

よどみ流旋回バーナを用いた超希薄燃焼の研究

システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 藤 一実、西岡 牧人

1. はじめに

希薄燃焼はエネルギーの有効利用と NO_x 削減の観点から有用である。ただし予混合火炎が伝播できる限界である「希薄可燃限界」が燃料ごとに存在し、それに近づくと燃焼が不安定になり消炎しやすくなる。この希薄燃焼の安定化技術の一つとしてガスタービンや工業用バーナに用いられる旋回流があり、旋回流は既燃ガスの逆流が未燃ガスの連続的着火を促すため希薄燃焼が可能であると考えられる。

旋回流方式を用いて希薄可燃限界を下回る「超希薄燃焼」条件下でも火炎を保持できたという報告がこれまでにいくつか存在する [1-3]。そのように一次元的な火炎伝播が全くできない条件下において安定に燃焼するという事は、何らかの特別なメカニズムが働いていることが考えられる。しかしこれらの報告の中では、超希薄燃焼が可能になった理由は全く示されていない。もし超希薄燃焼のメカニズムが解明され、希薄可燃限界を突破する方法が確立できれば、それは超希薄燃焼のみならず、通常の希薄燃焼の更なる安定化にも寄与するはずである。

構造エネルギー工学専攻燃焼研究室では、既燃ガスの逆流を伴う旋回流火炎を形成できるよどみ流旋回バーナを考案し、超希薄条件下における火炎を形成させるとともに、最希薄消炎限界の計測を行っている。またそれに加えて詳細反応数値計算を用いて火炎中における化学反応や熱伝導、物質輸送の状態を調査している。以下に、燃料としてメタンを用いた場合の最近の実験結果を紹介する。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験で用いたよどみ流旋回バーナを示す。このバーナはアクリル製の旋回流発生部と石英ガラス製の燃焼器、よどみホルダから構成される。図 2 に旋回流発生部の左半分の直接写真、および図 3 に旋回流発生部内の整流板の直接写真を示す。整流板は直径 0.9mm の穴を多数あけたもので、これによりスリット断面から噴出する流れはスリットの長手方向にほぼ様な速度になることが期待される。また、燃焼器のガラスは傾斜角 30° で緩やかに拡大し、その後、出口部内径 60mm まで

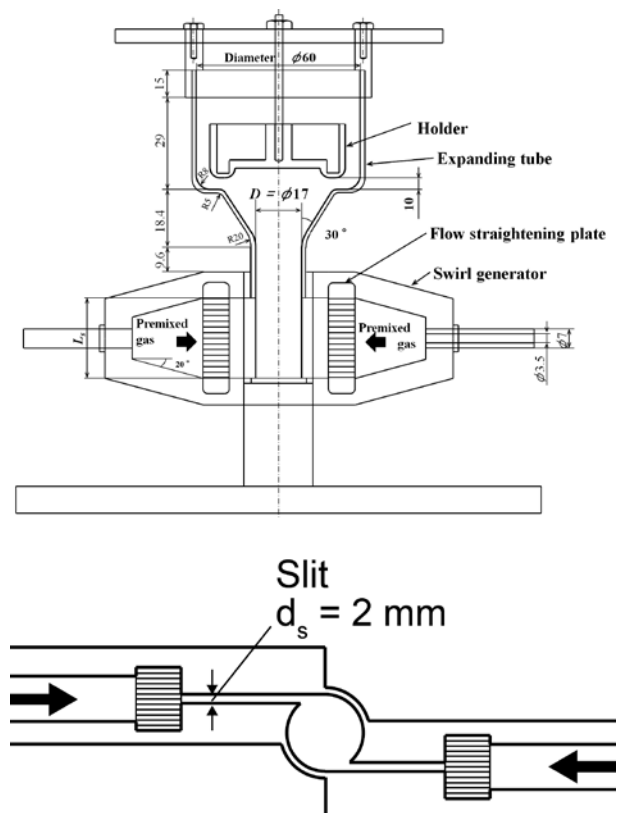


図 1 よどみ流旋回バーナの概略: (上) 横から見た図、(下) スリット部を上から見た図

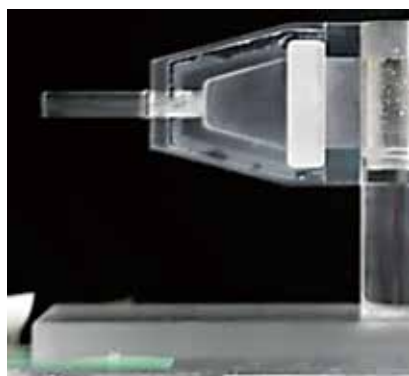


図2 旋回流発生部の写真

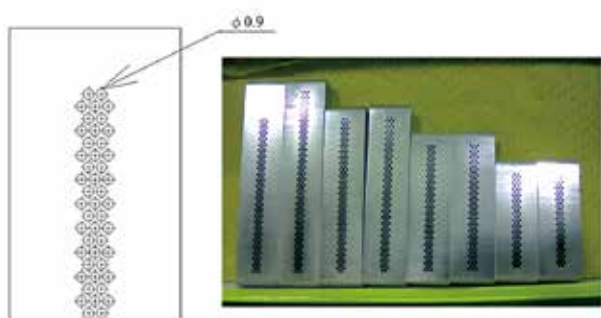


図3 旋回流発生部中の整流板の写真

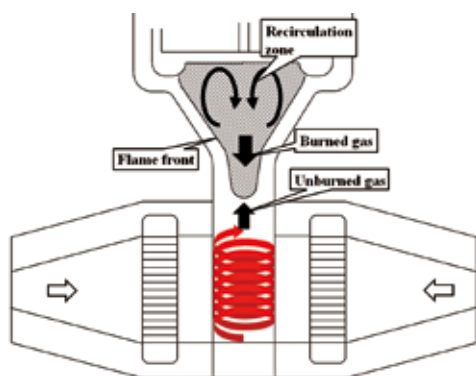


図4 形成される流れと火炎の概念図

で90°で急激に拡大する構造となっている。よどみホルダは大きな再循環領域が安定に形成されるように導入した。ただし、燃焼場にこのような物体が存在すると熱伝達による熱損失の影響が考えられる。そこで本研究では熱伝導率の異なるステンレス (SUS304) 製およびマシナブルセラミックス (MACOR) 製の2種類の材質を用いて熱伝達の影響を調べた。

響を調べた。

図4に燃焼器内で形成される流れと火炎の概念図を示す。旋回流発生部においてスリットから予混合ガスが流入して旋回流となり、図のような旋回流火炎が形成される。ここで燃焼器のガラスの内径が拡大することで旋回流の半径も拡大するため、角運動量の保存から周方向速度は減少する。それにより上に行くに従って中心軸付近の圧力回復が生じ、上側に存在する高温の既燃ガスが逆流して、火炎先端付近において未燃ガスとの対向流を形成する。なお、我々は最近の詳細反応数値計算による研究において、既燃ガスと未燃ガスとの対向流が超希薄燃焼を可能にするという結果 [4,5] を得ているため、この実験はその検証という意味を有している。

本実験装置におけるスワール数は次式で定義される。

$$S_w = \frac{\pi}{4} \frac{(D - d_s)D}{nd_s} \frac{1}{L_s} \quad (1)$$

ここで、 D 、 n 、 d_s 、 L_s はそれぞれ旋回流発生装置の内径、スリット数、スリット幅、スリット長さを表す。本研究では $D=17\text{mm}$ 、 $n=2$ 、 $d_s=2\text{mm}$ を固定しているため、スワール数は $S_w=50.069/L_s$ と表され、スリット長さ L_s にのみ反比例する。即ちスリット長さを変化させることでスワール数を変化させることが可能な構造である。本研究では、スリット長さ L_s を10mm、20mm、30mmの3種類のものを用いた。それらに対応するスワール数の概算値はそれぞれ5.01、2.50および1.67である。

以上、整流板を含む旋回流発生部とよどみホルダは、研究基盤総合センター工作部門で製作していただいた。

図5に本実験装置の供給系の概略図を示す。使用するメタンはボンベから、空気はベビコンによって実験室内の空気を圧縮し、それぞれ圧力調節弁およびマスフローコントローラを用いて流量を制

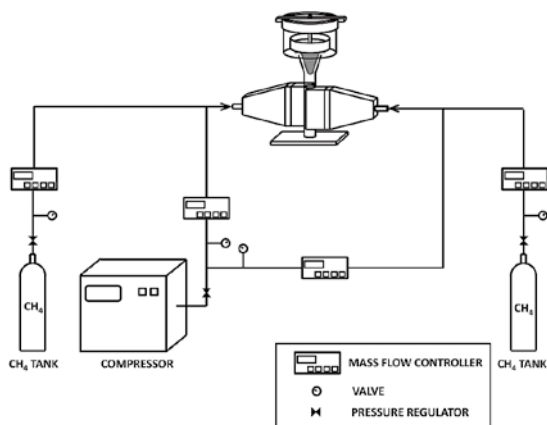


図5 供給系の概略図

御したのち、一様に混合されてスリットに至る。スリット出口から噴出される流量の変化に対するメタン空気予混合火炎の希薄消炎限界の計測においては、混合気流量を固定し、混合気中のメタン濃度を減少させ、消炎した点の当量比を希薄消炎限界として計測した。火炎形状の調査には直接写真を用いた。なお、ホルダ下部の表面温度が定常であることを確認するために熱電対によるモニタリングを行った。

4. 実験結果

4.1. よどみ流旋回バーナによる超希薄火炎

表1はホルダの材質がステンレス、 $S_w = 5.01$ の場合において、総流量 Q を2.00、2.40、2.50、3.00および3.60L/minと固定し混合気の当量比を変化させたときの火炎形状を示す。また、それぞれの火炎形状の直接写真に燃焼器の外形を白線で示し、表の空欄は消炎を意味している。表に示す通り、総流量によらずメタン空気予混合火炎の希薄可燃限界 $\phi = 0.50$ を大きく下回る超希薄条件下で安定した火炎を形成することが確認できた。また、火炎先端付近において軸対称性の良い火炎を形成することに成功した。ただし、よどみホルダ付近においては、ここに示す全ての条件において熱損失のために消炎していることがわかる。

表1 条件による火炎形状の変化

	$Q = 2.00$ L/min $W_f = 0.85$ m/s	$Q = 2.40$ L/min $W_f = 1.00$ m/s	$Q = 2.50$ L/min $W_f = 1.05$ m/s	$Q = 3.00$ L/min $W_f = 1.25$ m/s	$Q = 3.60$ L/min $W_f = 1.50$ m/s
$\phi = 0.490$					
$\phi = 0.485$					
$\phi = 0.480$					
$\phi = 0.475$					
$\phi = 0.470$					
$\phi = 0.465$					
$\phi = 0.460$					
$\phi = 0.455$					

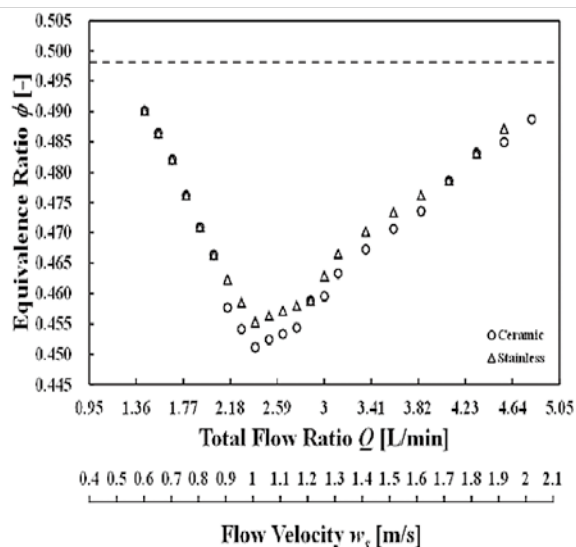


図6 ホルダの熱伝導率による希薄消炎限界の変化

4.2. ホルダ材質による希薄消炎限界の変化

熱伝導率の異なるホルダを用いたときの希薄消炎限界を調べた結果を図6に示す。ここで $S_w = 5.01$ とした。破線は希薄可燃限界である。プロットより上側は安定燃焼範囲、下側は消炎範囲を表している。この図から、熱伝導率の違いによらず、総流量 Q が増加するとともに希薄消炎限界が減少し、その後増加していることがわかる。この最小値を最希薄消炎限界 $\phi_{leanest}$ とし、熱伝導率 λ および熱電対から得られたホルダ下部の表面温度 T_s を表2に示す。このように、ホルダの材質によらず最希薄消炎限界が希薄可燃限界 $\phi = 0.50$ を大きく下回る超希薄条件下で安定した火炎を形成することに成功した。表に示すようにホルダの熱伝導率が SUS304 の 16.0 W/mK から MACOR の 1.46 W/mK に減少すると $\phi_{leanest}$ は 0.455 から 0.451 へとより希薄側にシフトしたことから、今後、更に熱伝導率が低い材料を使用することで、より希薄まで燃焼できることが期待される。

表2 最希薄消炎限界 (ホルダによる違い)

	$\phi_{leanest}$	λ W/mK	T_s °C
SUS304	0.455	16.0	280
MACOR	0.451	1.46	350

4.3. スワール数による希薄消炎限界の変化

スワール数を変化させたときの希薄消炎限界を調べた結果を図7に示す。いずれのスワール数においても、流量 Q が増加すると希薄消炎限界の減少し、その後増加している。つまり、各々のスワール数における最希薄消炎限界時の流量は異なるが、スワール数に対応した最適な流量が存在し、それより少ない流量側、多い流量側に安定範囲が狭くなっている。表3に各々のスワール数における最希薄消炎限界の値を示す。このように、スワール数が $S_w = 1.67, 2.50$ および 5.01 と増加すると最希薄消炎限界 $\phi_{leanest}$ はそれぞれ 0.475、0.465 および 0.451

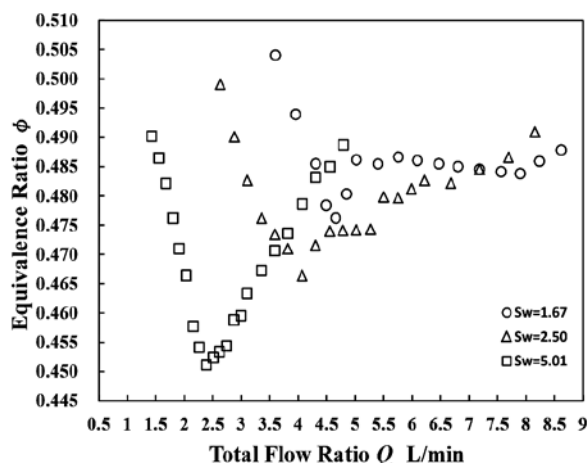


図7 スワール数による希薄消炎限界の変化

表3 最希薄消炎限界 (スワール数による違い)

S_w	1.67	2.50	5.01
$\phi_{leanest}$	0.475	0.465	0.451

と希薄側にシフトしている。更に大きなスワール数を用いればより希薄な火炎が形成できる可能性がある。

5. おわりに

本研究では、燃焼器の製作にあたり研究基盤総合センター工作部門には大変お世話になった。ここに深く謝意を表す。

参考文献

1. 上島光浩, 小沼義昭, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 94-95 (2006).
2. 上島光浩, 第47回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 48-49 (2009).
3. 荒川善行, 早川晃弘, Somarathne, K.D., Kunkuma, A., 工藤琢, 小林秀昭, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 376-377 (2015).
4. M. Nishioka, Z. Shen, A. Uemichi, Combustion and Flame 158, pp. 2188-2198 (2011).
5. A. Uemichi, M. Nishioka, Combust Theory and Modeling 19(1), pp. 58-80 (2015).