

可燃性固体の燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響* (周囲温度の影響と鉛直下方燃え拡がり限界酸素濃度)

山本和弘*¹, 森 幸一*², 小沼義昭*¹

Effects of Ambient Atmosphere on Flame Spread over Solid Fuel (Effects of Ambient Temperature and Limiting Oxygen Concentration for Downward Flame Spread)

Kazuhiro YAMAMOTO*³, Koichi MORI and Yoshiaki ONUMA

*³ Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology,
Hibridaoka, Tempaku, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

The downward flame spread over solid fuel has been studied. Paper sheets are used as samples, and experiments are conducted in a combustion chamber with a vertical duct to obtain uniform ambient atmosphere, keeping the inflow velocity constant. The gas composition and temperature can be changed to examine the effects of ambient atmosphere. The downward flame spread rate has been measured at lower oxygen concentration and preheated temperature ($\sim 150^\circ\text{C}$). Results show that, flame spread rate is increased with an increase of ambient temperature. As the oxygen concentration is decreased, the flame spread rate is decreased monotonically. Then, the flame can not propagate and the flame extinction occurs at some oxygen concentration. We define this condition as the limiting oxygen concentration for downward flame spread. It can be reduced as the ambient temperature is increased. To discuss these experimental facts, we estimate the net heat flow into the preheat region, which is an important factor to sustain the flame spread. The net heat flow into the preheat region is decreased as the oxygen concentration is smaller. It is interesting to note that this heat flow near the flame extinction is smaller with an increase of the ambient temperature. These experimental data are useful to make clear the controlling mechanism of flame spread.

Key Words: Flame Spread, Solid Fuel, Extinction, Diffusion Combustion, Heat Transfer

1. 緒 論

可燃性固体の燃え拡がりに関する研究は、火災時の災害の抑制や防災上有用である。燃え拡がり現象は、火災からの熱伝導やふく射による熱輸送、対流による熱・物質移動、可燃性固体の熱分解、気相中の燃焼反応などが含まれ、非常に複雑な現象である。これまでも数多くの研究が行われており、特に紙やPMMAなど比較的实验に適した均質な試料を対象にした研究が多い。例えば de Ris は、薄い紙を想定した可燃性固体表面に沿って進行する火災の燃え拡がり現象を理論的に解析している⁽¹⁾。Fernandez-Pello ら⁽²⁾⁽³⁾ は、対向する気流速度および酸素濃度を変化させて鉛直下方への紙とPMMAの燃え拡がりを調べ、可燃性固体が熱的に薄い場合と厚い場合に分けて現象を解析した。また、Hirano らは試料にろ紙を用いて対向する気流の影響を鉛直下方と上方の火災伝ばに対して行い⁽⁴⁾、燃え拡がりのメカニズムについて検討した⁽⁵⁾。

試料が熱的に薄い場合、燃え拡がり速度は密度と厚さの積、すなわち単位面積当たりの重量に反比例することが明らかとなっている。Di Blasi は、セルロース系の固体燃料を想定し、炭化過程も考慮した可燃性固体の燃え拡がりを数値的に解析した⁽⁶⁾。実験と比較した結果、計算により予測された燃え拡がり速度は実験結果とほぼ一致した。一方、熱的に厚い場合については、Suzuki らが不安定な火災の燃え拡がりに着目した研究を行っている⁽⁷⁾。

このように、可燃性固体の燃え拡がりに関する研究は古くから行われているが、最近では微小重力下での実験が行われるなど⁽⁸⁾、これまでは難しかったデータの取得や解析が行われている。また、近年の飛躍的な計算機の発達から、直接燃え拡がり現象を数値的に扱うことが可能となってきた。可燃性固体の燃え拡がり現象に対する三次元の数値計算が行われ、酸素濃度を変えた場合の火災構造と燃え拡がり速度の変化が検討された⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかしながら計算では、一段総括反応など単純な反応機構が用いられており、モデルの妥当性を検討するにはさらに多くのデータが必要となる。また、特に周囲雰囲気の温度の影響に対しては定量的なデータが不足している。なぜなら、これまでは試料をヒータ⁽¹¹⁾もしくはふく射パネル⁽¹²⁾⁽¹³⁾で加熱すると温

* 原稿受付 2002年1月21日。

*¹ 正員、豊橋技術科学大学工学部(〒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

度の制御が難しくなる。周囲の温度が時間的に変化すると局所的に試料の温度が異なり、燃え拡がり速度が一定とならないなどの問題があった。

そこで本研究では、周囲温度と酸素濃度に着目し、可燃性固体の燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響を調べることを目的としている。特に、酸素濃度を変化させたときの燃え拡がりの限界について詳細に検討した。試料には、厚さと密度の異なる5種類のろ紙を用い、対向流中における鉛直下方への燃え拡がりについて検討した。燃焼実験を風洞により整流した燃焼ダクト内で行うことにより、周囲雰囲気の条件をほぼ均一にすることが可能である。試料および周囲の温度を150°Cまで加熱し、対向する空気中に窒素を添加することで希釈の影響を調べた。

2. 実験装置

可燃性固体の燃え拡がり現象に及ぼす周囲雰囲気の影響について調べるため、図1に示すような実験装置を作製した。装置は、予熱器、整流装置(風洞)、燃焼ダクトからなる。これにより対向する混合気の流速、温度、組成を変化させることができる。発熱体には、螺旋状に加工したカンタル線(3.61 Ω)を用いた。これにより、例えば空気流量871/min、電圧50 Vにおいて、予熱器出口でおよそ580°Cの予熱空気を得ることが可能である。対向する気流の速度は25 cm/s一定(風洞出口平均速度)とし、空気を窒素で希釈することにより対向する気流中の酸素濃度を変化させた。実験の際は、熱電対で予熱器出口および燃焼ダクト内の温度を測定し、予熱器を制御した。試料を燃焼させる燃焼ダクトの寸法は、長さが200 mm、断面は80 mm×80 mmである。燃え拡がりのようすを観察するために、一部を石英ガラスとした。

試料には厚さと密度が異なる5種類のろ紙を用いた。試料を図2に示すようなステンレス製のホルダで燃焼ダクト内に固定し、着火は試料に対し水平に取付けたニクロム線にて一様に行った。試料の幅は任意に変えることが可能であるが、火炎が燃え拡がる際の二次元性を考慮し、試料の幅を40 mmとして実験を行った。火炎の燃え拡がり速度は、図2に示しているようにあらかじめ中心線を試料上に書いておき、10 mm間隔で引いた水平線を中心線上の先行する火炎先端(青炎)が到達する時間を測ることで求めた。また、実験条件を一定にするため、試料を湿度25%以下のデシケータ中で48 h以上乾燥させたのち使用した。表1に、使用した5種類のろ紙の物性値を示す(試料番号AからE)。試料は東洋炉紙社製であり、括弧内に製

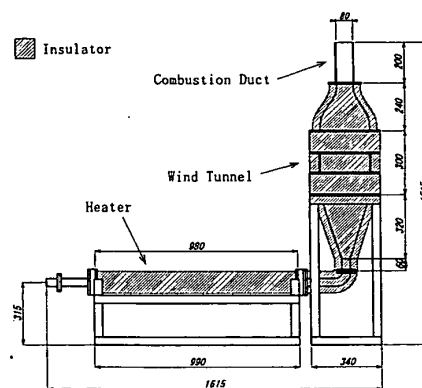


Fig. 1 Experimental apparatus

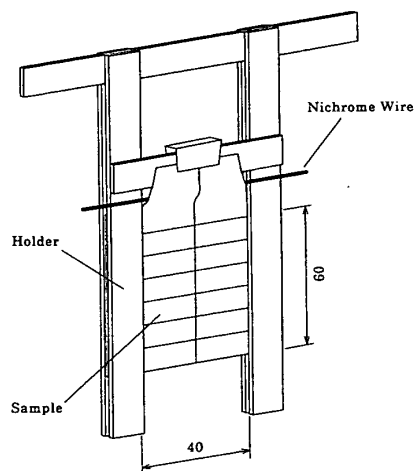


Fig. 2 Holder and paper sample

品番号を記した。ここで、 δ はろ紙の厚さ、 ρ はろ紙の密度である。

なお、予備実験として、室温(20°C)の空気雰囲気下での鉛直下方への燃え拡がり速度 V を測定した。燃え拡がり速度は各試行において多少変化するため、5回測定し平均している。密度と厚さの積である $\rho\delta$ の逆数で整理した結果を図3に示す。これによると、 $\rho\delta$ の逆数の値が増加すると燃え拡がり速度は直線的に増加した。この結果を Suzuki ら⁽⁷⁾の実験結果と比較したところ、燃え拡がり速度の $\rho\delta$ に対する依存性はほぼ一致した。試料が熱的に薄い場合、試料内部の温度はほぼ均一であると考えられるため、火炎による気相から固相(試料)への熱移動が重要となる。このとき、燃え拡がり速度は $\rho\delta$ 、すなわち単位面積当たりの重量に反比例することが知られている。図3に示された結果より $\rho\delta V$ が一定となることから、今回は試料が熱的に薄い範囲内にあることが確認された。

3. 実験結果

3.1 予熱の影響

まず、予熱の影響について調

Table 1 Physical properties of samples

No. (Sample)	δ mm	ρ mg/cm ³	$\rho \delta$ g/m ²
A (7)	0.18	480	87
B (4A)	0.12	800	96
C (3)	0.23	490	113
D (2)	0.26	460	125
E (131)	0.25	560	140

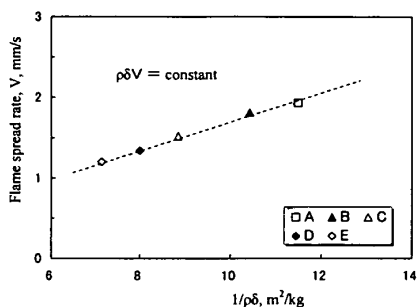
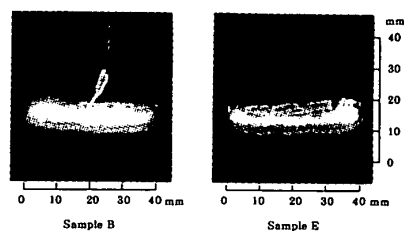


Fig. 3 Dependence of flame spread rate on $\rho\delta$

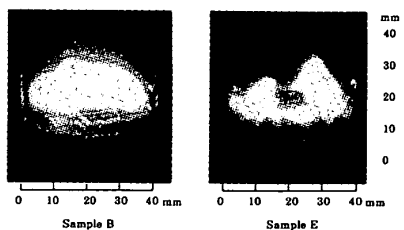
べるため、火炎のようすを観察した。図4に35mmカメラにて撮影された火炎の直接写真を示す。絞りは4, シャッタースピードは1/8とし、試料BとEについて室温(20°C)と150°Cに予熱した場合の結果を比較している。今回選んだ試料の中で、試料Bは密度が最も大きく試料Eは比較的小さいが、単位面積当たりの重量は試料Eが最も大きい。これによると、ダクト内部が室温と150°Cに予熱したものを比べると、予熱により青炎の領域が拡がり全体の火炎長が大きくなった。この傾向は、ヒータで紙の温度を変化させたCampbellの実験結果⁽¹¹⁾と同様であった。

次に、予熱した場合の鉛直下方への燃え拡がり速度を求めた。図5は試料Eに対し、温度がそれぞれ20, 50, 100, 150°Cの場合の火炎位置 L の時間変化を示す。なお、着火の影響を避けるため、着火位置から下方20mmで測定を開始した。これによるといずれの場合も、火炎は時間とともにほぼ一定の速度で移動している。したがって、試料の温度と周囲雰囲気条件がほぼ均一であることが推察される。火炎の移動速度は図5のこう配により求められることから、予熱すると燃え拡がり速度が速くなることがわかった。

図3で確認されたように、今回選んだ試料は熱的に薄いものであるから、試料の厚さと密度によらず $\rho\delta V$ は一定となる。そこで、異なる試料について予熱温度を同様に变化させ、この $\rho\delta V$ の値を求めた。試料BとEについて得られた結果を図6に示す。これによると、各試料で $\rho\delta V$ の値は同じになったが、



(a) Room temperature (20°C)



(b) 150°C

Fig. 4 Direct photographs of flames spreading downward over a paper sheet

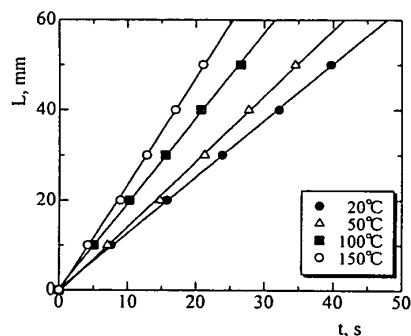


Fig. 5 Position of flame front; paper No. E

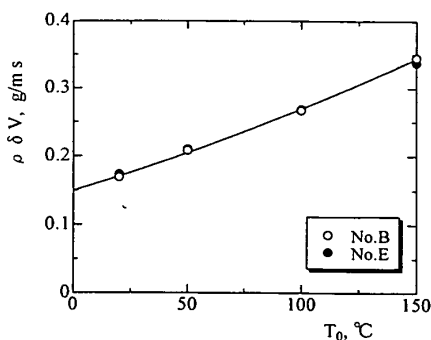


Fig. 6 Variations of $\rho\delta V$ with initial temperature

この一定値は予熱することにより増加することがわかった。

3・2 希釈の影響 次に希釈の影響について検討した。対向する空気に窒素を添加し、酸素濃度 C_{O_2} を低下させた。通常、空気中には体積濃度で約21%の酸素が存在するので、酸素濃度を21%から火炎が鉛直下方へ燃え拡がらなくなるまで变化させた。図7は予熱温度が150°Cのときに、試料B, Eを用いたときの火炎

の直接写真である。酸素濃度は20%から1%ごとに变化させ、16%が燃え拡がり限界付近である。これによると窒素で希釈して酸素濃度を減少させると、全体の火炎長が減少した。また青炎の長さも小さくなっていることがわかる。さらに酸素濃度を減少させると、火炎の燃え拡がりが不安定になり、やがて初期に試料を着火させても火炎が途中で燃え拡がらなくなるようすが観察された。

そこで、酸素濃度を变化させたときの燃え拡がりのようすの変化について詳しく調べた。周囲温度を室温(20°C)、50、100°C、および150°Cと一定にし、酸素濃度を变化させたときの鉛直下方への燃え拡がり速度を

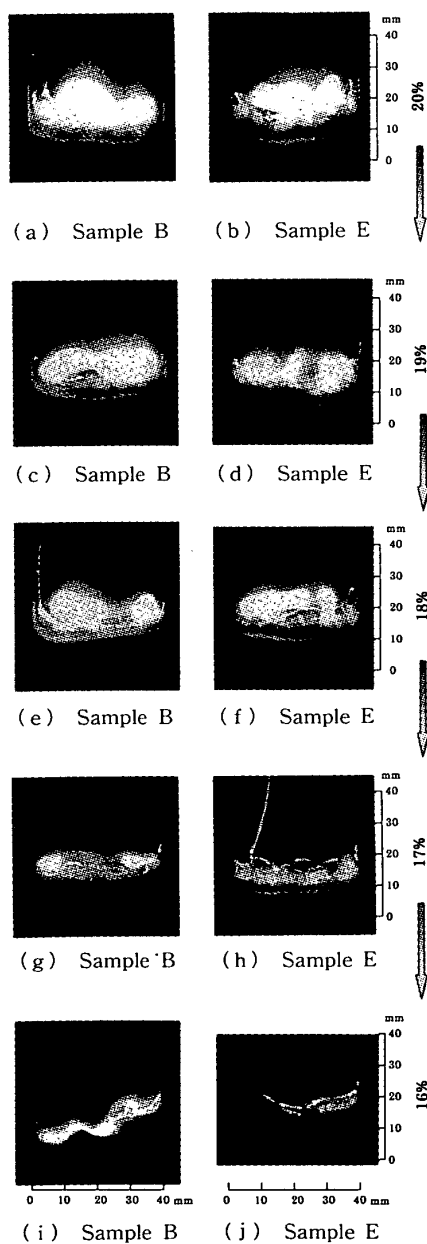


Fig. 7 Direct photographs of flames spreading downward over a paper sheet; $T=150^{\circ}\text{C}$

試料 B について求めた結果を図 8 に示す。ただし、周囲温度が室温の場合、空気に酸素を添加することで酸素濃度を空気よりも高くする実験も行った。なお、酸素濃度により燃え拡がりのようすが大きく变化したため、領域 I: 安定に燃え拡がる領域、領域 II: 不安定に燃え拡がる領域、領域 III: 燃え拡がることのできない領域、の 3 領域に分けて図 8 に示した。ちなみに Suzuki らは、紙の厚さが大きくなると燃え拡がりが不安定になることに着目し、このような分類を紙の厚さに対して行っている⁽⁷⁾。

比較的酸素濃度が高いときは火炎は安定に燃え拡がる(領域 I)、図 8(a)の室温の場合の結果によると、酸素濃度を空気中の 21% よりも増加させると、ほぼ直線的に燃え拡がり速度が増加した。この場合、図 7 でも観察されたように、火炎の形状はほぼ横方向に同様であり、火炎は定常に燃え拡がる。逆に酸素濃度を空気のとより減少させると、火炎の燃え拡がり速度は

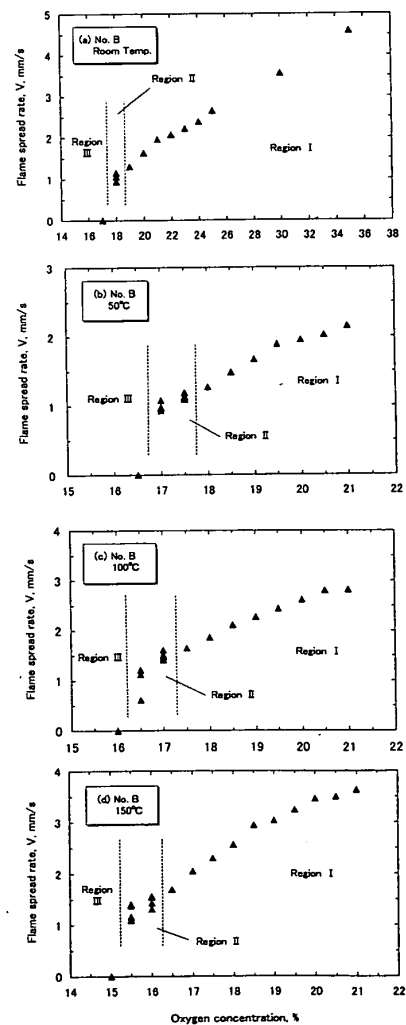


Fig. 8 Variations of flame spread rate with oxygen concentration; No. B

減少し、図7(i)のように火炎長が短くなって火炎面が波打つようになる(領域II)。また、さらに酸素濃度を減少させると火炎は停滞し、燃え拡がらなくなって局所的に消炎が起こった。火炎の直接写真により観測した結果、酸素濃度を低下させると鉛直方向の火炎の長さや試料表面上の変色領域(熱分解領域にほぼ相当する)の幅も減少した。さらに酸素濃度を減少させると、初期に着火させてもすぐに消炎した(領域III)。すでにいくつかの実験において、この酸素濃度の減少による燃え拡がり速度の低下が確認されているが⁽³⁾⁽⁶⁾、室温により行われた実験であり不安定挙動についてはあまり検討されていない。したがって、図8の四つの結果を比較することで、周囲温度を変化させたときの影響について検討した。まず、温度が上昇するにつれ安定に燃え拡がる領域が拡大していることがわかる。これに伴い、不安定に燃え拡がる領域は低酸素側へ移動した。

そこで、それ以上燃え拡がらなくなる酸素濃度を鉛直下方への燃え拡がり限界酸素濃度とし、異なる試料を用いてその限界酸素濃度の変化を定量的に調べ、比較することにした。試料B, Eについて、周囲温度を変化させ、限界酸素濃度を求めた結果を図9に示す。これによると、限界酸素濃度は周囲温度が増加すると単調に減少することがわかった。また、試料Bのほうがより低い酸素濃度でも燃え拡がりが維持されていた。

4. 考 察

本実験では、可燃性固体の燃え拡がりに及ぼす周囲温度と希釈の影響を実験的に検討した。可燃性固体の燃え拡がりについては多くの研究があり、火炎からの熱流入により可燃性の熱分解ガスが放出され、拡散により輸送された酸素と反応することで火炎が維持される。Di Blasiはこの機構の定式化を行い、燃え拡がり

を計算により模擬した。これらの研究の中で、火炎の燃え拡がりには火炎から予熱領域への熱移動が重要であることが指摘されている。これを模式的に示したものが図10である。図10では、対向する気流速度を U 、火炎の燃え拡がり速度を V 、気相から予熱領域へ流入する単位時間の熱量を Q で示している。Campbellは予熱領域に流入する熱量を、その領域における熱の出入りを考慮することで算出した⁽¹¹⁾。熱的に薄い場合は固相内の熱移動が無視できることから、提案された式において固相内の熱移動を無視すると、以下の式が得られる。

$$Q = \frac{1}{2} \rho \delta w V C (T_p - T_0)$$

ここで、 T_p [K]は固体燃料の熱分解温度、 T_0 [K]はその初期温度であり、 w は試料の幅、 C [J/g·K]は比熱である(セルロースでは1.22 [J/g·K])。つまり、火炎が定常で伝播している場合は、気相から予熱領域に流入する熱量は、初期温度から熱分解温度まで上昇させるのに必要な熱量と釣り合うことを意味している。Suzukiらは熱的に厚い場合に対し、火炎が可燃性固体上を鉛直下方へ燃え拡がる場合の予熱領域への熱流入量を求めている⁽⁷⁾。この場合、予熱領域への熱流入量は、気相から試料表面に流入する熱量と固相内の熱分解領域から予熱領域へ流入する熱量の和となる。ただし、固相内の熱移動を無視すれば、上記の試料が熱的に薄い場合と同じ式になる。

すでに図3でも示したように、熱的に薄い場合は $\rho \delta V$ が一定となる。試料の密度や厚さなどの特性が変わっても、予熱領域への熱流入量が一定であれば、 $\rho \delta V$ が一定となることはこの式から説明できる。また図6において、周囲温度が増加するとこの一定値である $\rho \delta V$ が増加したが、周囲の温度が高いほど熱分解温度まで試料の温度を増加させるのに必要な熱量は小さくてすむから、予熱領域に流入する熱量が一定であれば、周囲の温度が増加することにより燃え拡がり

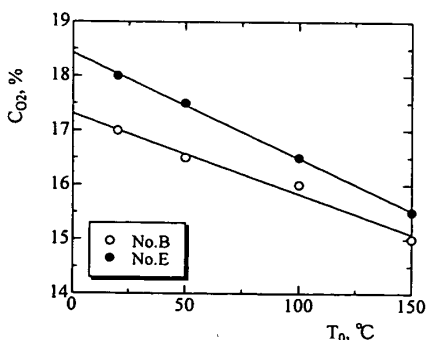


Fig. 9 Variations of limiting oxygen concentration with initial temperature

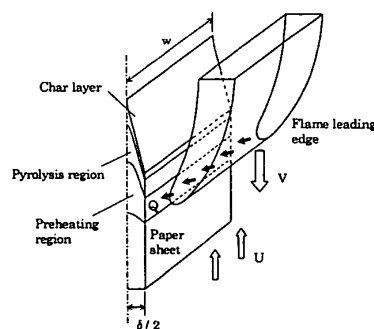


Fig. 10 Schematic of downward flame spread

速度も増加することになる。Suzukiらは、沸点の異なる可燃性液体をろ紙に浸潤させることにより試料の気化特性を変化させた⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。その結果、沸点の低い燃料を浸潤させた場合ほど燃え拡がり速度が大きくなることがわかった。この実験結果は、可燃性液体を気化させるのに必要な熱量が、沸点が低いものほど小さいことを考えれば説明できるものと思われる。したがって本研究でも、上式をもとに周囲温度の増加による燃え拡がり速度の増加を説明できる可能性がある。

そこで、この式により気相から予熱領域への熱流入量を見積もることにした。ここで、ろ紙の熱分解温度を370°Cとした。まず、希釈を行わない場合について、周囲温度を変化させて Q を求めた。各試料に対して得られた結果をまとめて図11に示す。これによると、周囲の温度が一定であれば、試料の厚さと密度が異なっても、予熱領域に流入する熱量 Q はほぼ同じ値になることがわかった。しかしながら、周囲の温度を変化させると流入する熱量は一定ではなく、増加し

ていることがわかった。したがって、図6で明らかとなった周囲温度の上昇による燃え拡がり速度の増加は、温度を熱分解温度まで増加させるのに必要な熱量が小さくなった分だけ燃え拡がり速度が単に増加したのではなく、火炎からの熱流入量も大きくなることがわかった。

次に、酸素濃度を変化させた場合について同様に Q の値を求めた。試料B, Eについて得られた結果を図12に示す。これによると、酸素濃度が低下すると予熱領域に流入する熱量が小さくなっていることがわかる。これは、火炎温度が低下したことにより、気相から試料表面への熱流束が減少したことによるものと思われる。また、酸素濃度が同じであれば周囲温度が高いほど Q の値は増加した。消炎時の Q を見積もったところ(点線)、予熱するとより低い値でも燃え拡がり維持されること、また、試料BとEでは燃え拡がり限界酸素濃度が異なるにもかかわらず、消炎したときの Q の値がほぼ同じであることがわかった。

以上の結果から、火炎の燃え拡がりを維持するには、予熱領域に流入する熱量が重要であることが推察された。おそらく、気相中に存在する火炎からの熱伝導およびふく射の影響が重要であると思われる。佐藤らも周囲温度は変えていないが、室温における二次元の温度分布をもとに酸素濃度を変化させたときの火炎構造の変化を調べている⁽¹⁶⁾。今後、気相の温度分布を調べ、予熱および希釈の影響をさらに検討していく予定である。

5. 結 論

本研究では、試料に厚さと密度の異なる5種類のろ紙を用いて、対向流中における可燃性固体の鉛直下方への燃え拡がりについて調べた。特に周囲の温度と酸素濃度に着目して、燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響について検討した。燃焼実験を風洞により整流した燃焼ダクト内で行うことにより、周囲雰囲気の条件をほぼ均一にすることが可能である。試料および周囲の温度を150°Cまで加熱し、対向する空気に窒素を添加することで希釈の影響を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 周囲の温度が増加すると燃え拡がり速度は増加する。予熱領域に流入する熱量を計算したところ、試料の種類によらずほぼ同じであり、周囲の温度が増加すると予熱領域に流入する熱量も増加した。

(2) 酸素濃度を低下させると火炎の燃え拡がりが不安定になり、やがて消炎する。初期に着火しても下方へ燃え拡がらなくなる限界の酸素濃度を下方燃え拡

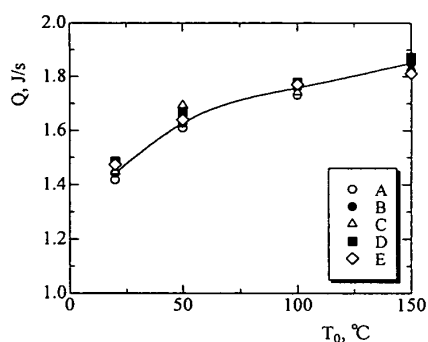


Fig. 11 Heat flow into preheat region

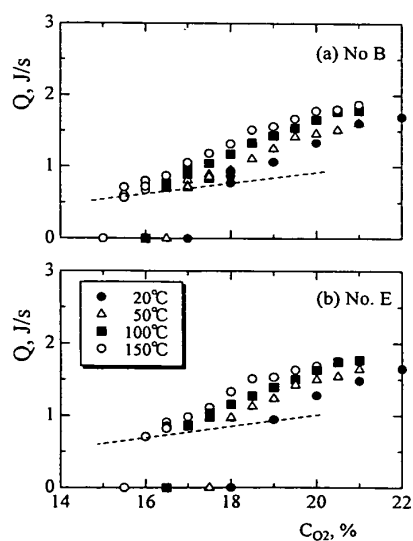


Fig. 12 Heat flow into preheat region

がり限界酸素濃度とすると、この限界酸素濃度は周囲温度を増加させると単調に減少し、火炎が安定に燃え拡がる範囲も拡大する。

(3) 燃え拡がり限界付近の予熱領域への熱流入量を比較した結果、周囲温度を増加させるとより小さい熱流入量でも燃え拡がりが維持される。

文 献

- (1) de Ris, J. N., *Proc. 12th Symp. (Int.) Combust.*, (1969), 241-252.
- (2) Femandez-Pello, A. C. and Williams, F. A., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1975), 217-231.
- (3) Femandez-Pello, A. C. Ray, S. R. and Glassman, I., *Proc. 18th Symp. (Int.) Combust.*, (1981), 579-589.
- (4) Hirano, T., Sato, K. and Tazawa, K., *Combust. Flame*, **26**, (1976), 191-200.
- (5) Femandez-Pello, A. C. and Hirano T., *Combust. Sci. Technol.*, **32**, (1983), 1-31.
- (6) Di Blasi, C., *Combust. Flame*, **97**, (1994), 225-239.
- (7) Suzuki, M., Dobashi, R. and Hirano, T., *Proc. 25th Symp. (Int.) Combust.*, (1994), 1439-1446.
- (8) Honda, L. K. and Ronney, P. D., *Combust. Sci. Technol.*, **133**, (1998), 267-291.
- (9) Mell, W. E. and Kashiwagi, T., *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, (1998), 2635-2641.
- (10) Shih, Hsin-Yi and T'ien, J. S., *Proc. Combust. Inst.*, **28**, (2000), 2777-2784.
- (11) Campbell, A. S., *Combust. Sci. Technol.*, **3**, (1971), 103-120.
- (12) Hirano, T. and Sato, K., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1975), 233-241.
- (13) Hirano, T. and Tazawa, K., *Combust. Flame*, **32**, (1978), 95-105.
- (14) Suzuki, T. and Hirano, T., *Proc. Fire Sci. Technol. Asian Conf.*, (1992), 445-460.
- (15) 鈴木健・平野敏右, 日本火災学会論文集, **42**, (1995), 31-36.
- (16) 佐藤研二・酒井康弘・町田貴成, 第33回燃焼シンポジウム前刷り集, (1995), 362-364.