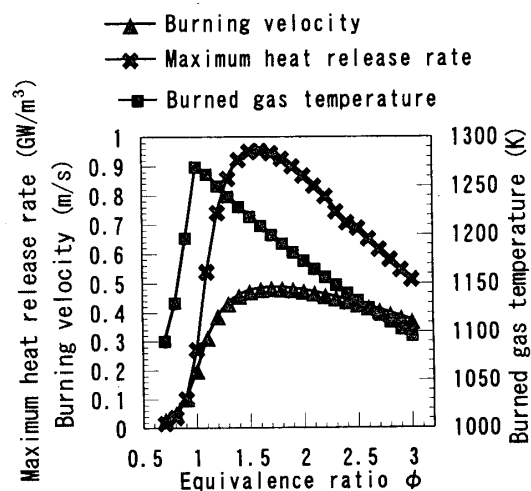
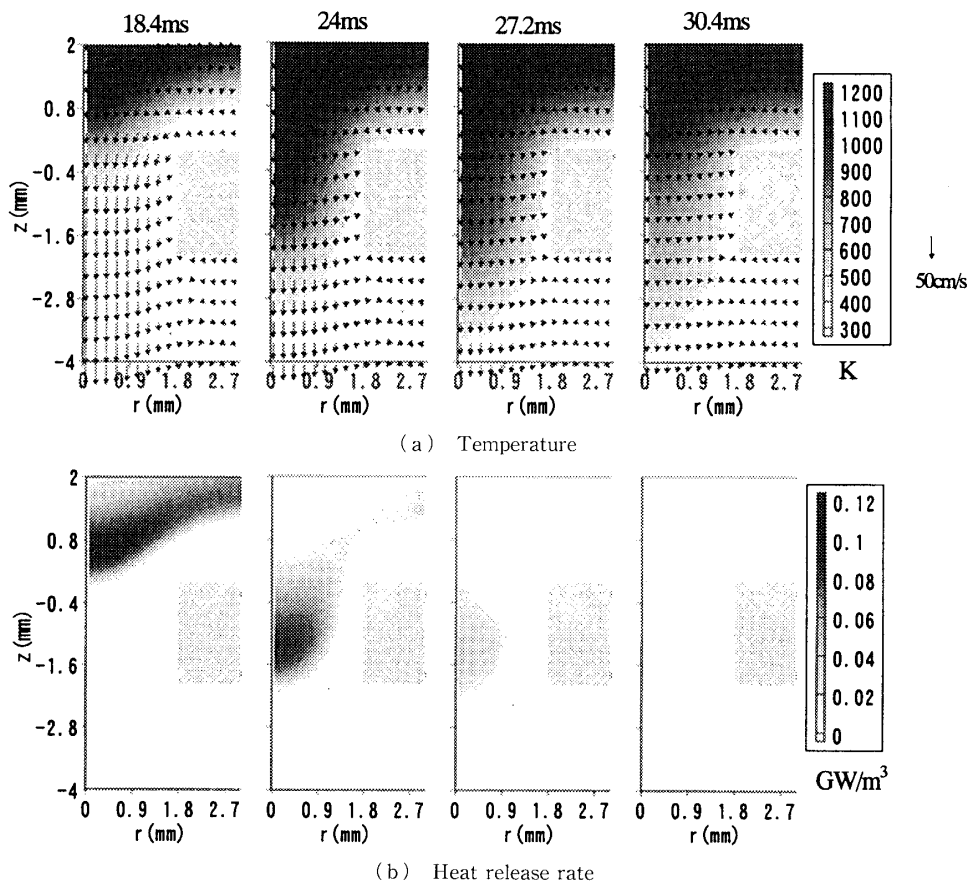


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on burning velocity, maximum heat release rate and burned gas temperature

Fig. 4 Quenching process ( $\phi=0.7$ ,  $d=3.6$  mm)

ある。なお、以下ではルイス数効果が顕著に現れると予想される消炎限界時の挙動に注目して検討する。当然ながら、消炎距離よりもかなり小さな直径の円孔の場合には、固体壁の冷却効果により、火炎は円孔部に十分に近づく前に消炎する。また、消炎距離よりもやや小さな直径の円孔の場合には、火炎が円孔部に近づき、ある程度曲げられ始めたことにより現れたルイス数効果よりも、固体壁の冷却効果が大きいときには、円孔部付近あるいは円孔内部で消炎する。

**3・2・1 流れ場** 円孔部には $z$ 軸負方向に向かう流れが存在する。この流れは火炎帯で発生する熱によって気体が膨張することにより誘起される流れである。円孔部以外の空間の体積に比べ、円孔部の体積は非常に小さいため、この膨張の効果が円孔部に顕著に現れる。熱発生速度の大きさによって膨張の度合いが変わるため、当量比によって流速は変化する。特に、中心軸付近の流速は、過濃側では希薄側に比べて4倍程度大きく、対流によって火炎が運ばれる効果大きい。また、この流れは火炎が弱まるにつれて小さくなる。

**3・2・2 温度場** 希薄側および過濃側ともに、円孔付近に火炎面が達すると、対称軸付近の火炎面の伝

ば速度は、 $z$ 軸負方向に向かう流れによって加速される。そのため、対称軸付近に未燃側に凸の火炎形状が形成される。

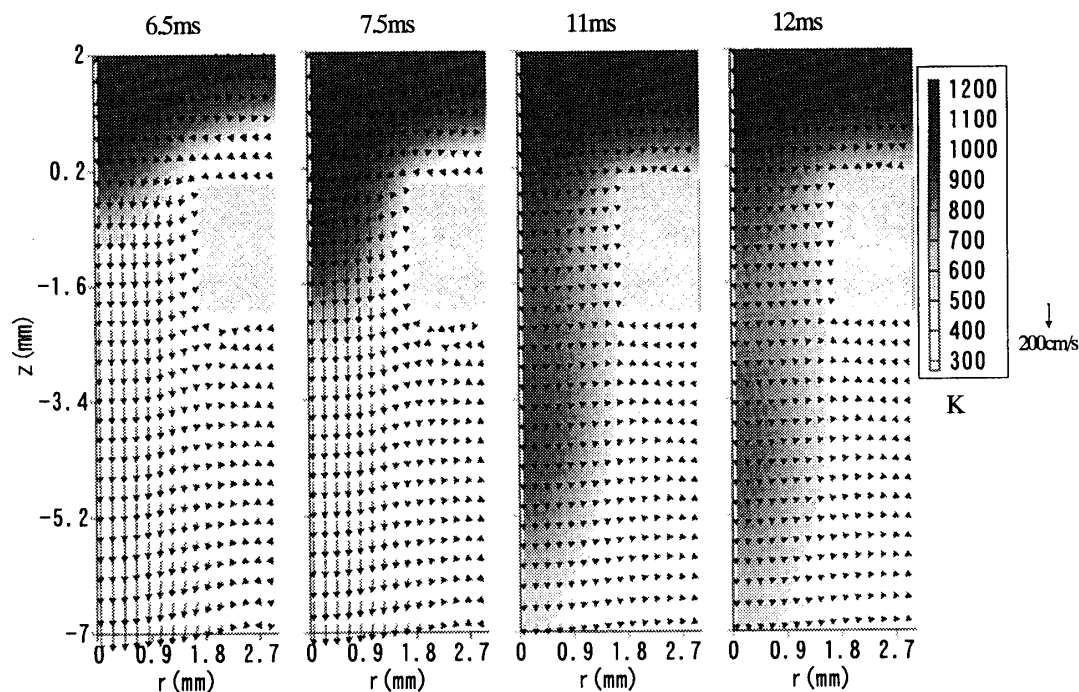
希薄側では、火炎の先端が円孔出口部から若干下方まで伝ばする。しかし、それ以上燃え広がらずに、しだいに温度が低下し消炎に至る。したがって、消炎は円孔付近で起こる。

過濃側では、火炎の先端が円孔出口部から十分離れた位置まで伝ばする。しかし、ある程度伝ばすると、それ以上 $r$ 軸方向にも $z$ 軸負方向にも伝ばせず、しだいに温度が低下し消炎に至る。

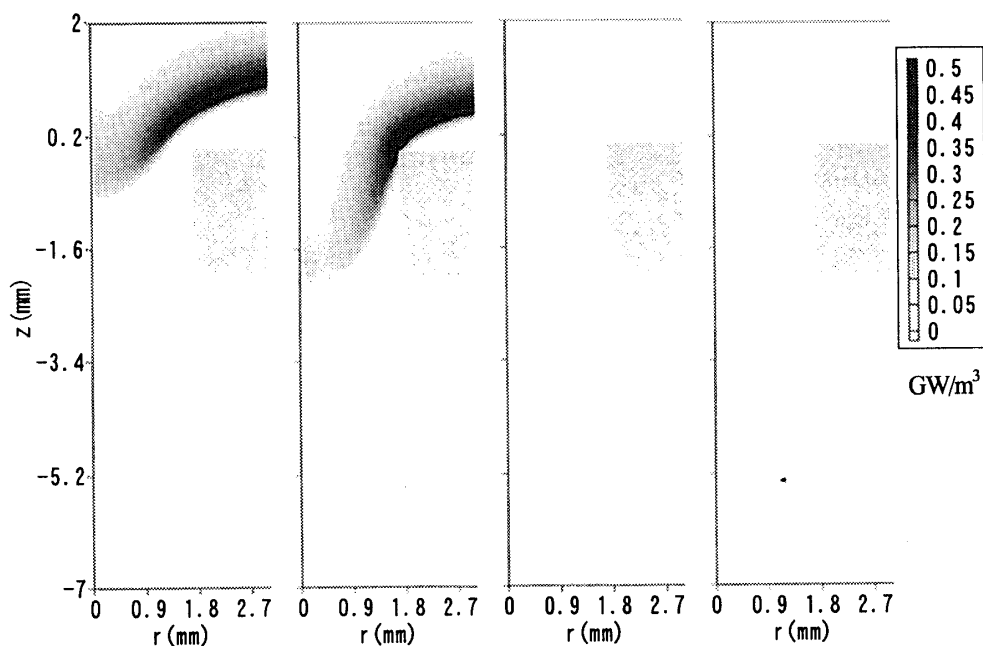
**3・2・3 熱発生速度分布** 円孔に火炎面が侵入する際、火炎面は曲率をもつことにより、ルイス数効果が現れる。そのため、局部的に火炎が強められたり、逆に弱められたりする。

希薄側では $Le < 1$ であるため、未燃側に凸の火炎面形状となる対称軸付近は火炎が強められる。逆に、既燃側に凸の火炎面形状となる固体壁に沿った円孔入口部は火炎が弱められる。

過濃側では、 $Le > 1$ であるため、未燃側に凸の火炎面形状となる対称軸付近は火炎が弱められる。逆に、既燃側に凸の火炎面形状となる固体壁に沿った円孔入



(a) Temperature



(b) Heat release rate

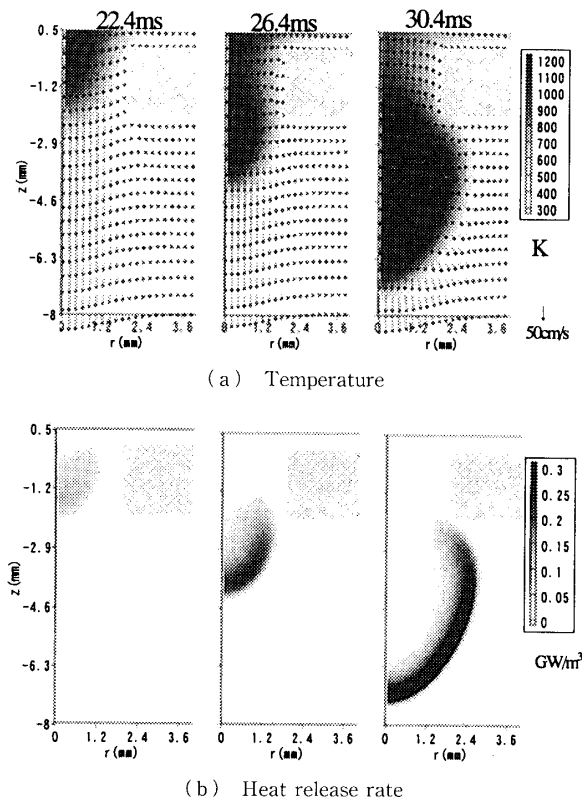
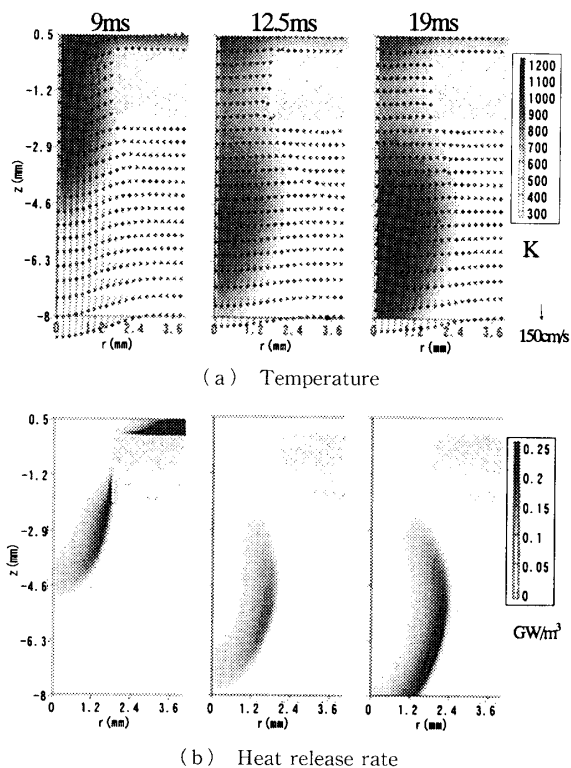
Fig. 5 Quenching process ( $\phi=3.0$ ,  $d=3.4$  mm)

口部は火炎が強められる。固体壁の温度は 300 K の低温であるが、ルイス数効果によって、固体壁付近まで強い発熱反応が起こっていることがわかる。

**3・3 燃え広がり挙動 ( $L=2$  mm の場合)**  $T_{\text{wall}}=300$  K,  $L=2$  mm,  $\phi=0.7$  および  $\phi=3.0$  における、固体壁下部の広い空間に燃え広がる際の速度ベクトルと温度および熱発生速度の分布を図 6 および図 7 に示す。これらの結果は円孔通過限界時のものであり、各

当量比において固体壁下部の広い空間に燃え広がる条件の中で、最小の円孔直径を示すものである。すなわち、円孔半径を図 4 および図 5 の場合からそれぞれ 1 格子分広げたものである。

**3・3・1 流れ場** 図 4 および図 5 の消炎限界時同様、火炎が円孔を通過する際、円孔部には  $z$  軸負方向に向かう流れが存在する。火炎が円孔を通過後は、火炎先端部から未燃側に、その他の部分より強い  $z$  軸負

Fig. 6 Passing process ( $\phi=0.7$ ,  $d=3.8$  mm)Fig. 7 Passing process ( $\phi=3.0$ ,  $d=3.6$  mm)

方向に向かう流れが生じているのがわかる。その際、円孔部には、 $z$ 軸正方向に向かう既燃ガスの流れが生じる。

**3.3.2 温度場** 希薄側では、円孔通過後、球状に大きく広がる。対称軸付近は、 $z$ 軸負方向に向かう流れによって火炎伝ば速度が、その他の火炎面に比べ速くなるので、広がり方が大きい。

過濃側では、円孔通過後、希薄側とは違い $r$ 方向にはあまり燃え広がらない。

**3.3.3 熱発生速度分布** 希薄側および過濃側ともに、円孔通過後の火炎の火炎面形状は、未燃側に凸の形状となる。よって、円孔通過後の火炎にもレイス数効果が現れる。

希薄側では、 $Le < 1$ であるため、レイス数効果によって火炎が強められ、熱発生速度は火炎面で全体的に大きい。また、その値は同じ当量比の平面火炎の熱発生速度に比べて大きい。

過濃側では、 $Le > 1$ であるため、レイス数効果によって火炎は弱められる。特に、熱発生速度は曲率が大きい対称軸付近では、他の火炎面に比べて小さい。

#### 4. 考 察

希薄および過濃混合気の消炎について、消炎限界時における挙動に注目して考察する。

**4.1 冷却固体壁の効果** 比較のために、固体壁の条件を断熱壁とした場合も計算したが、当量比、円孔径にかかわらず、消炎することはなかった。また、断熱壁の場合、冷却壁面の場合に見られるような、対称軸付近が未燃側に凸となる火炎面形状が見られず、ほぼ平面を保って円孔内を伝ばした。

このことから、冷却固体壁が消炎に及ぼす効果として次のことが考えられる。固体壁の温度が低い場合、固体壁付近の気体を冷却し、固体壁付近に火炎を形成させない。このことは、対称軸付近が未燃側に凸の火炎面形状を形成する要因の一つとなっている。また、気体の冷却効果は、火炎全体の強度を弱める働きもする。

また、円孔部に発生している $z$ 軸負方向に向かう流れは、固体壁面上では粘性の影響を受け、対称軸付近に比べ流速が小さくなる。このため、円孔内で速度差が生じている。

これらの固体壁からの冷却および流れの影響により、対称軸付近の火炎面の伝ば速度は、固体壁付近の火炎面の伝ば速度に比べ速くなる。そのため、円孔部での火炎面形状は、対称軸付近が未燃側に凸の形状となり、レイス数効果が現れる。このように、固体壁か

らの冷却と  $z$  軸負方向に向かう流れの存在は、消炎機構を特徴づける重要な要因である。

**4・2 希薄側の消炎限界時における消炎機構** 3・3・3項で述べたように、広い空間に燃え広がる際、火炎はルイス数効果によって強められる。よって、火炎先端が円孔下部より若干下方まで伝ばした場合には、広い空間中で燃え広がる際、途中で火炎が弱まり消炎に至ることはないといえる。このことにより、円孔付近で火炎に起こる効果のみで、火炎が消炎に至るといえる。

これらを踏まえて、消炎機構は以下のように考えられる。

まず、円孔付近では火炎全体として固体壁からの冷却の効果により火炎強度が弱まっている。さらに、①対称軸付近では、ルイス数効果によって火炎が強められる。②固体壁に沿った円孔入口部では、ルイス数効果によって火炎が弱められる。また同時に、固体壁からの冷却によって、固体壁付近の火炎は弱められる。

消炎は円孔付近で起こっていることから、このほかに火炎を消炎させる原因はない。よって、火炎全体が弱まっているうえに、②の効果①の効果を上回った場合に消炎するといえる。

**4・3 過濃側の消炎限界時における消炎機構** 過濃側では、希薄側と違う考慮すべきことが二つある。一つめは、円孔付近で消炎せずに、火炎先端が円孔を通過し、円孔出口部から十分離れた位置まで伝ばしてから消炎しているということである。二つめは、3・3・3項で述べたように、広い空間に燃え広がる際、火炎はルイス数効果によって弱められるということである。特に、二つめに示した効果から次のことが考えられる。それは、円孔を通過し、火炎先端が広い空間まで伝ばしても、ルイス数効果の度合いによって、火炎が消炎してしまう可能性があるということである。

これらを踏まえて、以下のような消炎機構が考えられる。

希薄側と同様に、まず火炎全体が固体壁からの冷却の効果により弱まっている。さらに、①対称軸付近では、ルイス数効果によって火炎は弱められる。②固体壁に沿った円孔入口部では、ルイス数効果によって火炎が強められる。一方、固体壁からの冷却によって、固体壁付近の火炎が弱められる。③円孔付近で消炎していないため、とりあえず円孔部で消炎しない程度の火炎強度を保って円孔を通過する。その後、④広い空間中を広がる際、ルイス数効果によって火炎は弱められる。

以上より、火炎全体が弱まっているうえに、④のル

イス数効果が、③の円孔を消炎せずに通過した火炎を消炎させるほど強い場合、消炎するといえる。

円孔部で火炎に及ぼす影響の中で、火炎を強める効果は、固体壁に沿った円孔入口部のルイス数効果のみである。しかし、過濃側では、円孔部での消炎は見られない。よって、固体壁に沿った円孔入口部のルイス数効果は、過濃側の消炎を特徴付ける重要な役割を果たしているものといえる。

## 5. 結 論

本研究では、予混合気の満たされた広い空間から、固体壁に設けた小円孔に、予混合火炎を伝ばさせた際の火炎挙動および消炎機構について数値解析により検討した。特に、燃料に水素を用いることにより、ルイス数効果が強く現れる場合を対象とした。得られたおもな結論を以下にまとめる。

(1) 火炎面は曲率をもつためルイス数効果が現れる。そのため次元予混合火炎で燃焼速度および熱発生速度が最大となる当量比において最小消炎直径を示さない。

(2) 壁厚が薄い場合、火炎面は短時間に形状を変化させるが、壁厚が厚い場合には、円孔内で一定の火炎面形状をもって伝ばすることが可能となる。このため、壁厚によって火炎挙動の非定常性が変わり、消炎直径と当量比の関係も変わる。

(3) 冷却された固体壁と  $z$  軸負方向に向かう流れにより、円孔部では、対称軸付近が未燃側に凸の火炎形状となる。そのため、火炎面は曲率をもつ。

(4) 消炎限界時には、火炎全体が固体壁からの冷却の効果により弱まっているうえに、希薄側では、固体壁に沿った円孔入口部での火炎強度を弱めるルイス数効果と固体壁からの冷却が、対称軸付近の火炎強度を強めるルイス数効果を上回った場合に消炎する。過濃側では、広い空間に広がる際の火炎強度を弱めるルイス数効果が、固体壁に沿った円孔入口部での火炎強度を強めるルイス数効果によって消炎せずに円孔を通過した火炎を消炎させるほど強い場合に消炎する。

## 文 献

- (1) 石澤静雄・片石一永・高橋秀夫, 第37回燃焼シンポジウム講演論文集, (1999), 427-428.
- (2) 石澤静雄・片石一永・高橋秀夫, 第38回燃焼シンポジウム講演論文集, (2000), 403-404.
- (3) 石澤静雄・関田和夫・高橋秀夫・関口宏治, 第39回燃焼シンポジウム講演論文集, (2001), 85-86.
- (4) 石澤静雄・関田和夫・高橋秀夫, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 465-466.

- (5) 飯田訓正・川口修・佐藤豪, 機論, **48**-435, B (1982), 2344-2351.
- (6) 飯田訓正・河野賢祐・川口修・佐藤豪, 機論, **50**-449, B (1984), 132-140.
- (7) 藤田英之・山下博史, 日本機械学会東海支部豊橋地区講演会論文集, (2002), 159-160.
- (8) 藤田英之・山下博史, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 466-467.
- (9) Gutheil, E., Balakrishnan, G. and Williams, F. A., *Reduced Kinetic Mechanisms for Application in Combustion Systems*, (1993), 177-195, Springer-Verlag.
- (10) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics, SAND 89-8009 (1989).
- (11) Smooke, M. D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
- (12) Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (1980), 126-131, McGraw-Hill.
-