

6. 配管内を伝ばする粉じん火炎の抑止* (水噴霧, 消炎金網, 不活性ガス隔離による消炎)

八島正明**

6. Suppression of Dust Flames Propagating in a Duct* (Quenching with Water Sprays, Wire Gauze and Isolation by Inert Gas)

by Masaaki YASHIMA**

Abstract : It is necessary to conduct protective measures for ignition prevention in powder handling processes since ignition may cause dust explosions or fires. Moreover explosion protection and explosion suppression systems are also required so that the damage may not expand even ignition occurs. Explosion pressure release (vent for deflagrations), automatic fire extinguishing systems and rapid valves (mechanical isolation and chemical isolation) have been known as equipment to mitigate the damage of dust explosions. The goal of this study is to develop a new explosion suppression system applied to dust explosions, which relates to the latter two terms of equipment described above. An experimental study has been conducted to obtain fundamental knowledge on suppression of dust flames in a duct by (a) water sprays, (b) wire gauzes and porous plates, and (c) inert gas isolation. Lycopodium was used as a sample powder to compare with previous studies.

Experiment (a): The experimental apparatus consisted of a vertical duct having 200 x 200 mm in square cross section and 3 m in height, a fluidized bed and a water spray system. Lycopodium was mainly used at the concentration of 50 g/m³, which is lower than the stoichiometric concentration for the dust cloud. An infrared sensor was mounted on the surface of the duct to detect the propagating flames and made water spray with time delay.

Experiment (b): The experimental apparatus consisted of a vertical duct (pipe) having 60 mm in diameter and 1.1 m in height, a fluidized bed and a mechanical insert system of quenching elements. Different sizes of wire gauzes with more than 0.46 mm opening and porous plates were used as quenching elements. In order to examine quenching behavior of the flame, the quenching elements were rapidly inserted into the duct from horizontal direction before arrival of the flame at the element position but after a spark ignition was given.

Experiment (c): The experimental apparatus is similar that of Experiment (b) except for the injection system of inert gas from the duct wall. Argon (Ar) was used as inert gas.

* 平成 13 年 9 月 21 日 日本機械学会茨城講演会, 平成 13 年 11 月 27 日 第 34 回安全工学研究発表会, 平成 13 年 11 月 29 日 Asia Pacific Symposium on Safety (APSS) (京都) において本研究の一部について各々発表した。

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

Principal results are as follows :

(1) For the lean concentration of the dust cloud, some post flames behind a leading top flame which propagated upward direction were observed. It took longer time to quench these flames successively than those for a single dust flame or a premixed gaseous flame in the same size of water droplet and spray flux. The experimental results were compared with our previous study on premixed gaseous flames.

(2) It was found that the isolation effect by inert gas on the flame quenching was small unless a long duct, since the inert gas flows with the flame propagation in the same direction, even if the injection is started early after the ignition.

(3) Detecting the propagating flame by infrared light and carrying out water spray on the dust flame was available to quench the flame in a duct.

(4) The dust concentration was changed among 93~280g/m³. In the case of opening of 0.46 mm for wire gauze, quenching was found to be achieved by piling up plural pieces, though quenching was not done with a single wire gauze.

Keywords; Dust explosions, Flame propagation, Explosion suppression, Extinction, Quenching, Extinction limit, Lycopodium

1. はじめに

粉体を取り扱われる産業現場では、粉碎、造粒、集じん、乾燥、輸送、貯蔵などの工程（プロセス）があるが、一般的に粉碎→輸送→集じん、造粒→輸送→乾燥→輸送→集じん→貯蔵というように各工程が組み合わされ、一つのシステムとして操業されている。したがって、システムを構成する装置、設備のどこかで粉じん爆発や火災が発生すると、工程間を結ぶ移送配管内を火炎が伝ばすることで別の設備の爆発につながり、被害が拡大する可能性がある。このときの粉じん爆発は、火炎が配管内を伝ば可能な粉じん雲濃度範囲となり、その雰囲気中を火炎が伝ばすることで発生することが多いが、雰囲気がその濃度範囲に無くとも、管・装置壁に粉が堆積し、層表面あるいは層内部をくすぶって燃え広がることでも結果的には粉じん爆発になることがある。

粉体を取り扱う設備では、まず粉じん爆発に至らないように発火防止、不燃化などの予防対策が施されることが必要不可欠であるが、万が一の爆発に備え、発火しても被害が拡大しないように爆発防護、爆発抑制対策も必要とされる。このための安全装置としては、爆発圧力放散設備、自動消火装置、緊急遮断装置などが知られているが、特に配管内における火炎抑止の目的では、後者二つの装置が用いられている¹⁻⁸⁾。

爆発の初期段階を検出し、早期に消火剤を高速噴霧する自動消火装置については既に市販化され、経験と実験的なデータの蓄積により基本的な技術が確立されていると言える⁹⁻¹⁴⁾。消火剤としては、リン酸

アンモニウムなどの化学粉（chemical powder）、水などが使われている。この抑制装置では、予め対象となる粉じんと消火剤の種類とその量に対する爆発抑制試験が実施され、密閉容器などの対象空間の圧力が防護圧力以下に抑えられたことの確認がなされ、消火剤の抑制効果として評価される。しかし、抑制効果が消炎の有無ではなく、主に圧力で評価されているので、必ずしも試験容器内で消炎が達成されているとは言えない。このことは、火炎が完全に消炎しない場合、工程間を結ぶ移送管内を火炎が伝ばし続ける可能性があることを示唆している。

緊急遮断装置は、火炎が伝ばする前方において物理的、機械的に遮へい板で閉じる方法と、消火剤、不活性ガスなどを壁から噴出することで粉じん雲の濃度を低下させ化学的に隔離する方法がある^{3, 4, 6, 15)}。物理的に遮断する方法は火炎の抑止が確実に達成できるが、遮断壁までは火炎が伝ばするので、適切な防護措置が採られていないと爆発圧力の上昇によって、上流側の装置が破壊する可能性がある。化学的な隔離については、主に炭鉱内の爆発抑制の目的で坑道に岩粉棚、水棚を設けた研究が行われてきたが^{4, 16)}、化学プラントを対象とする配管を使った研究について、Bartknecht^{4, 15)}によると、大量の消火剤によって抑制が達成できることを示している。

ガス爆発に見られる予混合伝ば火炎の抑止の目的では、消炎距離¹⁷⁾が調べられるとともにフレームアRESTA設計のための消炎素子に関する研究が行われてきた。粉じん火炎における消炎距離は、予混合気火炎のそれとは区別して調べられるべきであるが、定義としては予混合火炎と同じく管径の小さな円管

を伝ばできる限界、あるいは伝ばできる平板間の隙間とされる³⁾。予混合火炎の消炎距離については、実験的にも理論的にもよく調べられている。林¹⁸⁻¹⁹⁾は、フレームアRESTA設計のため、予混合火炎を対象に焼結金属や金網などの消炎素子における消炎能力を定量的に調べている。粉じん火炎の消炎距離について、例えばコーンスターチ粉についてはJarosinski²⁰⁾、ProustとVeyssiere²¹⁾が調べているが、その値は数mmから10mmと予混合火炎のそれよりも大きいという結果を得ている。Ballal²²⁻²³⁾、Goroshin²⁴⁾はアルミニウム粉について、実験的に調べるとともに粒子径、粉じん雲濃度に対する消炎距離を見積もる理論計算を行っている。これまでの研究結果からすると粉じん爆発用の消炎素子としては、ガス爆発に見られる予混合火炎用の消炎素子の細隙よりも大きくても良いことが推察される。しかし、文献を調べた限りでは粉じん火炎のそれについては十分に調べられているとは言い難い。

本研究では、配管内を伝ばする粉じん火炎の消火・爆発抑制装置の開発に必要な消炎に関する基礎的な知見を得る目的で、粉じん火炎に水噴霧を行った際の消炎挙動、管内に消炎素子（金網、多孔板）を設けた場合の消炎距離、さらに不活性ガスを噴射することで伝ばする火炎の前方に不燃領域（隔離領域）を形成した場合の消炎挙動を調べた。著者らは粉じん伝ば火炎に関する一連の研究²⁵⁻²⁶⁾で標準粉体として知られる石松子粉³⁾を用いて実験を行ってきたが、本報告でも実験結果の比較の容易さを考慮し、同じ粉を使って実験を実施した。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験概要

本研究では、次の四項目の実験を行った。

①火炎からの光の波長測定（分光測定）

爆発の発生を早期に捉える方法としては、圧力^{1, 9-12)}や火炎からの光を検出するもの²⁷⁾がある。本研究では光による検出を試みるが、火炎からの光と太陽光、電灯などの外部からの光とを区別するため、対象となる火炎の紫外から赤外領域の波長特性を把握する必要がある。ここではガス火炎として円形バーナ（内径14mm）上に形成したプロパン-空気（希薄と過濃）、メタン-空気（希薄）の予混合（気）火炎を、また粉じん火炎として石松子粉とPMMA粉（メタクリル樹脂粉）を平板上に堆積させた状態で燃焼する際の火炎からの光の波長特性を分光計を使って調べた。

②水噴霧による消炎実験

ハロン代替消火剤の開発とともに微細な水滴（ウォーターミスト）を使った消火技術の研究開発が進んでいる²⁸⁻²⁹⁾。著者らは以前、ガス爆発で見られる予混合伝ば火炎を水噴霧による消炎挙動を調べたが³⁰⁻³¹⁾、本実験ではその際に使用した実規模寸法の鉛直管を用い、石松子粉じん火炎についても同様に消炎挙動を調べた。ただし、水噴霧の開始時間は、管の側壁に取り付けた光センサ（赤外線受光）を火炎が通過する際の出力によって定めた。

③消炎素子による消炎実験

粉体を移送する配管内に目の細かい消炎素子を設けると、圧力損失が大きくなり輸送特性が著しく低下するとともに目詰まりの原因となる。配管内に消炎素子を常時設置することは不適當であるが、爆発発生の際に消炎素子を高速で管内に挿入し、遮へい板として使用することができれば、上流側の火炎を消炎しつつ圧力上昇を抑える効果が期待できる。これまで粉じん火炎の消炎距離については調べられているが、その値の妥当性も含め金網（1枚から複数重ね）と多孔板を鉛直管（円管、内径5cm）の中に挿入できる実験装置を試作し、火炎の消炎挙動を調べた。

④不活性ガスによる伝ば火炎の隔離実験

実験項目（3）と同じ大きさの円管を用い、火炎が伝ばする前方で管の側壁からアルゴンガス（不活性ガス）を噴射することで、伝ばする前方の粉じん雲を希釈し、火炎伝ばの抑止性を調べた。

2.2 水噴霧による消炎実験装置

実験装置はFig. 1に示したように、鉛直に設置した燃焼管、粉を分散供給する流動層、そして噴霧装置から構成される。燃焼管は、長さ2,050mm、正方形200×200mm流路断面を持ち、下端から150mmのところ電極（ネオントランス15kV, 20mA）が取り付けられている。また、管の中ほどを伝ばする火炎の様子を観察できるように200mm流路幅、長さ380mmの対面する2枚のガラス窓が取り付けられている。噴霧ノズルは、上方に伝ばする火炎に対向するように下方に向けて取り付けられている。さらに、管側壁からの噴霧実験もできるように取り付け孔を設けた。管の寸法は実規模のダクトを想定して定めたもので、それに合わせてノズルの寸法、噴霧特性も考慮した。

水噴霧の開始時間を定めるため電極から600mmの高さ（ $y=600$ mm）に赤外線センサ（焦電型P4488、浜松ホトニクス製）を取り付けた。このセ

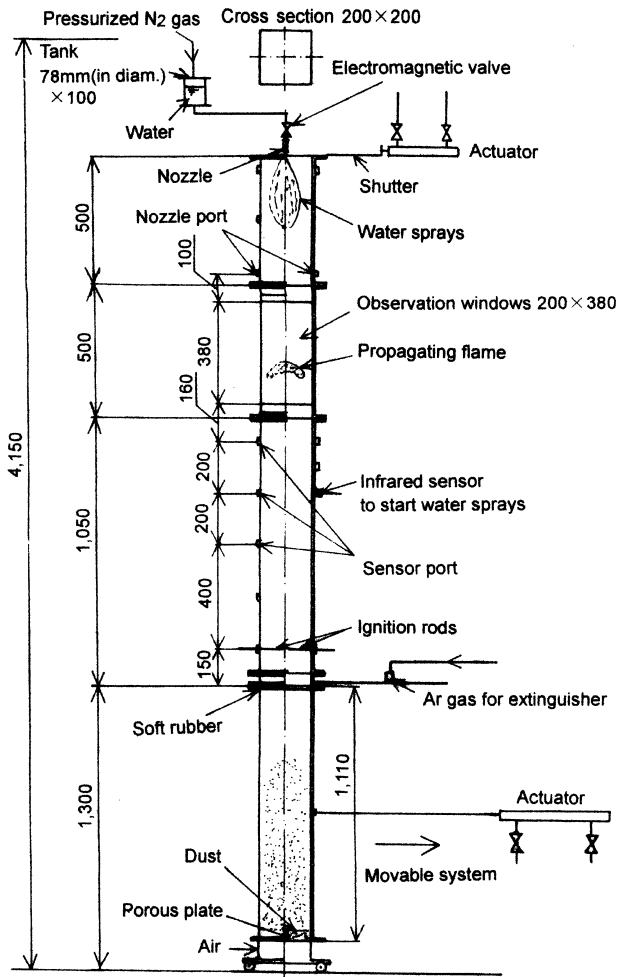


Fig. 1 Experimental apparatus for flame quenching by water spray.
水噴霧による消炎実験装置

ンサによる電気回路はいわゆる“人センサ”と呼ばれるものと同じものであり、動きのない太陽光、電灯などの外部光には感知せず、赤外線を発する物体、ここでは火炎が動いている場合に感知、出力するものである。ただし、ブンゼン火炎、ろうそくの炎などの定在火炎でも時間的な揺らぎと、わずかの光量変化があるため感知できる。センサは管壁面に垂直に取り付けた円筒ソケット内に取り付けたが、予めたばこライターの小さな裸火でセンサ出力を調べた結果、その設置高さの上下 65 mm (このときの受光角度は 59.4°), すなわち, $y = 535$ から 665 mm が受感する高さとなることがわかった。なお、センサの応答性は 100 ms である。実験では、火炎がセンサに近づき検出した場合、ある時間遅れを設定して電磁弁を開き、水噴霧を行うようにした。

大型燃焼管への粉の分散方法としては、所定の粉を圧縮空気分散する方法が一般的であるが、空間

的な濃度の不均一性、着火前の気流の乱れの影響が大きいなどの短所がある。本研究では、空間的な濃度の均一性に優れ、気流の乱れの影響の少ない流動層を用いた方法^{21, 25-26)}により、燃焼管に粉を分散させた。試料粉は前述の通り、粒度 (平均 32 μm 径) が揃い標準粉体としてよく用いられている石松子を用いた。

実験手順は次のとおりである。①初め燃焼管上端のシャッターを開けて、所定の流量の空気を一定時間だけ流動層下部から供給し、粉を舞上げ、燃焼管に導入する。②舞い上がった粉じん雲は 11 ~ 15 cm/s の速度で燃焼管上方へ向かい、上端から粉が流出するのを見計らって流動層を水平方向に取り除き、燃焼管の下端を開くとともに火花点火する。③実験条件によっては上端を閉じるとともに点火する。これらの一連の動作は、タイマを使った時間制御によって自動的に行われる。ただし、水噴霧開始時間を除く。火花放電の時間は、確実に着火させるために 0.5 s とした。粉じん雲の濃度は、流動層への圧縮空気の供給量とその時間で変化させたが、この濃度は燃焼管へ導入された粉の量を燃焼管の容積で除した値 (平均値) で代表した。局所的な粉じん濃度は、鉛直上方に行くに従い減少するが、実際のところ火炎の伝ばとともに粉が流動し、局所的な濃度が時間とともに変化するため、鉛直方向の濃度差は火炎の伝ば速度を大きく変化させないことがわかっている²⁵⁾。

未燃焼の粉じんは燃焼管下端から落下、飛散するが、それとともに下方に伝ばする火炎が下端から周囲に拡がるようになる。粉じん濃度が高い場合には、移動した流動層まで火炎が伝ばし、燃焼を始めることがあった。そこで、流動層内に入った火炎をアルゴンガスで消火できるようにした。実験は屋内で行うが、粉じん雲の濃度の増加によって、未燃焼粉が装置周囲に飛散することで現実的には火災に至る危険性が高まることがわかったため、実験は石松子-空気粉じんの化学量論濃度 (125 g/m³)²⁵⁾ よりも低い濃度範囲で行った。

火炎の様子は、観測窓を通してビデオカメラ (30 駒/s) を用いて観測した。火炎の伝ば速度は、管の壁面に一定間隔で取り付けられたフォトランジスタでも測定した。消炎の判定は、観測窓の上部のフォトランジスタに出力がなく、火炎が管の上端まで伝ばしない場合とした。

2.3 不活性ガス噴射による隔離、及び金網を使った消炎実験装置

Fig. 2 は本研究で使用した実験装置で、(a) は消

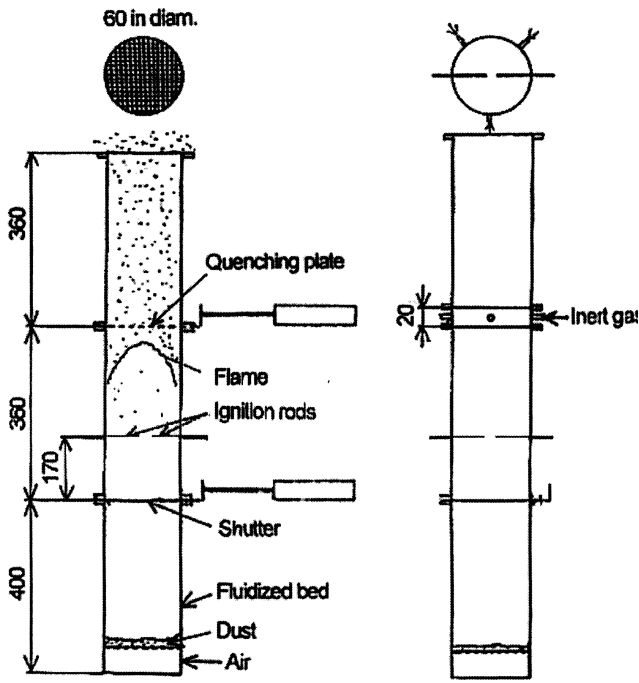


Fig. 2 Experimental apparatuses for quenching distance by wire gauze and for isolation of propagating flame by inert gas injection.
金網による消炎距離と不活性ガスによる火炎隔離のための実験装置

炎素子を用いた実験, (b) は不活性ガスを管壁から噴射した実験に対するものである。管の内径は 60 mm で, いずれも流動層によって燃焼管内に均一な粉じん雲を形成し, シャッターを閉じ上方への火炎伝ばに対する消炎特性を調べることができる。火炎の伝ば速度は, 管径, 管端の開閉によって異なるが, 上方への伝ば速度は, 下端を閉じたほうが開けたときに比べて大きい。本実験は, 伝ば速度が大きくなる下端を閉じた条件で調べた。

Fig. 2 (a) の消炎素子を用いた実験を行う際, 着火前の粉の分散過程で予め消炎素子を燃焼管内に設置すると, 素子の目開きによっては粉が素子に付着したり, 粉本来の流動を阻害したりするので, 着火以前に既に素子の前後で粉じん雲の濃度差が生じる可能性がある。すなわち, 実際よりも消炎距離が大きいと判断する可能性がある。そこで, 本実験では, 流動層方式によって鉛直管内に均一な粉じん雲を分散し, その後, 消炎素子を挿入するようにした。このことは, 爆発発生の際に消炎素子を高速で管内に挿入し, 遮断壁として使用することができれば, 上

流側の火炎を消炎しつつ圧力上昇を抑える効果が期待できることを示す。消炎素子としてはステンレス金網 (平織) と熱伝導性の良いアルミニウム製の多孔板を用い, 目開き 0.46 mm 以上の金網について調べた。

Fig. 2 (b) の実験では, 20 mm 長さのユニット部の円周方向の均等距離三カ所にガス噴射口を設けた。噴射口一つの内径は 4.4 mm である。不活性ガスとしてはアルゴンを用いた。

火炎伝ばの様子は高速度ビデオカメラ (最大 2,000 駒/s) を使って調べ, 消炎の判定は目視と記録映像によって行った。不活性ガスを噴射した実験では, 噴射口と燃焼管上端の間で消えた場合を消炎と判定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 火炎からの光の波長

実験で得られた火炎からの直接光の波長スペクトルを Fig. 3 (a) ~ (e) に示す。ただし, 縦軸は相対強度である。分光測定ではマルチチャンネル分光計 (S-2400, 200 ~ 550 nm, 最大 1,050 nm, 相馬光学製) を使用した。プロパン-空気予混合火炎については希薄側の青炎の状態 (a), 過濃側では輝炎のある状態 (b) で, メタン-空気予混合火炎については希薄側のみの青炎の状態 (c) で調べた。受光部はバーナリムから上方 14 mm, 中心から 22 mm の位置に固定して行った。石松子 (d), PMMA 粉 (メタクリル樹脂粉) (e) は堆積した状態で燃焼させ, 受光部は火炎から 20 mm 程度離れた位置に設置した。

実験の結果, プロパン, メタンの火炎ともに紫外から可視光 500 nm 付近まで, 炭化水素火炎の特徴的なピーク波長 (308, 428, 514 nm など) が存在することが確認できた。広い波長範囲を一度に調べられるように波長検出幅を広くした (解像度を下げた) ため, 従来より知られている値^{27, 32)} と一致しないがピーク位置はほぼ特定できる。予混合火炎の過濃範囲では二次火炎, 拡散火炎が形成し, すすからの発光 (輝炎) が見られるようになり, 波長の長い領域 (橙色から赤色) で連続したスペクトルを有するようになる。石松子とメタクリル樹脂の火炎の場合は, 紫外領域の波長よりも主に可視から赤外領域にかけての波長スペクトルが増加する。両方の粉とも有機物粉であり, プロパン, メタンと同様に炭化水素火炎の C_2 , CH, OH ラジカルの素反応があり, 紫外領域にもピーク波長が存在するが, 火炎の外側に

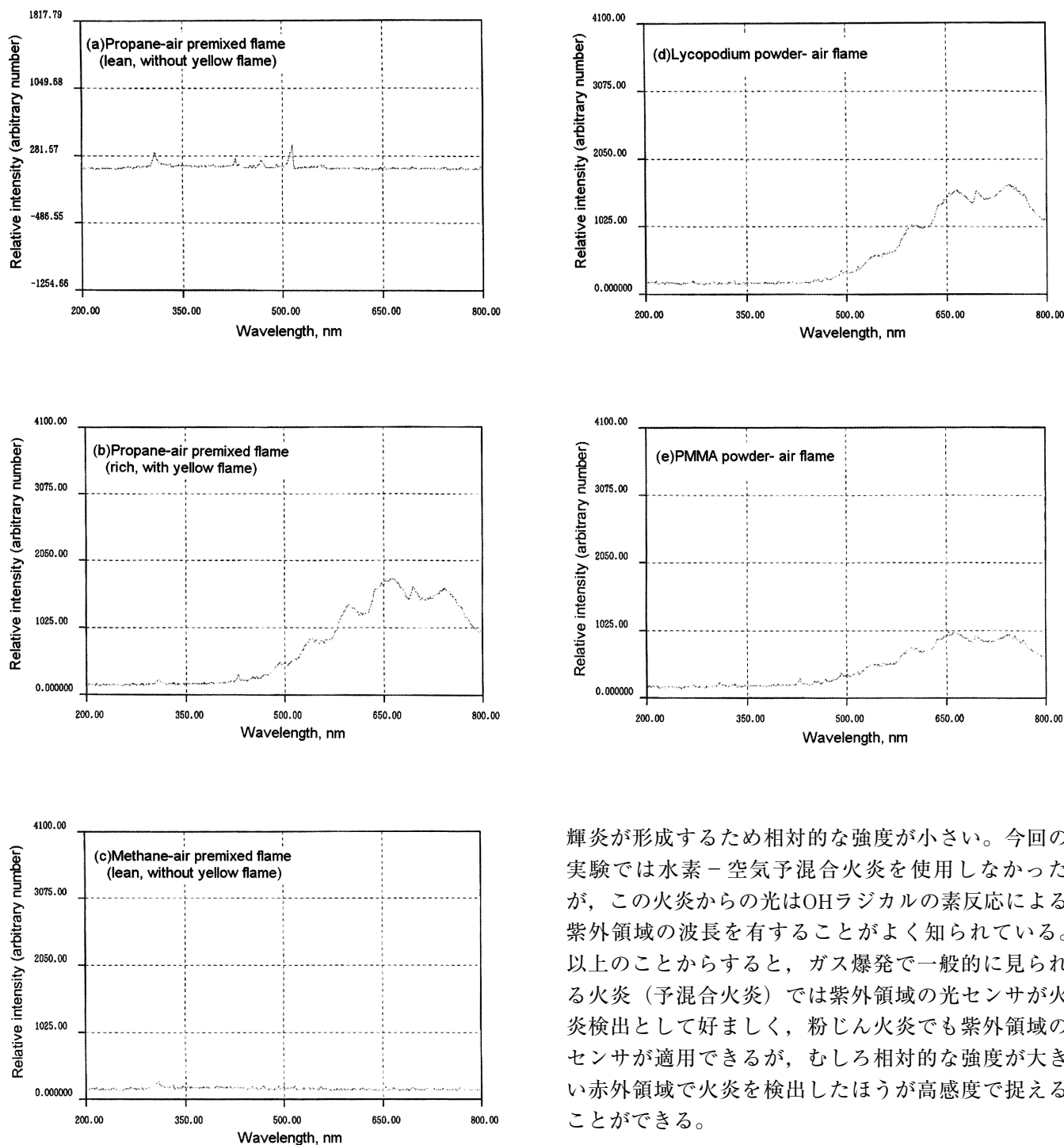


Fig. 3 Relationship between wavelength and relative intensity of light emission by premixed gaseous flames and dust flames.
予混合火炎と粉じん火炎からの光の波長と相対強度の関係

輝炎が形成するため相対的な強度が小さい。今回の実験では水素 - 空気予混合火炎を使用しなかったが、この火炎からの光はOHラジカルの素反応による紫外領域の波長を有することがよく知られている。以上のことからすると、ガス爆発で一般的に見られる火炎（予混合火炎）では紫外領域の光センサが火炎検出として好ましく、粉じん火炎でも紫外領域のセンサが適用できるが、むしろ相対的な強度が大きい赤外領域で火炎を検出したほうが高感度で捉えることができる。

3.2 水噴霧ノズル

Table 1 は、水噴霧に使用したS5ノズルの特性である。ただし、この呼び名は便宜的に定めたものである。このノズルは一流体ノズルであり、開放空間では円形状に比較的一様な質量流速分布 q_w の特性を有するが、燃焼管内の観測部 $y=1.25$ mで測定した分布はFig. 4のようになる。水滴は拡がり角約 60° で初め円錐状に広がるが、すぐに管壁に衝突し、さらに噴霧圧力が大きくなるにつれ水滴の下方への移動速度が増加し、水平方向の水滴間の衝突、流束

Table 1 Characteristics of water spray.
水噴霧の特性

Pressure P_i , MPa	Mean diameter of water droplet, μm	Water flux, q_w , $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$	Velocity of droplet, V_w , m/s	Velocity of gas flow induced by water sprays, V_g , m/s
0.39	88	0.078	14.5	8.4
0.59	79	0.103	23.2	13.8
0.68	72	0.113	-	-
0.83	97	0.135	26.0	14.0

Sprays angle: 60 deg., Hole diameter: 3mm,

Nominal flow rate of water at 0.69MPa: 5.0 L/min

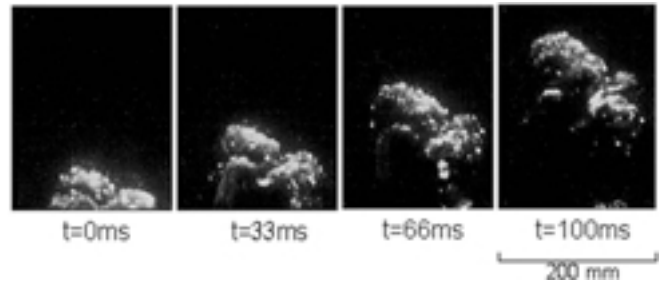


Photo 1 Lycopodium dust flame propagating through dust cloud without water spray ($50\text{g}/\text{m}^3$).
水噴霧が無い場合の粉じん雲中を伝ばする石松子粉じん火炎

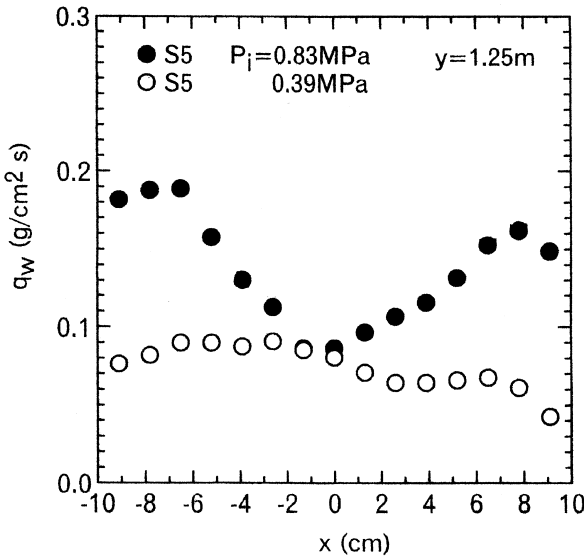


Fig. 4 Water flux of spray in duct.
配管内の水噴霧流束

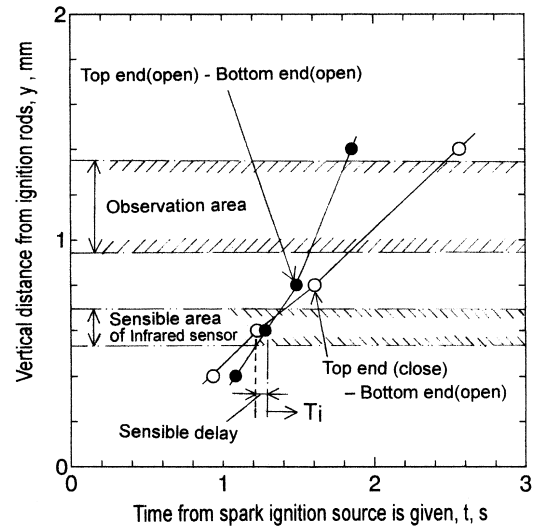


Fig. 5 Location of the leading flame with time.
時間経過に対する火炎先端の位置

分布が均一化するよりもむしろ流束分布は次第にひずみ、壁付近で大きな値を持つようになる。このノズルは以前の予混合伝ば火炎の水噴霧実験³⁰⁾の際に使用したノズルの中で比較的消炎性能が良かったため、本実験でも使用することにした。

3.3 水噴霧実験における火炎伝ばの様子

(1) 水噴霧無しの場合

Photo 1 は、粉じん雲濃度 $50\text{g}/\text{m}^3$ 、燃焼管上端開放条件の場合の水噴霧をしない場合の火炎伝ばの様子である。ただし、画面の横幅は 200 mm で、燃焼管側壁に一致している。この粉じん雲濃度は希薄側にある。火炎は、上方に凸形に湾曲して一定速度で伝ばしていることがわかる。このときの伝ば速度は $1.6\text{m}/\text{s}$ である。この火伝ばにおける特徴的な様相は、見かけの燃焼帯が厚く、先行して伝ばする一次火炎

の背後にさらに二次火炎が形成しているということである ($t=100\text{ms}$ において、画面下にその火炎が見える)。また、管の鉛直方向に濃度勾配が存在しているものの、それによって伝ば速度が急激に減少せず、一速度で伝ばしていることもわかる。Fig. 5 は、時間経過に対する火炎先端の位置を管上端の開放の有無で調べたものである。燃焼管の上端を閉じたときの伝ば速度は $64\text{cm}/\text{s}$ であった。この値は $15 \times 15\text{cm}$ で得られた実験結果²⁵⁾よりも大きい。火炎形状、伝ば速度が一定、二次火炎の形成などの火炎伝ばの挙動が同じであることがわかった。

(2) 水噴霧有りの場合

水噴霧は、火炎の伝ばとともに火炎検出センサが受光後、任意に設定した時間遅れ T_i で開始し、ある持続時間 T_D だけ噴霧を継続する (Fig. 5)。S 5 ノズ

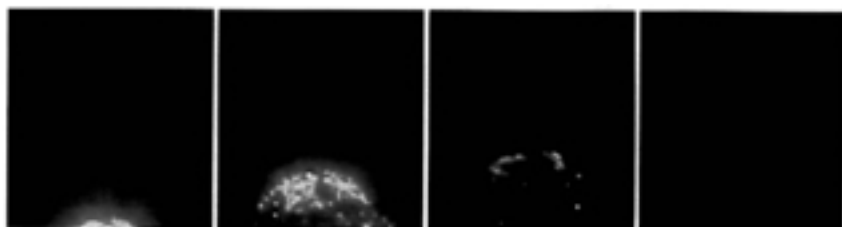
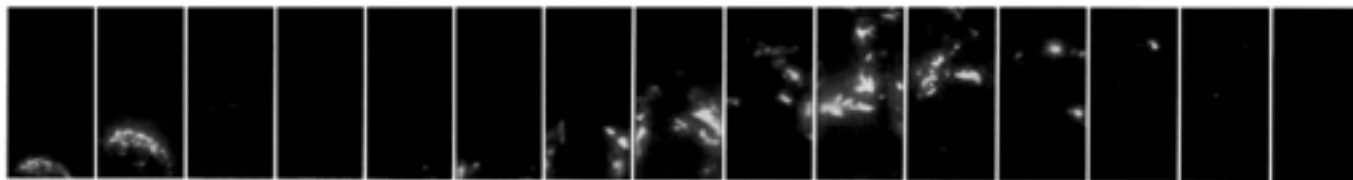
(a) $T_i = 0.5s$, $T_D = 0.5s$ (b) $T_i = 0.6s$, $T_D = 0.6s$

Photo 2 Quenching behavior of lycopodium dust flames by water spray (from left to right, 33 ms/frame).
水噴霧による石松子粉じん火炎の消炎挙動

ルを使い、加圧 $P_i = 0.83$ MPaの条件で水噴霧を行ったが、Photo 2 (a), (b) はそれぞれ $T_i = 0.5, 0.6$ sの場合の消炎挙動である（各写真は 33 ms毎）。

Photo 2 (a) の場合は、観測窓よりも下の高さで水滴が火炎に流入し、少しの時間 (0.1 s) で消炎に至るが、Photo 2 (b) の場合には、一次火炎が消えてもその背後に続く二次火炎が伝ばを継続している。ただし、観測窓の上方で消炎した。火炎検出から応答遅れ (0.1 s) と本実験で設定した時間遅れの範囲では消炎が達成できた。噴霧持続時間を変えて消炎挙動を調べてみたが、噴霧開始が早く ($T_i \rightarrow 0$)、噴霧持続時間 T_D が短いと、消炎せずに上方に伝ばを継続することがわかった。これは、水噴霧によって誘起された下方への気流とともに、粉じん雲が自然落下よりも下方に速く流動するため、対向して伝ばする火炎前方に局所的に高い粉じん雲濃度領域を形成するようになるためである。すなわち、配管内を伝ばする火炎に対しては火炎の検出後、ごく短時間 (概ね <10 ms) で水噴霧を開始しなくても、火炎を抑制しようとする位置で水噴霧を開始すればよいことがわかる。上述の粉じん雲濃度では、 $T_D = 0.5$ s以上であれば消炎した。このときの水噴霧による管内の平均的な水滴群 ($97 \mu\text{m}$) の濃度は、Table 1 の $q_w = 0.135 \text{ g/cm}^2\text{s}$ と $V_w = 26 \text{ m/s}$ より、 51.9 g/m^3 となる。ただし、 1 m^3 空間内に占める数密度の比を見積もると、石松子/水滴 = $7.5 \times 10^8 / 1.4 \times 10^7 = 54$ となる。単一粒子密度が小さく、かつ粒子径が小さい石松子のほうが水滴よりも空間に占める粒子数は多い。

前述のように希薄側濃度にある粉じん雲中であっても、先行して伝ばする火炎 (一次火炎) の背後に別の火炎 (二次火炎) が形成するが、噴霧持続時間が短いと後者の火炎まで消炎できずにその火炎が伝ばを継続することがわかった。同じ水滴径・水噴霧質量流束条件では、メタン-空気の子混合気火炎よりも石松子粉じん火炎 (ただし、実験では希薄粉じん雲濃度のみ) のほうが消炎しやすいことがわかったが、二次火炎を消すためには噴霧持続時間を長く設定する、すなわち総水量を多くする必要があることがわかった。

水噴霧の際の火炎の挙動について、メタン-空気の子混合火炎の場合には、水噴霧によって、消炎しないときは乱流火炎に遷移し、急激に燃焼・伝ばしたが、希薄濃度の粉じん火炎の場合にはそれほど急激な変化はないことがわかった。このような特徴は予混合火炎の挙動とは異なるが、これは火炎が伝ばする前方の未燃焼粒子と水滴の相互作用により、局所的な濃度が高くなったとしても、むしろ粉の流動と気流の乱れを抑えるためであると考えられる。しかし、実験を行っていない高い粉じん濃度範囲では、噴霧水滴が未燃焼粉じんの流動をかく乱することによって乱流火炎に遷移し、激しく燃焼・伝ばする可能性は否定できない。

この実験の結果、赤外線光センサが火炎検出に有効であること、水噴霧時間はやや長く設定する必要があるが、粉じんの流動を除けば予混合気火炎の水噴霧による消炎と同様の解析が有効であることがわ

かった。

3.4 金網, 多孔板による消炎

(1) 実験結果

Table 2 は得られた結果を整理したものである。調べた粉じん雲濃度 93, 120, 280 g/m³ は石松子-空気火炎の化学量論濃度を基準にしたもので、それぞれの濃度は希薄側, 量論付近, 過濃側にある。なお本研究では、目開き寸法を消炎距離に相当するものとした。

Table 2 より、93 g/m³ について、目開き 1.22 mm では消炎したが、1.65 mm では消炎しなかったことがわかる。120 g/m³ については、目開き 0.46 mm の金網 1 枚では消炎しなかったが、複数重ねることで消炎が達成できた。280 g/m³ についても同様であった。金網を重ねて用いて消炎する場合、火炎は金網のところで保炎され、その後下方に少し伝ばし消炎するが、上方に伝ば、金網を通過することはなかった。この時、金網が上方に押し出されることはなく、燃焼に伴う圧力上昇が放出されていることがわかっ

た。

金網直前の火炎の伝ば速度は、粉じん雲濃度と消炎素子によって異なり、例えば、目開き 1.22 mm の金網について比較すると、93 g/m³ では 1.9 m/s であるが、280 g/m³ では 12.0 m/s にも達する。また、120 g/m³ について見ると、消炎素子の目開きや枚数によって火炎の伝ば速度に違いが見られることから、金網の存在による空気流れと粉じん流動への影響が大きいことが推察される。

Proustら²¹⁾ は一定間隔の平板を管内に設置して実験を行い、コーンスターチについて、粉じん濃度の増加とともに消炎距離が減少、次第に一定値に達し、最終的には 7 mm という結果を得た。この値は、メタン-空気やプロパン-空気などの炭化水素系の予混合火炎について知られた 1 ~ 2 mm よりは大きいものである。予混合伝ば火炎の場合、目開き 1 mm の金網を用いると、その火炎の伝ばを抑止できるが、本実験の粉じん火炎の場合は 0.46 mm の金網 1 枚では粉じん火炎の伝ばを抑止できない。

(2) 消炎距離

Table 2 Characteristics of flame quenching with wire gauze and porous plate.
金網と多孔板による消炎特性

Concentration of dust cloud [g/m ³]	Propagation velocity [m/s]	Quenching plate / opening [mm]	Number of the plate	Quenching or Propagation
93	1.9	Wire gauze : 1.22	1	Quenching
		: 1.65	1	Propagation
120	3.8	Wire gauze : 0.46	1	Propagation
		: 1.22	1	Propagation
	10.6	: 0.46	2	Quenching
	6.7	: 0.46	3	Quenching
	7.5	Porous plate: 0.50 (at space of 0.5 mm, thickness 0.5 mm)	1	Propagation
280	12.0	Wire gauze : 1.22	1	Propagation
	15.9	: 0.46	2	Quenching
	9.4	Porous plate: 1.00 (at space of 1 mm, thickness 0.5 mm)	1	Propagation

Wire gauze: opening 0.46 mm (diameter 0.21 mm), 1.22 mm (0.31 mm), 1.65 mm (0.40 mm)

平板間を伝ばする予混合気火炎における消炎距離 d は次式で表される³³⁾。

$$d = a \cdot \delta \quad (1)$$

ここで、 a は予混合気火炎の混合気ごとの定数である。さらに、 λ_g を気体の平均熱伝導率とすると、

$$d = a \lambda_g / (C_{pg} \rho_g S_L) \quad (2)$$

で表される。すなわち、 d は火炎の厚さと燃焼速度から推定できることになるが、Hanら²⁵⁾ が調べた石松子-空気粉じん火炎の濃度 122, 350 g/m³ における火炎の厚さがそれぞれ 15.5, 16 mm, 燃焼速度についてはいずれも 40 cm/s³⁴⁾ を用い、上式 (1) と (2) と比較検討を行うと、定数 a の値がかなり小さいことになる。予混合気火炎では a の値は 2 に近いとされる^{3, 35)}。

金網を重ねることで消炎が達成できるが、これは予混合気火炎の場合と同様で、消炎能力は金網前後の圧力損失に比例するという¹⁸⁻¹⁹⁾。粉じん火炎の場合、局所的な粉じん濃度の減少(粉の数密度の低下)により消炎が達成できるはずであるが、粉の流動は気流と完全に一致しているわけではないので理論的な現象解析は複雑である。

Palmer³⁶⁾ のプロパン、都市ガスなど可燃性ガスの予混合伝ば火炎に対し金網を使った消炎実験では、ばらつきが大きいものの、傾向として消炎能力は火炎の伝ば速度に大きく依存することを示している。この伝ば速度の増加とともに細かい目の金網が必要になるが、金網を 3 枚重ねると 1 枚のときよりも消炎能力が高くなり、10 枚では 3 枚と変わらないという結果を得ている。対象とした可燃性ガスの結果から、目開き ϕ 、 γ と η は定数として、火炎の伝ば速度 $V = \gamma / (\phi^\eta)$ の近似式を考え、円柱周りの対流熱伝達を考察し、実験結果より次式で表した³⁶⁾。

$$V = 21.6 / \phi^{0.9} \quad (3)$$

ここで、 V と ϕ の単位はそれぞれ、[cm/s] と [cm] であり、21.6 は実験的に求められたもので、0.9 は用いた金網の目開きと直径の比から定まる係数である。この式によると、 $V=100$ cm/s では 0.18 cm, 1,000 cm/s では 0.014 cm という値を見積もることができるが、これらの値は本実験結果に近いものである。石松子の大きさは目開きよりも十分に小さいため、火炎の伝ばとともに前方の未燃焼粒子は火炎と同じ方向に移動でき、金網の隙間を通過できる。燃焼粒子が金網を通過する可能性は十分にあるため、通過した燃焼粒子によって金網背後の粒子が着火することで、火炎が伝ばを継続することがある。しかし、石松子の場合、個々の粒子の燃焼時間が短く²⁵⁾、そのことで、通過している間に前方の未燃焼

粒子に着火²⁶⁾ することが難しい。石松子粉じんの火炎の構造は予混合火炎のそれとは異なるが、金網への熱伝達からすると予混合火炎と同じように解析できることがわかる(付録参照)。しかし、燃焼時間が長い粒子の場合には、燃焼しながら金網の隙間を通過後、着火する可能性がある。

3.5 隔離距離

(1) 実験結果

シャッターを閉じると同時にアルゴンガスを一定時間噴射した。粉じん濃度 120 g/m³ においては、シャッターとガス噴射の作動開始から 0.12 s 後に火花放電により着火し、1 s 間噴射を継続した。実験の結果、この粉じん雲濃度において、ガスの噴射量を 1.6 から 4.3 L, すなわち一つの噴射出口の平均速度を 35 ~ 94 m/s まで変化させたものの、いずれも消炎しないことがわかった。280 g/m³ についても同様であった。ガス噴射から着火前までの 0.12 s 間の噴出量は 0.192 ~ 0.516 L となり、これが噴射部付近から燃焼管上方下方に拡散するものと仮定すると、それぞれ 68 ~ 182 mm の長さをアルゴンガスで不燃化、隔離したことになる。ただし、火炎の挙動からすると、単純にこのような隔離が実現できなかっただけでなく、ガス噴射の際、火炎は小さくなるものの加速的に伝ばしていることがわかった。ガスの噴射によって空気を希釈するが、むしろ吹き出した際の乱流混合によって、粉じんの流動が促進される。酸素濃度は低下するが、その濃度が消炎する限界よりも小さくならなければ、酸素が局所的に存在する領域を通して火炎が伝ばを続ける。アルゴンガスを着火前の早い段階で噴射しても、空気が希釈されるだけでは、火炎の伝ばを抑制できるだけの隔離領域を形成できないことがわかった。**Fig. 6** は、この様子を模式的

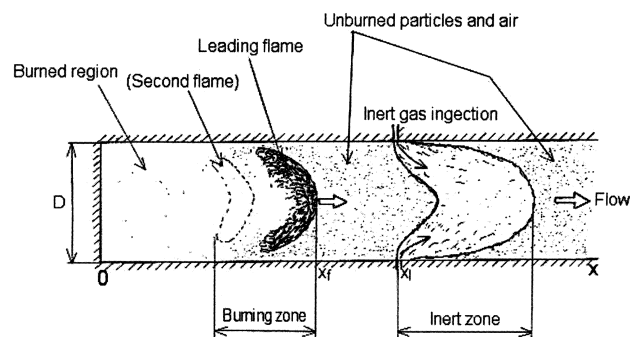


Fig. 6 Schematic illustration of movement of flame and inert gas.

火炎と不活性ガスの動きの概略図

に示したものである。管壁面から垂直に噴射された不活性ガスの速度が火炎の伝ば速度よりも大きくとも、火炎に向かう管軸に沿った方向成分の速度は小さい。早く噴射を始めても、そのガスは伝ばする火炎とともに動く未燃焼側混合気に押され、雰囲気希釈しながら下流に流動することになる。隔離しようとする領域においては、粉じん+空気+不活性ガスの不均一な混合があるので、火炎は未燃焼粉じん雲が燃えるまで前方に伝ばを続ける可能性があり、実際かなり下流まで伝ばするものと考えられる。

(2) 不活性ガス添加による限界酸素濃度

粉じん雲の着火性、爆発性については、一般的に窒素希釈に対する限界酸素濃度が求められており、有機物粉は9%から15%に限界値があるものが多い(例えば文献(3)付録:ドイツBIAの表参照)。しかし、堆積状態では、粉じん雲の酸素濃度よりも低い値で着火するという結果もある。金属粉の代表的なものであるアルミニウム粉(22 μm メジアン径)とマグネシウム合金粉(21 μm)については、それぞれ5%と3%という値が得られている。

限界酸素濃度による不活性化は発火防止、爆発の予防対策に有効であるが、爆発が発生して装置が破壊した場合には外から空気が流入するためこの考えに基づく爆発抑制の効果は期待できない。

(3) 隔離に必要な不活性ガスの量

隔離に必要な不活性ガスの量は、上流側の未燃焼側の粉じん雲を限界酸素濃度以下にするだけの量と見積もれるが、実際は下流に噴射したガスが流れるので、かなりの不活性ガスを噴射する必要がある。不活性ガス添加に対する燃焼限界は一般的にアルゴン、窒素、二酸化炭素の順で狭くなるので⁴⁾、本実験のアルゴンガスよりも、むしろ二酸化炭素のほうが消炎しやすいかもしれない(ただし、金属粉に対して、二酸化炭素は不適當、窒素の使用は注意が必要)。

本実験結果から判断すると、火炎が噴射位置に到達したときに噴射を開始すると効果的に消炎できることがわかる。均一に配管内に噴射するために噴き出し孔を多くし、かつ噴き出し孔を前後二段にすることで早く隔離距離を形成できる。管壁面からの水噴霧³⁰⁾でも隔離効果があるが、未燃焼粉じんの流動を抑える効果も期待できるため、むしろ不活性ガスの噴射よりも効果的である可能性が高い。

4. まとめ

本研究では、配管内を伝ばする粉じん火炎の消火・爆発抑制装置の開発において必要な消炎に関す

る基礎的な知見を得る目的で、粉じん火炎に水噴霧を行った際の消炎挙動、流路に消炎素子(金網、多孔板)を設けた場合の消炎距離、さらに不活性ガスを噴射することで伝ばする火炎の前方に不燃領域(隔離領域)を形成した場合の消炎挙動を調べた。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 同じ水滴径・水噴霧質量流束条件では、粉じん火炎のほうが予混合火炎よりも消炎しやすいが、配管内を伝ばする粉じん火炎では希薄な粉じん雲濃度であっても先行する一次火炎の背後に二次火炎が形成することがあるので、それをも消火するためには、噴霧時間を長く、すなわち総水量を多くする必要がある。
- (2) 伝ば火炎の隔離(火炎抑止)のため不活性ガスを噴射する場合、着火後、早く噴射を開始しても火炎の伝ばとともにガスが同じ方向に流動するので長い配管でなければ隔離効果が小さいことがわかった。
- (3) 伝ば火炎からの光を検出し、水噴霧を行うことで粉じん火炎を抑止することができた。配管内を伝ばする火炎を消炎する場合には、火炎検出からごく短時間(10 msのオーダー)での噴霧でなくとも、火炎検出から抑止を達成しようとする位置に火炎が到達してから水噴霧あるいは不活性ガス噴射をすれば効果的である。
- (4) 消炎素子による実験では、粉じん濃度を93~280 g/m³(希薄から過濃)まで変化させて調べた結果、実験で用いた目開き0.46 mmの金網1枚では消炎しないが、複数枚を重ねることで消炎が達成できることがわかった。
- (5) 緊急遮断のために消炎素子を挿入することで内容物の飛散防止と圧力放散効果が期待できることがわかった。

なお、本実験は石松子粉のみで行ったが、近年取扱量が増え、その爆発防止対策が求められているマグネシウムなど金属粉じんに対しては室内実験の安全性が確保できなかったため調べることができなかった。

水噴霧は、粉の飛散防止、粒子と気体の分離、装置の冷却効果、周囲の気流を巻き込むことによる有毒ガス(燃焼ガス等)の希釈、装置内の洗浄に寄与する。さらに、二次爆発が発生する可能性の低減、爆発後火炎に進展した場合の火災拡大防止、装置壁、溝部に堆積していた粉を洗い流す効果もある。対象となる装置によっては、爆発抑制のために常時水噴霧を行うことが望ましい場合もある。

参考文献

- 1) 中央労働災害防止協会編, 粉じん爆発の防止技術, 中央労働災害防止協会, (1989).
- 2) 榎本兵治編, 粉じん爆発－危険性評価と防止対策－, オーム社, (1991).
- 3) Eckhoff, R. K., *Dust Explosions in the Process Industries (second ed.)*, (1997), Butterworth - Heinemann, Oxford, UK.
- 4) Cashdollar, K. L. and Hertzberg, M. (eds.), *Industrial dust explosions*, ASTM Special Technical Publication 958, (1987), ASTM, Baltimore, USA.
- 5) 爆発圧力放散設備技術指針, NIIS-TR-No.34 (1998), 産業安全研究所, pp.1-67.
- 6) 集じん機及び関連機器における粉じん爆発防止技術指針, NIIS-TR-No.36 (1999), 産業安全研究所, pp.1-33.
- 7) NFPA 68: *Guide for venting of deflagrations*, NFPA 69: *Explosion prevention system*, National Fire Protection Association, (1994), USA.
- 8) VDI 3673 : Drauckentlastung von Staubexplosionen, Verein Deutscher Ingenieure (1992), Germany.
- 9) 那須貴司, “爆発抑制装置”, 高圧ガス, 22, (1985), pp.16-24.
- 10) 日本フェンオール株式会社資料, 東京.
- 11) Moore, P. E., “Suppressants for the control of industrial explosions”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 9 (1996), pp. 119-123.
- 12) Fikeジャパン株式会社資料, 東京.
- 13) 高井陸雄, “空気中にある可燃性粉じんの爆発指数決定方法”, 安全工学, 27 (1988), pp.37-40.
- 14) ISO 6184 (1985), *Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air, Part 2: Determination of explosion indices of combustible gases in air, Part 3: Determination of explosion indices of fuel/air mixtures other than dust / air and gas/air mixtures, Part 4: Determination of efficacy of explosion suppression systems.*
- 15) Bartknecht, W., “The course of gas and dust explosions and their control”, (ed., Buschmann C.H.), *Loss Prev. Safety Promotion in the Process Ind., Proc., Elsevier, First Int. Loss Prev. Symp.*, Hague/Delft, Netherlands, 28-30
- May (1974), pp.159-175.
- 16) Sapko, M. J., Furno, A. L., and Kuchta, J. M., “Quenching methane-air ignitions with water sprays”, *Bureau of Mines Report of Investigations (USA)*, RI-8214, (1977), pp.1-13.
- 17) Jarosinski, J., “A survey of recent studies on flame extinction”, *Prog, Energy Combust. Sci.*, 12 (1986), pp.81-116.
- 18) 林 年宏, 産業安全研究所研究報告 (第1報) RR-21-1 (1972), (第4報) RR-24-5 (1976), (第5報) RR-24-6 (1976), 産業安全研究所.
- 19) 林 年宏, 産業安全研究所研究報告 RR-31-1 (1983), 産業安全研究所.
- 20) Jarosinski, J., Lee, J. H. S., Knystautas, R., and Crowley, J. D., “Quenching of dust-air flames”, *Proc. Twenty-First Symp. (Int.) on Combust.*, Combust. Inst., Pittsburgh, (1986), pp. 1917-1924.
- 21) Proust, C, and Veyssiere, B., “Fundamental properties of flame propagating in starch dust air mixtures”, *Combust. Sci. and Tech.*, 62 (1988), pp. 149-172.
- 22) Ballal, D.R., “Ignition and flame quenching of quiescent dust clouds of solid fuels”, *Proc. R. Soc., Lond.*, A 369 (1980), pp. 479-500.
- 23) Ballal, D. R., “Further studies on the ignition and flame quenching of quiescent dust clouds”, *Proc. R. Soc. Lond.*, A 385 (1983), pp.1-19.
- 24) Goroshin, S., Bidabadi, M., and Lee, J. H. S., “Quenching distance of laminar flame in aluminum dust clouds”, *Combust. Flame*, 105 (1996), pp. 147-160.
- 25) Han, O.-S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A., and Ogawa, T., “Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 13 (2000), pp.449-457.
- 26) 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. Process Ind.*, 14 (2001), pp. 153-160.
- 27) 日本燃焼学会, 燃焼工学ハンドブック, 丸善, (1995), p.20.
- 28) Grant. G., Breton, J., and Drysdale, D., “Fire

suppression by water sprays”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 26 (2000), pp. 79-130.

- 29) Jones, A. and Nolan, P. F., “Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 8 (1995), pp.17-22.
- 30) 八島正明, “水を噴霧した場合の管内伝ば火炎の消炎挙動”, 産業安全研究所報告 NIIS-RR-98 (1998), 産業安全研究所, pp. 77-91.
- 31) 八島正明, “管内を伝ばする火炎の消炎剤噴霧による消炎”, 第31回安全工学研究発表会講演予稿集, (1998), 安全工学協会, pp. 81-84.
- 32) 幸田清一郎, 田久保嘉隆編, 火炎の分光学的計測とその応用—フレームスペクトロピー—, 学会出版センター, (1990), 第6章.
- 33) Williams, F. A., *Combustion Theory (second ed.) : The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*, Addison-Wesley, (1985), Redwood City, CA, USA.
- 34) 八島正明, “双火炎核法による粉じん伝ば火炎の燃焼速度測定”, 第33回安全工学研究発表会予稿集, (2000), 安全工学協会, pp. 49-52.
- 35) Pu, Y., “Fundamental characteristics of laminar flame in cornstarch dust-air mixture”, *Dynamic of Reactive Systems, Progress in Aeronautics and Astronautics*, AIAA, 113 (1988), pp.3-25.
- 36) Palmer, K. N., “The quenching of flame by wire gauzes”, *Proc. Seventh Symp (Int.) on Combust.*, Combust. Inst., Pittsburgh, (1959), pp. 497-503.

付 録

〔噴霧水滴の最適径と水量について〕

粉じん火炎の火炎構造は予混合火炎のそれとは異なるが、気相の温度分布は類似していることがわかっている¹⁻²⁾。そこで、粉じんの流動を無視し、粉じん火炎の解析を予混合火炎に置き換え、ここでは消炎のための噴霧水滴径と必要な総水量について簡単な計算を行ってみた。

火炎は厚さ δ 、温度 T_b のステップ状の温度分布をもつ火炎帯からなり、速度 V_f で空間を伝ばしているとする。この火炎に相対する水噴霧により火炎温度が低下し、消炎するための水滴径と総水量、ここでは水噴霧の条件を設定するのに不可欠な質量流束を求める。消炎が主に火炎先端付近の平面に近い領域で起こるとし、火炎全体の形状は湾曲せずに平面であると仮定する。

火炎に相対的な速度 V で水滴が火炎に流入する際の質量流束 q_w は次式で表される。

$$q_w = Nm_oV = (nm_oV)/(\delta A) \quad (1)$$

ここで、 N は単位体積あたりの水滴数 (数密度)、 m_o は水滴 1 粒子あたりの質量、 V は $|V_w - V_f|$ で水滴の移動方向を正符号にとり、 V_w は静止空間に対する水滴の移動速度、 V_f は周囲気流の速度 + 燃焼速度 S_L 、 A は火炎面の面積 (投影面積)、 n は火炎帯に入る水滴数である。水滴の火炎帯を通過する時間 t_p は次式で表される。

$$t_p = \delta / V \quad (2)$$

単位体積、単位時間あたりの火炎の発熱量 Q_b'' は、

$$Q_b'' = H_b \omega = C_{pg} \rho_g (T_b - T_o) S_L / \delta \quad (3)$$

である。ここで、 H_b は単位質量あたりの燃焼熱、 ω は単位体積、単位時あたりの生成量、 C_{pg} は気体の定圧比熱、 ρ_g は気体の密度、 T_b は火炎温度、 T_o は未燃焼ガスの温度 (= 火炎帯流入前の水滴の温度) である。ステップ状温度分布をもつ火炎帯全体の発熱量 Q_b は、上式より次のようになる。

$$Q_b = Q_b'' \delta^2 A / S_L \quad (4)$$

粒子径 D_o の水滴が火炎帯に流入し、蒸発する際の熱量 Q_{w1} は次式で表される。

$$Q_{w1} = nh_c (T_b - T_o) tA \quad (5)$$

ここで、 h_c は水滴 (球) と周囲ガス温度との平均熱伝達率、 t は経過時間で水滴の蒸発時間あるいは火炎帯通過時間に相当する。球の伝熱に対するヌセルト数 N_u は、

$$N_u = h_c D_o / \lambda_w \quad (6)$$

である。ここで λ_w は水滴表面と周囲ガスの平均熱伝導率である。

水滴の蒸発によって火炎温度が T_e まで下がり消炎する場合、火炎帯の水滴の通過時間 t_p と蒸発時間 t_v について二つに分けて検討できる。

(i) $t_p \geq t_v$ のとき

水滴が t_p 時間ですべて蒸発し、温度 T_e の蒸気になったとすると、水滴群の火炎からの受熱量 Q_{wo} は次式で表される。

$$Q_{wo} = C_{w1} n m_o (T_v - T_o) + n m_o L + C_{wg} n m_o (T_e - T_v) = \{C_{w1} (T_v - T_o) + L + C_{wg} (T_e - T_v)\} n m_o \quad (7)$$

ここで、 C_{w1} は水の定圧比熱、 C_{wg} は水蒸気の定圧比熱、 L は蒸発潜熱である。

$Q_{w1} = Q_{wo}$ 、 $t = t_p$ と置き、式 (2) (5) ~ (7) より、この時間条件における水噴霧流束 q_{w1} は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 q_{w1} &= \lambda_w N_u (T_b - T_o) t_v / \{C_{w1} (T_v - T_o) + L \\
 &\quad + C_{wg} (T_e - T_v)\} t_p D_o \\
 &= \tau \lambda_w N_u (T_b - T_o) / \{C_{w1} (T_v - T_o) + L \\
 &\quad + C_{wg} (T_e - T_v)\} D_o
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

ここでは $\tau = t_v / t_p$ とする。

水滴が急に火炎に流入した場合の非定常蒸発期間を無視し、水滴径 D の二乗が時間とともに一定速度で減少するいわゆる D^2 則に従うとすれば、 β を蒸発係数として、次式で表される。

$$D^2 = D_o^2 - \beta t \tag{9}$$

水滴の表面付近で沸点に近く、沸点以上にならないとし、 λ_g を気相中の平均熱伝導率、 T を周囲温度とすると、 β は次式で表される³⁾。

$$\beta = 8 \lambda_g (T - T_v) / \rho_w L \tag{10}$$

$$t_p \geq t_v \text{ では, } D_o^2 = \beta t_v$$

$$t_p < t_v \text{ では, } D^2 = D_o^2 - \beta t_p \tag{11}$$

(ii) $t_p < t_v$ のとき

火炎帯で水滴径が D に減少するまでの水滴の火炎からの受熱量 Q_{w2} について、それが水滴表面積の減少、すなわち D^2 の減少に比例すると考えると、式 (7) (9) ~ (11) より、次式で表される。

$$\begin{aligned}
 Q_{w2}/Q_{wo} &\sim (D_o^2 - D^2) / D_o^2 \text{ より,} \\
 Q_{w2}/Q_{wo} &= a \{(D_o^2 - D^2) / D_o^2\}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

ここでは、 a は係数である。

このときの火炎の熱損失 Q_{bL} は、式 (3) (4) より、 $T_o = T_e$ として次式で表される。

$$Q_{bL} = C_{pg} \rho_g (T_b - T_e) \delta LA \tag{13}$$

$Q_{w2} = Q_{bL}$ 、 $t = t_p$ と置き、式 (2) (9) ~ (13) より、この時間条件における水噴霧流束 q_{w2} は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 q_{w2} &= C_{pg} \rho_g (T_b - T_e) V^2 D_o^2 / \\
 &\quad a \beta \delta \{C_{w1} (T_v - T_o) + L + C_{wg} (T_e - T_v)\}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

式 (8) と (14) について、0.1MPa における次の値⁴⁾ を代入した場合の結果を **Fig. 1** に示す。ただし、 N_u 数は 2、空気中での燃焼に伴うガスの物性値は窒素で代表した⁴⁾。

$N_u = 2$, $T_o = 294\text{K}$, $T_v = 373\text{K}$, $T_e = 1,273\text{K}$, $T_b = 1,773\text{K}$, λ_w (水 330K) = $0.647 \times 10^{-3} [\text{kJ/m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}]$, ρ_w (水 330K) = $984 [\text{kg/m}^3]$, $L = 2.26 \times 10^3 [\text{kJ/kg}]$, C_{w1} (水 330K) = $4.19 [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$, C_{wg} (蒸気 800K) = $2.19 [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$, ρ_g (窒素 1,773K) = $0.164 [\text{kg/m}^3]$, C_{pg} (窒素 1,773K) = $1.28 [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$, $V = 30 [\text{m/s}]$, $\delta = 1 \times 10^{-3} [\text{m}]$, $\beta = 2.44 \times 10^{-7} [\text{m}^2/\text{s}]$ (式(10), $T = T_b$ より), $a = 1$

二曲線の交点の q_w が最小になるときの水滴径が最適径 D_o^* となるが、実際使おうとするノズルの水滴径の性能が予め定まっている場合の水噴霧条件を設

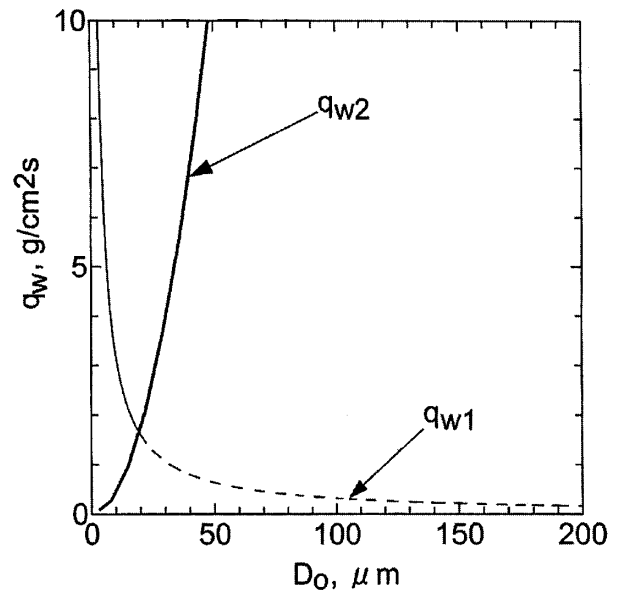


Fig. 1 Qualitative variation of water flux with size of water droplet on quenching.
 消炎に対する水滴径と水噴霧流束の定性的な変化

定する場合には、この値 D_o^* よりも小さい粒子径の水滴では、数密度を増やすように q_{w1} 曲線に従い、大きい粒子径では相対速度を小さくするなど q_{w2} 曲線に従うと良いことが推測できる。しかし、メタン-空気予混合火炎 (当量比 1.0) について実験的に調べた消炎条件では、 $D_o = 97 \mu\text{m}$ において水噴霧の質量流束 $0.135 [\text{g/cm}^2\text{s}]$ (本文 **Table 1**)、Sapko ら⁵⁾ は $100 \mu\text{m}$ で $0.127 [\text{g/cm}^2\text{s}]$ という結果であったが、これらの値からすると、ここで用いた物性値と火炎をステップ状の温度分布で簡略化した計算は定性的なものである。しかし、水滴径の減少とともに消炎のための水噴霧質量流束が減少する傾向は実験と一致する。また、必要な総水量についてもおおその値を見積もることができる。 q_{w1} の曲線の交点よりも右側 (点線部) では、水滴が火炎帯内で蒸発しきらない状態にあるので、点線よりも大きい値となるはずである。

最適径 D_o^* を見積もるといっただけならば、静止した水滴中を火炎が燃焼速度 S_L で伝ばし、火炎帯ですべて蒸発すればよいので、たとえば次式で表される⁶⁾。

$$D_o^* = 2 \{(2D_f C_s \delta) / (\rho_w S_L)\}^{1/2} \tag{15}$$

ここでは、 D_f は蒸気の空気中への拡散定数、 C_s は水滴表面における飽和蒸気圧である。この式では、水滴の火炎帯の通過時間は δ / S_L で表されるが、粉じん火炎では、予混合火炎のそれに比べて δ が大⁷⁾, S_L が小なので⁸⁾, D_o^* は大きくてもよいことが推測できる。

参考文献

- 1) Smoot, D. L. and Horton, M. D., “Propagation of laminar pulverized coal -air flames”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 3 (1977), pp. 235-258.
- 2) Seshadri, K, Berlad, A. L., and Tangirala, V., “The structure of premixed particle-cloud flames”, *Combust. Flame*, 89 (1992), pp.333-342.
- 3) 熊谷清一郎, 燃焼 (岩波全書), 岩波書店, (1976), p.178.
- 4) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 (改訂第4版, 丸善, (1996).
- 5) Sapko, M. J., Furno, A. L., and Kuchta, J. M., “Quenching methane-air ignitions with water sprays”, *Bureau of Mines Report of Investigations (USA)*, RI-8214, (1977), pp.1-13.
- 6) 疋田 強, 秋田一雄, 改訂燃焼概論, コロナ社, (1982), pp.186-193.
- 7) Han, O.-S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A., and Ogawa, T., “Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 13 (2000), pp.449-457.
- 8) 八島正明, “双火炎核法による粉じん伝ば火炎の燃焼速度測定”, 第33回安全工学研究発表会予稿集, (2000), 安全工学協会, pp.49-52.

(平成 14 年 9 月 14 日受理)