

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-87, 1987
UDC 621.928.93 : 621.60.4 : 614.838

サイクロン中における粉じん爆発の危険性*

松田 東栄**, 林 年宏**

Dust Explosions in a Cyclone System

by Toei MATSUDA** and Toshihiro HAYASHI**

Abstract ; Dust explosions in industrial plant can occur in various process units, such as hoppers, dust collectors and ducting. Cyclones are the most widely used industrial dust collectors for separating dust and air from solid-gas streams. Some engineers recognize that dust explosions might be avoided in a cyclone, which is employed usually for the collection of coarse particles with spiral flows. Larger vortex in a cyclone, however, will be expected to increase a burning rate of dust suspensions. To assess the dust explosion hazards, some experiments were carried out in an industrial scale cyclone system.

The cyclone plant consisted of several units, as shown in Fig. 1, and the explosion pressures were released through the vents on the quenching box connected to an outlet ducting from the cyclone. The cyclone vessel, of volume 0.32 m³, was constructed to withstand much higher explosion pressures than those anticipated, and was situated on a dust settling chamber of volume 0.15m³. The air velocity was measured in the inlet duct to the cyclone, and dust concentration was given from the amounts of the air flow and the dust supplied. The ignition source was a small amount of Al and Mg powders mixed with barium nitrate and barium peroxide. ABS-resin dust and ethylene-vinylacetate-copolymer (EVA) were used as fuel, which were of industrial grade with average diameters of 183 μm and 42 μm, respectively (Fig. 3).

The first series of tests were to measure explosion pressures in non-vortex dust suspensions in the cyclone without driving an exhaust fan. For the static tests, dust was dispersed through two perforated tubes by the aid of high pressure air (Fig. 2). The maximum value of the explosion pressures was 145 kPa, obtained with variations of dust quantities up to 300 g (Fig. 8). Comparison was then made between the pressures in dust explosions and in methane-air explosions in the cyclone without turbulent flows. For the static gaseous mixtures, a maximum pressure of 202 kPa was observed in the cyclone when explosions were vented into the duct system with two venting doors on the quenching box (Fig. 14).

Further tests were carried out while the fan was working. The flowing dust-air mixtures were ignited at position X1 in Fig. 1 and the explosion flames were propagated into the cyclone vessel. Variations of explosion pressures in the cyclone with dust concentration are shown in Figs. 17 and 18, at air velocities of 5.2, 8.3 and 13.4 m/s. An increase in the air velocity made slightly higher the explosion pressures for two kinds of dust tested (Fig. 19), yet the maximum

* この研究の一部は第20回安全工学研究発表会 (1987, 東京) において発表した。

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division

pressures attained were lower than those observed under the non-flow conditions. On the other hand, the data obtained from time measurements between ion-gaps showed that the apparent flame speed in the cyclone remained in some 10 m/s (Fig. 22). The flame detectors showed that explosion flames were seen both in the inlet and outlet ducts, and fire balls were often formed outside near the mouth of the dust feeding duct. On these observations, any data have not been given for the effect of vortex formation on the explosion to be much serious in the cyclone.

A working cyclone causes vortex flow, in which dust is concentrated close to the wall. These turbulence and concentration gradient show the conflicting effects on dust explosion hazards by each other. Palmer (Refs.4 and 5) cited only a fraction of the volume of the cyclone being filled with an explosible dust suspension for a probable explanation of the low pressures in their closed cyclone plant. For the cyclone in the present work, it seemed that the reduction of explosion pressures would be explained as the results of effective explosion venting and compulsive suction of the explosion flame towards the fan. Unless appropriate vents were provided with, explosion flame could be markedly intensified by the action of the fan.

Keywords ; Dust Explosion, Explosion Venting, Cyclone Separator

1. 緒言

集じん技術は、およそ「粉粒体」を扱う工程では不可欠なものであり、粉体製品の回収・除去などばかりではなく、周知のように労働衛生や環境改善の点でも重要な技術である。集じん条件や集じん物質などに対応して、種々の集じん装置が産業界では利用されているが、可燃性粉じんを扱う場合には粉じん爆発の危険性を考慮する必要がある。集じん工程はその大部分が最終プロセスであり、とりわけ微粉が捕集されることが多く、また着火源となりうるものが装置内へ吸引されやすいほか、集じん装置内での浮遊粉じんの濃度の制御が事実上困難であることなどが、危険性の理由である。

各種の集じん装置のうちサイクロン方式のものは、遠心力と重力を利用した単純な構造の集じん・分離装置であり、産業界では数多く設置されている。このサイクロン型集じん装置は、比較的粒径の大きい粉粒体の捕集・分離に適していることや、渦流による粉じん濃度の偏りが大きいことから、その中では爆発は起き難いものと一部の人間には思われているようである。しかし、サイクロン中での出火件数は非常に多く¹⁾、その危険性は無視できない。一方、これまで数多く行われてきたガス爆発に関する研究では、実大規模の装置における渦流あるいは乱れの影響は特に顕著であり、より激しい爆発をひき起こすことがわかっている²⁾。サイクロンはその機構上大きな渦流が形成されるので、

その中で粉じんが発火した場合に激しい爆発に至るとも考えられ、最近、これを示唆する爆発災害も発生している³⁾。

サイクロン中での爆発の危険性については、これまで Palmer⁴⁾⁻⁵⁾ による研究報告があるが、これらは爆発放散口の設置を目的として、循環方式の閉囲系サイクロンを用いて実験を行ったものであり、実際の運転方式におけるサイクロン中での粉じん爆発の挙動を知るには十分ではない。また、Eckhoff⁶⁾ はサイクロン中での渦流が粉じん爆発に及ぼす影響が小さくないことを指摘したが、その程度を示すデータはまだ見当たらない。

このように、渦流や粉じん濃度の偏り、あるいは排気ファンの存在などがサイクロン中での爆発にどのように影響するかについて不明の点が少ない。そこで、こうした爆発の危険性を検討するため、実大規模のサイクロンを用いて粉じん爆発の実験を行ったので、その結果を報告する。

実験は主として、実際の運転状態に近いサイクロン系で行った（以下、ファンを駆動させた場合という）が、そのほかに、排気ファンを停止させ、加圧空気を用いてサイクロン容器（本体）中に粉じんを分散させた場合（以下、分散法という）、及び、比較実験として、サイクロン容器中のメタン—空気静止混合ガスの爆発についても実験した。

2. 実験

2.1 実験装置

ファンを駆動させた場合の実験に用いた装置は、粉体供給機、サイクロン容器、消炎容器、排気ファン(最大風量 $30 \text{ m}^3/\text{min}$, 静圧 300 mm 水柱)及び配管より成り、その配列を Fig. 1 に示す。粉体供給機と接続配管は建屋二階に設置し、他は一階床に設置した。粉体は電磁振動式供給機により定量供給し、呼び径 3 又は 4 インチ、長さ 7.5 m の水平配管中を流送後、サイクロン入口接続配管(呼び径 6 インチ、長さ 3.6 m)を経てサイクロン容器内に入る。サイクロン容器は耐圧構造で、入口面積は 360 cm^2 、上部円筒の内径は 60 cm 、容積は約 0.32 m^3 であり、下部の円筒形集じん容器の容積は約 0.15 m^3 である。出口側配管は呼び径 8 インチ、長さ 3.0 m であって、Fig. 1 に示すような逆 U 字形である。

消炎容器は、サイクロン容器内で生じた爆発火炎が直接に排気ファンに吸引される危険性を避けるために

設けた一辺の長さ 0.9 m の立方体(厚さ 3.2 mm の鋼板製)で、出口側配管内に設置した 2 個の水噴霧ノズルからの水膜による消炎を行うための空間を与えるとともに、フィルターによる水切りを行えるようにした。また、消炎容器の耐圧を考慮して、爆発圧力放散口として蝶番付爆発扉(厚さ 3.2 mm 鋼板製)を、側面(Fig. 1 の V1, 面積 0.3 m^2)及び上面(同 V2, 面積 0.1 m^2)の 2 箇所に設けた。サイクロン内への空気流入量(気流速度)は、ファンの回転数をインバータ制御により変えること、又は水平配管の径を変えることにより調整した。

加圧空気により粉じんを分散させて着火する実験(分散法)では、サイクロン容器頂部に Fig. 2 に示す分散装置を取り付けた。空気溜めには圧力 980 kPa の空気が充填されており、試料粉じん容器との間の電磁弁を開くことによって、穴のあいたパイプ(分散パイプ)を経て粉じんがサイクロン容器内へ分散される。分散装置は 2 系統あり、空気溜めの容積は 3.5 及び 1.8 l であり、これらに接続される分散パイプ(内径約 28 mm)

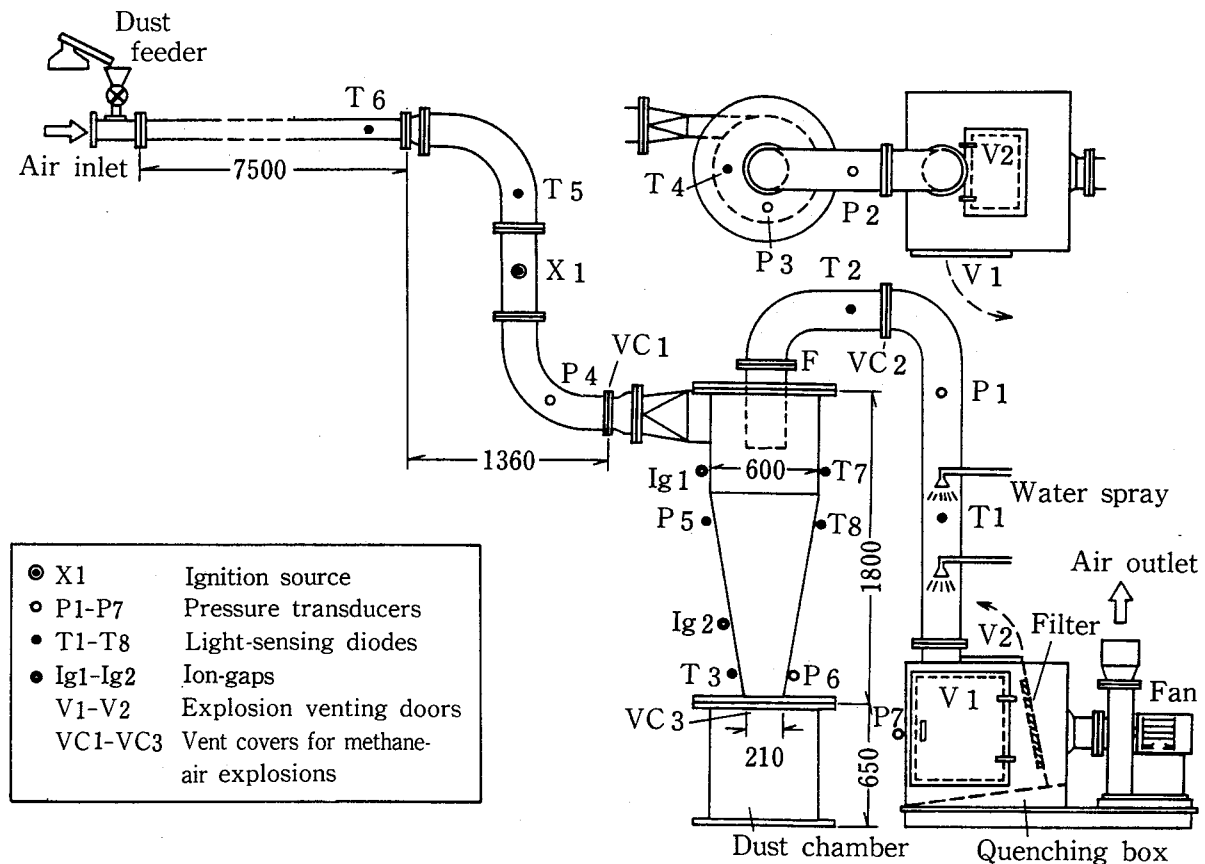


Fig. 1 Scheme of the experimental cyclone plant.
実験に用いたサイクロン集じん装置

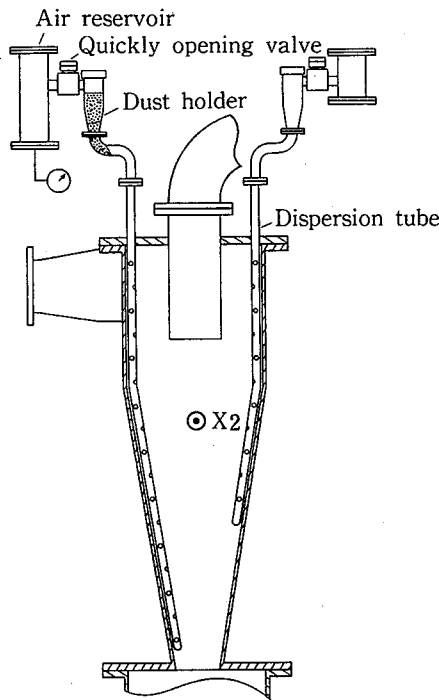


Fig. 2 Scheme of the dust dispersion system.
粉じん分散装置

の長さはそれぞれ 1.7 及び 1.2 m, 粉じん分散用の穴の数はそれぞれ 150 及び 100, 穴の直径はいずれも 6 mm であって, 2 本の分散パイプはサイクロン容器の中心軸に関して対称の位置に取り付けた。粉じん試料容器(内径 70, 高さ 250 mm), 電磁弁(呼び径 1 インチ, 弁径 27 mm) 及び管継手類(呼び径 1 インチ) の寸法・仕様は同じであるが, 試料容器に充填する粉じんの量(重量)は, 空気溜めの容積の比に合わせて 2:1 となるようにした。以下に示す粉じん量は両方の試料容器に充填した合計量である。

分散法による実験は密閉状態においても行ったが, この場合には, サイクロン容器の入口及び出口側の配管を取り外したあと (Fig. 1 の VC 1 及び F の位置を) 盲フランジでふさいだ。なお, ファンを駆動した場合と同じ装置構成を, サイクロン容器を密閉した場合に對比して「開放系」ということがある。

メタンの爆発実験は, 粉じん分散装置を取り除いたほかは分散法と同じ装置構成において行ったが, 詳細は実験方法の項で述べる。

2.2 粉じん試料

粉じん試料は, ABS 樹脂粉じん及びエチレン・酢酸ビニル共重合体の粉じん (以下, EVA 粉じんと記す)

の 2 種類で, いずれも工業的品質のもので, 重量基準平均粒径はそれぞれ 183 及び 42 μm である。Fig. 3 にこれらの粉じんの粒度分布図をしめす。また, ABS 樹脂粉じん及び EVA 粉じんの燃焼熱及び水分含量は, それぞれ 9950 及び 9590 cal/g, 0.7 及び 5.9 wt% であった。

2.3 実験方法

(1) 分散法による実験では, 消炎容器の爆発扉 V 1 及び V 2 を爆発放散口として作動させ, 出口側配管中で水噴霧を行った状態で粉じんを分散させて着火した。着火は, アルミニウム及びマグネシウムの粉末に過酸化バリウムと硝酸バリウムを加えた混合物約 0.4 g (放出エネルギーは約 5 kJ) を厚さ 0.01 mm のポリエチレン・シート片でくるんだものを市販の点火玉で起爆する方法によった。着火位置は, サイクロン容器の中心部 (Fig. 2 の X 2) とした。この方法では, 空気溜めと粉じん試料容器間の電磁弁への通電開始から着火源に通電するまでの時間 (以下, 着火遅れ時間という) を, 誤差数 ms で任意に設定することができる。着火遅れ時間は主として 50, 100 及び 150 ms に設定したが, 200 及び 250 ms についても実験した。

サイクロン容器中での粉じんの分散状態を知るために, 着火位置の 30 cm 上方 (Fig. 1 の T 7) に光透過型濃度計 (光路長 16.7 cm) を取り付けたが, その出力波

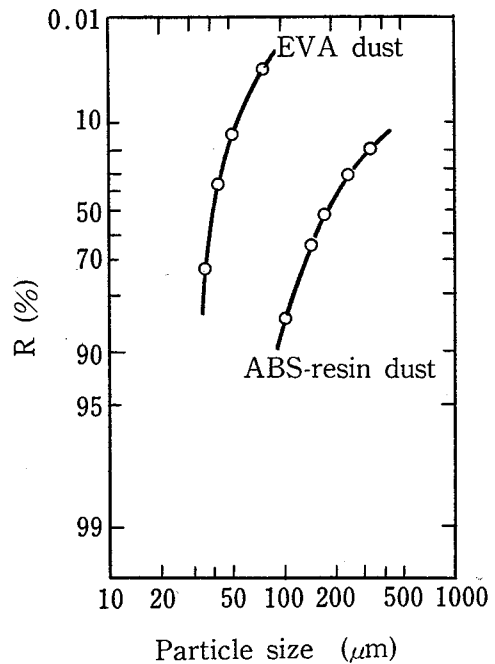


Fig. 3 Particle size distributions of the dusts.
試料粉じんの粒度分布図 (RRS 粒度線図)

形からサイクロン容器中での火炎の発生も検出できるようにした。

試料容器に充填する粉じん量は100~300 gとした。なお、粉じん量が75 g以下のときは、この実験方法では着火しなかった。

(2) 比較実験として行ったメタン-空気混合ガスの爆発実験では、可燃性混合ガスをサイクロン容器内に形成させるために、サイクロンの入口側及び出口側配管の途中(Fig. 1のVC1とVC2)、及び、サイクロン容器本体と集じん容器の間(Fig. 1のVC3)を、それぞれ厚さ0.01 mmのポリエチレン・シートで仕切り、所要量のメタン(純度99%)を送入したあと循環ポンプにより混合し、干渉計式ガス濃度計によりメタン濃度を測定したのち、混合ガスの初期圧力を大気圧に等しくして着火した。着火源はニクロム線ヒーターとし、着火位置は分散法の場合と同じである。ポリエチレン・シートで仕切った部分の開口径は155~205 mmであるが、シートの静的破断圧力は、これらの開口径によらず4 kPaであり、ほぼ開放系に模することができる。

メタンを用いた実験は密閉系についても行い、密閉系における分散法による粉じん爆発との比較に供した。

(3) ファンを駆動させた場合の実験は、消炎容器の爆発扉V1及びV2(又はV2のみ)を作動させ、水噴霧を行った状態で、粉じん濃度と気流速度を変えて行った。気流速度は、Fig. 1のX1において熱線風速計を用いて測定した。気流速度と配管断面積の積を空気流量とし、単位時間当りの粉じん供給量と空気流量から粉じん濃度を算出した。平均気流速度は5.2, 8.3及び13.4 m/sの3種類とし、粉じん濃度は0.21~0.85 kg/m³とした。毎回の実験では、ファンを駆動させ安定な運転に達した時点で粉じんの供給を開始し、その3~5秒後に着火源に通電した。着火源は分散法による実験に用いたものと同じである。

爆発火炎の検出は、配管壁及びサイクロン容器壁に取り付けた8個のフォトダイオード(Fig. 1のT1~T8)を用いて行い、その一部は光源と組合わせて、粉じんの濃度の変化を測定するための光透過型濃度計として利用した。フォトダイオードはガラス窓付きの細管内に収納して、受光面への入射角を極力狭めるようにした。火炎検出回路の出力は、デジタルメモリスコープ又は電磁オシログラフに記録した。また、サイクロン容器内における火炎速度をイオン・ギャップ法により測定した。イオン・ギャップとしては電極部の長い点火プラグ(容器内への突出長さ17 cm)を用い、Fig.

1のIg1及びIg2の位置に、両者間の垂直距離が90 cmとなるように水平に取付け、この間を火炎が伝播するに要する時間はユニバーサル・カウンタ又はオシロスコープにより測定した。

(4) 系内の圧力の時間的変化の測定には、歪ゲージ式圧力変換器(容量0.2 MPa, 応答周波数5 kHz, 及び、容量3 MPa, 応答周波数26 kHz)、動歪増幅器(応答周波数10 kHz)及びデジタルメモリスコープからなる測定系を用い、測定値に電算機処理を加えて必要な諸数値を求めた。測定系に起因する圧力値の変動幅は4 kPa以下である。

圧力は同時に4箇所において測定した。分散法による実験では、開放系の場合はFig. 1のP2, P3, P4及びP5において、また密閉系の場合にはP3, P5, P6及びVC1の盲フランジの中心において測定した。メタン-空気混合ガスの実験では、ポリエチレン・シートで配管を仕切った場合にはFig. 1のP1, P3, P4及びP5において、また密閉系の場合には分散法と同じ位置において測定した。ファンを駆動させた実験では、Fig. 1のP3, P4, P5のほか、P2又はP7(消炎容器側面)において測定した。

ファンを駆動した場合はサイクロン系内は負圧となり、気流速度13.4 m/sにおいて大気圧との差が約3 kPaとなり、また、分散法による実験(密閉系)では着火直前のサイクロン内圧が最大15 kPaに達したことがあるが、いずれの場合にも初期圧力が爆発に及ぼす影響は無視し、前者の場合にはファンが定常運転に達した時点の圧力を、また後者の場合には大気圧をそれぞれ基準として爆発圧力(overpressure)を求めた。なお、特に断わらない限り、ひとつの圧力-時間記録における圧力の最大ピーク値を爆発圧力と呼び、同一条件下で得られた爆発圧力のうちの最大値を最大爆発圧力と呼ぶ。また、配管の途中をポリエチレン・シートで仕切った場合の、サイクロン容器内での発生圧力を放散爆発圧力と呼ぶことがある。

3. 実験結果及び考察

3.1 分散法による粉じん爆発

(1) 開放系の場合

Fig. 4は、EVA粉じんの爆発について、圧力(実線で示す)及び光透過型濃度計出力(光透過率を一点鎖線で示す)の時間的変化を、種々の着火遅れ時間及び粉じん量について示したものである。圧力波形はすべ

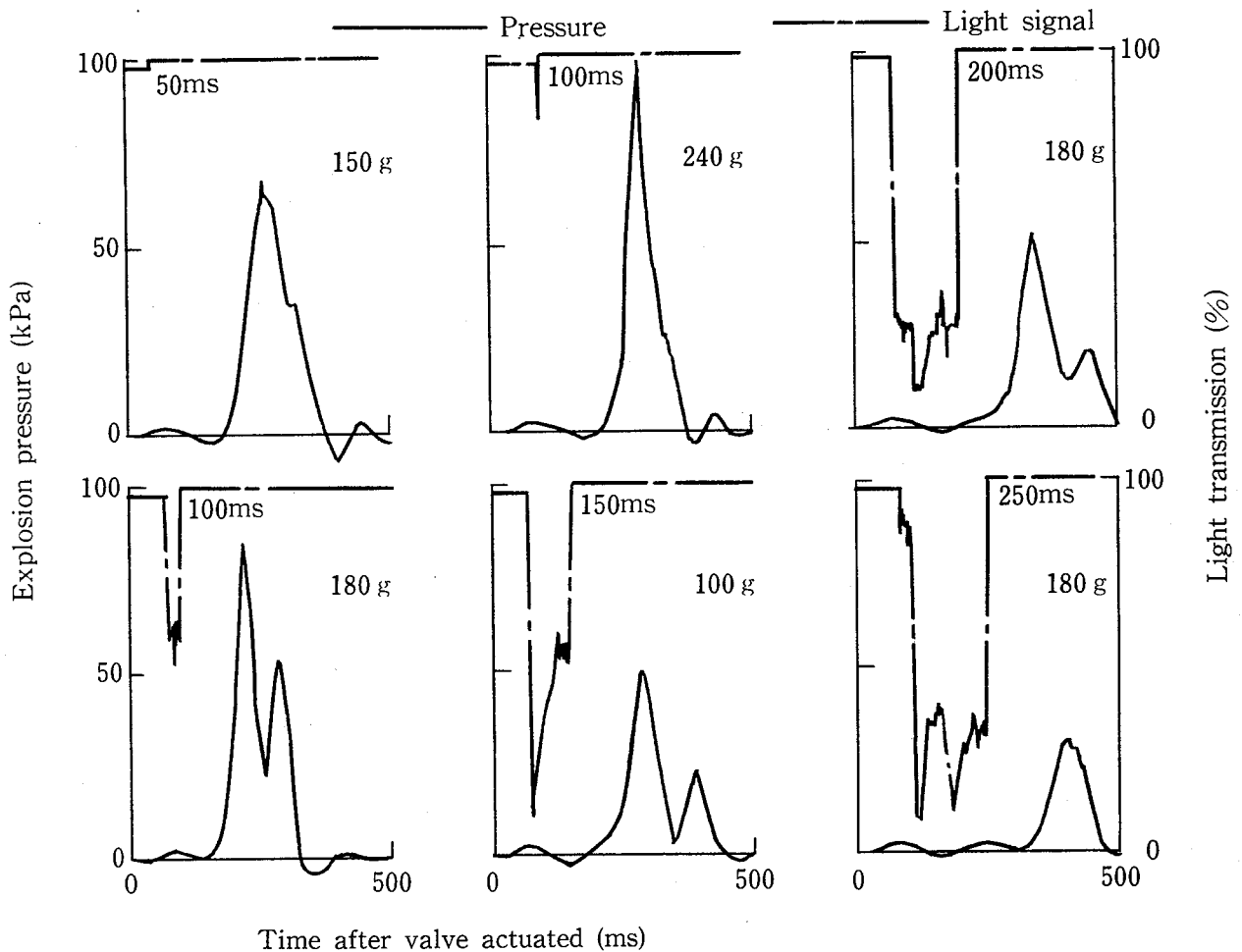


Fig. 4 Pressure-time traces with light transmission for EVA dust explosions in the cyclone system with two vents, by dispersion method (numerical values in each record are the ignition delay time and the dust charge).

分散法によるEVA粉じんの爆発圧力波形

て、粉じん分散用電磁弁への通電開始時を時間軸ゼロに合わせてある。光透過率の急激な減少はサイクロン容器内への粉じんの分散開始を、また、その急激な増加は点火玉の起爆を意味する。電磁弁の作動から点火玉の起爆までの時間は、タイマーで設定した着火遅れ時間と極めてよく一致した。

着火遅れ時間を変化させる目的は、サイクロン容器内の粉じんの分散開始から点火玉の起爆までの時間(以下、「実質着火遅れ」という)を変えることにある。着火遅れ時間が100~250msにおいては、実質着火遅れの平均値はFig. 5に示すように着火遅れ時間と比例関係にあり、所期の目的は達せられている。着火遅れ時間を50msに設定した場合には、粉じんの分散が確認されないうちに点火玉が起爆する結果となり、実質着

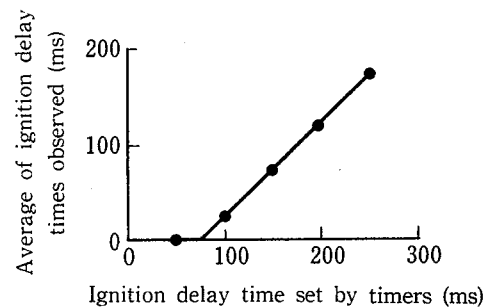


Fig. 5 Relation between ignition delay time set by timers and real ignition delay observed, in dispersion method.

着火遅れ時間(タイマー設定値)と実質着火遅れ

火遅れはゼロであるが、Fig. 5の直線の外挿からわかるように、この分散系では約70 ms以下の着火遅れ時間設定では同様の結果になるとみられる。

着火遅れ時間を短くすれば、充填した粉じんの一部だけしか分散されないうちに着火することになり、その濃度（粉じん量）での最大爆発圧力に達しないばかりでなく、分散の継続に伴う複雑な圧力波形が予測され、逆に、着火遅れ時間が長すぎれば分散された粉じんの一部は重力沈降してしまうので、爆発圧力はやはり低くなるであろう。従って、ある粉じん量に対して、最大爆発圧力が得られる最適の着火遅れ時間が存在すると予測される。一方、この分散方法では分散に伴って浮遊粉じん中に乱れが形成され、乱れの程度は着火遅れ時間の短いほど大きいが、時間の経過とともに急激に減少するとみられる。これらのことから、着火遅れ時間が比較的短いときに最大爆発圧力が得られると考えられた。

実験結果によれば、いずれの粉じんについても、粉じん量が100 gのときに爆発圧力がやや低くなる傾向はあるものの、粉じん量と爆発圧力の間には明確な相関は見出せなかった (Fig. 6 参照)。

Fig. 6には、種々のEVA粉じん量について、実質着火遅れとサイクロン容器内の爆発圧力（測定点P5）の関係を示す。（なお、サイクロン容器入口近傍の測定点P4における爆発圧力は容器内のそれとほとんど等しく、出口側配管の測定点P2の爆発圧力の1.5~2.3倍であった。）図からわかるように、実質着火遅れが約100 ms

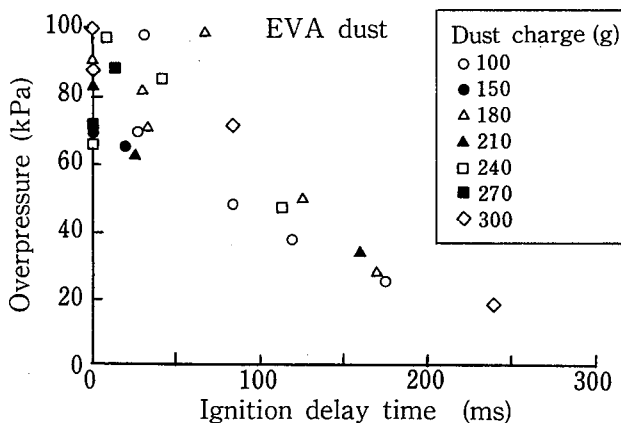


Fig. 6 Effect of ignition delay time on explosion pressure attained in the cyclone system for EVA dust, by dispersion method.
分散法における着火遅れ時間（実質着火遅れ）と爆発圧力の関係

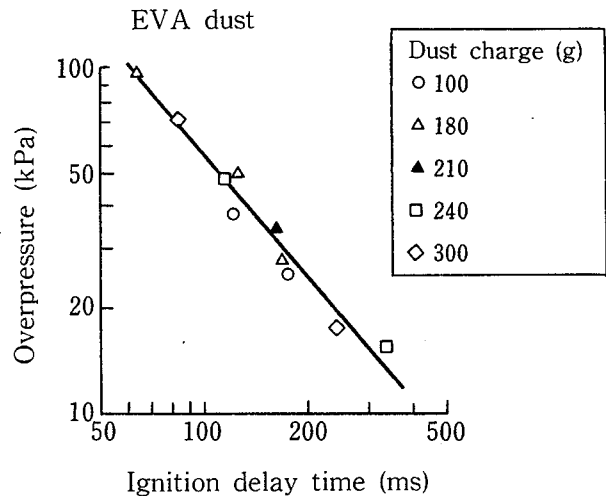


Fig. 7 Effect of longer ignition delay time on explosion pressure attained in the cyclone system, for EVA dust.

実質着火遅れが爆発圧力に及ぼす影響（着火遅れ時間が長い場合）

以下においては爆発圧力はこの遅れ時間とは無関係に一定の範囲内でバラツキを示しているが、100 msを超えると爆発圧力は明らかに遅れ時間とともに減少する。Fig. 7は、実質着火遅れが長い場合について、爆発圧力との相関を示したものである。粉じんの分散から着火までの時間が長びくほど爆発圧力が減る理由は、先に述べたように分散粉じんの重力沈降により説明できる。一方、着火までの遅れ時間が100 ms程度以下の場合に爆発圧力が遅れ時間や粉じん量にあまり影響されない（この傾向はABS樹脂粉じんについても同じであった）理由は、毎回の実験における粉じんの分散の不均一性にもよるであろうが、基本的には次のように考えられる。

第1の理由は粉じん分散装置に起因する。すなわち、粉じんを分散させる推力（加圧空気）及び、分散パイプを含めての粉じんの通過する経路が同じである場合には、試料容器に充填する粉じん量をいくら増しても、サイクロン容器内に一定の時間のうちに分散させる有効な（爆発に寄与する）粉じんの量には大差がないとみられ、従って爆発圧力もほぼ一定となる。

第2の理由は開放系の爆発空間に特有のものである。一部が大気に開放された容器中の爆発においては、粉じん爆発に限らず、密閉容器の場合に比べて爆発圧力は低くなり、その度合は容器の開放の程度によることが知られている。この実験では、サイクロン容器は配

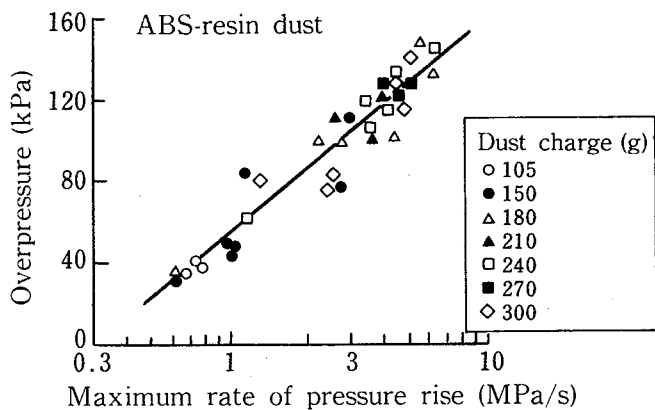


Fig. 8 Relation between explosion pressure attained and maximum rate of pressure rise in the cyclone system for ABS-resin dust, by dispersion method.

分散法によるABS樹脂粉じんの爆発圧力と最大昇圧速度の関係

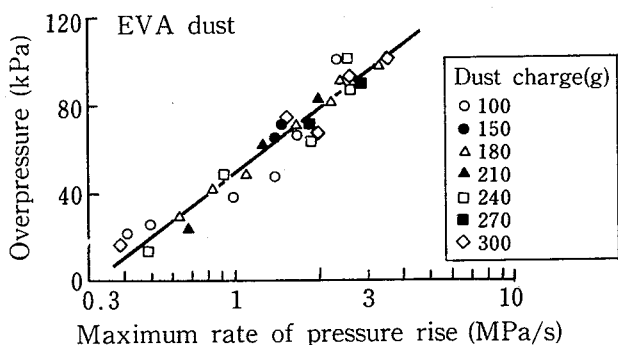


Fig. 9 Relation between explosion pressure attained and maximum rate of pressure rise in the cyclone system for EVA dust, by dispersion method.

分散法によるEVA粉じんの爆発圧力と昇圧速度の関係

管系及び消炎容器の爆発扉を経て大気開放されており、圧力の放散効果大きい。こうした条件下では、容器内で生じた爆発の昇圧速度によって爆発圧力がいくらか異なることはあるにせよ、到達する最大圧力が粉じん量などによって大きく影響されないことは十分に考えられる。測定された最大爆発圧力は、ABS樹脂粉じんでは145 kPa, EVA粉じんでは100 kPaであった。

Fig. 8及び9には最大昇圧速度と爆発圧力の間を示した。粉じん量や着火遅れ時間が異なっても、発生する圧力とそのときの昇圧速度の間には相関があり、

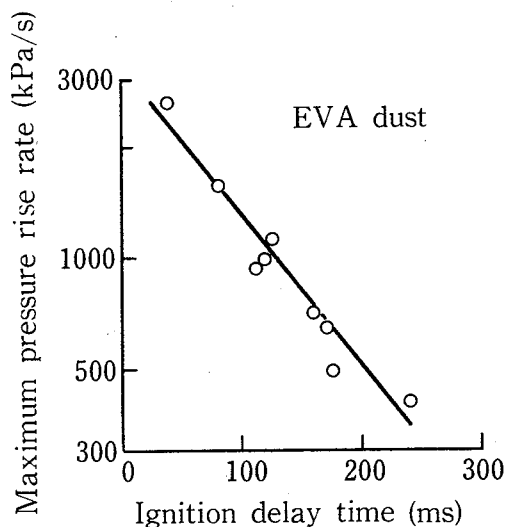


Fig. 10 Effect of ignition delay time on maximum rate of pressure rise of explosion pressure in the cyclone system, by dispersion method.

分散法における着火遅れ時間と最大昇圧速度の関係

これは、爆発の開始後の時間と圧力の間にある一定の関係が存在することを示唆している。この関係については解析しなかったが、時間とともに昇圧速度が増加するような関数で近似できるものとみられる。なお、図の結果は、昇圧速度を小さくすることができれば爆発圧力を低く抑えられることを意味しており、爆発放散口の設計などに応用することができる。Fig. 10は、EVA粉じんについて実質着火遅れと昇圧速度の関係を示したものであり、着火遅れが大きければ爆発圧力が大きくならないことのひとつの説明である。

なお、Fig. 4からもわかるように、圧力波形には分散用空気の送出に伴うゆるやかな振動圧力がみられ、爆発による圧力がこれに重なるため、圧力の上昇開始の時点は明確ではないが、点火玉の起爆から圧力の上昇開始までには最大100 ms程度の遅れがある。この遅れの理由は不明であるが、開放系における粉じん爆発では初期の昇圧速度が極く小さいためではないかとおもわれる。なお、密閉系における実験では、点火玉の起爆と圧力の上昇開始は時間的によく一致した (Fig. 11参照)。

(2) 密閉系の場合

サイクロン容器を密閉した実験では、開放系での結

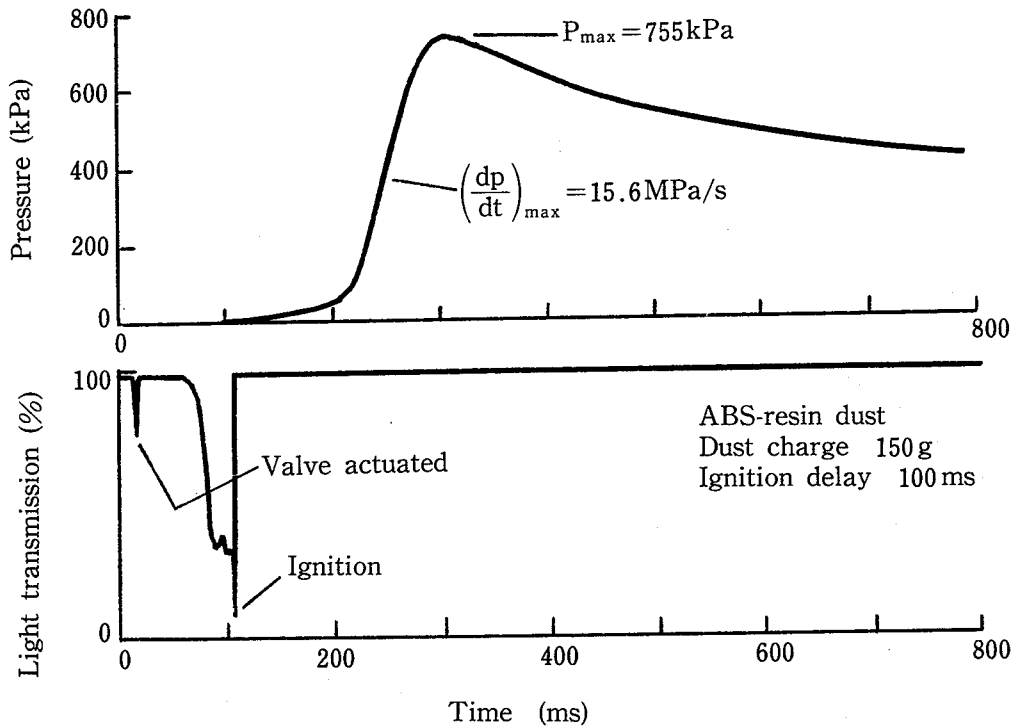


Fig. 11 Typical records of explosion pressure and light transmission for ABS-resin dust in the closed cyclone vessel, by dispersion method.
密閉サイクロン容器における爆発圧力と光透過率の時間的変化の例 (分散法)

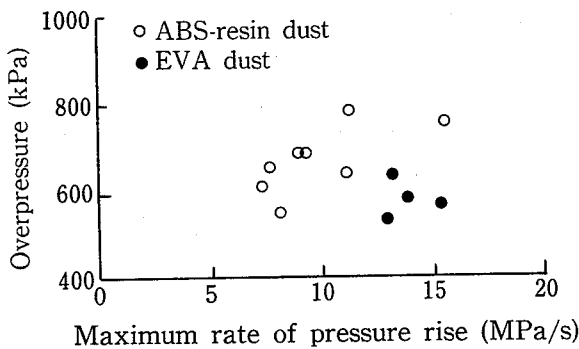


Fig. 12 Relation between explosion pressure attained and maximum rate of pressure rise in the closed cyclone vessel, by dispersion method.
密閉サイクロン容器中の爆発圧力と最大昇圧速度の関係 (分散法)

果をもとに、粉じん量は 150～300 g とし、着火遅れ時間は、ABS 樹脂粉じんの場合は 100 及び 150 ms, EVA 粉じんの場合は 150 ms に、それぞれ設定した。

Fig. 11 は圧力波形の例である。このような単一ピー

クの圧力波形は、一般に密閉容器中でのガス爆発の際に観測される波形と同じであり、懸念される粉じん濃度の不均一性を思わせる要素はなく、粉じん分散方法が妥当なものであることを示している。次節に述べるメタン-空気混合ガスの爆発と比較すると、ABS 樹脂粉じんの場合は、最大昇圧速度は約 1/4 であるが、爆発圧力の最大値はほぼ同じであり、EVA 粉じんの場合は、爆発圧力はやや低かったが最大昇圧速度は ABS 樹脂粉じんのそれよりもやや大きかった。爆発圧力と最大昇圧速度の関係を Fig. 12 に示す。EVA 粉じんのほうが昇圧速度が大きいのは、粉じんの平均粒径が小さいことによるとおもわれる。爆発圧力の差は粉じんの燃焼熱に差がないことから、粉じんの分散性に起因するものと思われる。

3.2 メタン-空気混合ガスの爆発

分散法による粉じん爆発は、粉じんの分散方法や着火のタイミングに問題がないとはいえず、このため再現性は必ずしもよくない。一方、ガス爆発は結果の再現性が比較的好く、実用上の問題として爆発放散口の設計などに際しては粉じんの代りにガス (特に、昇圧

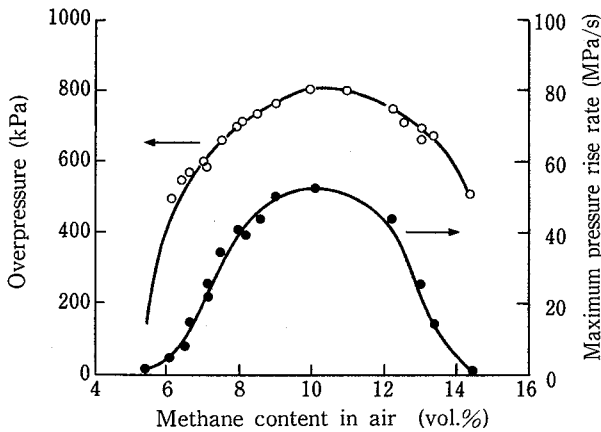


Fig. 13 Characteristics of methane-air explosion in the closed cyclone vessel.
密閉サイクロン容器におけるメタン-空気混合ガスの爆発特性

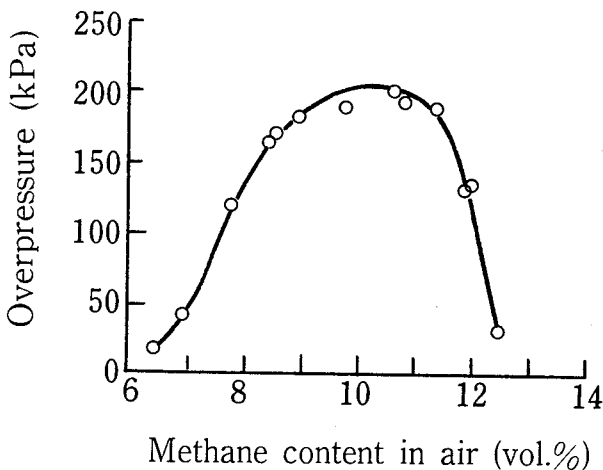


Fig. 14 Explosion pressure of methane-air mixture in the vented cyclone vessel.
サイクロン容器におけるメタン-空気混合ガスの放散爆発圧力

速度の小さいメタン) を用いて実験することも多い。ここでは、分散法による粉じん爆発の場合と同じ装置構成において、乱れのない静止状態のメタン-空気混合ガス(初期圧力は大気圧)の爆発実験を行い、粉じん爆発と比較した。

Fig. 13は、密閉したサイクロン容器における爆発圧力と最大昇圧速度をメタン濃度に対してプロットしたものである。密閉系における分散法によるABS樹脂粉じんの爆発と比較すると、爆発圧力の最大値に相当する圧力を与える濃度は、当量値からややはずれた8.

5~9%付近である。昇圧速度は、メタン濃度6.5%のときに粉じんの爆発にほぼ相当した。

Fig. 14には、ポリエチレン・シートをベントカバーとして爆発を放散させた場合の、メタン濃度と放散爆発圧力の関係をしめす。開放系における分散法による粉じん爆発においては、Fig. 4に示したように、圧力波形に第2のピークが出現することはあっても、その圧力値が最初のピークのそれを超えることはなく、極端な振動波形も生じなかった。一方、メタンの爆発の場合には、破断圧力が僅か4 kPaであるとはいえ、ベントカバーで仕切られているため、予め開口が存在する容器中での爆発とは異なり、特に配管内の圧力は振動を伴う複雑な波形を示すことが多かった。Fig. 14の爆発圧力(測定点P5)は、圧力の放散に伴う振動波形を除いたうちの最大ピークの圧力(容器に加わる実質的な圧力)であるが、予測されるように当量値付近の濃度において最大値を示した。この最大値は202 kPaであり、分散法による開放系におけるABS樹脂粉じんの最大爆発圧力より約40%高かった。

先に述べたように、8.5~9%のメタンを含む混合ガスとABS樹脂粉じんの爆発圧力がほぼ等しいとすると、この混合ガスの放散爆発圧力は図から170~180 kPaであり、開放系における分散法によるABS樹脂粉じんの最大爆発圧力(145 kPa)と比較的よく一致した。この結果は、爆発特性の類似した混合ガスを用いた実験により、粉じん爆発と等価な爆発実験を行うことが実際上可能であることを示している。一般に、密閉容器におけるガス爆発と粉じん爆発について、爆発圧力と昇圧速度の両者が等価となる混合ガスは得難いが、上述の結果によれば、開放系又は圧力を放散する場合(昇圧速度が小さい範囲)の挙動を比較するには、密閉容器における爆発圧力が等しくなるような混合ガスを用いればよいと考えられる。ただし、火炎の持続時間や噴出火炎の効果については別に考慮する必要がある。

3.3 ファンを駆動させ、粉じんを流動させた場合

Fig. 15は、サイクロン容器内における圧力(測定点P5)と光透過率(測定点T7)の時間的変化を示す例である。この例では、粉じんの供給開始から約2.5秒後に定常状態が達成されるものの、光透過率にはかなりの変動がみられる。こうした変動は、サイクロン容器内での渦流と、これに伴う粉じん濃度の器壁への偏りによるものと思われる。

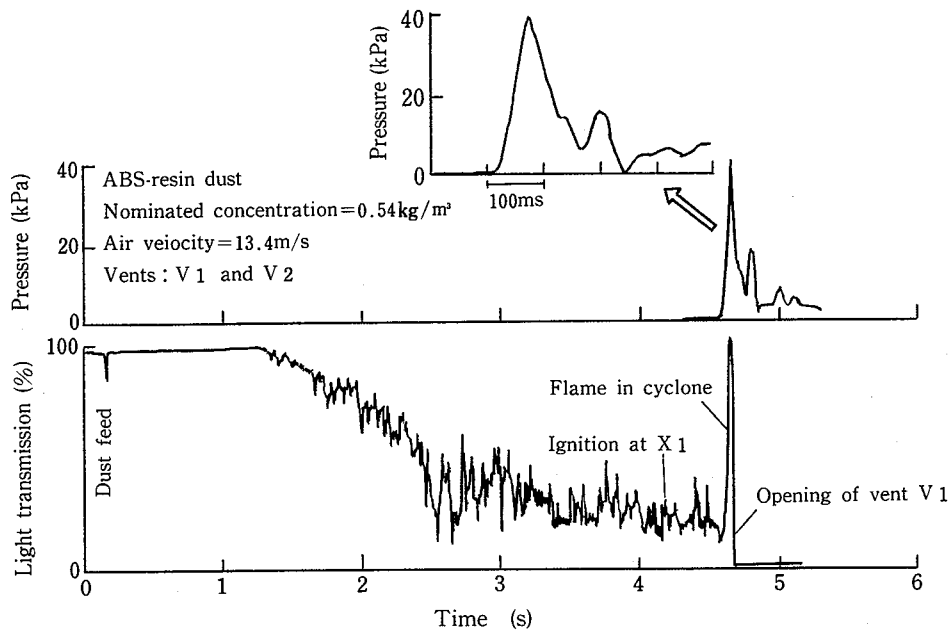


Fig. 15 Typical records of explosion pressure and light transmission in the cyclone system with a fan operation.

ファンを駆動した場合のサイクロン容器中の爆発圧力と光透過率の時間的変化の例

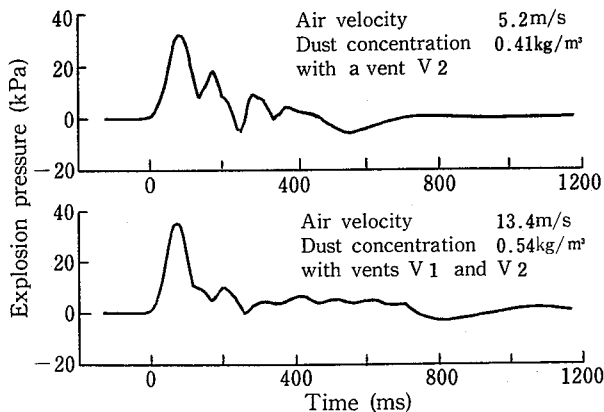


Fig. 16 Pressure traces in the cyclone system with or without the larger vent V1, for ABS-resin dust explosions.

爆発扉 V1 を作動させたか否かによる爆発圧力波形の差異

爆発扉 V1 を作動させたか否かによる圧力波形の差異を Fig. 16 に、また、爆発扉 V1 を作動させなかった (ボルト締めにより密封した) ときの粉じん濃度と爆発圧力の関係を Fig. 17 に、それぞれ示す。これらの実験では、入口側配管及びサイクロン容器内の各所において測定した爆発圧力には差がなかった。消炎容器壁に

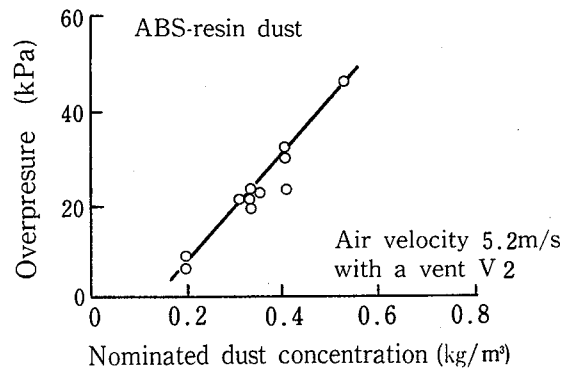


Fig. 17 Effect of ABS-resin dust concentration on explosion pressure attained in the cyclone system with a smaller vent V2.

粉じん濃度と爆発圧力の関係 (爆発扉 V1 密封)

において測定した爆発圧力は爆発扉 V1 を作動させたか否かによって異なり、サイクロン容器内の爆発圧力に対して、それぞれ約 1/3~1/5 及び 1/2~1/3 であった。特に断わらない限り、以後の論議の対象はサイクロン容器内の爆発圧力である。

配管系がサイクロン容器内の爆発に対して爆発放散

口となることは分散法の場合と同じであるが、ファン駆動の場合には配管中にも粉じんが存在するので爆発圧力は高くなると予測されたが、測定された圧力は分散法の場合よりもかなり低かった。爆発圧力は爆発扉の作動の有無によっても影響される。当初は爆発扉 V1 を密封して V2 のみを作動させて実験したが、ABS 樹脂粉じんの濃度 0.54 kg/m^3 、気流速度 5.2 m/s のときに 46 kPa の爆発圧力が記録され、この爆発により消炎容器側面に変形を生じたので、以後の実験では両方の爆発扉を作動させた。

Fig. 17 からわかるように、爆発扉 V1 を作動させないときの爆発圧力は粉じん濃度の増加とともに高くなり、実験した範囲の粉じん濃度においても、軽構造の装置類を破損させるに十分であると思われる圧力を生じた。粉じん濃度を更に増しても爆発圧力は著しくは増加しないとみられる。

Fig. 18 に、爆発扉 V1 及び V2 を作動させたときの粉じん濃度と爆発圧力の関係を示す。気流速度が 5.2 m/s のときの ABS 樹脂粉じんに対する両者の関係は、気流速度が 8.3 m/s の場合とほぼ同じであった。実験の範囲で測定された爆発圧力の最大値は、ABS 樹脂粉じんの濃度 0.69 kg/m^3 、気流速度 13.4 m/s のときの 40 kPa であり、このとき消炎容器に加わる圧力は 10 kPa であった。気流速度が 13.4 m/s では最大爆発圧力はほぼ等しかったが、最大値を与える粉じん濃度は EVA 粉じんのほうが低かった。これは EVA 粉じんの平均粒径

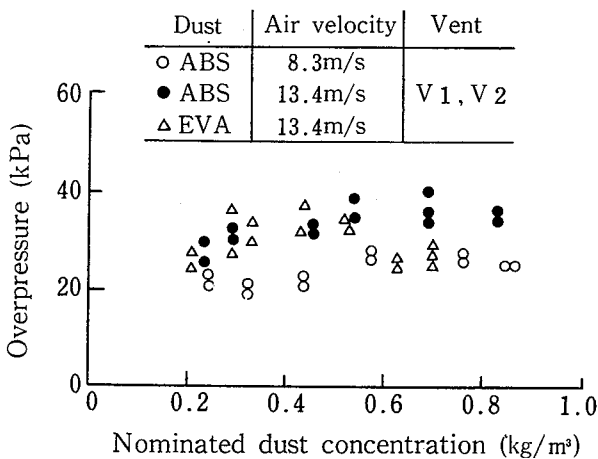


Fig. 18 Effect of dust concentration on explosion pressure attained in the cyclone system with two vents.

粉じん濃度と爆発圧力の関係 (爆発扉 V1 及び V2 作動)

が小さいことによるものであって、粉じん爆発の一般的特徴として知られている。爆発圧力に及ぼす粉じん濃度の影響が顕著でないのは、サイクロン容器に接続される配管系とファンの排気による圧力放散効果が大いことを示すと同時に、消炎容器の爆発扉が有効に作動したことを意味し、爆発放散口の設計に際しての有益な知見となる。爆発放散口の効果は、最初の圧力ピークをいかに小さく抑えられるか、第2以降の圧力ピークの出現を抑えられるか、圧力の持続時間を減じ得るかなどにより評価されるが、Fig. 16 はこれを比較した例である。

Fig. 19 は、各気流速度において測定された ABS 樹脂粉じんの爆発圧力の最大値とそのときの最大昇圧速度を、気流速度に対してプロットしたものである (爆発扉は両方とも作動の場合)。粉じん濃度の影響が無視できるとすれば、図は気流速度が粉じん爆発の特性値に及ぼす影響を示すものであり、また、気流速度はサイクロン容器中での渦流の強さに関係するので、爆発過程に及ぼす乱れの効果を示すものといえる。乱れそのものの定量化はこの場合極めて困難であるが、サイクロンにおける気流速度を乱れの尺度とみなすならば、気流速度がある値を超えると爆発の激しさが増加し始める限界のあることがわかり、実用上のサイクロンの運転における爆発危険性の軽減のための運転条件の選

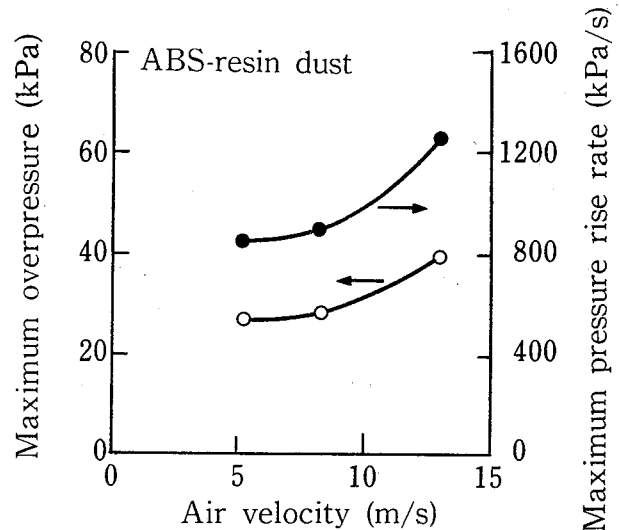


Fig. 19 Effect of air velocity on explosion characteristics of ABS-resin dust in the cyclone system with two vents.

気流速度が爆発特性に及ぼす影響

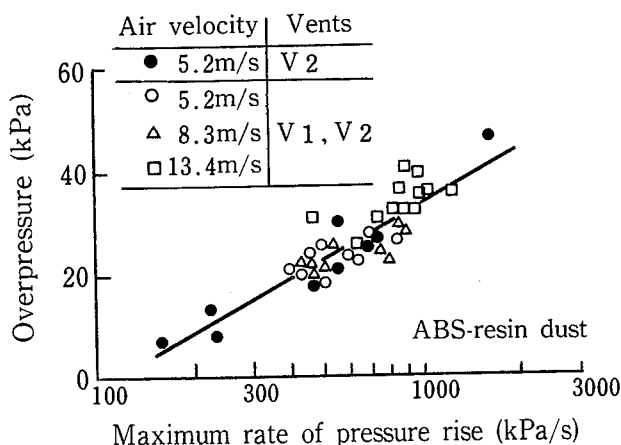


Fig. 20 Relation between explosion pressure attained and maximum rate of pressure rise for ABS-resin dust.

ABS樹脂粉じんの爆発圧力と最大昇圧速度の関係

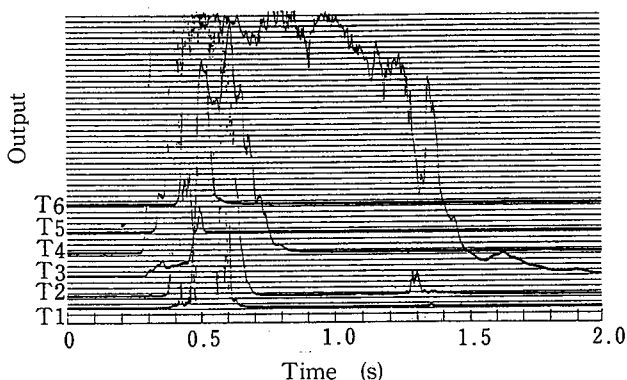


Fig. 21 Typical trace of flame propagation in the cyclone system detected by the use of light-sensing diodes (ABS-resin dust, air velocity 8.3 m/s, dust concentration 0.85kg/m³)

フォトダイオードを用いた光検出回路の出力波形の例

定に示唆を与えるものである。

Fig. 20 は、爆発圧力と最大昇圧速度の関係を ABS 樹脂粉じんについて示したものである。気流速度による乱れの効果が含まれているにも拘らず、両者の値の範囲が、開放系における分散法による実験結果に比較して著しく小さい領域にあることに注目したい。この差異は、ファンの駆動によるサイクロン容器中の粉じん濃度の偏り（サイクロンの本来の目的のための機構上の特徴である遠心力の効果）及びファンの強制排気効果によるものであろう。

Fig. 21 は、フォトダイオードを用いた光検出回路の

出力の典型的な例であるが、測定点 T5 及び T6 の出力から、火炎がサイクロン容器内へ入ったあと粉体供給機側へ逆火していることがわかる。また、サイクロン容器内では約 500 ms 間火炎が持続するが(T4)、火炎の一部は下部の集じん容器内へ伝播して、沈降中の粉じんに燃え移り、約 1.2 s 間燃焼の継続することや(T3)、出口側配管中 (T2) で火炎が検出されるのはサイクロン容器内の火炎の検出から約 80 ms 後であることなどが、この記録からわかる。この例では、2 個の水噴霧ノズルの中間地点 (T1) でも火炎が検出されているが、多くの場合には水スプレーは消炎装置として有効ではなく、爆発扉 V1 の作動により、水飛沫とともに火炎が外部に噴出した。着火以前には、粉じんはサイクロン容器中で捕集されるので、出口側配管中には粉じんはほとんど存在しないが、容器中で爆発が生ずると、熱膨張に伴う熱ガスの噴出とファンによる排気方向が一致して未燃粉じんを急速に排出するので、配管内を伝わる火炎は加速される。この結果、火炎に伴う圧力により水膜が押しよけられ、水噴霧ノズル近傍では消炎されず、消炎容器にまで火炎が達すると考えられる。

一方、粉体供給機側へ逆火した場合には、管端（空気吸入端）から火炎が噴出してファイア・ボール（球状爆発火炎）を形成することが多かった。こうした危険性は、実験手法の上では、粉じんの供給停止と着火とのタイミングを調整して着火源よりも上流側の管中に粉じんが残存しないようにすれば避けることができ

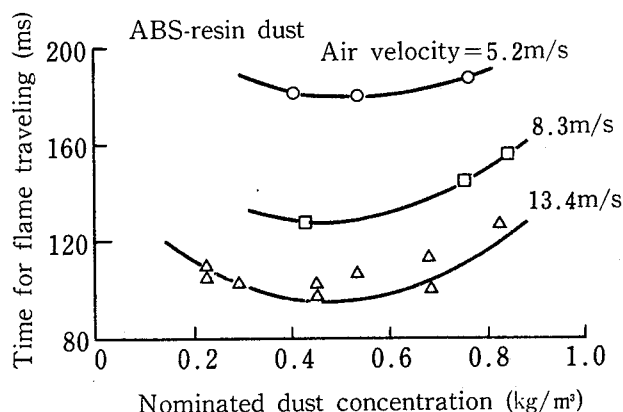


Fig. 22 Relation between dust concentration and the time required for a flame to propagate between two ion-gaps in the cyclone vessel.

イオン・ギャップ間を火炎が伝播するに要した時間と粉じん濃度の関係

るが、実際に操業中のサイクロンにおいては、逆火の可能性に対する認識と対策が必要である。なお、逆火した場合の測定点 T5-T6 間の平均火炎速度は（粉じん濃度や気流速度に依存するが）最大 60 m/s に達する場合があった。

Fig. 22 は、サイクロン容器内に設けた 2 個のイオン・ギャップ間を火炎が伝播するに要した時間を、粉じん濃度に対してプロットしたものであり、粉じん濃度が同じであれば、気流速度が大きいほど所要時間は短くなっている。サイクロン容器内の渦流（旋回流）のため、火炎の伝播方向は単純ではないとみられ、イオン・ギャップ間の垂直距離から求めた平均火炎速度（最大約 10 m/s）は気流速度以下であるが、サイクロン容器内全体に火炎が拡がるに要する時間が気流速度の増加によって減ずることは明らかであり、この結果、昇圧速度（従って爆発圧力）が増加すると考えられる（Fig. 19 参照）。

3.4 サイクロンの危険性に関する考察

可燃性粉体を扱うサイクロンは、運転中であれば停止中であれ、内部に粉じんが存在する限り爆発の可能性はあるが、サイクロンに固有の現象が生ずるのは運転中（ファン駆動時）の爆発である。ファンの機能は、粉体の移送のほか、サイクロン容器中に渦流を発生させることにより粉じん濃度に偏りを形成させることにある。こうした渦流による乱れは爆発火炎を加速するとともに、サイクロン容器の器壁側へ粉じんを偏らせるので容器全体への火炎の拡がりや抑制され、粉じんの燃焼は限定されると考えられ、こうした相反する効果がどのような結果をもたらすかは最も興味ある関心事である。

実験によれば、圧力放散の条件が同じ場合の最大爆発圧力は、ファンを駆動させた場合のほうが停止させた場合の約 1/3 であり、予測したよりもかなり低かった。また、気流速度を 5.3 m/s から 13.4 m/s に増した（2.5 倍）場合、最大爆発圧力は約 1.5 倍となったが、その値は 40 kPa に過ぎなかった。更に、サイクロン容器内の平均火炎速度が気流速度のオーダであることを考え合わせると、渦流がサイクロン容器内の爆発を特に危険なものとするという結果は導かれなかった。

Palmer^{4), 5)} は、サイクロン内で低い放散爆発圧力が得られる原因として、渦流による粉じん濃度の偏り（それに伴って火炎が器壁側に局在する）を挙げている。彼らが用いたサイクロンは、今回の実験に用いたもの

の約 2 倍の直径を有しており、遠心力の効果も大きいことから、その推察は妥当とみられる。今回の実験では、サイクロン直径と入口配管径の比は 3 であるが、直径が小さいので、爆発時には火炎が容器全体に拡がり易かったとみられる。そのわりには爆発圧力が低かった理由は、爆発扉が有効に圧力を放散したためと思われる。爆発扉 V1 は約 4 kPa の圧力により作動し始めたので、粉体供給機側の管端が開放であったことと併せて、昇圧速度を減じ、従って爆発圧力を低減させたとみられる。ファンの排気能力は、気流速度 13.4 m/s において 0.5 m³/s であり、サイクロン容器と集じん容器（合計容積約 0.5 m³）の内部だけで爆発が生じたとして単純計算すれば、100 kPa/s の昇圧速度の気体の膨張を排出できる。実験で得られた昇圧速度は少なくともその数倍から十数倍であり、ファンの排気だけで爆発圧力が低減されたとは考えられないが、圧力の放散にある程度寄与したとみてよい。

以上のように、ファンの駆動による渦流（乱れ）の発生、粉じん濃度の偏り及び排気効果は同時に起きるため⁷⁾、これらがサイクロン内での爆発に及ぼす影響を個々に評価することはできなかった。また、爆発圧力は予想より低かったものの、通常のサイクロン型集じん装置を破壊するに十分とみられる圧力の発生が確認されたほか、逆火により集じん配管口から火炎が噴出するという危険性も認められた。

4. 結 言

サイクロン中における粉じん爆発の危険性を検討するため、排気ファンの直前に爆発放散口を備えた消炎容器を設置した実大規模のサイクロンを用いて実験した結果、次のようなことがわかった。

(1) ファンを駆動させたときの爆発圧力は予想外に低かったが、その理由は、爆発放散口が有効に作動したことのほかに、サイクロン容器内における粉じん濃度の偏りとファンによる強制排気が主な理由と考えられ、ファンの駆動による乱れが爆発の激しさに影響して危険性を著しく増大させるという結果は得られなかった。

(2) ファンを駆動させた場合には約 50 kPa、ファンを停止してサイクロン容器内に加圧空気により粉じんを分散させた場合は 100~150 kPa の爆発圧力が記録されたが、これらの圧力は、適切な爆発放散口を備えていない通常の構造のサイクロン集じん装置を破壊するに十分な爆発が生ずることを意味する。また、サイク

ロン容器周辺の配管中でも同程度の圧力が生ずるほか、火炎が逆火して開口端から噴出してファイアー・ボールを形成する可能性も大きいので、配管の強度や装置周辺の防護対策も必要である。

(3) 加圧空気を用いて粉じんを分散させる方法によって、メタン-空気混合ガスと同程度の爆発圧力が得られた。こうした手法を利用すれば、サイクロン内での粉じん爆発の圧力放散時の挙動を、ガス爆発の実験をもとに予測することが可能であると考えられる。

(昭和63年4月1日 受理)

参考文献

- 1) United Kingdom Fire and Loss Statistics, Ministry of Technology and Fire Offices' Committee, Joint Fire Research Organization (1964) HMSO
- 2) 平野敏右, “ガス爆発予防技術”, 海文堂 (1983)
- 3) 松田東栄, 安全, 38 (9), p. 18 (1987)
- 4) K.N.Palmer, Inst. Chem. Engrs. Symposium Series No.34, p.142 (1971), Inst. Chem. Engrs. (London)
- 5) K.N.Palmer, Chem. Eng. Progress, 70 (4), p. 57 (1974)
- 6) R.K.Eckhoff, Proceedings of the Int. Symp. on the Explosion Hazard Classification of Vapors, Gases and Dusts, p. 181 (1986), National Materials Advisory Board, Publication NMAB-447, National Academy Press (New York)
- 7) A.K.Gupta, D.G.Lilley and N.Syred, “Swirl Flows”, Energy & Energy Science Series (1984) Abacus Press