粉じん爆発の危険性評価技術

Technical Assessment of Dust Explosion Hazards

松 田 東 栄* 林 年 宏*
Toei MATSUDA, Toshihiro HAYASHI

Key Words : Dust Explosion, Explosibility Test, Combustible Dust, Hazard Classification

1. まえがき

我が国では、1970年から86年の17年間に101件の粉じん爆発災害が発生し、231名の死傷者(死者38名)を出している。年間約6件程度の災害発生件数になるが、人身事故に至らなかった事故や小さな火災は必ずしも把握されていないので、それらを網羅すれば、実状ははるかに多くの可燃性粉じんによる火災・爆発災害が起きているものと推察される。粉じん爆発による災害は、人身事故ばかりでなく大規模設備破壊などをもたらすので、諸外国でも大きな問題になっている。特に、米国では穀物サイロでの粉じん爆発が毎年連続して発生し、大きな被害を出していることはよく知られている。今日、粉体工学の発展に伴って、粉体貯蔵設備などはますます大型化され、粉体はファイン化され、粉体処理装置は知識集約化される傾向にあるが、可燃性粉じんを扱う場合には粉じん爆発の危険性に対

する工学的な対策が必要になる。最近では、粉体として利用される新素材物質も飛躍的に増加しており、それらの中には、火災・爆発危険性が十分把握されないままに製造されようとしているものもある。少なくとも、新規物質が可燃性粉じんである場合には、これらの爆発危険性に対し十分な注意が必要である。

このような粉じん爆発の危険性評価および防止対策の重要性を認識して、かねてから日本粉体工業技術協会では、粉じん爆発試験法委員会を設置して爆発試験法を審議してきたところであるが¹⁾、同委員会では去る2月、労働省産業安全研究所の招きにより来日した、この方面の専門家であるワルシャワ工科大学 動力・航空工学部長のWolanski教授に講演をお願いする機会を得た。同教授は、ポーランドで隔年ごとに開催されるようになった「粉じん爆発の国際研究集会」^{2,3)}の実質的な主催者としても知られているばかりではなく、ASTMの作成機関NMABによってただ1回だけ開催された「ガス、蒸気、粉じんの爆発危険性分類に関する国際集会」⁴⁾の有力メンバーでもあった。講演会での同教授の演題は「粉じんの爆発性評価と粉じん爆発特性値試験方法の傾向」というものであったが、ここではその主旨を含めて、粉じん爆発の発生要因並びに最近の可燃性粉じんの爆発危険性評価技術について解説した。

2. 粉じん爆発の発生要因

一般に、粉じん爆発を起こす粉じんは、可燃性固体を細分化したもので、気体中(通常は空気中)に浮遊する微細な固体粒子や微細な繊維状のものである。これ

平成2年8月27日受付

*労働省産業安全研究所(〒204 清瀬市梅園1-4-6)

TEL 0424-91-4512

<著 者 紹 介>

(松田東栄)

昭和40年新潟大学理学部卒、現在、労働省産業安全研究所化学研究部主任研究官。

専門：化学安全工学、燃焼学。粉じん爆発の災害防止の研究に従事。

(林 年宏)

昭和40年金沢大学工学部卒、現在、労働省産業安全研究所化学研究部主任研究官。

専門：ガス爆発の防護。現在、可燃性ガス・粉体混合物の爆発特性に関する研究に従事。

らの粉じんが粉じん爆発を起こすためには、

- (1) 粉じんが空気中に浮遊、分散していること、
- (2) 分散した粉じんの濃度が、爆発下限濃度以上であること、
- (3) 大きなエネルギーとエネルギー密度を持つ着火源が存在すること、

の各要因が必要である。すなわち、燃料としての可燃性粉じんが単に存在しただけでは、粉じん爆発は生起しないのであって、3つの要因が同時に充足されることが必要である。

要因(1)は、空気中における粉じんの分散性、浮遊性(場合によっては分散後の再凝集性)に関係する。粒子径や固体密度の大きい粒子は、一旦浮遊しても重力沈降により落下して、粉じん・空気-混合気を形成し難く、その意味で粉じん爆発を起こす危険性は小さい。一方、堆積粉じんは風や空気圧の作用で容易に空気中に飛散する。この意味では、要因(1)に至る前提としての堆積粉じんの存在そのものが、潜在的な発生要因になり得るが、一般に、浮遊粉じんの形成度合は粉体処理工程に大きく依存する。

要因(2)は粉じん濃度についての条件であるが、通常、分散して浮遊する粉じんは空間的にも時間的にも変化する種々の粉じん濃度を形成する。それ故、粉じん爆発では爆発可能となる最低濃度、すなわち爆発下限濃度が工業的にはより重要であり、要因(1)が達成される場合は(2)の要因もなれば達成されていると考えた爆発防止対策が必要であろう。このように、要因(1)と(2)は互いに関連して発生し、それらの存在確率は工程条件に依存する。もっとも、堆積粉じんが空気力学的な乱れによって分散するのであれば、その空間の粉じん濃度が爆発下限濃度を超えるかどうか、あるいは爆発性粉じん混合気が形成される領域の大きさなどは、正確には、工程内の粉じんの分散を引き起こす形態に著しく依存する。また、爆発可能な濃度範囲の粉じん混合気が、定常的に存在する場合と、ある時間だけ形成される場合とがある。空気輸送システムにおける粉じん流は前者の例で、バグフィルタのろ布の払い落とし時に形成される粉じん混合気は後者の例である。

しかし、上記の要因が達成されても、およそ着火源(要因(3))が存在しなければ、粉じん爆発は起こらない。最も一般的な着火源には、電気的、化学的あるいは単なる熱的なものなどがあるが、着火源としての有効性は、ある体積の粉じん混合気を着火させ得るかどうかによって決まる。しかも、この有効性は、着火源

のサイズや形状、エネルギー密度などに依存する。このような着火源を粉体処理工程から完全に排除することは、実際上なかなか困難なようであるが、粉碎工程では衝撃・摩擦火花、乾燥工程では高温発火や静電気放電など、一般にそれぞれの工程ないしは設備特有の着火源が存在するので、予防対策を講ずることは可能であろう。

3. 危険性評価のあり方

以上のように、粉じん爆発の発生要因は、實際上工程の設備や操業条件に大きく依存する。それ故、産業界における粉じん爆発の危険性評価のあり方としては、可燃性粉じん自体の物質危険性評価とそれらを取り扱う設備の危険性評価に分けることが必要である。

3.1 粉じんの物質危険性評価

既に述べたように、一般に粉じん爆発を起こす危険性のある粉じんは可燃性物質であるが、爆燃性や発火性などを有する一部の粉じんを除けば、法的にそれらの製造や使用が制限されているわけではない。食品、飼料、薬品、プラスチック、化成品等々に関連する膨大な量の可燃性粉じんが存在するが、当然ながら、一般に、それらを爆発性粉じんとは呼ばない(規制または認知されていない)。

それでは、大部分の可燃性粉じんは粉じん爆発を引き起こす危険性があるとしても、実際に爆発する粉じんの種類などはどのようにして判定すればよいのだろうか。粉体の化学構造や燃焼熱、熱分解特性等々の物理化学的特性値、あるいは粉体物性や粒子表面状態などの情報は有力な判断材料になる。また、これまでの実験や研究によって、ある程度は予測できるが、性質がわかっていない物質や新規開発物質などは、最終的に爆発試験を行って判定することになるであろう。爆発することが予測できても、爆発のしやすさや激しさの程度を知るためには、目下のところ爆発試験によって測定するより他に有効な手段は見出されていない。一般にこれらの爆発危険性の判定法および爆発危険特性値の測定法を合わせて、粉じん爆発試験法と呼んでいる。これらの試験法を確立して、測定データを公表している国や外国機関もいくつかあるが、我が国では公的には未整備な状況にある。最近、ECを中心に試験法の国際的な標準化の方向にある。

粉じん爆発を起こす物質の危険性評価が目的であるとしても、粉じん爆発を実験的に生起させるわけであるから、評価そのものは再帰的なものにならざるを得ず、その意味では設備面からみた危険性評価と密接に

関係する。また、安全上は、爆発試験はすべて最悪条件（最も爆発しやすい条件および最も激しい爆発を生じる条件）において測定することが望ましいが、データの適用性を考慮した場合に現実的でないこともあって、通常は、常温・常圧下において任意の装置および試験法によって、最も激しい爆発を生じ易い条件で試験を行っている。しかし、工程に適合した条件で爆発試験を行うことが、過大ないしは過小評価を避ける評価のあり方として必要であろう。

3.2 粉体処理設備からみた危険性評価

上記のように、粉じん爆発の発生条件は可燃性粉じんを扱う工程に大きく依存し、個々の粉体処理設備に特有の粉じん爆発危険性が存在する。設備・装置の方式や運転条件によっても危険性は異なってくるので、個々の設備の粉じん爆発危険性を十分検討、把握して評価を行う必要がある。また、各設備の危険性ばかりでなく、工程のシステム全体としての危険性の評価も忘れてはならない。

このような設備面から見た危険性の最も重要な要因は、規模効果と混合気の乱れに起因するものであろう。両者は互いに関連する要因でもあるが、前者は設備が大きくなることによって、より激しい爆発に到る効果（熱的な条件ばかりでなく、諸々の原因による）を指し、後者は加速的な乱流燃焼の生起に関係する。火炎（燃焼波）前方の気体力学的な乱れは火炎面積を拡大させ、燃焼速度を加速させる。火炎の加速は乱れを増大させ、さらに燃焼速度を加速させる。このようなフィードバック機構が作用して、火炎は次第に著しく加速されるようになる。最悪の場合は、衝撃波が発生し、これに燃焼波が併合すると爆ごう（detonation）が生起する。その火炎速度は、約 2,000 m/s 以上にもなり、波面圧力は 8 MPa に達する場合もあり⁵⁾、壊滅的な破壊力を示すことになる。粉じん爆発では、爆ごうの生起はかなり懐疑的なものと考えられてきたが、米国穀物サイロで多発している粉じん爆発災害の破壊状況から、現実にも爆ごうが発生している、と考える研究者もいる。Wolanski 教授もその一人である。しかし、このような設備面での危険性評価は、粉体設備の種類が多岐にわたるので、本稿では省略する。

4. 粉じんの爆発危険特性値と測定法

4.1 爆発判定試験

粉じん試料は、最も爆発を起こしやすいもの、すなわち、できるだけ乾燥した細かい粉じんで、粒子表面が酸化されていない“新鮮な”試料が望ましく、この

意味でその粉じんが存在するプロセスの危険性を代表するものでなければならない。フレーク状や粒状物質などのものでも、輸送や貯蔵作業中に破碎、分級されて思いもかけない粉じん爆発を起こす場合がある。通常、粒径が 63 μm 以下の粉じんを用いて行う。

試料粉じんが粉じん爆発を生ずるかどうか、すなわち、着火源から十分に離れた位置の粉じん混合気中でも火炎が自己伝播するかどうか、最も基本的な判定基準となる。これは、限界現象を表す下記の特性値の測定の場合にもあてはまる。しかし、火炎伝播の判定方式は、使用した爆発試験装置ごとに異なり、統一されたものはない。爆発試験装置は、爆発装置内に種々の濃度の浮遊粉じんを形成させて起爆できる構造のものでなければならないが、着火源の種類や大きさ、混合気の乱れの程度などによって、判定結果が影響を受ける場合もある。装置としては、米国鉱山局で開発された Hartmann 型粉じん爆発試験装置（容積；約 1.2 ℓ 、着火源；電気火花）が広く使用されてきた。我が国では、吹き上げ式粉じん爆発試験装置と呼ばれる同様の形式のものが、日本粉体工業技術協会において、適合装置の一つとして採用される見込みである。他に、以下に述べるような測定装置を用い、種々の条件下で爆発を生ずる粉じんかどうかについて試験が行われている。試験条件は、試料粉じんを扱う工程の操業条件を代表するとともに、設備の危険性評価を反映した条件で行うことが望ましい。特に、着火源などは、電気火花では爆発しないが、ガス炎などの大きなエネルギー源では爆発する粉じんもあり得るからである。

爆発試験で粉じん爆発を生ずるものであると判定された場合は、爆発のしやすさや激しさの程度を表すと考えられる粉じん爆発危険特性値を測定する。これには、爆発下限濃度、最小発火エネルギー、発火温度、爆発限界酸素濃度、最大爆発圧力、最大圧力上昇速度などがある。代表的な特性値について次に記す。

4.2 爆発下限濃度

爆発火炎の伝播を維持するために必要な最低の粉じん濃度が爆発下限濃度（下限界）であるが、限界現象を支配する物理的プロセスについては、ガス爆発においてさえも、熱損失、浮力、火炎の伸張、あるいは化学反応機構によって決まるなど、いくつかの考え方があり、火炎伝播理論（または消炎限界機構）によって正確に爆発限界を予測できるまでには至っていない。Wolanski 教授ら⁴⁾は、熱損失効果による考えを主に支持し、ガスと粉じんの爆発限界現象を支配する機構に基本的な相違はないと主張している。

一方、下限界の実測データを見ると、同じ種類の粉じんでも、粉じんの特性や測定装置および方法によって著しく異なる値が報告されている。これまで種々の測定装置が考案されてきたが、国際的に統一された標準装置といえるようなものはない。従来使用されてきた試験装置の中で最も有名で、我が国でも広く使用されているものが、上述のHartmann型試験装置である。この装置はもともと大規模な炭じん爆発坑道試験結果と同じ結果を与えるように開発されたものであるが、爆発容器内で均一な粉じん濃度が達成できない、特に比重の大きい粉じんの場合に困難であること、装置が小さく、下限界が低く出ること、などが指摘されている。Wolanski教授は、講演会において、Hartmann型と同種の装置内における粉じん濃度の不均一性と爆発火炎の挙動を高速度撮影したフィルムを示し、それらの結果や熱力学的考察から、 $\sim 20 \text{ g/m}^3$ などの下限界は低すぎる値で、妥当でないことを述べていた。

最近、層流伝播火炎を正に観察できるように、より大きい装置(図1)で爆発下限界を測定する方法が提案されている。それによると、いくつかの有機粉じんの下限界は、 $70 \sim 75 \text{ g/m}^3$ で国際的に一致する値であった。現状では、下限界が粉じん固有の特性値であるとはいえないので、測定方法に留意して、データの扱いおよびそれらの解釈については慎重に行うべきであろう。

実際の粉じんの分散状況を考慮すれば、爆発下限界だけでは限界量を評価するには十分ではないとして、Wolanski教授⁴⁾は新しい尺度として最小危険粉じん量(Minimum Hazardous Mass, MHM)を提案している。分散させた粉じんの総量(M)と容器の大きさ(V)から算出される平均濃度(C_0)が等しくても、粉じん雲が容器全体に広がるか、容積 v_1 の空間に局部的に偏在

図2 最小危険粉じん量(MHM)の概念⁴⁾

するかによって、粉じん雲の実質的な濃度(C_1)は異なる(図2)。この粉じんの下限界が 0.1 kg/m^3 であったとすれば、粉じん雲が容器全体に広がる場合には爆発を生じないが、局部的分散の場合には激しい爆発を生じ、爆発圧力の大きさによっては容器の破壊もあり得る。このMHMは、ある装置を破壊するに足る最小の粉じん量とでもいうべき概念で、設備面から見た危険性評価に有用な危険特性値の一つであろう。

4.2 発火温度

粉じん混合気の発火温度は、電気炉型式の発火温度測定装置で測定する。電気炉中のガラス管内が均一温度になるように電熱線で加熱し、一定量の粉じんを分散させ、粉じん混合気の発火を観察する。粉じん量を変化させ、発火の起こる最低温度、すなわち発火温度を測定するもので、ほぼ同等の装置が国際的に使用されてきた。しかし、これらのガラス管内容積は約 0.27ℓ にすぎず、火炎伝播を観測するには小さすぎることから、より大きい容積の加温容器を持つ電気炉装置が設計され、米国鉱山局などで使用されている。その結果、粉じんの浮遊滞留時間が増し、より低い発火温度が得られるようになった。より低い値を与える装置が、果たしてより良い測定装置かどうか、意味のある基準を考える必要があろう。

4.3 最小発火エネルギー

圧力、温度、粉じん濃度などを変化させて、形成した浮遊粉じん中で電気火花を飛ばした場合、発火が起こる火花エネルギーの最小値を最小発火エネルギーという。電気エネルギー密度の空間的、時間的分布が浮遊粉じんの発火に大きく影響するため、測定は面倒である。通常、コンデンサーの放電火花を用いるが、放電回路中の抵抗による熱損失を考慮して、電極間放電電流および放電電圧の時間積分によって求めるが、粉じん混合気 of 電気火花による発火の機構、あるいは放電エネルギーが活性化エネルギーに変換される機構は十分に分かっていない。ドイツやスイスでは、コンデ

図1 爆発下限界大型測定装置における S_m/C_0 磁性粉じんの爆発状況(100ℓ垂直管, 上端閉, 下端開放)

ンサーに抵抗とインダクタンスを接続した電気回路を使用して測定している。その結果、従来のデータの約 $1/10 \sim 1/100$ の値が得られている。このように、電気回路によって異なるデータが得られるので、この場合もまた、より低い値を与える測定装置が、果たしてより良い装置がどうかという疑問が生じる。現状では、国際的に同意された粉じん爆発の最小発火エネルギー試験法はない。

発火、すなわち火炎伝播が生ずるか否かの限界では、火炎の大きさの限界(最小火炎核)が存在し、そのサイズより大きい火炎核が放電火花によって形成されれば火炎伝播は達成され、それ以下では火炎は消滅する、と考えることができる。最小発火エネルギーは、とりもなおさず、極限の最小火炎核(直径: $2R$)の形成に関与するエネルギーともいえる。また、最小火炎核よりも小さい火炎は消滅することから、最小火炎核は細隙における火炎の消滅限界である消炎距離 d_q に相当する。さらに、最小火炎核の半径はほぼ火炎の厚み δ_L (層流火炎幅)に等しい($d_q = 2R \approx 2\delta_L$)。

混合ガスの場合には最小発火エネルギー E_m と消炎距離は、実験的に $E_m = 0.06 d_q^2$ の関係にある。そこで、測定が困難であって、かつ測定に用いた電気回路に依存する最小発火エネルギー値を直接測定する代わりに、消炎距離を測定して最小発火エネルギーを予測する方法が、粉じん混合気についても適用できるだろうと思われる。

4.4 最大爆発圧力および最大圧力上昇速度

密閉容器中において浮遊粉じんの爆発によって生ずる圧力の最大到達値を、最大爆発圧力という。最大爆発圧力は粉じんの種類、濃度、粉体特性などに依存し、通常、化学量論組成濃度の数倍にあたる最適粉じん濃度において得られる。また、爆発圧力の変化率の最大値を最大圧力上昇速度というが、これは燃焼速度に関係し、爆発の激しさを表す特性値である。

空気中に分散した可燃性粉じんの、急激な燃焼反応の結果生ずる燃焼熱によって、容器内のガス温度が上昇し、急激な爆発圧力の発生を引き起こすが、粉じんは完全燃焼するわけではなく、かつ器壁での熱損失が大きく、断熱条件での計算値より常に小さく、実測によって求めている。爆発圧力は測定容器の大きさと形状、浮遊粉じんの乱れの程度、着火源の種類・大きさなどの測定条件によっても異なり、その測定方法は過去何度も変化してきた。現在、国際規格 ISO-6184⁶⁾ が制定され、容積 1 m^3 の円筒容器を有する大型装置を用いた方法が粉じん爆発の最大爆発圧力および最大圧

図3 1 m^3 容器における金属・無機粉じんの爆発データ ($dP_{\max}$: 最大爆発圧力, kPa , $(dP/dt)_{\max}$: 最大圧力上昇速度, kPa/s)

図4 1 m^3 容器における有機粉じんの爆発データ

力上昇速度の標準試験法とされている。

図3および4は、ISO規格で定める方法で測定された各種の金属・無機粉じんおよび有機粉じんの平均粒径に対する現存データをプロットしたもので、同一種の粉じんではないことに注意されたい。また、例外もあるが、 $10\mu\text{m}$ 以下で粒径が測定されていないものは、 $10\mu\text{m}$ のところにまとめて表示してある。 1 m^3 装置と等価のデータを与えるといわれているスイス製 20 l 球形爆発装置(着火源: 火薬)が EC 各国で使用されており、別の標準装置となりつつある。しかし、測定の目的は、爆発防護対策の一つとして設置される、爆発放散口の最適面積の決定や耐爆発構造の設計データへの適用にあり、必ずしも粉じんの危険性評価を意図してはいない。とはいえ、同一装置および方法で測定されたこれらのデータは、現状では非常に有用である。ただし、測定容器内の粉じん混合気は乱れ状態にあり、乱れは測定データに影響すること、さらに、乱れは初期条件(粉じん混合気の形成方法)と境界条件(装置の形状と寸法)によるので、データも常に測定装置に依存することに留意しなければならない。特に、最大圧

力上昇速度は、乱れの特性によっては、乱流燃焼速度が増し、さらに大きな値が得られることも予測されるので、実際の工業条件に対応する値と見なしてはならない。つまり、最悪条件のデータではなく、工程や設備によってはISO規格による最大圧力上昇速度よりも大きな値が爆発時に達成される可能性もあり、危険特性値として妥当かどうかという議論になる。実際の爆発災害危険性を表すような値であるかどうかについては、設備面から見た評価と併せて考える必要がある。

5. あとがき

危険性評価の目的は、産業工程での粉じん爆発災害を予防することにある。しかし、評価のための粉じん爆発試験法で得られるデータは、上述のように比較的小さな装置で測定されるので、それらのデータをそのまま産業設備や装置に適用することは困難であろう。同一試験装置で測定されたデータであれば、異なる粉じんに対する相対的な危険性の目安として利用できるが、もし、実際面に適用する場合には、設備面から見た危険性評価を考慮して慎重に行う必要がある。設備面から見た危険性評価については、究極のところ、実

際規模での各設備中での爆発試験が不可欠であろう。そのような試験は費用がかかるが、理論的研究が立ち遅れている現状では、越えなければならないハードルであろう。

可燃性微粒子群中の火炎伝播理論は、我が国でも水谷⁷⁾、田中ら⁸⁾による研究が知られているが、今日なお、層流粉じん混合気中での火炎伝播機構を支配するプロセスについては異なった考え方がある。燃焼の形態もきわめて複雑であり、粉じんの種類や特性にもよるが、粉じん粒子は加熱されて可燃性揮発成分や可燃性分解ガスを放出し、それらが気相燃焼するものと、粒子が表面燃焼(異相反応)するもの、その両者を合わせた挙動をとるものなどに分かれ、熱伝達要因も、熱伝導、放射、対流あるいはそれらの組み合わせについてのいずれであるかも結論には至っていない⁹⁾。微粉炭などでは、爆発規模が違えば混合気の加熱速度が異なり、伝播機構も異なる可能性がある。粉じん爆発の物理的・化学的プロセスの基礎的な研究が進展し、粉じん爆発の理論的モデルが確立される日も近いことを期待したい。そうすれば、粉じん爆発試験法もより適切なものに改善され、合理的な予防対策が確立されて災害防止に有力な決め手となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 田森行男、荷福正治：粉体と工業，**20**，63 (1988)
- 2) 松田東栄：粉体と工業，**19**，55 (1987)
- 3) 林 年宏：安全工学，**28**，121 (1989)
- 4) Proc. Int'l. Symp. on the Explosion Hazard Classification of Vapors, Gases and Dusts, National Materials Advisory Board, Pub.447, National Academy Press(1987)
- 5) Gardner B. et al. : Proc. 21st(Int'l.) Symp. on Combustion, 335, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. (1986)
- 6) ISO-6184/1 : Explosion Protection System(1985)
- 7) Mizutani Y. et al. : *J. Heat Mass Transfer*, **8**, 921 (1965) : 日本機械学会論文集, **31**, 1009 (1965)
- 8) 田中達夫：粉体工学会誌，**18**，114，190 (1981)
- 9) Jarosinski J. et al. : 上記文献 5)，1917 (1986)