

災害調査報告書

セルロース製造工場における爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

要旨

A 社 B 工場でセルロース誘導体を製造するため、反応、粉碎、製品調整作業等を行っていたところ、突然爆発と火災が発生した。その結果、同社の労働者 2 名、業務請負会社及び外部協力会社の労働者 15 名の合計 17 名が火傷などを負い、そのうち 3 名は全身熱傷で重体となった。爆発・火災に伴い B 工場の建屋外壁、屋根、粉碎器の設置された部屋の壁などが大破し、当該工場内にあったセルロース誘導体が燃えて、ケーブルの焼損や火炎により建物の損傷も見られた（図 1～3 参照）。

また爆風によって、隣接する工場建屋の外壁、窓ガラスの破損やシャッターの変形などが発生し、工場外周辺地域の家屋で窓ガラスや扉の破損などが発生した。

本件災害については、爆発災害が発生した経緯、爆発災害に関与した可燃性物質と着火源を中心として調査を行った。

爆発が発生した経緯については、A 社 B 工場の 2、3 階に設置された No.1 ミキサーで作業者が袋詰めされた粘度調整用セルロース誘導体をミキサーに投入する作業を行っていたところ、爆発が発生し、これが長年の操業で作業場内の設備の表面や梁等に堆積していた粉じんを巻きあげて爆発性雰囲気を形成することにより、さらに数回の粉じん爆発が連鎖的に発生したためと考えられる。

No.1 ミキサーの粉体投入口周囲には、特に着火源となるものは見あたらないこと及び作業場の床の材質やセルロース誘導体の体積抵抗率及び当日の気象条件などから、No.1 ミキサー内がセルロース誘導体による爆発性雰囲気となっていたところに、静電誘導などによって電位が上昇した作業者からの静電気放電、あるいは帯電したセルロース誘導体粉体からのコーン放電が発生し、これが着火源になってセルロース誘導体が着火・爆発し、これが端緒となって一連の爆発が発生した可能性が高いと推定される。



図 1 中間タンクの損傷状況（一部膨張している）

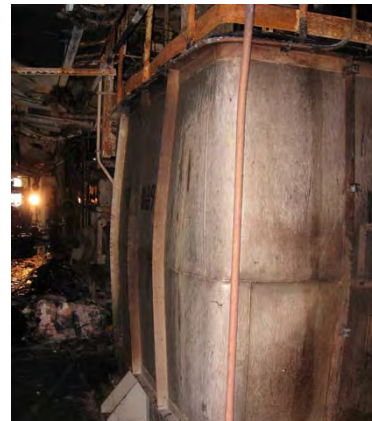


図 2 製品タンクの損傷状況（焼損と膨張が発生している）



図 3 工場内部の損傷状況

1. 災害発生要因の検討

1.1 爆発機構及びその威力

1.1.1 周辺の被害状況

被害は、ガラス窓などの破損が半分程度であり、飛散物の詳細な検索が行われていないため、飛散物による被害か爆風圧による被害かは、判別しがたい。しかしながら、残り半数程度の被害はシャッターや窓枠の歪み等であり、その原因が飛散物ではなく爆風によるものと推測される。被害は 100～260m の範囲で分散しており、最長距離と最短距離を除いた平均は約 160m である。したがって、160m 程度の距離で、家屋を軽度損傷する程度の爆風が爆発により発生したものと考えられる。

1.1.2 爆風曲線による爆発威力の推算

通常爆風は、その爆発のエネルギーと爆心からの距離、そして背景となる大気圧に影響されることがわかっているⁱ。この関係を簡単に示すため、正規化された爆風の圧力と、正規化された距離とを関連付ける曲線を爆風曲線(Blast-curve)と呼び、爆風の推算に広く用いられている。図4に参考文献ⁱⁱの詳細計算による爆風曲線を、大気圧を基準として換算したものを示した。横軸の換算距離の単位である $m/J^{1/3}$ は変則的な単位ではあるが、爆風の強さがエネルギーの 1/3 乗に比例するいわゆる Hopkins 則を端的に表している。

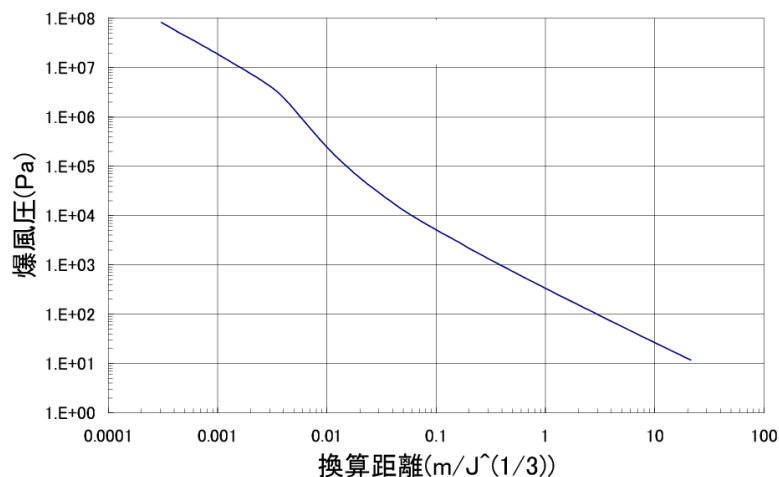


図4 大気圧における爆風曲線

前節の結果を受けて、爆風により家屋が一番軽微な損傷を受ける、すなわちガラスが破壊される一般的な圧力として 1kPa を採用する時ⁱⁱⁱ、この圧力が 160m の地点で発生していたとすると、爆風曲線から 1kPa を与える換算距離 $0.4m/J^{1/3}$ で実距離 160m を除して 3 乗することで、爆風に寄与したエネルギーを見積もることが出来る。この見積りにしたがって計算すると、エネルギーは

$$(160/0.4)^3 = 64 \times 10^6 \text{ [J]} \quad (1)$$

となる。ここで注意すべきは、図4に示した爆風曲線は、火薬類について成立するものであり、爆風圧力の上限である。つまり、得られた 64MJ は、主たる被害を与えた一回の爆発（以下「主たる爆発」という。）に関与したエネルギーの下限であり、実際にはより多くのエネルギーが必要であったと考えられる。

ⁱ Baker, W.E.(1973).Explosions in air. Austin, TX: University of Texas Press.

ⁱⁱ 同上 p156 Table 6.3

ⁱⁱⁱ <http://staff.aist.go.jp/n-matsunaga/damage.htm>

1.1.3 爆発規模からの爆発機構の推定

炭化水素の燃焼熱は単位質量あたりの約 $45\text{kJ/g}^{\text{iv}}$ でほとんど種類によらず、炭化水素の単位質量あたりの酸素消費量も 3.4g/g^{v} でほぼ一定であるため、燃焼した物質はガスでも粉じんであっても、酸素消費量に対する炭化水素の発熱量は 13kJ/g で一定と考えてよい。また、セルロースのような酸素を含んだ物質であっても、酸素消費量に対する発熱量は $13.03\text{kJ/g}^{\text{vi}}$ で、やはりほぼ一定である。したがって、前項で得られた爆発の下限 64MJ が、通常の炭化水素の燃焼によって得られたものとする、少なくとも

$$64 \times 10^6 / (13 \times 10^3) = 4.9 \times 10^3 \quad (2)$$

で 4.9kg の酸素が必要となる。この酸素質量から、Boyle-Charles の式 $V=nRT/P$ に、当日の気温 $T=3.8^\circ\text{C}=276.95\text{K}$ 、圧力 $P=1021.7\text{hPa}$ と、 4.9kg を酸素の分子量 32 で割って得られる酸素のモル数 n を代入することで、必要な酸素の体積 V を計算できる。

$$V = \frac{4.9 \times 10^3}{32} \times 8.31 \times \frac{276.95}{1021.7 \times 10^2} = 3.45 \quad (3)$$

R は気体定数で、気体の種類によらず 8.31J/molK である。大気中の酸素濃度は $21\text{vol}\%$ であるので、得られた酸素量 3.45m^3 を 0.21 で除して得られる $3.45/0.21=16\text{m}^3$ が、主たる爆発に最低限必要な空気量となる。

以上の計算により得られた 16m^3 は、変形の見られた中間タンク、ミキサー、製品タンクのいずれの容積よりも大きいため、どの容器での爆発を想定しても実際の被害状況と一致しない。また、製品ラインは中間タンクからミキサーを経由して製品タンクへと至る形となっているが、ミキサーの前後の部分で燃焼の伝播が停止していることが確かめられている。三つの機器において、爆風が重なるような時間範囲内 (0.1 秒程度) で爆発が起こる可能性は極めて低く、この可能性は除外してよい。また、上記に見積もられたような爆発が起きていたとすれば、容器は単純な変形では済まず、大きく裂けていなければならない。しかしながら、工場内の装置の焼損は激しくとも、大きく裂けたようなものは見当たらなかった。

以上のことから、主たる爆発は容器内ではなく、容器外で起こったと結論付けられる。

1.2 爆発した物質と爆発の拡大原因

1.2.1 B 工場にあった可燃物

発災当時、B 工場にあった可燃物は以下のとおりである。

- 粉末状セルロース誘導体（製品及び粘度調整用）
- 原料パルプ
- 塩化メチル
- 酸化プロピレン
- メタノール

これらのうち、酸化プロピレン、塩化メチルの配管は災害後も漏洩はみられず、爆発には寄与していないと考えられる。また、火災へ移行した際に原料パルプが燃焼を続けたため、原料の保管場所であった B 工場 4 階エレベータ前の焼損は極めて激しいものであった。しかしながら、原料パルプはロール状に巻かれた状態で保管されていたため、空気との混合は起こりえず、したがって爆発には寄与していないと考えられる。

メタノールに関しては、発災以前直近の環境測定の結果において若干の増加傾向が見られるものの爆発限界の濃度からすれば無視できる程度の量であり、仮に、広い空間に漏洩したとすれば、少なからずアルコール臭があるため被災者のいずれかの証言があるはずである。しかしながら、そのような証言は得られていない。

^{iv}例えば化学便覧

^v炭化水素の組成 CH_2 に対し、 1.5O_2 が反応するため、酸素の質量 48 を組成の質量 14 で割って得られる

^{vi}NIST Special Publication 958 pp.280-282(<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/sp958-lide/280-282.pdf>)

以上のことから、主たる爆発に寄与した物質は、粉末状セルロース誘導体であったと考えられる。

1.2.2 粘度調整用セルロース誘導体の性状からの考察

ここでは、災害発生当時ミキサーに投入中であったと考えられる、主に粘度調整に用いられていたセルロース誘導体（以下、「粘度調整用セルロース誘導体」という。）について爆発可能性を検討した結果からの考察を述べる。粉じんの爆発に関して、その詳細を論ずる場合、最小着火エネルギー、爆発下限濃度、粒径分布、爆発指数、爆発圧力を把握することが重要である。各々、着火のし易さ、着火する濃度、粉じんの舞い易さ、爆発の激しさ、爆発の威力を示す値である。粘度調整用セルロース誘導体について、資料により最小着火エネルギー10~25mJ、爆発下限濃度 60~70g/m³、平均粒径 38μm が得られている。

表 1 に、残った爆発圧力と爆発指数の測定のため行った 30L 球形容器による爆発実験の結果を示した。この爆発試験は、JISZ8817:2002 “可燃性粉じんの爆発圧力及び圧力上昇速度測定方法”の附属書 2 に定める 30L 球形粉じん爆発試験装置を使用して行った。この装置は、密閉したステンレス鋼製 30L 球形爆発容器内に、減圧下で試料粉体を下部から高压空気で吹き上げて分散させ、容器中心部の化学着火剤に電流を与えて点火したときに発生する 10kJ のエネルギーを用いて試料粉体を着火させる構造である。爆発圧力測定は、容器壁に対向して設置した 2 個の圧力変換器と記録計を接続して行った。最大圧力上昇速度の中で最も大きい値に、容器体積の立方根をかけたものが、その粉じんの爆発指数である。したがって、粘度調整用セルロース誘導体の爆発指数は $541 \times (0.03)^{1/3} = 168$ である。この値は「爆発圧力放散設備技術指針（改訂版）(NIIS-TR-No38)」の表 A.3 可燃性粉じんの爆発指数の例からみて、それほど突出した値ではない。これは火炎伝ば速度がそれほど高い値ではないことを示しており、爆風へエネルギーが転換していくのに、爆発物に比して長い時間がかかることを示している。

表 1 30L 球形容器による爆発実験の結果

粉じん濃度 [g/m ³]	爆発圧力 [MPa]	最大圧力上昇速度 [10 ² kPa/s]	爆発圧力到達時間 [ms]
250	0.59	214	70
500	0.82	472	52
750	0.85	529	41
1,000	0.82	486	37
1,250	0.77	541	37

爆発においてそのエネルギーは、放射熱、爆発した物質の温度上昇、周囲空気温度の上昇、爆発周囲の器物の破片の運動エネルギーに分散される。また、図 4 に示した爆風は、火炎伝ば速度が音速よりも速く、爆風へ転化されたエネルギーが爆風先端に集中するような爆発について用いられるものであり、本災害の原因物質と考えられる粘度調整用セルロース誘導体の火炎伝ば速度程度では、そのエネルギーは爆風先端には集中せず時間的にも分散されてしまう。そのため、本災害の粉じん爆発では、そのエネルギーのうち、数分の 1 程度しか最大圧力に寄与出来ない。したがって、本災害におけるセルロース誘導体の主たる爆発においても、その必要な空間は、1.1.3 節で見積もった数倍程度、すなわち数十~百 m が、妥当な値であると考えられる。

1.2.3 粉じんの分散について

爆発下限濃度 70g/m³ とエネルギーから必要と推算された空間の積、あるいは、セルロース誘導体の燃焼熱と爆風への寄与率から、分散した粉じんは数 kg 程度であったと考えられる。粘度調整用セルロース誘導体は、20kg を一袋として 5 袋が投入予定であり、単一の袋だけでも十分なエネルギー量を与えることができる。また、粘度調整用セルロース誘導体による調整を受ける側の、既にミキサー内に導入済みであったセルロース誘導体粉じん 200kg が噴出して、分散状態を形成した可能性は考慮すべきである。しかしながら、数十~百 m³ もの空間に十分な分量の粉じんが同時に行き渡るようなことは、単一の装置/場所からの噴出のみでは非常に難しい。粉じん爆発の実験を行う場合、約百 L 以上の規模において、単一の噴出口からでは良好な分散状態が得られず、その場合爆発に寄与する粉じん量は非常に少なくな

る。このような状況を補うために、爆発実験では多数の噴出口を用いるのが普通である^{vii}。

今回の災害で変形の見られた中間タンク、ミキサー、製品タンクの各々から噴出した粉じんが、協調的に粉じん雲を形成したシナリオは排除できない。しかしながら、少なくとも各々の間で配管を通した火炎の伝ばした痕跡はなく、中間タンクと製品タンクは、下部から火種を拾う可能性は低く、上部から火の粉をもらって爆発した可能性が高い。このことは、比較的大きな火災が発生し、タンク上部の配管を焼損した後に、各々が爆発したことを示唆している。したがって、協調的に粉じんを噴出させた可能性はそれほど高くない。

図 5 に、発災場所の B 工場とほぼ同様の操業をしていた A 社 C 工場のミキサー横上部の写真を示した。図 5 から、配管系、ケーブルラック等に大量の粉じんが堆積している状況が見られる。一度爆発があれば、堆積した粉じんが降り注ぐことで粉じん雲を形成することは、可能性を検討するまでもなく必然であったと考えられる。



図 5 C 工場のミキサー横上部における粉じんの堆積状況

より可能性の高いシナリオとして、長年の操業により溜まった粉じんが、始めの小爆発による爆風と振動で落ちて来るときに、粉じん爆発に適した分散状態を作ったというものが考えられる。2003 年 1 月 29 日に米国ノースカロライナ州キンストンのウェストファーマセウティカルサービス社の医薬品の製造工場で、死者 6 名負傷者 38 名の同種の災害が発生した際、米国 CSB (Chemical Safety and Hazard Investigation Board)が行った調査の最終報告書^{viii}で結論付けられた内容も、吊り天井上に堆積した粉じんが分散の原因であるとしている。

発災前の災害現場は、比較的清掃は行き届いていたとされているが、通常目に付かない部分に関しては定期的な清掃はなされておらず、B 工場でも、図 5 と同じような状況にあったと考えられ、このところが本災害の主たる発生原因だと考えられる。

1.3 着火源の検討

災害現場での調査の結果、ライターなどの明白な着火源は見あたらなかったことから、静電気による着火の可能性を検討するため、爆発に関与したと考えられるセルロース誘導体について、帯電特性、着火特性などを実験した。なお実験に用いたセルロース誘導体は D 反応機で製造されたもので、物性は爆発災害時に取り扱われたものと同一であるが、粘度及び粒径には相違がある。本セルロース誘導体は、J

^{vii} 例えば Large-Scale Dust Explosion Experiments to Determine the Effects of Scaling on Explosion Parameters, Combustion and Flame 89, pp.320-332

^{viii} <http://www.chemsafety.gov/index.cfm?folder=completedinvestigations&page=info&INVID=34>

(粘度 61.9、重量 1,550kg)、K (粘度 66.7、重量 1,210kg)、L (粘度 6.0 ; 重量 300kg) を混合して製造されており、粘度 40~60 の範囲に入るように設計調整されている。

1.3.1 セルロース誘導体の特性

セルロース誘導体の抵抗率、最小着火エネルギーなどの特性を測定した結果を表 2 に示す。平均粒径は 105.3 μm であった。

最小着火エネルギー(MIE)については粒径 73 μm 以下のセルロース誘導体を用いた実験によって 10mJ~30mJ の結果を得たが、この値は静電気のスパークによっては容易に着火爆発するレベルではなかった。なお今回の測定によって得られた最小着火エネルギーは資料の最小着火エネルギーのデータである 20~54mJ と矛盾のないものであった。

体積抵抗率については $3.8 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ と高く、表 3 に示す帯電の大きさの指標^{ix}では「大きい」に分類され、静電気の帯電が問題となるレベルであった。以下、セルロース誘導体の基本特性の測定方法、結果の詳細を述べる。

表 2 セルロース誘導体の基本特性

供試品	色	形状	平均粒径 $D_{50}[\mu\text{m}]$	最小着火エネルギー [mJ]	体積抵抗率 $[\Omega \cdot \text{m}]^*$
セルロース誘導体	白	不定形	105.3	10~30	3.8×10^{13}

*:印加電圧：直流 1,000V (1分値)

表 3 物質の帯電特性と抵抗率の指標

帯電の大きさ (帯電電位の目安) [kV]	体積抵抗率の指標 $[\Omega \cdot \text{m}]$	表面抵抗率の指標 $[\Omega]$
ほとんどなし[0.1 以下]	10^8 以下	10^{10}
小さい[0.1~1]	$10^8 \sim 10^{10}$	$10^{10} \sim 10^{12}$
普通[1~10]	$10^{10} \sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{14}$
大きい[10 以上]	10^{12} 以上	10^{14} 以上

1)形状

セルロース誘導体の形状は CCD 顕微鏡で撮影した図 6 に示すとおり、不定形であった。

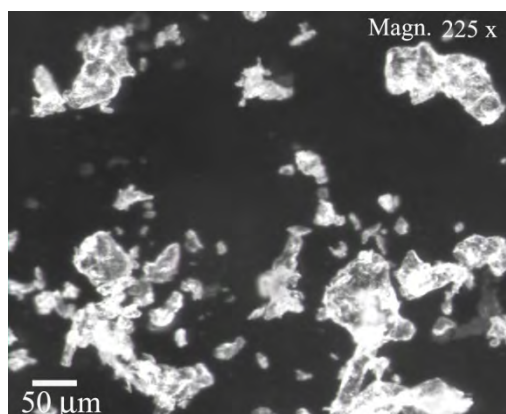


図 6 セルロース誘導体の CCD-顕微鏡写真

2)粒度分布

粒度分布測定には LDSA-1400A (東日コンピュータアプリケーションズ社製、図 7) を使用し、焦点

^{ix}静電気安全指針、p.51、労働省産業安全研究所(1988)

距離を 300mm、サンプリング時間を 2.0 秒に設定した上で 5 回測定した。なお、測定に先立ちセルロース誘導体は気温 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $10\pm 3\%$ の環境下において 24 時間静置した。

測定結果を図 8 に示す。平均粒径 (D_{50}) は $105.3\mu\text{m}$ であり、 D_{10} は $44.95\mu\text{m}$ 、 D_{50} は $105.3\mu\text{m}$ 、 D_{90} は $189.4\mu\text{m}$ であった。



図 7 LDSA-1400A

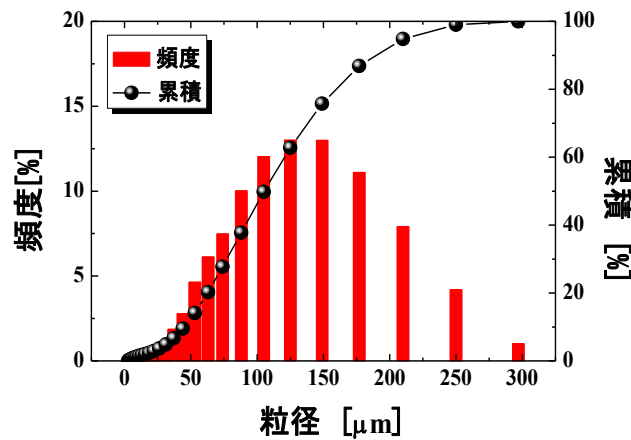


図 8 レーザー回折法によるセルロース誘導体粒径の測定結果(LDAWin1.21、Drytype)

3) 最小着火エネルギー

最小着火エネルギー測定は、図 9 に示すハルトマン式の測定装置を使用した。試料を容器の底部にセットし、その後に圧縮空気によって容器内に一様にセルロース誘導体を分散させ、一様に分散した粉体に対し放電エネルギーを与えて着火特性を試験するものである。

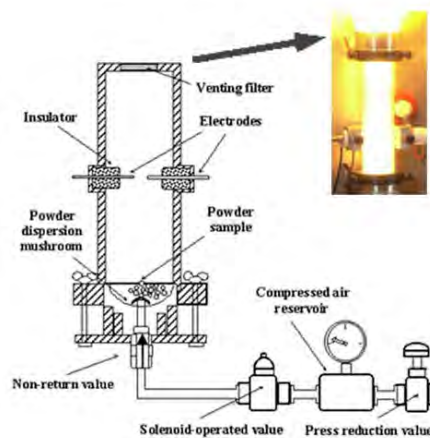


図 9 最小着火エネルギー測定に用いたハルトマン装置(MIKE-3)

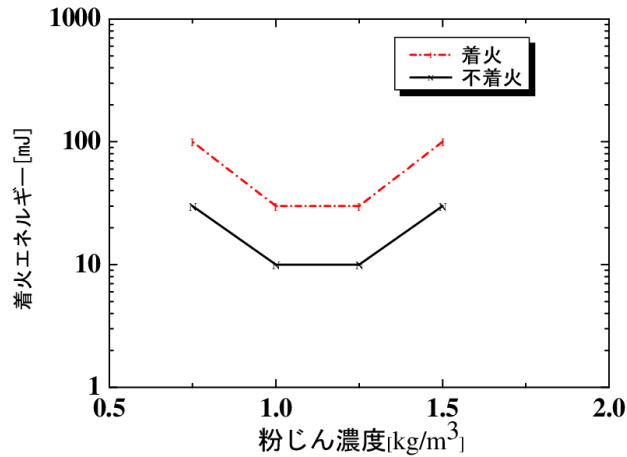


図 10 セルローズ誘導体の粉体濃度と着火エネルギーの関係

試験にはセルローズ誘導体の粒径が $73\mu\text{m}$ 以下の粉体を用いた。なお最小着火エネルギー測定に先立ち、セルローズ誘導体を 24 時間、気温 20°C としたデシケータで乾燥させた。測定結果を図 10 に示す。これらの結果より最小着火エネルギー (MIE) は $10\text{mJ} < \text{MIE} < 30\text{mJ}$ であることがわかる。

4)体積抵抗率

体積抵抗率の測定は気温 $26\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $10\pm 3\%$ の条件下で、図 12 に示す電極を用いて実施した (図 11 参照)。まず電極にセルローズ誘導体をセットし、高電圧直流電源から直流 $1,000\text{V}$ を印加して 1 分後の電流値に基づき体積抵抗率を求めた。体積抵抗率の平均値は約 $3.8 \times 10^{12} \Omega\cdot\text{m}$ となり、帯電特性として「大きい」(表 3 参照) に分類される。



図 11 体積抵抗率測定状況

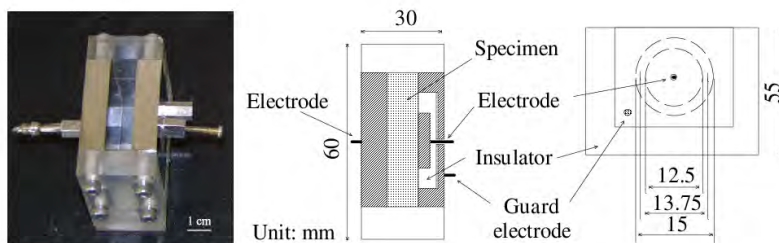


図 12 セルローズ誘導体の体積抵抗率測定に用いた電極

5)比電荷

本実験のみ平均粒径が 50 ミクロン程度と小さい粘度調整用のセルロース誘導体を使用した。ステンレス製の容器にセルロース誘導体を入れて 100 回振ったときのセルロース誘導体の比電荷は平均で $16.5\mu\text{C}/\text{kg}$ であり、最大では $22.9\mu\text{C}/\text{kg}$ であった。これらの値は一般の粉体の比電荷よりかなり高いので、浮遊粉塵濃度が高いと着火の危険性が高まると考えられる。

1.3.2 床に使用された塗料の電気的特性

爆発のあった B 工場の床塗料として使用されていたペイントの抵抗を測定した。測定には高電圧直流電源として TREK model 664、電流測定用エレクトロメータにはアドバンテスト製 R8240A を使用した。

1)ペイントの抵抗

ペイントをアクリル製容器の底面に塗布して、ペイントの抵抗を測定した (図 13)。 $5.6 \times 10^{12}\Omega$ と高い抵抗であり、静電気の帯電が問題となるレベルであった。



図 13 アクリル容器に塗布されたペイントの抵抗測定

2)ペイントの表面抵抗率

簡易測定法によって、ペイントの表面抵抗率を測定した。測定時にはアクリル板 (厚さ 3.5mm) に塗布したペイントの塗面上に、幅 10mm、長さ 25mm の銅テープ 2 枚を、25mm の辺が間隙 25mm で平行に対向するように貼り付けて測定した (図 14)。直流 1,000V 印加に対して $5 \times 10^{13}\Omega$ であり、帯電の程度は「普通」に分類されるものであった。



図 14 ペイントの表面抵抗率測定の状態

1.3.3 粘度調整用セルロース誘導体が梱包されていたラミネート袋の抵抗率

簡易測定法によって、セルロース誘導体が袋詰めされていた紙袋（以下、「ラミネート袋」という。）の内側に貼り付けられているポリエチレンシートの表面抵抗率を測定した。測定時にはテフロンシート上にポリエチレンシートを揚げ、同シートに幅 10mm、長さ 25mm の銅テープ 2 枚を、25mm の辺が間隙 25mm で平行に対向するように貼り付けて測定した（図 15）。1,000V 印加に対して $1.16 \times 10^{11} \Omega$ であり、帯電の程度は「小さい」に分類されるものであった。

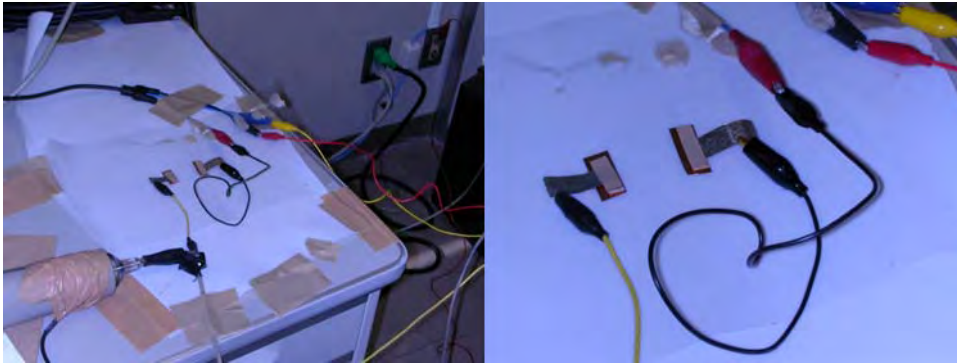


図 15 ポリエチレンシートの表面抵抗率測定

1.3.4 セルロース誘導体投入時の人体電位

セルロース誘導体約 5kg をラミネート袋から一度に空けるときの人体の電位を測定した。なお実験時の環境は気温 $15 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $55 \pm 3\%$ であった。

実験に際しては床にアクリル板（1000mm×1000mm×5mm）を敷いて、人体と床を絶縁し、人体の電位を測定した。セルロース誘導体を空けるときの様子を図 16 に示す。実験者の作業服はポリエステル 60%、綿 40%の混紡であり、靴は帯電防止ではない通常の安全靴であった。災害発生現場では帯電防止作業服、帯電防止作業靴を着用していたが、これらは人体の帯電電荷を速やかに漏洩させる目的で使用されるものである。今回の実験のように帯電電荷を漏洩させない条件下では、帯電防止作業服の影響は小さいので作業服について帯電防止を考慮しないこととした。

図 17 に人体電位の時間変化を示す。セルロース誘導体をラミネート袋から空けて袋に付着したセルロース誘導体を払い落とした後に人体電位が最大値である -2.2kV となった。この人体電位は帯電したラミネート袋による静電誘導と人体帯電の複合された結果と考えられる。



図 16 セルロース誘導体を空けるときの実験状況

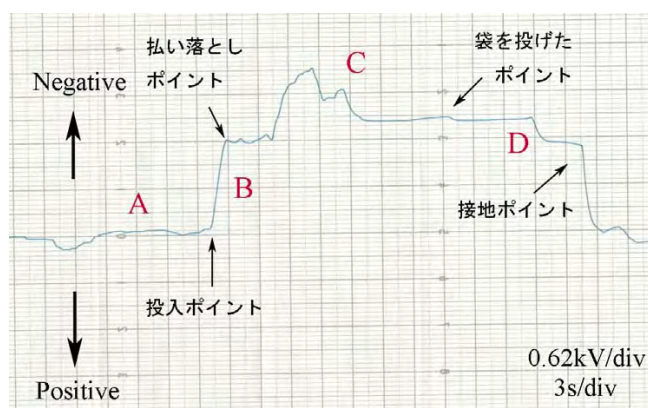


図 17 粉体投入時の人体電位の変化

1.3.5 考察

一連の爆発発生の端緒については、B 工場の 3 階にあるミキサーで最初の爆発が発生したと考えられている。爆発した可燃性物質については、1.2.1 で述べたようにセルロース誘導体であったと考えられる。一方着火源であるが、表 4 に示す着火源を検討した。取り扱う物質が塩化メチル、酸化プロピレン、セルロース誘導体粉体など爆発危険性のあることは十分認識されていたことから、ライターなどの明白な着火源は見あたらなかった。4 階には足場が組み立てられていたが、爆発の発生した時点では金属工具類を用いた作業も無かったとの関係者の証言に基づき、金属火花も着火源としては可能性が低い。No.1 ミキサー内も見分したが金属類が落下した形跡は見あたらず、同ミキサー内で金属火花が発生した可能性は無い。使用される電気機器については、着火源としての危険性を考慮して全て防爆電気機器を使用していた。また金属配管類はいずれもボンディングによって電氣的に接続されていたことから、これらの静電気の帯電は考えられない。作業者に対しても静電気帯電防止作業服及び静電気帯電防止用作業靴の着用を義務づけており帯電防止に配慮がなされていたが、鉄製床材に塗布されていた塗料であるペイントは導電性ではなかったことから、静電気について検討した。

実験的にアクリル板に塗布したペイントの抵抗を測定した結果、 $5.6 \times 10^{12} \Omega$ と抵抗が高く静電気の帯電が懸念される。ペイントの表面抵抗率を簡易的な方法で測定した結果 $5 \times 10^{13} \Omega$ であり、普通（表 3 参照）の帯電性であり静電気災害の発生が懸念されるレベルである。

そこでセルロース誘導体取り扱い過程での静電気の発生を実験的に検討した。セルロース誘導体粉体は体積抵抗率が $3.8 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ と極めて高く、発生した静電気の漏洩は小さくセルロース誘導体自体の帯電が問題となるものであった。

またミキサー内には投入されたセルロース誘導体は粒径が数十ミクロンのオーダーであることから、空中に拡散して爆発性雰囲気を形成していたことは、セルロース誘導体の爆発下限界が $60 \sim 70 g/m^3$ （提出された資料の測定データ）に基づき十分に考えられる。仮にセルロース誘導体の最小着火エネルギーを $20 mJ$ 、人体の静電容量を典型的な値である $150 pF$ とすると、着火させるために必要な人体の電位 V_c は次式で与えられる。

$$V_c = \sqrt{\frac{40 \times 10^{-3}}{150 \times 10^{-12}}} = 16.3 \times 10^3 = 16.3 kV \quad (4)$$

$16.3 kV$ は静電気の帯電電位としては高い値であるものの、現場で発生しうるレベルの電位である。再現実験において約 $5 kg$ のセルロース誘導体によって人体は $-2.2 kV$ に帯電した。災害発生日には粘度調整用のセルロース誘導体を $20 kg$ 入り紙袋で 5 袋ミキサーに投入予定であったので、今回の実験に比較して最大 20 倍のセルロース誘導体が扱われていた。したがって災害発生時にセルロース誘導体投入を行っていた作業員の人体電位が $-10 kV$ を超えていた可能性は十分に考えられることから、静電誘導などに起因し

表4 着火源の検討

着火源	現場での状況	可能性
裸火	労働者はライターなど火元になる可能性のあるものは持ち込みが禁止されている。	無し
電気機器	当該現場の電気機器は防爆構造である	無し
配管類	ボンディングが施されていた。	無し
金属火花(1)	爆発のあった現場周囲で工具等を用いた作業は見られなかった。	低い
金属火花(2)	No.1 ミキサー内には金属工具類などの落下物は見られなかった。	無し
金属火花(3)	除鉄機へ想定しているよりも大きな鉄片の混入があれば、その鉄片による摩擦熱、あるいは摩擦火花などが着火源として疑われる。	この除鉄機より前で大きな異物の分級は行われており、除鉄機への粉体輸送はブローによるもので大きな金属が運ばれる可能性は低いと考えられる。
静電気(1)	作業員がセルロース誘導体の入った袋（内側にポリエチレンのラミネートがされている）からセルロース誘導体をミキサーに投入するときに、粉体と内袋とは静電気が発生したと考えられる。また粉体投入過程で人体にも静電気が帯電していたと考えられる。	セルロース誘導体をラミネートされた袋からミキサーに投入する過程で静電気がラミネート袋及びセルロース誘導体粉体に発生し、人体に静電誘導した可能性がある。また投入過程で人体も帯電した可能性がある。結果として高い電位となった人体から静電気放電が発生した可能性がある。
静電気(2)	空気輸送中にバグフィルタなどでセルロース誘導体が帯電して、帯電したセルロース誘導体がミキサー内に堆積していたと考えられる。また作業員によって投入されたセルロース誘導体も帯電していたと考えられる。	ミキサー内に堆積したセルロース誘導体粉体から着火性の強いコーン放電が発生した可能性がある。

て人体の静電エネルギーがセルロース誘導体の最小着火エネルギーを超えていた可能性はあり得る。また、粉体そのものの帯電による静電気放電（コーン放電）も着火源となる可能性がある。

しかしながら帯電した粉体、あるいは静電誘導などによって帯電した人体のいずれから放電が起こったかは、静電気の場合には痕跡が残ることがないため、特定することは不可能であり、着火源を静電気と断定することも出来ない。またミキサー内部でも、周辺部でも静電気による放電の可能性が残るため、最初の着火位置についても特定は出来ない。

以上の検討から、ミキサー内にセルロース誘導体による爆発性雰囲気形成され、人体からの静電気放電、あるいは帯電粉体からのコーン放電によってセルロース誘導体粉体が着火したことが一連の爆発の端緒となった可能性はあり得ると推定される。

2. 同種災害の防止対策

爆発した可燃性物質としてはセルロース誘導体であると判断される。セルロース誘導体の最小着火エネルギーは 10～30mJ であり、静電気スパークによって爆発する可能性は十分にある。したがって今回と同様の爆発災害防止には、着火源となりうる静電気の帯電防止対策は不可欠であり、具体的には次の通りである。

- 1) 作業者は静電気帯電防止作業服及び静電気帯電防止用作業靴の着用を徹底する。
- 2) 金属などの導電性床材を使用し、漏洩抵抗^xを $10^8\Omega$ 以下とする。もし床材を塗装する場合には導電性塗料を使用する。なお、床材は長期間使用していると粉体が床表面に付着して床の導電性が保持できないこともあり得るので、定期的な床の清掃が必要となる。
- 3) 機器、装置のボンディングを徹底する。一方可燃性物質に対しては次の対策が挙げられる。

①セルロース誘導体

作業場内で通常目に付かないような部分への堆積が起こらないように、天井に設置されたケーブル幹線や配管などの清掃を徹底する。特に高所に堆積した粉体は、振動や風で容易に空気と混合するので注意が必要である。

セルロース誘導体は数十ミクロンの粒径であって、製造過程で取り扱われるセルロース誘導体粉体も浮遊状態では爆発範囲に入ることがある。その対策には窒素パーージによってセルロース誘導体粉体の爆発限界酸素濃度以下にすることを目標とするが、困難であれば着火エネルギーを増大させて静電気では着火しないレベルにする。

セルロース誘導体の爆発限界酸素濃度が一般の有機粉じんの典型的な値である 8～12%であれば、管理酸素濃度の指標を 5%未満^{xi}とする。

なお窒素取り扱いにおいては、作業者などが誤って窒素を吸入しないように、標識の設置など十分な配慮をするとともに、万一の対策として緊急措置を周知徹底しておくことが必要である。

②塩化メチル、酸化プロピレン

貯蔵容器、配管、反応器の定期的な点検によって漏洩を防止する。

③メタノール

貯蔵容器を定期的に点検し、作業環境濃度を定期的に測定するとともに、メタノールが爆発性雰囲気を形成しないように換気を行うことが必要となる。

^x物体（ここでは床材）と大地間の電気抵抗をいう。

^{xi}静電気安全指針、p.39、労働省産業安全研究所(1988)