

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

リサイクル品・廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究

平成15年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 荷福 正治

平成16（2004）年 4月

## 目 次

I	総括研究報告		
	リサイクル品 廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究	-----	1
	荷福正治		
II	分担研究報告		
	1 粉塵の着火エネルギーの評価 検討	-----	5
	荷福正治、堀口貞茲		
	2 粉塵の爆発強度の評価 検討および		
	粉砕・破砕に伴い発生するカスの爆発性評価 検討	-----	11
	八島正明		
	3 粉塵移送タクトの静電気危険性	-----	17
	児王 勉、山隈瑞樹		
	4 粉塵の流送帯電、粉塵の帯電に起因する着火源の形成 観測および		
	破砕・粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策の検討	-----	22
	竹内 宇		
III	研究成果の刊行に関する一覧表	-----	32
IV	研究成果の刊行物 別刷	-----	33

## リサイクル品 廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究

主任研究者 荷福正治 独立行政法人産業技術総合研究所 主任研究員

本研究は、家電製品のリサイクル工場、廃棄物処理工場で近年頻発している粉塵爆発災害を防止することを目的とし、そのための基礎資料を提供しようとするものである。資源の有効利用や環境保全の見地からリサイクルや廃棄物の処理が行われているか、その過程で可燃性の粉塵やガスが発生し、これらか何らかの原因で着火し、爆発災害に至る事例が頻発し、従業員への人的被害や工場施設の損害のみならず、リサイクルや廃棄物処理にも大きな影響が及んでおり、その安全確保は大きな社会的要請となっている。

これらの観点から、平成15年度は粉塵の爆発に要する着火エネルギー、粉塵の爆発強度・ガスの爆発性、粉塵の移送に伴う静電気の発生と危険性、着火源形成要因、破碎・粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策等の検討・解明を行い、粉塵爆発災害の防止を目指した。

**A 研究目的**

粉塵の着火性、爆発強度、着火源形成要因、災害防止対策等の解明。

**B 研究方法**

平成15年度は、粉塵の着火エネルギー、粉塵の爆発強度、粉碎・破碎に伴い発生するガスの爆発性、粉塵移送タクトの静電気危険性、粉塵の流送帯電、着火源の形成・観測、破碎・粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策等の評価・検討をした。このため、以下の内容の研究を行った。

- ① 吹上げ式粉塵爆発試験装置、Godbert-Greenwald型炉（加熱部は内径60mm、長さ526mm）、着火エネルギー測定装置等を用い、粉塵の爆発下限濃度、爆発特性曲線、存遊粉塵着火温度、粉塵の粒度が最小着火エネルギーに及ぼす影響、放電電極部の条件（放電持続時間、放電電極間隔、放電電極の先端角度）が粉塵の着火に及ぼす影響等を検討した。
- ② 粉塵の爆発強度、粉碎・破碎に伴い発生するガスの爆発性の評価・検討のため、初めにレー

ザーノット光学システムを用い、吹上げられた粉が空間に分散する挙動を調べた。そして、可燃性粉塵単独の場合と可燃性ガスが混合したハイフリット状態の場合について最大爆発圧力、最大圧力上昇速度、爆発指数を実験的に測定し、爆発性の評価を行なった。

③ 粉体循環装置及び関連機構を用いて、粉塵移送タクトに関連した静電気危険性の評価・検討を行った。粉塵移送タクト内での沿面放電による堆積粉塵への着火の可能性、粉塵着火後の火炎状態の観測を行うとともに、ハクフィルタ式集じん機へ移送後の静電気危険性を評価するために、粉体とフィルタの剥離帯電量測定及び全金属粉塵が付着したフィルタからの放電現象を観測し、着火性の有無を検討した。

④ 粉塵の流送帯電量の測定をトリホ帯電方式の静電スプレーガンを使用して行った。実験にはリコホテューム、ポリアクリロニトリル、ナイロン11、酸化鉄粉を使用した。これらの試料粉体のイオン化ポテンシャルも測定した。

⑤ 粉塵の帯電に起因する着火源の形成・観測のため、簡易型の装置を使用して粉塵の着火性試

験を行った。本装置では、超音波振動を加えて試料粉体をホッパーから落下させて、一様な粉塵雲を形成した。電極間に高電圧パルスを印加し、発生した火花による試料粉体の着火を観測した。

⑥破砕 粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策に関し、物体の破砕・粉砕工程において発生する静電気量の測定を行った。具体的には、二種類の粒子の混合系を撹拌、摩擦したときに発生する電荷量をフローオフ法により測定した。

#### (倫理面への配慮)

本研究は研究対象が工業製品であり、人や動物を対象としないので、倫理面の問題はない。

### C 研究結果と考察

①家電製品リサイクル工程で大きな爆発性を有すると考えられるポリウレタン粉塵の爆発下限濃度は約  $40 - 50 \text{ g/m}^3$  程度、浮遊粉塵雲着火温度は概ね  $500^\circ\text{C}$ 、最小着火エネルギーは約  $11 \text{ mJ}$  であり、爆発しやすいことがわかった。また、放電持続時間が約  $0.2 \text{ ms}$  程度以上になると着火エネルギーが最小となり、放電電極間隔約  $5 \text{ mm}$ 、放電電極先端角約  $30$  度で最も爆発しやすいことがわかった。

②用いたポリウレタン粉の平均粒子径  $D(v, 0.5)$  は  $159\mu\text{m}$  である。このポリウレタン粉塵雲濃度  $C=100\sim 250 \text{ g/m}^3$  においては、最大爆発圧力  $P_{max}=5.5 \text{ bar}$ 、最大圧力上昇速度  $(dP/dt)_{max}=260 \text{ bar/s}$ 、爆発指数  $K_{st}=70 \text{ bar m/s}$  であった。ハイフリットの場合にクロペンタン  $2,020 \text{ ppm}$  一定に対して、 $C=100\sim 250 \text{ g/m}^3$  においては、 $P_{max}=5.6 \text{ bar}$ 、 $(dP/dt)_{max}=247 \text{ bar/s}$ 、 $K_{st}=67 \text{ bar m/s}$  であった。ハイフリットの場合にクロヘンタン  $5,270 \text{ ppm}$  一定に対し、 $C=100\sim 175 \text{ g/m}^3$  においては、 $P_{max}=5.7 \text{ bar}$ 、 $(dP/dt)_{max}=220 \text{ bar/s}$ 、 $K_{st}=60 \text{ bar m/s}$  であった。用いたポリウレタンの粒子径が大きいため、爆発の強さはやや小さい結果が得られたか、より小さな粉塵を試料として用いれば、 $K_{st}$  は  $100$  を超えるものと考えられる。他の粉塵に比べ、爆発に強さは中程度と判断される。

③接地背板を有する薄い絶縁物が帯電した場合に発生する沿面放電が堆積粉塵に着火する条件を調べた。石松子及びアントラキノンを試験粉体とした場合、金属板か接地背板の場合には、 $160\mu\text{C}$  及び  $130\mu\text{C}$  で着火したか、導電性繊維入り絶縁シートの場合、 $330\mu\text{C}$  及び  $70\mu\text{C}$  であった。浮遊粉塵の最小着火エネルギーは  $30 \text{ mJ}$  及び  $3 \text{ mJ}$  であるか、堆積粉塵になると放電条件によって着火性が異なることが判明した。

更に、集塵機内においては、粉塵はフィルタからの剥離によって極めて高い帯電量を示す。特に金属粉塵がフィルタに付着した場合には、電気抵抗が含まれるために着火性の高い放電が生じやすいことが判明した。

④粉塵の流送帯電量測定として静電スプレーカノを用いて測定した試料粉体の帯電量(比電荷)は、酸化鉄 > リコホテューム > ナイロン 11 > ポリアクリルニトリル、であった。試料粉体の供給量の増加につれて全帯電量は増加するか、単位質量あたりの帯電量(比電荷)は減少することか確認してきた。また、スプレーカノ内壁の材料であるフッ素系樹脂のイオン化ポテンシャル ( $6.72 \text{ eV}$ ) との差が大きくなるにつれて、試料粉体の帯電量が増加していることが確認してきた。さらに、粉体の流送速度が大きくなるほど帯電量が増加することかわかった。

⑤粉塵の帯電に起因する着火源の形成 観測のため、超音波振動式着火試験装置を用いて測定された最小着火エネルギーは、リコホテューム、 $25 - 32 \text{ mJ}$ 、ポリアクリロニトリル、 $29 - 34 \text{ mJ}$ 、アントラキノン、 $9 - 15 \text{ mJ}$  であった。また、本観測システムが着火源の観測に有効であることを確認してきた。

⑥破砕 粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策の検討のため、アクリル、ポリエチレン、ポリプロピレン粉体のポリスチレンペレットに対する摩擦帯電量特性を、相対湿度を変化させてフローオフ法により測定した。相対湿度の増加につれて粉体の摩擦帯電量は減少した。また、粉体の単位質量あたりの電荷は粒径の減少にもなって増加することかわかった。

## D 結論

①リサイクルや廃棄物処理工程で発生する粉塵、特に冷蔵庫のリサイクル工程で発生するポリウレタン粉塵は多量発生し、爆発性が大きいため、操業の際にはこれを予測して安全の確保に努める必要がある。

②使用したポリウレタン粉塵は他の粉塵と比べると、爆発の強さは中程度と判断される。しかし、リサイクル工場では可燃性粉塵のほか可燃性ガスの発生もあり得る。それぞれの爆発の強さが小さくとも、共存する場合には相乗効果によって爆発の強さが増すことがわかった。爆発の予防、爆発の抑制対策を講じる際にはこのようなことを加味する必要がある。

③絶縁性タクト又は薄い絶縁ライニングを有する全金属タクトを使って粉体を移送する場合には、表面放電による着火危険性を考慮しなければならない。全金属製又は導電性ライニングとすべきである。また、集塵機で金属粉塵を回収することは極めてリスクが高い。接地等の帯電防止及び不活性化が必要である。

④流送帯電に伴う帯電が原因となって生じる粉塵爆発の防止には、流送速度をできるだけ小さくする、輸送に使用する空気の湿度を高くする、輸送する粉体と輸送に用いるパイプ内壁のオン化ポテンシャルをなるべく近づけることが有効である。

⑤粉塵の帯電に起因する着火源の形成 観測については、超音波振動を利用する着火試験装置により従来法とほぼ同様に着火エネルギーを測定できることを確認した。

⑥破碎 粉砕工程における粉塵爆発災害防止対策に関し、攪拌 摩擦にともなう粉体の帯電量をフローオフ法により測定した結果、粉体の単位表面積あたりの帯電量は粒径に依存しないことを確認した。

## E 健康危険情報

(特になし)

## F 研究発表

### 1 論文発表

- (1) 荷福正治, J Gatineau, C Barre, 堀口貞茲, 加藤裕美 Explosibility of Shredder Dusts for Electrical Appliances, Proceedings of Electrostatics 2003, The Institute of Physics (印刷中)
- (2) 山隈瑞樹, 児玉勉 ハクフィルタでの粉塵の剥離帯電特性、静電気学会誌、Vol 28、No 1 (2004)、pp 65-70
- (3) M Yamaguma and T Kodama Observation of Propagating Brush Discharge on Insulative Film with Anti-Static Materials, IEEE Transactions on Industry Applications (印刷中)
- (4) K S Choi, M Yamaguma, T Kodama, J H Joung, T Y Kim, M Nifuku, M Takeuchi Influence of Discharge Conditions on the Ignitability of Lycopodium Streams Due to a Single Capacitance Discharge Spark, KIEE Int'l Trans on EA, Vol 3-C, No 3 (2003), pp 99-105
- (5) 内田博樹, 和田達明, 竹内 亨 電界法に基づく粒子個々の付着力測定装置の開発、静電気学会誌、Vol 27、No 4 (2003)、pp 194-198
- (6) K S Choi, M Yamaguma, T Kodama, J H Joung, M Nifuku, M Takeuchi Effects of Corona Charging of Polymer on their Minimum Ignition Energies, J Loss Prevention in Process Industries (印刷中)

### 2 学会発表

- (1) 荷福正治, 辻田博志, 藤野憲司, 高市健二, C Barre, J Gatineau, E Paya, 堀口貞茲, 羽鳥貞紀子 A Study on the Ignitability of Polyurethane Dust, 第 27 回静電気学会全国大会、(東京理科大学)、2003 年 9 月 11 日
- (2) 荷福正治, 辻田博志, 藤野憲司, 高市健二, C Barre, J Gatineau, E Paya, 堀口貞茲, 羽鳥貞紀子 冷蔵庫リサイクル工程における粉塵爆発抑制、第 36 回安全工学研究発表会(金沢工業大学)、2003 年 12 月 5 日

- (3) M Yamaguma, T Kodama Properties and incendivity for dusts of discharges from electrostatically charged insulating materials Asia Pacific Symposium on Safety 2003 (Taipei)
- (4) 水谷 亘、竹内 亨 高分子粉体の帯電保持能力、第 64 回応用物理学会学術講演会講演予稿集、No 1、 p 147、2003 年 9 月 1 日
- (5) 沓掛健一、竹内 亨 アクリル粒子の帯電に關与する因子、静電気学会講演論文集'03、pp 77-78、2003 年 9 月 11 日
- (6) T Suzuki, T Kodama, T Mogami, K S Choi, J H Joung, M Takeuchi A New Electrostatic Eliminator Using High Voltage Usable in Explosive Atmosphere , Pre-prints IFAC Symp on Power Plants and Power Systems Control 2003, Vol III, pp 1161-1164、2003 年 9 月 15-19 日
- (7) T Tada, Y Baba, M Takeuchi Influence of Properties of Magnetite on Tribocharging Characteristics of Mono-component Magnetic Toner, Proc IS&T's NIP19 Int'l Conf Digital Printing Technologies, pp 180-185、2003 年 9 月 30 日
- (8) Manabu Takeuchi Tribocharging Polarity of Ferrite Carrier Beads, Proc 4th Korea-Japan Joint Symp Imaging Materials Technol, pp 28-31、2003 年 11 月 14-15 日
- (9) 沓掛健一、荷福正治、竹内 亨 高分子粉体の帯電に關与する因子、2004 年度静電気学会春季講演会論文集、pp 11-12 、2004 年 3 月 5 日
- (10) 杉原鷹男、荷福正治、竹内 亨 表面コーティングか接触電位差、摩擦帯電に及ぼす影響、2004 年度静電気学会春季講演会論文集、pp 19-20、2004 年 3 月 5 日
- (11) 松本大輔、竹内 亨 粉体塗料の帯電量測定、表面技術協会第 109 回講演大会講演要旨集、pp 254-255、2004 年 3 月 15 日

- G 知的財産権の出願 登録状況  
(予定を含む)
- 1 特許取得  
(なし)
  - 2 実用新案登録  
(なし)
  - 3 その他  
(なし)

厚生労働省研究員補助金(労働安全衛生総合研究事業)  
分担研究報告書

(リサイクル品・廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究)  
粉塵の着火エネルギーの評価・検討

主任研究者 荷福正治 独立行政法人産業技術総合研究所 主任研究員  
分担研究者 堀口貞茲 独立行政法人産業技術総合研究所・チームリーダー

リサイクル品 廃棄物処理工場で発生する粉塵の中で、粉塵爆発に至る危険性の大きいポリウレタンにつき、粉塵の爆発性(着火性)(爆発確率曲線、爆発下限濃度、浮遊粉塵雲の着火温度、最小着火エネルギー、粉塵粒度が着火エネルギーに及ぼす影響等)を検討した。さらに、着火源の形成特性(放電持続時間、放電電極間隔および放電電極の先端角度)および発泡剤の種類(フロンおよびシクロペンタン)がポリウレタン粉塵雲の着火性(着火エネルギー)に及ぼす影響を検討した。その結果、ポリウレタン粉塵雲の爆発下限濃度は  $40\sim 50\text{ g/m}^3$ 、浮遊粉塵雲の着火温度は約  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 、最小着火エネルギーは約  $11\text{ mJ}$ 、放電持続時間が約  $0.2\text{ ms}$  以下で着火性が小さくなること、放電電極間隔約  $5\text{ mm}$  付近で着火性が最も大きいこと、放電電極先端角度約  $30$  度で着火性が最大であること、シクロペンタンがポリウレタン粉塵と共存すると爆発性が促進され、約  $1,000\text{ ppm}$  程度以上で着火エネルギーの最小領域になることなどが明らかになった。

## A 研究目的

資源の有効利用や環境保全の観点から、多量に排出されている廃棄物はリサイクル(再利用)されるようになった。家電製品、コンピュータ、自動車などのリサイクルは法制化され、資源の有効利用が図られている。しかしながら、その工程においては、爆発や火災などの災害も頻発している。特に断熱材を多用する冷蔵庫のリサイクル工程では、爆発や火災の事故例も報じられており、作業においては注意が必要である。断熱材として利用されているポリウレタンの発泡には以前フロンが使用されていたが、環境への影響のため、近年はシクロペンタンが使用されるようになった。この断熱材の破碎(冷蔵庫の破碎)に伴い、可燃性ガス(シクロペンタン)が放出され、爆発性蒸気や気体が形成されやすくなるので、爆発の危険性が大きい。

本分担研究では、このような粉塵爆発災害を防ぐた

め、平成15年度はリサイクル品や廃棄物処理過程で発生する粉塵(特に、ポリウレタン粉塵)につきその着火性の評価・検討を行った。

粉塵の爆発性(着火性)は浮遊粉塵濃度、着火源の大きさ、粒子の大きさ(粒度)、着火源の形成のしかたなど種々の要因に影響される。この観点から、平成15年度は、粉塵爆発における着火エネルギーを主とした着火の特性に関する評価・検討を行った。

## B 研究方法

### B 1 爆発下限濃度

吹上げ式粉塵爆発実験装置(Fig 1)を用い、爆発が発生する最小の濃度を求めた。実験では、粉塵濃度を変え、それに対する爆発確率を求め、粉塵濃度と爆発確率の関係を調べた。爆発確率は、同一条件下で連続10回の爆発試験を行い、着火に到る確率を求めた。粉塵の粒度が爆発性に及ぼす影響は、

B 5 に述べる粒度分布の調整を行ったのち、各粒度について爆発下限濃度を求めた。なお、落ト式粉塵爆発実験装置を用いた結果と、吹き付け式粉塵爆発実験装置による結果は、両者概ね同じであることを確認した。

粉塵と共存する可燃性ガスが粉塵の爆発性に及ぼす影響は Fig 2 に示す装置を用いて調べた。爆発雰囲気形成に使用するガスは、前もって準備したガス濃度を有する高圧ガスボンベから、実験系に供給し、爆発チャンバーおよび配管系を所定のガスに置換した。

## B 2 着火エネルギー

Fig 1 または Fig 2 に示す爆発実験装置を用いて爆発実験を行うか、着火用電極に供給する放電は甲発の矩形波である。この波形をオシロスコープで観察し、放電エネルギー量を計算する。放電エネルギー量は、放電電流、放電持続時間、放電電圧を調整して測定する。粉塵雲の着火に使用されるエネルギーは放電の持続時間、電極間隔、放電電極先端角度等の放電条件に影響を受けるので、これらを変化し、粉塵雲の着火に要するエネルギー量を計算する。

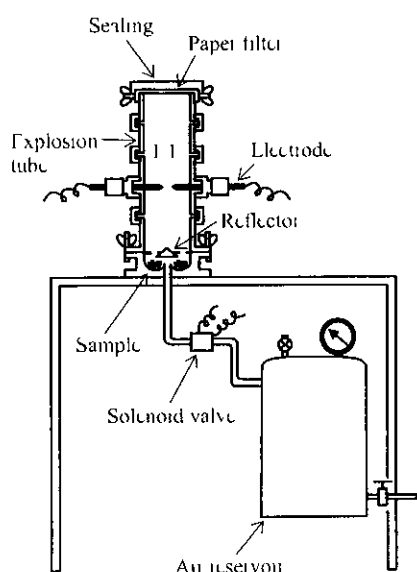


Fig 1 Experimental apparatus for dust explosion

## B 3 浮遊粉塵雲着火温度

Godbert-Greenwald 型炉 (加熱部は内径 60 mm、長さ 526 mm) を用いた。浮遊粉塵濃度はこの加熱部に投入した試材の重量を容積で除して求める。

## B 4 粉塵試料

粉塵試料は家電製品リサイクル工程で発生するポリウレタンを主として用いた。ポリウレタン粉塵は家電製品リサイクル工場、特に、冷蔵庫のリサイクル工程でよく発生する。その発泡剤としてフロンに代わり近年使用されるようになったノクロペンタンは可燃性であるため、粉塵爆発の危険性に留意しなければならない。

## B 5 粒度分布の調整

粉塵試料は家電製品リサイクル工程で採取したままのもの、および、これを 75 $\mu$ m、125 $\mu$ m、200 $\mu$ m、1 mm 等の篩で分級したものを用いた。

### (倫理面への配慮)

本研究は研究対象が工業製品であり、人や動物を対象としないので、倫理面の問題は無い。

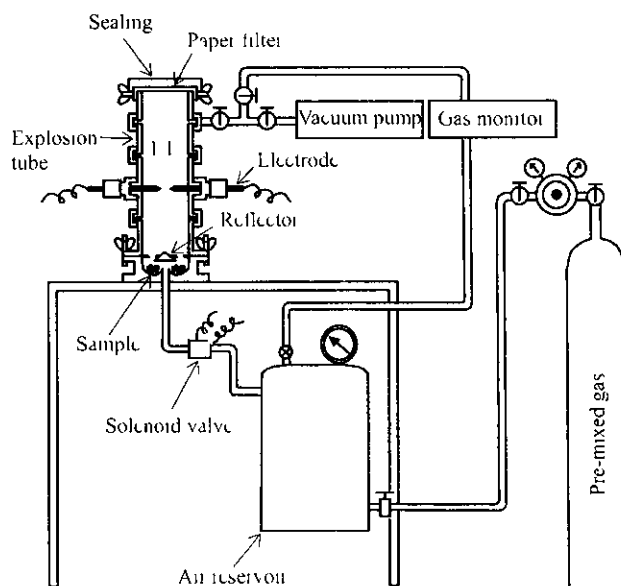


Fig 2 Experimental apparatus to investigate the influence of ambient gas on dust explosion



## C 研究結果

### C 1 爆発確率曲線および爆発下限濃度

ポリウレタン粉塵雲の爆発しやすさ(爆発確率曲線)をFig 3に示す。爆発下限濃度は40~50 g/m<sup>3</sup>であり、爆発確率曲線の立ち上がりは急峻である。したがって、一度、爆発が発生すると爆発の伝播は速いと言えます。また、可燃性のノクロペンタンで発泡したポリウレタン粉塵はフロンの発泡のポリウレタン粉塵より爆発性が高く、粉塵の粒度が大きいものは爆発性が小さいことが示されている。

### C 2 粉塵の粒度が爆発下限濃度に及ぼす影響

粉塵の粒度が小さくなると単位質量当たりの粒子表面積が大きくなる。したがって、粉塵の粒度が小さくなると粒子の酸化反応が起こりやすくなり、粉塵爆発が起こりやすくなる。Fig 3には粒度の小さい粉塵の爆発性が高であることが示されている。リサイクル工程における冷蔵庫の破碎 粉砕工程では微細粉塵が発生するので、これを爆発性を有する粉塵雲を形成しないように注意を払う必要がある。

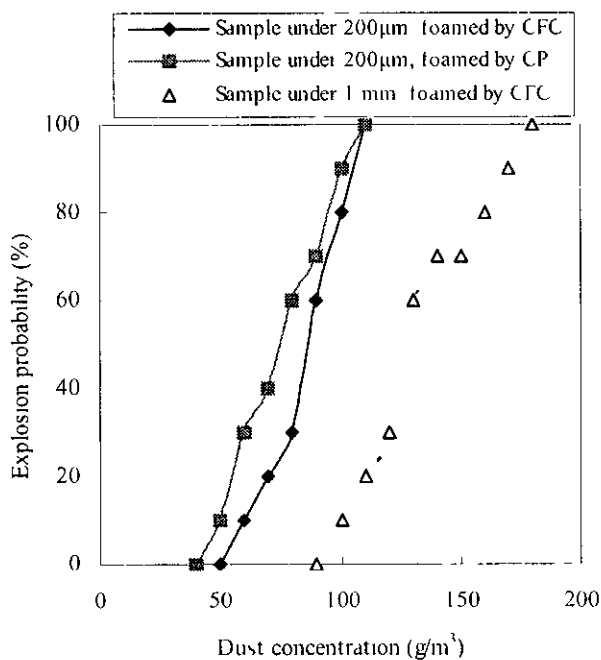


Fig 3 Minimum explosive concentration of polyurethane dusts (CP Cyclopentane, CFC Chlorofluorocarbon)

### C 3 浮遊粉塵雲の着火温度

ポリウレタン粉塵雲の着火温度は、Fig 4に示すものである。粉塵濃度が小さいと着火温度が高いが、粉塵濃度がある程度大きくなると(約130 g/m<sup>3</sup>程度以上)、着火温度が500~530 °C近辺に収束することになった。

### C 4 粉塵雲の着火エネルギー

ポリウレタン粉塵雲の着火エネルギーをTable 1に示す。粒径が小さい場合、ノクロペンタン発泡のポリウレタン粉塵雲の着火エネルギーが小さく、最小着火エネルギーは約11 mJである。爆発確率曲線を考慮すると、ノクロペンタン発泡のポリウレタン粉塵は爆発性が高いといえる。

### C 5 断熱材の発泡剤が着火性に及ぼす影響

Fig 3, Fig 4およびTable 1に示したように、ノクロペンタンで発泡したポリウレタンの粉塵はフロンの発泡のポリウレタン粉塵に比し、爆発性が高いことが示されている。前述のように、フロンは環境インパクトがあることから使用禁止となり、発泡に利用できなくなった。

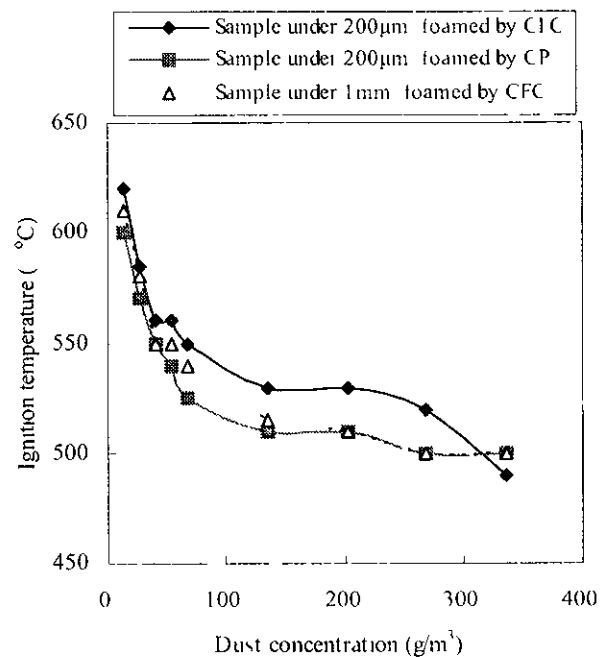


Fig 4 Ignition temperatures of polyurethane dust clouds (CP Cyclopentane, CFC Chlorofluorocarbon)

Table 1 Minimum ignition energies for polyurethane dusts

Foaming agent	Powder size	MIE (mJ)
Cyclopentane	under 125 $\mu\text{m}$	10.6
	under 200 $\mu\text{m}$	25.7
	200 $\mu\text{m}$ - 1mm	36.7
	under 1mm	53.0
Chlorofluorocarbon	under 75 $\mu\text{m}$	24.2
	under 125 $\mu\text{m}$	27.8
	under 200 $\mu\text{m}$	28.2
	200 $\mu\text{m}$ - 1mm	27.1
	under 1mm	47.5

ンクロペンタンは爆発性があるので(爆発範囲 11~8.7 vol%)、冷蔵庫のリサイクルプロセスではンクロペンタン濃度の監視を行い、危険濃度に達しないようにする必要がある。

### C 6 放電持続時間が着火エネルギーに及ぼす影響

粉塵爆発が発生するためには、放電持続時間は粉塵粒子の継続的酸化が行われるに十分なものでなければならぬ。この関係を示すものがFig 5である。放電持続時間つまり着火源持続時間が約0.2 ms以

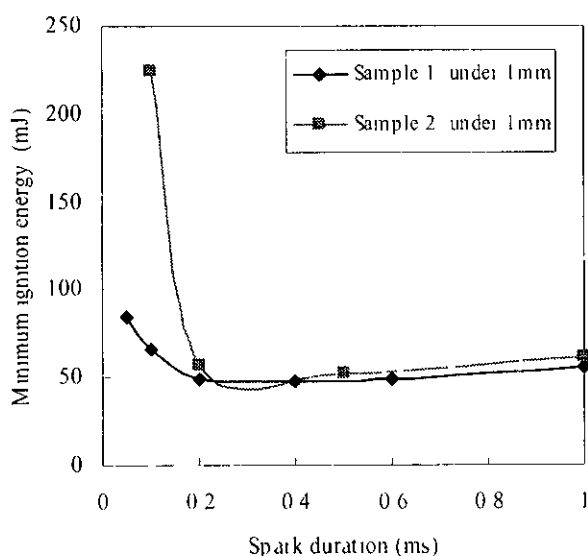


Fig 5 Influence of spark duration on the minimum ignition energy for polyurethane dusts

下では着火エネルギーが大きく、着火性が小さい。約0.2 ms以上になると着火エネルギー値は最小レベルに達する。本研究に使用したポリウレタン粉塵の場合、最小着火エネルギーは約50 mJである。

### C 7 放電電極間隔が着火エネルギーに及ぼす影響

放電電極間隔は、放電電極間で形成される放電火花の大きさに関係するので、粉塵粒子の酸化反応に影響する。爆発が発生するには、粉塵粒子の酸化を誘起し、その酸化反応が他の粒子へと継続するものでなければならぬ。この関係を示すものがFig 6である。放電電極間隔が小さいと着火性が小さいことが示されている。また、放電電極間隔が大きくても(1 cm)着火性は小さい。放電電極間隔が大きくと放電の惹起に大きなエネルギーが必要となり、さらに、この放電に伴う衝撃波が発生することにより、放電火花付近に粉塵粒子の存在しない空間を生ずることも考えられる。このような点からも、筆者らの実験条件下では、約5 mm程度の放電電極間隔のときに粉塵雲の着火性が最も大きく、着火エネルギーの測定に適しているものと考えられる。

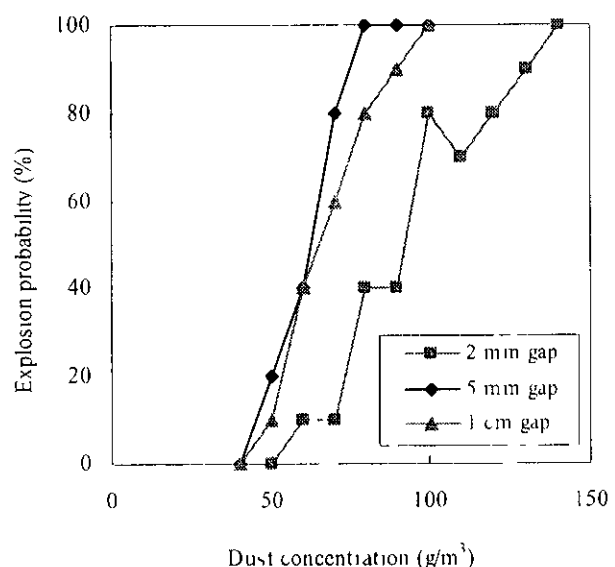


Fig 6 Influence of spark gap on the explosibility of plastic dust cloud (original sample)

### C 8 放電電極の先端角度が着火エネルギーに及ぼす影響

放電を形成する部材には種々の形状があり、放電の発生の容易さに大きな影響がある。放電部位が先端であると、電気力線の集中がおこり、放電の発生が容易になる。静電気の発生による着火を検討する場合、帯電部材の形状は広範であることから、静電気災害発生に大きな関連がある。

このような関係を示すものがFig 7である。放電電極の先端角度約30度の時にポリウレタン粉塵雲の着火エネルギーが最小となっている。本知見は物質の着火エネルギー測定法の作成に大きく貢献するものである。

### C 9 共存可燃性ガス濃度が着火エネルギーに及ぼす影響

既に述べたように、冷蔵庫リサイクルプロセスでは、可燃性ガス(シクロペンタン)が発生している。このガスが粉塵(ポリウレタン)と共存することにより、粉塵粒子の着火が促進され、爆発の発生が容易となる。この関係を示すものがFig 8である。ポリウレタンと共存するシクロペンタン濃度が大きくなるにつれ、粉塵雲の最小着火エネルギー値が小さくなり、シクロペンタ

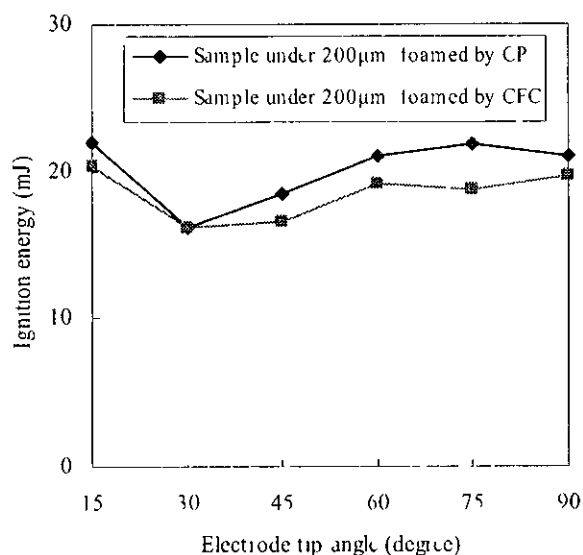


Fig 7 Influence of the tip angle of electrode on the ignition energy for polyurethane dusts (Dust concentration =  $400 \text{ g/m}^3$ ) (CP Cyclopentane, CFC Chlorofluorocarbon)

ン濃度が約1000 ppm程度以上になると、概ね最小値領域になっている。このことから、冷蔵庫リサイクルプロセスではシクロペンタン濃度が1000~2000 ppm程度以上にならないように注意する必要がある。

### D 考察

リサイクル品や廃棄物の処理工程では、これらを構成する材料の粉塵が発生し、浮遊粉塵雲が発生する。特に、冷蔵庫リサイクル工程ではポリウレタン粉塵の発生に加え、断熱材発泡ガス(シクロペンタン)が発生し、粉塵爆発を促進する危険性がある。

ポリウレタン粉塵の爆発特性(着火特性)およびシクロペンタンを含有する粉塵雲の爆発特性は先に述べたものであり、これらの知見をもとに粉塵爆発災害防止を図る必要がある。

### E 結論

リサイクル品、廃棄物処理工場での粉塵爆発災害防止のため、主として冷蔵庫リサイクル工程で発生するポリウレタン粉塵の爆発性を検討したところ次の結果を得た。

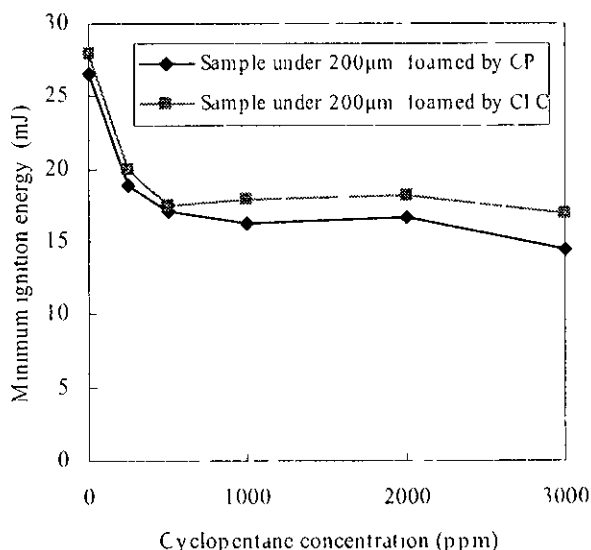


Fig 8 Influence of co-existing cyclopentane gas with polyurethane dust on the minimum ignition energy (CP Cyclopentane, CFC Chlorofluorocarbon)

- (1) 爆発下限濃度は  $40\sim 50 \text{ g/m}^3$  程度であり、比較的爆発性が大である。
- (2) 浮遊粉塵雲の着火温度は約  $500^\circ\text{C}$  であり、他の粉塵のものと類似している。
- (3) 最小着火エネルギーは約  $11 \text{ mJ}$  であり、他の粉塵に比し、小さい値である。
- (4) 着火エネルギーは放電持続時間か約  $0.2\text{ms}$  以上で最小の値となる。
- (5) 粉塵の着火性は放電電極間隔か約  $0.5 \text{ mm}$  程度で最も大きくなる。
- (6) 放電電極の先端角度約  $30$  度の時、着火エネルギーが最小となる。
- (7)  $\text{ノクロペンタン}$  が共存すると粉塵の爆発性が大きくなる。 $\text{ノクロペンタン}$  濃度か  $1000 \text{ ppm}$  程度以上になると着火エネルギーが最小となる。

## F 健康危険情報

(特になし)

## G 研究発表

### 1 論文発表

- (1) 荷福正治、J Gatineau、C Barre、堀口貞茲、加藤裕美 Explosibility of Shredder Dusts for Electrical Appliances, Proceedings of Electrostatics 2003, The Institute of Physics (印刷中)

### 2 学会発表

- (1) 荷福正治、辻田博志、藤野壺司、高市健二、C Barre、J Gatineau、E Paya、堀口貞茲、羽鳥真紀子 A Study on the Ignitability of Polyurethane Dust、第 27 回静電気学会全国大会、(東京理科大学)、2003 年 9 月 11 日
- (2) 荷福正治、辻田博志、藤野壺司、高市健二、C Barre、J Gatineau、E Paya、堀口貞茲、羽鳥真紀子 冷蔵庫リサイクル工程における粉塵爆発抑制、第 36 回安全工学研究発表会(全国工業大学)、2003 年 12 月 5 日

## H 知的財産権の出願 登録状況

(予定を含む)

### 1 特許取得

(なし)

### 2 実用新案登録

(なし)

### 3 その他

(なし)

厚生労働省研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業)  
分担研究報告書

(リサイクル品・廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究)  
粉塵の爆発強度の評価 検討および粉砕・破碎に伴い発生するカスの爆発性評価・検討

分担研究者 八島正明 独立行政法人産業安全研究所 主任研究官

本分担研究では、爆発抑制の観点から、主に可燃性粉塵の爆発特性を明らかにする目的で、可燃性粉塵の爆発の強さを調べ、さらに可燃性カスか混合したハイフリット(複合)状態における爆発の強さについても調べた。実験では、初めに、吹上げられた粉塵か空間に分散する様子についてレーザノット光システムを使って調べた。吹上げ式の粉塵爆発試験装置にこの光システムを導入し、流脈をカメラで撮影した結果、吹上げた粉塵雲か細かい渦からなる乱流状態にあり、等方性、高速で動き、その後、細かい渦か大きな組織渦になり、局所的には粉の移動速度か小さくなることかわかった。粉塵爆発特性の測定では、建築材、家電製品の断塊材として使われているポリウレタンのか破碎粉(平均粒子径  $159\mu\text{m}$ )を使い、その爆発の強さを測定するとともに、家電品の冷媒などとして使われているノクロペンタンカス(可燃性カス)か混合したハイフリット状態における爆発の強さも測定した。空気中のノクロペンタンのカス濃度か  $2,020\text{ppm}$  と  $5,270\text{ppm}$  のそれぞれ一定条件の下で、ポリウレタン粉塵雲の濃度を  $100$  から  $250\text{g/m}^3$  まで変えて調べた結果、爆発圧力は、ポリウレタン単独の場合よりもノクロペンタンを添加した場合のほうかやや大きくなる傾向かあること、爆発指数はノクロペンタンの添加効果に關係なくばらつきか大きいことかわかった。さらに、最大爆発圧力は、粉塵雲濃度か  $150$  から  $175\text{g/m}^3$  を境に、低い濃度側ではノクロペンタンの添加の効果か見られることか推察された。それよりも高い濃度側では、爆発圧力は濃度とともに増加することかわかった。しかし、実験範囲内の粉塵雲濃度において代表値となる  $P_{max}$  と  $K_{st}$  を見ると、実験範囲内ではノクロペンタンの顕著な添加効果は見られなかった。

## A 研究目的

地方自治体の粗大こみ破碎処理施設や民間のリサイクル処理施設では、プラスチック、ゴム、木材、紙、金属などからなる生活資源こみや産業廃棄物の破碎作業か毎日のように行なわれている。このとき、破碎設備に誤ってLPカススプレー缶やかセットカス容器か混入した場合、その内容物である可燃性カスか周囲に拡がり、破碎機付近に局所的に高い爆発性の粉塵気を形成し、その滞留する量と着火源となるものの有無、そのエネルギーの大きさによっては爆発に拡大することかある。

破碎処理設備において爆発を防止するには ます

は着火させない、「予防」という対策か必要不可欠となるか、なか - 爆発か生じた場合を想定し、爆発拡大の「抑制」という対策も併せて行うへきてある。爆発抑制については、爆発防護という対策でも呼ばれることかある。その技術的な対策としては、爆発圧力を逃かす圧力放散口、隔離のための遮断弁、消火のための高速消火剤噴霧装置などの設置か挙げられる。実際に対策を講ずる際には、装置の設計強度と爆発圧力放散面積を算出するため、最大爆発圧力  $P_{max}$ 、最大圧力上昇速度  $(dp/dt)_{max}$ 、爆発指数  $K_g$ (カスの場合)、 $K_{st}$ (粉塵の場合)などの爆発特性を予め調べておかなければならない。

本分担研究では、爆発抑制の観点から、主に可燃性粉塵の爆発特性を明らかにする目的で、可燃性粉塵の爆発の強さを調べ、さらに可燃性ガスか混合した場合のハイフリット(複合)状態における爆発の強さについても実験的に調べた。

## B 研究方法

### B1 実験項目

爆発特性に及ぼす代表的な因子として、粒子の大きさか上げられる。粒子の大きさは、空間における粒子の浮遊性、移動性にも影響する。実験は以下の二つの項目について実施した。

実験(1) 吹上げられた粉か空間に分散する挙動の測定

着火のために吹上げられた粉の移動性、分散性について、レーザシート光学システムを使って調べてみた。実験を容易にするため、この測定では吹上げ式(ハートマン型)の粉塵爆発試験装置を用いた。

実験(2) 可燃性粉塵と可燃性ガスか混合した場合のハイフリットの場合の爆発圧力測定

可燃性ガスとしてはシクロペンタン( $C_5H_{10}$ )を用いた。このガスの常温、大気圧下の爆発範囲は 11~67%である。実験では予め 2,020 と 5,270 ppm の濃度で空気との混合、調製したガスを用いた。実験は、後述の 20 リットル球形耐圧容器を用いて行なった。

### B2 爆発試験装置

爆発圧力を測定するために使用した装置を Fig 1 に示す。この装置は球形耐圧型のもので、二重容器の外殻は冷却水用、内殻は燃焼室で容積は 20 リットルである。試料粉は初め粉体容器に収められ、圧縮空気(20 気圧)により燃焼室に吹き込まれ、分散板で空間に極力均一になるように浮遊分散され、ごく短時間で電磁弁が閉じ、吹き込まれてから一定時間後(60 ms)に化学着火剤(硝酸バリウムとアルミニウム粉の混合物)で点火が行われる。

この装置は可燃性ガスについても測定できる。この場合は、予め所定の混合気を燃焼室に充てんすることで行なう。本々分散吹き出し用の粉体容器の中に

は混合気を充てんすべくてあるか、高圧下で高速でルーフを流動するため、点火動作の前に右火する可能性もある。本研究のハイフリット状態の実験では、そのような不都合と実験実施を容易にするため粉体容器には空気を充てんして行なった。

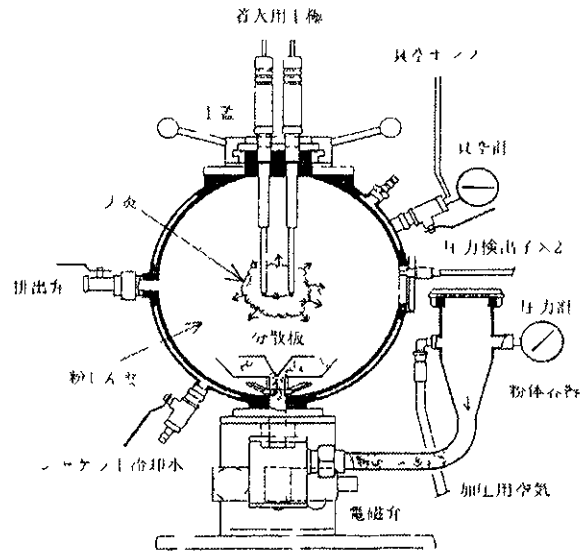


Fig 1 20 liter explosion bomb  
20リットル爆発試験容器

### B3 レーザシート光学システム

Fig 2にレーザシート光学システムの概要を示す。このシステムは、実験室に既存の2次元レーザトポグラフィ用アルコニオンレーザを本システムの光源としても使えるように、変向ミラー光学系を途中に設

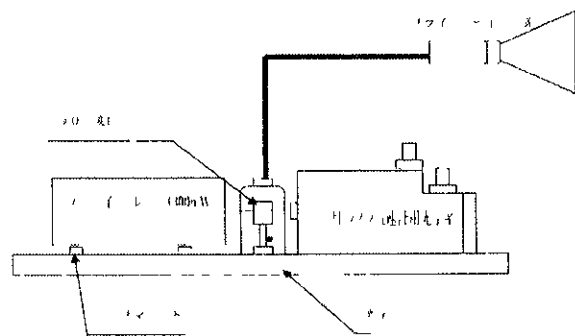


Fig 2 Laser light sheet optics for particle track  
レーザシート光学システムの概要

直し、出射フローから厚み2~10 mm、開き角度45~60°のノート状の光線を得ることかできるものである。観測部にこのノート光線を照射し、存遊している粒子からの散乱光を高速カメラ、スチルカメラなどを使って撮影することで、断層に沿った粒子の分散性、粒子の動きを連続的に調へることかできる。

#### B4 粉塵試料とその粒度分布

家電製品のリサイクル現場では、断熱材として使われていた(硬質)ポリウレタン、きょう体として使われていたプラスチックや各種全属が回収されている。ここでは、荷福(主任研究者)と堀口(分担研究者)の「粉塵の爆発しやすさの評価・検討」と同様に、試料として実際に採取されたポリウレタン粉を用いて実験を行った。実験に用いたポリウレタン粉の粒度分布をFig 3に示す。平均粒子径は中位径 $D(v, 0.5)$ で代表とすると159  $\mu\text{m}$ である。面積径 $D(3, 2)$ では102  $\mu\text{m}$ である。粒度分布のスペンは、 $D(v, 0.1) = 61 \mu\text{m}$ 、 $D(v, 0.9) = 252 \mu\text{m}$ より、 $(252-61)/159 = 1.201$ となる。この粉は実験(2)で用いた。

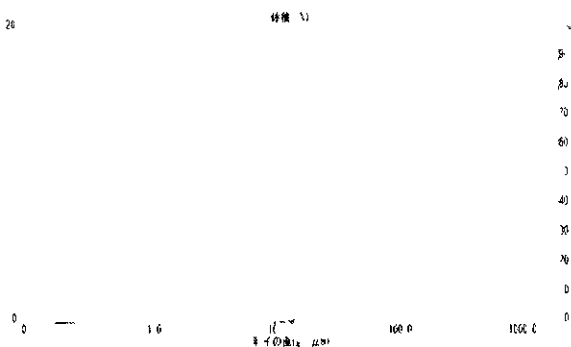


Fig3 Size distribution of polyurethane dust  
ポリウレタン粉の粒度分布

実験(1)の粉の移動性については石松子粉を試料粉とした。これはいくつかの理由から決した。

(a)久節に示した通り、ポリウレタン粉と石松子粉ともレイノルズ数 $Re$ は1以下、沈降速度の値が近く、単一粒子としての流体力学的な特性に大きな違いはないこ

と。

(b) 基準粉体の一つとして知られる石松子粉を用いると、実験結果を他の研究者による結果と比較しやすいこと。

(c)石松子粉は平均粒子径(=中位径)は32  $\mu\text{m}$ で、大きさが良くそろっているため、粒子径の違いという因子を排除し、現象を簡略化して解析できること。

(d)気流への追従性がよく、また可燃性であるため、粉塵爆発研究においてはしはしは用いられてきたこと。

#### B5 理論上の単一粒子の沈降速度(終末速度)

粒子の沈降速度が小さいほど気流に追従しやすくなる。ただし、粉塵雲における現実の沈降速度は単一粒子のものよりも粒子群として考えなければならず、また形状への依存性もあるため、沈降速度はやや異なる。ここでは沈降速度のおおよその値を求めてみる。目安として球形単一粒子を仮定した場合の理論的な沈降速度(終末速度) $V_s$ は、 $Re$ 数が1よりも小さければストークスの抵抗則が適用でき、次式で表される。

$$V_s = (gD^2/18\nu_g)(\rho_s/\rho_g - 1) \quad (1)$$

ただし、 $g$ は重力加速度、 $D$ は粒子径、 $\nu_g$ は気体の動粘性係数、 $\rho_s$ は粉の密度、 $\rho_g$ は気体の密度である。この式から単一粒子の $V_s$ を見積もるとポリウレタン粉の $V_s$ は2.4 cm/s、石松子のそれは3.2 cm/sであり、これらに対する $Re$ 数はそれぞれ0.26と0.067となる。いずれも $Re$ 数が1よりも小さいことが確認できたため、ストークスの抵抗則が適用できる。

#### (倫理面への配慮)

本研究は研究対象が工業製品であり、人や動物を対象としないので、倫理面の問題は無い。

### C 研究結果及び考察

#### C1 吹出し分散過程における粉の移動

石松子粉を吹上げて火花放電を行なっている際の様子をFig 4に示す。一連の写真はスチルカメラを用いて撮影した。レーザ光の照射を左上方から行なっ



Fig 4 Aspect of polyurethane dust cloud after dispersing process

吹き出し後のホリウレタン粉塵雲の様子(左から右へ0.5sごと。 $C < 100 \text{g/m}^3$ )

ているため、画面を左上から右下に斜めに横切る筋が写っているか、これは実験装置のカラス円筒の印の影であり、観測部内の粒子をさえぎるものではない。

Fig 4は $C < 100 \text{g/m}^3$ 、下限界に近い希薄な粉塵雲の場合で、初めに着火しても火炎は伝ばせず放電が継続している。吹上げ後の着火遅れは0.1s、放電持続時間は1sであり、カメラの露出時間は0.067sである。着火時刻では空間に浮遊している粒子全体の動きは速いもので、流脈は不明瞭であるか、時間経過とともに流れに渦が見られるようになり、局所的には粒子の動きが小さくなり、ちょうど浮遊状態にあることかわかる。すなわち、吹上げ後は円筒容器内が小さな渦による乱れにより粉が高速で流動しているか、次第にその移動速度は減少し、小さな渦が大きな組織渦に変化していくことかわかる。粉と気流の連動の差を考慮すれば、吹上げ後の気流は時間とともに早く減衰するため、気流速度は粉の速度よりもやや小さくなっているはずである。しかし、着火遅れ時間では十分に乱流状態にあり、むしろ電極付近は均一であり、この乱流の効果は着火には効果的に寄与している可能性が高い。さらに気流の速度が増加すれば、流れの電極後方で成立した火炎核が発達できず、着火しても火炎が伝ばできない。

着火から火炎が伝ばしていくことで爆発に至るため、着火前後の粉と気流の動きを詳細に調べることは重要である。特に、用いたホリウレタン粉塵の場合は、

粒度分布が広く、小さい粒子と大きい粒子が混在している。そのことから、大きさの違う粒子の移動特性の違い、それらの衝突、摩擦による相互作用すなわち粒子群としての移動特性、帯電による凝集特性などにより気流の速度変化に追従しないため、吹上げる速度、着火遅れの設定によって爆発特性がかなり変化することが推測される。慣性により粉が動き出して気流の速度に達しても、気流が先に減衰しても粉はわずかに運動を続ける(静止空間を高速で吹き出した粉でも速度差による抵抗により、粉はすぐに減速、停止する)。

この吹出し圧力における電極付近の吹上げ速度は15 m/s程度であることから、円筒内の $Re$ 数は $5 \times 10^4$ であり、粘性力よりも慣性力が $10^4$ 倍であり、かつ個々の粒子表面での境界層ははく剥離しているはずであるから気流と粉の移動速度の差に対する表面の抗力は小さいことになる。帯電による凝集力に比べて、流体力学的な慣性力が桁違いに大きいことが類推される。

## C2 空気中のポリウレタン粉塵の爆発特性

Fig 5に空気中におけるポリウレタン粉塵の $P_{max}$ と $\lambda_{st}$ を示す。各粉塵濃度 $C$ について、100から250  $\text{g/m}^3$ まで2回ずつ実験を行なった。 $P_{max}$ は実験の範囲内では $C$ とともに増加する傾向があることわかった。しかし、 $\lambda_{st}$ については100  $\text{g/m}^3$ を除けば、はらつきが大きいことわかった。クロペンタンガス



2,020ppmを含むハイフリトの場合の粉塵濃度に対する最大爆発圧力をFig 6を示す。この場合にはシクロペンタンを含まない場合に比べて、(a) $P_{max}$ の曲線が蛇行していること、(b) $P_{max}$ がやや大きいこと、(c)各Cにおける $K_{st}$ のはらつきが大きいこと、などがわかる。(a)については、 $C=150$ から $175 \text{ g/m}^3$ を境に爆発特性の傾向が変化することか推察される。それよりもCが増加すると、粉塵の燃焼に伴い圧力の上昇があり、しかし、その濃度よりも小さい希薄側では、ちょうど可燃性ガスが粉塵の燃焼を補助する効果か考えられる。すなわち、2,020 ppmのシクロペンタンは(ガス)爆発下限界よりも小さく単独では燃焼しないか、(粉塵)爆発下限界付近の粉塵が燃焼することに対してはむしろ燃焼促進に寄与していると考えられる。さらに、このような寄与があるとすれば、粉塵の爆発下限界をさらに小さい側に広げるのではないかと推測される。爆発下限界付近では、粉塵雲中の伝ば火炎は不安定であり、火炎温度が下がり途中で消滅する可能性が高くなるか、火炎付近にシクロペンタンとポリウレタン

の熱分解によるガスが共存し、それらの燃焼で火炎温度が高く維持されれば、粉塵単独に比べれば消滅せずに火炎が伝はてくるはずである。火炎の伝ばには火炎の反心帯における酸化剤の量にも依存するため現象をより詳細に検討するには、火炎の伝ばの際の火炎構造を調べる必要がある。これについては今後で明らかにしていく予定である。

$K_{st}$ は、特に火炎の伝ば速度とそれに伴う燃焼率に依存する。 $K_{st}$ のはらつきは、容器内での火炎の伝ばが不均一であることかヨな原因と考えられるか、これには(a)装置固有の問題点として粉の分散が不均一なこと、(b)大きさの異なる粉塵を含むため、着火時刻までの粉の流動特性が異なること、(c)着火過程から火炎が伝ばし始める初期の過程の火炎の伝ばが不安定であること、(d)ハイフリト状態の燃焼特有の現象であること、(e)化学着火剤の起爆過程が不均一なこと、(f)粉体容器に空気を充てんしたことなどが要因と考えられる。

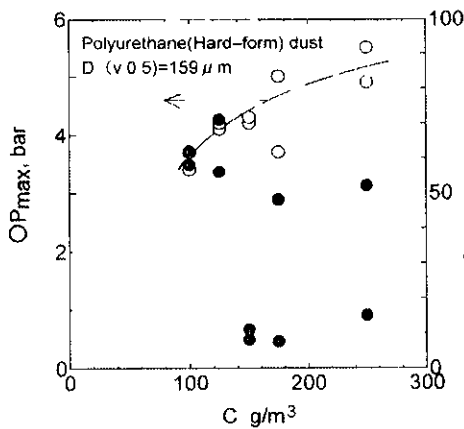


Fig 5 Maximum pressure rise of explosion,  $P_{max}$  and explosion index,  $K_{st}$ , for polyurethane dust in air

ポリウレタン粉の粉塵雲濃度に対する最大爆発圧力  $P_{max}$  と爆発指数  $K_{st}$

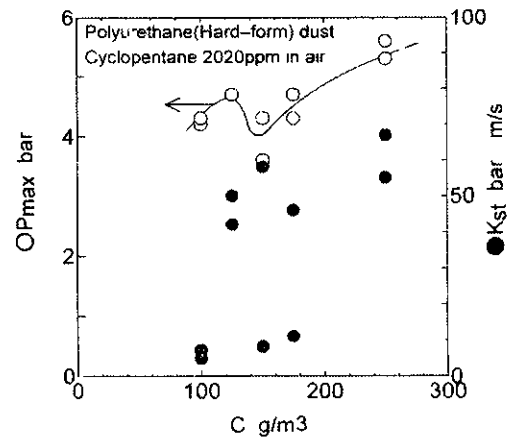


Fig 6 Maximum pressure rise of explosion,  $P_{max}$  and explosion index,  $K_{st}$ , for polyurethane dust and cyclopentane 2,020ppm hybrid in air

ポリウレタン粉とシクロペンタン 2,020ppmのハイフリト粉塵濃度に対する最大爆発圧力  $P_{max}$  と爆発指数  $K_{st}$

### C3 ポリウレタン粉塵の爆発特性の結果の整理

- (1)  $C=100\sim 250\text{ g/m}^3$  において、 $P_{max}=5.5\text{ bar}$ 、 $(dP/dt)_{max}=260\text{ bar/s}$ 、 $K_{st}=70\text{ bar m/s}$
- (2)  $\text{Nクロペンタン } 2,020\text{ ppm}$  一定に対し、 $C=100\sim 250\text{ g/m}^3$  において、 $P_{max}=5.6\text{ bar}$ 、 $(dP/dt)_{max}=247\text{ bar/s}$ 、 $K_{st}=67\text{ bar m/s}$
- (3)  $\text{Nクロペンタン } 5,270\text{ ppm}$  一定に対し  $C=100\sim 175\text{ g/m}^3$ 、 $P_{max}=5.7\text{ bar}$ 、 $(dP/dt)_{max}=220\text{ bar/s}$ 、 $K_{st}=60\text{ bar m/s}$

用いたポリウレタンの粒子径が大きいと、爆発の強さはやや小さいという結果が得られたか、より小さな粉塵を試材として用いれば、 $K_{st}$  は 100 を超えるものと考えられる。他の粉塵に比べ、爆発の強さは中程度と判断される。

### D 結論

本分担研究では、爆発抑制の観点から、主に可燃性粉塵の爆発特性を明らかにする目的で、可燃性粉塵の爆発の強さを調べるとともに、可燃性ガスが混合した場合のハイフリト(複合)状態についても併せて調べた。実験研究により、以下の結果が得られた。

- (1) 初めに吹上げられた粉が空間に分散する様子についてレーザードクト光学システムを使って調べた。吹上げた粉塵雲は初め細かい渦からなる乱流状態にあり、等方性、高速で動いているが、少しの時間経過後、細かい渦が大きな組織渦になり、局所的には粉の移動速度が小さくなることわかった。
- (2) ポリウレタンの破砕粉(平均粒子径  $159\text{ }\mu\text{m}$ )を使い、その爆発の強さを測定するとともに、冷媒として使われている  $\text{Nクロペンタン}$  ガス(可燃性ガス)が混合したハイフリト状態の爆発の強さも測定した。空気中の  $\text{Nクロペンタン}$  のガス濃度が  $2,020\text{ ppm}$  と  $5,270\text{ ppm}$  のそれぞれ一定条件の下で、ポリウレタン粉塵雲の濃度を  $100$  から  $250\text{ g/m}^3$  まで変えて調べた結果、爆発圧力は、ポリウレタン単独の場合よりも  $\text{Nクロペンタン}$  を併加した場合のほうがやや高くなる傾向があること、爆発指数は粉塵雲濃度によってばらつきが大きかったことわかった。しかし、実験範囲内の粉塵雲濃度において代表値となる  $P_{max}$  と  $K_{st}$  を見ると、 $\text{Nクロペ}$

$\text{Nタン}$  の併加の効果は顕著には見られなかった。

- (3) 使用したポリウレタン粉塵は他の粉塵と比べると、爆発の強さは中程度と判断される。

今後、ほかの可燃性粉塵についても爆発特性を調べるとともに、可視化手法により火炎構造の変化も調べる予定である。

### E 健康危険情報

(特になし)

### F 研究発表

#### 1 論文発表

(なし)

#### 2 学会発表

(なし)

### G 知的財産権の出願 登録状況

(予定を含む)

#### 1 特許取得

(なし)

#### 2 実用新案登録

(なし)

#### 3 その他

(なし)

(リサイクル品 廃棄物処理工場での粉塵爆発災害の防止に関する研究)  
粉塵移送ダクトの静電気危険性

分担研究者 児玉 勉 独立行政法人産業安全研究所 研究部長  
山隈 瑞樹 独立行政法人産業安全研究所・主任研究官

破碎等で発生した粉塵が空気ダクトを経て集じん機へ回収される過程を想定し、絶縁性ダクト等で発生する沿面放電による粉塵の着火特性及び集じん機内ではく離帯電の特性を調べた。その結果、沿面放電においては  $70\mu\text{C}$  以上の放電電荷量で試験粉体が発火した。一方、集じん機のはく離帯電においては樹脂粉、金属粉ともにフィルタ表面からはく離する際に大きな帯電量を示し、特に、金属粉塵の場合には、フィルタが帯電することにより、着火性の高い火花放電を発生する可能性があることが判明した。

## A 研究目的

リサイクル現場において廃棄物の破碎機等によって発生した可燃性粉塵は、通常、空気ダクト等を通して輸送され、集塵機へ集められる。もし、ダクトが合成樹脂等の絶縁性素材で作られている場合、または、内面に絶縁性コーティングを施している場合には、沿面放電が生じる可能性がある。火花放電やフラン放電に比較して、沿面放電は極めて放電エネルギーが高いことが特徴であり、これにより粉塵に着火するおそれがある。さらに、集塵機に集められた粉塵は、内部から取り出して最終処分されるか、その際の操作に粉塵又はフィルタが帯電し、爆発する可能性がある。実際に爆発災害が頻発している。

以上のように、粉塵の移送及び回収作業においても粉塵爆発の可能性があり、このような条件下での帯電性、爆発特性等を明らかにしておく必要があると考えられる。そこで、沿面放電による粉塵への着火特性及び集塵機内での帯電現象等について実験的調査を実施したので報告する。

## B 研究方法

## B 1 沿面放電による粉塵着火実験

沿面放電は、フィルムのように薄い絶縁物の背面に接地された電極板が存在する場合に、フィルムに大量の電荷が蓄積して発生する強力な放電である。接地背板の構造及び電気的性質に

よって異なった放電形態をとることかわかっている。本研究では、図1に示すように、金属板又は導電性繊維を縫い込んだポリプロピレンシートを接地背板とし、厚さ  $0.1\text{mm}$  の PET ノートを帯電させて、接地球電極との間で沿面放電を発生させた。爆発用の試料粉体として、石松子及びアントラキノンをを用いた。

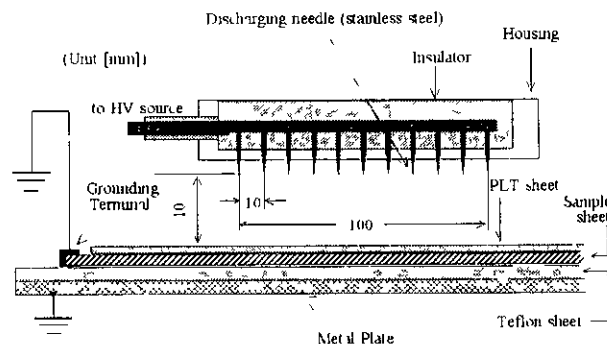


図1 コロナ荷電装置及び試料の配置方法

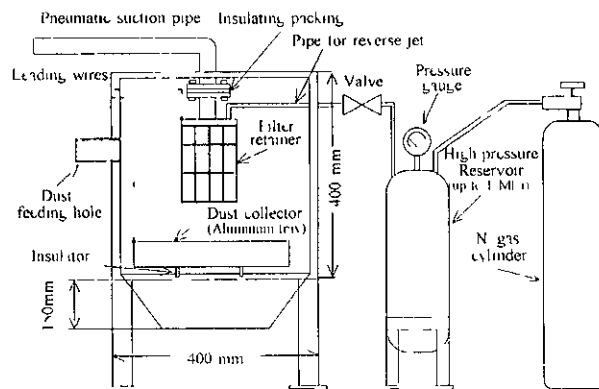


図2 実験用ハグフィルタ式集じん機の構成

## B 2 集じん機内における帯電実験

実験用小型集じん機を図2に示す。この装置は、木研用に特作製作したものである。装置の入井中央には金属製フレーム(リテーナ)を設け、これに試験用ハクフィルタを取り付けた。吸引エアポンプにより内部の圧力を低下させ、側面の開口部から試験用粉塵を導入した。十分な量の粉塵がフィルタ表面に付着した後、吸引を停止し、圧縮空気をフィルタ内部から吹き付けて粉塵をはく離(逆洗)させ、その際の粉塵の帯電量を測定した。

### (倫理面への配慮)

本研究は研究対象が工業製品であり、人や動物を対象としないので、倫理面の問題はない。

## C 研究結果

### C 1 沿面放電による粉塵着火実験

沿面放電によって堆積粉塵(アントラキノン)が爆発する様子を図3に示す。一般に堆積粉塵をこのように炎上させるのは困難であるが、沿面放電は非常に強力であるので、放電エネルギーの一部が高速の空気流を発生させ、粉塵を舞い上げていると考えられる。

沿面放電の着火エネルギーを正確に求めることは技術的に困難であったので、放電電荷量によって着火性を評価することとした。全属板とPETノートの組み合わせで発生させた沿面放電による着火実験結果を図4(a)及び(b)に示す。このときの爆発に必要な最小の電荷量(MIC)は160  $\mu\text{C}$ であった。同じ放電条件で石松子のMICは180  $\mu\text{C}$ であり、石松子の着火特性から予測されたほどに大きな違いは見られなかった。一方、導電性糸を織り込んだ布とPETノートの組み合わせにおいては、アントラキノン及び石松子のMICは、それぞれ70  $\mu\text{C}$ 及び330  $\mu\text{C}$ と大きな違いが見られた。現時点では、理由は明確ではないが、両粉体の性質を考慮すると、粉体の舞い上がり易さ及び放電の強度が影響しているものと考えられる。

### C 2 バグフィルタ式集じん機内の帯電現象

実験に用いたハクフィルタの素材は3種類あり、そのうち2種類は帯電防止加工(導電性

繊維を配合)を施したものであった。これらの外観を図5に示す。本報では、これらを標準型(Standard)、縞型(stripe)、混合型(Mix)と称する。縞型及び混合型が帯電防止加工品である。

試験用粉体は、表1に示すように合成樹脂5種類、全属(アルミニウム)3種類であった。

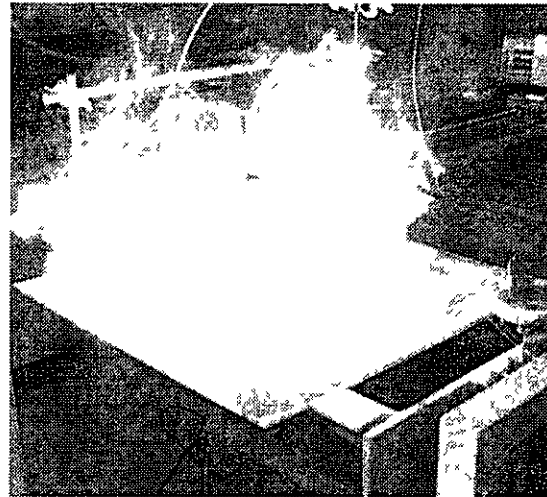
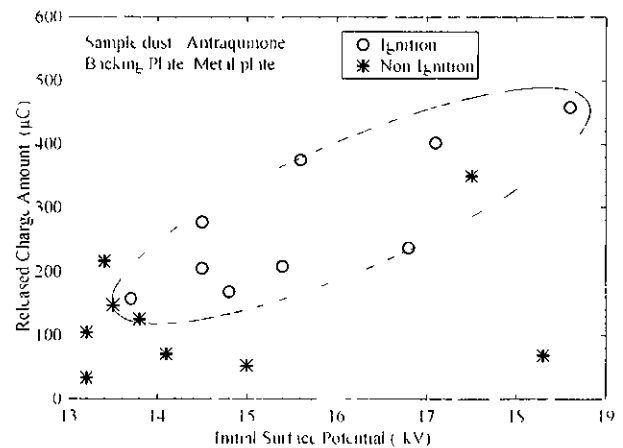
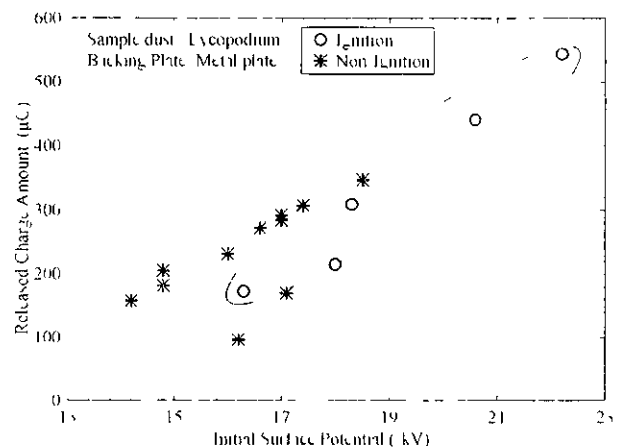


図3 沿面放電による堆積粉塵の爆発



(a) アントラキノン



(b) 石松子

図4 沿面放電による堆積粉塵の着火特性