メタン・窒素と高温空気で形成された対向流拡散火炎への PMMA 粉体混合による消炎挙動に関する研究

花井 宏尚^{*1}, 須田 捷生^{*2}

Extinction behavior of addition of PMMA powder into counterflow diffusion flame of methane and nitrogen and high temperature air

Hironao HANAI^{*1} and Toshiki SUDA^{*2}^{*1} Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Gunma College
580 Toriba-machi, Maebashi-shi, Gunma 371-0845, Japan^{*2} Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan

Received: 12 September 2019; Revised: 21 November 2019; Accepted: 29 March 2020

Abstract

A counter-flow diffusion flame formed of a fuel consisting of methane and nitrogen, and an oxidizer of air heated to 500°C was applied to clarify the influence on the extinction limit when fine powder of polymethyl methacrylate (PMMA) was added to the fuel. The flame stretch rate at the time of extinguishing flame was measured as function of the powder size and the weight concentration of powder in the fuel. The sizes of PMMA powder used are 15 μm , 30 μm and 50 μm . The weight concentration of PMMA powder in the fuel was changed to 20%, 25% and 30%. The flame stretch rate at the extinction limit for the methane fuel and air was increased with the increase of the air temperature. When the PMMA powder were mixed in the fuel, the flame stretch rate at the extinction limit increased with the larger fuel size, because the larger powders had slip to gas and did not trace on the gas flow. Therefore, the powder stayed longer in the flame. The flame stretch rate at the extinction limit was decreased with the increase of the weight concentration of the PMMA powder, because the combustion of powder needed longer time to that of gas.

Keywords : Plastic powder, Counterflow flame, Stretch rate, Extinction limit, Transfer number, High-temperature air, Heterogeneous combustion

1. 緒 言

プラスチックごみ問題が社会の大きな関心を集めている。プラスチックは、軽く強く成形が容易であるため、金属に代わり家庭から産業に至るあらゆる製品で使用されるようになった。しかし一方で、廃棄されるプラスチックごみの量も急速に増加し大きな問題となっている。環境省の平成 30 年度調査によると、国内で排出される全体のごみのうち、質量割合でおおよそ 12% がプラスチックである。体積にすると 40% 以上がプラスチックとなる。一般社団法人プラスチック循環利用協会のデータでは、1 年間に排出されるプラスチックごみ約 900 万トンのうち、リサイクルにより有効に再利用されているのは 250 万トンに過ぎない。しかも、このうち 150 万トンが中国などに輸出されていたが、2019 年 5 月のバーゼル条約の改正により、この 150 万トンも国内処理する必要性が生じている。残り 650 万トンは埋め立てや焼却などにより処分されているが、焼却ごみにプラスチックを多く混ぜ過ぎると燃焼炉内が高温になり過ぎ、炉内や煙道の耐熱レンガを痛める問題が発生する。このため、プラスチックごみの燃料への転用などによる有効利用が急務となっている。

原料が石油であるプラスチックは熱量が大きく、また炭素と水素の化合物であるため、適切に燃焼させれば水

No.19-00334 [DOI:10.1299/transjsme.19-00334], J-STAGE Advance Publication date : 7 April, 2020

^{*1} 正員, 群馬工業高等専門学校 (〒371-0845 群馬県前橋市鳥羽町 580)

^{*2} 学生員, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail of corresponding author: hanai@mech.gunma-ct.ac.jp

と二酸化炭素しか排出しない優秀な燃料になり得る。しかし一方で、プラスチックの燃焼は気体の燃焼と比較して、加熱による気体モノマーの発生、周囲酸化剤との混合、着火と多くの過程を含むため、プラスチックの熱的性質や形状、大きさなどさまざまな因子が燃焼に影響を与える。固体微粒子の燃焼は、液体噴霧と気体の発生過程が異なるが、燃焼形態や燃焼挙動に関して多くの点で類似している。このため、微粒子の燃焼に関する研究は、産業界の要望から微粉炭や燃料噴霧を中心に数多く進められてきた (Smoot et al., 1976 および Chiu et al., 1982)。中村ら (中村他, 2005a, 2005b) は、噴霧と空気が対向する場での燃焼における噴霧の群燃焼に関する数値解析を実施した。三上ら (三上他, 2008) は、低揮発性の正デカンが、対向流場に形成された一枚の火炎に突入した場合の燃焼形態について明らかにしている。また、菅沼ら (菅沼他, 2008) は、燃料噴霧の構成要素の一つである燃料液滴列を用い、雰囲気中の蒸気が、燃料液滴列の燃え広がりによどのような影響を及ぼすのか明らかにしている。一方、固体の粉体に関して、Tezok らは (Tezok et al., 1985)、球形の爆発実験容器を用いて、粉体巻き上げ時の噴射空気強度を変えることで容器内に生じる乱れ強さを変化させ、乱れと乱流燃焼速度の関係を明らかにしている。また、Okuyama らは (Okuyama et al., 1996) 微小重力環境を用いてプラスチック粉体の直径と火炎伝播速度の最大濃度の関係を明らかにしている。同様に微小重力環境を用いて、Hanai らは (Hanai et al., 1999)、対流の生じない場でのプラスチック粉体の可燃限界と粒径の関係を明らかにした。

プラスチック粉体をボイラーや発電の燃料として用いるには、燃焼場に粉体が混入した場合の燃焼挙動や火炎構造の変化を知る必要がある。特に、気体の流れと粉体の間に生じるすべりを考慮した火炎の安定性を考慮することが重要である。そこで本研究では、流れのある燃焼場にプラスチック粉体が投入された場合の消炎挙動に焦点をあてる。対向流場に安定に形成された気体の拡散火炎にプラスチック粉体を混合し消炎させる。伸長流れ場の形成には一対の対向流バーナーを利用し、この流れに、微細化した粉体を燃料側から混合することで消炎を得る。プラスチックの火炎は不安定であり、消炎限界を精度よく得ることが難しい。そこで、対向する空気流を 500℃ まで加熱し、より大きな伸長流れ場においても火炎を安定化させる。測定では、火炎に与える伸長率を変化させ、消炎時の伸長率を得る。気体燃料へのプラスチックの混合割合、粉碎時の粉体粒径、および燃料濃度をパラメータとし、消炎限界におよぼす影響を明らかにする。本実験により、高温空気燃焼を廃棄物焼却炉に適応する際に必要となる混合燃料の消炎限界に関する基礎データを取得することを目的とする。

2. 実験装置および方法

本研究では、流れの速度と伸長率の変化が準一次元流れとして扱え、数値計算結果との比較が容易であるという理由から、対向流バーナー法を用いて実験を実施する (Ju et al., 2001)。図 1 に実験装置の概略図を示す。バーナーは、中心軸を一致させた対向する内径 14.0 mm の二つの直管を使用し、上下方向に設置する。上側のバーナーからは、可燃性のプラスチック粉体を含んだ、メタンを窒素で希釈した混合燃料を供給する。下側のバーナーからは、体積割合で窒素 79%と酸素 21%に調整した酸化剤を高温に加熱したものを供給する。上バーナーには水冷ジャケットを取り付ける。これは、燃焼場から上昇する高温の燃焼ガスによりバーナー側壁が加熱され、壁面に接触する粉体がバーナー内に熔融固着することを防ぐためである。

粉体を用いた燃焼実験を精度良くかつ再現性をもって行うためには、粉体の安定供給が重要である。本実験では、粉体の供給に、安定的に多くの粉体を連続供給可能である重力落下式ホッパーを用いる。ホッパー側壁には、粉体の落下を促進するエア式バイブレーターを設置し、粉体をふり落とす。粉体供給量の調整にはボールバルブを使用する。図 2 に、バルブコック開度に対して 1 分毎に 1 分間、計 5 回、粉体供給装置から供給される粉体を採取し測定した結果を示す。エアバイブレーターの空気流量は 30 L/min とした。5 回の採取量のばらつきは 1%以下であり、10 分程度は安定に粉体が供給されることを確認できた。また、バルブコックの開度と粉体供給量に相関があり、燃焼実験では、特に直線性の良いバルブコック開度 5° から 40° の範囲で使用した。粉体を搬送するメタン、窒素、および酸化剤の酸素、窒素は、精度±1%F.S.のマスフローコントローラーを用いて、供給流量が常に最大流量の 70%以上で使用されるようにマスフローコントローラーを交換し供給した。メタンと窒素を混合チャンバーに供給し混合した後、バーナー入口付近にて粉体を混合する。酸化剤は、マスフローコントローラーで所定濃度に混合した窒素と酸素の混合気（体積割合で窒素 79%、酸素 21%で混合）を用いる。酸化剤

Fig. 1 The experimental apparatus. A fuel with added PMMA powder are supplied from the upper burner and an oxidizer of air are supplied from the lower burner.

混合後に IH 式の加熱器（最高温度 1200℃）を用いて所定温度まで加熱し、バーナー内部に設置された整流網で流れを整えた後、燃焼部に供給される。伸長率の変化は、データのばらつきを抑えるため、バーナー間距離をすべての条件において 8.0 mm に固定し、流速のみを変化させて行う。

本実験で用いるポリメタクリル酸メチル（PMMA）粉体は、燃料粒径の影響が実験結果に現れるように、真球状で比較的粒度分布の小さい PMMA 粉体である、積水化成製品工業「テクポリマー」MBX シリーズを使用する。準備した粉体サイズは、15.0 μm, 30.0 μm, 50.0 μm の 3 種類である。

実験は以下の手順で行う。上側のバーナーからはメタンと窒素と PMMA 粉体の混合燃料、下側のバーナーからは所定の温度に加熱された空気が供給され、バーナー間に対向流流れを形成する。対向流場のよどみ面付近で燃料に着火すると、一枚の対向流拡散火炎が形成される。火炎が安定した後、両者のバーナーの流速および燃料の混合割合を一定に保ちながら燃料濃度を徐々に減少させると、ある燃料濃度で火炎は消炎に至る。それを火炎の消炎限界と定義する。混合燃料、酸化剤の流速および密度から火炎伸長率を求め、消炎曲線を得ていく。また、燃焼時および消炎直前の状態をカメラにより撮影した。本研究では、燃料中に含まれる可燃物質（メタンおよび PMMA）の割合として標準状態の燃料に含まれる燃焼熱 [MJ/Nm³]を用いてグラフを整理する。各燃焼熱は、メタンが 55.5 kJ/g, PMMA が 26.2 kJ/g である。

図 3 に、粉体を含まないメタンと窒素の燃料に対して、常温の酸化剤を用いて燃料中のメタン濃度を変化させながら消炎限界にいたる伸長率を測定した実験結果を示す。横軸は燃料中の単位体積当たりのメタンの燃焼熱量、縦軸は消炎が生じた伸長率である。消炎限界は、燃料中のメタン濃度の増加と共に拡大、つまり大きな伸長率まで消炎が生じなくなった。本実験データは、従来の研究結果 (Hanai et al., 2003a) と比較して少し低い消炎限界伸長率を示すが、これは粉体をバーナー内に均質に分散させるため直管バーナーを用いたため、バーナー内に流速分布が存在するためであると考えられる。

3. 火炎伸長率について

対向流場において、両バーナーから噴出する気体の運動量が等しい時、よどみ点はバーナーの中央に位置する。一方、流れの中に形成される火炎の位置は、燃料と酸化剤が理論混合比となる場所に位置するとされている。このとき、火炎がよどみ面に対して酸化剤側にあるとき正炎とし、逆に燃料側のとき負炎とする。正炎負炎の判定には、大塚らの先行研究 (大塚, 渡辺, 1975) から式 (1) を用いて判定を行う。

$$A = C_o/C_f - r_{st} \quad (1)$$

Fig. 2 A relationship between the valve opening angle and mass flow rate of PMMA powder with the diameter of 15 μm .

Fig. 3 Stretch rate at the extinction limit as a function of heat of fuel per unit volume. The temperature of air is 25°C. The solid circle in the figure shows the data obtained by Hanai et al. using with Tsuji burner.

ただし、 C_o は酸化剤中の酸素の質量分率、 C_f は燃料中の可燃性物質の質量分率、 r_{st} は燃料の単位質量を完全酸化するのに必要な酸素の質量である。式 (1) において $A < 0$ であれば正炎、 $A > 0$ であれば負炎とした炎である。これら可燃限界と消炎限界を表すパラメータとして消炎時伸長率がある。これは見かけの速度勾配として定義される。傳田らの先行研究 (傳田他, 2002) より上下のバーナーからの流量の運動量保存則を変形して得られた正炎時の火炎伸長率を式 (2) に示し、負炎時の火炎伸長率を式 (3) に示す。

$$\varepsilon = \frac{u_o + u_f \sqrt{\rho_f / \rho_o}}{L} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{u_f + u_o \sqrt{\rho_o / \rho_f}}{L} \quad (3)$$

ここで、 ε は伸長率、 u_o および u_f はバーナー出口における混合燃料および酸化剤の流速、 ρ_o および ρ_f はバーナー出口における混合燃料および酸化剤の密度、 L はバーナー間距離である。一般に、伸長率が大きくなると予熱帯を通過する間に伝わる熱が少なくなり、火炎温度の低下をもたらす、燃焼反応が維持できなくなる。つまり、消炎時の伸長率が高い火炎ほど、安定な火炎であると言える。

4. 実験結果

4・1 酸化剤温度による消炎限界の変化

図4に、PMMA粉体を含まない、メタンと窒素の混合気に対して、酸化剤温度を25°C、200°C、500°Cに変化させたときの消炎限界時の伸長率を示す。横軸は燃料側のメタンと窒素の混合燃料に対するメタンの質量割合、縦軸は火炎が消炎した時の伸長率である。図4より、酸化剤の温度上昇に伴い消炎時の伸長率も同様に増加している。これは、酸化剤温度が上昇したことで火炎温度が上昇した結果、消炎限界が拡大したためであると考えられる。この結果は、傳田ら (傳田他, 2002) や Hanai ら (Hanai et al., 2003b) による先行研究とよく一致する。対向流拡散火炎の消炎は、化学反応時間と流れの特性時間の比であるダムケラー数が小さくなるために、燃料の火炎中の滞留時間が反応時間に対して不足し、火炎温度が低下するために発生する。そのため、酸化剤の温度が上昇すると反応速度定数が大きくなりダムケラー数が増加し、より大きな伸長率でも燃焼の継続が可能となる。高温酸化剤を用いた対向流拡散火炎の消炎限界伸長率は、酸化剤温度に対して単調に増加した。

4・2 粉体の混合による消炎限界の変化

対向流れの場に粉体が混合した場合の消炎限界の変化を調べるために、燃料側に PMMA 粉体を混合した場合の消炎時の伸長率を測定した。PMMA の混合に対し、混合した PMMA 粉体と同熱量のメタンを燃料側から除いている。使用した粉体粒径は $15\ \mu\text{m}$ である。図 5 は、燃料中の質量割合で 20% のメタンを同じ熱量となる PMMA 粉体で置き換え、各燃料濃度に対する消炎限界の測定を行った結果である。酸化剤温度は 500°C である。横軸は標準状態で燃料に含まれる熱量、縦軸は消炎時の伸長率である。

図 5 からわかるように、メタンの一部を PMMA 粉体に置き換えることで消炎限界時の伸長率が低下している。図 6 および図 7 に、伸長率 $480\ \text{s}^{-1}$ の同じ条件で撮影した、粉体がない場合と粉体を混合した場合の、よどみ点近傍に形成された火炎の直接写真をそれぞれ示す。図 6 の粉体が混合していない場合と比較して、図 7 の粉体を混合した場合には、火炎がバーナー周囲に大きく広がっていることがわかる。これは、粉体が燃焼するときには、気体の燃焼と異なり予熱帯において、熱分解によるモノマーの発生、酸化剤との混合、着火の過程が必要となる。そのため粉体の大部分で着火遅れが生じ、火炎面から離れた後方でも火炎を形成してしまう。つまりこれは、消炎限界を決定する、よどみ点近傍の燃料濃度が希薄となることを意味し、結果として消炎限界が生じる伸長率が減少する。

粒子単一の燃焼速度（質量消費速度）を表す指標として、Transfer number, B (Godsave, 1953) が用いられる。これは境界面での伝達を駆動する力と、それを妨げる力の比を定性的に表わす。一般に、プラスチックは小さな値を持つことが知られており、PMMA でおよそ $B=2$ で、気化の生じやすい液体燃料の代表である正デカンの $B=10$ に比べ非常に小さい。 B 値は、小さいほど気化が起こりにくいため、PMMA は、気体が発生し難い粒子であることがわかる。このことから、メタンの一部を PMMA に替えると燃焼場への燃料の投入が乏しくなり消炎限界が低下する。また、図 6 および図 7 で観察される火炎の輝度の変化から、PMMA を燃料に混合すると、燃焼場に強い輝炎が多く見られることになる。これは、燃焼場から周囲へのふく射による熱の放出が多く行われていることになる。これらすべての作用により、PMMA の混合は、対向流拡散火炎の消炎時の伸長率を低下させることとなった。

また、図 5 を見ると、メタンのみの場合に得られる消炎限界曲線に比較して、粉体を混合した場合には伸長率の低い領域において消炎限界時の伸長率の差がわずかに大きい。これは、粉体の挙動が消炎に及ぼす影響が伸長率により異なるためであると思われる。一般的に、伸長率の高い場では、流れ場や周囲からの外乱の影響は受け

Fig. 4 Stretch rate at the extinction limit as a function of heat of fuel per unit volume. The oxidizer temperature changed to 25°C , 200°C and 500°C .

Fig. 5 Effect of mixing of PMMA powder in the fuel on the stretch rate at the extinction limit at oxidizer temperature of 500°C . The powder mixing resulted in lower flame extinction limits.

難く、火炎の消炎限界伸長率へのこれらの影響はほとんどない。しかし、低伸長場では、流れや外乱の影響を受けやすく、そのため消炎限界もこれらの影響を受けてしまう。PMMA 粉体が伸長流れに存在すると、粒子の気化時に生じる微小な擾乱や、熱分解直後に見られる燃料濃度の偏り、粉体と周囲流のスリップによる微小渦の生成など多くの外乱が生じる。そのため、PMMA 粉体を混合した流れの場合、気体の燃料のみの場合に比べ、これらの擾乱により消炎限界時の伸長率は低い値で観測され、特に伸長率が低い領域ではこれらが消炎限界測定に大きな影響を及ぼすため、消炎限界を低下させてしまう。そのため、図 5 のようにメタンの消炎限界曲線に比べ、粉体が混合した場合の消炎限界曲線の傾きは大きなものとなると推測される。

4・3 粉体粒径の消炎限界への影響

図 8 に、混合する粉体の粒径を変化させた場合の消炎限界伸長率への影響を示す。使用した粉体は、15 μm 、30 μm および 50 μm の 3 種類である。酸化剤温度は 500 $^{\circ}\text{C}$ である。燃料側の質量比で 20% のメタンを同熱量の PMMA で置き換えた。ここでは興味深い結果が得られた。固体微粒子の可燃限界に関する先行研究 (Okuyama et al., 1996) によると、粉体のサイズが大きくなると燃料希薄側の消炎時の燃料濃度が高くなると報告されている。すなわち大きな粉体の可燃限界は狭くなる。しかし図 8 を見ると、より大きな粉体を混合した方が、メタンのみの消炎限界に近い値を示していることがわかる。

図 9 に、燃料の熱量 11.9 MJ/Nm³ における各粒径に対する消炎限界伸長率の変化を描画した。図 9 より、小さな粉体を混合した時よりも、大きな粉体を混合したときの方が、メタンのみの消炎限界に近い値を示していることがわかる。PMMA 粉体の可燃限界に関して、Hanai らは、微小重力環境を用いて粒子に働く重力の影響を排除し、粉体の粒径と可燃限界濃度の関係について明らかにしている (Hanai et al., 1999)。それによると、PMMA 粉体の可燃限界は、より大きな粉体の方がより高い可燃限界濃度を示す。そのため、対向流拡散火炎では、大きな粉体の方が消炎時の伸長率が減少するはずであるが、本結果はこれにあてはまらない。この理由として考えられるのは、Burgoyne らがテトラリン粒子を用いて導き出した結論である。Burgoyne らは、粒径の異なるテトラリン粒子の消炎限界測定を行ったところ、粒径 10 μm から 40 μm において、粒径の増大とともに消炎限界が拡大する傾向が見られたと報告している (Burgoyne and Cohen, 1954)。これは、テトラリン粒子のこの粒径範囲において、火炎が均質燃焼（いわゆる予蒸発が大きな予混合燃焼の支配する燃焼）から不均質燃焼（粒子を取り囲む拡散燃焼が中心となる燃焼）へと燃焼形態が変化するためである。同様な結果を布目らも微小重力環境を用いてヘプタンとオクタン噴霧について得ている (布目他, 2005)。さらに、中村ら (中村他, 2005b) は、対向流火炎中における正デカン噴霧の数値解析において、群燃焼数の増加により、液滴は単一燃焼から外殻燃焼へと変化することも示している。結果として、不均質燃焼の割合が高い大きな粒子の燃焼は、火炎温度が高く、消炎する伸長率が上昇した。

Fig. 6 A typical direct photograph of methane and high-temperature air of 500 $^{\circ}\text{C}$ under the counter-flow field.

Fig. 7 A typical direct photograph of methane mixed with PMMA powder of 15 μm and high-temperature air of 500 $^{\circ}\text{C}$ under the counter-flow field. The photograph showed the luminous flame around the burner.

Fig. 8 Effect of mixing of PMMA powder on the stretch rate at the extinction limit at oxidizer temperature of 500°C.

Fig. 9 Effect of mixing of PMMA powder on the stretch rate at the extinction limit at oxidizer temperature of 500°C. The mixing of larger powder resulted in higher extinction limit.

Fig. 10 A typical direct photo of a flame mixed with PMMA powder with a particle size of 15 μm. The oxidizer temperature is 500 °C. The photo showed a flat flame.

Fig. 11 A typical direct photo of a flame mixed with PMMA powder with a particle size of 50 μm. The oxidizer temperature is 500 °C. The photo showed a flat flame and also a diffusion flame surrounding the particles.

図 10 および図 11 に PMMA 粉体の粒径が 15 μm および 50 μm の場合のよどみ点付近の火炎の直接写真を示す。撮影時の伸長率は 480 s⁻¹，酸化剤温度は 500°C である。この画像から，両者の火炎で支配的となる火炎の形態が異なっていることがわかる。図 10 を見ると，15 μm では，バーナー管中心に一枚のフラットな火炎が形成されている。これは，粒径が小さい場合，予熱帯に粉体が到達する間に大方の粉体があらかじめ熱分解し予混合火炎を

Fig. 12 A typical flame image taken with intense light. The diameter of PMMA is 15 μm . The oxidizer temperature is 500°C. There is no particles on the oxidant side.

Fig. 13 A typical flame image taken with intense light. The diameter of PMMA is 50 μm . The oxidizer temperature is 500°C. The particles are present on the oxidizer side through the flame.

形成するためである。それに対して、図 11 の 50 μm の場合では、粉体一粒一粒を取り囲むように形成された拡散火炎が火炎面付近に存在し、火炎形成の一部となっていることがわかる。この火炎構造の変化により、大きな粉体では消炎限界伸長率が大きくなったと考えられる。先行研究のテトラリン粒子の 10 μm から 40 μm の粒径範囲内に遷移域が存在する場合と PMMA で 15 μm から 50 μm と粒径範囲内が異なるが、本実験では、高温の酸化剤を用いており、それにより遷移域がより大きな粒径へと移動したためであると考えられる。

また、違う観点から粉体の軌跡に着目する。図 12 および図 13 に、火炎に突入する粉体の移動経路および消滅位置に焦点を当てるため、強力な光源を前方から当てた場合のよどみ点近傍の拡大写真を示す。伸長率は、480 s^{-1} 、粉体粒径は 15 μm および 50 μm である。15 μm (図 12) では、火炎をほぼ中心によどみ流れを形成し、粉体もおおよそ流れに追従していると思われる。また、酸化剤側に粉体をほとんど見ることが出来ない。一方、50 μm (図 13) では、図 12 に比較して粉体がよどみ流れに追従していないように見え、また多くの粉体が火炎を通過して酸化剤側に存在している。この様子は、火炎の形態に着目した図 11 でも確認することが出来る。簡易モデルを用いて PMMA 粉体の終端速度を計算すると、15 μm で 0.64 cm s^{-1} 、50 μm で 8.2 cm s^{-1} であり、50 μm の粉体では流れの速度に対して、すべり速度が無視できないことが予想される。結果として、50 μm の粉体は、火炎面前縁で十分な熱分解を完了できないにも関わらず、火炎を一度通過して再び火炎側に押し戻される経路を通るため、見かけ上の滞留時間が長くなり、よどみ点近傍に大きな熱量を供給できるようになるため、消炎限界伸長率を上昇させたとも考えられる。

4・4 混合粉体量を変化させた場合の消炎限界への影響

粉体の混合量により消炎限界にどのように変化するかを確認するため、粉体の混合量を変化させた場合の消炎限界測定実験を行った。図 14 は、燃料側の粉体量をメタンの質量に対し 20%、25%、30%置き換えた場合の消炎限界である。使用粉体粒径は 30 μm で、酸化剤温度は 500°C である。PMMA の混合割合が大きくなると消炎限界伸長率が減少していることがわかる。これは、気化速度の遅い PMMA が多く混合すると、反応帯に供給される熱量が減少してしまうため、火炎温度が低下し消炎限界伸長率が減少する。火炎を観察すると、PMMA を多く

Fig. 14 Effect of mass percentage of PMMA powder in the fuel on the stretch rate at the extinction limit at oxidizer temperature of 500°C.

Fig. 15 The relationship between the extinction limit and mass percentage of methane in fuel replaced by PMMA powder, when the oxidizer temperature is 500°C and the mass percentage of combustibles in the fuel is 35%.

混合した場合、バーナー周囲で燃焼する粉体の火炎が多く見られた。火炎を通過して後燃えする粉体が増えたことを示す。

図 15 に、横軸にメタンを PMMA に置き換えた質量濃度を、縦軸に消炎限界伸長率を描画した関係を示す。燃料側の可燃物質の質量濃度 $((\text{メタン} + \text{PMMA}) / (\text{メタン} + \text{PMMA} + \text{窒素}) \times 100)$ は 35% である。これから分かるとおり、粉体濃度が増加すると消炎限界は単調に減少した。

5. 結 言

対向流拡散火炎を用いた、可燃性気体燃料と可燃性固体の混合気が高温酸化剤において消炎にいたる伸長率を測定した。

酸化剤温度が上昇すると消炎限界時の伸長率は上昇することがわかった。これは、酸化剤温度の上昇による火炎温度の上昇のためである。メタンと同量の PMMA 粉体をメタンの一部と置換し消炎限界を測定した実験では、粉体を混合することで消炎限界時の伸長率は低下することがわかった。粉体が火炎を形成するには、粉体の気化、酸化剤との混合、着火と多くの時間を必要とするためであり、着火遅れによってよどみ面付近の火炎に供給される熱量が減少するためであることがわかった。粉体のサイズを変化させると消炎限界も変化した、大きな粒径を混合した場合の方が、消炎限界伸長率が大きくなることがわかった。これは、火炎の形態が均質燃焼から不均質燃焼に遷移することが大きな理由であるが、高温空気を用いた場合、その領域が $15\ \mu\text{m}$ から $50\ \mu\text{m}$ であることがわかった。

メタンの一部を PMMA に置き換えると、消炎限界伸長率が低くなった。これは、メタンと比較して PMMA の燃焼熱が小さいことも理由であるが、粉体の燃焼過程の煩雑さにより着火遅れが生じ、熱の供給量が減少することも理由の一つであることがわかった。このため、粉体の割合が上昇するほど消炎限界伸長率も低下することがわかった。また、粉体が混合することにより、気化により生じる微小な擾乱や混合気の不均質により、特に小さな伸長率において早く火炎が消炎に至ることがわかった。

文 献

Burgoyne, J. H. and Cohen, L., The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols, Proceedings of the Royal Society London A, Vol.225 (1954), pp.375-392.

- Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., Internal group combustion of liquid droplets, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA (1982), pp.971-980.
- 傳田知広, 丸田薫, 小林秀昭, 新岡嵩, 混合燃料の対向流拡散火炎の消炎に関する研究, 日本燃焼学会誌, Vol.44, No.129 (2002), pp.158-165.
- Godsave, G. A. E., Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel, Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1953), pp.818-830.
- Hanai, H., Kobayashi, H., Suzuki, M. and Niioka, T., Extinction limits of counterflow diffusion flames of CO, H₂, CH₄ and their blends, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, USA (2003a).
- Hanai, H., Kobayashi, H. and Niioka, T., An experimental and numerical study on extinction limits of stretched diffusion flame in high-temperature air, Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Combustion, Nanjing, China (2003b), pp.91-94.
- Hanai, H., Ueki, M., Maruta, K., Kobayashi, H., Hasegawa, S. and Niioka, T., A lean flammability limit of polymethylmethacrylate particle-cloud in microgravity, Combustion and Flame, Vol.118 (1999), pp.359-369.
- Ju, Y., Maruta, K. and Niioka, T., Combustion limits, Applied Mechanics Review, Vol.54 (2001), pp.257-277.
- 三上真人, 水田好実, 土田祐己, 小嶋直哉, 対向流における予混合正デカン噴霧火炎の構造と定在性に関する一考察, 日本燃焼学会誌, Vol.50, No.153 (2008), pp.242-247.
- 中村摩理子, 赤松史光, 黒瀬良一, 香月正司, 対向流中に形成される噴霧火炎挙動に及ぼす粒子の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.71, No.711 (2005a), pp.2761-2768.
- 中村摩理子, 赤松史光, 黒瀬良一, 香月正司, ガス火炎面に突入する液体燃料噴霧の燃焼機構, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.71, No.707 (2005b), pp.1921-1928.
- 布目佳央, 吉永健太郎, 花井宏尚, 小林秀昭, 新岡嵩, 微小重力環境における揮発性燃料噴霧の火炎伝播速度およびその伝播挙動, 日本燃焼学会誌, Vol.47, No.141 (2005), pp.227-236.
- Okuyama, Y., Ohtomo, Y., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., An experimental study on particle-cloud flames in a microgravity field, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1996), pp.1369-1375.
- 大塚芳郎, 渡辺浩章, 対向流拡散炎の可燃限界, 日本機械学会論文集 (第2部), Vol.41, No.350 (1975), pp.2980-2983.
- Smoot, L. D., Horton, M. D. and Williams, G. A., Propagation of laminar pulverized coal-air flames, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute (1976), pp.357-387.
- 菅沼祐介, 野村浩司, 氏家康成, 菊池政雄, 依田眞一, 三上真人, 燃料液滴列の燃焼火炎燃え広がり及び気相燃料蒸気濃度の影響と気相火炎伝播に及ぼす燃料液滴列の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.737 (2008), pp.212-220.
- Tezok, F. I., Kauffman, C. W., Sichel, M. and Nicholls, J. A., Turbulent burning velocity measurements for dust/air mixtures in a constant volume spherical bomb, Proceedings of the 10th ICDERS, Berkeley, California (1985), pp.184-195.

References

- Burgoyne, J. H. and Cohen, L., The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols, Proceedings of the Royal Society London A, Vol.225 (1954), pp.375-392.
- Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., Internal group combustion of liquid droplets, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA (1982), pp.971-980.
- Denda, T., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., Extinction of the counterflow diffusion flame of blended fuels, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 44, No. 129 (2002), pp.158-165 (in Japanese).
- Godsave, G. A. E., Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel, Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1953), pp.818-830.
- Hanai, H., Kobayashi, H., Suzuki, M. and Niioka, T., Extinction limits of counterflow diffusion flames of CO, H₂, CH₄ and their blends, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, USA (2003a).

- Hanai, H., Kobayashi, H. and Niioka, T., An experimental and numerical study on extinction limits of stretched diffusion flame in high-temperature air, Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Combustion, Nanjing, China (2003b), pp.91-94.
- Hanai, H., Ueki, M., Maruta, K., Kobayashi, H., Hasegawa, S. and Niioka, T., A lean flammability limit of polymethylmethacrylate particle-cloud in microgravity, Combustion and Flame, Vol.118 (1999), pp.359-369.
- Ju, Y., Maruta, K. and Niioka, T., Combustion limits, Applied Mechanics Review, Vol. 54 (2001), pp.257-277.
- Mikami, M., Mizuta, Y., Tsuchida, Y. and Kojima, N., Study on flame structure and stabilization of premixed n-decane spray in counterflow, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 50, No. 153 (2008), pp.242-247 (in Japanese).
- Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R. and Katsuki, M., Effects of droplet size on spray combustion in counterflow, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 71, No. 711 (2005a), pp.2761-2768 (in Japanese).
- Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R. and Katsuki, M., Combustion mechanism of liquid fuel spray entering gaseous flame front, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 71, No. 707 (2005b), pp.1921-1928 (in Japanese).
- Nunome, Y., Yoshinaga, K., Hanai, H., Kobayashi, H. and Niioka, T., Flame speed and propagation behavior of volatile fuel spray in microgravity, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol. 47, No. 141 (2005), pp.227-236 (in Japanese).
- Okuyama, Y., Ohtomo, Y., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., An experimental study on particle-cloud flames in a microgravity field, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1996), pp.1369-1375.
- Ootsuka, Y. and Watanabe, H., The flammability limits of counter-flow diffusion flames, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.41, No.150 (1975), pp.2980-2983 (in Japanese).
- Smoot, L. D., Horton, M. D. and Williams, G. A., Propagation of laminar pulverized coal-air flames, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute (1976), pp.357-387.
- Suganuma, Y., Nomura, H., Ujiie, Y., Kikuchi, M., Yoda, S. and Mikami, M., Effects of fuel vapor concentration of an ambient gas on flame spread along a fuel droplet array combustion and effects of fuel droplet array on gas-phase flame propagation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 74, No. 737 (2008), pp.212-220 (in Japanese).
- Tezok, F. I., Kauffman, C. W., Sichel, M. and Nicholls, J. A., Turbulent burning velocity measurements for dust/air mixtures in a constant volume spherical bomb, Proceedings of the 10th ICDERS, Berkeley, California (1985), pp.184-195.