

配管内粉じん流中の火炎伝ば特性*

松田東栄**

Flame Propagation Characteristics of Flowing Dust-Air Mixtures in a Tube

by Toei MATSUDA

Abstract ; Dust explosion and fire hazards should be taken into consideration in the design and operation of industrial pneumatic conveying systems associated with combustible dusts.

This paper describes flame propagation characteristics of flowing dust-air mixtures in a 4.2-cm diameter, 13-m length tube of a suction-type pneumatic conveying system.

In the small horizontal tube system, flame velocities were measured as a function of dust concentration at several conveying air velocities. The dusts studied most extensively are cork dust and ABS-resin powder. The flame velocities were obtained from the output signals for photodiodes and they merely represent the rate of leading flame front in propagation, for which correction was not made at various air velocities. The ignition source situated in the middle of the test tube length was given by a spark, whose energy was relatively small and at a level from 2 to 3 J, depending on a flow condition.

Apparently there are two types of flames, namely downward and upward propagation. Figures 2 and 3 show flame velocity versus distance curves at various dust concentrations and air velocities. Most of the downward expanding flames reach to peak of flame velocity upon ignition. Then, at low air velocities and higher dust concentrations above $\sim 0.2 \text{ kg/m}^3$, the flame velocities are diminished to a velocity such that the flame front almost stopped, meanwhile at the lower concentrations the flame velocities decrease gradually although the tube length appears to be short to observe full deceleration of flame velocity in the downstream. At higher conveying air velocities, the flame velocities certainly decrease with some variation after the peaks, but within a range of relatively thin dust concentrations, they are re-accelerated towards the dust collector. In the upstream propagation, flame velocities increase relatively slowly at first and then rather rapidly, towards an open end of the tube.

The maximum values of the peak downstream flame velocities are given at the dust concentrations from approximately 0.12 to 0.16 kg/m^3 for the ABS-powder, and from about 0.15 to 0.20 kg/m^3 for the cork dust with increasing air velocities from 15 to 30 m/s , respectively. These concentrations are lower than the optimum dust concentration which minimized the minimum ignition energy at various conveying air velocities. The upstream flame propagation is only possible within a narrow range of dust concentrations, around that maximizes the downward peak flame velocity.

These dust flame propagation behavior would be partly similar to that for gaseous mixtures

* 本報とほぼ同主旨の内容を、安全工学 Vol.26, No.4(1986), 196~204頁の報文の一部として発表した。

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division

in a tube. However, the dust flame propagation in this observation is seemingly characterized by a rapid decrease in flame velocity after initial flame acceleration. Although this could be explained by a flow resistance at the tube wall due to high viscosity of the flame, the additional data of dynamic increase in dust concentration before the flame front seem to give another probable reason. Because of the dependence of flame velocity on dust concentration, the increasing concentration in front of the flame will cause a more rapid burning if the dust concentration is much lower than the actual stoichiometric concentration; this in turn will increase the dust concentration, and so on. Thus, the maximum peak values of flame velocities may have been recorded at a concentration on the lower side of the spark ignitable limits. If the dust density in flows is increased even more, the concentration ahead of the flame will be increased more than the stoichiometric composition, possibly near to or over the upper limit, resulting in the collapse of the flame into smouldering particles or in quenching.

Furthermore, turbulent mixing immediately ahead of the flame seems to be responsible for the variation in flame speeds. The rate of combustion can be considerably enhanced in the flow with a high level of turbulence. Too much intense of turbulence, on the contrary, may cause decrease in burning velocity. Such a dual role of turbulence was tentatively and qualitatively cited to explain the phenomena on the flame propagation in the small tube.

In conclusion, it is unlikely that the flame will accelerate into detonation with weak spark ignition in comparatively small tubes of pneumatic transportation systems for common organic dusts.

Keywords ; Dust explosion, Pneumatic transportation, Flame velocity, Flame propagation, Cork dust, ABS-resin powder.

1. まえがき

可燃性粉じんが浮遊分散して流動するような工程での爆発・火災危険性を把握する目的で、前報¹⁾では粉じん流の最小発火エネルギーに及ぼす空気速度の影響を実験的に検討し報告した。本報では、同じ実験装置を用いて調べた細管内粉じん流中の火炎伝ば挙動について述べる。

配管中を粉じんが流動している場合の火炎伝ば状況は、工業的には今では多くのプロセスに散見されるにもかかわらず、これまであまり報告がない。過去に広範な研究が行われた炭じん爆発においても、実験的研究は堆積粉じんを爆風が舞上げその中を爆発が伝ばして行く、という状況にほとんど限定され、ここで問題とする粉じん流が前もって存在するようなケースを扱った例はほとんどないように思う。その点、最近 Gardener²⁾が報告した火力発電所での微粉炭利用における安全問題に関する、0.6 m 径配管内炭じん流中での爆ごう発生実験結果（ただし、強力な着火源による）は注目される。

一方、可燃性混合ガスが配管中を流動している場合の火炎伝ば特性は、よく知られているように気流の乱れ特性に影響されるが、細管中では短い誘導距離で爆ごうに転移しやすくなる。しかし、粉じん流は固・気二相流で、空気エネルギーによって粉体が搬送されるもので空気流と粉じんのながれの各速度は異なるなど、現象はすこぶる複雑である。従って、混合ガスと同じような伝ば挙動を示すかどうかは安全工学上検討を要する基本的な問題と考えられる。

ここでは、できるだけ均一な粉じん流を達成するため前報¹⁾で述べた細管 (1 $\frac{1}{2}$ ") 中における粉じん流の火炎伝ば特性を測定した。その結果、15~30 m/s の範囲で空気速度を増すと、着火直後下流側火炎先端速度は加速され最大速度で 110~180 m/s に達した後、減少または消炎に至る場合が多く、爆ごう速度のような火炎速度に進むことはないと思われる。

2. 実験

実験装置、実験方法並びに粉じん試料はすべて前報¹⁾で詳述したとおりである。ただし、粉じんはコルクお

よび ABS 樹脂 (I) 試料のみを使用し、配管は直径 4.2 cm (1½") の水平ガス管約 13 m とした。

本報で示す火炎先端速度はフォトダイオードで検知した平均火炎先端速度そのものであり、集じん空気速度を差し引いていない。ここでは、便宜上火炎先端速度と後述の火炎速度とを区別することにする。火炎先端速度の測定における着火源は、2～3 J のアーク放電火花を使用した。なお、着火源の位置は前報同様、配管上流粉体試料供給口から約 6.5 m 下流位置に固定して、集じん空気速度および粉じん濃度をそれぞれ変化させた場合の火炎先端速度を測定した。

3. 実験結果

3.1 火炎伝ば性状

Fig. 1 (上) は ABS 樹脂粉の空気輸送速度 20 m/s における、配管の長さに沿った火炎伝ば状況を 16 ミリ高速度撮影した結果から描いたもので、以下に述べるこの配管中での概略的な火炎伝ば性状を代表しているように思う。同図 (下) には対応の火炎先端速度の変化をプロットしてある。着火と同時に火炎は一瞬下流側に流されるように見えるが、ある濃度範囲では着火源から見て下流側および上流側 (逆火) への火炎伝ばが起きる。同図 (上) での実線は火炎先端を、点線は火炎後尾の終端を示す。斜線部は輝炎部を示し、上下流方向への爆発火炎通過後の管中には燃焼生成ガス (煙) や未燃焼粉じんが残存する。輝炎部は概して長い円筒状の火炎で、その後尾部分はやや暗く薄い不規則な形状を示す。

火炎先端速度は、いずれの方向でも次第に加速されてそれぞれの極大値に達した後、減速するようである。しかも、この場合上流側の極大先端速度の方が下流側のそれより約 6 割も大きく、上流側火炎は極大値を通過後急激に消滅する。下流側火炎も、同様に一たん消滅するように見えるが、燃焼粒子やくん焼粒子が未燃粉じん雲中に混入し、吸引プロワーによって粉じん流が排出されるにつれて再び粉じん火炎が形成されるようである。

結局、上記の火炎伝ば性状は、火炎形成による急激な熱膨張に起因するものと考えられるが、下流側火炎が流れ方向に伝ばするにもかかわらずほぼ停止するまでに減速することや逆火の速度が比較的大きいことなどが特徴的と思われる。以下により詳しい測定データについて述べる。

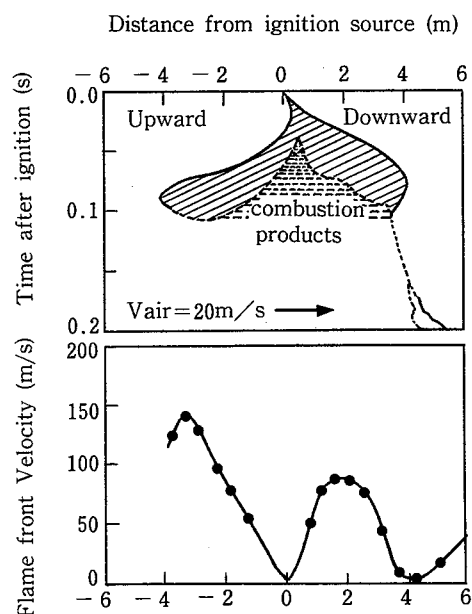


Fig. 1 Schematic flame propagation trace and the corresponding flame front velocity along the 1½" dia. tube for ABS-resin. Air velocity; 20 m/s, dust conc.; 0.22 kg/m³.

ABS 樹脂粉じんの 1½" 径配管に沿った火炎伝ば状況図と対応の火炎先端速度。空気速度 20 m/s; 粉じん濃度 0.22 kg/m³

3.2 火炎先端速度データ

Fig. 2 及び 3 は、それぞれコルク粉および ABS 樹脂の種々の濃度ならびに 15～30 m/s の種々の空気速度における配管長さに沿った平均火炎先端速度の変化を示す。着火源から見て吸引ファン側を下流、粉体供給側を上流側としてそれぞれの場合に分けて表示した。これらの図では、二、三の例を除いて粉じん濃度の表示は省略した。また、各曲線は重複して見分けにくい、いくつかの例外があるものの、ほとんどの場合発火後火炎は加速し、ある極大値 (または最大値) に達した後減速するという前記の特徴がみられる。しかし、減速の度合いは粉じん濃度のよび空気速度によって大きく異なり、約 0.2 kg/m³ 以下の低濃度または空気速度が大きいほど十分な火炎の減速はみられず、火炎は再び加速する場合もあるようだ。このような加速現象は、開放管端では通常観測されることなので、十分な火炎の減速を観測する上でここで使用した管の長さは不十分であったと思われる。曲線の途切れは、消炎を示す。ABS 樹脂粉では、空気速度が小さいと逆火は困難にな

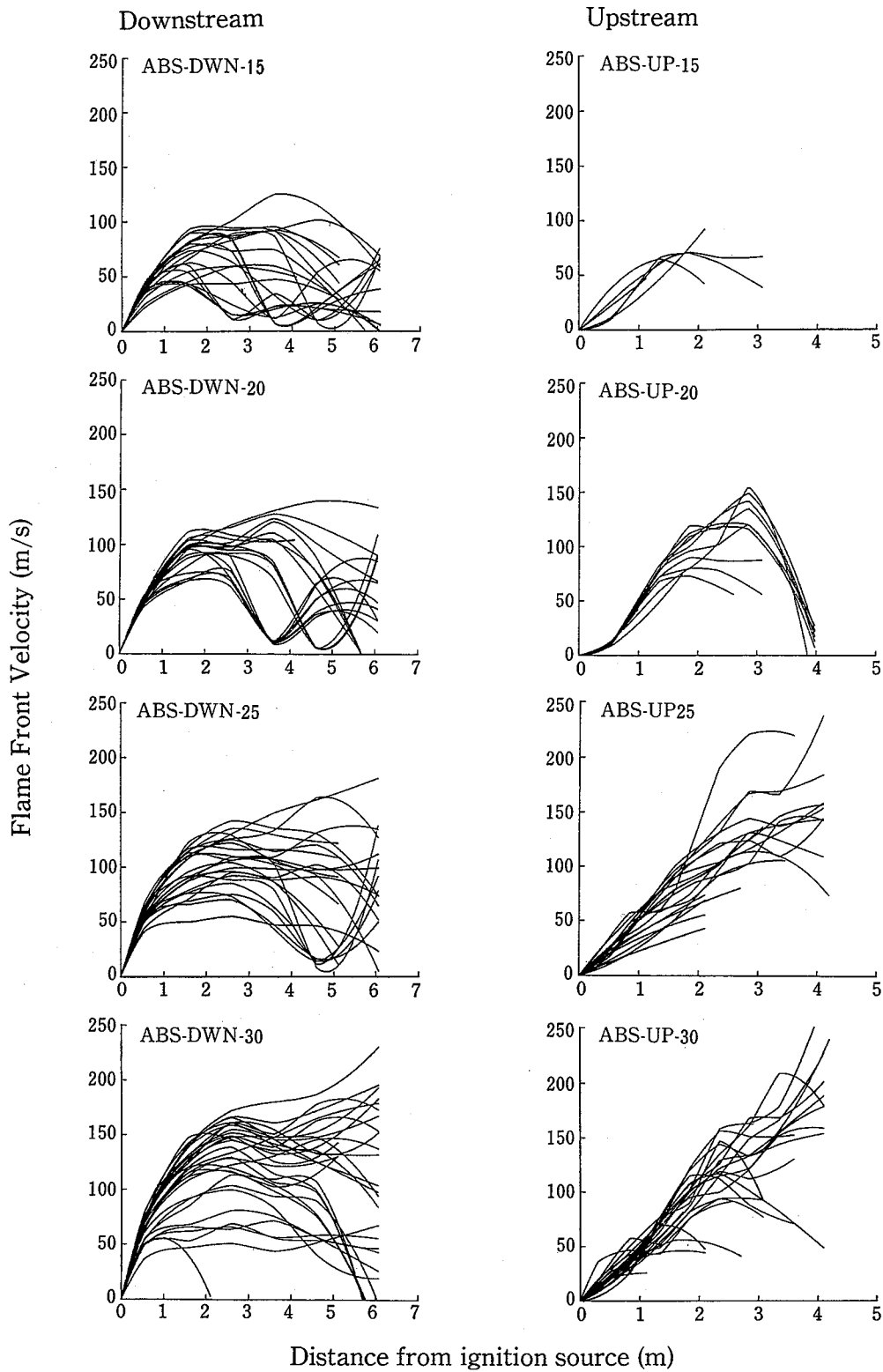


Fig. 2 Variation of flame front velocity along tube length at various dust concentrations and the initial air velocities of 15, 20, 25 and 30 m/s, top to bottom, for cork dust.

コルク粉じんの種々の濃度および集じん空気速度（上から、15、20、25、30 m/s）における配管長さに沿った火炎先端速度の変化。

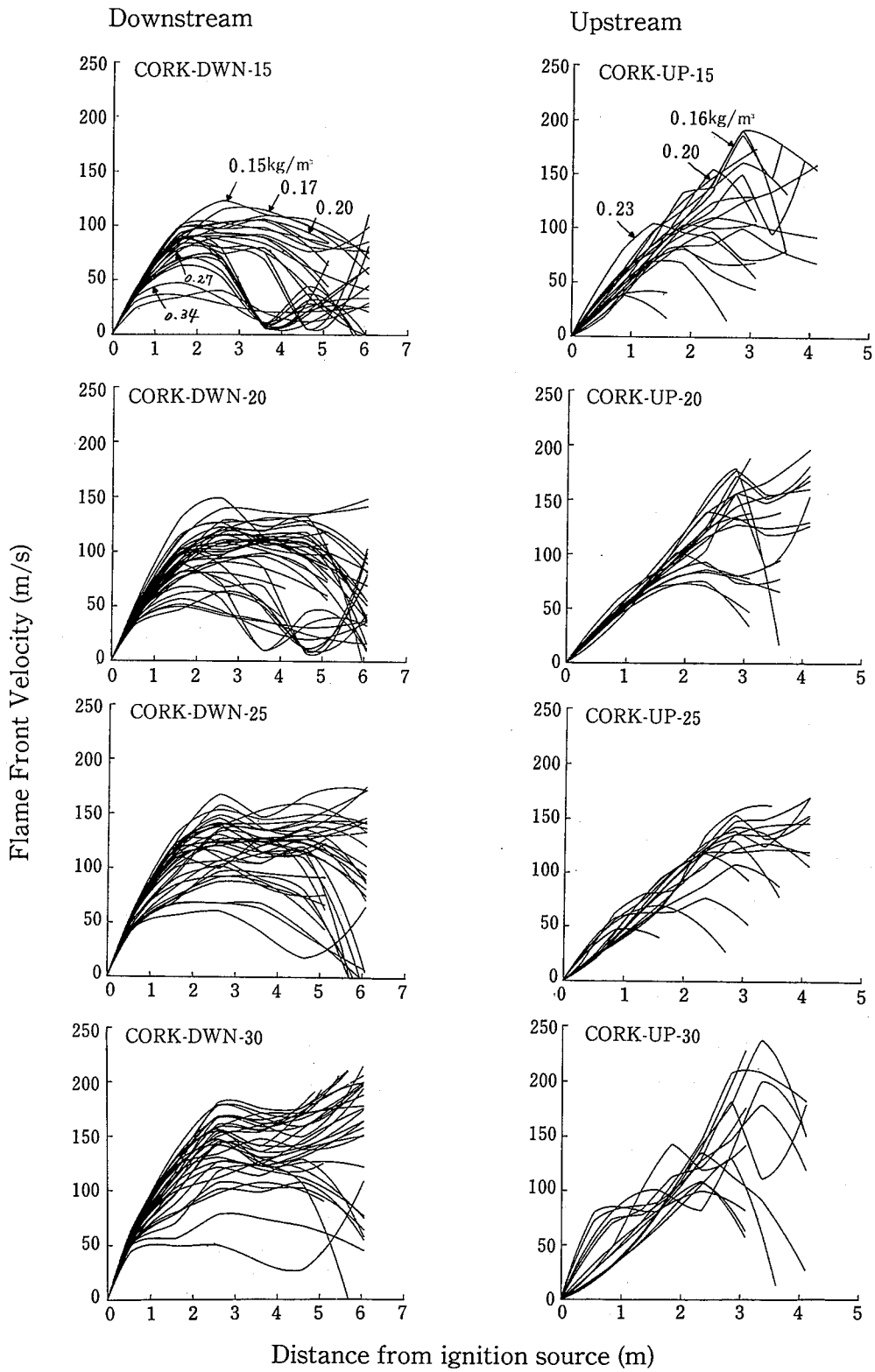


Fig. 3 Variation of flame front velocity along tube length at various dust concentrations and the initial air velocities of 15, 20, 25 and 30 m/s, top to bottom, for ABS-resin dust.
 ABS樹脂粉の種々の濃度および集じん空気速度（上から、15、20、25、30 m/s）における配管長さに沿った火炎先端速度の変化。

る。

なお、火炎加速後に減速するという伝ば特性は、直径 7.2 cm または 10 cm、長さ 86.6 m の配管を用いた圧送式空気輸送系での爆発実験³⁾においても観察された。ただし、減速後下流側火炎は空気輸送速度で搬送され、上流側への伝ばはみられなかった。

Fig. 4, 5 は、発火直後の火炎加速で達せられる火炎先端速度の極大値を濃度の関数として示したもので、空気速度 15 および 30 m/s の場合のみデータをプロットした。各点はすこぶるばつづくが、各濃度における最大値をつなげると明らかにピークのある一つの曲線で表

される。下流側での曲線 Fig. 4 の傾向は各空気速度で類似しており、火炎先端速度の最大値を示す粉じん濃度は ABS 樹脂粉に対して約 0.12~0.16 kg/m³、コルク粉じんに対して約 0.15~0.20 kg/m³ の間にあり、しかも空気速度が小さいほうがわずかながら低い濃度で最大値をとる。

前報¹⁾で示した最小発火エネルギーの最低値を示す粉じん濃度が、空気速度を 15 から 35 m/s まで増した場合、ABS 樹脂・コルク粉ともに約 0.40 から 0.25 kg/m³ まで逆に低濃度側へ移行した結果とは対称的で、著しく低い濃度で火炎先端速度は極大（または最大）を

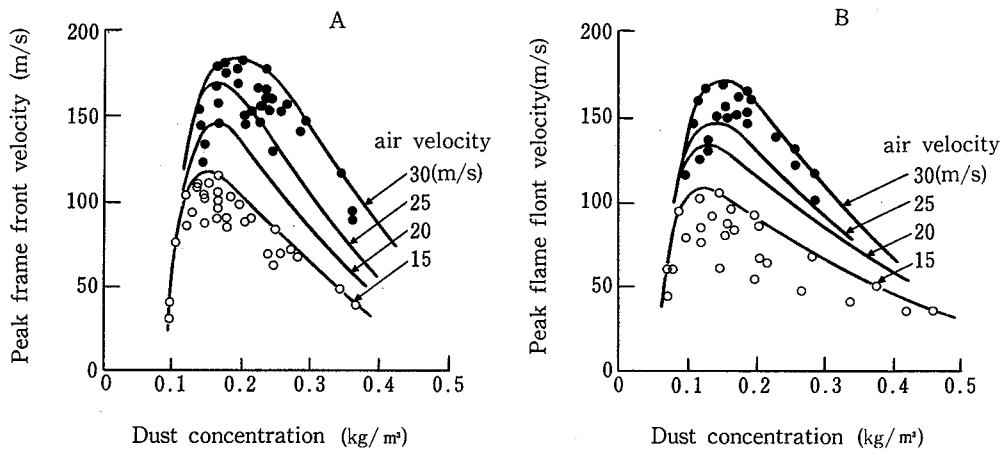


Fig. 4 Peak downward flame front velocities as a dust concentration for A : cork, B : ABS-resin. Plotted data points for air velocities : 15 (○) and 30 m/s (●).

粉じん濃度に対する下流側極大火炎先端速度 (A : コルク, B : ABS 樹脂, 空気速度 (○) : 15, (●) : 30 m/s)

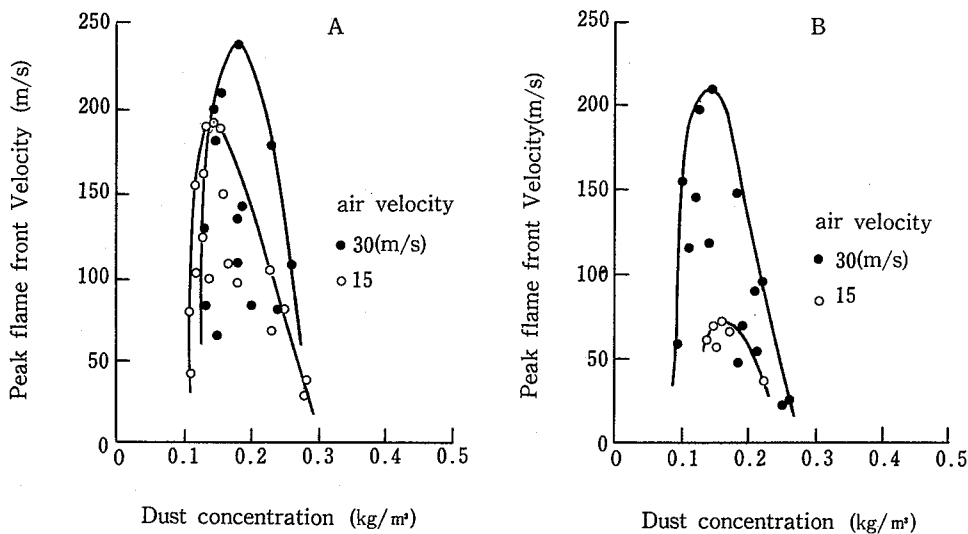


Fig. 5 Peak upward flame front velocities as a function of dust concentration for A : cork, B : ABS-resin.

粉じん濃度に対する上流側極大火炎先端速度 (A : コルク, B : ABS 樹脂)

示す。これに対して、上流側への伝ば（逆火）は、下流側の先端速度が極大値を示す濃度周辺の狭い範囲でしか観測されず、データのばらつきはさらに大きい（Fig. 5）。なお、逆火は空気速度に比例した減圧下で起きることが、管壁での圧力測定によって示された。

Fig. 6 は下流側での火炎通過時の光透過率の変化とそれを記録した地点での火炎先端速度変化を示したもので、火炎加速の結果、火炎前面で粉じん濃度が連続してしだいに高濃度に濃縮され火炎直前で最大濃度になることを示す。このような粉じん濃度の変動すなわち動的増加は、上流側でも同じく記録される。

Fig. 7 は加速段階での火炎前後の濃度変化ならびに管壁で測定した圧力変化を示す。両者は火炎直前で最大変化を示すように同時的現象であることがわかる。このような圧力変動は、開放空間では火炎伝ばに伴って生ずる火炎直前の気体速度に依存することはよく知られている⁴⁾。その最大圧力上昇値 Δp は火炎速度 V_f の関数でもある。

コルク粉じんについて両者の関係を求めたところ、例えば集じん空気速度 30m/s における V_f は、 $\Delta p^{0.5}$ に比例するデータが得られた。これを Fig. 8 に示す。ただし、配管径が小さいので圧力変動は管壁の影響を受ける可能性などがある。なお、ここでの火炎速度 V_f は火炎先端速度から集じん空気速度を差し引いた値とした。

4. 考察

上記の火炎伝ばに伴う、火炎直前の圧力変動や濃度変化は、坑道内炭じん爆発実験などにおいてすでに観測されている結果^{5,6)}とかなり類似している。しかし、本報で述べたように火炎先端速度の減速は一般的には観測されていないように思う。そこで、ここでは細管中での火炎先端速度の減速の理由について火炎伝ば状況から考察した。

細管中における粉じん火炎の一般的特徴は、かなり長い円筒状の火炎が形成されるということである。したがって、管壁への熱伝達による熱損失や管壁での粘性抵抗などが原因となって火炎速度が減速されることが十分考えられる。その点では、配管中での混合ガスの火炎伝ばと類似する。このような細長い粉じん火炎が火炎後部に滞留するため、先端火炎はその影響を受けると思われるが、その効果はここでは明らかでない。火炎や燃焼ガスによる膨張や放射熱は、逆に火炎速度を急激に加速させるだろう。

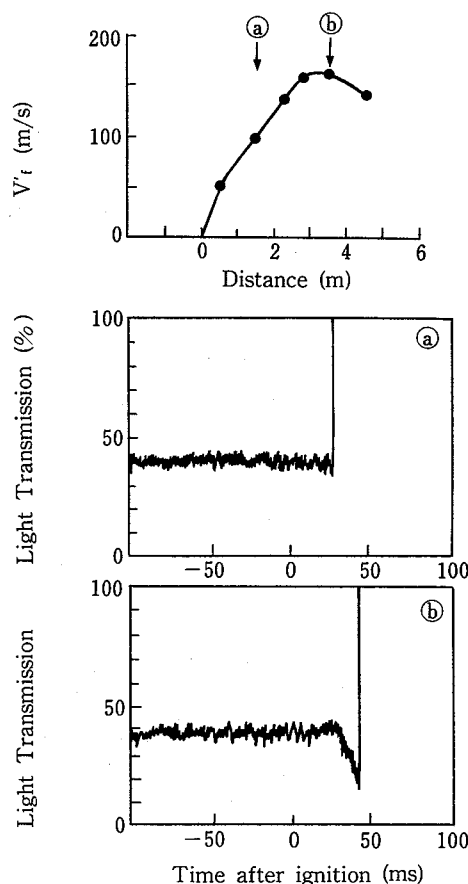


Fig. 6 Flame front velocity profile for downward propagation and simultaneous dust probe traces at arrow-indicated positions along the tube. Cork : air velocity ; 30 m/s ; dust conc. ; 0.23 kg/m³

下流側火炎先端速度の変化と火炎通過時の光透過率の変化コルク、空気速度 30 m/s、粉じん濃度 0.23 kg/m³

ここでは、上記の理由以外に火炎先端での観察から得られる動的濃度増加および乱流混合による火炎の加速、減速現象について説明を試みた。

(1) 動的濃度増加 Fig. 6, Fig. 7 に示したように、火炎の膨張は多少なりとも火炎直前に粉じん濃度の動的増加を伴うものと考えられる。粉じん流の初期濃度が実質的の化学量論組成よりもかなり低ければ、火炎直前での濃度増加は火炎速度を増すことになり、火炎速度の増大は先端速度の増加となりさらに濃度増加をもたらす。このような繰返し増幅機構によって、粉じん濃度が実質的な量論組成を超えない限り、火炎速度は粉じん濃度に強く依存するので火炎速度は加速されることになるだろう。これらの理由で、Fig. 4, Fig. 5 に

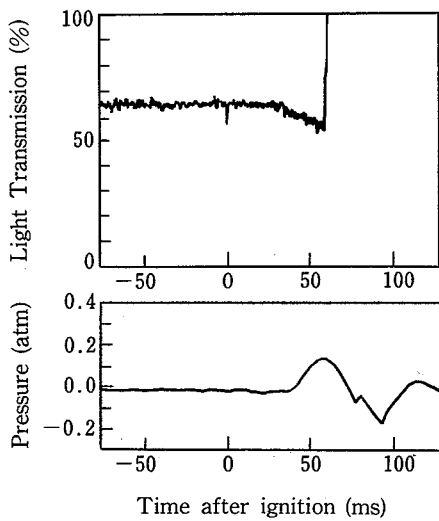


Fig. 7 Dust probe transmission and pressure traces during flame passage. Cork : downward air velocity ; 20 m/s ; dust conc. ; 0.16 kg/m³ ; flame front velocity ; 95 m/s. 火炎通過時の光透過率の変化と管壁での圧力変動(コルク, 下流, 空気速度 20 m/s, 粉じん濃度 0.16 kg/m³, 火炎先端速度 95m/s)

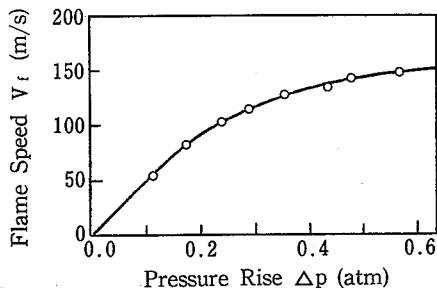


Fig. 8 Flame speed versus peak pressure rise at leading flame front. Cork : downward air velocity ; 30 m/s. 火炎前面での火炎速度と最大圧力上昇値の関係(コルク粉じん, 空気速度 30 m/s)

示すように極大火炎先端速度の最大値がかなり低い粉じん濃度において記録されたものと思われる。

一方、量論組成以上の初期濃度であれば、発火後の火炎加速による濃度増加によって火炎速度は現象するか、動的濃度増加が急激であれば上限以上の濃度に濃縮され消炎に至るものと思われる。

(2) 乱流混合 発火直前の粉じん流は、配管中では高いレイノルズ数 ($10^4 \sim 10^5$) を持ち、乱流状態にあるため、発火直後の燃焼速度 (S_f) = 火炎速度 (V_f) - 気体速度 (V') は著しく加速されると思われる。燃焼

速度の加速は火炎直前の気体速度を増加させ、さらに乱れを増加させるものと予想される。以下、火炎直前での乱れが燃焼速度を増大させるという機構が互いに繰り返され、火炎速度は急激に加速される。しかし、火炎前方での乱れがあまり激しくなると乱流混合により未燃粉じんが先端火炎と接触する速度が早まり、火炎は局部的に消炎することになる。そこで、燃焼速度が最大になる乱れ強度が存在し、乱れの強すぎる領域では燃焼速度はかえって減少することになる。

このような火炎と乱れの干渉の問題は、ガス爆発において近年詳しく研究されており(例えば、Lee による総説⁸⁾)、粉じん爆発でも十分成立するものと考えられる。

すでに示した火炎速度と管壁での圧力データを用い、Pickles⁷⁾の提案した炭じん爆発の乱流混合モデルにより火炎直前で火炎自身によって誘起される気体速度および燃焼速度を求めると、Fig. 9 の結果が得られる。

これらの計算は粒子の影響を考慮しておらず、多くの仮定を前提としているので概略的なものにすぎないが、上図の結果は上記の乱流混合による燃焼速度の増大と減少を示唆している。気体速度は火炎速度以上にはなり得ないので ($V' < V_f$)、配管中での火炎速度は限定され、結局火炎先端速度も乱れの増大によって限界値に達した後は減少することになるだろう。また同図は、自己伝ば性のある火炎が形成されるためには、初期粉じん流に加えてさらに気流速度が火炎直前に誘

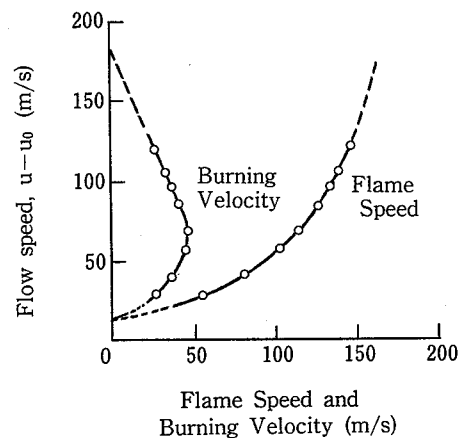


Fig. 9 Variation of flame speed and burning velocity with flow speed u for cork dust flames at an initial air velocity u_0 of 30 m/s. 初期空気速度 $u_0 = 30$ m/s におけるコルク粉じん火炎直前の気体速度 ($u - u_0$) に対する火炎速度と燃焼速度の関係

起される必要があることを示唆している。

Fig. 10 における乱流燃焼速度の最大値は約 46 m/s である。このように大きな値は乱流混合によって与えられるものと思われるが、Kauffman ら⁹⁾は穀物粉じんについて 223 m/s の乱流燃焼速度を報告した。しかし、細管中での燃焼速度の求め方については、多分に検討の余地がある。

以上述べた動的濃度増加も乱れの増大も、先端火炎直前に誘起される同時現象である。したがって、両者の影響は当然、結合あるいは増長し合うことにより燃焼速度の増大または現象を引き起こすと思われる。すなわち、火炎直前での乱れの増大は濃度増加に伴うので火炎速度は急速に限界値に達するだろう。火炎速度は粉じん濃度に依存するので、動的濃度増加と乱れの相互作用による火炎直前での濃度変動が火炎先端速度の極大値 (Fig. 4) が大きくばらつく原因になったと考えられる。なお、参考までに伝ば火炎先端を高速度写真撮影 (撮影速度 2,000 駒/秒) した例を Fig. 10 に示す。撮影方法は、着火源より下流側 2.0 m の位置で配管の一部 (1.0 m) を同径のガラス管で置き換えて直接撮影した。そのため、火炎像は不鮮明であるが、かなり小さな乱れのスケールを持つ乱流火炎構造であることがわかった。シュリーレン写真でも同様であった。

一方、すでに述べたように、逆火は下流側での火炎先端速度が最大となる粉じん濃度周辺の狭い濃度範囲でしか記録されず、しかも空気速度に比例した減圧下で起きること、火炎先端で動的濃度増加を伴うことなどから、下流側の火炎伝ばと同様の機構で起きるものと考えられる。しかし、逆火は火炎が粉じん流とは反対方向へ進む状態であり、流速の影響を受け伝ばし難い状況にあり、これが上流側の火炎先端速度が極端にばらつく原因になったものと思われる。また、火炎が上流側開放端に向かうにつれ大気圧に近づくことから、下流側の場合よりもより加速されより大きい先端速度を示す場合もあったようだ。

5. まとめ

できるだけ均一な粉じん濃度を達成するため、直径 4.2 cm の水平配管中で 15~30 m/s の集じん空気速度で可燃性粉じんを流動させることにより火炎先端速度を測定し、配管中での粉じん爆発危険性を検討した。

発火直後、粉じん火炎は下流側約 2~4 m の間で加速し、極大火炎先端速度に達した後減速する特徴がある。なお、コルクおよび ABS 樹脂粉じんの先端速度の極大

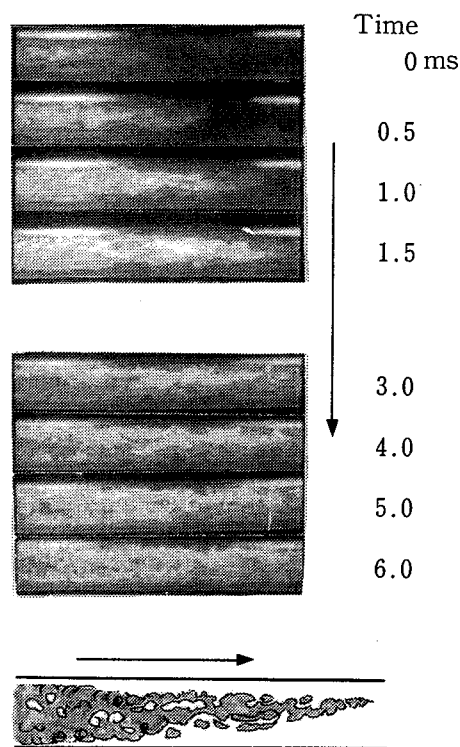


Fig. 10 High-speed pictures of a downward propagating ABS-resin dust flame and a sketch of the flame front.

$V_0 = 15$ m/s, $C = 0.19$ kg/m³, $V_f = 95.5$ m/s, Film speed : 2,000 frame/s

下流方向へ伝ばする ABS 樹脂粉じん火炎の高速度写真と火炎先端の模式図

値は約 110~180 m/s の間にあった。このような粉じん流中での火炎の加速と減速 (または消炎) を、火炎直前の粉じん濃度の動的増加および乱流混合によって定性的説明を試みた。すなわち、乱れは燃焼速度を増大させるばかりでなく、最小発火エネルギーを増加させ爆発範囲を減少させることもあるとした。また、粉じん濃度は火炎直前で動的に増加するので実質的な量論組成以下のかかなり低い濃度においてより大きい爆発危険性を示す恐れがある。さらに真空式輸送系では逆火の危険性もある。

以上の結果から、安全上できる限り高いレイノルズ数を達成することが望ましいことになるが、燃焼速度の低下や乱れによる消炎は必ず加速後に達成されるもので、この意味では非常に危険である。一方、火炎速度を制限するためには管径の影響は非常に重要であり、管径があまり大きければ熱的な影響ばかりでなく粉じんの不均一性が大きくなり、濃度によっては管底流になる場合が多い。

粉じんの舞上げ機構は不明であるが、その場合には炭じん爆発などの結果^{2,5)}からみて最適濃度中を火炎が伝ばして音速以上のより大きな火炎速度あるいは爆ごうに転位する危険性がある。しかし、通常の有機粉じんの場合多少の管底流であっても小径配管（これまでのところ、少なくとも最大径 10 cm¹⁰⁾）では、爆ごう速度のような火炎速度に達することはないと思われる。

(昭和62年10月6日受理)

参考文献

- 1) 松田東栄：産業安全研究所研究報告，RIIS-RR-86，労働省産業安全研究所，p. 93～107 (1986)
- 2) B. R. Gardner, R. J. Winter and M. J. Moore：21 st Symp. (International) on Combustion p. 335, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1987)
- 3) 松田東栄・内藤道夫・豊永克弘・野島康弘・小林誠・清水民生：安全工学，22-2, p. 155 (1983)
- 4) 平野敏右：ガス爆発予防技術，p. 108，海文堂 (1983)
- 5) J. K. Richmond and I. Liebman：15 th Sym. (International) on Comb., p. 115, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1975)
- 6) J. M. Singer, M. E. Harris and J. Grumer：U. S. Bureau of Mines Reports of Investigation 8130, p. 1～50 (1976)
- 7) J. H. Pickles：Comb. and Flame, 44, p. 153 (1982)
- 8) J. H. S. Lee：The Chemistry of Combustion Processes (M. S. Thompson ed.), ACS Symposium Series 249, American Chemical Society, p. 119～150, Washington (1984)
- 9) C. W. Kauffman, S. R. Srinath, F. I. Tezok, J. A. Nicholls and M. Sichel：20 th Symp. (International) on Comb., p. 1701, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1984)
- 10) H. Enomoto and T. Matsuda:Encyclopedia of Fluid Mechanics (ed. by N. P. Chermisinoff), Vol. 4, p. 602, Gulf Pub., Houston (1986)

〔訂正〕 上記参考文献(1)に関して、産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-86 (1986), p. 97, Photo 1 の写真は裏がえして、全体が左右上下とも逆に印刷されました。お詫びして訂正いたします。(印刷所)