PMMA 粉体の可燃下限界に及ぼす粉体粒径の影響

花井 宏尚^{*1}, 長沼 佳昌^{*2}

Effect of the particle diameter on lean flammability limits of PMMA dusts

Hironao HANAI^{*1} and Yoshimasa NAGANUMA^{*2}^{*1, *2} Dept. of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Gunma College
580 Toriba-machi, Maebashi-shi, Gunma 371-0845, Japan

Received 8 May 2016

Abstract

Lean flammability limits of PMMA dusts with diameters of 5, 15, 30, 50, 80 and 100 μm were measured by using a closed vessel method. The results showed that the limits for the dusts with a certain diameter or higher were affected by the dust size, and the PMMA concentration at the limit increased with the diameter. A simple model for the gasification of PMMA in the pre-heat and the reaction zone of flame was clarified that the change of the limit was caused by insufficient gasification. It showed that the particle with a certain diameter or higher could not be gasified perfectly in the flame and passed through the flame. This caused heat loss to the outside of the flame. Thus, the limit concentration became higher than the gasified fuels. Heterogeneous blended fuels with methane and PMMA dust showed that the lean flammable limit changed under the Le Chatelier method when the dust size was small enough, but the limit increased when the dust size was large.

Key words : Lean flammability limit, Dust combustion, Plastic powder, Heterogeneous combustion, Gasification

1. 緒 言

燃料と酸化剤の予混合気で形成される火炎において、燃料濃度を増加もしくは減少させると、ある濃度を境に火炎は消炎に至る。この消炎となる境界の燃料濃度を可燃限界と言う。燃料が酸化剤に対し不足する場合に見られる可燃限界を可燃下限界（希薄側可燃限界）、燃料が酸化剤に対し過剰な場合を可燃上限界（過濃側可燃限界）と呼ぶ。メタンやプロパンなど炭化水素燃料の代表である気体のアルカンの可燃下限界は、単位体積当たりの発熱量がある一定の値で起こるとされる Burgess-Wheeler の法則(Burgess and wheeler, 1911)におおよそ従うことが知られている。言い換えれば、アルカンの可燃下限界は、ある一定の温度で生じると言うことである。火炎に生じる浮力や伸長の影響を慎重に取り除けば、Burgess-Wheeler で求められる値は実験結果とよく一致する。さらに異なる二種類以上の気体燃料が混合した場合には、Le Chatelier の式が示す通り、可燃下限界の気体濃度は、それぞれの発熱量の総和が一定値となるように決定されることが知られている。

一方で、可燃性の噴霧や固体の微粒子群（粉体、粉じん）を燃料とする混合気の可燃下限界は、気体と様相が大きく異なる。噴霧や粉体のような燃焼前の状態が気相でない物質は、燃焼を開始するにあたり、粒子の熱の吸収（粒子温度上昇）、気化（相変化）、周囲酸化剤との混合、着火と多くのプロセスを必要とする。そのため、燃焼の完了には気体燃料に比較して多くの時間を必要とする。噴霧、粉体の物性や粒子直径などの条件によっては、火炎帯内において粒子が燃焼を完結できない場合もあり、その場合の可燃下限界は、粒子径(Hanai et al., 1999)や気化熱、気化温度(布目他, 2005)など諸因子の影響を受けることになる。これまでの報告(Burgoyne and Cohen, 1954, Hayashi, 1984)において、数 μm 以下の噴霧や粉体は、予熱帯において粒子が完全に気化し、気体の可燃限界にほぼ等しくなるとされている例もある。すなわち、極小の粒子では、可燃下限界に対する粒径の依存はないとみなせる。しかしこれまでのところそれを裏付ける詳細な報告は見当たらない。

No.16-00201 [DOI:10.1299/transjsme.16-00201], J-STAGE Advance Publication date : 5 October, 2016

^{*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} 群馬工業高等専門学校専攻科 生産システム工学専攻

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

噴霧や粉体の燃焼実験を理想的な環境で実施するにはさまざまな困難を伴う。これらは主に、噴霧の生成や、噴霧や粉体の装置壁への付着、粒子同士の凝集、粒子の均一な浮遊、浮遊に伴う流れ場の影響、着火の確実性 (Peraldi et al., 1993) に起因する。粉じんの爆発実験に関しては、一般的に JIS Z8817 および Z8818 に規定された標準装置もしくはそれに準ずる装置を用いて測定が実施されている。粉じんの爆発では、安全性の観点から、すべての要因を含めた最もあり得る爆発の危険条件を爆発限界と定めるため、実際はそれが純粋な粉体/空気の可燃限界を表しているとは言い難い。

本研究では、可燃限界測定としてよく用いられる密閉容器を利用した実験手法を用い、 $5\text{ }\mu\text{m}$ から $100\text{ }\mu\text{m}$ のメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA) 粉体の可燃下限界を精度良く測定する。粉体の可燃下限界は粉体粒径の影響を受けることが分かっており、この測定値と、粉体燃焼時の気化に着目した簡略化モデルによる解析の実施結果から、粉体の可燃下限界の粒径依存性を明らかにすることを目的とする。また、PMMA 粉体に可燃性気体であるメタンを加えた異相混合気の可燃限界も測定し、あらかじめ空間中に気体燃料が存在する場の可燃限界を測定することにより、粉体の可燃限界に対する粒径依存への新たな知見を加える。

2. 実験装置および方法

安全性の観点から粉体の可燃限界濃度を知るだけであれば、その測定は JIS Z8818 に準ずる装置で行うべきである。一方、学術的な興味から可燃限界機構の解明に関心があるのであれば、その手法では、粉体の分散や着火時の流れ (Pu et al., 1991), 着火エネルギー (Hertzberg et al., 1980) 等の影響が排除できず、得られる可燃限界は、粉体濃度のみに依存する純粋な可燃限界と大きく異なるかもしれない。そこで本研究では、これまでの経験から粉体の可燃限界測定に対して多くの実績を持つ円筒形状の密閉容器およびプラスチック粉体分散装置を用いた実験を実施し、PMMA 粉体の可燃下限界の測定を行った。

図 1 (a) および (b) に、実験装置全体の概略図および粉体分散の概要図を示す。密閉容器は、内部の直径が 200 mm 、長さが 250 mm で、容積はおおよそ 8.0 L である。この容器の下部に設置された粉体カップに粉体を所定量入れ、空気噴流および分散板を用いて容器内全域に粉体は均一に分散される。分散用空気の噴射時間は 0.7 s とし、分散空気停止直後にニクロムヒーターにより容器中心部で着火した。メタンと PMMA 粉体の混合燃料を用いる実験では、実験前に容器内を完全に真空にした後、電磁弁の開弁時間のタイマーによる制御により規定量のメタンを容器内に満たし、所定濃度のメタン/空気の予混合気を容器内に生成した。粉体噴射用ガスも同様に所定濃度の混合気として粉体を噴射した。

Fig. 1 Schema of experimental set up. (a) Schematic diagram of experimental apparatus and (b) Explanation diagram for dust injection system.

密閉容器の上面と側面 2 箇所に観測窓が取り付けられており、実験時の粉体の分散の様子、着火の開始および火炎伝播時の火炎前縁の様子を観察した。燃烧に伴う容器内の圧力変化は、圧力上昇速度に対し十分に小さな時定数を持つひずみゲージ型圧力センサーを用いて取得した。可燃限界測定における「燃焼」および「不燃焼」の判断は、JIS および過去の研究(Hertzberg et al., 1980)を参考に、観測窓からの確認と容器内に生じた最大圧力値から行った。本研究では、容器中心部で燃焼が確認され、かつ容器内の最大圧力が 0.2 MPa 以上となった場合を「燃焼」と判断した。

粉体は、空気噴射を利用して勢い良く容器内に噴射されるため容器壁面にわずかに付着する。本実験では、あらかじめ着火を行わない噴射実験をすべての条件にわたって実施し、噴射による粉体の容器壁への付着量を計測することでその量を粉体カップに入れた量から除外し実験濃度とした。

実験で用いた PMMA 粉体は、積水化成成品工業（株）が製造、販売する商品名テクポリマーの PMMA 粉体である。この粉体は、形状が完全な球でまた粒度分布も比較的小さいため、粒径を変化させた場合の実験結果の変化を得やすい。また球状の粉体は、凝集し難く容器内全体で良好な粉体雲を得ることが可能である。準備した粉体粒径は、重量メジアン径で 5, 8, 15, 30, 50, 80, 100 μm の 7 種類である。各粉体粒径に対し 3 回以上の実験を行い、それらの平均を実験データとした。

3. 実験結果

3・1 PMMA 粉体の可燃下限界の測定

図 2 に、それぞれの粒径の粉体の可燃下限界濃度の測定結果を示す。横軸が粉体の粒径、縦軸が単位体積当たりの粉体濃度である。黒丸印がそれぞれの粉体の可燃下限界濃度を示す。結果から分かるとおり、PMMA 粉体の可燃下限界は、粉体が小さい場合、粒径の影響を受けずほぼ一定の値、おおよそ 100 mg/L 程度となった。その値は、PMMA の単体であるモノマーの MMA の可燃限界濃度 93.8 mg/L に近い値である。PMMA 粉体が燃焼する場合、火炎からの熱を受けた PMMA から MMA が発生し、それが燃焼するため、PMMA の可燃限界が MMA のそれに近くなることは妥当である。この時、PMMA の燃焼熱 26200 kJ/kg に対し MMA への気化熱 920 kJ は十分に小さい値であり、気化熱の可燃限界への影響は小さいと考えることができる。

ある直径以上では、可燃下限界濃度は粒径とともに大きく上昇していることがわかる。その上昇割合は、粉体粒径が大きくなればなるほど大きくなっている。この傾向は、以前行った微小重力環境における実験(Hanai et al., 1999)とよく一致する。

Fig.2 Amount of PMMA dust in the combustion vessel at the lean flammability limit as a function of the particle diameter. The region above each dot means flammable.

4. 粉体粒子燃焼モデル

4・1 解析モデル

粉体は、燃焼に至るまでに、粒子表面からの熱の吸収、固相から気相への気化、酸化剤との混合、そして着火と多くのプロセスを経ないといけない。そのため、ふく射や熱伝導による粒子の加熱開始を火炎帯に含めると粉体の火炎は気体に比べ厚くなる。本解析では、粉体の気化にのみ着目した簡略化モデルを提案し、火炎帯で粉体が完全に気化できるか否かが粉体の可燃下限界に影響を与えていると考え、粉体粒径と燃焼限界の関係解明を試みた。

これまでの実験(Kobayashi et al., 1994, Okuyama et al., 1996)での伝播する火炎の詳細な観察から、PMMA 粉体燃焼では、火炎前縁部に明確な予混合火炎が形成されることがわかっている。すなわち、火炎の伝播機構は、気体の予混合火炎と同様であると推測できる。そこで本研究では、粉体の粒径依存が粉体の火炎帯での完全蒸発にあると考え、次のモデルを考えた。図3に解析に用いたモデルを示す。直径 L の粉体粒子を空气中に配置し、そこに燃焼速度 S_L で火炎が向かってくる。粉体粒子は、予熱帯と反応帯を通過する間に加熱され、熱分解を起こす。次第に粉体直径は減少し、どの位置で粉体粒子が消滅するか解析した。簡略化のため、ふく射による粒子の加熱は考慮していない。解析の実行は、オープンソースの数値解析ソフトウェアの Scilab を用いて行った。予混合火炎の反応帯および予熱帯厚さは以下の式を用いて算出した。

$$\delta_p = \frac{\lambda}{\rho c_p S_L} = \frac{\alpha}{S_L} \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{\alpha}{S_L} \frac{T_b - T_{ig}}{T_{ig} - T_0} \quad (2)$$

ここで、 λ は予熱帯の平均熱伝導率、 ρ は未燃ガスの密度、 c_p は定圧比熱、 S_L は燃焼速度を表している。また $\alpha = \lambda / \rho c_p$ は温度拡散率と呼ばれている。さらに T_b は火炎温度、 T_{ig} は着火温度、 T_0 は未燃ガス温度である。

Fig. 3 Analytical model for gasification of a PMMA particle in propagating flame.

火炎から粉体へ伝わる熱量 Q は、式(3)より算出される。

$$Q = h(T - T_p)A \quad (3)$$

ここで、 h は熱伝達率、 T は粉体周囲の温度、 T_p は粉体粒子の温度、 A は粉体粒子の表面積である。熱伝達率 h はヌセルト数を定義する式(4)から求める。ヌセルト数は無次元数であり、流れのない場合の熱移動速度に対する流れのある場合の熱移動速度の大きさを示す。

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (4)$$

今回の解析では $Nu \approx 2$ とした。これは、球体の周囲の流れを得る Ranz-Marshall の式から算出した(Ranz and Marshall, 1952)。Ranz-Marshall の式を式(5)に示す。

$$Nu = 2 \left(1 + 0.276 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (5)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 Pr はプラントル数を示している。 Re は代表長さ L に比例し、また、粉体粒子と周囲空気の速度差はほぼないとみなすことができるため $Nu \approx 2$ となる。

よって式(3)は以下の式(6)のように書き換えることができる。

$$Q = \frac{Nu\lambda}{L}(T - T_p)A = \pi\lambda NuL(T - T_p) \quad (6)$$

この時、粉体直径が十分に小さいため、粉体は一様に加熱され粉体内では温度分布が生じないと仮定する。よって時間 t における粉体の温度 T は、式(7)により計算される。

$$T = \int_0^t \frac{6Q}{\pi d^3 \rho_p c_{PMMA}} dt + T_0 \quad (7)$$

ここで、 d_0 は粒子初期直径、 ρ_p は PMMA の密度、 c_{PMMA} は PMMA の比熱である。

また、PMMA は、ある温度に達するとポリマーの主鎖が連続的に切断されモノマーが次々と生じる解重合型であるため、解重合温度に達した PMMA は温度を一定に保ちながら、供給熱量に応じた単体の MMA を発生すると仮定し計算を行った。気化開始後の粉体直径は式(8)により算出した。

$$d = \left(d_0^3 - \frac{6Q(t-t_d)}{\pi \rho_p L_d} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

ここで、 t_d は解重合を開始した時間、 L_d は PMMA の解重合熱である。

表 1 に、解析で用いた物性値を示す。

Table 1 Thermal properties for PMMA and MMA

Specific heat at constant pressure for air, c_p	Specific heat for PMMA, c_{PMMA}	Flame temperature of MMA and air mixture at the limit, T_b	Ignition temperature for MMA, T_{ig}	Depolymerization heat of PMMA, L_d
1006 J/(kg·K)	1420 J/(kg·K)	1100 °C	421 °C	0.92×10^6 J/kg

4・2 解析結果

図4(a)および(b)に、 $25\ \mu\text{m}$ および $40\ \mu\text{m}$ の PMMA 粒子の解析結果を示す。横軸は、粒子が予熱帯に突入した時を $t=0$ とする時間変化、赤線が雰囲気から粒子が受け取る熱量、黒線が MMA の発生による粒子直径の変化である。予熱帯に突入後まもなくは、両粒子とも吸収熱流束が上昇する一方直径に変化は見られない。これは、吸収した熱がすべて粉体の温度上昇に使用されるためである、次第に粒子温度が上昇し PMMA の解重合温度に達すると、解重合が開始されモノマーである気体の MMA が粒子表面から放出される。ここから粒子直径は減少を開始する。この後、粉体温度が解重合温度で一定となり、雰囲気温度がさらに上昇するため、粒子へ移動する熱量は増加する。しかし、粒子直径の減少に伴い粒子への移動熱量はある時間において減少に転じ、最終的に粉体は消滅に至る。

図4(a)から分かるとおり、 $25\ \mu\text{m}$ の粉体では $0.014\ \text{s}$ 、また図4(b)から分かるとおり、 $40\ \mu\text{m}$ では $0.018\ \text{s}$ 付近で気化が開始されている。その後、 $25\ \mu\text{m}$ は火炎帯内で完全に消滅するが、 $40\ \mu\text{m}$ では火炎終端に達しても粒子は消滅していないことが分かる。

図5は、初期粉体粒径と火炎終端における粉体粒径の関係を示す。この結果において火炎終端における粉体粒径が0でない場合、粉体が火炎帯において完全に蒸発せず、火炎から熱の流出が生じたことを示す。その結果、火炎温度を維持するための必要粉体量が増加し、可燃下限界濃度が大きくなる。図5から、PMMA 粉体では $26\ \mu\text{m}$ 以上で燃え残りが生じ、これより大きな粉体では可燃下限界に対しより多くの粉体を投入しなければならないことがわかった。 $25\ \mu\text{m}$ 以下では燃え残り粉体粒径が $0\ \mu\text{m}$ であるため、火炎を通過する前に完全に気化し、可燃下限界は MMA の可燃下限界と一致するであろうことが推測できる。

Fig.4 Changes in particle diameter and heat transfer rate from ambient to particle with exposed time in flame. The black line is the particle diameter and the red one is the heat transfer rate to the particle. (a) for $25\ \mu\text{m}$ particle and (b) for $40\ \mu\text{m}$ particle.

Fig. 5 Variation of the diameter at the end of flame with the initial diameter change.

4・3 その他の影響

粉体粒子が火炎面において完全に蒸発するか、もしくは火炎を通過して火炎後方で後燃えするかは、初期の粒子直径以外に、各種粉体の熱物性の影響も受ける(Mizutani and Ogasawara, 1965). 粒子の熱容量が大きくなれば初期の温度上昇が緩慢となり、完全気化する粒径はより小さくなってしまふ。解重合温度が高い場合も初期の加熱量が大きくなってしまふために、火炎厚さが同じである場合、完全気化する粉体は小さくなる。また、解重合熱が大きい場合も、気化速度が遅くなるため完全気化する粒径は同様に小さくなる。一方、形状が球ではない粉体の場合や、粒子と周囲空気間にスリップが生じる環境での燃焼では、粉体への伝熱量が増加するため、完全気化できる粉体は大きくなるであろう。

本解析では、PMMA 粉体の直径が小さいため Bi 数が十分に小さいとみなし粉体内の温度分布を考慮しなかった。しかし、大きな径の粉体や熱伝導率の悪い粉体では、Bi 数の影響を受け、粉体内の温度分布を考慮しないと正しい結果が得られない可能性がある。また、実際の粉体の火炎では、ふく射による伝熱を無視できない。ふく射により粉体が加熱を受ける場合、より遠方から粉体は加熱を受けることができ、粉体の気化はさらに早い段階から発生する。この場合、完全気化する粉体の径はより大きく見積もることができる。

4・4 実験との比較

図6に、解析結果と実験結果との比較を示す。簡略化モデルを使った解析により $26\mu\text{m}$ (図中赤線) を境に PMMA 粉体は火炎帯において完全に気化できず火炎を通過してしまうことが示された。実験結果を見ると、 $15\mu\text{m}$ までは可燃下限界はほぼ一定値を取るが、 $30\mu\text{m}$ 以上では可燃下限界は粒径とともに上昇していることが分かる。つまり、 $15\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の間に粒子直径の影響を受ける変化点が存在し、それは解析結果と矛盾しないことが分かる。 $15\mu\text{m}$ 以下の粉体では、可燃下限界濃度はおよそ 100 mg/L であり、これは PMMA のモノマーである MMA の燃焼限界濃度 93.8 mg/L にほぼ一致する。 $30\mu\text{m}$ 以上の粉体では、火炎面で気化できなかった粉体が火炎を通過してしまうため熱損失となり、可燃下限界近傍では消炎をもたらす。このため、可燃下限界濃度を上昇させる。

このように、この簡略化モデルは粉体の可燃下限界の粒径の影響を定性的に説明できることが分かった。

Fig.6 Comparison between experimental result and analytical estimation. The red line indicates the estimated diameter for complete gasification in analysis. The flammability lean limit of MMA is 93.8 mg/L as indicated by arrow.

5. PMMA 粉体とメタンの混合気の可燃下限界

5・1 完全気化する粉体とメタンの混合気の場合

図7に、 $5\ \mu\text{m}$ のPMMA粉体とメタンを混合させた異相混合気の可燃下限界の測定結果を示す。縦軸は、空気に対するメタンの体積濃度、横軸は単位LあたりのPMMA粉体の重量濃度である。各測定点は、3度ずつ実験を実施した結果である。黒印が着火燃焼した条件、×印が着火しなかった条件の混合気を示す。実線は、これらの結果から予測したPMMA粉体とメタンの混合気の可燃下限界値となる。図7からわかるように、 $5\ \mu\text{m}$ のPMMA粉体とメタンの混合気の可燃下限界は直線となった。これは、気体の混合気の可燃下限界濃度を予測する Le chatelier の式とよく一致する。すなわち、これは先ほどの解析で示された通り、 $5\ \mu\text{m}$ のPMMA粉体は火炎帯において完全に気化するため、気体と同様な燃焼挙動を示すことを証明している。このように、火炎帯において完全気化可能な粉体に対する可燃下限界は、気体と同様な予測を導入することが可能である。

Fig. 7 Lean flammability limit of heterogeneous mixture of PMMA dust with diameter of $5\ \mu\text{m}$ and methane. The solid line indicates the flammable limit estimated by the law of Le chatelier.

図8(a)および(b)に、 $5\ \mu\text{m}$ のPMMA粉体0.2g、メタン濃度4.0%およびPMMA粉体0.5g、メタン濃度3.0%に対する着火0.1秒後における伝播火炎の静止画像を示す。火炎を観察すると、混合燃料での実験の火炎は、粉体のどの濃度においても比較的クリアな不輝炎（予混合火炎）が火炎先端に形成されていることが見て取れる。ただし火炎面の乱れはPMMA噴射時の空気流および火炎に生じる浮力の影響によるものである。両者の画像を比較すると、粉体濃度が高いほどオレンジの発光が強くなるように見える。これは、粉体燃料からのすすの生成によるものと推測できる。すなわち、粉体が十分に小さい場合には、気体燃料と同様の可燃下限界が得られることが分かったが、一方でこれらの発光から推測すると、火炎構造に明確な変化が生じたことが示唆される。

Fig. 8 Typical flames of $5\ \mu\text{m}$ PMMA dust and methane. (a) for 0.2 g PMMA and 4.0 % methane and (b) for 0.5 g PMMA and 3.0 % methane.

5・2 火炎帯で燃え残りが生じる粉体とメタンの混合気の場合

解析の結果から、火炎帯での完全な気化が期待できないと予測された $26\text{ }\mu\text{m}$ 以上の大きな粉体について、メタンとの予混合気を生成し、可燃下限界の測定実験を行った。図9および図10にそれらの結果を示す。縦軸は、空気に対するメタンの体積濃度、横軸は単位LあたりのPMMA粉体の重量濃度である。図9から分かるように、 $30\text{ }\mu\text{m}$ の粉体とメタンによる可燃下限界は、 $5\text{ }\mu\text{m}$ の場合よりなだらかな変化を見せた。これは、 $30\text{ }\mu\text{m}$ の粉体単体での可燃下限界 142 mg/L が、 $5\text{ }\mu\text{m}$ の場合 104 mg/L より高いためであり、メタン濃度減少分の熱量低下を粉体で補うためには、 $30\text{ }\mu\text{m}$ は $5\text{ }\mu\text{m}$ より多くの粉体を供給しないとイケないためである。実線で示される可燃下限界の予測線は直線となっていない。特に、粉体濃度が希薄の場合において、必要粉体量が大きく変化する曲線となっている。これは、微量な粉体が混合することで火炎厚さや温度分布に変化が生じ、粉体不完全気化の影響をより過敏に受けるためであると予測される。粉体濃度がある一定以上高くなると火炎構造の変化は微小となり、可燃下限界を予測する線は直線に近くなる。

Fig.9 Lean flammability limit of heterogeneous mixture of PMMA dust with diameter of $30\text{ }\mu\text{m}$ and methane. The solid line indicates the flammable limit estimated by the law of Le chatelier.

図10に示す $80\text{ }\mu\text{m}$ のPMMA粉体では、可燃限界線の傾きは $30\text{ }\mu\text{m}$ の場合よりさらになだらかになっている。これは、粒径が大きくなればなるほど粉体の完全燃焼が難しくなり、混合燃料において不足分の熱量を補うためにさらに多くの粉体量を供給しないとイケないためである。

Fig.10 Lean flammability limit of heterogeneous mixture of PMMA dust with diameter of $80\text{ }\mu\text{m}$ and methane. The solid line indicates the flammable limit estimated by the law of Le chatelier.

図 11 (a)および(b)に、30 μm および 80 μm の PMMA 粉体とメタンの混合気燃焼時の火炎の様子を示す。両者とも、着火 0.033 s 後の火炎である。ただし、火炎周囲に見られる小さな線状の光は、アクリル観測窓の微細な傷による光の乱反射である。大きな粉体の火炎では、火炎帯での粒子の完全気化が難しく火炎の後燃えが多く生じるようになるため、粉体量が多い場合に特に火炎からの強い輝炎が観察される。また 30 μm の火炎に比べ 80 μm の火炎の方が輝炎からのさらに強い発光が見られる。

Fig. 11 Typical flames of large PMMA dust and methane. (a) for 0.9 g PMMA of 30 μm and 2.0 % methane and (b) for 2.1 g PMMA of 80 μm and 3.0 % methane.

6. 結 言

混合気の可燃限界は、燃焼反応によって生じる熱の供給と系外への熱損失のバランスにより生じる。気体の予混合気では火炎帯において燃料が完全に燃焼するため、酸素が十分に存在する雰囲気において不完全燃焼による熱の損失は存在しないが、粉体では、燃焼プロセスの複雑さおよびその長さにより粉体は燃焼に寄与しないまま系外へと流出し熱損失となる。今回はごく簡単な粉体気化モデルを用い、粉体の完全気化が粉体の粒径や、熱物性形状などによることが分かった。解析結果は、実験結果とよく一致し、この解析モデルが粉体の燃焼限界の変化を説明できることが分かった。今後は、粒子内の温度分布、気化モデルの最適化、ふく射熱移動の考慮等を含めることが課題となると思います。また、PMMA は火炎前縁の様子を観察すると比較的明確な予混合火炎の形成が確認できるが、気化の困難な粉体の場合、粉体の周囲に形成される拡散火炎の燃え移りによって伝播火炎が形成されるケースでは、他の消炎限界モデルを提案しないといけない。

文 献

- Burgess, M. J. and wheeler, R. V., Lower limit of inflammation of mixtures of paraffin hydrocarbons with air, Journal of the Chemical Society, Vol.99, No. 2013 (1911).
- 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.
- Hayashi, S., Limiting factor of flame propagation in mono-sized sprays of low-volatility fuels, Technical Report of National Aerospace Laboratory, TR-839T, (1984).
- Hertzberg, M., Cashdollar, K. L. and Lazzara, C. P., Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1980), pp. 717-729.
- 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.
- Kobayashi, H., Ono, N., Okuyama, Y. and Niioka, T., Flame propagation experiment of PMMA particle cloud in a microgravity environment, Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1994), pp.1693-1699.
- Mizutani, Y. and Ogasawara, M., Laminar flame propagation in droplet suspension of liquid fuel, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 8 (1965), p. 921.
- 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.
- Pu, Y. K., Jarosinski, J., Johnson, V. G. and Kauffman, C. W., Turbulence effects on dust explosions in the 20-liter spherical vessel, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1990), pp.843-849.
- Peraldi, O., Landry, C., Lee, J. H. and Knystautas, R., Influence of particle size on dust explosions in a small scale spherical vessel, 14th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, University of Coimbra, Portugal (1993).
- Ranz, W.E., Marshall, W.R., Evaporation from drops. Chemical Engineering Progress, Vol.48 (1952), pp.141-146.

References

- Burgess, M. J. and wheeler, R. V., Lower limit of inflammation of mixtures of paraffin hydrocarbons with air, Journal of the Chemical Society, Vol.99, No. 2013 (1911).
- 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.
- Hayashi, S., Limiting factor of flame propagation in mono-sized sprays of low-volatility fuels, Technical Report of National Aerospace Laboratory, TR-839T, (1984).
- Hertzberg, M., Cashdollar, K. L. and Lazzara, C. P., Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1980), pp. 717-729.
- 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.
- Kobayashi, H., Ono, N., Okuyama, Y. and Niioka, T., Flame propagation experiment of PMMA particle cloud in a microgravity environment, Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1994), pp.1693-1699.
- Mizutani, Y. and Ogasawara, M., Laminar flame propagation in droplet suspension of liquid fuel, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 8 (1965), p. 921.
- 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.
- Pu, Y. K., Jarosinski, J., Johnson, V. G. and Kauffman, C. W., Turbulence effects on dust explosions in the 20-liter spherical vessel, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1990), pp.843-849.
- Peraldi, O., Landry, C., Lee, J. H. and Knystautas, R., Influence of particle size on dust explosions in a small scale spherical vessel, 14th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, University of Coimbra, Portugal (1993).
- Ranz, W.E., Marshall, W.R., Evaporation from drops. Chemical Engineering Progress, Vol.48 (1952), pp.141-146.