

Research Report of the Research Institute of  
Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.  
UDC 621.6.04 : 662.5 : 684.041

## 配管中における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

松 田 東 栄\*

### The Effect of Air Velocity on Minimum Ignition Energy for Flowing Dust-Air Mixtures in a Tube

by Toei MATSUDA

**Abstract** ; In pneumatic transport system of combustible dusts, a dust explosion could be propagated extensively throughout the system by the presence of conveying air. Safety concerns are needed in the design and operation of the system.

Experiments have been conducted to investigate the effect of conveying air speed on minimum energy requirements for the electric spark ignition in air flow of cork dust, ABC-resin powder and some other industrial types of dust in a small tube. The dust-air mixtures flowing at air velocities between 10 and 35 m/s were formed in the 4.2 or 5.3-cm in diameter by 13-m-long horizontal steel tube of a suction-type laboratory pneumatic system. Dust was supplied at the air inlet of the tube by a vibratory feeder and optical monitors were used to follow uniformity of the dust concentrations through the tube. The optical transmission data at the cross-section of the 4.2-cm diameter tube, showed for the flow to be well homogeneously dispersed mixtures of dust at the concentrations up to 0.8 kg/m<sup>3</sup>, at which the dust probe showed an upper detecting limit. Therefore, the smaller diameter tube was more suitable for use in these tests.

Ignition was produced with capacitance spark whose energy and duration could be varied independently. At a distance of 6.5 m downstream from the dust inlet, the spark electrodes of pointed steel bars of 2-mm dia. were situated vertical to the flow. A very wide range of phenomena is involved in two-phase flow. With reference to the available data on velocity gradient between particles and gases, tip of the lower electrode was fixed at a height of one-third of the tube diameter from the bottom wall.

First in the preliminary ignition tests, the optimum spark duration and electrode gap width were determined at various dust concentrations and air velocities. The reverse effect of air velocity was found here both for the optimum spark duration and for the optimum spark gap width, since the reported data by other investigators suggest that optimum spark duration reduces and optimum gap width increases with increase in air velocity for gas or liquid spray fuels. The flow condition in the present test were different from that of the earlier studies. It will be also responsible for the effect that the relatively larger chemical time scale for the case of dust flames than gas flames is required.

---

\* 化学研究部 (Chemical Safety Research Division)

At a given velocity, measurements of minimum ignition energy versus dust concentrations were performed using predetermined optimum values of spark gap and spark duration.

The ignition energy decreased rapidly as the dust concentration increased, until it reached the minimum for all the dust. After that, at the lower air velocities the ignition energy increased fairly slowly, but at the higher air velocities it raised sharply with increasing dust concentrations. The optimum dust concentration, at which the minimum ignition energy was given, slightly shifted its value to a lower side with increasing air velocities. Increase in the air-flow velocity markedly elevated the minimum ignition energy of flowing dust-air mixtures in the tube. A more detailed investigation of the flow parameters having an influence on minimum ignition energy in flowing dust mixtures will be required to obtain a fuller understanding of the dust ignition processes in the flows.

From the relation between the ignition energy and the dust concentration, spark ignitability curves are drawn which separates the domain of concentrations and conveying air velocities that are spark-ignitable at an energy level from the domain that is not. Spark ignitability limits were narrowed by an increase in conveying air velocity. At an ignition energy level, the lower ignitability limit was almost not affected, but the upper one extremely shifted its value to a lower side with an increase in air speeds. Eventually they reached a critical extinction air velocity above which flame was no longer propagated at any dust concentrations at that given ignition energy for the dust-air flows in the tube. These ignitability curves validate the previously reported data, which have been obtained using a full-scale pneumatic transport system (7.5 or 10-cm in dia. and 86.6-m long pipes).

**Keywords** ; Dust explosion, Pneumatic transportation, Minimum ignition energy, 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状況は、産業界では集塵、空気輸送、流動乾燥など多くの工業プロセスに存在する。特に、最近粉体にした場合新しい付加価値が創造されることから微粉体あるいは超微粉体化への技術開発が盛んに行われており、粉体の改質や粉体表面処理技術などが急速に進展し、化学、電気、食品、製紙、製鉄業界など多くの素材メーカーで可燃性浮遊粉じんを扱うケースが多くなっているように見受けられる。しかも、これらの粉体の製造プロセスでは効率及び自動化の要求から、たとえ中短距離でもバルク (bulk) で連続処理される場合が一般的であり、粉じん流は多くの工業分野に散見できる重要な形態となりつつある。もとより、可燃性粉じんが空気中に浮遊分散して発火した場合、ガス爆発同様に、あるいはそれ以上の設備破壊及び労働災害を引き起こしていることは、多くの災害事例が示す通りである<sup>1,2)</sup>。そこで、このような工程における粉じん流の火災・爆発

危険性を解明することは安全工学上一つの重要な課題と思われる。

粉じんが流動している配管中のある箇所が発火が起これば、空気速度の存在により粉体処理システム全体へ爆発が伝ば拡大され、大きな事故をひき起こす危険性がある。しかし、管中に電気火花のような発火源(着火源)が存在したとしても管中の流速が速ければ粉じん粒子がそれらの発火源と接触する時間は短くなり、粒子の発火温度までに加熱されて発火に至る可能性は極めて小さく、實際上流速が大きい程発火は困難になるだろうと思われる。それ故、出来るだけ大きな流速でこれらのシステムを運転すれば、火災・爆発に至る発火を回避できるということになるだろう。しかし、どの程度まで空気速度を増せば発火を回避できるものか、あるいは空気速度を増すことによって確実に発火を防止できるものか(逆に、流速の増大によって火災・爆発が増長されることはないか)、などに関する粉じん爆発における十分な研究は見あたらないように思われる。

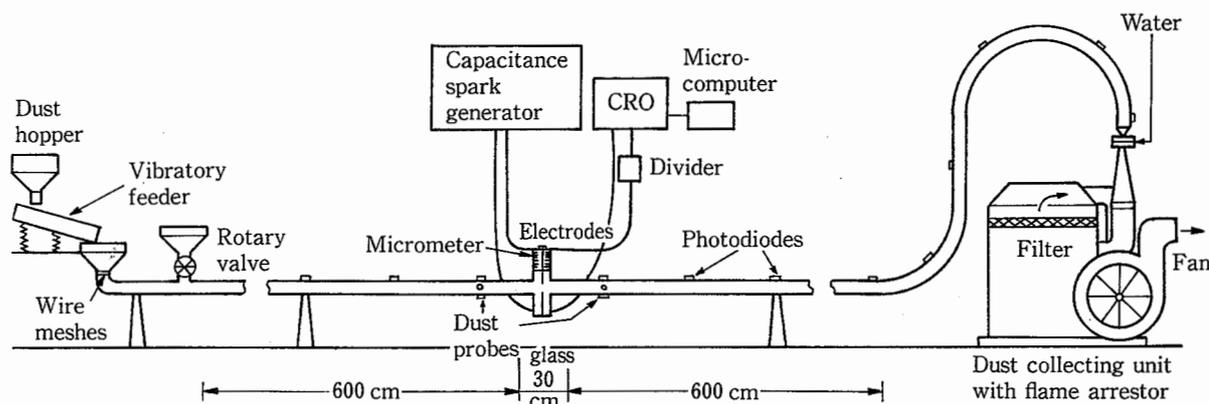


Fig. 1 Experimental layout.

実験装置配置図

一方、ガス爆発特性などから当然予想されるように、爆発特性は一般に燃料濃度依存性が非常に大きい。従って、均一な浮遊粉じん流を形成させることは差し当たって爆発特性などの基礎データを測定する上で非常に重要であり、逆に均一な粉じん濃度を達成することの困難性がガス爆発と較べた現段階での粉じん爆発の研究の立ち遅れの原因ともなっていることは多くの研究者が指摘している通りである<sup>3-5)</sup>。

ここでは、粉じん爆発におけるいわゆる消炎管径<sup>4)</sup>\*にも近い小管径の集じん配管中を10~35 m/sの空気速度で粉じんを流動されることによりほぼ均一な粉じん流を達成するとともに、その管中での最小発火エネルギー及び火炎伝ば速度を測定した。その結果、粉じん流の発火特性を明らかにするとともに発火を回避するための空気速度の存在について予測し、火炎伝ば危険性などを明確にすることができた。本報では、粉じん流の特性とコルク並びにABS-樹脂を含むいくつかの粉じんの最小発火エネルギーに及ぼす空気速度の影響及びそれに関連する限界空気速度などについて報告する。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

種々の濃度の粉じん流を配管中に形成させる目的で、真空式粉体空気輸送あるいは集塵配管を使用して発火・爆発実験を行った。実験装置の配管をFig. 1に示す。直径4.2(1½")または5.3 cm(2")の水平ガス管(水

\* 消炎距離に類似した自己火伝ば不可能な最大配管径。文献(4)では、ガスの場合 mm の領域であるのに対して粉じんでは cm の領域にある、と記述されているだけで正確な値は不明である。

平部13 m)から成る集塵配管中において、一端から電磁振動式粉体供給機(神鋼電機(株)製小形電磁フィーダ)により定量的に粉を供給し、他端の湿式集塵機まで流動させた。なお、上記の粉体供給機のみでは十分な高濃度粉じん流が達成できない場合は、更にもう一台の電磁フィーダを使用しロータリーバルブを通して粉体を追加供給するようにした。湿式集塵機はベンチュリスクラパーで、ファンの回転数をインバータで制御することにより配管内空気速度を変化させた。

配管一端の粉体供給口から約6.5 mの位置に容量火花発生電極を設置して配管中の粉じん流の発火源とした。電極部の配管は、粉じん流及び放電火花や電極状態、火炎の形成等が観察できるように長さ30 cmのガラス管で置き換えた。放電電極は先端を針状にした直径2.0 mmの鋼棒一対を流れに直角に対向させたもので、電極間隔はマイクロメータによって調節した。容量火花発生装置は、10 μsの単位で放電時間を変化できるもので、内蔵のコンデンサー容量並びに放電抵抗、充電電圧などを選択することにより、アーク放電火花エネルギーを変化させた。同装置は、Ballal *et al.*<sup>7-9)</sup>が用いた方式と同じもので別に報告した<sup>10,11)</sup>。発火に至る放電エネルギーすなわち発火エネルギーは放電波形上の電流、電圧波形の時間積分により求めた。

### 2.2 実験方法

管内圧力は下流に向うにつれて大気圧から次第に減圧され吸引ブロー(排気ファン)の位置で最低になる。平均空気速度10, 20, 30 m/sにおける電極部での大気圧との差圧は、2"配管においてそれぞれ38, 130, 350 mmH<sub>2</sub>Oであった。Fig. 2は平均空気速度と単位配管長さあたりの圧力損失の関係を示したものである。

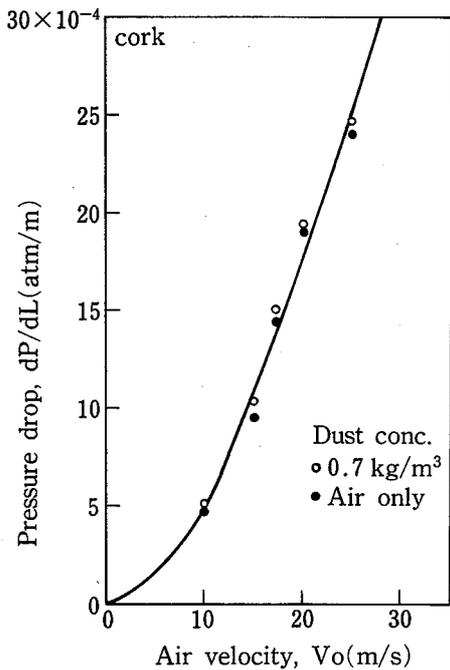


Fig. 2 Pressure drop along the 2" tube as function of air velocity.

2" 配管中での圧力損失と空気速度の関係

当然、輸送粉じん量によって圧力損失は増大するが、爆発範囲に該当する粉じん量は比較的少ない。上図に示したように、0.70 kg/m<sup>3</sup> のコルク濃度での圧力損失は空気流だけの場合のそれと大きな差がない。そこで、ここでの空気速度は、粉じんを流さない場合の平均速度で示し、平均空気速度は熱線風速計及びデジタルマノメーターで管内最大流速を測定して求めた。粉じん

濃度は時間あたりの粉体供給量と空気流量から算出した。

しかし、これは見かけの公称粉じん濃度を表わすにすぎない。粉じん粒子は管壁に衝突しながら空気エネルギーで搬送されるので、粒子速度と空気速度は異なり真の粉じん濃度は多少高いと思われる。なお、空気速度は 10~35 m/s の間で変化させた。上限はブローの能力による制限である。

ところで、固気二相流は現象が複雑で、管内での粒子と気流測定分布を一般的に求めることはまだかなり困難であり<sup>12)</sup>、複雑な流れの場のどの位置に電極間隙を設定すれば良いか判断しかねる。そこで、ここでは下部電極先端を最大半径方向で管壁から配管直径の 1/3 の高さに固定して上部電極のみをマイクロメーターで調節することにより、発火に最適な電極間隔を決定することにした。

一方、発火の有無は 0.5 m 間隔で管壁に設置したフォトダイオードによって検知した。なお、発火実験は同一条件で 10 回繰り返し、20% 以下の発火確率を限界データとして求めた。

2.3 粉じん試料

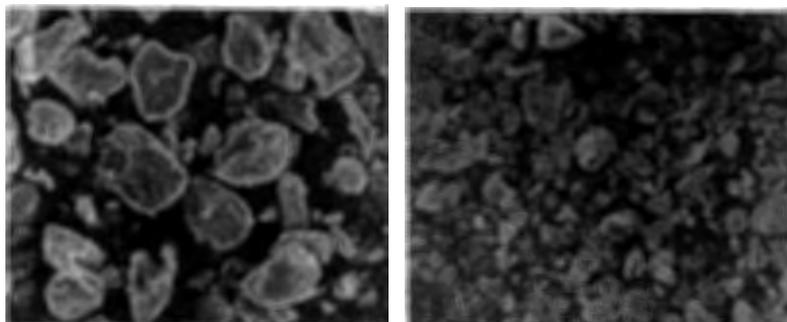
実験に使用した可燃性粉じんの主な特性を表 1 に示す。コルクおよび ABS-樹脂粉じんは優れた分散性、燃焼性の観点から最もよく使用した試料で、いずれも工業的品質のものである。粒度分布はふるい分け法、レーザー解析及び散乱法を併用して、種々の分布基準間

Table 1 Properties of the combustible dusts.

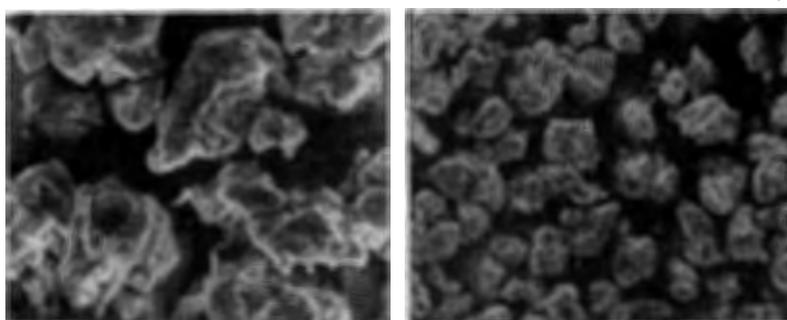
可燃性粉じんの物性

Types of dust	Cork	ABS-resin (I)	ABS-resin (II)	ABS-resin (III)	Polyethylene (I)	Polyethylene (II)	Cellulose acetate
Mean diameter (μm)							
mass-weighted d <sub>w</sub>	28	74	58	166	21	86	38
surface-area-weighted d <sub>s</sub>	14	29	28	95	14	60	21
Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	16,520	3,800	4,300	620	4,120	2,030	6,140
Specific area mean diameter (μm)	20	17	15	130	16	32	8
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.21	0.95	0.95	0.74	0.92	0.92	1.26
Heat of combustion (cal/g)	6,450	9,720	9,660	9,480	11,110	11,110	4,470
Moisture (wt. %)	5.5	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	3.4
Ultimate chemical analysis (%)							
C	58.6	85.0	85.4	84.8	85.4	85.4	47.6
H	7.2	8.8	8.6	7.9	14.1	14.1	5.5
N	1.1	4.5	4.6	6.0	0.1	0.0	0.1
O	31.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	41.7
Hydrogen-to-carbon ratio: H/C	1.47	1.24	1.21	1.12	1.98	1.98	1.39

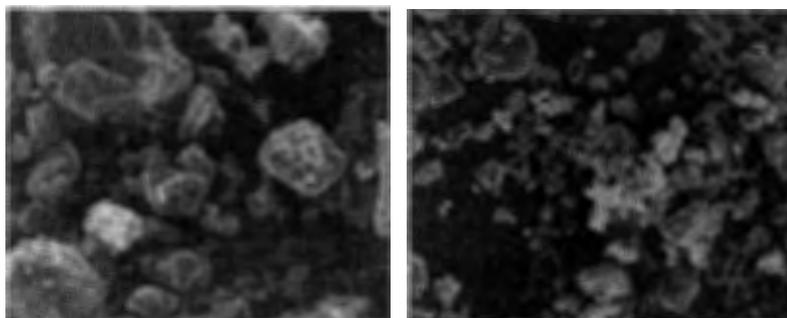
Cork



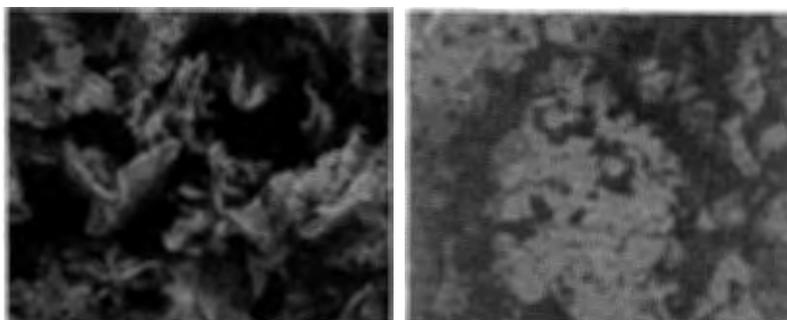
ABS-resin (II)



Polyethylene (I)



Cellulose acetate



0 150 $\mu$ m

0 60 $\mu$ m

Photo 1 Scanning electron microscope photographs of dust particles at two magnifications.

試料粉じんの走査電子顕微鏡写真 (2種類の倍率)

の解析に基づいて平均粒子径を重量分布での表面積平均径 ( $\bar{d}_s$ ) 及び重量平均径 ( $\bar{d}_w$ ) で表した。比表面積及び同平均粒子径は、島津粉体比表面積測定装置 (SS-100 形) で、密度はピクノメーターでそれぞれ数回測定して平均値で示した。更に、燃焼熱の測定は島津一熱研式自動ボンベ熱量計で、行った。元素分析は、JISM 8813<sup>13)</sup> に準じ外部の分析センターへ依頼した。コルク以外は熱分解によってほとんどガス化する物質で、酢酸セルローズ及びコルク以外は酸素をほとんど含まず、ポリエチレンの燃焼熱はここで一番大きい。ABS-樹脂は窒素を含むものの発熱量は大きい。

Photo. 1 は試料粉じん 4 種の走査型電子顕微鏡写真で、2 種類の倍率でそれぞれ示してある。コルクは薄片状で他は塊状に見え、コルクの著しく大きい比表面積と小さい密度が関連することが推測できる。なお、ABS-樹脂 (II) 及び酢酸セルローズは冷凍粉碎を行なって表記の平均粒径を持つ試料としたものであるが、粒径分布はかなり広いことが写真からわかる。

### 3. 粉じん流の特性

火災検知の目的で管壁に配列したフォトダイオードの一部は、発光ダイオードとともに一对の光透過型粉じん濃度計として利用した。管中での粉じんの輸送状態は、ガラス管部で観察した限りではかなり定常的で浮遊流に見えたが、これを上記の濃度計で調査した。電極近くの輸送管断面の最大半径縦方向と同横方向での光透過率を同時測定した例を Fig. 3, 4 に示す。Fig. 3 はコルク粉じんを供給し始めてからの様子を、Fig. 4 は平均、粒径が大きく比較的分散し難いポリエチレン (II) 粉じんの透過率変化をそれぞれ示す。これによると、時間的にも空間的にも定常的な粉じん流が達成されることが分かるが、管内断面での濃度分布は不明である。そこで同図に示したようなある断面における垂直並びに水平方向での光透過率の割合を種々の濃度および流速において測定したところ、Fig. 5, 6 のような結果が得られた。すなわち、Fig. 5 では比較的浮遊し易いコルク粉じんであるにもかかわらず、濃度が高く流速が遅いほど均一流から縮退した不均一流 (管底流) になることがわかる。これに対して、Fig. 6 ではポリエチレン (II) 粉じん濃度約  $0.8 \text{ kg/m}^3$  までに対しては透過率の割合が 100% で均一な粉じん流であることが推定される。なお、光透過型の濃度計では粉じん流の均一性を調べることは可能であるが絶対的な粉じん濃度を求めることはできないと言われている<sup>4)</sup>。そのため質量比

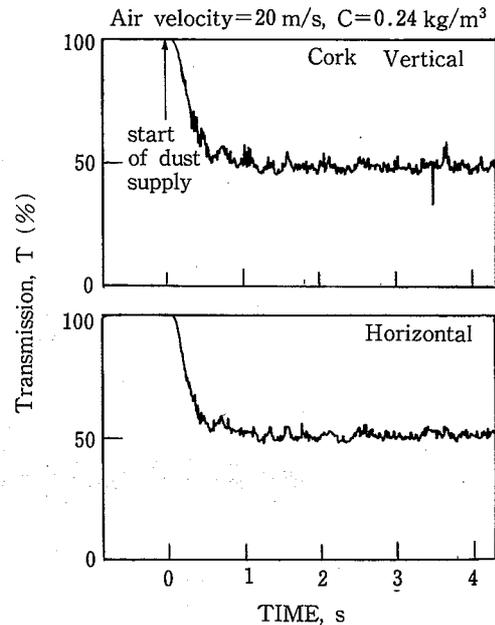


Fig. 3 Simultaneous transmission traces for optical dust probes at the vertical and horizontal directions in the center across the 2" tube.  
2" 配管垂直および水平中心断面での粉じん光透過率の同時測定例

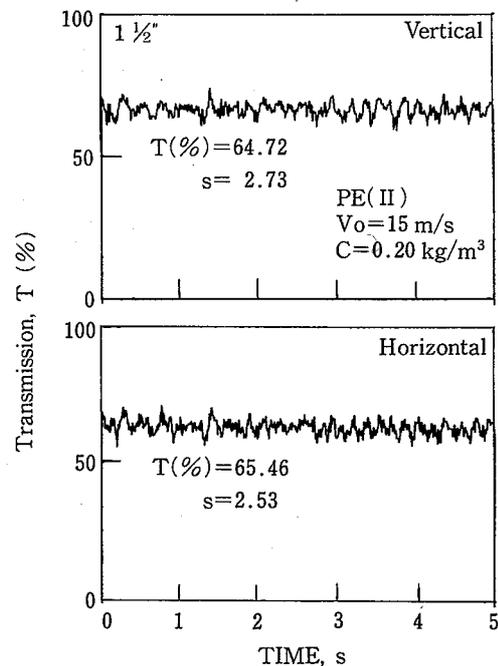


Fig. 4 Simultaneous optical transmission traces at the vertical and horizontal cross-section centers of the 1 1/2" tube for a polyethylene (II) dust flow.  
1 1/2" 配管垂直および水平中心断面でのポリエチレン (II) 粉じん流に対する光透過率同時記録例

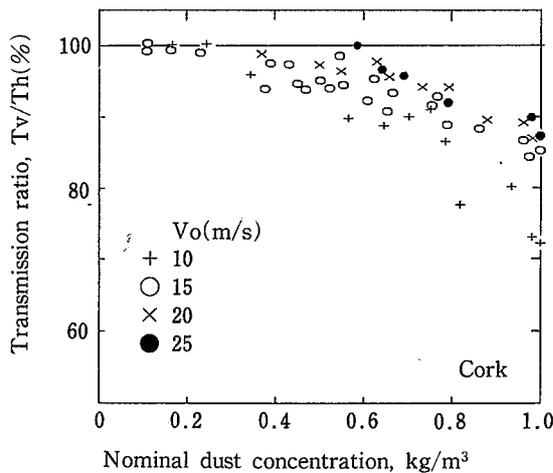


Fig. 5 The ratio of vertical direction transmission to horizontal one at a central cross-section of the 2" tube versus the nominal dust concentration of cork flow. 2" 配管断面の水平方向に対する垂直方向透過率の比とコルク流粉じん濃度の関係

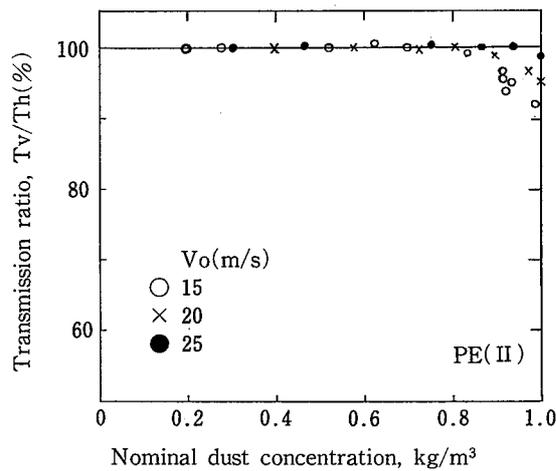


Fig. 6 The ratio of vertical direction transmission to horizontal one at a central cross-section of the 2" tube versus the nominal dust concentration of polyethylene (II) in the flow. 1 1/2" 配管断面の水平方向に対する垂直方向透過率の比と流れ中のポリエチレン(II)粉じん濃度の関係

例型の  $\beta$  線吸収動的濃度計が開発されているものの<sup>14)</sup>, ここでの公称粉じん濃度と光透過率の間には Bouguer-Beer-Lambert 則で表わされるよい相関性があった。ただし, 粉じん濃度が約  $0.8 \text{ kg/m}^3$  を越えると透過率はあまり変化せず, この濃度計の検出限界がこの辺の濃度にあることがわかった。Fig. 6 での透過率比の減少がこれらの濃度附近で起きるのは, これらの検出限界

によるものであらうと思われる。

以上の Fig. 5, 6 の結果から, 2" 配管に較べて 1 1/2" 配管中の方が均一流になることからこの管中での濃度分布を他の粉じんについても調査した。その結果, ここで使用した総ての粉じん試料で同一断面での垂直方向透過率と水平方向透過率が管軸でほぼ等しく,  $10 \sim 35 \text{ m/s}$  の空気速度範囲で少なくとも  $0.8 \text{ kg/m}^3$  までの濃度に対して十分な均一流になることが分った。また, 粉じん濃度と透過率との相関性から見ても 1 1/2" 配管中での実際の濃度は見かけ公称濃度にほぼ等しいものと判断される。そこで, 以下の実験では主に 1 1/2" 配管を好んで用いた。

#### 4. 最小発火エネルギー

##### 4.1 放電エネルギーに及ぼす流速の影響

絶縁破壊中 ( $< 10^{-4} \text{ ms}$ ) の正確な電流, 電圧は使用した測定装置の分解能からみて観測できず, この間の放電エネルギーは衝撃波などとして伝達され発火には関与しないものとして, 放電エネルギーを求めた。一方, 発火にはグロー放電よりもアーク放電の方が優れていることは良く知られているので, <sup>8, 15)</sup> 電流密度が  $50 \text{ A/cm}^2$  以下にならないように配慮しアーク放電が達成されるようにした。しかしながら, 放電々流レベルは流速の影響を受けないが, 電圧波形は大きく変化する場合がある。Fig. 7 はその一例を示したもので, 空気速度が増すにつれ火花放電経路が流れ方向へ流されて下流側へ張り出す結果尻上りに放電々圧は増大し, 結果的には放電エネルギーも増大する。その増加の例を, 2" 配管中での測定データとして Fig. 8 に示す。このような測定例は数多く報告されているが<sup>9, 16)</sup> 曲線の傾向は流れの場の特性によっても大きく異なる。それは, 放電エネルギーは火花放電経路長さに依存するからであらう。一方, 火花継続時間が短い場合 ( $50 \mu\text{s}$ ) には, 電極間隔が異なるが放電エネルギーは空気速度の影響を受けない場合もあることがわかる。これは実質上放電経路が短いばかりでなくある一定の遅れ時間後<sup>15)</sup> (すなわち, 電子-イオンなだれプロセスが開始後) でなければ下流側へ流されないこと, によるものと思われる。

以上, 粉じん流が存在しない管内流において, 放電時間が長いと火花放電エネルギーは流速を増すことによってすでに大きく増大する。

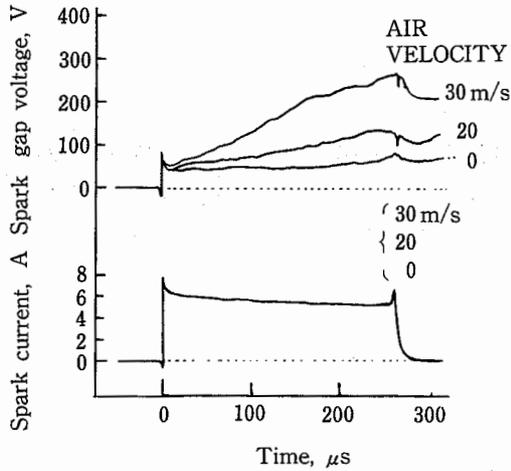


Fig. 7 Influence of air velocity on spark discharge voltage and current (Gap distance 3 mm, 1 1/2" tube).  
火花放電電圧および電流に及ぼす空気速度の影響(電極間隙 3 mm, 1 1/2" 配管)

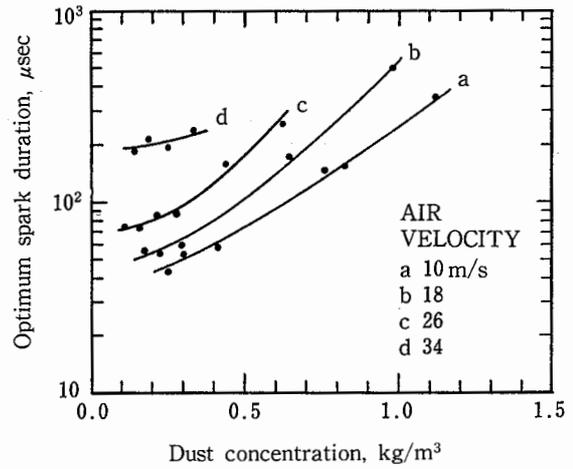


Fig. 9 Influence of flow velocity and dust concentration on optimum spark duration for cork in the 1 1/2" tube.  
1 1/2" 配管中コルクに対する最適放電時間に及ぼす流速と粉じん濃度の影響

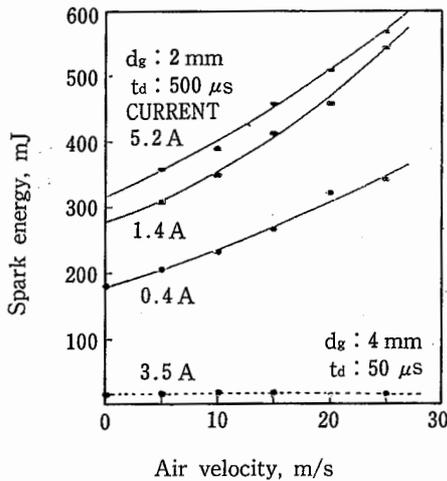


Fig. 8 Effect of air velocity on spark energy (dg : Gap distance, td : Spark duration).  
放電エネルギーに及ぼす空気速度の影響

#### 4.2 電極間隔と放電時間

最小発火エネルギーに及ぼす影響因子は非常に多い。しかも、粉じん雲の最小発火エネルギーの測定にはガスとは異なった多くの困難が指摘されており<sup>17)</sup>、相対的な値でしか測定できないとも言われている。その中で、これまでの多くの研究により特に火花放電時間と電極間隔は最も重要な影響因子であることが知られている<sup>7-9, 18)</sup>。そこで、種々の条件下で測定したデータを整理して、最小発火エネルギーが最低値を示す条件での、

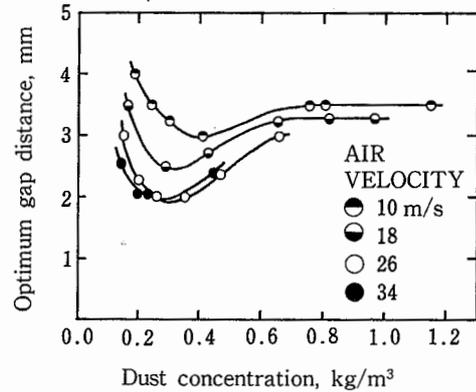


Fig. 10 Influence of air velocity and dust concentration on optimum gap distance for cork in the 1 1/2" tube.  
1 1/2" 配管コルクの最適電極間隔に及ぼす空気速度と粉じん濃度の影響

最適放電時間および最適電極間隔に及ぼす粉じん濃度並びに空気速度の影響を、コルク流について Fig. 9, 10 に示す。これによると、空気速度が大きくなる程最適放電時間は長くなり、更に最適電極間隔は流速が増すと減少し最小値 2 mm に漸近する。これらの傾向は、ガスや滴液の場合とまったく逆の結果をしめす<sup>7-9)</sup>。一方、最小発火エネルギーの限界値近くでは幅数ミリの細長くやや暗い火炎が電極下流側に形成されて、消炎又は爆発に至る場合が多く観測された。これは粉じん濃度が比較的高く、大きい放電エネルギーを与えた場

合に特に顕著にみられた。

以上の結果は、空気速度が大きい程強い乱れの粉じん流の中で粉じん粒子が発火するためには、比較的長時間にわたってエネルギーを付与しなければならないことを示している。Fig. 11 に異なる空気速度における、最適放電時間と最適電極間隔の関係から描いた最小火花面積を比較した。一般には、最小火花核に相当する容積が発火温度までに加熱されるのに必要なエネルギーが最小発火エネルギーに相当するものと考えられているが、ここでは便宜上二次元的な面積で示した。これによれば、電極間隔の差は余り大きくなく、空気速度が大きい程電極間隙後流の強い乱れによる冷却作用を受けるので、より長時間のエネルギー付与が必要になるのではないかと考えられる。放電時間が長ければ、火花核が形成された後のエネルギーは当然周囲へ伝達され、最小発火エネルギーは結果的に増大する。従って、乱れ構造や速度勾配が実験結果に大きく影響するものと思われるが、気流の乱れは粒子によって著しく抑制される場合もあるので<sup>12)</sup>、更に流体力学的な構造の詳細な検討が必要である。また、Ballal *et al.*<sup>7-9)</sup>の実験と異なって流れの場が均一でないことが逆の空気速度の影響を与えている一因と思われるが、そればかりでは説明がしにくいところから、粉じん粒子の発火に関連する化学的特性時間がガスや液滴に較べて決定的に長いことにも原因があると考えられる。

なお、最小発火エネルギー  $E$  は雰囲気気圧力  $P$  と、 $E \propto P^{-n}$  の関係にあり、燃料液滴に対して  $n=1.3$  が報告されている<sup>9)</sup>。ここでの電極近傍での最低雰囲気気圧力は約 0.95 atm であり、粉じんに対する  $n$  の値は不明であるが  $n=1.3$  としても、この圧力による最小発火エネルギー

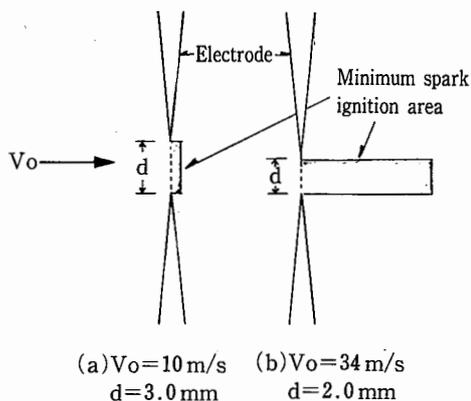


Fig. 11 Comparison of minimum spark ignition areas at low and high air velocities.  
高・低空気速度における最小火花発火面積の比較

の最大誤差は 6.5% である。従って、真空式輸送管を使用したことによる測定データへの圧力の影響は、ここでは小さいと考えられる。 $n$  の値は流れの存在により急激に小さくなることも報告されている<sup>9)</sup>。

### 4.3 最小発火エネルギー・データ

このようにして測定したコルク粉じんの 2" び 1 1/2" 配管中における最小発火エネルギーと粉じん濃度との関係をそれぞれ Fig. 12 および Fig. 13 に示す。一定の空気速度では、いずれも粉じん濃度が増すにつれて最小発火エネルギーは急激に低下してその極小値に達する。更に濃度を増すと、空気速度が大きい程急激に最小発火エネルギーは上昇する。空気速度が小さい場合には、その上昇はかなり緩慢で、しかも 1 1/2" 配管中の方だ低いエネルギー値を示す。管径による測定値の差の原因は、まず第一に 2" 配管中での粉じん濃度の不均一性にあることはデータから明らかだろう。すなわち、流速 10 m/s の場合、最小発火エネルギーの極小値を示す濃度は 2" 配管の方が低濃度側にあり、その後の濃度増加によって最小発火エネルギーはより急激に高くなる。これに対して極小値よりも低い濃度側では管径による大きな差は見られない。これらの例からわかるように、空気速度が低く濃度が高い程、管径による

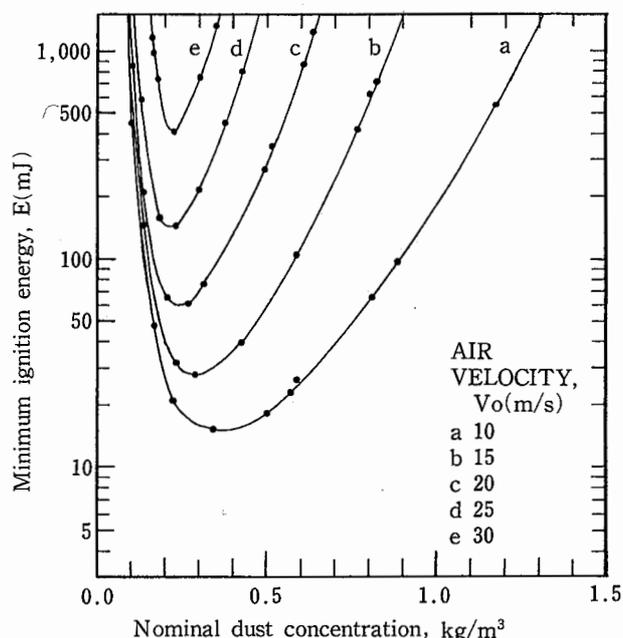


Fig. 12 Minimum ignition energy data for cork at various air velocities in the 2" tube.  
2" 配管中の種々の空気速度におけるコルクの最小発火エネルギーデータ

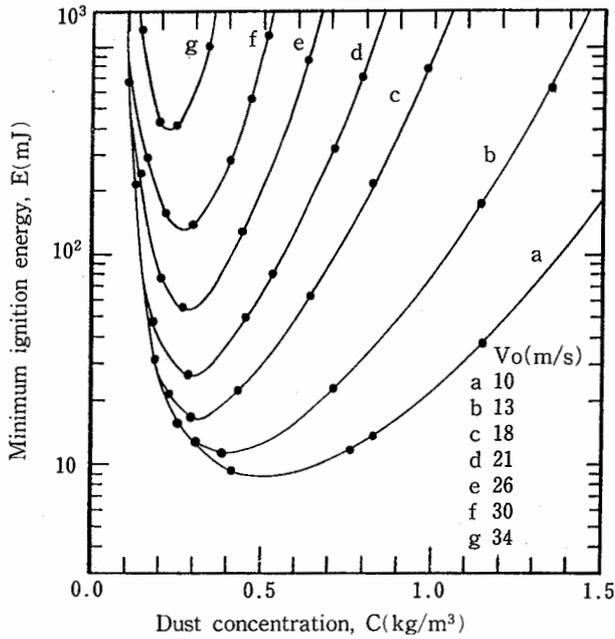


Fig. 13 Minimum ignition energy data for cork at various air velocities in the 2" tube.  
 1½" 配管中の種々の空気速度におけるコルクの最小発火エネルギーデータ

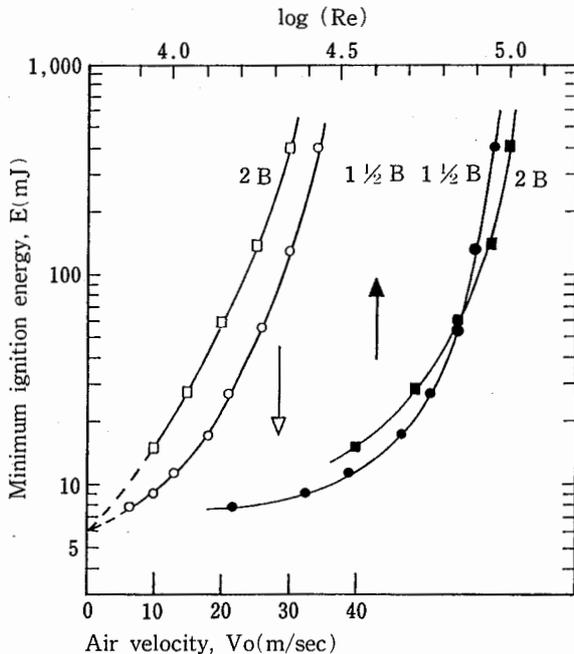


Fig. 14 Influence of air velocity and Reynolds number on minimum ignition energy for cork dust in the 1½" tubes.  
 1½" 及び 2" 配管中におけるコルク粉じんの最小発火エネルギーに及ぼす空気速度とレイノルズ数の影響

差が大きくなる。

Fig. 14 は、コルク粉じんの最小発火エネルギー極小値を空気速度及びレイノルズ数に対してプロットしたものである。同一空気速度であればわずかな管径の差によっても最小発火エネルギーは大きく異なるが、同じデータを気体のレイノルズ数に対してプロットすれば、管径が異なってもレイノルズ数が同じであれば最小発火エネルギーは変わらない場合があることを示している。それ故、すでに述べたように流れの場合は測定していないが、管径による最小発火エネルギーの差はこれらの乱れ特性にも依存しているものと考えられる。

1½" 配管中で測定した最小発火エネルギーと粉じん濃度の関係を、コルク以外の粉じん試料に対して Fig. 15 にまとめて示す。一部の例外を除いて、コルク粉でんの場合とは異なって最小発火エネルギーの極小値を中心とした対称的な曲線が多くみられ、発火可能な濃度範囲はいずれもかなり狭い。Fig. 16 は、これらの極小値と空気速度の関係を総括表示したもので、最小発火エネルギーは空気速度の増大によって著しく上昇する傾向がある。一方、Fig. 17 は空気速度 25 m/s における最小発火エネルギーと粉じん濃度の関係を種々の粉じんについて再プロットして比較したもので、ABS-樹脂 (II) 粉じんに対する曲線が最も低い極小値と広い濃度範囲に対応する。最小発火エネルギーの極小値を示す濃度は、およそ 0.25~0.30 kg/m³ にあり、極小値はかなり異なるものの曲線の傾向は互いに類似している。なおこれらの極小値を示す粉じん濃度が空気速度が大きくなる程、低濃度側へ移行する原因としては、空気速度と粒子速度の差異による見かけ粉じん濃度の表し方にも一因があると思われる。空気速度が十分高ければ、空気速度と粒子速度の割合は一定値に漸近する<sup>12)</sup>。これに対応して、最小発火エネルギーの極小値を示す濃度も低濃度側の一定値に収れんする傾向が見られる。

### 5. 火花発火限界

前節で述べた、種々の空気速度における最小発火エネルギーと粉じん濃度の関係から、一定の発火エネルギーにおいて火花発火可能な濃度範囲がある空気速度において規定される。Fig. 18 は、Fig. 12 から求まる種々の発火エネルギーにおける 2" 配管中でのコルク粉じんの火花発火限界 (または領域) を示す。各曲線の下側がある火花発火エネルギーで発火可能な領域で、上側はその発火エネルギーでは火花発火不可能な領域を示

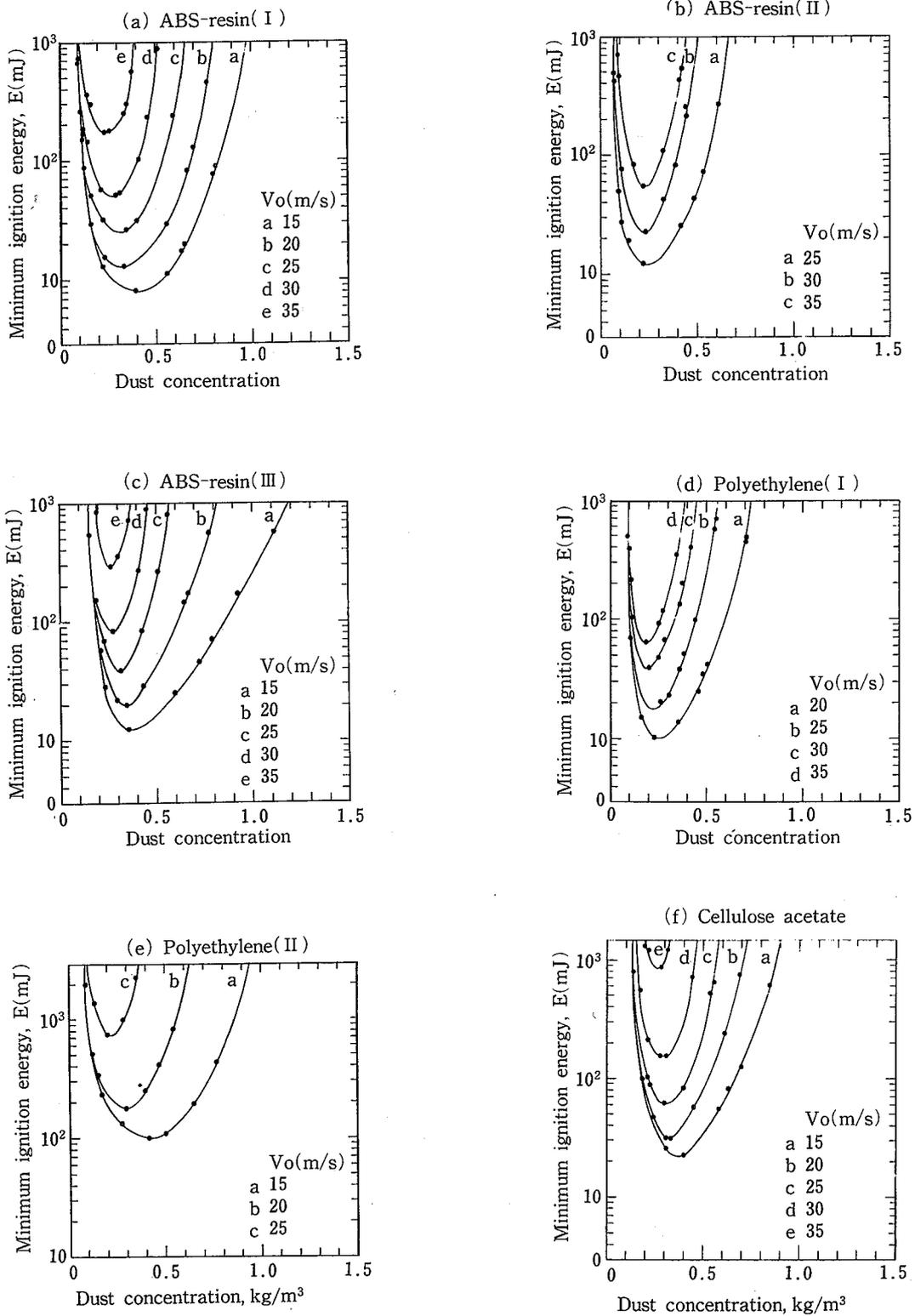
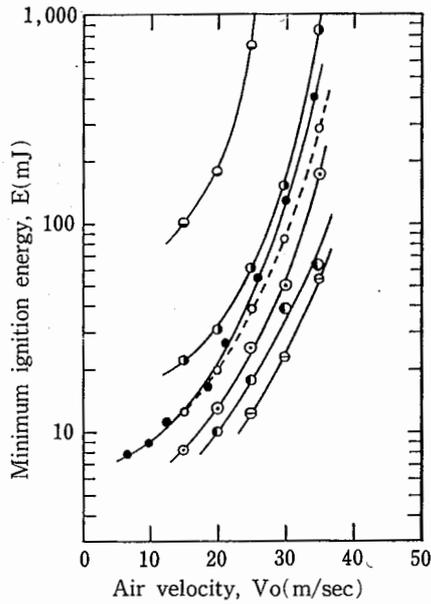


Fig.15 Minimum ignition energy data for six types of dust.  
6種粉じんの最小発火エネルギーデータ



- symbol    dusts
- Polyethylene (II)    ⊙ ABS-resin (I)
  - ⊙ Cellulose acetate    ● Polyethylene (I)
  - Cork    ⊙ ABS-resin (II)
  - ABS-resin (III)

Fig. 16 Influence of air velocity on minimum ignition energies for different dusts in the 1 1/2" tube.  
1 1/2" 配管中における種々の粉じんの最小発火エネルギーに及ぼす空気速度の影響

す。これによると、集じん空気速度が小さい場合は発火下限界（濃度限界）はほとんどその影響を受けないが、上限界は空気速度が増すと急激に低濃度側へ移行して究極的にはある発火エネルギー値において上・下限界が一致する空気速度が存在する。

2" 配管中での粉じん流は高濃度になると不均一流になるので、発火限界は見かけの粉じん濃度でしか示し得ない。Fig. 19 および 20 に、見かけ粉じん濃度が実際の濃度に等しいとした場合の 1 1/2" 配管中でのコルクおよび ABS-樹脂粉じんの同様の火花発火限界曲線を示す。Fig. 19 のコルク粉じんでは空気速度が低い程上限界が高濃度側に大きく広がるが、ABS-樹脂 (I) (Fig. 20) の上限界の拡がりはかなり小さい。しかし、いずれも発火エネルギーに依存する限界空気速度が存在する。この関係を各グラフから読み取りプロットすると、Fig. 21 のようになる。すなわち、十分大きい発火エネルギーにおいて限界空気速度は一定値に漸近するようになる。ちなみに、1 1/2" 配管中での ABS-樹脂 (I) 粉のそれは約 42 m/s である。

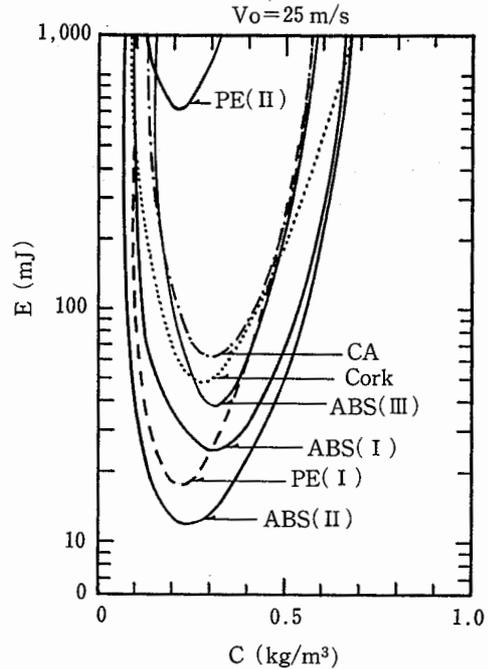


Fig. 17 Graphs replotted to illustrate the effect of dust concentration on ignition energy requirements for the seven dusts at the air speed of 25m/s in the 1 1/2" tube.  
空気速度 25 m/s における 7 種粉じんの発火エネルギーに及ぼす粉じん濃度の影響を比較するために再プロットしたグラフ

安全上は火花発火限界よりも、発火エネルギーに依存しない爆発限界がより重要である。上記と同様に、発火エネルギーと発火上限界の関係を求めると、上限界を表す曲線は大きいエネルギーでほとんど平坦になる。同じ外挿により発火エネルギー 100 J に対応する上限界を取り、Fig. 18 および Fig. 20 において曲線 (h) でそれらを示した。これらは上記の外挿からその管中での爆発上限界と実際上みなすことができるように思われる。なお、最適放電時間および同電極間隔を考慮して 10 J の火花エネルギーを与えることは実験的に困難であったので、ネオントランス (9000 V, 20 mA) による着火を試みた。その結果を Fig. 18 中に点線 (g) で示した。この場合には、流速が増すと着火能は急激に低下するようである。

なお、上記の空気速度と粉じん濃度で規範される発火限界曲線の傾向あるいは限界空気速度が存在することは、直径 3" または 4", 長さ 86.6 m の配管中における電気火花着火による爆発実験の結果<sup>19)</sup>、並びに Essenhig *et al.* のガス炎による着火実験結果<sup>20)</sup>と一致する。

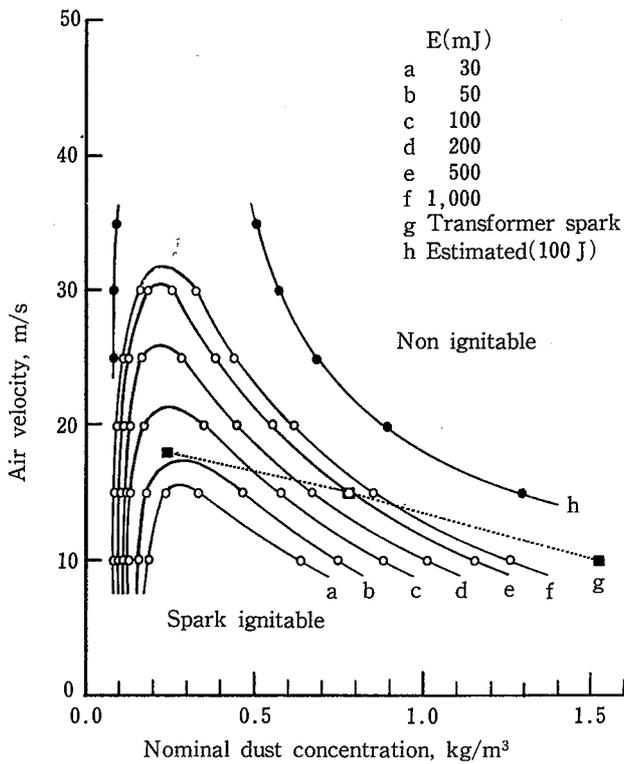


Fig.18 Domains of spark ignitability for cork in the 2" tube at various spark ignition energies.  
 種々の火花発火エネルギーにおける2"配管中流動コルクの各流速での火花発火限界

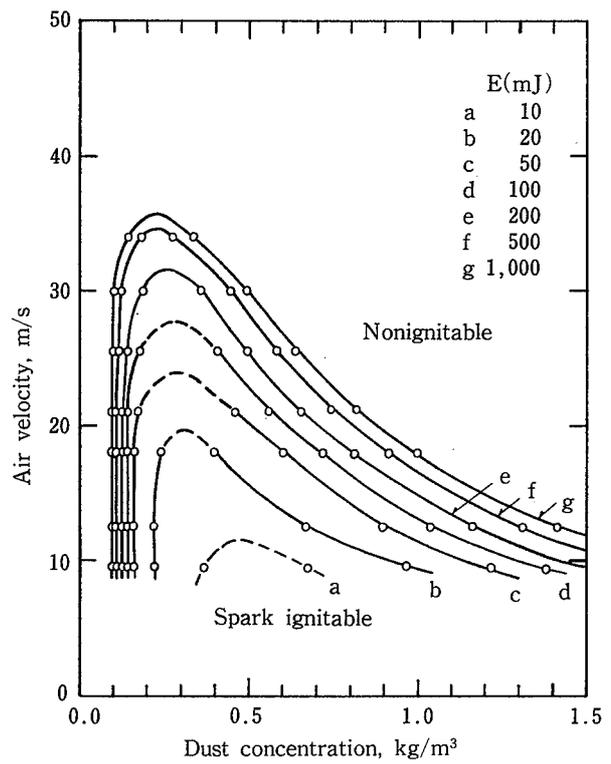


Fig.19 Domains of spark ignitability for cork in the 1 1/2" tube at various spark ignition energies.  
 種々の火花発火エネルギーにおける1 1/2"配管中流動コルクの各流速での火花発火限界

### 6. 結 語

(1) 出来るだけ均一な粉じん濃度を達成するため、2"及び1 1/2"水平ガス細管中で10~35 m/sの集じん空気速度で可燃性粉じんを流動させたところ、2"配管ではやや不均一であったが、1 1/2"配管中ではほぼ均一な粉じん流を達成することができた。

(2) これらの管中での粉じん流の最小発火エネルギーに及ぼす10~35 m/s間の平均空気速度の影響を検討したところ、表1に示す可燃性粉じんの最小発火エネルギーはいずれも空気速度を増すことにより著しく増大し、その値は数mJから1Jまでの間にある。その増加傾向は、ガスや液滴に対する影響よりもはるかに大きい。その理由は、流れの場の乱れ構造などに関係すると思われるので今後粉じん流の乱れ構造とあわせて詳細な発火機構の研究が必要である。

(3) 最小発火エネルギーの極小値を示す粉じん濃度は、空気速度が増すと低濃度側へ移行する。空気速度10~35 m/sにおけるそれらの粉じん濃度は約0.2~0.

5 kg/m³の範囲にあり、その極小値を中心として濃度を増減させるといずれも最小発火エネルギーは急増するが、流速が小さいと濃度を増加させても最小発火エネルギーの増加は緩慢になる傾向がある。

(4) 火花発火における最適放電時間および最適電極間隔に及ぼす空気速度の影響も、従来のガスや液滴の場合と異なった傾向を示した。配管断面での速度勾配や粉じん流の乱れ構造、あるいは粉じんの発火に関連する化学的特性時間が比較的長いことに起因すると考えられる。

(5) 最小発火エネルギーの測定データから、火花発火限界に及ぼす空気速度の影響がわかる。すなわち、管中の空気速度を増すと最小発火エネルギーが大きくなるばかりでなく、ある発火エネルギーで発火可能な濃度範囲も狭くなり、究極的にはどのような粉じん濃度においても発火不可能な限界空気速度に達する。同様のことは爆発範囲についてもあてはまり、爆発範囲が消滅する限界空気速度が存在すると推定される。

(昭和61年9月17日受理)

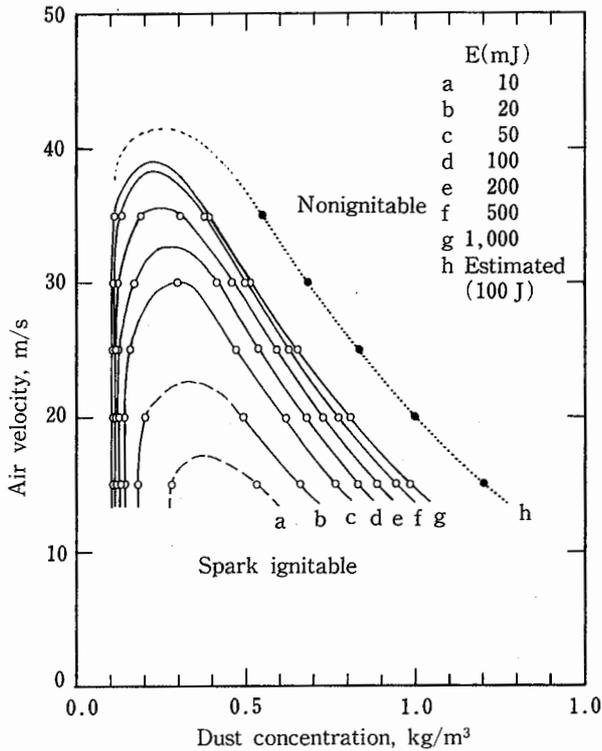


Fig.20 Domains of spark ignitability for ABS-resin (I) in the 1 1/2" tube at various spark ignition energies. 種々の火花発火エネルギーにおける、1 1/2" 配管中流動ABS樹脂 (I) の各流速での火花発火限界

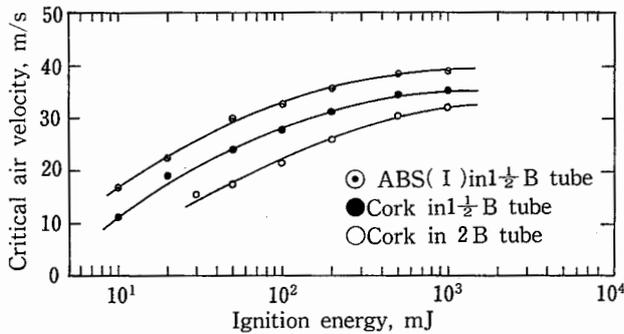


Fig.21 Dependence of critical air velocity on spark ignition energy for ABS-resin (I) and cork dusts. ABS樹脂 (I) とコルク粉じんに対する限界空気速度の火花発火エネルギー

参考文献

1) 内藤道夫, 松田東栄: 粉じん爆発の危険性とその防止対策, 産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-69-1, 産業安全研究所 (1969)

2) 最近の災害事例については, 例えば; 松田東栄: 粉体プロセスにおける粉じん爆発・火災の危険性とその対策, 粉体と工業, 6, p.27 (1986)

3) 石浜渉, 榎本兵治: 粉じん雲の爆発特性実験研究方法の変遷, 安全工学 14 (4), p.195 (1975)

4) M.Hertzberg, K.L.Cashdollar & J.J.Opferman: The flammability of coal dust-air mixtures, lean limits, flame temperatures, ignition energies, and particle size effects. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8360, pp.1~70 (1979)

5) S.E.Slezak, D.J.Fitch, H.Krier & R.O. Buckius: Coal dust flame propagation in a laboratory flammability tube. Comb. and Flame 54, p.103 (1983)

6) W.Bartknecht: Explosionen - Ablauf und Schutzmassnahmen. p.69, Springer-Verlag. Berlin (1978)

7) D.R. Ballal & A.H. Lefebvre: The influence of flow parameters on minimum ignition energy and quenching distance. 15th Symposium (International) on Combustion, p.1473, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1974)

8) D.R. Ballal & A.H. Lefebvre: The influence of spark discharge characteristics on minimum ignition energy in flowing gases. Comb. & Flame, 24, p.99 (1975)

9) D.R. Ballal & A.H. Lefebvre: Ignition and flame quenching of flowing heterogeneous fuel-air mixtures. Comb and Flame 35, p.155 (1979)

10) T.Matsuda & M.Naito: Effect of a spark discharge duration on ignition energy for dust-air suspension. Particulate systems - Technology and fundamentals. (J.K. Bedow ed.), p.189, Hemisphere, Washington (1983)

11) 松田東栄, 内藤道夫: 木粉類ダスト層の最小発火エネルギーの検討, 産業安全研究所特別研究報告 SRR-82-1, 木工機械作業の総合的安全化に関する特別研究. p.132, 労働省産業安全研究所 (1982)

12) 辻 裕: 空気輸送の基礎. p.68, 養賢堂 (1984)

13) JIS M 8813 (1976): 石炭類及びコークス類の元素分析法, 日本規格協会 (1984)

14) S.E. Slezak & R.O. Buckius: Dust concentration measurement probe using beta attenu-

- ation. Rev. Sci. Instrum. 54 (5), p.618 (1983)
- 15) M.Kono, K.Hatori & K.Iinuma : Investigation on ignition ability of composite sparks in flowing mixtures. 20 th Symp. (*International*) on Combustion, p.133, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1984)
  - 16) C.C. Swett : Spark ignition of flowing gases. NACA Report, No.1287 (1956) ; C.C.Swett : Spark ignition of flowing gases using long-duration discharges. Third Symp. on Comb. Flame and Explosion Phenomena, p.523, Williams & Wilkins (1949)
  - 17) M.Hertzberg, R.S. Conti & K.L. Cashdollar : Electrical ignition energies and thermal autoignition temperatures for evaluating explosion hazards of dusts. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8988, pp.1~41 (1985)
  - 18) 石浜渉, 榎本兵治, 駒井武, 梅津実, 東猛, 荷福正治 : 粉じん雲の着火エネルギーに関する研究—実験の方法と火花放電持続時間の影響 I—, 安全工学 21 (5), p.273 (1982)
  - 19) 松田東栄, 内藤道夫, 豊永克弘, 野島康広, 小林誠, 清水民生 : 粉体空気輸送配管中における爆発危険性, 安全工学 22 (3), p.155 (1983)
  - 20) R.H. Essenhigh & M.G. Perry, Proceedings of Conf. on Science in the Use of Coal. p.D 1, Inst. Fuel, London, (1958)