

6. 木粉集じんシステムにおけるダストの爆発・火災危険性

松田 東 栄*
内藤 道 夫*

Dust Explosion and Fire Hazards in a Wood-Dust Collecting System

by Toei MATSUDA* and Michio NAITO*

In many woodworking shops, dust collecting systems have been installed for the purposes of environmental aspects, use of wood dusts as a fuel in the furnace and so on. The hazards of wood-dust explosions and fires in the systems, however, have not always been appreciated, partly due to the recognition of the wood dust as by-products or wastes among wood workers. If flow velocities in the duct are kept as high as practical, then the time of exposure of dust particles to an ignition source is minimal, and the possibility of ignition is minimal. On the other hand, the hazard of flame propagation and acceleration in the coal mine galleries under initial static conditions have been reported in many publications, but the effect of air currents on the dust explosibility is not well clear in the ventilating duct system. Wood-dust explosion propensity in pipeline was then examined in relation to the installation of protective measures in the collecting, or pneumatic transport systems.

A full scale pneumatic transporting system was employed with steel piping of 3 in. and 4 in. diameters (Fig. 6-1). The ignition sources for the dust flow were an explosion flame of acetylene-air mixture, near-stoichiometric composition, or a continuous induction spark. A unit bag filter with explosion vent was used as a receiving hopper in order to see whether safe explosion venting could be achieved in the case of the flame ejecting from the high speed flowing pipe.

The result for an effect of conveying air velocity on explosibility limits of a wood-dust/air mixture is compared with that of a coal-dust/air mixture, and Essenhigh et al⁹⁾ (Fig. 6-3). At an air speed of 15 m/s, the range of explosible concentrations agreed closely with the result of Essenhigh et al in spite of different conditions (2" pipe) and a different type of dust (coal-dust), but the flame was not extinguished at the higher conveying velocity of up to 40 m/s with the gas ignition source. From those comparison, flame extinction by velocity and concentration is estimated to be affected by the power strength of the igniting source : with a small source of ignition such as a spark, the critical air velocity, above which flame was no longer propagated at any dust concentration, could be given for the dusts used, but if a severe ignition source is present, then a wider range of explosibility limit would be obtained at conveying velocities higher than the critical one. The lower explosibility limit seems to be scarcely affected by increasing the air velocities.

* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

The extinction mechanism has not been well understood, but the higher mixing of cold unburned dust flow into the flame zone is expected to prevent the ignition and subsequent flame propagation with increasing turbulence. Above the critical air velocity, the dust flame formed in contact with the severe ignition source, would not have enough time to be extinguished by the higher conveying velocity and insufficient mixing of cold dust flow.

Average flame speed were measured along the pipeline with photo-transistors (Figs. 6-4 and 6-5). It was generally found that the flame was propagated initially in a more or less rapid acceleration and then gradually decelerated to a velocity such that the flame was conveyed by the dust flow into the filter unit. We may suspect that the decreasing flame speed could be attributed to the condensed dust concentrations ahead of the flame zone, in the turbulence flow.

The maximum pressure for vented explosions in the filter unit was as low as the static bursting pressure of the vent cover, 0.08kg/cm^2 . The capacity of the bag filter was 1.3m^3 , and the vent ratio (area of vent/ volume of vessel) was 0.56^{-1} , and relatively large compared to the value recommended for a bag filter by Bartknecht.⁵⁾ A fireball of 3.5m maximum diameter was formed outside the dust filter unit on the explosion venting. All the combustible materials should be removed from the danger space relevant to the opening of explosion vents. A continuously burning flame was maintained at the mouth of the inlet pipe of the filter unit, unless the dust flow was cut off immediately after the explosion.

A glowing cigarette-butt and grinding frictional sparks were introduced into the dust flow pipe as the practical igniting sources. The cigarette-butt, which came to pieces in the flow, caused smouldering fires in the filter unit, but the frictional sparks were mostly cooled in the pipe.

In general, wood-dust collecting system are operated under high flow speed and relatively low dust concentrations, and then it is concluded that they have the hazards of wood-dust explosions and fires, which could propagate instantaneously throughout the system by the presence of high flowing air, even in small duct systems.

6.1 まえがき

6.1.1 木作業現場調査からみた問題点

木材処理・加工・組立て等作業場での環境整備や切削屑あるいは研磨等による木粉の回収・利用の目的からも、ほとんどの木工工場では木粉集じんシステムが設置されるようになってきた。ところが、大小・形式を問わず種々の同集じんシステムで、火災や爆発の災害が工場によっては頻繁に経験されるようになってきている。

今回の特別総合研究のために数回にわたって行った現場調査では、幸い早期発見で小火災（ぼや）程度で消火された場合が大部分であったと聞いたが、言うまでもなく木材資源は有史以前の太古から燃料として利用されてきたように燃焼性が高い。

ところが、最近木材資源の枯渇やそれらの有効利用と相俟って木材加工や表面処理技術の進歩により、主に副産物あるいは廃棄物としてではあるが、木工工場では微粉化されて処理されることが多くなっている。また、パーティクルボードや合成樹脂粉との複合材として木粉ダストを製造・利用する場合もある。残念ながら産業現場ではこのような木粉の粉じん爆発の爆発特性が、Table 6-1のような激しさを示すことは必ずしも十分には認識されていない。すなわち、粒子径が小さくなる程大事故につながる潜在的な爆発危険性は非常に大きい。また、木材と複合したプラスチックや種々の塗装処理を受けた材料の微粉が集じんされたり、可燃性溶剤蒸気の共存下での吸引など、種々雑多なものが集じんされて一カ所に集められる結果、木粉集じんシステムでの爆発危険性は大きくなっていると言わざるを得ない。実際、個別調査によると人身事故には到らなかったが、かなりの数の粉じん爆発災害が特定の木工工場で起きて集じん系統の設備破壊をもたらしていることがわかっている。

爆発・火災をひき起こすためには、燃料としての木粉のほかに当然何らかの着火源が存在しなければならないが、実際問題として着火源の管理や排除について完璧を期することはなかなか困難なようである。特に、ほとんどの作業が動力回転機械を使用する一方、完全な自動機械化には到っていないという面と、機械装置の使用増加が間接的な着火源を増す結果になっている。

例えば、家具製造・組立て工程などに使用される金属部品と回転のことの接触あるいは切断による衝撃火花や、ベルト・サンダーにおける研磨紙の破断時の装置本体との接触による火花など、至る所にかつ思いがけない所に潜在的な着火源が存在する。しかも、これらの火花が木粉と一緒に容易に集じんシステム内に吸引されてしまうところに問題点がある。

現在では集じん装置の性能が大きく向上したが、その反面不適切な使い方がなされている場合もみられる。通常、吸引ダクトが主配管から分岐して、工場内の切断・研磨などの各機械装置にたこ足のように配置されている現状であるが、身近に各吸引口があるため、時にはゴミ捨て口として小さな端材などはもちろん木材以外のものが集塵システムの中に入り込んだり、不注意にも休憩時間に吸った煙草火までも吸引させた例があるという。

このように、集じんシステムでは工場内に集じん幹線ダクトを這わせ、そこから各機械装置へ小ダクトを分岐させるとともに、工場外にサイクロンやバグフィルタを配置してサイロ、ホッパー等に貯蔵後あるいは直接ボイラー等の燃料とする場合が多い。しかも、これらの集じん系統では、一般に木工製品とは無関係な廃棄物を扱うという考えが強く管理があまり行き届かない場合が多い。そのため、貯槽室内の床やはりには貯槽からあふれたり、飛散した木粉が堆積して何らか

Table 6.1 Dust explosibility of wood dusts in a 1 m³ vessel.

木粉の爆発特性 (1 m³容器)¹⁾

木粉の形態	平均粒径(中径値:ミクロン)	着火源						
		火薬(2ヶ) ~10,000 J			コンデンサー放電火花 ~ 100 J		誘導電気火花 ~10 J	
		最高爆発圧力 (バール)	最大昇圧速度 (バール/秒)	爆発下限界 (g/m ³)	最高爆発圧力 (バール)	最大昇圧速度 (バール/秒)	爆発圧力 (バール)	昇圧速度 (バール/秒)
集じん粉(ブナ)	49	10.0	200	30	10.0	125	着火せず	
研磨粉	61	9.7	156	60	9.7	123	着火せず	
おが屑	1500	着火せず			—	—	—	—
かんな屑(マツ)	2300	着火せず			—	—	—	—

※1バール(bar) = 1.013気圧(atm)

の攪乱行為により容易に粉じん雲が舞い立つ状況にある。特に、このような貯槽の近くには往往にしてボイラー焚口があるので危険である。木粉の投入時に焚口から逆火して火傷を負った事故例も何件か報告されている。

以上、粉じんの火災・爆発危険性から見た木粉集じんシステムにおける問題点を、限られた現場調査から取り上げた。しかし、これは集じんシステムの維持管理に関するものが大部分で、十分行き届いた安全管理によって解決できる問題であろう。また、その必要性も強調せざるをえない。ところがこのような集じんシステムでは、本質的には可燃性ダストを扱うこと、着火源の完全排除は困難であること、の理由により状況によっては木粉の爆発・火災が起きると考えるのが我々の考えである。その状況の最も重要な場合として、ここでは空気速度の影響について検討した。

6.1.2 研究の目的

集じんシステムも効率の面や設置場所の関係から、一プラントに何台も配置できないという理由で、大型高馬力のものが要求される結果、一部では集じん機の容量も次第に大型化するとともに高風量・高空気速度が使用されるようになってきている。その結果、このようなシステム中で一旦着火して爆発・火災が起きると、高速流のため瞬時にシステム全体へ火災が拡大する恐れがある。他方、ある個所で着火源が与えられたとしても高気流によって冷却されて、木粉の発火温度までは加熱されえないであろう、ということも考えられる。このように、気流速度が木粉の火災伝播にどのような影響を及ぼすかは、あまり明らかではない。

これまで木工作业に関する火災・爆発を扱った研究として、Scholl¹⁾は移動型簡易バグフィルタ(我国でも同種のもの、木工工場で使用されている)内での粉じん爆発実験を行っているが、空気速度の影響については述べていない。吉田ら²⁾は、炭じん爆発の伝ばに及ぼす通気の影響を調べたが、通気速度は最大9.5m/sで炭じん棚を使用したものであった。一方、Essenhigh³⁾は炭じんの真空式空気輸送系で爆発限界に及ぼす空気速度の影響を検討した。これも炭じんについての報告であるが、木粉の場合にも大いに参考となるので後で紹介する。粉体空気輸送と集じんシステムでは、対象とする粉じん濃度がかけ離れているが、配管中でダスト流を扱うことに変わりはなく、共通点が多い。

また、産業界でのこの粉体空気輸送設備における可燃性ダストの防爆対策は重要な問題であり、関連する危険性を十分解明した後で普及を計るべきであるが、現実には扱われるダストの種類も多く、広範囲な使用例および大規模化に著しいものがある⁴⁾。

そこでEssenhigh³⁾の使用した配管は2インチ(5cm)管で実用的には小さすぎることや、上記の粉体空気輸送設備との関連で、ここでは3または4インチ管を使用した実大規模の配管内での木粉ダストの火災伝播に及ぼす輸送空気速度の影響を実験的に検討して、集じんシステムにおける爆発・火災危険性を明らかにすることにした。また、集じん装置としてバグフィルタを使用し、これに防護対策として現在最も広く活用されている爆発ベントを設置して、開放時の火災の噴出状況やバグフィルタの安全性などについても同時に観察・検討することを目的とした。実験データは種々の制約から非常に限られたものであったが、ほぼ初期の目的を達することができたので以下報告する。

6.2 実験

6.2.1 実験装置

実規模集じんシステムあるいは空気輸送装置として、ロータリーフィーダ低圧圧送式を使用するとともに、粉体の回収は特にバグフィルタによった。バグフィルタのみの運転の場合には集じんシステム(真空吸引式)となるが、輸送量が十分でないので、ここでは大部分圧送式に依存したので以下空気輸送システムとして述べる。装置の概略を、バグフィルタの構成図とともにFig. 6-1に示す。輸送管は、内径3及び4インチ(7.6および10.2cm)鋼管(3B, 4B)を使用した。

まず、実験(A)では粉体投入口から1.5mのところまで3B管から4B管へ管路を拡大して、以後水平配管29.5mを輸送させ、以下ベンド及び直管、半円部を通りバグフィルタの上部から下方へ圧送流動されるようにした。この場合の4B管全長は、37.0mである。なお、管路拡大部には長さ12cmの接続管を使用して、流れが円滑に進むようにした。

一方、実験(B)では長さ51.5mの3Bを接続して、その後に接続管を通して4B、35.0mを連結した。この場合の輸送距離は、101.5mに達する。いずれの実験でも、配管の一部は同径のガラス——実験(A)では

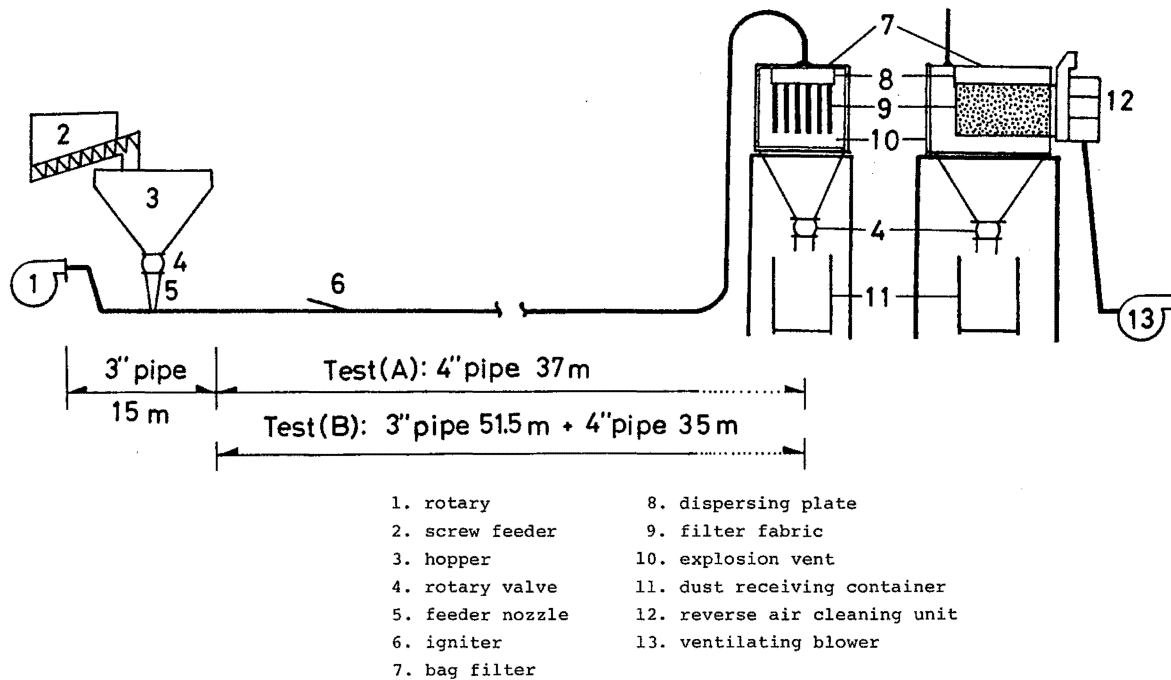


Fig. 6-1 Experimental arrangement
実験装置配置図

長さ25cm, 実験 (B) では1 m管——で置きかえて粉体輸送状況ならびに伝播火炎状況を観察できるようにした。

6.2.2 着火源

着火源は量論組織近くのアセチレン・空気/混合気の爆発火炎または誘導電気火花によった。

ガス着火源用として、主配管と同径の長さ1 mの側管を、流れ方向に対して30度の角度で主配管に接置した。この中で上記の混合気を調整、すなわち循環ポンプにより十分混合攪拌後、簡易ガス濃度計で濃度を測定した。この混合気を側管端部の電気火花で着火させ、閉囲用に使用したビニール・シートを爆発火炎が破って主配管内に噴出し、そこでのダスト流の着火源となるようにした。

一方電気火花着火源として、鋼管中央に先端を針状にした直径2 mmの鋼棒から成る対向電極を設けた。電極間隔は、7 mmとした。電気火花は、ネオントランス15,000 V (20mA) を使用して、少なくとも3秒間継続して放電させた。

電気火花およびガス着火による着火源の位置を、粉

体投入口から、実験 (A) では1.3 mおよび10 mに、実験 (B) では11 mおよび10 mにそれぞれ配置した。

6.2.3 バグフィルタ

バグフィルタは内容積1.34 m³で、封筒型濾布を形枠(100×48×2 cm)に被せて6枚水平方向に差し込んだものである。各濾布は逆圧払い落とし機構により内圧をかけられるようになっている。ホッパー上部の一側面は爆発ベント(爆発放散孔)として作動させるため、ベント・カバー——リノリウム/アルミはく・接着シート(Klingerit), またはポリエチシート(2 mm厚)——で被覆した。この場合のベント比は、0.73 m²/1.34 m³ = 0.54 (m⁻¹) になる。ベント・カバーの内側には、金属製格子枠を置いて負圧等による破損を防ぐようにしてある。また、バグフィルタ本体は角材により全体的に補強して耐圧強度を増すようにした。

実験 (A) では、輸送距離が比較的短く実験時間も長くかからなかったことから払い落とし機構および吸引ブローワーは使用せず、実験 (B) の一部においてのみ使用した。バグフィルタのロータリーバルブはいずれの実験でも駆動し続けた。

6.2.4 測定装置

バグフィルタの上部側面およびホッパー部には、圧力検出素子（トランジスタ型）を配置してそれらの出力からえられる爆発圧力を増幅後シンクロスコープに記録した。更に配管中での火花伝播は、配管に沿って2.5m（実験（A）の場合）または5.5m（実験（B）の場合）の間隔で配置したガラス窓付ナット中でホトトランジスタ（NEC, PT7L）により検知し、その出力を電磁オシログラフに記録した。他に、空気速度の測定にはサーミスタ式風速計を、爆発ベントの作動状況の観測には16ミリ中速度カメラ（最大；500f/s）などを適宜使用した。

6.2.5 木粉試料

この実験に使用した木粉試料は、タモおよびケヤキ材からなる突板^{ツキイタ}を研磨する際に集じんされた木粉である。使用量が多く、集じん回収粉を受領してそのまま使用したので、一部は研磨紙の砂粒の混入がみられた。Fig. 6-2に粒度分布を示す。個数基準の（幾何）平均粒径は17ミクロン、体積基準の平均粒径は29ミクロンであった。また、水分は5～6重量%にあった。

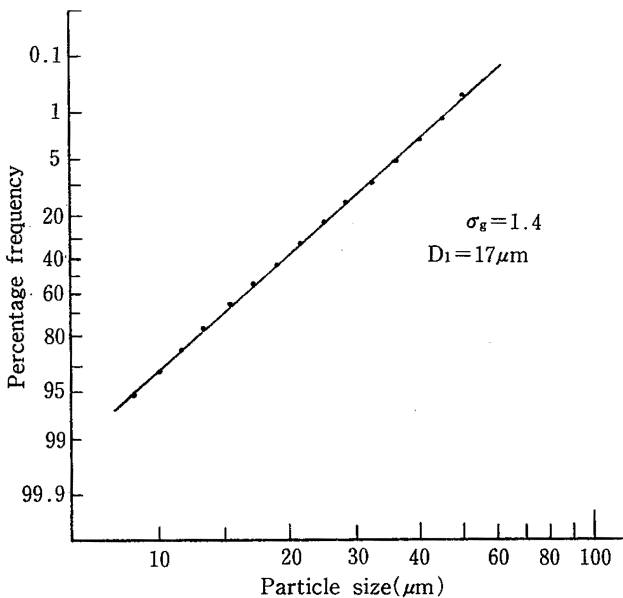


Fig. 6-2 A log normal particle size distribution plotted on log probability paper.
対数確率紙に表示した粒子径対数正規分布

6.2.6 実験方法

実験方法は、上記の空気輸送プラントを粉体供給量が一定になるように運転して適当な空気速度と粉じん濃度を達成後、着火源を起動して火炎伝播性およびバグフィルタでの爆発性を観測するものである。

まず、ホトトランジスタ設置用配管側面穴に風速計プローブを差し込んで空気速度を調節する。その後、一定速度で粉体量を供給して、再度粉体投入口上流で空気速度を調整する。別に、配管中の圧力分布を知る目的で液柱計を、またバグフィルタ内での圧損を知る目的でダイヤル式マノメータを設置して、それぞれ測定した。粉体供給量は、一定の粉体供給量が達成されるまで、スクリーコンベヤを定速度で回転し、一定時間内で任意の容器内に集めた粉体量を秤量して求めるとともに、空気速度から換算した風量とによって粉じん濃度を求めた。高濃度の場合は、輸送管を移送後バグフィルタを通して集じんされた粉体量から算出した。これらは、いずれも同一条件で数回くり返し、それらの平均値によって表示した。

以上の一定輸送状態において、任意の着火源を作動させ火炎伝ば等の計測を行うとともに、バグフィルタでの爆発の状況を16ミリフィルムあるいは8ミリフィルム撮影をした。爆発後、濾布の燃焼が継続するような場合は消火活動を行うようにした。

実験は野外で行った。日中温度範囲は21～32℃にあったが、粉体輸送中の配管壁は摩擦によって昇温するので温度の影響は考慮しなかった。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 爆発範囲に及ぼす空気速度の影響

着火実験の結果は、バグフィルタで爆発が起こるか、着火源からの火炎伝播が認められない場合のいずれかであった。当初予想したように配管途中で消炎することは、実験的に木粉については観察されなかった。爆発の場合は、ホトトランジスタの出力からみて着火源から下流方向の配管全長を火炎が伝播してバグフィルタ内で爆発を起こした。上流方向への火炎伝播、すなわち目立った逆火はみられなかった。

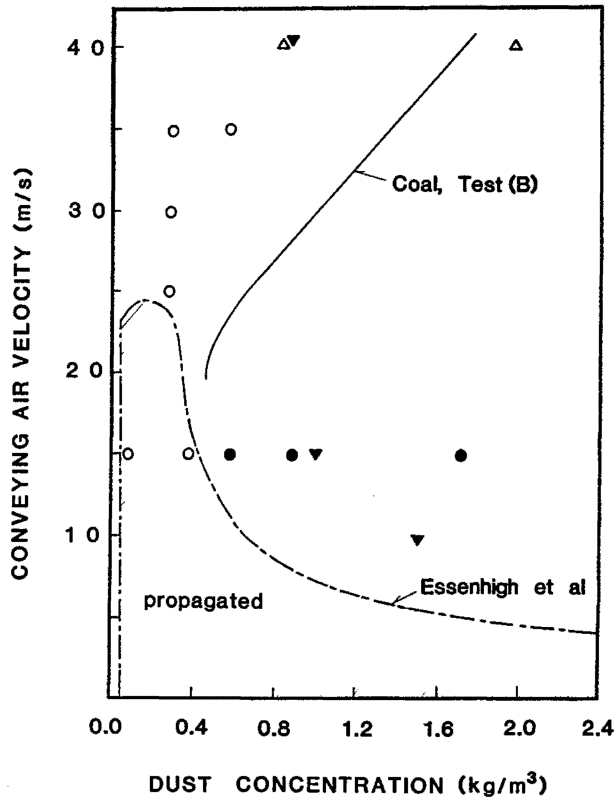


Fig. 6-3 Influence of conveying air velocity on explosibility of a wood-dust air mixture.
 Test (A): O explosion, ● no propagation,
 Test (B): △ explosion with a gas igniting source,
 Test (B): ▼ no propagation with a spark ignition.
 木粉の爆発範囲に及ぼす空気速度の影響

Fig. 6-3に実験結果を示す。データ点ははなはだ限られているので、炭じんについて別に行った実験(B)並びに Essenhigh ら³⁾の結果を併せて示し比較することにした。

実験 (A), 空気速度15m/sにおける木粉の上限界は, Essenhigh ら³⁾の限界曲線に近似している。ところで, 輸送状態でない密閉容器中での木粉の爆発上限界は, 明確なデータは見られないが, 平均粒径約50ミクロンで1.5~2.5kg/m³の範囲にあると思われる¹⁾。一般に可燃性ダストの上限界は, 2~6 kg/m³と示されているので⁵⁾, いずれにしても上限界は空気速度が0から増すにつれて低濃度側に急激に移行するようである。

これは, Essenhigh らの示した限界曲線と同じ傾向にある。しかし, 彼らの結果は約25m/sの限界速度以上の空気速度では, どのような炭じん濃度でももはや火炎伝播できないが, ここでは実験 (A), 35m/sにおいてもバグフィルタでの爆発が起きた。

このような大きい空気速度では, 輸送距離51mであっても1~2秒という瞬間に移送されるので, 配管の長さの影響をみる目的から輸送距離をさらに長くした実験 (B) を行ってみた。ただし, この場合には3 B管を接続して管径による相違をも調べられるようにした。その結果, ガス着火では輸送空気速度40m/sの場合にも火炎伝播して上限界が広がることがわかった。電気火花を着火源とした場合には, 着火しなかった。

以上の結果と同図に示した炭じんの結果を考慮して, 木粉の爆発限界に及ぼす空気速度の影響を次のように考える。最初, 着火エネルギーが小さい場合は, 火炎伝播可能な最大空気速度が存在する。着火エネルギーが大きいと一旦狭まった上限界は, 再び空気速度の増加につれて比例的に高濃度側に移行する。これに対して, 下限界は空気速度の影響を受けないようである。また, 木粉の爆発限界は炭じんのそれより少し範囲が広い。ここで, 着火エネルギーの近似的な大きさとして電気火花では10 J, ガス爆発火炎では10⁵J程度と予想されるが, エネルギー形態や作用形態が異なるので直接的な比較は困難である。一方, 詳細は不明であるが, 上記の Essenhigh ら³⁾は粉体投入口でガス炎着火を行っていることから, 電気火花よりもかなり大きいエネルギーを与えても十分大きい空気速度では火炎伝播不能となる可能性がある。

爆発限界に対する空気速度の影響の原因となる機構は, まだ良くわかっていないが, 定性的に我々は次のように考える。輸送管における実際の流動様式は均一流からは程遠いものであるが⁴⁾, ガラス管部でのダスト流の流動状態の観察やシリンダー状の伝播火炎などからみて十分な浮遊運動状態にあるものと思われる。しかるに, 管内の乱れは空気速度および木粉濃度とともに増す。従って着火の段階で, 着火帯に進入するダスト流による吸熱冷却は乱れが増すほど大きく, 消炎または着火不可能となるだろう。この場合には, 可燃性ダスト自体が熱吸収体として作用することになる。輸送管においては, 空気速度や混合比に関係なく空気および粉粒体の相対速度はほぼ一定であることが知られている⁴⁾。そこで, 空気流だけによる冷却と異なっ

て、粉じん濃度が大きい程ダストによる冷却の役割が増して輸送空気速度の増大につれ上限界は急激に低下するとともに、ついには伝播不可能になるものと思う。一方、ガス爆発炎と接触して形成されるダスト火炎は、着火源の噴出の勢いもあるので比較的長く、着火段階での消炎のためには十分な量の未燃ダスト流の混入を必要とする。空気速度が小さい場合は、時間的にも未燃ダスト流が混入して消炎される余裕があるが、約25 m/s以上の空気速度では乱流下でも冷却は不十分でダスト火炎は空気速度に乗ってそのまま配管中を移送されてしまうようである。このことは、平均火炎速度の変化によっても裏付けられよう。

6.3.2 火炎速度

配管に沿って隣接するホットランジスターの出力から求めた平均火炎速度比の変化を、Fig. 6-4 および5に示す。火炎速度比は、3B管で測定した平均輸送空気速度に対する平均火炎速度の割合である。ただし、実験(B)における3Bから4Bへ管路を拡大した場合の4B管中での空気速度は換算値を用いた。

まず、Fig. 6-4において概略的な傾向として、火炎は初め輸送空気速度の数倍の速さに加速されるが、次第に減少して輸送速度に近づいて、あるいはそれ以下でバグフィルタに到達する。空気速度が大きい程、大きく加速されるようだ。しかし、データにはかなりの変動がみられ、バグフィルタに連結された曲管部に達する前に、火炎速度を再度加速される場合も多い。これは、濃度のバラツキあるいは曲管部での脈動流の影響によるのではないかと思う。一方、Fig. 6-5では着火直後の加速は明らかにはみえないが、その後は空気速度の2倍以内の速度で移送される。輸送距離の大部分では著しい加速を受けない、という点で上記の場合と同じであると考えられる。

木粉火炎が配管中でどのような形式で伝播していくのかは、より詳しい火炎伝播に関するデータが不足しているので十分明らかでないが、幾つかの観察から手掛かりは与えられるように思う。まず、着火直後の火炎の加速は、均一濃度の爆発性混合ガス中でのそれに類似している。すなわち、燃焼生成物の熱膨張によって引き起こされるものだろうと思う。電気火花着火の場合でも加速現象が見られることは、他のダストで確かめられた。しかし、その後の配管中での火炎伝播は混合ガスあるいは輸送空気速度があえて存在しない場合

の粉じん爆発の場合と著しく異なる。通常、水平な配管中では管端条件によっても火炎伝播状況は異なるが、

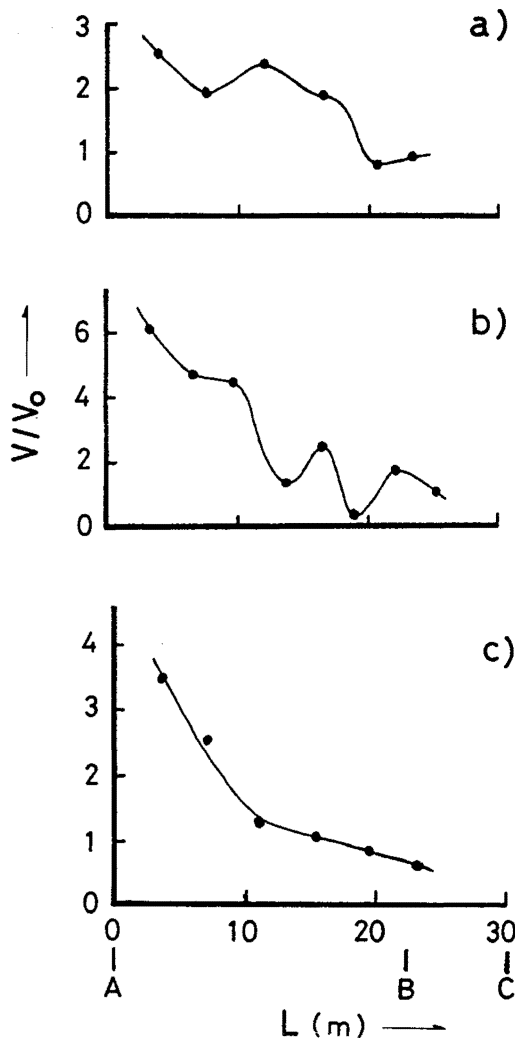


Fig. 6-4 Variation of flame speed ratio along the pipeline in test (A).

V/V_0 : flame speed (m/s)/conveying air speed (m/s)

L : distance along the pipeline,

C_0 : dust concentration (kg/m^3),

A : igniting point,

B : pipe bend section,

C : entrance of the bag filter.

V_0 (m/s) / C_0 (kg/m^3): a) 25/0.3, b) 30/0.3, c) 35/0.6

実験(A)における配管に沿った火炎速度の変化

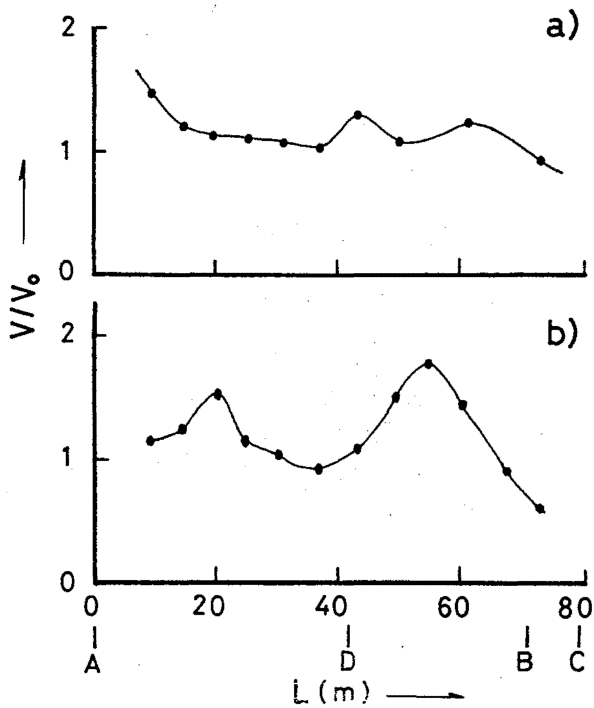


Fig. 6-5 Variation of flame speed ratio in test (B).
 $V_0(\text{m/s})/C_0(\text{kg/m}^3)$: a) 40/0.88, b) 40/2.0
 実験(B)における火炎速度比の変化

少くとも乱れの存在によって火炎は著しく加速されることはよく知られている⁵⁾。従って、木粉火炎での高速気流中での減速はこのような配管中での特徴的なことと考えられる。

ガラス管部で観察した火炎の大部分は、赤橙色、円筒状で先端は明確なものではなかった。その厚い火炎は、下流方向へ燃焼生成物とともに押し流される。ホットランジスターの出力時間と平均火炎速度から求まる見掛けの火炎の長さの変化を Fig. 6-6に示す。この図から一旦加速された火炎は、当然ながら平均火炎速度が大きい程全般に比較的長い。中には110mを越える場合や火炎長の変化の大きい場合もある。これらの長くて厚い火炎が、当初加速段階で火炎帯前方の未燃ダストを巻き込んで、そこでの粉じん濃度が高くなって次第に火炎速度が低下する；とともに、高速流のため瞬時にバグフィルタに到達するので、その効果が継続される、のではないと思われる。一定条件のもとで、火炎速度は粉じん濃度に依存し、最大速度を示す実験上の量論組成以上の濃度では、高い濃度ほど減少する。

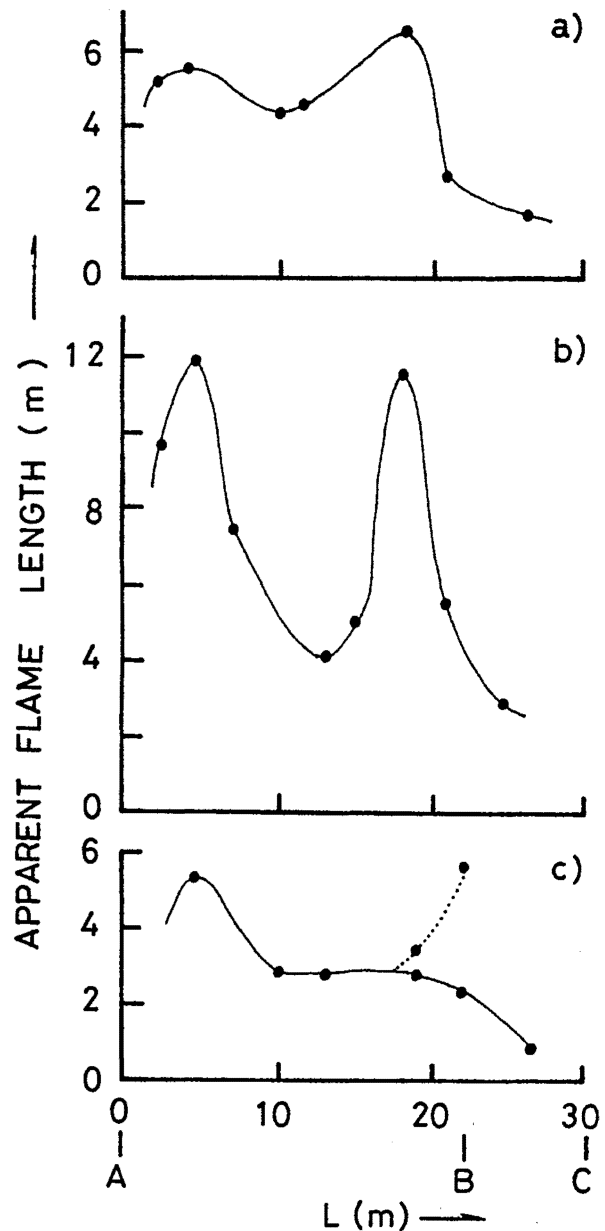


Fig. 6-6 Change of apparent flame length along the pipeline.
 $V_0(\text{m/s})/C_0(\text{kg/m}^3)$: a) 25/0.3, b) 30/0.3, c) 35/0.6 with separated flame.
 配管に沿った見掛けの火炎長さの変化 (点線は分岐火炎を示す)

また、ダスト粒子の燃焼時間は粒径に依存して、比較的長い。このように、目下のところ十分なデータがなく、平均火炎速度が次第に減少する理由として、乱流下にもかかわらず火炎帯前方での粉じん濃度の高濃度化によるものと考えざるをえない。それにしても、一

且着火すればダスト火炎は火炎速度の変動があるものの、輸送速度によって瞬時にバグフィルタまで押し流されることは明らかである。なお、曲管部で火炎が減速される事実は、適当な半径と管径の条件がそろえば、遠心力によりダストが配管外壁に押しやられることから予想される。このようなダストと空気分離が起これば、消炎される可能性も期待されるが³⁾、本実験ではみられなかった。

実験(B)の場合、管路を拡大することによりダスト火炎は加速されるのか減速されるのか、これだけの実験結果からは明らかでない。拡大部では、乱れは増すが、減速される結果ダスト粒子の流れが淀み、場合によっては加速に有利であったり、場合によっては消炎される機会もあるであろう。なお、配管内の爆発時の圧力変化の測定は十分でなかったが、流れに対して直角方向での管壁圧力はそれ程大きいものではなかった。

6.3.3 バグフィルタにおける爆発・火災危険性

爆発ベントの開口面積を大きく取るとともに、破裂圧の低いベント・カバーを使用したので、バグフィルタ本体の破損を防ぐ目的からは、爆発ベントは非常に有効であった。しかし、爆発放散に伴う噴出火炎の拡がり大きく、放散範囲として十分な安全空間を取る必要がある。また、不燃性濾布をできるだけ使用することが望ましい、などいくつかの問題点が観察された。

Fig. 6-7はバグフィルタ本体での圧力応答曲線の例で、ベント・カバー破裂時の昇圧速度は僅かに $0.3\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ で、破裂圧力はベント・カバーの静的破裂圧に一

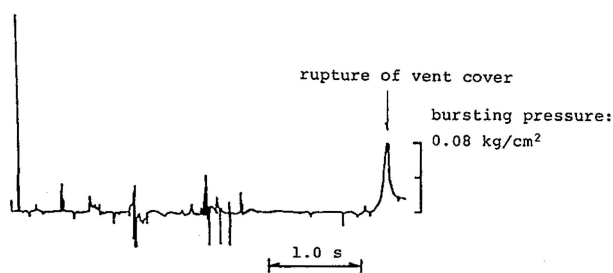


Fig. 6-7 Explosion pressure-time record in the filter unit with relief vent.
放散ベント付バグフィルタ内爆発圧力記録例

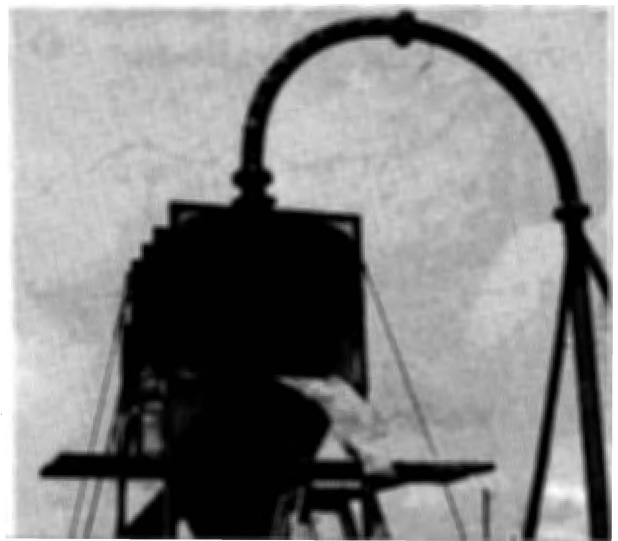


Photo 6-1 Rupture of the explosion vent cover.
爆発ベント・カバーの破裂

致する。なお、カバー破裂前に瞬間的な正ピーク圧や減圧が記録されているが、これらはノイズまたはバグフィルタ内でのダスト流の動きを示すものと思われる。Photo 6-1は、カバー破裂後の様子を示すもので、この場合枠組の縁で千切れるように破裂している。カバー破裂圧は、その固定方法によっても影響されるので支持枠などに十分な配慮が必要であろう。

一方、バグフィルタ内で爆発した場合、特に弱い爆発でない限り化繊濾布(テトロン製)は、Photo 6-2に例を示すように焼損した。焼損の程度は、バグ内での爆発の激しさに対応して部分的な焦げから、爆発放散完了後も継続して燃え続け消火しなければ溶融、完全焼失するものまで種々みられる。濾布の焼損は、付着ダストの燃焼によって助長される。特に、濾布繊維間に安定した一次付着層が形成されれば、同時燃焼するので消火もしにくくなる。また、写真からわかるように濾布の下部焼損状態が特にひどいことから、バグ・ホッパー内で爆発火炎が形成されそれによる焼損であることがわかる。このことは、ベント・カバーを透明シートで置き換えた時の火炎の挙動からも明らかである。

16ミリ撮影フィルムから見た火炎の挙動は、ほぼ次のようになる。まず空気速度の勢いでバグフィルタ内へ噴出した火炎は、ホッパー内に堆積しているダストを舞い上らせて大きな爆発を起こす。この爆発火炎は濾布間で火炎伝播が姉げられて小火炎に分割される。



Photo 6-2 Damage of the filter cloths from an explosion.

爆発による濾布の焼損

同時に、ベント・カバーが破裂して爆発火炎は放散される。その際、バグ内の未燃ダストと一緒に放出されて外での燃焼を継続させる。以上の過程は、爆発の激しさによらず適応されるようである。

爆発ベントの開放による噴出火炎は、爆発に関する粉体量及び放散段階に大きく依存するであろう。低いカバー破裂圧などの理由で、バグ内ホッパーで爆発火炎が形武された後早い段階で放散された結果、すなわち燃焼の初期段階で放散されるので、噴出火炎は未燃焼ダストをかなり含みこれに外部の空気が一部とり込まれて激しい燃焼を継続したものと思われる。

噴出火炎の最大直径は3.5mで、いわゆるファイヤーボールを形成した(Photo 6-3)。これは当然ながら、気象条件での風の影響を受け、向い風が強いと押し流されたりして拡大する(Photo 6-4)。これらのファイヤーボールの燃焼時間は数秒程度で消滅してしまうが、爆発放散後、輸送管内への粉体供給を停止しない限り、バグ配管入口で火炎が継続して噴出してバーナー状に燃え続けることがある。これらの火炎は、バグフィルタ内にダストが残存すると、それを舞い上げて二次爆発の着火源となる。通常、バグ内で一旦爆発を起こすとバグ内は火炎で占領され著しい酸欠状態になる。その点粉体空気輸送では輸送空気を伴うので爆発後も粉体を送り続けると、バーナー状火炎を形成して二次爆発をひき起こすことは容易である。もっとも、爆発放散

直後はベントを通して外気が浸入することも可能であるが、そのためには強制的な攪判が必要だろう。

6.3.4 その他の着火源による結果

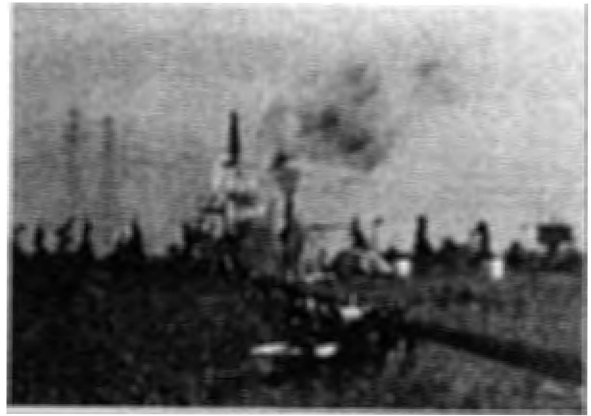
図1における実験プラントで、圧送用ロータリー・ブローを取りはずし、バグフィルタ側ロータリー・ブローを運転することにより吸引式粉体輸送(または集じん)システムとして、実際的な着火源、すなわち煙草火および衝撃火花を木粉流とともに吸引させ、爆発をひき起こすかどうかを検討した。

まず、長さ約5cmの火のついた紙巻煙草吸殻を投入した場合、粉じん濃度 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 、輸送空気速度 $15\text{m}/\text{s}$ までは、実験(A)および(B)の配管条件でも直接爆発をひき起こさなかった。しかし、吸殻は粉々になってバグフィルタ内に集塵されそこでくすぶり燃焼(燻焼)、すなわち白煙を発する火災に至った。特に、集じん機ロータリー・バルブ下に置いたドラム罐内に堆積していた木粉層上に吸殻の小破片——巻紙が破れてバラバラになったもの——が多数点排出され、それぞれの点からくすぶり燃焼が見る間に進行して行った。(Photo 6-5)。また、それらが粉体層中に埋もれてしまうと、発見が困難になるばかりでなく、くすぶり燃焼の消火もなかなか困難である。バグ内では空気流の存在で、くすぶり燃焼の進展は意外と早く、適度な濃度のダスト雲と接触あるいは、くすぶり中のダスト層が分散浮遊されると容易に爆発的に燃焼した。

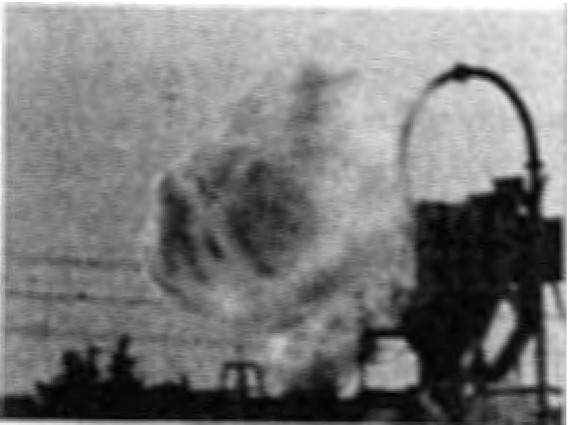
次に衝撃火花着火源として、直径1.2cmの鉄棒を回転中のジスク・サンダー(直径10cm、回転数15,000r.p.m.)に押しつけて発生する火花を吸引させた(Photo 6-6)これらの火花の着火能の評価は、火花発生方法が一定とは限らないので困難であるが、上記と同一条件では木粉の爆発・火災を発生させることはできなかった。配管側面の受光部ネジ穴から覗いて調べた結果、ダストを流さず空気速度 $10\text{m}/\text{s}$ で粉じん投入口から約5mの位置で火花の一部がわずかに肉眼で確認できる程度であった。粉じん流が存在する場合は、その間に火花の大部分は冷却されて消滅するようであった。このように、激しい気流中で木粉を衝撃火花により着火することは、今回の条件下では達成されなかった。



(a)



(b)



(c)

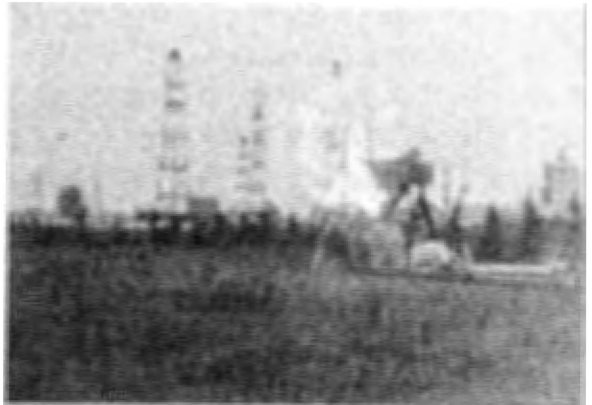
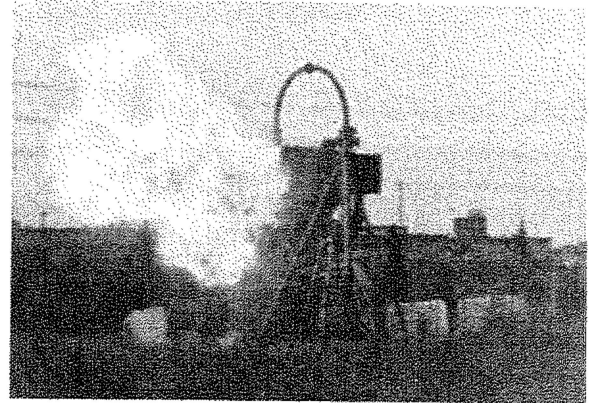


Photo 6-4 Some shapes of the vented dust explosion flames from motion pictures; Effect of the wind.

Test (A): a) and b), Test (B): c)

放散爆発火災のいくつかの形状 (風の影響)

Photo 6-3 Development of a fireball after the vented wood-dust explosion in the bag filter. Test (A): V_0 (m/s) / C_0 (kg/m^3): 35 / 0.3. Picture interval, approximately 0.1 s

バッグフィルタ内における木粉爆発放散後のファイヤ・ボールの進展

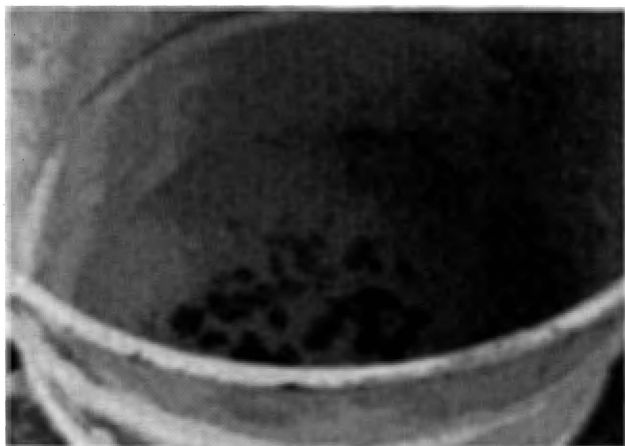


Photo 6-5 Smouldering spots in the dust receiving container, formed with a glowing cigarette-butt.

煙草吸殻火によって、ダスト回収容器内に形成された燻焼点



Photo 6-6 Producing the grinding frictional sparks as an ignition source.

着火源としての衝撃摩擦火花の発生

6.4 実験結果の木粉集じんシステムへの活用

本実験結果から、約20m/sまでの空気速度は木粉の爆発上限界を低減させるようであるが、それ以上の空気速度は逆に上限界を拡大させるような効果を及ぼす。内径10cm以下の配管で均一木粉濃度が定常的に維持できるような場合には、爆発領域外での操業は危険性がないであろう。しかし、木粉集じんシステムで上限界以上の均一濃度を扱うケースはほとんどなく、時間的

にも濃淡の激しい不均一な場合でむしろ下限界附近での濃度が問題になろうかと思う。このような場合は、爆発範囲内であれば空気速度と粉じん濃度による予防対策を講ずることはできない。これに対して、粉体空気輸送システムでは、上限界の数倍以上の輸送濃度で適当な空気速度を使用することにより予防対策が達成できる、といえよう。従って、木粉集じんシステムでは、低濃度で高速気流があるとしても十分火炎伝播の危険性があるものと考えべきである。

一方、火炎伝播が10cm以上の管径でどのような影響を受けるかまだ明らかでない。大規模な炭鉱坑道を使用した爆発火炎伝播の研究は数多く行われており、直径40cmの鋼管中で2,000m/s以上の火炎速度も記録された例⁹⁾があるが、気流速度の影響はわからない。しかし管径が増した場合には粉体流動状態も変化するので、大口径配管中での火炎伝播はこれらの流動状態に大きく依存することになるであろう。

集じん装置としてバグフィルタを使用する場合、濾布堆積ダストの払い落とし操作は避けられず、その場合装置内粉じん濃度は制御できるものではなく、集じんダスト中の濃度とも関係なく、爆発性雰囲気形成する。従って、着火源があれば爆発を起こす危険性がある。その予防のためには、プレダスターなどを設けてバグフィルタ内に着火源を吸引しないことである⁹⁾。サイクロンはプレダスターの一つとなりえるが、伝播火炎などの着火源に対しては効果がない。現状では、着火源の排除に優れたプレダスターの研究は十分でなく、バグフィルタ内での爆発に備えて爆発ベントを設けることを推奨する。

Bartknecht⁹⁾は、バグフィルタに対するベント面積推奨値を示している。その場合、配管中の伝播火炎が高速度でバグフィルタ内に噴出して、大きな着火源とならないように配管を配置させるべきであることを注意している。今回の実験では、垂直管および半円曲管を使用してバグフィルタ上部から落下流となるようにダスト流を誘導した。噴出火炎による爆発を考える場合、この入口はホッパー部での爆発の着火源としては最も離れた位置にある。そのためか、噴出火炎を着火源としたこのバグフィルタの爆発放散は成功したが、一般的に適用できるものかどうか明らかでない。しかし、爆発ベントを適切に設置して、吸引ダクトからの噴出火炎あるいは何らかの着火源がホッパー内堆積ダストや濾布付着ダストをできるだけ浮遊分散させ攪

乱を与えることないようにダクトを配置させれば十分な爆発放散が達成されるものと思う。

爆発ベント作動時の噴出火炎の最大到達距離は、水平方向で約4mであった。この距離は種々の因子によって影響を受けるので、それらの関係を明らかにして安全距離を決定することは困難な問題だろう。その中で、爆発火炎に巻き込まれるダスト量は大きな因子の一つと思われるので、ホッパー内の堆積ダストはできるだけ排除するようにすることが望ましい。また、噴出火炎はファイヤーボールとなって上昇する場合があるので、ベント周辺は十分な距離の立入禁止区域として、可燃物等を排除した空間空地とするべきであろう。この意味で、バグフィルタを屋内に設置することは望ましくない。止むをえない場合は、爆発ベントの開放を屋外に誘導するような対策も必要である。

爆発放散後、ダストの供給を停止しない限りバグフィルタ入口でバーナー状火炎が形成される。これを防止するためには、爆発火炎を一早く検知してダストの供給を停止するシステムの採用が必要であろう。この場合、ダストの供給を止めず空気源を停止することは、配管中に浮遊ダスト雲を形成させ、逆火をおこす可能性があるため危険である。必ず配管中に滞留するダストを排除後に、空気源を停止させるべきであろう。検知システムについては、炭鉱関係をはじめ種々のセンサーを含めて開発されているのでそれらを利用することができる⁸⁾。ただし、配管システムではセンサー感応面でのダスト付着による妨害などが問題になると思われる。空気の吹きつけを感応面に行う方法も利用できる⁹⁾。

今回の実験では衝撃火花によって着火することはできなかったが、実際の木粉の発火事故の原因は衝撃火花による例が多い。そのような例から見ても、十分高い温度の衝撃火花であるとともに発生点にダストが密着して存在することが着火に必要であるようだ。木工作業では木粉の発生は動力回転機械によることが多いので、回転部で衝撃火花が発生した場合着火する確率は非常に大きい。そこで、これらの火花が継続して発生しないように回転機械を直ちに停止できるとともに、集じんシステム中へ吸引されないように構造を改良することが必要になる。煙草火にみられるように、一旦集じんシステム中へ着火源が吸引されるとプレダスターによって途中で捕そくされない限り終端集じん装置での火災もしくは爆発は免れえないと見るべきで

ある。

以上、木粉集じんシステムでは空気速度によって着火源が移送され集じん装置内で爆発をおこす危険性があり、火炎は消炎されるよりも助長される可能性がある。従って、十分な予防対策^{6,7)}がぜひとも必要になる。

謝 辞

最後に現場調査や屋外実験に御協力頂いた多数の関係者各位にここに所属機関を記して厚く御礼申し上げます。

東京都新木場木材団地関係工場および同協同組合、静岡県島田市木工各関係工場、北海道苫小牧市木材団地各関係工場。

東京営林署、細田木材工業(株)、ディー・シー・イー・ヴォークス(株)、鐘淵化学工業(株)鹿島工場。

参 考 文 献

- (1) E. W. Scholl: Brand- und Explosionsgefahren an fahrbaren Einzel-absauggeräten für Hobelspäne und Holzstaub. Die Berufsgenossenschaft 129, 27(April), 1975
- (2) 吉田, 岡田, 渡辺: 炭塵爆発の伝播に及ぼす通気の影響について。採鉱と保安 63, 22, 1976
- (3) R. H. Essenhigh and M. G. Perry: Proc. Conf. Science in the Use of Coal, D. 1, Inst. Fuel, London, 1958
- (4) 上滝: 粉粒体の空気輸送(新版), 日刊工業新聞社, 1974
- (5) W. Bartknecht: Explosionen - Ablauf und Schutzmaßnahmen, Springer-Verlag, Berlin, 1978; 一部改訂英訳: Explosions, Course Prevention Protection, Springer, Berlin, 1981
- (6) 松田, 鈴木, 松浦: バグフィルタ・システムにおける粉塵爆発・火災防止対策, 空気清浄, 1, 20, 1982
- (7) K. N. Palmer: Dust Explosion and Fires, Chapman and Hall, London, 1973 (日本化学会訳編: 粉塵の爆発と火災, 粉体産業におけるその対策, 丸善, 1981)
- (8) 梅津: 炭鉱の作動式爆発伝播防止装置, 安全工学, 281, 14(4), 1975
- (9) I. Liebman, R. Conti and K. L. Cashdollar

: Dust cloud concentration probe, Rev. Sci.
Instr., 1314, 48, 1977

(昭和56年 5 月25日受理)