

5. 管路における粉じん爆発火炎の伝ば挙動と機構*

韓 宇燮**, 八島正明***, 松田東栄****

5. Propagation Behavior and Mechanisms of the Dust Flame in a Duct*

by Ou-Sup HAN**, Masaaki YASHIMA*** and Toei MATSUDA****

Abstract : The aim of this study is to investigate experimentally the flame structure in dust flame propagation and to provide the fundamental knowledge for development of explosion suppression systems applied to dust explosions. Insufficient information on dust flame propagation is mainly due to experimental difficulties in the generation of a uniform dust suspension, as well as the fact that particle size and size distribution. Upward propagating laminar flames in a vertical duct of 1800 mm height and 150 mm × 150 mm square cross-section are observed. From the experimental result, it is found that propagating lycopodium flame front shows the double flame structure in which individual burning particles and ball-shaped flames surrounding several particles are included. The thicknesses of preheated and reaction zone have been also determined by a schlieren photography. The flame in spatial area between independent flames and individual burning particles is not observed. This means that the flame can not propagate continuously in comparison with premixed gaseous flames. The thickness of lycopodium dust flame is observed to be 20 mm, about several orders of magnitude higher than that of premixed gaseous flames. By means of the microscopic visualization, it was found that the flame front propagating through lycopodium cloud is discontinuous and not smooth. The experiments using a PIV (Particle Image Velocimetry) system with a high-resolution video camera have been conducted to clarify the motion of particles during the flame propagation. Due to convective flow induced by the flame, a part of gravitational settling particles is shifted to its surrounding sides and the rest of the particles changed their movements to upward in front of the flame. Such particles movement causes a dynamic variation in dust concentration ahead of the flame, which propagates at lower dust concentration rather than the mean concentration. Considering the movement of single particle ahead of the flame, a certain residence time of the unburned particle in preheat zone is needed to generate combustible gas from the particle. The residence time will depend on preheat zone thickness, particle velocity and flame propagation velocity..

Keywords; Dust explosions, Lycopodium, Flame propagation, PIV, Dust particles

* 本研究の報告内容は、J. of Loss Prev. 13-6 (2000) と J. of Loss Prev. 14-3 (2001) に発表したものを一部修正して取りまとめたものである。

** 科学技術振興事業団重点研究支援協力員 Supporting Staff Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

*** 化学安全研究グループ Chemical Safety Research Group

**** (社) 産業安全技術協会 Technology Institution of Industrial Safety ; 元社産業安全研究所化学安全研究部 Former Senior Researcher of NIIS, Chemical Safety Research Division

1. まえがき

微粒子技術の高度化により、原料、中間生成物を粉体の形で取り扱う産業分野は多くなっているが、取り扱われる粉体の多くは可燃性であるものが多いため、粉体取り扱い工程では、発火予防が必要とされる。可燃性粉体を取り扱われる工程では、粒子群が空気中に浮遊、分散されている場合が多く、何らかの原因で粉じん混合気に着火すると、気相中を火炎（燃焼波）が急激に伝ばする現象が見られ、粉じん爆発に至ることがある。

粉じん爆発に関する特性評価では、燃焼に及ぼす燃焼限界（粉じん雲濃度、限界酸素濃度、粒子径など）、最大爆発圧力、圧力上昇速度などがハートマン型爆発試験装置や密閉耐圧容器を使って実験的に測定され、実用的には爆発の威力を相対評価しやすいように K_{st} 値に置き換えてその危険性が示される。この場合、容器内部の火炎の伝ば挙動によって K_{st} 値がどのように変化するかということには関係なく、むしろ数値そのものに価値が置かれ比較されることになる。しかし、実際のところ、粉の分散性、内部の気流の乱れの影響などによって火炎の伝ば特性が変化し、その値に違いが見られることは明らかであり、粉じん雲中の火炎伝ば特性とともに爆発特性が議論されなければならない。

粉じん雲中の火炎伝ばに関する研究は、実用的な危険性評価という観点から、上述のハートマン型爆発試験装置に代表される小型燃焼管を用い、多くの粉体に対して燃焼特性値の測定が行われ、火炎伝ばに及ぼす因子についてはよく調べられてきた^{1,4)}。ここで問題になるのは、粉じんの燃焼が複雑な不均一系混合気の燃焼現象であり、粒子に対する重力の影響が大きいということである。そのため、粉の自重により生じる分離、沈降、浮遊、熱対流などの現象は、粉じんの火炎伝ば機構に対する研究を一層困難なものにしている。最近では、この問題を解決するため、無重力場（微小重力場）で実験が行われることがあるが、結局のところ、地上で起こる粉じん爆発では対流の影響が大きい、それが無重力場では無く、また単一粒子と粒子群の燃焼挙動の違いもあり、すなわち、火炎の伝ばの様式が異なるため、無重力場で議論される因子だけでは実現象を説明できないことになる。包括的な粉じん爆発に関する研究において、火炎の伝ば機構を解明するための研究は、精度、再現性のよい実験の実施及び他の研究と比較できるデータが十分ではなく、予混合火炎や液滴のそれらほど行われていないのが実状である。さらに、

得られた結果が実験室的な小規模装置で測定されていることが多く、これらのデータを実規模の装置で起こりうる火炎伝ば現象に適用できるかどうかという問題には議論の余地がある。

本研究は、可燃性粉体を取り扱われる工程において、粉じん爆発を抑制するための火炎抑止装置の開発を最終目標とするが、その目標達成のためには、工程で多く用いられている移送配管内を火炎が伝ばする挙動を調べるとともに、火炎の伝ば機構に関する知識が必要である。なぜなら、火炎が伝ばできる条件とその伝ば機構を知ることによって、逆に火炎が伝ばできない条件を知ることができるためである。そこで、本研究では、実規模の配管内で起こりえる粉じん火炎伝ばを想定し、精度、再現性の良い実験データを収集し、火炎抑止装置の開発に生かすための実験を行った。実験の試料としては、従来より粉じん爆発研究で使われてきた石松子粉を用い、その粉じん雲中の火炎の伝ば挙動とその際の火炎構造を調べ、火炎の伝ば機構を考察した。

2. 実験

2.1 実験で用いた粉じん試料

粉じん雲中の火炎伝ばに影響を与える因子としては、粉じんの種類、化学反応特性、粒径分布、粒子径、粒子の形状、雰囲気組成、周囲の気流、重力などが挙げられる。石松子（lycopodium）粉は、シダ植物の一つヒカゲノカズラの胞子で淡黄色、流動性が良く、用途としては主に果樹等の人工授粉用の花粉増量剤として用いられているが、粒子径がほぼ一定で流動性が良いという特徴から、気流の動きを調べる際のトレーサー粒子としても使われている。さらに、この粉は可燃性でもあるため、粉じん爆発特性の試験粉体としても使用されている。Table 1には石松子の物性値を示した。本実験では、このような特徴から石松子を試料粉として用いたが、このことは火炎伝ばに与える因子の数を限定した実験を可能とし、またこれまでに調べられてきた実験結果との比較が容易になる利点がある。

2.2 実験装置

本研究で使用した実験装置は、Fig. 1に示したように、垂直燃焼管、シャッター、点火装置、粉じん雲発生装置、空気供給装置で構成されている⁷⁾。燃焼管は、長さ1,850 mm、その断面は150 mm×150 mmの正方形である。また、火炎温度を測定するために、熱電対（素線径25 μm、Pt/Pt-Rd 13%）を電

Table 1 Physical properties of lycopodium dust.
石松子粒子の物性値

Molecular formula	$C_{5.7}H_{9.6}O_{1.3}N_{0.09}$
Minimum ignition energy [mJ]	10 ~ 40
Minimum ignition temperature [°C]	
- dust clouds	480
- dust layer	310
Flammable lower limit [g/m^3]	40 ~ 70
Stoichiometric concentration [g/m^3]	105 ~ 125
Particle size [μm]	32
Specific gravity [-]	1.05
Volatile content [weight %]	50
Moisture [weight %]	3.3 ~ 3.7
Bulk density [g/m^3]	0.367 ~ 0.477

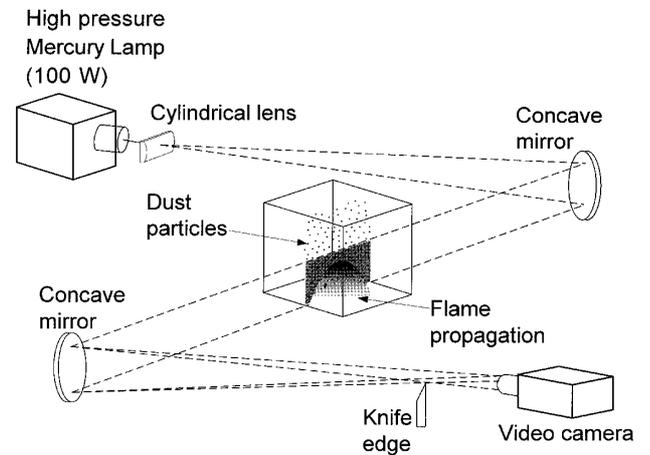


Fig. 2 Optical system for measuring flame behavior in lycopodium dust.
光学測定装置の概要

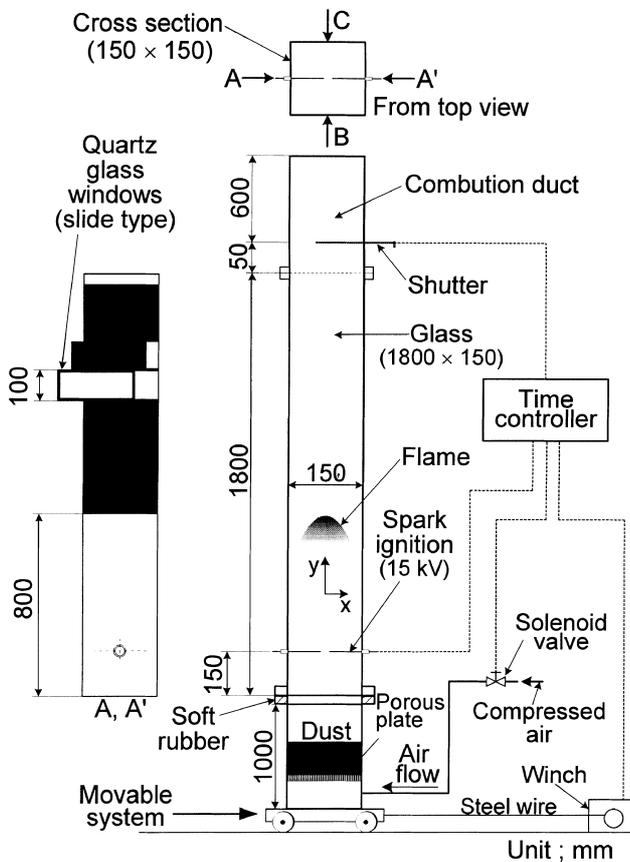


Fig. 1 Experimental setup.
実験装置

極位置から上方に 300 mm, 燃焼管断面の中央に位置するように取り付けられた。ただし, ふく射補正は行っていない。火炎の構造とその挙動を観察するために, ビデオカメラ, 高速度カメラ, シュリーレン写

真撮影法 (Fig. 2), PIV法などを用いた。火炎伝ば及び粉じん粒子挙動の可視化手法として, PIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定法) と呼ばれる流速計測技術^{8)~13)}を用いた。

2.3 実験方法

実験は, まず垂直燃焼管の上部だけを開放した状態で, 一定圧力の乾燥空気による流動層を燃焼管下部から導入し, 均一な粉じん空気混合気を作る。垂直燃焼管の下端より空気を流入させ, 燃焼管内に比較的緩やかな上昇気流を作り, 粉じん粒子をこの気流にのせて粉じん雲を作る方法である。次に, 粉じん空気混合気が燃焼管の全体に満たされた時, 空気の供給を停止し, 粉じん供給装置を除去して燃焼管の下部を開放し, 燃焼管の上部にあるシャッターを閉じる。そして, 0.3 ~ 0.5 secの時間遅れ及び 0.3 secの火花放電により点火を行った。粉じん濃度は, 実験前後における粉じん供給装置内にある粉じん量の減少量より求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 火炎帯の様子及び厚さ

シュリーレン写真撮影法は, 火炎伝ば速度の測定と火炎先端付近の温度変化の様子を観察するために用いた。濃度Cに伴う石松子粉じん雲中を上方に伝ばする火炎の高速度シュリーレン写真の例をPhoto 1に示す。シュリーレン像の境界面は, 密度変化により屈折率が急激に変化するところであるので, 火炎帯付近の温度勾配の大きいところを示すものと考

えられる。これらの写真からわかるように、温度上昇の始まりを示すシュリーレン境界面が先行し、その後方のところには孤立した輝炎（独立火炎として定義した）が存在する⁷⁾。独立火炎の数は、濃度の増加とともに多くなることがわかる。シュリーレン像の境界面はなめらかな形状をしているが、黄色い発光部の輪郭は不規則な形状をしている。**Photo 1**において、焦点の合っていない孤立火炎が多く見られるが、これは上方への火炎の伝ば方向に対し、水平方向から撮影しているため、管の中央に合わせた焦点の手前と奥行きにあるいっしょに写っていることによる。予混合火炎の場合、火炎は薄く、シュリーレン像の境界面はほぼ燃焼帯の先端を示していると考えてよいが、粉じん火炎の場合は、**Photo 1 (a)**に示したように火炎は厚く、予熱帯の先端と考えられ、その境界面から後方約 8 mmのところに燃焼帯が位置（火炎が存在する位置）していることがわかる。シュリーレン像のどの位置が火炎の予熱帯と燃焼帯に該当するのかは、温度分布の測定結果と同時に議論する必要があるが、燃焼帯はシュリーレン像の境界面（予熱帯）から後方の一定の距離に存在していることがわかる。この距離は、ある粉じん濃度まではその濃度増加とともに小さくなるが、次第に一定値になる。なお、**C = 47** と **122 g/m³**における平均火炎伝ば速度は、それぞれ 0.30 と 0.38 cm/sであった。

熱電対を使った空間を伝ばする火炎の温度測定で

は、熱電対の熱慣性による出力の応答遅れがあるため、熱電対の時定数補正が必要となる¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。熱電対の接点周辺の気体温度である補正温度に対して、時定数 τ を考慮すると、以下の式 (1) が得られる。

$$T = T_m + \tau \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

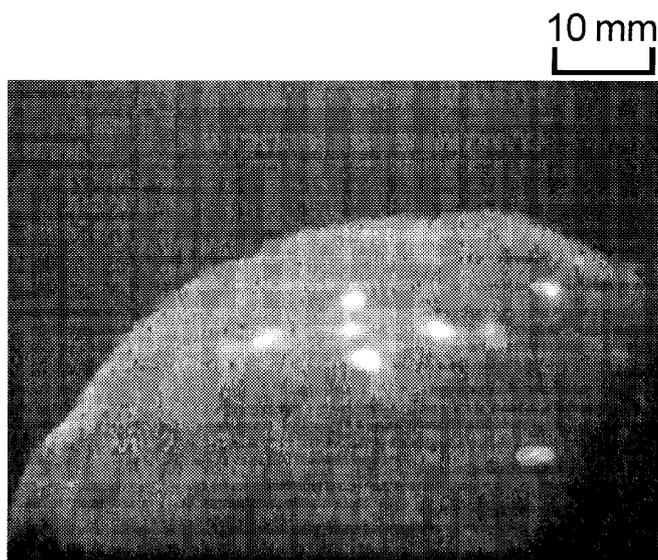
式 (1) において、 T_m は実際に測定された温度であり、 τ は d を熱電対の接点（球）の直径として次式で表される。

$$\tau = \frac{(\rho \cdot C_p \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6})}{h \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot d}{6 \cdot N_u \cdot \lambda_g} \quad (2)$$

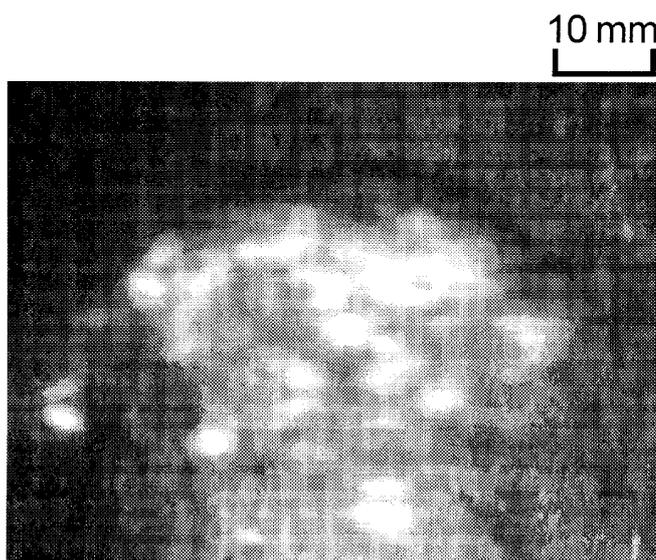
ここで、 h 、 ρ 、 C_p 、 λ_g 、 N_u 、 d は、それぞれ熱伝達係数、接点の密度、比熱、気体の熱伝導率、Nusselt数、熱電対接点の直径である。本研究で使用した熱電対の物性値は $\lambda_g = 0.081 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、 $\rho = 2.14 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_p = 159 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $d = 40 \times 10^{-6} \text{ m}$ である。また、火炎伝ばに伴う気流の速度は $U = 0.8 \text{ m/s}$ で、代表長さ $l = 40 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、動粘性係数 $\gamma = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、レイノルズ数 Re は、約 2×10^{-2} となる。空気中での N_u と Re に関する実験式として、式 (3) があるが¹⁸⁾、

$$N_u = 2.0 + 0.547 \cdot Re^{0.5} \quad (3)$$

$Re = 2 \times 10^{-2}$ を代入して計算すると、 N_u は約 2.0 が得られる。したがって、これらの値から、 τ を計算すると、 $\tau = 5.6 \text{ ms}$ となる。



(a) $C = 47 \text{ g/m}^3$



(b) $C = 122 \text{ g/m}^3$

Photo 1 Typical instantaneous schlieren images with the concentration of lycopodium dust.
石松子の濃度による火炎帯の瞬間シュリーレン画像の一例

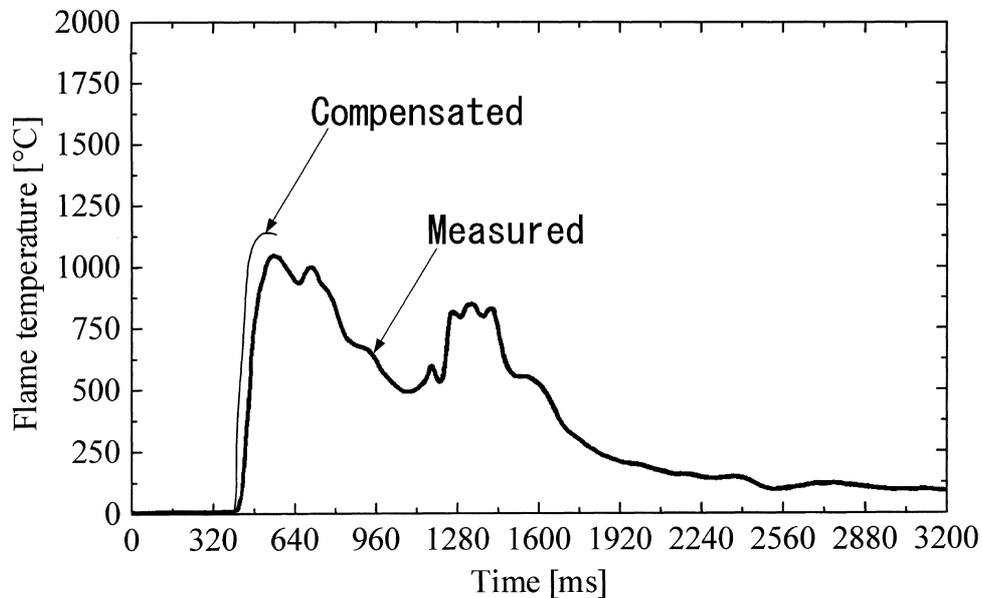


Fig. 3 Measured and compensated temperature variation with time of the flame propagating in a 122 g/m³ lycopodium-air mixture.

濃度122 g/m³での石松子の火炎炎温度及び熱電対の時定数を考慮した補正温度の一例

熱電対により得られた火炎温度の測定値及び熱電対の時定数を考慮した補正温度をFig. 3に示す。いくつかの火炎温度のピークが観察され、最初のピークと二番目のピークは反応帯に入った熱電対の温度変化である。このような温度波形から二つのピークの間においては、熱電対が独立火炎と独立火炎の間にある燃焼粒子中を通過しているか、あるいは火炎が不連続になっているため、このようなピークとして現れたことがわかる。

3.2 火炎帯近傍における粒子速度

Fig. 4は、PIV測定による火炎伝ば速度の変化に伴う火炎先端の管軸方向の粒子速度を示したものである。粒子速度は垂直、水平成分の速度として表しているが、火炎伝ば速度とともに粒子速度も増加し、直線的に変化していることがわかる。濃度が増加すると、この直線の勾配がやや増え、粒子速度の増加率が多少大きくなる傾向がある。

Fig. 5は、粒子の速度 V_p が、火炎中心部における火炎先端からの距離によってどのように変わるのか調べた結果である。この図で、 y は火炎先端からの距離を、また負の粒子の速度は、火炎の伝ば方向とは逆に粒子が沈降していることを表している。 $C=47\text{ g/m}^3$ の場合、 $y=10\text{ mm}$ 以上の距離にある粒子は 0.04 m/s の速度で沈降しているが、 $y=9\text{ mm}$ の粒子は火炎伝ばと同じ方向で上方へ加速し始める。その後、

粒子は火炎先端に近づくほどより加速され、最大 0.29 m/s までになる。一方、 $C=122\text{ g/m}^3$ となると、 $y=13\text{ mm}$ 以上の距離にある粒子は 0.06 m/s の速度で沈降しており、 $C=47\text{ g/m}^3$ での粒子速度より多少大きくなる。この濃度での粒子速度は、およそ $y=11\text{ mm}$ のところまで火炎に接近すると、加速し始め、火炎先端近くで最大(0.36 m/s)となる。このように、粒子の速度は火炎先端からの距離によって変わり、火炎の移動は粒子の移動と密接に関係していることがわかる。管内を伝ばする予混合火炎においては、伝ば火炎とともに一緒に動く、誘起される気流が存在するが¹⁸⁾、粉じん伝ば火炎については、Fig. 6に示すような火炎近傍での粒子速度分布になると考えられる⁴⁾。すなわち、火炎遠方での粒子速度は燃焼管の中心部付近で一番大きな値となる速度分布を持っている。しかし、火炎に近づくにつれて、中心部の粒子速度はそれに対向する火炎の上方移動に伴う気流により減少し、その後、火炎とともに上方移動するようになる。上方へ移動する粒子の速度は、火炎帯の近くで最大となる。

3.3 火炎近傍での粒子間距離

粉じん火炎では、粒子間の距離も火炎の構造に密接に関係しているはずである。火炎面が浮遊粉じん雲中を通過する際の粉じん濃度の変化について、火炎近傍での粒子間距離の変化を調べることは火炎構

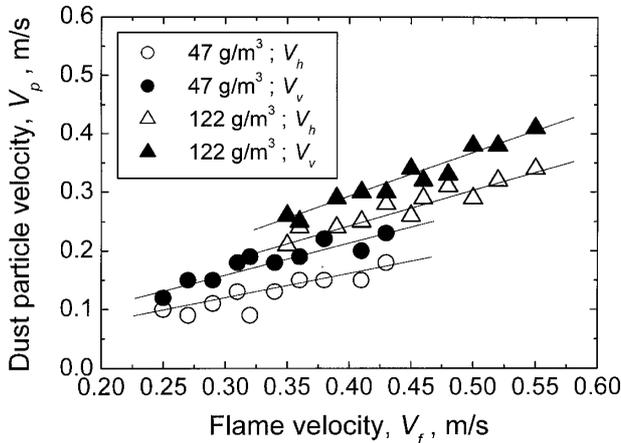


Fig. 4 The relationship between the flame velocity and dust particle velocity at the leading flame edge.
濃度による火炎中心部の先端における粒子速度の変化

造の理解に役立つものと考えられる。そこで、均一に分散した粉じん雲を仮定し、火炎帯に入る前後における粒子間の距離の変化について、濃度の増加に対して計算した。同じ直径 D_p を持つ粒子が均一に分散されている空間を考えると、ある温度における粒子間の距離 L は、式 (4) のように表される。

$$\frac{1}{L^3} = \frac{C_d}{\left[\frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 \right] \cdot \rho_s} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

ここで、 C_d 、 D_p 、 ρ_s 、 T_0 は、それぞれ粉じん濃度、粒子平均直径、粒子密度、初期温度である。 L は式 (5) になる。

$$L = D_p \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot \rho_s}{6C_d} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right) \right\}^{1/3} \quad (5)$$

式 (5) は、粒子が未燃焼領域から予熱帯に通過するとき、その粒子間の距離がどのように変わるのかを表した式である。計算で考慮した火炎帯温度 (T) は、実験で得られた最大火炎温度の測定値を用いた。

本研究で用いた燃焼管の下端開の条件下で火炎が伝ばすると、燃焼管内の圧力上昇は見られない。また、火炎が伝ばするときの火炎面前後における微小圧力変化を無視すると、火炎先端近くの一定体積の粉じん濃度は、温度の増加により、減少する。これらの結果をまとめて、Fig. 7 に示す。粉じん濃度は温度の増加とともに減少するので、単位体積当たり

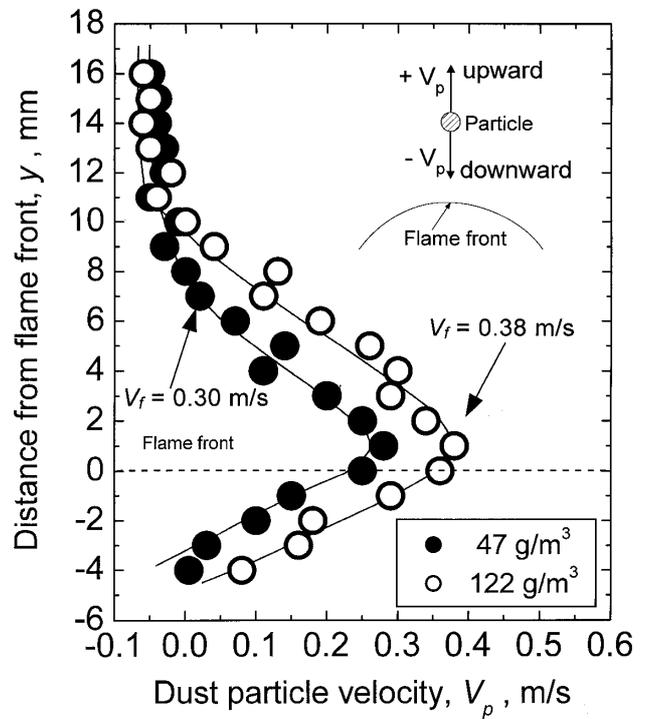


Fig. 5 Dust particle velocity with change of distance from leading edge of reaction zone at the center of flame.
火炎先端中心部からの距離による粒子の速度 (V_p) の変化

の粒子が未燃領域 (L) から燃焼領域 (L') に移動すると、粒子間の距離は広がる。燃焼領域では、火炎による膨張のため、粒子密度が減少するためである。また、粉じん濃度の増加とともに、 L と L' はともに減少する。実験から得られた燃焼粒子の直径は $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ であるので、個々の粒子まわりの火炎が一緒になる濃度は約 230 g/m^3 であり、この濃度以上では火炎面は連続になると見積もることができる。しかし、実際に粉じん雲中には、個々の粒子と粒子の塊が存在しているので、濃度 230 g/m^3 以下においても、火炎の融合はあり得る。

3.4 火炎の伝ば機構

3.4.1 粒子挙動と火炎の移動

石松子粉じん雲中の火炎伝ばを詳細に観察して得られた結果から、石松子粉じん火炎の伝ば機構を Fig. 8 に示した⁷⁾。次に粒子の挙動と火炎伝ばの関係性を述べる。

上方に伝ばしている火炎の遠方にある未燃粒子 (Fig. 8 の白丸の粒子 1) は、重力により沈降しているが、予熱帯の先端に近づくにつれ、その粒子速度が次第に小さくなる。これに対し、既に予熱帯の中

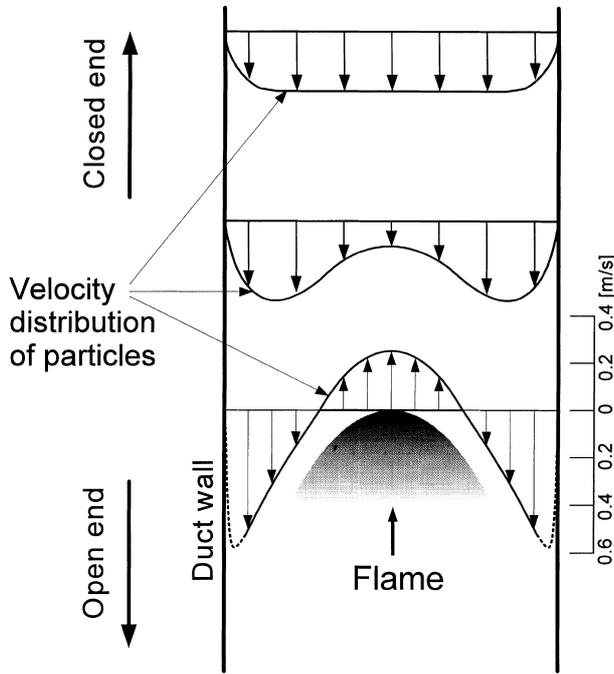


Fig. 6 Velocity distribution of particles near and ahead of flame of a propagating flame ($V_f = 0.32 \text{ m/s}$).
石松子層流粉じん火炎帯近傍での粒子速度分布 ($V_f = 0.32 \text{ m/s}$).

にある黒丸の粒子 2, 3, 4 は加熱されながら火炎帯とともに上方へ移動している。その粒子の速度は、加速されながら反応帯（燃焼帯）の先端の近くで最大となる。このような粒子の動きからわかることは、粒子が火炎と同じ方向に動くことで予熱帯における粒子の滞留時間を長くするということである。このことで粒子の熱分解に必要な加熱時間が確保されていると考えられる。

ここで粒子の滞留時間 T_r に着目すると、その時間は $d_{pr}/(V_f - V_p)$ により推定できる。ここで、 V_f , V_p , d_{pr} は、それぞれ火炎伝ば速度、粒子速度、予熱帯の厚さである。速度の符号は火炎の伝ばと同じ方向を正とする。Fig. 5 より、 $C=47$ と 122 g/m^3 における予熱帯の厚さは、それぞれ 8 と 10 mm、さらに濃度に対する火炎伝ば速度は、それぞれ 0.30 と 0.38 m/s が得られる。それらの濃度に対する $V_p=0$ となる距離は、それぞれ 8 と 10 mm である。 V_p を 0 から最大値までの平均とし、その平均速度差 (0.30 - 0.15) と (0.38 - 0.22) m/s より、それらの濃度における T_r を見積ると、それぞれ 53 と 63 ms となる。

空気中でのプラントル数は 1 より小さいので、火炎前方の粒子の速度境界よりも温度境界のほうが厚

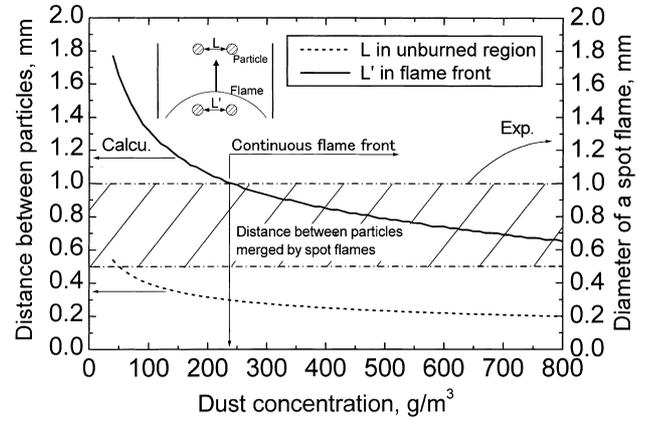


Fig. 7 Variation of mean distance between particles with dust concentration calculate by flame temperature and assumption of full-uniformity.
火炎近傍での粒子間距離の実験値と計算値

いと考えられる。したがって、 $V_p = 0$ のところの粒子はすでに火炎帯に入っていることが推測できる。Fig. 3 の温度分布から示されるように、粒子が火炎帯に入り、火炎帯で滞留する上述の時間、温度上昇は約 300 °C となる。この温度は、石松子の熱分解特性を調べた以前の研究によれば¹⁵⁾、石松子の粒子が熱分解し、可燃性気体が形成することが確認されている。熱分解により粒子の周りに放出された可燃性気体が拡散するとともに、その粒子周りの酸素と混合するようになる。そして、拡散された可燃性気体と酸素の混合気の温度が着火温度 T_i に達すると粒子は着火し、その周りに火炎を形成する（粒子 5）。石松子粉じんの最小着火温度については、425 ~ 460 °C という結果が得られている¹⁾。着火後、粒子周りの温度が火炎温度 T_f に達するとともに、熱は低温側、未燃焼側に移動し、新しい温度曲線は T_1 となる。粒子 4 の移動速度は最大となり、時間 t_1 で着火し、火炎帯の先端を形成する（粒子 4'）。火炎の伝ば速度 V_f は、粒子の移動速度 V_p より大きいので、予熱帯で上方移動する粒子は火炎帯の先端に追いつくことになる。

この予熱帯における粒子の着火に関して、流れ場に予熱帯を模擬した一定の温度勾配のある温度場を形成した着火実験を行った²⁶⁾。実験では、700 °C 以上（着火温度以上）に加熱した平板前方に一定の温度勾配のある温度場、よどみ流れの場を形成し、石松子粉の着火性を調べたが、このとき行った実験範囲の温度場と気流速度（粒子の移動速度）では、着火しないことがわかった。粒子の移動速度が大きい

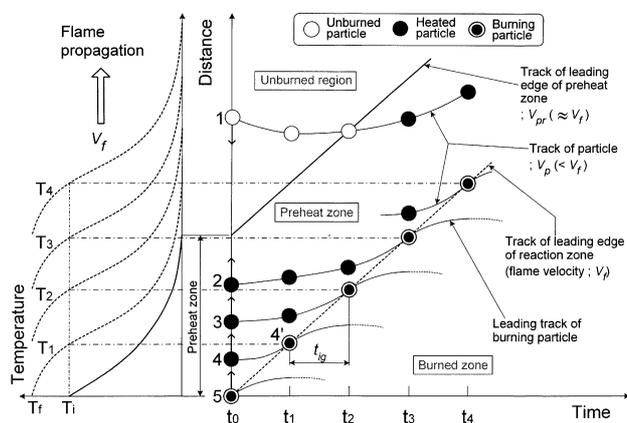


Fig. 8 Scheme of flame propagation mechanism based on movement of dust particle.
粒子挙動に基づいた火炎伝ば機構

場合には、その温度場の通過時間に着火が起こらない。温度場、すなわち温度勾配は流れの速度によって変化するが、一定の温度勾配であっても高温側は火炎温度（約 $1,100^{\circ}\text{C}$ ）程度になければならない。このことは、ある温度勾配の温度場に対し、粒子がある一定時間滞在しなければ着火ができないことを示しており、その時間が上述の時間に相当していると考えられる。

以上の説明からは、火炎帯の先端は、粒子5から粒子4へとある着火遅れ時間 t_{ig} ($=L/(V_f - V_p)$)を持って不連続的に移動しているように見える。均一な分散を仮定した式(5)を考慮すると、Fig. 7より、 $C=47$ と 122 g/m^3 における火炎近傍での粒子間距離 L と粒子の平均速度差は、それぞれ1.72と1.23 mm、そして(0.30 - 0.15)と(0.38 - 0.22) m/sとなるので、これらを用いて t_{ig} を見積もると、それぞれ11.5と7.69 msecとなる。しかし、観察では、希薄な粉じん濃度を除き、火炎は間欠的ではなく、ほぼ連続的に伝ばしていることから、実際には火炎先端で粉じん濃度が高くなり、 L は小さくなることで着火遅れはそれらの値よりも小さいことがわかる⁷⁾。粒子が5, 4, 3, 2, 1と着火していく過程は連続的である。しかし、式(5)からは、希薄な粉じん濃度では粒子間隔が大きいことによる着火遅れが火炎伝ばに影響することが推測できる。Fig. 8は熱移動に基づく伝ば機構の説明であるが、次に火炎構造に基づく伝ば機構について検討する。

3.4.2 拡散火炎構造による伝ば機構

前述のように、石松子粉じん雲中を持続的に火炎が伝ばするためには、未燃焼粒子はある厚みの予熱

帯に一定時間以上滞在し、短い着火遅れ時間で燃焼し始める必要があることがわかった。石松子粉の他にコルク粉、ポリエチレン粉を用いた鉛直管内の火炎伝ばの挙動を調べた実験でも、いずれの粒子径の粉じんにおいても不連続的な火炎伝ばが起こることがわかっている¹⁹⁾。

粉じん雲中の火炎伝ば機構に関しては、液滴中の火炎伝ばと同様の機構で説明されることがあるが²⁷⁾、粉じんの場合には、天然有機物が多く、熱分解特性（あるいは気化特性）とその燃焼過程は液滴よりも複雑であるため、その機構の適用性には注意を要する。粉じん雲中の火炎伝ば機構は個々の粉じんの燃焼特性に応じて議論されるべきであるが、従来の研究からは、石松子粉じん火炎の伝ばを予混合火炎による伝ば機構と類似して議論されている。

Kaesche-Krischer^{20), 21)}は、石松子粉じんの火炎伝ばを調べ、その火炎の様子は高い濃度の炭化水素の火炎と類似していると考えた。このとき調べた濃度 $180 \sim 300\text{ g/m}^3$ における燃焼速度は最大 0.25 m/s であった。Mason²²⁾は、石松子粉じん濃度 $125 \sim 190\text{ g/m}^3$ の範囲の層流火炎について、管壁による熱損失を考慮して調べた結果、その範囲の燃焼速度はKaesche-Krischerの場合と同様の結果を得た。Proust^{23), 24)}は、本実験に近い大型の鉛直燃焼管（断面 $0.2 \times 0.2\text{ m}$ 、高さ 2 m ）用い、コンスターチ粉の火炎伝ばを調べた結果、管端の開放条件によっては予混合火炎で見られるようなセル状構造の火炎が形成する場合があることを明らかにした。そして、化学量論に近い 235 g/m^3 の濃度において、火炎の伝ば速度が最大値の 0.63 m/s となり、その火炎を予混合火炎のように連続な火炎面であると仮定し、燃焼速度を 0.27 m/s と推算した。Veyssiere²⁵⁾は、平均粒径 $20\text{ }\mu\text{m}$ のコンスターチ粉を用いて火炎伝ばの様子や火炎速度を求め、その速度は炭化水素系の可燃性気体による予混合火炎のそれとあまり変わらないことを明らかにするとともに、混合気中の濃度勾配が火炎の加速機構に影響することを考察した。本実験においても、高い濃度の粉じん火炎の場合、巨視的な火炎の構造は予混合火炎のように見られるが、微細構造を見ると粒子周りの火炎（拡散火炎）が隣の粒子周りの火炎と結合し、全体として上に凸形の湾曲した火炎面を構成しており、石松子粉じん火炎そのものが予混合火炎の特性を持つ様子は観測されなかった。

火炎面の挙動は、希薄な粉じん濃度（ 47 g/m^3 ）を除けば、多少前後に振動しているようでも、連続な火炎面が途切れなく伝ばしている。このとき、火炎

が伝ばする機構としては、粒子と火炎の挙動の測定から次の三つが考えられる。

①粉じん雲の濃度の増加とともに、予熱帯で発生する可燃性気体が増加し、粒子間に多く拡散するようになり、予熱帯前方に予混合気層が形成し、その混合気層を火炎が伝ばしていく。これは、従来の研究からの説明される機構と同じである。

②前節で説明した予熱帯に入った未燃焼粒子が加熱され、周囲に拡散し、酸素と混合、着火すると同時に熱移動が行われるという繰り返しによる。粉じん濃度の増加とともにそれが顕著になるため、密集した粉じんがちょうど連続体を形成し、ちょうど凝縮相中を燃え拡がる現象²⁸⁾と同じ様に火炎が伝ばしていく。このとき、火炎は①の予混合火炎、あるいは拡散火炎による性質により伝ばしていくと考えられる。前節では、微視的には、個々の粒子周りに予混合気形成とすることと温度上昇で着火していくと説明したが、粒子間にあると仮定される予混合気層を火炎が伝ばすることで次の未燃焼粒子が着火していく様子は観測されていないので、予混合火炎による性質による伝ばとは考えられない。また、石松子の熱分解特性からすると、予熱帯における滞在時間での熱分解と可燃性気体の発生過程が火炎伝ばにおいては律速であり、粒子間に予混合気層が形成する可能性が小さいため、むしろ拡散火炎の性質により伝ばしていると考えられる。

③濃度が増加するとともに予熱帯に入る未燃焼粒子はすべて着火せず、熱分解を伴いながら火炎先端を構成している火炎面（火炎帯に相当）を通過し、火炎背後の領域に移動する。この領域は高温（Fig. 3）であり、反応帯（燃焼帯）に相当している。この移動の間、未燃焼粒子は気化し続けるが、それは主にこの領域で発生する。周囲の酸素濃度は低い。粒子周りに放出、拡散する可燃性気体は、局所的に酸素が存在する領域において、個々に単一粒子の拡散火炎として、あるいはまとまって燃焼し独立火炎（拡散火炎）として存在するが⁷⁾、粒子周りで燃焼せず拡散する可燃性気体は、前方にある火炎面に供給され、それに対向して前方から拡散してくる酸素とともに反応する。すなわち、火炎先端を構成する火炎は拡散火炎であり、それが可燃性気体の供給、可燃性気体の濃度増加とともに酸化剤側（上方）に移動している²⁷⁾。

気化しやすい小さな粒子径のPMMA（メタクリル樹脂）粉などを除いて、数10ミクロンの粉体は、液滴と違い、通常、予熱帯に十分な予混合気は存在しない。したがって、石松子粉じん雲中の火炎は予

混合火炎の構造と自己伝ばの性質で伝ばしていないものと考えられる。

粉じん雲の濃度が増加すると、火炎面における燃焼反応は拡散流入する酸素に大きく依存し、また未燃焼粒子への熱損失が増大するため、火炎の伝ば速度は主に熱的に減少する。

3.5 管内の火炎伝ばの特徴

粉じん濃度を希薄から化学量論濃度、さらに高い濃度（592 g/m³）まで変化させた実験の結果、管内を伝ばする火炎の様相には次のような特徴があることがわかった。

①鉛直方向に多少濃度勾配があっても火炎は一定速度で伝ばすること、②希薄粉じん濃度であっても火炎背後に二次火炎、三次火炎を形成し伝ばすること、③複数の火炎が形成することで見かけ上火炎が長くなるが、粉じん濃度の増加とともにそれが顕著になること、④火炎の伝ばは、粉の動き、気流の速度に密接に関係していること、逆に火炎の伝ばが始まると前方への気流を生み、さらにその気流によって粉の流動が影響を受けること。

伝ばする火炎に対して管断面の反応面積（投影面積）には限りがあるため、一次火炎ですべての粒子が燃焼せず火炎背後にそのまま残ったり、あるいは背後の高温場で熱分解が発生したりする。また側壁付近では熱損失、あるいは火炎に相対的な気流速度の増加もあり（Fig. 6）、その付近の未燃焼粒子が燃焼せずに気流とともに一次火炎の背後に回りこみ、それから燃焼を始めるようになる。このことで二次火炎ができる。管内に未燃焼の粉じんが残ることによる二次火炎、三二次火炎が形成することは、粉じん爆発においては二次爆発、三次爆発の発生を示唆している。

鉛直方向に粉じん雲の濃度差があっても、火炎前方の粉の流動により局所的には高い濃度が実現されている⁶⁾。また、管の鉛直方向には上方に向い濃度が減少する濃度勾配が存在している。実験を行った範囲C=47～592 g/m³に対するその勾配dC/dyは8.3～16.7 g/m⁴である。これらの鉛直方向へ濃度勾配と動的に変化する局所濃度の火炎伝ばに及ぼす影響は今回の実験では明確になっていないが、火炎先端付近において、火炎伝ばを支えるに必要な濃度を常に満たしているために一定に近い速度で伝ばできるものと考えられる。

ある粉じん雲の濃度まではその増加によって火炎の伝ば速度も増加の傾向を示すが、それ以上の濃度では伝ば速度はむしろ減少する。すなわち、火炎の

伝ば速度は一次火炎に依存し、その背後の火炎、あるいは火炎の長さには依存しないことがわかった。粉の動きと火炎の動きには密接な関係があるが、このことは、管路内を移送する粉体の速度が増加すると、仮に着火が起きて火炎が伝ばを始めた場合、火炎はその速度よりも大きな速度で伝ばする可能性があることを示している。実規模の管について、その移送速度範囲の流れはほとんど乱流条件にあり、このような流れの場合における火炎は層流火炎から乱流火炎に遷移して伝ばするものと考えられる。この場合、火炎の伝ば速度は層流の場合よりも格段に大きくなるが、その結果、火炎の伝ばとともに誘起される火炎前方への流れとそれに同伴する粉の移動速度も増加するため、火炎は当初の移送速度よりも大きな速度となる。しかし、火炎が伝ばするだけの濃度が火炎前方に形成される必要があるため、濃度の不均一、気流速度の増加による熱損失の増大により消滅する可能性もある。気流速度と着火性について見ると、一般的に気流速度の増大により着火しにくくなる傾向があるため、移送速度は、装置の性能、経済効率、そして爆発予防から一定速度以上になるように設定される。

水平管においては、初め粉が堆積していても、火炎の伝ばと同じ方向に動く気流が生じ、その速度が一定値以上であれば粉も下流と一緒に動き始める。着火後の火炎成長に伴う衝撃（圧力波）により、粉はむしろ舞い上がるかもしれない。堆積していた石松子が移動を始める速度を調べた結果、その平均流速が 5 ~ 8 m/sであったことから、この程度の火炎の火炎伝ば速度では、粉が移動し、舞い上げる可能性があるため、火炎の伝ばが継続することになる。水平管と鉛直管それぞれの火炎の伝ば特性は、粉の落下、堆積、浮力の影響なども考慮する必要があるが、伝ば機構は同じと考えてよい。

4. まとめ

粉じん爆発に適用できる火炎抑制装置の開発を目標に、本研究ではその第一段階として、管路内を伝ばする粉じん火炎に関する基礎的な知見を得る目的で、石松子粉じん火炎の伝ば挙動とその伝ば機構を実験的に調べた。得られた主な結果は次の通りである。

1) 火炎挙動の観察、火炎温度分布などの同時測定結果から、火炎帯は不連続的であることが多く、そこには数多くの個々の燃焼粒子といくつかの粒子を囲んで燃焼する球状の火炎（独立火炎）が存

在することが明らかとなった。これらの独立火炎の発生や移動は、間欠的に行われており、独立火炎の間には火炎が観察されなかった。シュリーレン画像と火炎温度分布の解析より、火炎の予熱帯の厚さは約 5 ~ 10 mm であり、これはメタン-空気、プロパン-空気などの予混合（気）火炎よりも一桁以上大きいことがわかった。

- 2) 粒子の動きを粒子画像流速計（PIV）を用いて解析した結果、火炎伝ば速度に比例して粒子速度も増加し、粒子速度は火炎先端からの距離に依存し、火炎先端近くで最大となることがわかった。火炎先端から未燃焼領域までの粉じん濃度の変化を調べると、濃度に関係せず、予熱帯の近くで粉じん濃度が最大になることがわかった。
- 3) 火炎近傍での粒子挙動の詳細な結果から、火炎伝ばに対する予熱帯における未燃焼粒子の滞留時間及び着火遅れ時間を推定し、粒子の挙動を明らかにした。また、石松子粉じん火炎が拡散火炎の性質によって伝ばしていることを推察した。

参考文献

- 1) Eckhoff, R.K., "Dust explosions in the process industries ; 2nd ed.", Butterworth and Heinemann, Oxford (1997).
- 2) Van der, P. and Wel, "Ignition and Propagation of Dust Explosions", Delft Univ. Press, Netherlands (1993).
- 3) Dahoe, A.E., Dust Explosion ; "A Study of Flame Propagation", Delft Univ. of Tech. (2000).
- 4) 韓宇燮, "粉じん雲中の火炎伝ば機構に関する研究", 横浜国立大学大学院博士論文 (2000).
- 5) Buckland, I. G., "Building research establishment note N 24/29", Fire Research Station, Borehamwood, UK (1979).
- 6) Thomas, G.O., Oakley, G. and J.Brenton, "Influence of the morphology of lycopodium dust on its minimum ignition energy", Combust. Flame, 85, pp.526-528 (1991).
- 7) Han, O.S, Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A. and Ogawa, T., "A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles behavior", J. Loss Prev. in the Process Ind., 14 (3), pp.153-160 (2001).
- 8) Hesselink, L., "Digital Image Processing in Flow Visualization", Annual Review Fluid Mechanics, 20, pp.421-484 (1988).

- 9) Adrian, R. J., "Particle-Imaging Technique for Experimental Fluid Mechanics", Annual Review Fluid Mechanics, 23, pp. 261-304 (1991).
- 10) Kean, R. D. and Adrian, R. J., "Theory of cross-correlation analysis of PIV images, in Flow Visualization and Image Analysis", ed. F. T. M. Nieuwstadt, pp. 1-25, (1993).
- 11) Okamoto, K., Hassan, Y. A., Schmidl, W. D., "New Tracking Algorithm for Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids 19, pp.342-347 (1995).
- 12) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhaus, J., Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1998).
- 13) Mei, R., "Velocity fidelity of flow tracer particles", Experiments in Fluids, Vol. 22, pp.1-13, (1996).
- 14) Han, O.S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A. and Ogawa, T., "Behavior of flame propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct", J. Loss Prev. in the Process Ind., 13 (6), pp.449-457 (2000).
- 15) Shepard, C.E. and Warshawsky, I., "Electrical Techniques for Compensation of Thermal Time of Thermocouples and Resistance Thermometer Elements", NACA TN 2703, (1952).
- 16) Ballantyne. A. and Moss. J. B., Combustion Science and Technology, 17, pp.63-72 (1977).
- 17) Hsu, S. T., Engineering Heat Transfer, D. van Nostrand, Toronto, Chapter 10, pp.168-170 (1963).
- 18) Lewis B. and Von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd edition, Academic Press Inc., New York, pp. 292-294 (1961).
- 19) 松田東栄, "浮遊粉じん雲中における層流火炎伝ばの実験的な研究 (I), (II)", 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-77-6 (1978).
- 20) Kaesche-Krischer, B. and Zehr, J., "Untersuchungen an Staub/Luft-Flammen", Zeitschrift für Physikalische Chemie Neue Folge, 14, 5/6, (1958).
- 21) Kaesche-Krischer, B., "Untersuchungen an vorgemischten, laminar Staub/Luft-Flammen", Staub, 19, pp.200-203 (1959).
- 22) Mason, W. E. and Wilson, M. J. G., "Laminar Flames of Lycopodium Dust in Air", Combust. Flame, 11, pp.195-200 (1967).
- 23) Proust, C. and Veysiere, B., "A New Experimental Apparatus for Studying the Propagation of Dust-Air Flames", AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics Series (1987).
- 24) Proust, C. and Veysiere, B., "Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-air mixtures", Combust. Sci. and Tech., 62, pp.149-172 (1988).
- 25) Veysiere, B., "Development and propagation regimes of dust explosions", Powder Technol., 71, pp.171-180 (1992).
- 26) 八島正明, "温度勾配のある流れ場における微粒子粉の発火", 日本機械学会茨城講演会予講集, pp.133-134 (2000).
- 27) Ballal, D.R., "Ignition and flame quenching of quiescent dust clouds of solid fuels", Proc. R. Soc., Lond., A 369, pp. 479-500, (1980).
- 28) 八島正明, 平野敏右, "可燃性気体吹き出し領域の移動に伴う火炎先端の挙動", 機論 (B), Vol.63-614, pp. 3396-3403 (1997).

(平成 14 年 7 月 12 日受理)