

可燃性固体の燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響*

(第2報, 希釈の影響と気相の温度測定)

山本和弘*¹, 森 幸一*², 小沼義昭*¹

Effects of Ambient Atmosphere on Flame Spread over Solid Fuel (2nd Report, Diluent Effect and Measurement of Gas Temperature)

Kazuhiro YAMAMOTO*³, Koichi MORI and Yoshiaki ONUMA

*³ Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

To investigate effects of ambient atmosphere on flame spread, an experimental study has been conducted. The downward flame spread over solid fuel has been examined in a combustion chamber with a vertical duct to obtain uniform ambient atmosphere. The flame spread rate is measured with constant inflow velocity. Two kinds of paper sheet are used as samples. Ambient temperature is increased up to 150°C, and oxygen concentration is reduced to examine the diluent effect, adding carbon dioxide and nitrogen to the ambient air. The gas temperature is measured by thermocouples. Results show that, the flame spread rate is decreased with a smaller oxygen concentration, resulting in smaller heat flow into the preheat region, Q . Diluent effect of carbon dioxide is larger than that of nitrogen to reduce flame spread rate, with larger limiting oxygen concentration. In the gas temperature distribution, the maximum temperature is located around the flame zone, which is defined as the flame temperature. As oxygen concentration is decreased, the flame temperature is reduced. Hence, as the flame temperature is decreased, the heat flow into the preheat region is resultantly smaller. The temperature where the flame can not propagate is almost constant for all cases. Therefore, at extinction limit, the flame temperature is low so that the flame spread can not be supported due to smaller Q .

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

1. 緒 論

防災や消火活動などの火災対策には、火災時の燃焼現象を理解する必要があるが、火災は、火炎からの熱伝導やふく射による熱輸送、拡散による物質移動、対流の影響、相変化や燃焼反応などが相互に影響し合う非常に複雑な現象である。その基礎的な知見を得るため、可燃性固体の燃え拡がりについてこれまでに多くの実験的研究が行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。最近では、数値計算により火炎の燃え拡がり現象を解析する検討が行われた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。そこでは特に、酸素濃度を変化させたときの火炎構造の変化について詳細に調べられている。

著者らも、試料に厚さと密度の異なる5種類のろ紙を用い、周囲雰囲気を変化させたときの鉛直下方への燃え拡がりについて検討してきた⁽¹¹⁾。その結果、(1)周囲の温度が増加すると予熱領域に流入する熱量が増し、燃え拡がり速度は増加する、(2)窒素で希釈して酸素濃度を低下させると火炎の燃え拡がりが不安定に

なって消炎するが、周囲温度が高い場合は消炎時の酸素濃度は減少する、(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、などのことが明らかとなった。火炎の燃え拡がりには、まず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ること、次にこの熱分解ガスが拡散により輸送された酸素と反応すること、その結果火炎帯で熱放出が起こり再び試料に熱が輸送されること、という機構が重要であると思われる。したがって、第1報で明らかとなった周囲雰囲気の影響には、火炎が形成されている気相の温度が密接に関係してくると思われる。

そこで本研究では、希釈剤として二酸化炭素と窒素を用いて鉛直下方への燃え拡がりについて調べ、第1報の結果と比較することで希釈の影響をさらに調べた。試料には2種類のろ紙を用い、周囲温度を150°Cまで変化させた。また今回は気相の温度測定を行い、特に燃え拡がり限界付近の挙動を熱輸送をもとに考察した。

2. 実験装置

図1に本実験で用いた装置を示す。装置は、予熱器、

* 原稿受付 2002年2月12日。

*¹ 正員、豊橋技術科学大学(☎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

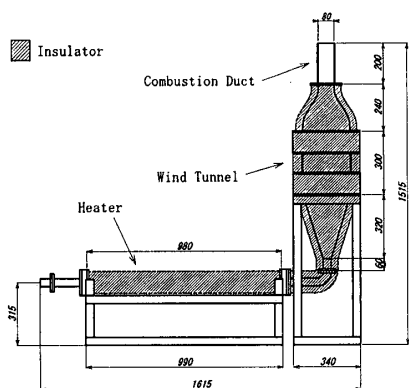


Fig. 1 Experimental apparatus

整流装置(風洞), 燃焼ダクトからなる。第1報⁽¹⁾ですでに説明しているので, その詳細は省略するが, 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, 対向する混合気の流速, 温度, 組成を均一に変化させることができる。試料はステンレス製のホルダで燃焼ダクト内に固定し, 水平に取付けたニクロム線にて一様に着火を行った。燃焼ダクトの寸法は, 長さが200 mm, 断面は80 mm×80 mmであり, 燃え拡がりようすを観察するために一部を石英ガラスとしている。表1に, 前回用いた5種類のろ紙の物性値を示す(番号AからE)。試料は東洋濾紙社製であり, 括弧内は製品番号である。ここで, δ と ρ はそれぞれろ紙の厚さと密度である。なお, これらの試料は熱的に薄い範囲内にあることを確認している。今回は単位面積あたりの重量の大きく異なる二つの試料BとEを選んで実験を行った。対向する流速は25 cm/s一定にし, 周囲の温度を150°Cまで変化させた。また空気に二酸化炭素と窒素を添加することで希釈の影響を調べた。

気相の温度測定は, Pt-Pt/13%Rhの熱電対を用いて行った。素線径はおもに100 μm のものを用いたが, ふく射による熱損失を見積もるため76 μm のものも使用した。熱電対で得られる起電力は, 分解能14 bit, 最大サンプリング周波数50 kHzのカード形A-D変換器(KEYENCE, NR 110)を介してパーソナルコンピュータに取り込み, 解析を行った。

3. 実験結果

3.1 希釈時の火炎の燃え拡がり まず, 希釈剤の種類が異なる場合の火炎の燃え拡がりに対する影響の違いについて検討した。二酸化炭素と窒素を対向する空気に添加し, 酸素濃度 C_{O_2} を低下させた場合の燃え拡がりようすを図2に示す。空気中には体積濃度で約21%の酸素が存在することから, これらの希釈剤

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

を添加することで酸素濃度を21%から火炎が鉛直下方へ燃え拡がらなくなるまで変化させた。図2は35 mmカメラにて撮影された火炎の直接写真である。絞りは4, シャッタースピードは1/8とし, 予熱温度が150°C, 試料Bの結果であり, 右側に酸素濃度を示した。火炎が燃え拡がる場合, まず青炎が先行するが, 二酸化炭素で希釈した場合のほうが青炎の幅が短く, 全体の火炎の大きさも小さいことがわかる。酸素濃度を低下させると, 次第に燃え拡がりが不安定になる。二酸化炭素で希釈した場合は酸素濃度が17%で約一に燃え拡がらなくなり, 16%では完全に消炎した。一方すでに第1報で報告したように⁽¹⁾, 窒素を添加した場合は酸素濃度が17%でも均一に燃え拡がっており, 消炎時の酸素濃度は15%であった。したがって, 希釈する気体により燃え拡がりようすが異なることがわかった。

次に, 時間的な火炎の位置の変化から火炎の燃え拡がり速度 V を求めた。第1報では, 窒素を添加していくことで燃え拡がりようすが大きく変化したので, 燃え拡がりを以下の三つの領域, すなわち領域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領域に分類した。今回は, 二酸化炭素を空気中に添加して, 同様の分類を行った。図3は, 室温(20°C)において試料Bを用いた場合に, 実験により得られた燃え拡がり速度を, 添加した二酸化炭素濃度に対してプロットしたものである。また, そのときの酸素濃度も上軸に同時に示した。これによると, 添加する二酸化炭素濃度を増加させる, すなわち酸素濃度を低下させると燃え拡がり速度ははじめ単調に減少した。この場合, 図2でも観察されたように, 火炎の形状はほぼ横方向に一樣であり, 火炎は一定の速度で燃え拡がる(領域I)。さらに酸素濃度を低下させると, 不安定な燃え拡がりの領域IIとなり, 燃え拡がり速度がいったん増加した。この傾向は, すでに行われた数値計算でも確認されている⁽¹⁰⁾。ただし, この領域では火炎の燃え拡がり速度は一定ではなく変動していた。さらに添

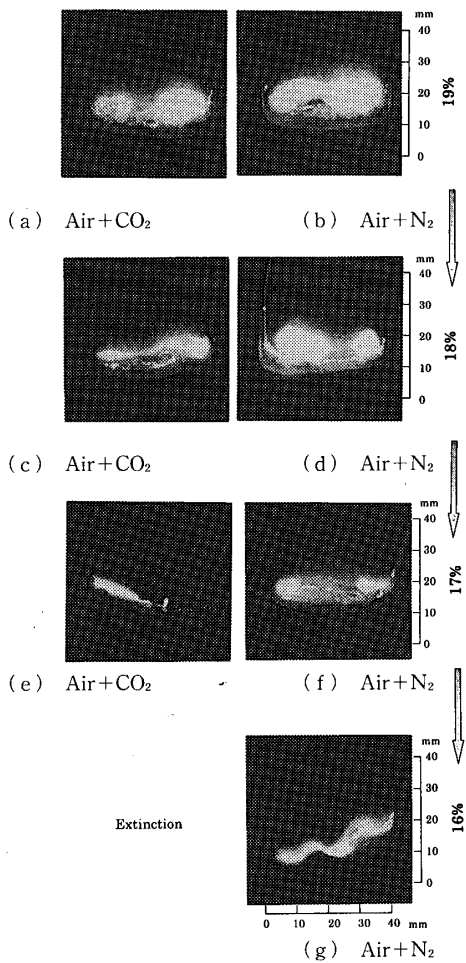


Fig. 2 Direct photographs of flames spreading downward over a paper sheet; $T=150^{\circ}\text{C}$, No. B

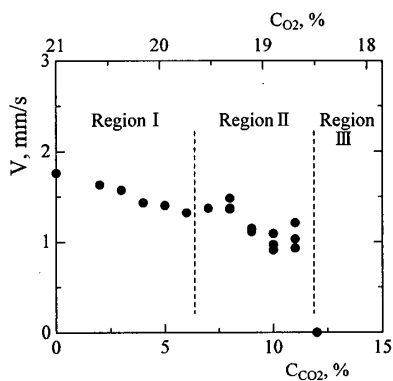


Fig. 3 Variations of flame spread rate with CO_2 concentration, $T_0=20^{\circ}\text{C}$, No. B

加する二酸化炭素濃度を増加させると消炎した(領域 III).

次に、周囲温度を増加させたときの燃え拡がり速度の変化について詳しく調べた。周囲温度を 20, 50, 100°C , および 150°C と一定にし、希釈剤として二酸化

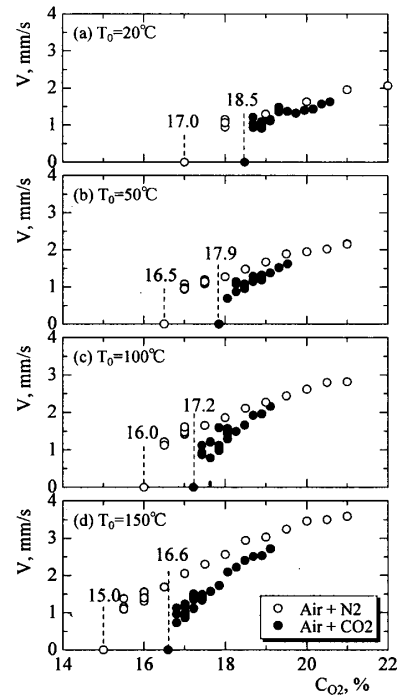


Fig. 4 Variations of flame spread rate with oxygen concentration; No. B

炭素と窒素を用い、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求めた。試料 B について得られた結果を図 4 に示す。これによるといずれの温度においても、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)。酸素濃度を低下させると、火炎の燃え拡がり速度は一定ではなく変動していることがわかる(領域 II)。また、二酸化炭素を添加したときのほうが高い酸素濃度でも燃え拡がりが不安定となった。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)。このときの酸素濃度を、下方燃え拡がり酸素濃度と第 1 報で定義した。図 4 においてもこの限界酸素を数字で示した。その結果、二酸化炭素で希釈した場合のほうが酸素濃度に対する燃え拡がり速度の低下が大きく、限界酸素濃度が大きいことがわかった。すなわち、二酸化炭素による希釈の影響が大きいことがわかった。また、周囲温度を変化させた結果を比較することにより、希釈剤の種類によらず、周囲温度が増加するにつれ安定に燃え拡がる領域が拡大し、限界酸素濃度が小さくなった。

次にろ紙の種類による違いについて検討した。第 1 報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、 $\rho\delta V$ は一定となる。そこで試料 B, E について、二酸化炭素と窒素を添加することで酸素濃度を同様に变化させ、この $\rho\delta V$ の値を求めた。周

囲温度が 150°C のときの結果を図 5 に示す。これによると、希釈する気体が同じであれば、各試料で $\rho\delta V$ の値は同じになった。ただし、この一定値は酸素濃度を低下させると減少した。希釈したガスの違いを比べると、同じ酸素濃度では二酸化炭素を添加した場合のほうが $\rho\delta V$ の値が小さくなった。また、試料 E のほうがより大きい酸素濃度で消炎することがわかった。

そこで、周囲温度を変化させて、この鉛直下方への燃え拡がり限界酸素濃度を、二酸化炭素と窒素に対して求めた。その結果を図 6 に示す。これによると、いずれも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ること、また、窒素より二酸化炭素で希釈したほうがより高い酸素濃度で消炎することがわかった。

3・2 気相の温度測定 第 1 報⁽¹¹⁾ において、予熱領域への熱流入量をもとに、酸素濃度を低下させたときの火炎の燃え拡がりについて検討した。試料が熱的に薄い場合、おもに気相から試料に流入する熱量が重要となる。Sato らも周囲温度が一定の条件下で二次元の温度分布をもとに対向流速を変化させたときの火炎構造の変化を調べている⁽¹²⁾。したがって本研究でも、気相の温度を調べることにした。

温度測定には熱電対を用いた。今回の測定では、1 本の熱電対を燃焼場に挿入したが、2 本から 4 本の熱電対を同時に燃焼場に挿入する実験も行っている。温度の二次元分布を得るには、同時刻に測定した温度をもとに分布を作成することが望ましいが、多数本入れる場合は、流れ場に与える影響も相対的に大きくなる

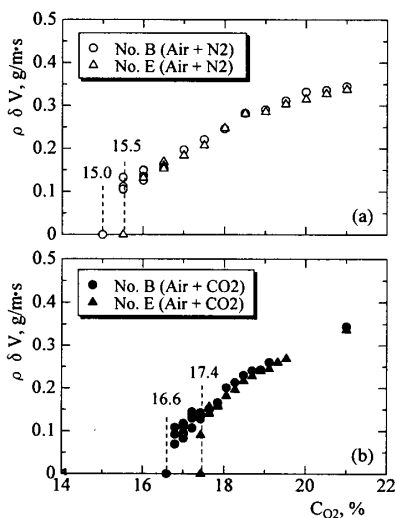


Fig. 5 Variations of $\rho\delta V$ with oxygen concentration; $T_0 = 150^\circ\text{C}$

ことが考えられる。今回は、火炎の燃え拡がりがほぼ定常であることから、別々の時刻に測定した一次元の測定結果をもとに温度の二次元分布を作成した。図 7 に周囲温度 20°C、試料 E において得られた結果を示す。試料表面からの距離 y [mm] の位置に熱電対を設置し、出力された温度の時間変化を、燃え拡がり速度をもとに試料の変色開始位置を原点として距離に換算した。 x [mm] は鉛直上方が正で、負の領域が対向流の上流側に相当する。これによると、 $y = 0$ mm の表面の温度は $x = -2$ mm 付近で上昇し始め、 $x = 0$ mm でいったん変化しなくなり、その後温度は単調に増加した。ろ紙の熱分解温度は約 370°C ほどであるので、 $x = -2$ mm から 0 mm 前後に予熱領域が存在し、それより下流に熱分解ガスが発生している領域が存在するものと思われる。このような傾向は Sato らによっても観察されており、温度変化がほとんどない領域が熱分解領域に対応することが指摘されている⁽¹²⁾。また、試料からの距離 y が大きくなると、温度変化は大きく異なることがわかる。

次に、これらの結果をもとに気相の二次元温度分布を作成した。周囲温度 20°C、試料 E で得られた結果を図 8 に示す。図 8 は $x = -2$ mm から 10 mm、 $y = 0$ mm から 7 mm の範囲で得られた温度分布であり、等

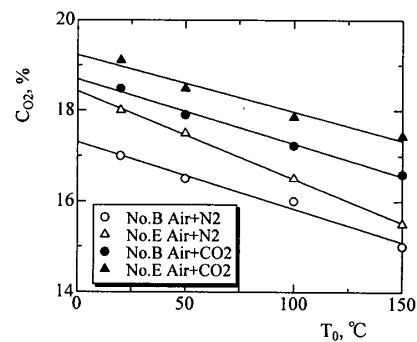


Fig. 6 Variations of limiting oxygen concentration with initial temperature

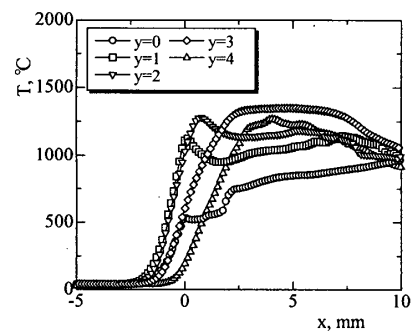


Fig. 7 Measured temperature by thermocouples; $T_0 = 20^\circ\text{C}$, No. E

高線は200°Cごとに1200°Cまで示した。これによると、 $x=0$ mmの変色開始位置よりも先行して温度が上昇し始めている。また高温の領域は、 $y=2$ mmから3 mm付近にあり、ほぼ試料に平行に存在した。

なお、ここで示した温度はふく射によると熱損失を考慮していない。そこで、測定された温度と実際の温度との差を見積もることとした。Kaskanは、高温の周囲雰囲気中に熱電対を挿入した場合に、熱電対の探針が受け取る熱量と探針からのふく射により失われる熱量が等しくなることから、実際の温度 T^* と測定された温度 T との差を見積もる式を提案した⁽¹³⁾。

$$T^* - T = \frac{1.25 \varepsilon \sigma T^4 D^{0.75}}{\lambda} \left(\frac{\eta}{\rho_g U} \right)^{0.25}$$

ここで、 ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 D は素線の径、 λ は熱伝導率、 η は粘性係数、 U は速度、 ρ_g は気体の密度である。ここでふく射による補正の妥当性を検討するため、素線径が76 μm と100 μm の2種類の熱電対で温度を測定し、それぞれに対し実際の温度を見積もった。一例として、 $y=2$ mmの位置に熱電対を設置したときに得られる最高温度について検討する。補正前の温度は、素線径が100 μm で1230°C、素線径が76 μm で1240°Cであった。流速を周囲流速と同じであると仮定し、各物性値を表により求めることでKaskanの式により補正後の温度を求めた⁽¹⁴⁾。その結果、いずれの熱電対の場合もほぼ同じで約1380°Cとなった。したがってこの場合は、熱電対のふく射による熱損失により、100°C程度の温度低下があることがわかった。ただし、今回は流速測定を行っていないため、以後は補正を行わず測定された温度のみを示す。

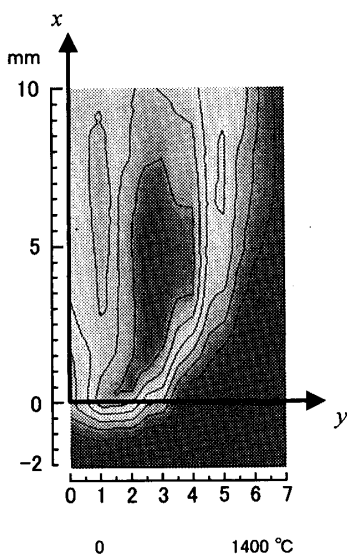


Fig. 8 Temperature distribution; $T_0=20^\circ\text{C}$, No. E

3.3 火炎温度 このような温度分布をもとにした火炎構造の議論はすでに行われている。例えば Hiranoらは、火炎が試料表面から約1 mmほど離れて存在しており、試料に平行な各断面での最高温度位置が火炎帯に対応していることを指摘した⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。また Satoらは、青炎である火炎先端が変色開始位置より上流に先行しており、火炎帯に沿って温度の高い領域が存在することを温度の等高線から明らかにした⁽¹²⁾。そこで本研究でも、この火炎帯付近で得られる温度を火炎温度とし、酸素濃度や周囲温度を変えて火炎温度を測定した。今回は、 $y=2$ mmの位置に熱電対を設置し、火炎が探針を横切るときの最高温度を火炎温度とした。周囲温度を20, 50, 100, 150°Cと一定にし、窒素と二酸化炭素で希釈することにより得られた結果を、試料 B, E に対してそれぞれ図9と図10に示す。また、燃え拡がり限界時の酸素濃度を図に示した。

これによるといずれの試料でも、酸素濃度が低下すると火炎帯の温度が単調に減少した。消炎限界付近では、火炎が不安定になるため正確な火炎温度は求められていないが、消炎時の酸素濃度から推定すると、いずれの場合も約1000°Cから1050°C程度で消炎していることがわかる。希釈剤の違いについて検討すると、二酸化炭素で希釈した場合のほうが、窒素で希釈した場合よりも低い火炎温度となった。また、周囲温度を

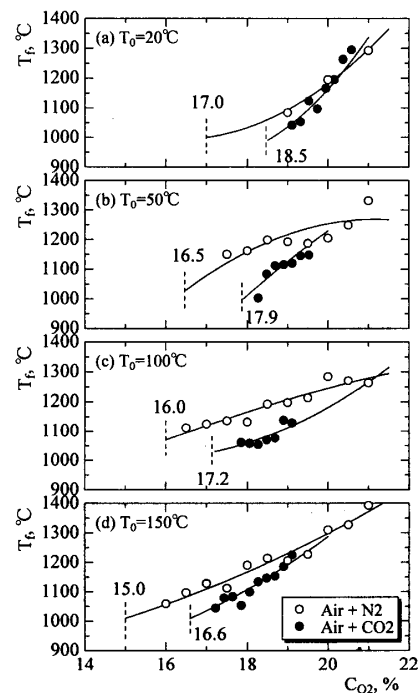


Fig. 9 Variations of flame temperature with oxygen concentration; No. B

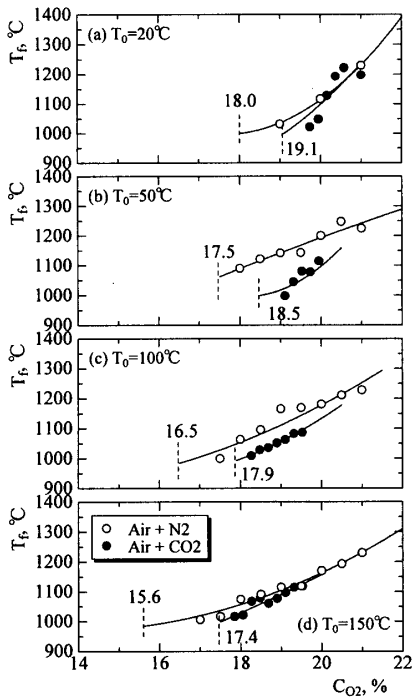


Fig. 10 Variations of flame temperature with oxygen concentration; No. E

増加させると、火炎温度もほぼ増加していることがわかった。各試料で得られた結果を比較すると、試料Bのほうが全体的に火炎温度は高くなっていた。

4. 考 察

今回は希釈剤に窒素と二酸化炭素を用いて実験を行った。図4で明らかとなったように、燃え拡がり速度は二酸化炭素で希釈した場合のほうが、窒素で希釈した場合よりも低い値となる。温度測定の結果、窒素で希釈した場合のほうが火炎温度は高くなったことから、火炎温度が高いほど燃え拡がり速度が大きくなった。de Ris⁽¹⁾は可燃性固体の燃え拡がり現象を理論的に解析しているが、それによると熱的に薄い試料の場合は火炎温度が高いものほど燃え拡がり速度が大きくなることを指摘した。このことは、Campbellの試料厚さと初期温度を変化させた実験でも確認されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。したがって本実験においても、気相の温度と燃え拡がり速度が密接に関係していることが推察される。そこでまず、火炎から試料への熱輸送について考察する。

第1報⁽¹¹⁾では希釈剤に窒素を用い、予熱領域に流入する熱量 Q を以下の式で見積もることにより、周囲温度と希釈の影響を検討した。

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

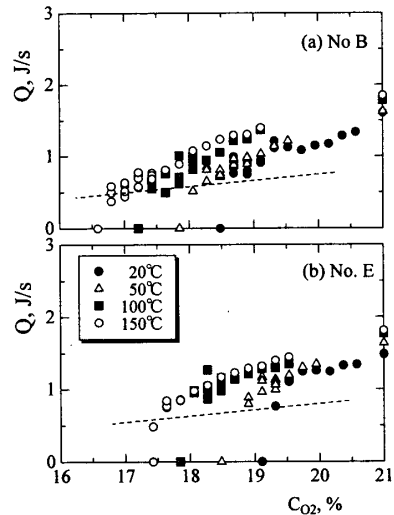


Fig. 11 Variations of heat flow into preheat region with oxygen concentration by CO₂ dilution

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 は比熱 [セルロースでは $1.22 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$] である。その結果、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ること、また、酸素濃度が同じであれば周囲温度が高いほど Q の値は増加することがわかった。加えて、周囲温度を増加させるとより小さい熱量でも燃え拡がりが維持されることが明らかとなっている。そこで本研究でも、二酸化炭素で希釈した場合の Q の値を同式により見積もることとした。その結果を図11に示す。これによると、酸素濃度の低下により予熱領域に流入する熱量も単調に減少している。周囲温度を増加させると Q の値は増加した。消炎時の Q を見積もった値を点線で示すが、周囲温度が高いほどより小さい Q でも燃え拡がりが維持されていた。以上の傾向は前回窒素で希釈したときに得られたものと同様であった。また、消炎時の Q の値も、 50 J/s から 70 J/s 程度であり、希釈する気体の種類が異なるにもかかわらずほぼ等しくなった。

試料表面付近の熱移動について具体的に考えると、気相から試料へふく射もしくは熱伝導により熱が流入するが、対流によっても下流へ熱が輸送される。ただし、対向する流速を一定にして酸素濃度を減少させたような本実験の場合は、火炎温度が低下することで試料に流入する熱量が減少する影響が大きいと思われる。Hiranoらも、ふく射と熱伝導の試料への熱輸送量を見積もることにより、紙の燃え拡がりに及ぼす外部ふく射の影響を考察した⁽¹⁶⁾。したがって本実験でも、火炎温度の変化と予熱領域に流入する熱量との間に密接な関係があると思われる。すなわち、希釈によ

り酸素濃度を低下させると、火炎温度が低下して予熱領域に流入する熱量が低下し、その結果燃え拡がり速度が減少したと考えることができる。

このことを確認するために、窒素と二酸化炭素による希釈の影響の違いについて検討した。図9および図10によれば、火炎温度は二酸化炭素を添加した場合のほうが低くなっている。そこで窒素と二酸化炭素で希釈した場合の定圧比熱を、酸素濃度を变化させて求めた⁽¹⁴⁾。一例として温度が1100°Cのときの結果を図12に示す。これによると、窒素を添加しても混合気の定圧比熱はほとんど変化していないが、二酸化炭素を添加した場合は比熱が大きくなっていることがわかる。ちなみに1100°Cにおけるそれぞれの低圧比熱は、空気が34.9 J/(mol·K)、窒素が34.6 J/(mol·K)、二酸化炭素が57.7 J/(mol·K)である。窒素の比熱は空気とほぼ同じであるが、二酸化炭素の値は非常に大きい。これにより二酸化炭素で希釈すると比熱が増加することになる。

次に酸素濃度を变化させた場合の火炎温度について考えると、二酸化炭素と窒素のいずれを添加しても酸素濃度は低下する。酸素濃度が同じであれば熱分解ガスと反応する酸素量は変わらないため、放出される熱量はほぼ同じであると考えてよい。この場合、混合気の比熱が大きいほど火炎温度は低下することになる。したがって、二酸化炭素を添加した場合のほうが火炎温度の低下は大きく、その結果、二酸化炭素のほうが燃え拡がり速度が小さくなったものと思われる。また、これら希釈剤の違いは、周囲温度に対する燃え拡がり限界酸素濃度の変化にも現れたが、これも低い火炎温度のため予熱領域に流入する熱量が低下したことから説明できる。今後、消炎付近の不安定な燃え拡がり挙動に着目して、火炎温度と燃え拡がり速度の関係を調べた理論解析⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾をもとにモデルの検討を行う

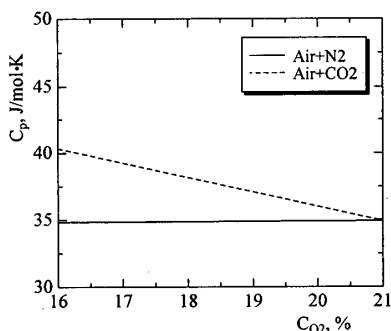


Fig. 12 Variations of molar heat capacity at constant pressure with oxygen concentration, $T = 1100^{\circ}\text{C}$

予定である。

5. 結 論

本研究では、可燃性固体の鉛直下方への燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響について調べた。試料には厚さと密度の異なる2種類のろ紙を用い、希釈剤として二酸化炭素と窒素を使用した。周囲温度を150°Cまで加熱し、酸素濃度を变化させて燃え拡がり速度と気相の温度を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 窒素と二酸化炭素のいずれを添加しても、酸素濃度が低下するため燃え拡がり速度は減少する。周囲の温度を増加させると燃え拡がり速度は増加するが、酸素濃度が同じであれば、二酸化炭素で希釈した場合のほうが燃え拡がり速度は小さい。さらに酸素濃度を低下させると、やがて火炎は燃え拡がることができなくなる。このときの酸素濃度(鉛直下方燃え拡がり限界酸素濃度)は、二酸化炭素で希釈した場合のほうが大きい。したがって、二酸化炭素のほうが希釈の影響が大きいことがわかった。

(2) 気相の温度を測定したところ、火炎帯付近で温度は最も高い値を示す。この温度を火炎温度とすると、火炎温度は酸素濃度を低下させると減少し、周囲温度を増加させると増加する。二酸化炭素で希釈した場合のほうが窒素のときより火炎温度は低くなったが、これは両者の比熱の違いにより説明できる。また、消炎時の火炎温度は、試料、周囲温度、希釈剤の種類によらずほぼ一定となった。

(3) 予熱領域に流入する熱量 Q を窒素と二酸化炭素の場合で比較した結果、二酸化炭素で希釈したほうが Q の値は小さい。またいずれの場合も、予熱することにより Q の値は大きくなったが、消炎時の Q の値は予熱すると小さくなった。

以上の結果から、酸素濃度を低下させると火炎温度が低下し、予熱領域に流入する熱量が減少して燃え拡がり速度が低下することがわかった。ただし、消炎付近の燃え拡がり挙動については、火炎温度と予熱領域への熱流入量との関係も含めて、今後定量的に検討する必要があるものと思われる。

文 献

- (1) de Ris, J. N., *Proc. 12th Symp. (Int.) Combust.*, (1969), 241-252.
- (2) Fernandez-Pello, A. C. and Williams, F. A., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1975), 217-231.
- (3) Fernandez-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) Fernandez-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) 山本和弘・森幸一・小沼義昭, 機論 **68-672** (2002) 2437-2443.
- (12) Sato, K., Suzuki, K., Sakai, Y. and Sega, S., *Fire Science and Technology--Proc. 2nd Asia-Oceania Symp.*, (1995), 161-171.
- (13) Kaskan, W. E., *Proc. 6th Symp. (Int.) Combust.*, (1957), 134-143.
- (14) 浅野康一, パソコンで解く化学工学, (1994), 丸善.
- (15) Hirano, T. and Sato, K., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1975), 233-241.
- (16) Hirano, T. and Tazawa, K., *Combust. Flame*, **32** (1978), 95-105.
- (17) Campbell, A. S., *Combust. Sci. Technol.*, **3** (1971), 103-120.
- (18) Campbell, A. S., *J. Fire. Flammab.*, **5** (1974), 167-178.
- (19) Wichman, I. S. and Williams, F. A., *Combust. Sci. Technol.*, **33** (1983), 207-214.
- (20) Delichatsios, M. A., *Combust. Sci. Technol.*, **44** (1986), 257-267.