

産業安全研究所安全資料

SAFETY DOCUMENT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1975

粉じん爆発に対する圧力放散設備

松 田 東 栄
内 藤 道 夫

労働省産業安全研究所

目 次

1. ま え が き	1	5. 圧力放散実験の解釈と応用	17
2. 粉じん爆発に対する圧力放散 設備とその問題点	1	6. 圧力放散設備の実施	22
3. 密閉容器内の爆発圧力と圧力 上昇速度	3	6.1 放散面積の決定	22
3.1 ガス爆発の場合	3	6.2 圧力放散設備の実際	25
3.2 粉じん爆発の場合	5	6.2.1 ベントの設置場所と容器形状	25
3.3 標準試験装置との比較	8	6.2.2 装置の耐圧力と実際への応用	28
4. 圧力放散の爆発特性に対する 影響	10	6.2.3 放散ダクトの使用	29
4.1 圧力-時間曲線	10	6.3 放散カバーの選択	29
4.2 放散爆発圧力	13	6.3.1 破裂形式の放散カバー	29
4.3 容器容積の影響	16	6.3.2 ドア形式の放散カバー	30
		6.3.3 建築物の爆圧放散	32
		6.4 実 施 例	33
		7. 結 言	34
		引用文献(61)	35

“粉じん爆発に対する圧力放散設備”

松 田 東 栄・内 藤 道 夫

1. ま え が き

可燃性の物質が空気中に分散するような系を扱うプロセスでは、火災・爆発の危険性を伴うことが常識であるから、安全操業上、何らかの有効な対策を講じなければならない。これらの危険性とは、物質の状態や種類および雰囲気の状態によって定まるガス・蒸気・ミスト(またはスプレー)・粉じんなどの急激な燃焼反応に基づくものであるが、このような物質を扱う場合は、災害の発生を避けるための予防手段を取るのが第一であり万一爆発が生じたときは災害発生による被害を最小限度に抑制する対策を講じなければならない。後者の対策としては危険プラントの隔離、チェックなどによる爆発伝播の阻止、自動ダンパーなどによる孤立化、自動爆発抑制装置の活用、爆圧放散設備による内部爆発の安全な圧力放散などいろいろの方法がある。

このうち爆圧放散設備は、しばしば対象となる爆発危険性のある装置に広く、安価に利用できる被害抑制対策の代表的なものの一つである。ところが、現在一部で、多少利用されているものの、粉じん爆発危険のある装置等にはいまだに常識的な安全設備として取りつけられず、また、粉じん爆発に対する圧力放散理論とその応用面については粉じん爆発の特殊性もあっていまだに体系化されていない。したがって、それらの安全性に関する技術的な検討は、粉じん爆発危険のある工程が増大する今日においては急務を要するものと考えられる。著者らは、さきに技術資料「粉じん爆発の危険性とその防止対策」¹⁾において爆発ベントについて簡単に解説したが、その後内外におけるこれに関する研究が進んでおり、この解説だけでは利用上不十分と思われるので、さらに深く突込んだ視野からこの本質的な問題点にふれ、その後に報告されている実験

研究の代表的な情報を整理し、特に粉じん爆発の特性と対応する圧力放散理論およびその応用について紹介し、安全対策上の参考とした。

2. 粉じん爆発に対する圧力放散設備とその問題点

爆発圧力放散設備の原理は、よく知られているように、いたって簡単でやや原始的でもあるが、爆発危険性のある容器の壁に、故意に材質的あるいは機械構造上において“弱い側面”，いわゆる爆発圧力放散面(簡単に爆発ベント，あるいは単にベントとか放散面がしばしば円形を取るのので，放散孔などとも言う)を設け，容器本体の破裂や破損を防ぐことにある。このような対策は，ボイラーやボンベなどの高圧容器の安全弁などに広く利用されていることは，周知の通りであるが，粉じん爆発では，加圧の原因が急激な圧力上昇を伴う爆発によるものであることや，多くの場合容器の耐圧性が非常に小さく，その容積が比較的大きいという場合が多いため，かなり異なった取扱いが必要となる。可燃性ガスや蒸気の爆発危険性に対しては，容易に耐圧容器や安全破裂板(ラプチャージスク)などを使用することができるが，粉じん爆発に対して，装置を耐圧性にして予想される爆発圧力に耐えることができるようにすることは，装置が小さいほど，容易に実行できるとしても，可燃性粉体を取扱う装置は大体軽量構造で，規模の大きいものが多くたとえば数 100 m³ の容積を持つ粉体貯蔵庫のような大きい装置であるためこれを耐圧構造にすることは，ほとんど不可能であろうし，設備上のコストも問題となるであろう。また，粉体の製造，輸送，貯蔵あるいは加工(粉碎，混合，乾燥)などの工業的な粉体プロセスが増加するとともに，規模が拡大され，それらの装置がますます大型化する傾向がみられる。それに伴って，粉じんの爆発および火災の潜在的危険性が増大しつつあると言

えよう。ところが、このようなプロセスに関連する装置の容器、たとえばサイロ、乾燥機などは、上記のように一般には内部爆発に耐える容器とは見なされないで、爆発災害をどうしてもまぬがれることができないような場合には、適切な爆発圧力放散設備を取付け装置を保護する必要がある。

放散設備を取付ける上で、爆発圧力を高めないうちできるだけ急速に放散させるためには、当然十分に大きい面積の放散面を取らなければならないが、他方放散面の寸法が大きくなり数も増すとそれだけ技術的にも面倒で経済的にも費用がかかるので、実用上放散面の最小必要面積の決定が最も重要な問題となってくる。放散面の大きさは単位体積あたりについて表わし、(長さ)⁻¹の単位を持ち、これをベント比と呼んでいる。これまで参考とされてきたベント比の推奨値には、次のようなものがある。

NFPA (アメリカ火災防止協会)¹⁾では、あまり激しくない爆発条件では、約 30 から 750 m³ までの大容積の密閉容器に対して、1/9 から 1/16 m⁻¹ までのベント比を推奨している。更に、750 m³ 以上の軽量コンクリート (またはレンガ) 建造物や大きい室に対して、その一部に粉じん爆発の危険性のある装置を含む場合、1/18 から 1/24 m⁻¹ のベント比が適当であろうという。イギリス²⁾では、炭素化合物粉じんを扱う比較的軽量の構造物に対して、1/6 m⁻¹ のベント比を推奨している。またごく一般的なガイドとして、Palmer³⁾は実験室における粉じん爆発試験装置で測定した最大昇圧速度の大きさによって次のようなベント比を上げている。

最大昇圧速度(kg/cm ² ・s) ベント比(m ⁻¹)	
<350	1/6
350—700	1/5
>700	1/3

なおこの値を使用するに際しては、いくつかの注意が必要である。

一方、VDI 2263 (西独)⁴⁾では、ベント比 0.1 m²/m³ を定めているが、耐圧容器では 0.2 m²/m³ で良いとされている。VDI 3673 については後に述べる。

ところが、これらの推奨値は必ずしも防護すべき装置の強度、容積、粉じんの爆発特性などを十分に考慮して求められたものでなく、不必要に大きすぎたり、実現不可能の場合が少なくないという批判を Heinrich²⁵⁾ 他が行なっている。

また、この他にも、これまで実験研究が行なわれた結果に基づいて、独自に提出された計算式⁵⁾⁶⁾や、推奨ベント比⁷⁾が Schawab 他によって見いだされるが、系統的なものは少ないようである。このような現状の理由が、粉じん爆発そのものの基礎的現象の解明と実験上の困難さに起因していることは多くの人が述べているとおりたしかであろう。

他方、Palmer は可燃性ガス・蒸気の爆発圧力放散の問題は理論的にも実験的にも、かなり系統的に研究されそれらの結果が利用できるようになっているが、粉じん爆発の場合もこれと同じ理論的扱いが適応できるためには、同一装置で測定した、粉じん、ガス・蒸気のそれぞれの爆発特性との相関が必要であり、なお最終的な有効性の判断は、やはり粉じん爆発の伝ば機構が完全に解明された後に得られるものであらうとのべている⁴⁴⁾。

爆発放散設備を設置する場合、最小の必要放散面積の他に問題となる点が多いことも考慮せねばならない³⁰⁾。たとえば放散開口部は實際上、容器内の取扱い物質の漏洩または飛散を防ぐために、何らかのカバーによって被覆されなければならないが、どのようなカバーが適切であるか、あるいはカバーの破裂圧力はどの位にすべきか、また放散設備は装置のどのような位置に取付けるべきか、などが解決されなければならないであろう。カバーの種類としては、材質的に強度が弱くあるいは故意に破裂しやすいように成型した、いわゆるカバー自体が破裂・破損するところのラプチャー形式のものと、単なるドア形式のものが利用されているが、その選択の基準をどこに置くか、あるいは、爆発放散を行なった場合に、ベントより吹き出した燃焼生成物などを安全な方向へ導き出すために、放散面に接して容器の外側に導管のようなものを取付けるべきか、これは噴出される燃焼生成物が場合によって火災そのものであったり、未燃焼の可燃性粒子や分解ガスを含む混合物であったりして、放散されてからの燃焼や爆発の危険が考慮されなければならないからである。

このように、実際に放散設備を取付ける上で考慮すべき点が多く、これらの要因のあるものは、放散面積の大きさに直接に関係してくる。そこで最適な放散設備を設計する上で、単に各種の指針に述べられているベント推奨値や爆発特性値などによってのみ与えられるベント比を利用するだけでは不十分で、粉じん爆発

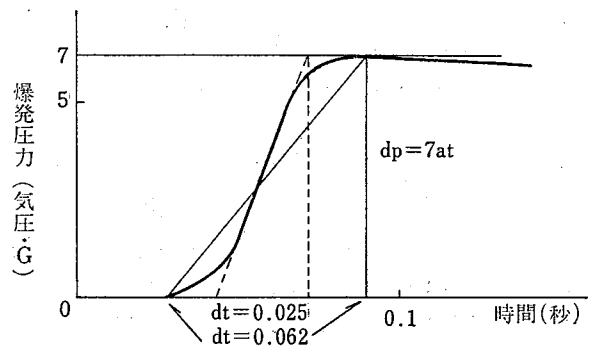
の可能性を初めとした、圧力放散現象の検討がなされるべきであろう。このように、一見簡単に思える問題でも、未解決の点が多く実施にあたって配慮すべき点が多いように思う。また、粉じん爆発の放散データは非常に限られているため、しばしばガス爆発のそれを引用した場合もあるが、両者は必ずしも共通するものでないことは、すでに引用した通りである。

3. 密閉容器内の爆発圧力と圧力上昇速度

放散設備を取付ける上で、対象となる粉じんの爆発特性を知っておくことは重要なことである。特に、爆発強度として考えられる密閉容器中における最高爆発圧力と最大（または平均）昇圧速度は、爆発放散の問題を扱う上では不可欠のものである。実際に必要な比較的大きい容器中における粉じんの爆発は、容器中に粉じんを分散・浮遊させて、いわゆる爆発可能な粉じん雲を形成させることがなかなか困難なこともあって、ガス爆発の場合ほどには実験データがそろっていない。そこで、まず爆発圧力と昇圧速度からみたガス爆発の特性を簡単に述べ、粉じん爆発の場合の参考とし、実験データの不足を補い、かつ比較が行なえるようにした。また、粉じん系を対象とするときでも、堆積粉じんのくすぶり現象によって、可燃性ガスが多量に放出されて、ガス爆発の放散を考慮しなければならないケースも考えられる。あるいは、しばしば経験するように、可燃性粉じんと可燃性ガス・蒸気が共存した系が現実には扱われる場合があるに多い。したがって粉じん爆発の放散を考える場合でも、ガス爆発の特性を十分認識して、放散設備を設置する必要があるかと思う。

3.1 ガス爆発の場合

可燃性混合ガス爆発では、均一濃度の混合物を容易に形成させることができるので、熱力学的な計算によって求められる爆発圧力と実測値は良い一致を示す場合が多い。一般の可燃性ガス混合物では、室温において最高爆発圧力は、初圧の約7～8倍とみられている。また、最高爆発圧力を示す空気中におけるガス濃度はいわゆる化学量論濃度に、ほぼ一致するが、大抵の実験結果では、それよりも若干高濃度にある。温度の影響は、高温になるほど、爆発圧力を低下させる傾向に



$$\text{平均昇圧速度: } \left(\frac{dp}{dt} \right)_{av} = 113 \text{ at/s}$$

$$\text{最大昇圧速度: } \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} = 280 \text{ at/s}$$

図1 爆発圧力-時間経過の記録（密閉容器）

あるが、昇圧速度は温度とともに増加する。昇圧速度は、爆発圧力の時間的な変化を示すものであるが、平均速度と最大速度をとる場合がある（図1）。最高爆発圧力は、容器容積によって、ほとんど変わらないが、最大昇圧速度は容積によって、図2のような変化を示す。また、特定の可燃性ガス・空気混合物について、図3に示すように容積 V と最大昇圧速度 $(dp/dt)_{max}$ の間には、(1)の関係が成立する。これは後述するよ

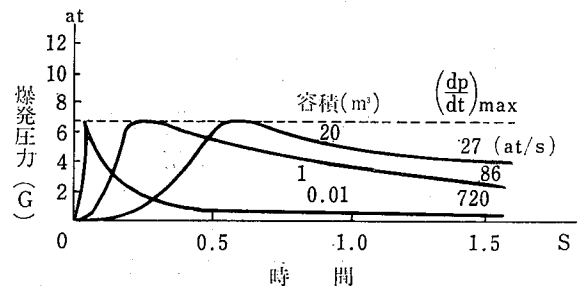
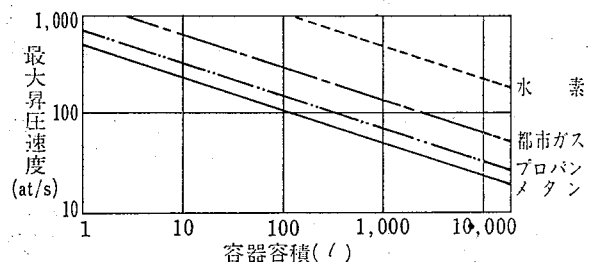


図2 爆発特性に及ぼす容積の影響 (CH₄/H₂ 混合ガス)⁸⁾



$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \cdot V^{1/3}$$

水素	5,030 (at/s · l ^{1/3})
都市ガス	1,400
プロパン	723
メタン	533

図3 種々の容積に対する最大昇圧速度⁸⁾

うに、小容器での測定値をもとに、大容器での最大昇圧速度を求めることができるので、放散面積の計算には非常に重要なものである。

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{一定 (K)} \quad (1)$$

最高爆発圧力を示す混合ガス濃度と最大昇圧速度の最高値を示すガス濃度は、わずかに異なる。たとえば水素、メタン、都市ガスでは、最高爆発圧力を示す濃度は、それぞれ ~30, 10.5, 22 vol. % であるのに対して、最大昇圧速度の最高値を示す濃度は、~30, ~10, 20 vol. % で後者の方が化学量論濃度に近い結果を示している⁹⁾。図4は水素とメタンからなる混合物の最高爆発圧力と最大昇圧速度を濃度に対して比較したものである⁹⁾。

また最大昇圧速度は、初圧の増加につれて、比例的に増大する傾向がある。

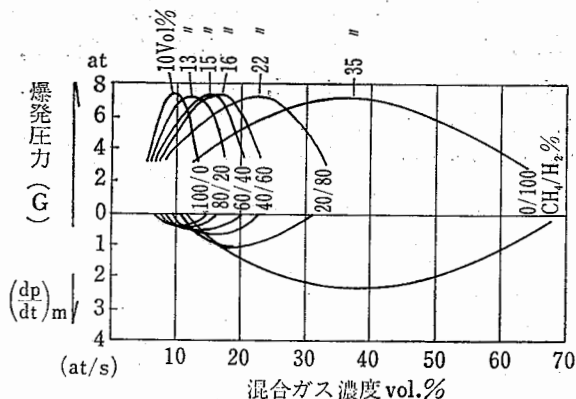
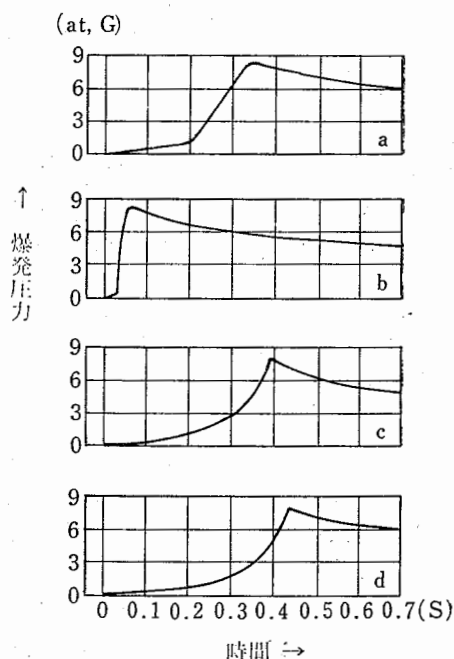


図4 CH₄/H₂ 混合ガスの爆発特性⁹⁾

以上の結果は、ほとんど気体に攪乱がない状態での容器中心における電気スパークなどの火花点火によって得られる爆発特性を示しているが、着火源の種類や位置あるいは気体を強制的に攪乱させた状態などによって、爆発の挙動に影響を受ける。むしろ、このような場合の方が、実際には、放散設備を設置する上で重要であり粉じん爆発の参考とすることができるであろう。図5は直径と長さの等しいシリンダー状容器で、プロパン空気混合物を爆発させて測定した圧力-時間曲線を示す。容器中心で点火した場合は、一般に圧力-時間曲線はなめらかであるが、器壁点火では急激に圧力が立ち上る部分がみられる。更に着火源の大きさは、昇圧速度に著しい影響を及ぼす。すなわち、爆発圧力は、ほとんど変わらないが、着火源がより強力（放出エネルギー密度が大）になると、最大昇圧速度の大きな増加が生ずる。一方、ガスの攪乱の影響は、



- a. 容器中心点火, 点火玉 $V=1.8\text{m}^3$
 b. " " , 電気雷管 $V=1.8\text{m}^3$
 c. 器壁での点火, 点火玉 $V=1.15\text{m}^3$
 d. " " , 電気雷管 $V=1.8\text{m}^3$

図5 爆発圧力曲線の変化(プロパン-空気混合物)¹⁰⁾

未燃焼ガスが火炎と急激に接触する効果をもたらすので、より激しい爆発を引き起こすと、一般には考えられる。攪乱の程度は定性的なものであるが、それらの効果を図6に示す。すなわち、170l の容器にファンを取りつけ、その回転数と爆発特性を調べた結果であるが、攪乱が増すと著るしく燃焼速度が増大することを示している。同じく、メタン・空気混合物に対する攪乱の影響を、ガス濃度に対して示したのが、図7

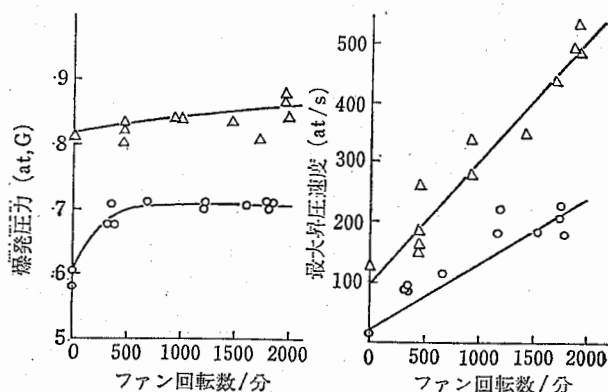


図6 爆発特性に及ぼすガス攪拌の影響¹¹⁾
 (ペンタン空気混合物: Δ 3.0モル%,
 $\circ$ 0.17モル%)

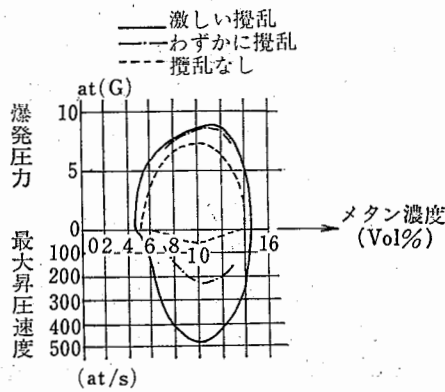

 図 7 ガス攪乱の影響¹²⁾
(メタン空気混合物)

 表 1 各種ガス混合物に対する攪乱の効果¹³⁾

混合ガス	静止状態		激しい攪乱を与えた状態		K
	P_{max}	K_G	P_{max}	K_G	
メタン	7.3	53	8.7	460	8.7
プロパン	7.3	72	8.7	500	6.9
都市ガス	7.3	140	8.5	615	4.4
水素	7.0	500	7.7	1,270	2.5

P_{max} : 最高爆発圧力 (bar)

$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \cdot V^{1/3}$ (式(1)=定数 (bar・m・s⁻¹))

$K = \frac{K_G(\text{攪乱})}{K_G(\text{静止})}$

1 気圧(at)=1kg/cm², 1at=0.98bar, 1bar=1.02 at. ただし at の場合, 大部分ゲージ圧 (G) を使用した (at, G).

で, 表 1 には 1m³ 容器中で測定した各種ガスの爆発圧力と, 式(1)の関係を表わす定数 K_G の値を, 攪乱のある場合とない場合の爆発についての比較を示した¹³⁾. 更に, ガス爆発の配管中における爆発特性, 特に燃焼速度やデートネーションへの転移の問題など考慮しなければならない点が多いが, ここでは省略した。

2.2 粉じん爆発の場合

密閉容器中で, 粉じん爆発をひき起こすためには何らかの方法で粉体を空気中に分散させなければならないが, これは大容器になるほど困難になる。一般には, 粉体を加圧空気で噴出させることによって, 粉じん雲を形成させ密閉容器内での爆発特性を測定しているが, その意味では可燃性粉じん混合物は常に攪乱状態にあり, 容器が大きい場合には特に不均一系であるため, 最初の爆発によって未燃焼の粉体や粉じん雲が更に大きい分散と攪乱をひきおこし, 爆発特性が大き

く変化することが考えられる。したがって, 測定結果には大なり小なり測定条件によって影響を受けるものと考えらるべきであろう。また, 爆発特性は言うまでもなく, 粉体の物性, 種類などによっても影響されるものであるが, これらの一般的な粉じん爆発性については, 別にまとめられているので, ここでは触れない¹⁴⁾。

さて, このような粉じんの爆発特性の中で, 爆発圧力および昇圧速度のデータは実際にはかなりガス爆発のそれとうまく対応させることができる。多数の粉じんに対するこれらのデータは, アメリカ鉱山局のいわゆるハルトマン型装置 (容積 1.23l, 円筒形, 図 8) において測定されたものが利用されている。それによると, 粉じん爆発における圧力-時間曲線は図 9 のようになる。この場合, 容器が小さいため, 爆発圧力が上昇する前に粉体を分散させるための噴出圧力が記録される。通常は噴出圧力を差し引いた値を爆発圧力として読みとる。しかし, この装置では分散すべき粉体量

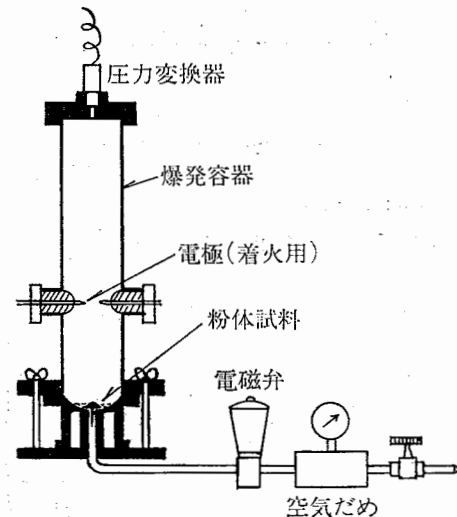


図 8 ハルトマン型粉じん爆発試験装置

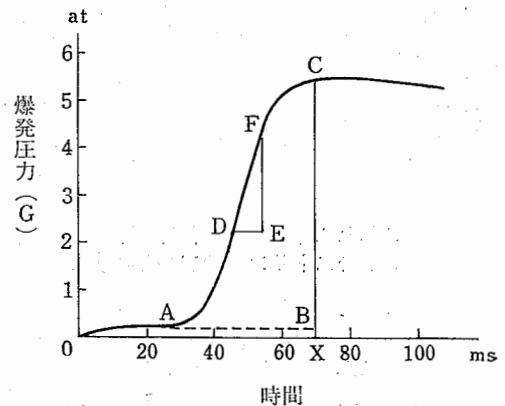


図 9 粉じん爆発の圧力-時間曲線

が多くなり、特に最高爆発圧力を示す濃度以上になると、粉じん濃度による圧力変化は、緩慢になる傾向がある。そこで数段階の粉体量で測定した爆発圧力の最大値を取って、その粉体に対する最高爆発圧力および同様に求められる昇圧速度を定めている¹⁵⁾。このように、ハルトマン型装置では高濃度の粉じん雲を容器全体にわたって形成させることが困難なため、必ずしも優れたものではなく批判も多いが、簡便であって広く各国で利用されており、粉じん爆発の標準試験装置とも呼ばれている。これによる測定値については次節で述べる。

一方、爆発容器が大きくなると粉じんの分散には、何らかの工夫が必要となるが、図 10 は Bartknecht

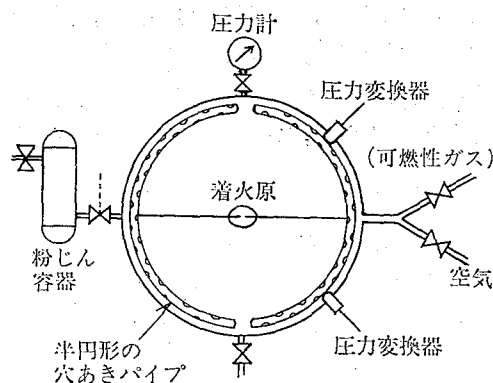
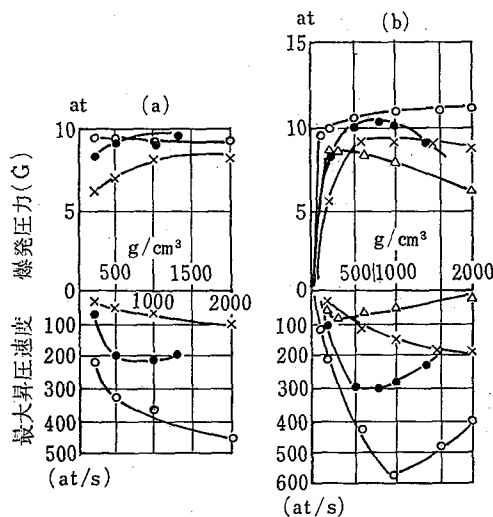


図 10 粉じん爆発球形容器 (1m³)¹⁶⁾



△炭じん ●有機顔料
×デキストリン ○アルミニウム

a. 着火源, 電気スパーク

b. " , 爆薬

△炭じん ●有機顔料
×デキストリン ○アルミニウム

図 11 代表的な粉じんの爆発特性¹⁶⁾

(ドルトムントの鉱山試験所)¹⁶⁾によって使用された内容積1m³の球形容器を示す。この場合も高圧空気によって粉体を噴出させるが、多くの噴出口を分散させ、できる限り容器内に均一な濃度が生ずるようにしている。これによって測定された結果について、幾つか述べる。一般に、可燃性粉じんは農産物（砂糖、小麦粉など）、金属（アルミニウム粉末など）、合成化学品（プラスチックや薬品など）および石炭などの通常の燃料に基づくものの四つに大別されるが、個々の粉体を大型容器で爆発させることは労力を必要とするし、大局を把握する点でも煩わしいので、これら四つの分類を代表する粉体として、デキストリン、アルミニウム、有機顔料および炭じんを選んで実験を行なっている¹⁶⁾。図 11 は着火源として電気スパークと爆薬を用いた場合の、これらの粉じんの爆発特性を示している。これによると、爆発圧力は、炭じんを除いてガス爆発の場合よりもはるかに大きく、アルミニウム粉じんでは実に、11.5気圧にも達している。すなわちこれらの粉じんの最高爆発圧力は約7~12気圧内にあり攪乱がない場合の大部分の可燃性ガス・空気混合物の爆発圧力を越えている。電気スパークによる着火の場合における最大昇圧速度を比較すると、デキストリンおよび有機顔料の粉じんは、プロパンおよび都市ガスよりも激しく反応し、アルミニウム粉じんでは水素の爆発よりも速いと言えることができる（表1参照、比較は可燃性ガスおよび粉じんと同じ測定容器条件における）結果による。更に着火源の影響をみると爆発圧力そのものは大きく変わらないが最大昇圧速度が著しい変化を示す。その点はガス爆発と同じ傾向にあるが、最高爆発圧力を示す粉じん濃度は、大抵いわゆる化学量論組成の濃度の数倍のところに相当し不完全燃焼が大部分で、有機物では燃焼残渣として、カーボンや未燃焼粒子が観察される。このように浮遊粉じんが空気中の酸素とすべて反応するわけではないが、可燃性ガス混合物の場合よりも粉じん混合物の方がその単位容積中に占める可燃物質の量のはるかに大きく、したがってそのエネルギー含有量も大きいため粉じんの種類によっては、ガス爆発よりも激しい粉じん爆発が可能であると言える。このような燃焼形態と攪乱の影響があって粉じん爆発での高い圧力が記録されたと考えられる。表2は、Heinrich等の実験結果で、5m³密閉容器中における粉じんの最高爆発圧力とその時の最大昇圧速度に及ぼす着火源および粉体の分散の影響を

表 2 密閉容器中における爆発特性に及ぼす着火源の影響¹⁷⁾

粉 じ ん (ポリアクリ ロニトリル とアルミニ ウム混合物)	堆積粉じん		粉 じ ん 雲					
	火炎噴出によ る着火		火炎噴出によ る着火		電線切断スパークによる着火, 時間遅れ			
					100ms	200ms	400ms	
	P_m	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_m$	P_m	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_m$	P_m	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_m$	P_m	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_m$
1	10.0	38	12.0	240	10.3	205	10.9	118
	11.5	38	12.0	176	10.6	186	10.2	121
	11.0	33	11.0	215	10.2	180	10.6	127
	12.0	38						
	12.0	44						
2	11.0	30	12.0	87			11.0	76
	10.5	31	11.2	98			11.0	76

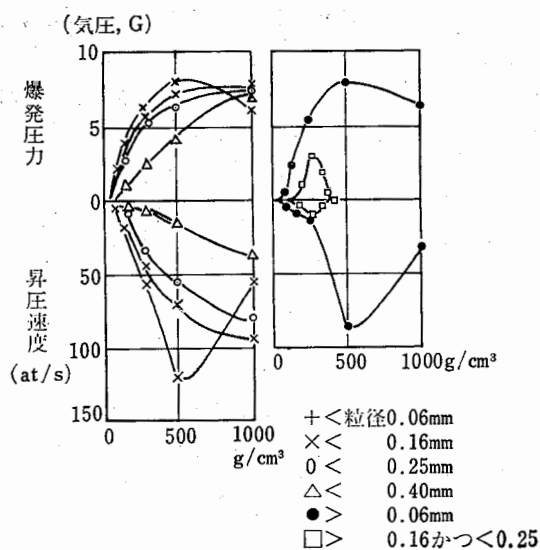
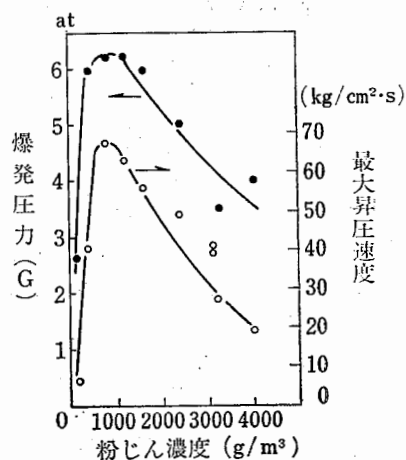
P_m : 最高爆発圧力 (bar), $(dp/dt)_m$: 最大昇圧速度 (bar/s)

あわせて数値にしたものを示している¹⁷⁾。火炎噴出による着火とは本体容器に径 20cm, 長さ 6m の配管を接続し配管内で均一な粉じん雲を形成させて着火, その噴出火炎を本体容器の大きな着火源として利用するものである。容器中であらかじめ粉じん雲を形成させて着火させた場合と, 堆積粉じんに着火源を差し向けた場合では, 最大昇圧速度に大きな差が見られる。表 2 における他の着火源は, 43 μ F, 1kV のコンデンサーに蓄えた電気エネルギーで, 5cm (径 0.2mm) 長さの導線を切断する方法によるもので, 粉じんを分散させた後の着火遅れ時間を変化させている。いずれにせよ火炎噴出による着火では, 電線切断スパークによる着火の場合よりも, 約 2 倍 (粉じん 1) から約 30% (粉じん 2) それぞれ最大昇圧速度が大きいことがわ

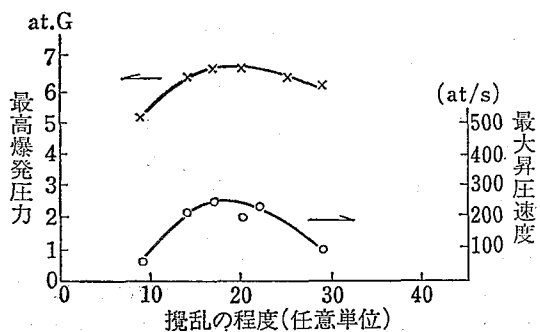
かる。

粉体の粒度も爆発特性に及ぼす重要な因子である。一例として砂糖粉じんの場合の粒度の影響を図 12 に示した。一般には細かい粒度ほど, 着火しやすく爆発性に富むが, 約 300 メッシュより細かくなると大きな変化はみられなくなる。しかも大抵の粉じんでは粒度分布を持つので, 各種の粉体の爆発性を比較する上で, できるだけ粒度をそろえなければならない。

ところで, これまでの結果では一般に粉じん濃度が高くなると粉体の分散が悪くなり粉じん濃度に対する爆発圧力の変化を示す関係において, 最高爆発圧力に達した後, 爆発圧力は濃度の増加に対して大きな変化を示さない。逆にこの事実が粉体の分散性が悪い理由として考えられているが, このような理由づけは一般にガス爆発のそれに対応して与えられているもので, 燃焼機構によって説明づけられてはいないように思

図 12 爆発特性に及ぼす粒度の影響¹⁶⁾図 13 小麦粉の爆発特性¹⁸⁾

う。石浜ら¹⁸⁾は爆発容器（容積 10ℓ）を回転させることによって粉じん雲を形成する方法で、図 13 のような結果を多くの粉じんについて測定している。これによると高濃度側における爆発圧力の著しい低下がみられ、ガス爆発のそれとよく対応させることができる。これらの多くの粉じんに対するデータと上記の 1m³ 球形容器中での爆発圧力を比較すると、明らかに粉体の種類による差を考慮しても後者の方が、はるかに



炭じん濃度：0.6g/l
揮発分：37%，爆発容器：9.5ℓ
図 14 攪乱の影響¹⁹⁾

に大きい値を示している。これはすでに繰り返し述べたように、密閉容器中における粉体試料の攪乱の影響によるものであらうと考えられるので、同一容器および粉体の同じ分散方法による測定値でないと粉体間の比較は困難であらう。粉じん爆発に及ぼす攪乱の影響について炭じんの例を図 14¹⁹⁾に示したが、攪乱の程度を表わす尺度を分散圧力の差によって示しているので両者に直接比例関係があるか疑問である。

次に容器容積と最大昇圧速度の関係は、ガス爆発の場合同様に（1）式が成立することが比較的大きい密閉容器において確かめられている。しかし容積が小さい場合には成立しないが、これについては次節で述べる。上記の代表的な四種の粉体に対するこれらの関係を、1m³ 球型容器と 20m³ シリンダー容器を用いて測定した結果を図 15¹⁶⁾、表 3¹³⁾に示した。この場合、容積が変化しても混合物の攪乱の程度、着火源の強さ、粒度分布などが一定でなければ、これらの関係は成立しない。より激しい反応性を持つアルミニウム粉体のようなものの昇圧速度は、比較的燃焼が遅い粉体よりも着火エネルギーによる影響は少ないようである。

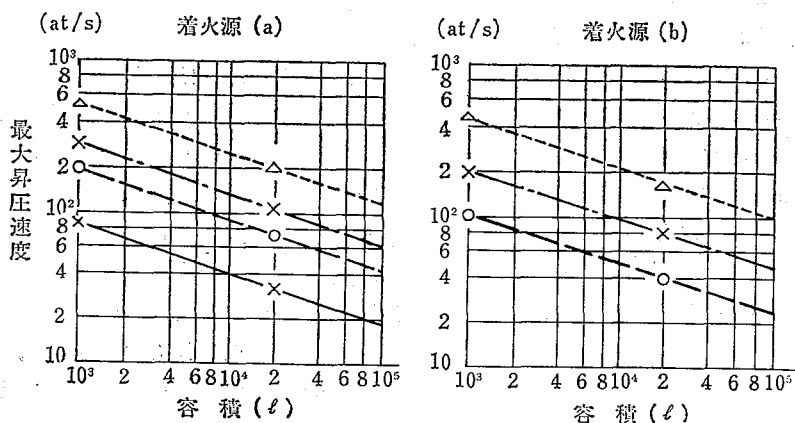


図 15 代表的な粉じん爆発における最大昇圧速度と容積の関係（表 3 を見よ）¹⁶⁾

表 3 各種粉じんの爆発特性（着火源の影響）
（図 11 および図 15 を参照）¹³⁾

記号	粉 じ ん	P_{max}	K_D	P_{max}	K_D
+	炭 じ ん	7.7	85	着火せず	
○	デキストリン	8.7	200	8.5	100
×	有機顔料	10.0	286	9.7	206
△	アルミニウム	11.5	554	11.0	450
	着 火 源	(a) 爆 薬		(b) 電気スパーク	

P_{max} ：最高爆発圧力 (bar)

$K_D = (dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3}$ (bar·m·s⁻¹) (式(1))

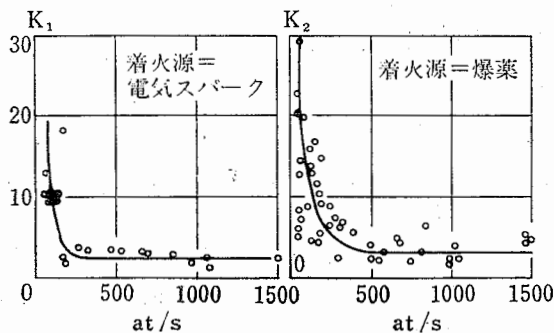
3.3 標準試験装置との比較

粉じん爆発標準試験装置によって測定された爆発特性のデータは、U. S. Bureau of Mines (鉱山局) の一連の報告^{20, 21)}において約 1,000 種類にも近い粉体試料についてまとめられている。また、上述のように実規模での爆発実験は、いろいろな意味で容易でなく、その点、標準試験装置での測定は比較的簡単である。そこで当然、この装置によるデータをできるだけ活用することが望ましいが、特に放散設備に関して言えば最高爆発圧力や昇圧速度の意義を十分に検討してデータを参照しなければならない。

いま、爆発圧力の測定法を注意してみると、前述のように補正圧力を差し引いた圧力によって爆発圧力が与えられた。このため補正

圧力は爆発圧力に直接関係しない空気圧とみなされるが、他方これを加圧下での粉じん爆発とみなすことができよう。このような場合には初圧に対する爆発圧力の比によって爆発圧力が与えられる²²⁾。通常補正圧力は、 0.4 kg/cm^2 程度であるので両者の爆発圧力の求め方には 40% 程の差が生ずることになる。すなわち補正圧力を単に差し引いた場合には、かなり大きい爆発圧力が期待されるし圧力-時間曲線から求まる昇圧速度についても何らかの補正が必要となるであろう。これらのことに注意すれば標準試験装置による測定値は粉体間の直接的な比較は可能であるが、次に述べるように他の測定条件によるデータとの比較を行なう場合は何らかの相関を導きだす必要がある。

放散設備においてこれらのデータが最も利用できるのは、容器容積と最大昇圧速度の関係を示す式 (1) においてである。すなわち、ある粉体の標準試験装置における最大昇圧速度から容積によって爆発圧力に変化がなければ任意の容積における最大昇圧速度を、式 (1) によって求めることができる。しかし実際には、標準試験装置における粉体の分散方法や爆発圧力の定め方などと大型容器でのそれは多少異なり、爆発圧力は一定とは言えないので、比較的大きな容積に対するこれらの計算値は実測値に大きな差を与える。約 100 種類の粉じんについて標準試験装置と大型密閉容器において測定した最大昇圧速度と容器容積の立方根との積の比 (K) を、標準試験装置における最大昇圧速度の関数として示したのが図 16 である。これによると比較的激しい爆発性を示す粉じん ($(dp/dt)_{\max} \geq 400 \text{ at/s}$) に対しては、着火源の種類に拘わらずほとんど一定の K を与えるとみられるが、反応性の低い粉じん ($(dp/dt)_{\max} < 400 \text{ at/s}$) ほど、著るしく大きい K の値



$$K = \frac{(dp/dt)_{\max, \text{ハルトマン型爆発装置}}}{(dp/dt)_{\max, \text{大型球型容器}}} \cdot V^{1/3} = \frac{(dp/dt)_{\max, \text{大型球型容器}}}{(dp/dt)_{\max, \text{ハルトマン型装置}}} \cdot V^{1/3}$$

図 16 爆発密閉容器の容積の影響¹⁶⁾

を取るようになるようである。一般に大型密閉容器中で測定した昇圧速度から予測できる標準試験装置のそれは、実測値の数倍に相当するという結果を得ている¹⁶⁾。それが昇圧速度が、 400 at/s 以下では実測値と計算値の差はますます大きくなることを、図 16 は示している。更に標準試験装置と他の容積でのポリアクリロニトリル粉じん爆発の比較実験の結果を、爆発圧力と最大昇圧速度について図 17²³⁾、図 18²³⁾に示す。この場合粉体の分散はいずれも空気噴出により、爆発圧力 P_E は初圧 P_A に対する割合として示してある。粉じん濃度についての補正も行なっているため、このような比較に問題はないであろう。計算値は断熱過程によるもので、容器容積が大きいほど最高爆発圧力比は大きく、 5 m^3 容器では $P_E/P_A = 10$ を越える。これは他の粉じんについても言えることであるが、標準試験装置での圧力比の約 1.5~1.7 倍にも相当し爆発圧力は容積によって大きな違いがある。また最高圧力比

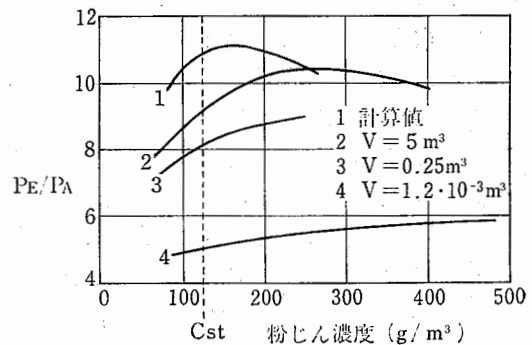


図 17 種々の容器におけるポリアクリロニトリル粉じん空気混合物の爆発圧力比 (4: 標準試験装置, C_{st} : 化学量論濃度)²³⁾

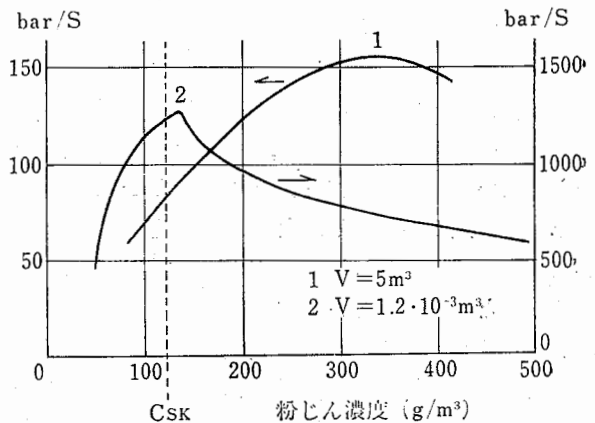


図 18 標準試験装置と 5 m^3 容器における最大昇圧速度の比較 (ポリアクリロニトリル粉じん, 図17参照)²³⁾

を示す粉じん濃度にも、かなりの違いがみられ標準試験装置では粉じん濃度に対する圧力比の変化は緩慢である。一方、最大昇圧速度の濃度に対する変化(図17)では、標準装置中での最大値はほぼ化学濃度のところで得られるが、5m³容器では、その3倍の濃度で認められる。5m³容器での最大昇圧速度の最大値から、(1)式の関係によって求まる標準試験容器に対する最大昇圧速度のそれは2,470at/sとなるが、実際には図17に示されるように1,300at/sにすぎない。このような理由は、大容器では大きい火災面による粉じんの再着火が生じて大きい昇圧速度が与えられるが、標準容器では5m³容器の場合と比較して容積に対する表面積の割合は、20倍も大きく周囲への熱損失に直接比例するためと考えられる²³⁾。このように標準試験装置における最大昇圧速度は大型容器から予想されるものよりもかなり小さくなる。

これらの事実を Palmer²⁴⁾ は次のように考えて標準試験装置による測定値から大型容器での最大昇圧速度を求める式(3)を導いた。すなわち、容器容積が減少するにつれて無限に最大昇圧速度が増加するとは考えられず、ある瞬間における燃焼は大きい容積ではその一部(V_0)を占めるだけであり、小さい容積では全容積において起こると考える。 V_0 より大きい容積では(1)式が成立し、これより小さい容器での最大昇圧速度を $(dp/dt)_{max}$ 、標準試験装置の容積を V_s とすれば、ある一定の混合プロセスに対して、

$$V_0 = BV_s (dp/dt)_{max}^{-n} \quad (2)$$

が成立するものと仮定した。 B および n は正の定数。 V_0 よりも大きい容積に対する最大昇圧速度を、 $(dp/dt)_M$ として(2)を(1)に代入すれば、

$$\frac{(dp/dt)_M \cdot V^{1/3}}{(dp/dt)_{max} \cdot V_s^{1/3}} = \frac{B^{1/3}}{(dp/dt)_{max}^{n/3}} \quad (3)$$

左辺は標準試験装置で測定される最大昇圧速度に対する計算値の割合を示すもので、これは図16の關係に他ならない。これらのデータを両対数軸にプロットしてみると各点のバラツキは大きいが近似的な直線をひいて(3)式の定数 $n=2.0$ 、 $B=1.8 \times 10^{11} \text{ kg/cm}^2$ を求めることができるという(図19²⁴⁾)。前に引用したポリアクリロニトリルの場合²³⁾、標準容器での最大昇圧速度1,300at/sから(3)式によって求まる5m³容器に対する値は、177at/sで実測値160at/sに近似できる。しかし、実用化するためには更に検討が必要であるように思われる。

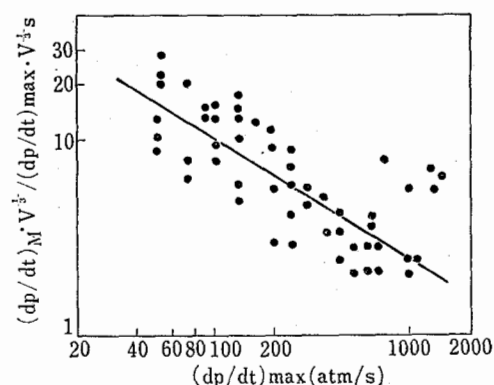


図19 式(3)の密閉容器への適用
(図16の書き換え)

4. 圧力放散の爆発特性に対する影響

最も適切な最小放散面積を決定する上で、放散面を取付けた容器における爆発特性を明らかにする必要がある。これに関する報告ではそれぞれ異なった形やサイズの容器、ペントあるいは部分的に分散された粉じん雲などが使用されたために一連のデータを何らかの比較可能な足がかりのもとに検討することは、なかなか困難であるが、まず圧力放散時における容器内の爆発圧力-時間曲線、放散面積と爆発圧力の関係、大型容器での圧力放散などについて述べる。ただ、これまでの放散実験では理論的な背景が欠如していたため、データはやや断片的で技術的に非常に限定された一般性のない問題に関したものであったりして、そういう意味では実験に使用された容器ないしは実験方法にしか適応できない結論である。したがって、これらのデータが実用面での直接の資料を提供しているとみなすには更に検討されるべきであろう。

4.1 圧力-時間曲線

放散実験では通常、放散面はフィルム状のプラスチック、紙、金属ホイル、薄板などで被覆されるが、それらの静的破裂圧力を放散カバーの設定圧力とする。これらのカバー材料のあるものは実際にも使用されるが、静的破裂圧力はカバーを設定した密閉容器にカバーの破裂に致るまで空気圧を除々に加えることにより容易に測定できる。ただこのような方法では、ゴムのような弾性力のある材料については不正確になるであろう。一方、放散カバーの爆発時における破裂圧力を作動圧力と呼び、静的破裂圧力と動的破裂圧力を区別

するようにする。両者は材質にもよるが、ある範囲ではその差が認められるが、ここでは、さしあたり問題にしない(6.3.1 参照)。

さて、このような放散カバーの設定圧力は、放散面積が比較的小さいと爆発圧力放散における圧力-時間曲線にかなりの変化をもたらす。図 20~22²⁵⁾は、メタン-空気混合物の爆発における種々の圧力変化を示している。放散面積が十分に大きければ、放散カバーが破裂するまで爆発圧力は上昇するだけであるが(図 20)、小さい放散面積では放散カバーの破裂後に第二の圧力ピークが生ずるのが特徴である。図 21 では、放散面積を一定にして、カバーの設定圧力を次第に高くした場合で、設定圧力 1.15, 1.45 に対してカバー破裂後の爆発圧力はそれぞれ 1.65, 1.62 気圧まで達し、カバーの設定圧力よりも高い爆発圧力を生じ有効な圧力放散を与えていない。更に大きい容積での放散実験でえられた圧力-時間曲線(図 22)では、放散後の圧力上昇は、明らかに放散前の圧力上昇速度よりもはるかに大きく、圧力放散の結果として流動過程に伴う燃焼の加速²⁵⁾がみられる。同じような例を、1.8m³ シリンダー状容器に破裂板(アルミニウム)を使用した例について図 23¹⁰⁾に示した。Harris ら²⁶⁾は同じような 1.7m³ のシリンダー容器で放散実験を行ないガス混合物の攪乱の圧力放散に及ぼす効果を調べた(図 24)。比較的小さいベントでの圧力変化は密閉容器でのそれと同じタイプのもので(図 24-a)、大きいベン

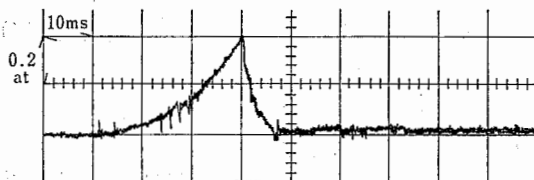


図 20 圧力放散における圧力時間曲線²⁵⁾
($V=12.2\text{ l}$, 放散面積 $F=41.5\text{ cm}^2$
カバーの設定圧力 1.4 気圧, $\text{CH}_4/\text{空気}$)

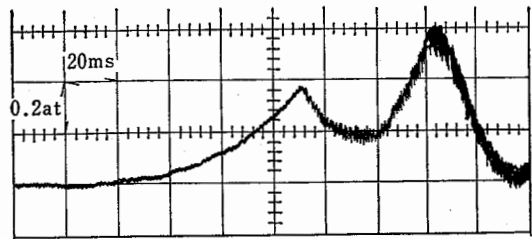


図 22 圧力放散における圧力変化²⁵⁾
 $V=107\text{ l}$, $F=134\text{ cm}^2$
設定圧力 1.39 気圧

トに低圧で作動する破裂板を取付けた場合(図 24-b)、破裂後の第二ピークの圧力記録は火炎が器壁に達した瞬間に相当するものであった。一方、極度に攪乱を与えた混合物の爆発を大きいベントによって放散させ、図 24-c を記録したが、これは多数の圧力ピークを伴った特徴が認められる。この他にも、それぞれ実験条件に応じた興味ある圧力波形が爆発放散において観測されている^{27~29)}。図 25²⁶⁾は、圧力放散における圧力変化を定性的に説明するものの一つで、爆発の初期において放散させる(低圧で作動する放散カバーを使用する場合および遅い段階で放散させる(高い作動圧力を持つ破裂板を使用する場合)に相当する。いずれの場合も放散面の作動によって火炎前面が著るしく変形されるため、火炎面積が増加し燃焼速度が加速されると考えられるが、この効果は両者を比較して爆発の初期において放散させた方が容器内に残存する未燃焼のガス混合物の量が多く、はるかに大きい燃焼速度を示すと見られる。攪乱ガス混合物での燃焼速度が増大すれば最高爆発圧力も増加するので、爆発初期での放散の場合の方が、爆発過程が十分進んでから放散させた場合よりも高い圧力がえられるであろう。また図 25 から予想されるように低圧で放散させた場合は、容器内により多くの未燃焼混合物がとりに残される形になるので、これが攪乱状態で燃焼すればやはりより高い爆発圧力を放散カバーの破裂後に生ずるであろう。すなわち、破裂圧力が低いほど最高爆発圧力は高くなるで

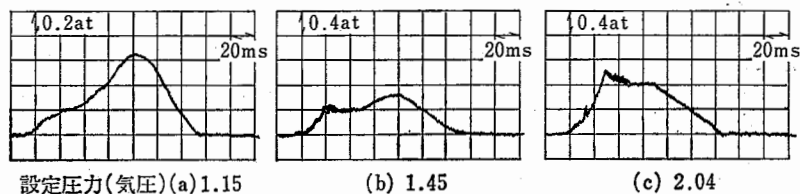


図 21 放散カバーの設定圧力の影響²⁵⁾
 $V=12.2\text{ l}$, $F=10.4\text{ cm}^2$, $\text{CH}_4/\text{空気}$

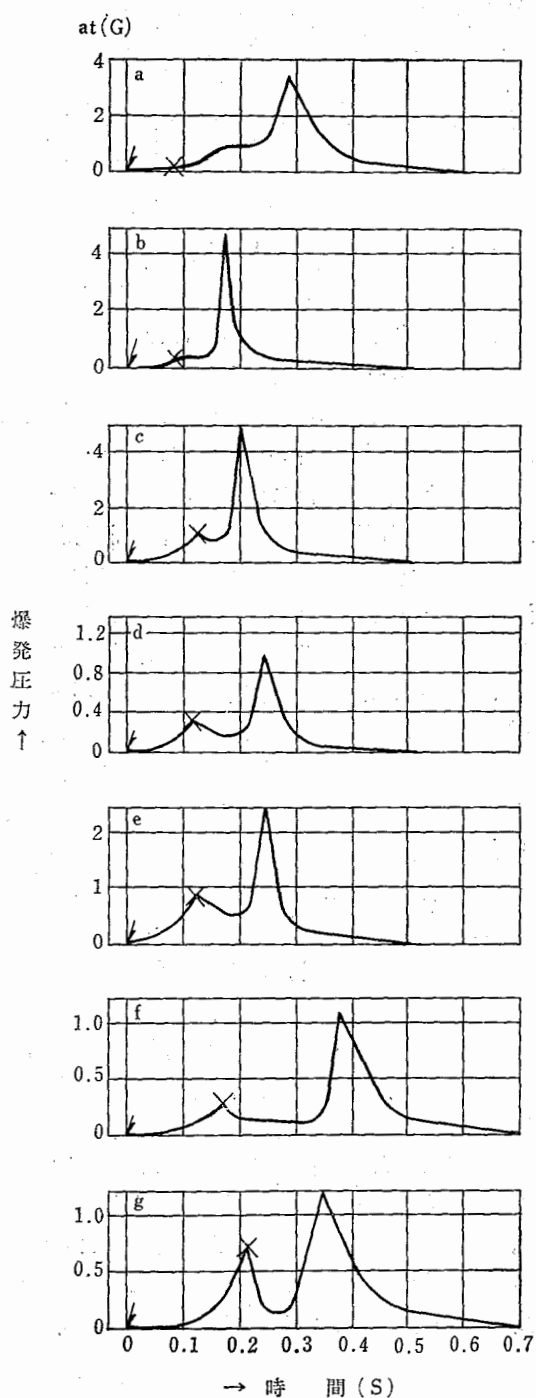
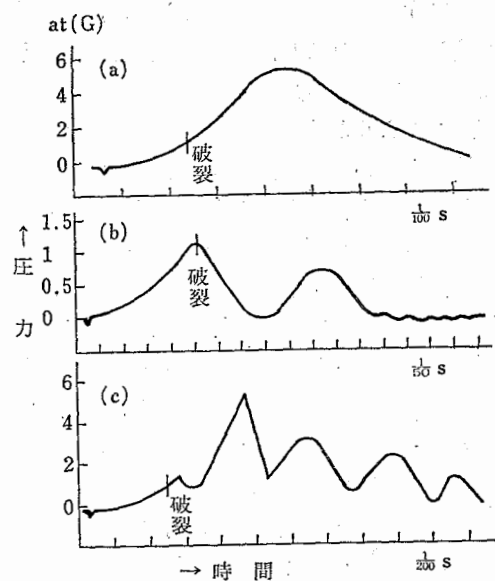


図 23 種々の直径 (d) の破裂板 (作動圧力 P_B) をつけたシリンダー容器 ($V=1.8\text{m}^3$) 中の圧力変化 (プロパン/空気)¹⁰⁾

	a	b	c	d	e	f	g
$d(\text{cm})$	20	30	30	40	40	50	50
$P_B(\text{at})$	0.4	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3	0.7

× 破裂板の作動時



(a) ベントサイズが小さい場合
(b) 大きいベント、低圧での放散
(c) 激しい攪乱を伴う混合物の放散
図 24 放散圧力曲線に及ぼす攪乱の影響²⁶⁾
(ペンタン/空気, 1.7m^3 容器)

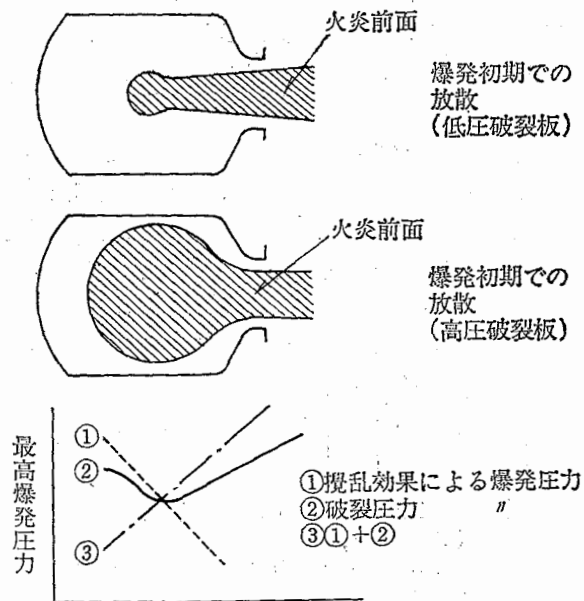


図 25 圧力放散での火炎前面の変形²⁶⁾

あろうと考えられる。しかし、他方、破裂板の破裂圧力が高くなれば、爆発圧力もそれに比例して増加すると見られるので、上の効果とは反対の影響を示すであろう。したがって、破裂板の破裂圧力に対する爆発圧力の関係は、互いに反対の効果が相殺して、ある中間の破裂圧力に対して爆発圧力の最小値を示すようなものとなるであろう (図 25) しかし、このような傾向は

混合ガスの爆発条件や放散条件によって著るしく影響されるであろうから、常に図のようなパターンを取ることは考えにくい。実測された破裂圧力と爆発圧力の関係²⁶⁾は後述する(図 31 参照)。

実際問題として放散面積を十分大きく取って、たとえば図 20 の場合のように、放出時の圧力が放散カバーの設定圧力以上にはならないようにするのが好ましい。このような要求は操業圧力の低いプラントに対して可能であろうが、操業圧力が大きい場合には、ベント比は大きすぎ実現不可能となる場合もある。このような場合には容器の耐圧力を考慮して、ベント比を小さくする手段がとられるであろうが、放散後の昇圧速度や爆発圧力には充分な注意が必要である。このような爆発放散の実施の基本となる圧力-時間曲線を、図 26³⁰⁾に示した。密閉容器中における混合ガスの最高爆

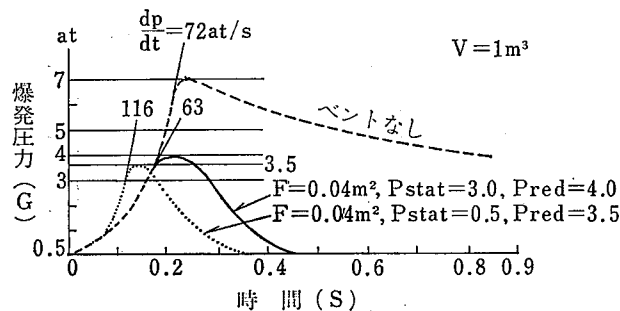


図 26 爆発放散実施の例(プロパン-空気)³⁰⁾
 P_{stat} =設定圧力(気圧)
 P_{pred} =(放散最高)爆発圧力(気圧)

発圧力は 7 気圧で、最大昇圧速度は 72 at/s であった。この容器には 5 気圧以上の圧力が生じないように保護するとすれば、爆発放散時における爆発圧力は、この値を越えてはならない。そこで、面積 $20 \times 20 \text{ cm}$ (0.04 m^2) の破裂板の設定圧力 3.0 および 0.5 気圧 (G) のものを使用すれば、爆発圧力はそれぞれ 4.0 および 3.5 気圧 (G) であった。放散させた場合の最大昇圧速度は、大抵密閉容器中でのそれより小さいが、すでに述べたようにある条件のもとでは逆に放散圧力変化曲線において、より大きい昇圧を示す場合がある。ここでは設定圧力 0.5 気圧 (G) の場合の最大昇圧速度 116 at/s は密閉容器中でのその約 1.6 倍の速さに達する。最高爆発圧力はいずれも 5 気圧 (G) を越えないので、この場合の爆発放散は達成されるが、次にこれらの圧力曲線において、放散時における最高爆発圧力とベント比やベントカバーの設定圧力の関係について知る必要があるであろう。

4.2 放散爆発圧力

あるベントを取り付けた場合に得られる一定の粉じん爆発の最高圧力(放散爆発圧力)の知識は圧力放散設備を設置する上で最も直接的な資料となるはずである。そのため、実際のプラント、配管から実験室での小容器まで種々の寸法、形状の容器を用いて、粉じん爆発の放散実験が行なわれた。それらは、いずれも別個になされたものであったため、繰り返えすが、それらを関連づけ、そこから何らかのルールを導き出すことは難しい。ここではそれらの代表的な結果のみを取り上げることにした。

Hartmann および Nagy³¹⁾は、一連の抗道実験において粉じん爆発の放散に関するデータを数多く求めた。それによると、一般にベント比が非常に小さい場合はわずかなベント比の増加に対して爆発圧力は急激に小さくなり、ベント比が比較的大きい場合は爆発圧力にはほとんど変化がなくなる。たとえば、酢酸セルロース粉じんでは、図 27³¹⁾のようになる。この例ではベントの形状による差はほとんどないことも示している。更に容積 0.03, 1.8, 6 m^3 についてベント比と爆発圧力の関係を調べた結果、多くの粉じん混合物について、それぞれ上のような関係を認めたが、容積の影響すなわちスケール効果がないことを示した³²⁾。

これらを整理して爆発圧力 (P) を対数軸にプロットしたベント比 (f) との関係は、半対数グラフにおいて直線を与え両者は、

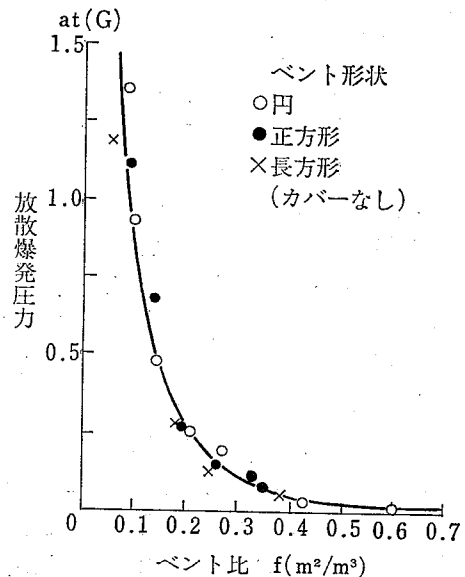


図 27 酢酸セルロース粉じん爆発³¹⁾の放散 (28.3% 容積坑道)

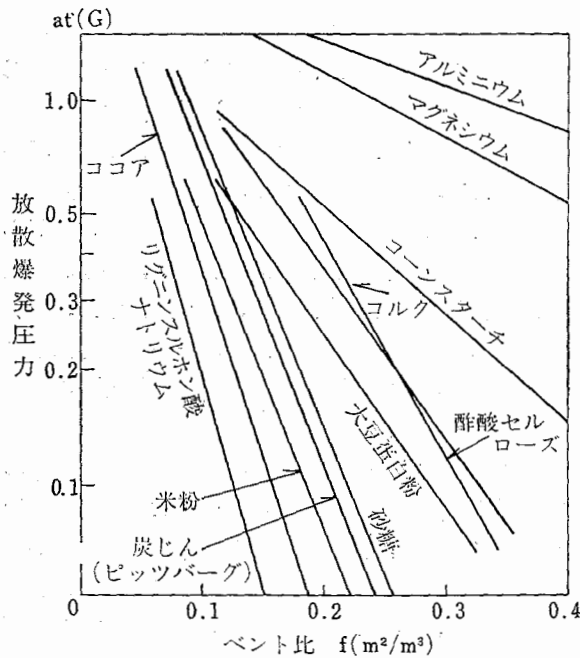


図 28 各種粉体のベント比と爆発圧力
の関係³¹⁾

$$P = Ae^{-K_1 f} \quad (A, K_1: \text{定数}) \quad (4)$$

によって近似されるという (図 28³¹⁾)。同じような結果は、ガス爆発放散についてもえられた例がある³³⁾。しかし、(4)式の関係をベント比がゼロあるいは、ベント比が十分に大きい場合へ外挿することはできない。更にベント比が大きい場合はこの関係で求められる爆発圧力よりも大きい値が実測される傾向にある。

一方、1, 10, 100m³ の3種類の容積における小麦粉 (78%, <100μ) の大規模爆発放散において求めた結果 (図 34)³⁴⁾は K_2 を定数として、

$$P = K_2 f^n \quad (n \approx -2) \quad (5)$$

によって近似されるという (図 29)³⁴⁾。しかしデータのバラツキは大きい。更に大きな抗道実験においても (5)式のような近似が可能であるという報告³⁵⁾があるが、このように大きい容積になるほど、当然粉じん雲濃度の均一性が問題になってくるが、他の因子も十分検討されなければならない。これらの因子の大部分は密閉容器中での爆発特性に影響を与えるものである。すでに述べたように、爆発性混合ガスを攪拌するとより高い爆発圧力が得られるが、同じように爆発放散を与える前に激しい攪拌を起こして乱流燃焼をさせるとベント比が小さいところで、より大きい圧力が得られる。粉じんの場合でも同じような傾向が十分期待されるし、測定もされている¹⁷⁾。

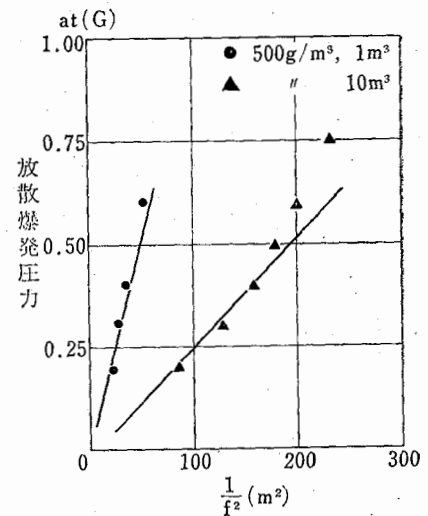
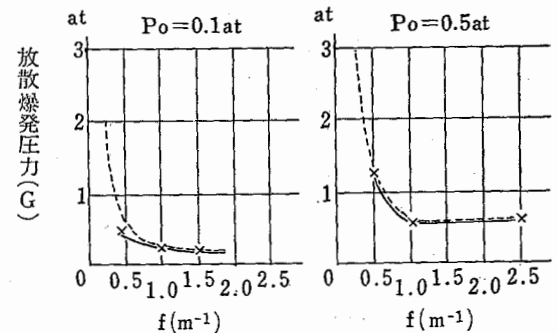


図 29 爆発圧力とベント比 (f) の関係 (小麦粉)³⁴⁾

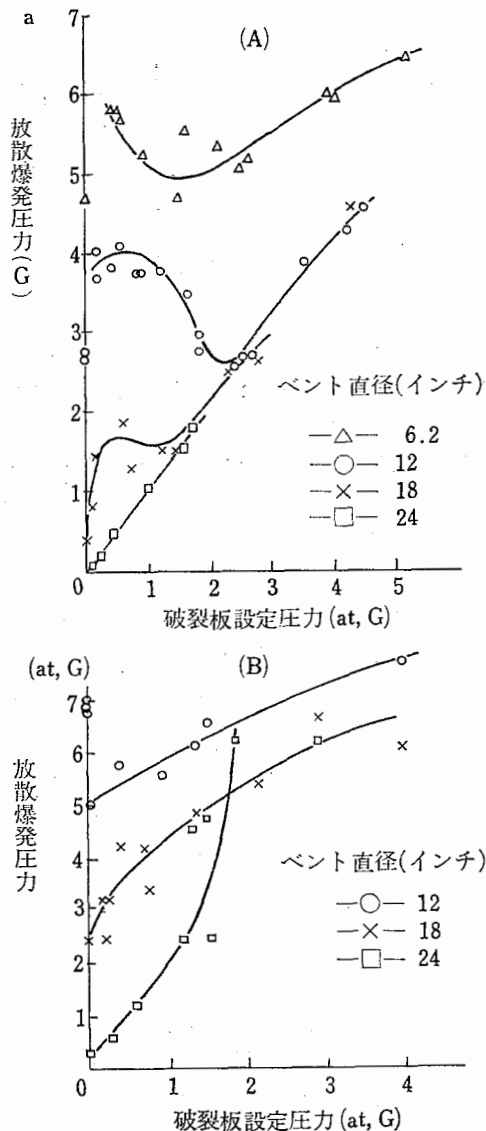


容器容積 10m³, ---デキストリン (爆薬)
——有機顔料 (電気スパーク)

図 30 爆発放散に及ぼす着火源の影響¹²⁾

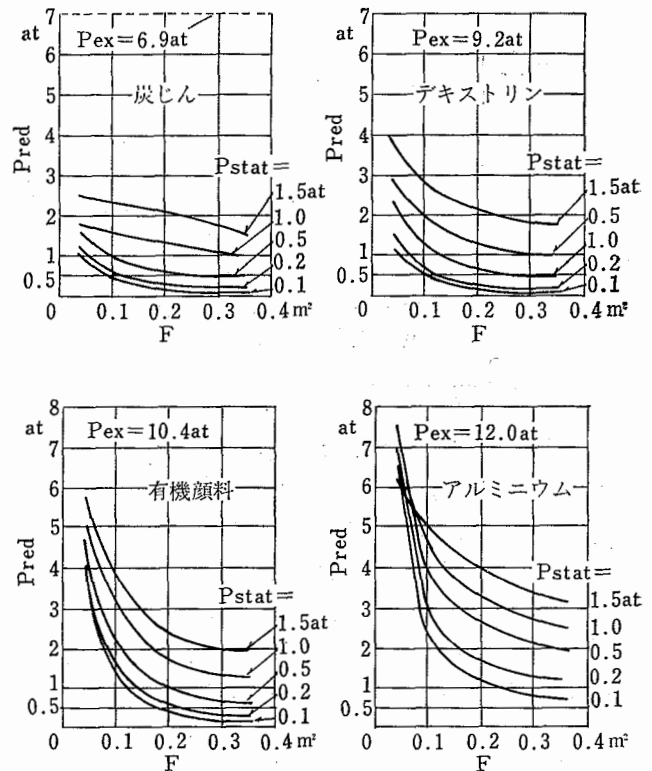
図 30¹²⁾は着火源の違いの効果を示す例である。一定容器でデキストリン粉じんを強力な着火源によって爆発かつ放散させた場合、この粉体よりも爆発性が高い有機顔料粉じんを単なる電気スパークで着火放散させたとき、ほとんど同じ放散爆発圧力を与えるという¹²⁾。なお、図 41¹⁷⁾にも放散爆発圧力に及ぼす着火源の影響を示す実験データをプロットしてあるが、この場合には放散面積が小さい場合のみ着火源による大きい差が見られる。このように着火源の強さ、大きさも影響するが着火源の位置も見逃せない因子である。一般には放散面近くで着火させると圧力は低く、放散面より遠くあるほど、高い圧力が生ずる。これらは配管中での粉じん爆発についてもよく確認されている³⁶⁾。

大規模な粉じん爆発放散の実験などは、ベントカバーを取付けない開放面 (オープンベント) で行なわれ、



(A) 2.50 モルペンタン空気混合物 (攪拌なし)
(B) 3.0 モルペンタン空気混合物 (激しい攪拌)
図 31 破裂圧力と爆発圧力の関係²⁶⁾

放散カバーの影響は考慮されない場合が多い。コンパクトな容器になるほど、カバーの設置が行ないやすい。放散カバーを取付けた場合の爆発圧力は、前述のように、カバーの設定圧力および粉じん混合物の爆発特性に大いに関係する。ここで再び、ガス爆発の放散で、すでに定性的な説明を与えたペンタン空気混合物に対する破裂板設定圧力と放散爆発圧力の関係の測定例²⁶⁾を図 31 に引用する。混合ガスの攪拌がなくベント面積が小さい場合は、定性的な関係を示した図 25 に対応するとみられるが、攪拌が与えられると爆発圧力は破裂圧力が高くなるにつれて大きい値を取る。その傾向は、放散面積が大きい程著しく、小さい放散



P_{ex} : 最高爆発圧力 (密閉容器, ゲージ圧)
 F : 放散面積
 P_{red} : 放散爆発圧力 (at, G)
 P_{stat} : 放散カバーの設定圧力 (at, G)

図 32 1m³ 容器中における爆発放散³⁰⁾

面積では、当然相対的な爆発圧力は高いが破裂圧力の増加に対して、わずかな上昇を示すにとどまる。これは、次の代表的な粉じん爆発の場合にも適応され (図 32), 粉じんの種類によってかなりの差が見られる³⁰⁾。アルミニウム粉じんのよう激しい爆発性を示すものほど、容易に予想されるように、放散カバー設定圧力と爆発圧力の差は大きく、その差は放散面積が小さくなると急激に増大する。図 32 におけるアルミニウムの場合で、設定圧力 1.5 気圧 (G) の曲線だけが、ベント比 0.1 m^{-1} 以下で特異な傾向を示している。このように、放散カバーの設定圧力と爆発圧力の関係は、いくつかの条件によって影響されるが、両者が近似的に等しいのは、あまり激しい爆発性を示さない粉じんで、放散面積を十分大きく取った場合に限られるといえよう。放散カバーに蝶番付金属板を使用したサイクロンでのコルク粉じん爆発放散³⁷⁾では、放散爆発圧力とカバーの重量は比例するという結果 (図 33)³⁷⁾は、後述するように実際にどのような放散カバーを採用するかという点で参考になるであろう。

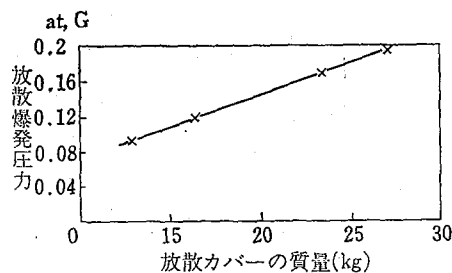


図 33 放散カバーの質量とサイクロンでの爆発圧力⁸⁷⁾

4.3 容器容積の影響

立体容器やそれに近いシリンダー容器などでは容積が大きくなるほど、爆発性の粉じん雲を容器全体にわたって均一に分散形成させることは更に困難になることから、通常同じベントにおいて大きい容積ほど、爆発圧力は低くなると考えられている。逆に小容器では粉じん雲の分散が容易に達成されるので、同じ爆発圧力に抑えるためには、より大きいベント比が必要となる。放散爆発圧力とベント比の関係に及ぼす容積の影響についての実験結果は、小麦粉の粉じん爆発について図 34 に示した⁸⁴⁾。一方、前述のように Hartmann ら⁸²⁾はトウモロコシ澱粉などについて 6m³ までの容器において容積の影響を認めなかった。このような実験結果の差は容器の形状や着火源の種類などを考慮して説明されなければならないが、均一な混合ガスの爆発放散においても容積の影響は明らかである⁸⁾ (図 35)。一定の爆発圧力を与えるベント比は容積が大きいほど小さくてよいという理由づけは、粉じん雲が比較的均一に分散した系に基づいても与えられる。密閉容器中における最大昇圧速度と容積の関係を表わす (1) 式は多くの粉じん系についても成立したが、爆発

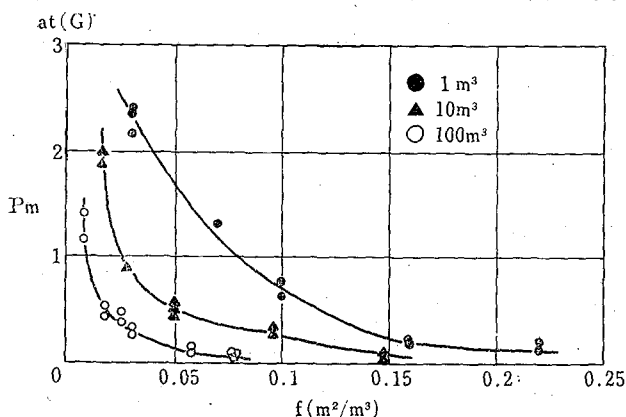


図 34 爆発圧力とベント比の関係に及ぼす容積の影響 (小麦粉 $\approx 250 \text{ g/m}^3$)⁸⁴⁾

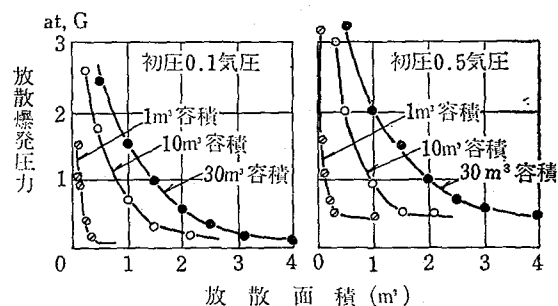


図 35 メタンガス爆発放散における容積の影響⁸⁾

放散における放散面積 (ベント比) を密閉容器中にける最大昇圧速度に比例するものと仮定すれば、ベント比 f と容積 V の関係が (1) 式とまったく同じように、

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt[3]{\frac{V_2}{V_1}} \quad (6)$$

として与えられる⁶⁾¹²⁾。最大昇圧速度は粉じんの爆発特性値の一つであるから、これをベント比に比例すると考えても十分理解できるであろう。一定の粉じん爆発に対する小容積での放散実験の結果から大容積における必要な放散面積を、上式によって求めこれを同大容積における実験結果とを比較して、(6)式の妥当性が検討できるが、それによっても大体の傾向は一致する。図 36 は 1m³ 容器での放散実験から、(6)式によって推定できる容積と放散面積との関係を示している¹²⁾ (1m³ 容器における放散面積は、 $F' = f' \cdot V' = f'$ であるから、 $F = \sqrt[3]{V'/V} \cdot f' \cdot V = f' \cdot V^{2/3}$)。このように小容器での放散実験から任意の容積に対する放散面積を容易に推定できるとしても、それらの結果が実験的に確認されないとどれほどの信頼が与えられるかははっきりしない。したがって、実験との比較は重要で後にまとめて説明する。

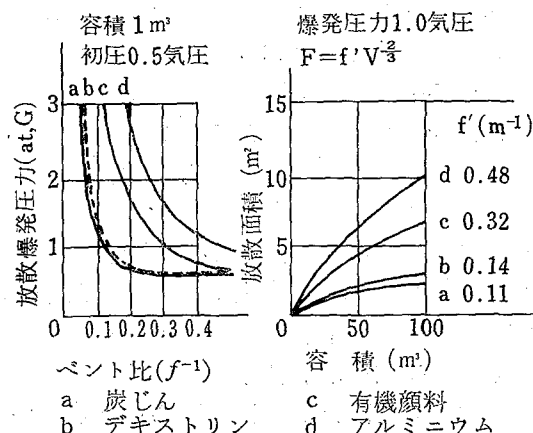


図 36 放散面積と容積の関係¹²⁾(計算値)

5. 圧力放散実験の解釈と応用

これまで得られた爆発圧力放散実験のデータは主として経験的なもので何らかの理論的な解釈のもとに蓄積されたものではなく、そこから合理的な解釈と放散面積の計算法を導き出すことはなかなか困難なことである。このような不明確さは、爆発放散における幾つかの事柄をより良く理解することによって解決されるであろう。しかし、粉じん爆発に対する圧力放散面積の計算法について、十分に一般化できるものは見あたらない。これまでの実験的解釈は、ガス爆発放散での取扱いがそのまま粉じん爆発についても適応されるという考えに基づいている。現象面における粉じん爆発とガス爆発の多くの相異が観察されるにも拘らず、それらの差を理論的に記述することがはなはだ困難なためである。これらの解釈の基本的な考え方は高压ガスのノズルからの噴出に関するノズルの理論に依る。粉じん爆発について適応した例では、Straumann⁶⁾の式が知られているが実測値と計算値はほとんど満足できるものではなく、多くの変数を含むため適切な放散面積を求めることは不可能である。ここでは同じような観点に立っているが最近の多くの実験とを比較できる、(i) Heinrich¹⁷⁾²³⁾²⁵⁾³⁸⁾³⁹⁾のものと、多くの仮定に基づいているが特に粉じん系を対象とした(ii) Palmer⁴⁴⁾⁴⁵⁾のものについて以下に説明する。

(i) 圧力放散面が最も有効に機能するのは放散面が作動圧力で確実に働くこと、爆発の昇圧速度よりも大きい速度で圧力放散を行なうことの二つの条件が満たされた場合であると考えられるが、第一の条件は放散カバーないしは装置の機械的な特性や保守、管理の問題でもあるので、ここでは常に満たされた条件として除外する。第二の条件は爆発の進展と圧力の放散によって定まる。すなわち、圧力放散時において更に圧力が上昇するか下降するかどうかは可燃性混合物を噴出することのできる速度(圧力降下速度)と、爆発による圧力上昇速度の競合によって定まるとみることができよう⁴⁰⁾。

圧力降下速度は加圧容器に噴出孔を設けて急激に気体を流出させる場合のプロセス(ノズルの理論)によって表わされる(式省略)。一方球型容器における爆発の昇圧速度は Lewis および v. Elbe⁴¹⁾によると、

$$\frac{dp}{dt} = 3v_n \left(\frac{4\pi}{3V} \right)^{1/3} (p_E - p_A) \times \left[1 - \frac{p_E - p}{p_E - p_A} \left(\frac{p_A}{p} \right)^{1/k} \right]^{2/3} \left(\frac{p}{p_A} \right)^{1/k} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 v_n : 定常燃焼速度、 V : 容器容積、 p_E : 終圧、 p_A : 初圧、 $k = C_p/C_v$ 断熱指数。昇圧速度と容積の関係のみに着目すると、(7)式は $f(p)$ を p の関数として、 $dp/dt = f(p) \cdot V^{-1/3}$ と書き直すことができ、これは実験結果によると(1)式と同じく、 $(dp/dt) V^{1/3} = \text{const.}$ と置くことができる。すなわち(7)式は昇圧速度と容積の関係を表わすものに他ならない。すでに述べたように、任意の圧力 p_i における容積 V_L で測定した爆発の昇圧速度より容積 V におけるそれは、

$$\left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_i, V} = \left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_i, V_L} \left(\frac{V_L}{V} \right)^{1/3} \quad (8)$$

によって求められる。ここで p_{ex} は爆発による圧力を示す。したがって放散爆発圧力を p_{red} とおくと上の説明より圧力放散の条件は、

$$-\left(\frac{dp}{dt} \right)_{p_{red}, V} = \left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_{red}, V} \quad (9)$$

によって与えられる。左辺は放散爆発圧力が最大値を与える瞬間での圧力降下速度を、右辺は同じ時点における爆発の昇圧速度をそれぞれ示す。Heinrich はこの関係から放散面積 F を次のように求めた。等温過程に対して、

$$F = \frac{V \cdot \left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_{red}, V}}{\alpha \sqrt{\frac{2RT}{M}} \sqrt{p_{red}(p_{red} - p_e)}} \quad (10)$$

式(8)を代入して、

$$F = \frac{V_L^{1/3} \cdot V^{2/3} \left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_{red}, V_L}}{\alpha \sqrt{\frac{2RT}{M}} \sqrt{p_{red}(p_{red} - p_e)}} \quad (10')$$

断熱過程に対して、

$$F = \frac{V_L^{1/3}}{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{k}{k+1} \frac{2RT}{M}}} \times \frac{V^{2/3} \left(\frac{dp_{ex}}{dt} \right)_{p_{red}, V_L}}{\alpha p_{red}} \quad (11)$$

ただし、 T : 温度、 M : 混合系の平均分子量、ただし粉じん系では空気(29 g/mol)の値を取る、 R : 気体定数、 α : 噴出係数(0.8)、 p_e : 大気圧。これらは、

いずれも理想気体について導かれたものであるが、粉じん系についても十分成立するはずである。通常の爆発放散では、等温過程のみを考慮すれば十分であるので (10) 式と実験データとの比較を行ない、この式の有効性を検討する。まず (10) 式にどのような昇圧速度を与えたらよいかを決めるため、5m³ 容器での各種粉じんの放散実験と密閉の場合の最大昇圧速度を求めた。放散実験のデータは、図 37 のようなグラフにプロットするが (10) 式によれば、これらは原点を通る直線を示し、その傾きは求める昇圧速度の値を与える。逆に、この値を (10) 式に代入すれば実験データに適合する放散面積と爆発圧力の計算曲線が求まるはずである³⁹⁾ (図 38)。すなわち適切な昇圧速度を式 (10) に代入すれば、放散面積は容易に計算できることになる。いま、最大昇圧速度を基準として 5m³ 容器における爆発放散のデータをプロットして求める適

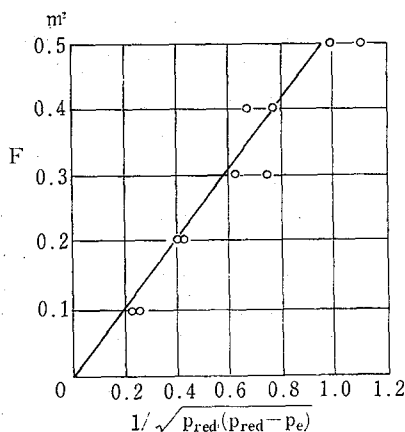


図 37 式 (10) の適用³⁹⁾
(ポリアクリロニトリル粉じん)

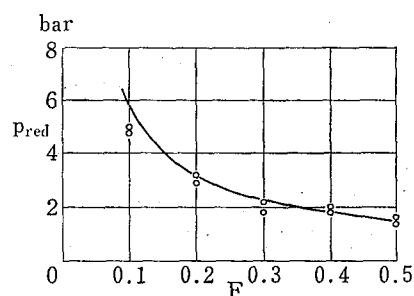
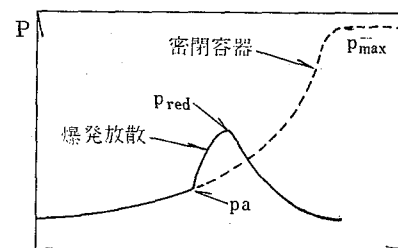


図 38 放散面積 (F) と放散爆発圧力 (p_{pred})
(図 37 に同じ)³⁹⁾

切な昇圧速度を表 4 (左) に示す⁴²⁾。これによると密閉容器中で大きい最大昇圧速度を持つ粉じん (メチルセルローズ) では、最適な昇圧速度は最大速度の 1/4 にしかすぎず、弱い爆発の場合にはその比は 1/2 程度である。ベントの作動圧力を低くして容器内での乱れを抑えれば、その比は著るしく小さくなる。このような解釈からすれば、粉じん爆発の圧力放散時における圧力-時間曲線は図 39 のようなものと考えられ、放散の瞬間における昇圧速度は密閉容器での最大昇圧速度



p_a : ベントの作動圧力
 p_{pred} : 放散爆発圧力
 p_{max} : 密閉容器中で最高圧力
図 39 圧力-時間曲線の推定

表 4 各種粉じんの昇圧速度⁴²⁾

粉 じ ん	ベント 作動圧 力	$\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{max,V}$	$\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{Pred,V}$	$\frac{\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{Pred,V}}{\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{max,V}}$	$\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{max,V_L}$	$\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{Pred,V_L}$	$\frac{\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{Pred,V_L}}{\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{max,V_L}}$
	(bar)	(bar/s)	(bar/s)		(bar/s)	(bar/s)	
メチルセルローズ	1.8	165	45.8	0.28	1,750	730	0.42
ポリアクリロニトリル PA (1)	1.6	141	53.0	0.38	1,300	845	0.65
澱 粉	1.8	118	35.0	0.30	900	560	0.62
PA (2)	1.7	117	41.0	0.35	1,050	655	0.62
有機硫黄化合物	1.7	91	38.0	0.42	900	606	0.67
PA>10 μ m	1.7	70	35.4	0.51	300	561	1.87
PA (2)	1.12	117	25.2	0.21	1,050	402	0.38
PA>10 μ m	1.15	70	21.5	0.31	300	343	1.14

V : 5m³ 容器, V_L : 標準試験装置

よりかなり小さいものとなるであろう⁴²⁾。

次に、上のような実験をその都度行なうことは難しいので前にも述べたように、粉じん爆発の標準試験装置を利用するために、この装置（容積 V_L ）における最大昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{\max, V_L}$ との比較を行なう（表 4，右）。標準試験装置における圧力放散時の（10）式に最適な昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{\text{pred}, V_L}$ は、 5m^3 容器での放散実験データから求まる昇圧速度を（8）式の関係によって容積 V_L に対して求めた値を採用する。この場合には標準試験装置における最大昇圧速度が小さいほど、これに対する放散時の昇圧速度の割合は大きくなる傾向がみられる。この表から最適な昇圧速度を求めるための、ファクター K を表 5 のように定めた⁴²⁾。すなわち（10）' 式によって放散面積を計算する場合、任意の放散圧力 p_{pred} における昇圧速度は標準試験装置における最大昇圧速度から、

$$\left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{\text{pred}, V_L} = K \cdot \left(\frac{dp_{ex}}{dt}\right)_{\max, V_L} \quad (12)$$

によって求めることができる。最大昇圧速度が $2,000\text{at/s}$ 以上の粉じんではその値の $1/2$ を放散時の昇圧速度として代入すれば良いが、最大昇圧速度が $1,000\text{at/s}$ 以下では、それらの値をそのまま採用する。ただし、ベント作動圧力によって昇圧速度の最大値は限定される。実測値とこれらの計算法による値とは、よく一致する場合もみられるが、着火源の種類や粉じん雲の攪乱の影響を受ける測定値と、これらの因子を含まない計算値とは当然いくつかの相違が見られる。

表 5 (12)式におけるファクター K の値

ベント作動圧力 (bar)	標準試験装置 における最大 昇圧速度 (bar/s)	ファク タ— K	$(dp_{ex}/dt)_{\text{pred}, V_L}$ に対する最大値 (bar/s)
	$>2,000$	0.5	—
1.6—1.8	1,000—2,000	0.67	1,000
	$<1,000$	1	700
1.15	$>1,000$	0.5	—
	$<1,000$	1	500

Metzner³⁵⁾ による 300m^3 容積での放散実験のデータは上の計算法によく一致した（図 40）。 5m^3 容器における配管からの噴出火炎による着火の場合と電線爆発によるスパーク着火の場合では、図 41 のように測定データが多少ばらつくのが見られるが計算曲線は放散面積が小さい場合、噴出火炎による測定値に近い。しかし、標準試験装置における最大昇圧速度を適用す

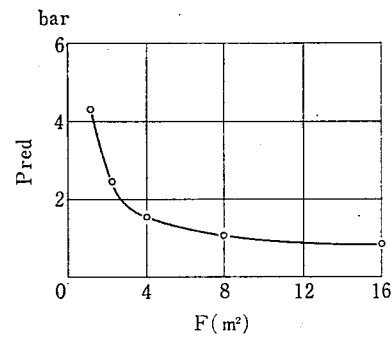
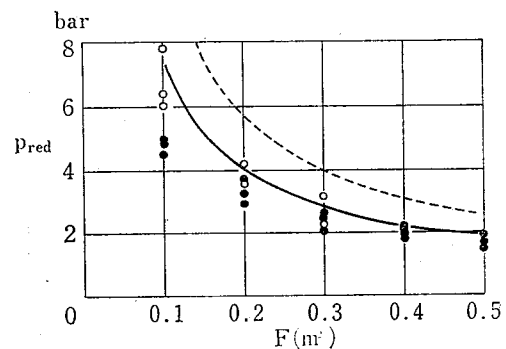


図 40 炭じん爆発 (300m^3) に対する放散爆発圧力³⁵⁾⁴²⁾



○噴出火炎による着火
●スパーク着火、遅れ時間 400ms
計算値——(12)式における $K=0.7$ の場合
 ----- " $K=1$ の場合
ベント作動圧力 1.8bar

図 41 計算値と測定値の比較¹⁷⁾(着火源の影響)

ることには、まだかなりの問題がある。それは既に述べたように実用的な大きい容器での爆発と、かなり異なった側面を示す¹⁶⁾からである（図 16）。

そこで標準試験装置の容積よりも、はるかに大きい 1m^3 容積での粉じん爆発放散実験の結果³⁰⁾（図 32）を適用することにする。すなわちこれらのデータを（10）式に適用して放散時における昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{\text{pred}}$ を求める。いま放散カバーの設定圧力 1.1, 1.2, 1.5bar におけるこれらの値を、 1m^3 密閉容器における最大昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{\max}$ に対する関係として求めると、図 42⁴⁹⁾ のようになる。ここでは、 5m^3 容器におけるデータを容積 1m^3 に換算した値を使用している。データの異なりは、爆薬（テルミット薬）と電線溶断による着火源の相違によるものであろう。図における実線の傾きは圧力放散において誘起された攪乱の効果を表わしていると考えることができる。すなわち、放散設定圧力が高いほど、圧力差は大きく攪乱は激しくな

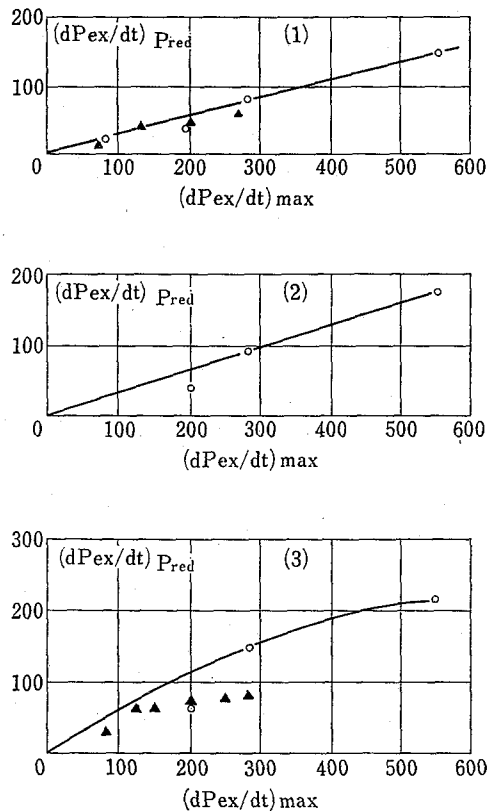


図 42 容積 1m^3 における種々の粉じんの最大昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{max}$ (bar/s) とベント設定圧力 (1) 1.1bar (2) 1.2bar (3) 1.5bar での放散昇圧速度 $(dp_{ex}/dt)_{Pred}$ (bar/s) の関係
着火源：▲電線溶断，○爆薬(テルミット)

り放散時における昇圧速度は大きい値を取る。放散爆発圧力 p_{red} は設定圧力に関係する。これらの三つの曲線を比較して、爆発性の弱い粉じんほど攪乱の効果が著しく、大きい最大昇圧速度を持つ粉じんほど、攪乱（ベントの開放の瞬間）による燃焼面の拡大はわずかであることが推定できよう⁴³⁾。更に、これらの関係を利用して簡便にベント面積を求めるノモグラフについては後に述べる。

(ii) Palmer⁴⁴⁾⁴⁵⁾ は粉じん爆発とガス爆発の火炎伝ば機構は異なるものであるという推定のもとに、粉じん爆発放散の機構を燃焼生成物の生成速度とベントからの放散速度は等しいものと置くことによって説明する関係式を導いた。これらの根拠は多くの実験的観察によって与えられるという。たとえば粉じんの火炎はガス炎よりも厚くて長く、通常のコンパクトな密閉容器では、粉じん雲を形成するための攪乱によって全

容積にわたる燃焼が可能であるということなどである。更に放散面から離れた地点での着火の場合、燃焼生成物の膨張によって容器内の粉じん雲が完全に燃焼し終る前に大部分の粉じんが放出されて爆発の途中において放散面から大きな火炎を噴出することなどがあげられよう。このような多くの粉じん爆発の特性を考慮して以下の式を導いたのでかなりの仮定を含むが、一つの参考となるであろう。

まず、既に述べたようにノズルの理論においてよく知られているように、放散すべき爆発圧力の違いによって臨界圧を境とした二つの流速域に分けて考慮する。この臨界圧は大気圧への放散を考慮すれば、最高爆発圧力 $6.9\text{kg/cm}^2(\text{G})$ を示す粉じん爆発に対しては $0.83\text{kg/cm}^2(\text{G})$ となる。

(a) 最高爆発圧力が臨界圧以下の場合

最大爆発圧力は燃焼生成物の生成速度が最大のときに得られるものと仮定する。更にベントからの燃焼生成物の質量流出速度は、等温条件 ((i)における等温過程に相当する) を仮定すれば、 $\alpha F \sqrt{2P_0 \rho_0 \ln P/P_0}$ で与えられる。ただし、 P_0 ：大気圧、 P ：最高爆発圧力、 ρ_0 ：燃焼生成物の密度、 F ：放散面積、 α ：噴出係数。一方、燃焼生成物の質量生成速度は粉じん爆発において直接求めることはできないので次のような推定による。一般に、最大昇圧速度は爆発の中間段階において生ずるが、その時の爆発圧力を P_1 とすれば単位体積あたりの粉じん雲が単位時間あたりに生ずる生成物の容積は同じ圧力で、 $(1/P_1)(dp/dt)_{max}$ となるであろう。同じように、爆発が放散される場合を考えると圧力 P 、密度 ρ において容積 $(1/kP_1)(dp/dt)_{max}$ の生成物を生ずるのである。したがって容積 V の容器において放散させた時の燃焼生成物の最大生成速度は、 $(P/P_0)(\rho_0/kP_1)(dp/dt)_{max} \cdot V$ で与えられる。これは非常に激しい粉じん爆発の場合に対応するであろう。最高爆発圧力では、燃焼生成物の生成速度と流出速度を等しいと置くことによって次式が得られる。

$$\frac{P}{P_0} \frac{\rho_0 V}{kP_1} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} = \alpha F \sqrt{2\rho_0 P_0 \ln \frac{P}{P_0}}$$

燃焼生成物の爆発圧力 P_1 における密度を ρ_c とすれば、近似的に $\rho_0/\rho_c = P_0/P_1$ とおくことができよう。更に最大昇圧速度の瞬間における爆発圧力 P_1 に関する粉じん爆発の圧力-時間曲線のデータを検討したところ、 $P_1 = 0.6P_{max}$ の関係が得られた。これらの関係を代入して、比較的激しい爆発に対しては、

$$\left(\frac{P_0}{P}\right)^2 \ln \frac{P}{P_0} = \frac{2.3 \rho_c}{\alpha^2 k^2} \left(\frac{V}{F} \frac{1}{P_{\max}^{3/2}} \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

が与えられ、比較的弱い爆発に対しては近似的に $P/P_0 \approx 1$ として、

$$(P-P_0) = \frac{2.3 \rho_c P_0}{\alpha^2 k^2} \left(\frac{V}{F} \frac{1}{P_{\max}^{3/2}} \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

が導かれた。これまで得られたデータをこれらの関係で検討した結果では、(11)式はいずれのデータよりも過大な放散爆発圧力を与え、実目的には、(14)式が適当であるという。(14)式にいくつかの定数を代入すると次のように簡単になる。

$$P-P_0 = \frac{10^{-3}}{P_{\max}^3 f^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}^2 \quad (14')$$

ここで圧力の単位は絶対ポンド/平方インチ、 V/A はフィート系である。これによると、ある粉じんに対する放散爆発圧力はベント比の平方に反比例することになり実験式(5)とも対応するようであるが、計算式として確立されるためには十分な実験データとの比較が必要である。

(b) 最大爆発圧力が臨界値以上の場合

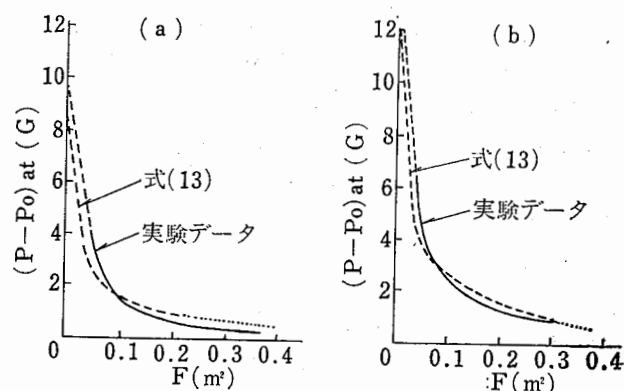
非等温過程の条件での質量流出速度は、 $\alpha FP[(k\rho_0/P_0)(2/(k+1))^{(k+1)/(k-1)}]^{1/2}$ で与えられる。これを KFP とおくと、粉じん爆発の火炎に対して K は近似的に定数と考えられる。ベントが小さく爆発圧力が大きくなる系では、爆発進行中にベントから放出される燃焼生成物の量を求めると存在した粉じん雲の量でこれを表わし、密閉容器における最高爆発圧力によって放散爆発圧力を表わす方法をとる。爆発進行中における平均のその速度は、 $KA(P-P_0)/2$ と近似できる。爆発時間は平均昇圧速度を $(dp/dt)_{av.}$ として、 $(P_{\max}-P_0)/(dp/dt)_{av.}$ であるからベントから放出される生成物の量は、 $KA/(P-P_0) \cdot (P_{\max}-P_0) 2(dp/dt)_{av.}$ となるであろう。もともと存在した粉じん雲の全量は、 $V\rho_c$ であるから容器内に残存する質量の割合は、それらの断熱冷却を無視して、

$$1 - \frac{KF(P-P_0)(P_{\max}-P_0)}{2V\rho_c(dp/dt)_{av.}} = \frac{P}{P_{\max}}$$

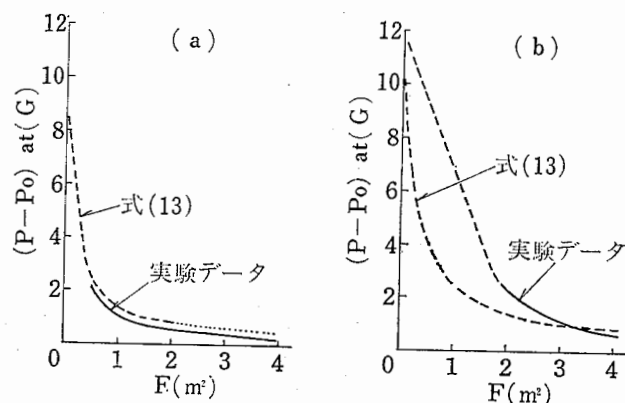
で与えられよう。 $(dp/dt)_{av.}$ は標準試験装置における平均圧力上昇速度であるが、これまでのデータを検討すると、 $(dp/dt)_{av.} = 0.4(dp/dt)_{\max}$ と置くことができるという。これを上式に代入して整理すると(15)式がえられる。

$$\frac{1}{(P-P_0)} = \frac{1}{(P_{\max}-P_0)} + \frac{KFP_{\max}}{0.8V\rho_c \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 K : 定数、 ρ_c : 圧力 P_0 における未燃焼粉じん雲の密度、かつ圧力 P_1 における燃焼生成物の密度 (圧力は標準試験装置における昇圧速度が最大のときの値)。(15)式はベントが小さく、そのため爆発圧力が臨界値以上に達し音速域で高温燃焼生成物が放出される場合に適用できる近似式である。実際上問題となるのは、プラントがもともと十分な強度を備えているが、完全な密閉状態では高い爆発圧力に耐えることができないような場合であろう。いくつかの計算値と実験データ³⁰⁾ (図32) との比較によると、両者はかなりよく対応した (図43)⁴⁰⁾。計算式はオープンベントについて導かれたものであるので、実験データとして、0.1at(G) のベント設定圧力に対するものを引用している。更に計算値は0.8at以上においてのみ有効であ



(a)有機顔料、(b)アルミニウム
図43 (15)式と1m³容器における放散実験データ (図32参照) との比較



(a)デキストリン、(b)アルミニウム
図44 (15)式と30m³容器における放散実験データの比較

るが、30m³ 容積での同じ実験データともよく対応するという（図 44）。この場合にも、多くの実験データ特に放散爆発圧力が最高値に達した時点での火炎の位置に関する測定を伴った実験データのようなものが更に必要であろうし、ベントカバーの設定圧力などは上式ではほとんど考慮されていない。

6. 圧力放散設備の実施

6.1 放散面積の決定

粉じん爆発に対する圧力放散設備を実際に設置する上で、まず当該粉体の爆発特性や粉体特性を十分に認識しておくことが必要であろう。ところが粉体特性のあるものは爆発特性にかなりの影響を及ぼすので、利用できる爆発特性のデータは厳密には測定に使用された粉体試料そのものにしか適応できないと言えるかもしれない。しかし、爆発特性がはっきりしたもので、それから必要なベント面積をかなりの精度で求めることは、前述のように現段階ではなかなか困難であるし、その他の因子の不確かさの影響も考慮しなければならない。そこで、ここでは、まず実験データに基づいた放散面積の決定を行なうことにする³⁰⁾。実際問題として可燃性粉じんを、その爆発の激しさによって四種類に分類⁴⁰⁾、これらの粉じんの爆発放散実験データをもとに、必要な放散面積を求めることにする。これらの粉じんおよび実験データは既に図 32 に示したものである。以下の図 45～49³⁰⁾は図 32 を利用して求めたものである。図 45 は容積 1m³ の容器において、

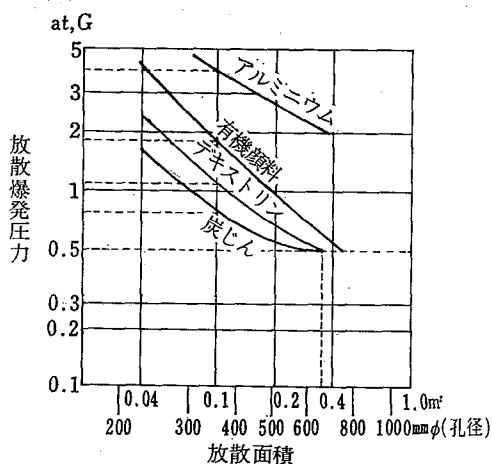


図 45 4種類の粉じんに対する放散面積と放散圧力³⁰⁾
(容積 1m³, ベント設定圧力 0.5 気圧)

ベントの設定圧力を 0.5at と定めた場合、粉じんの種類による放散面積と放散爆発圧力の関係を一つのグラフに示している。図 46～49 は各粉じんに対する放散面積と爆発圧力の関係に及ぼすベントの設定圧力の影響を書き直したもので、更にスケール効果を表わす

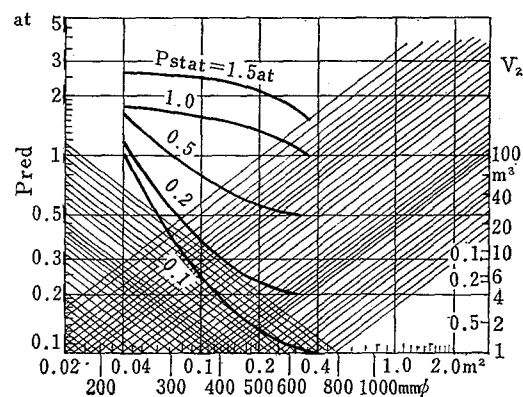


図 46 炭じん爆発の放散 (1m³ 容器)³⁰⁾
 p_{stat} : ベントカバーの設定圧力(気圧, G)
 p_{pred} : 放散爆発圧力(気圧, G)

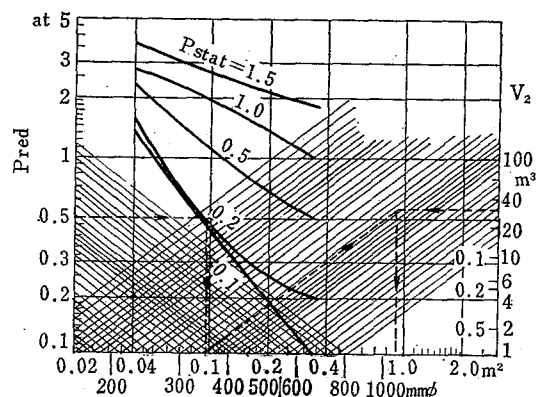


図 47 デキストリン粉じん爆発の放散(1m³)

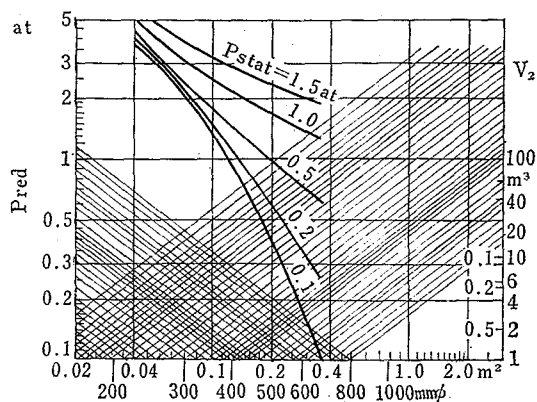


図 48 有機顔料粉じん爆発の放散(1m³)

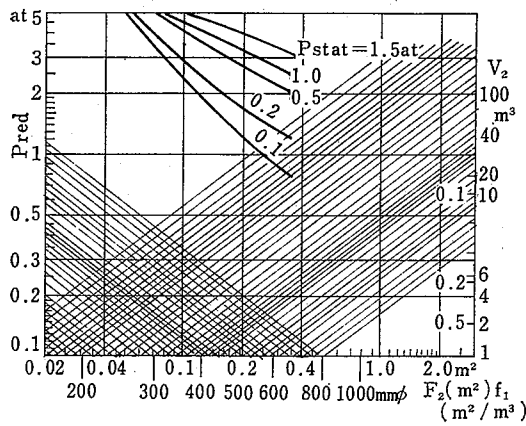


図 49 アルミニウム粉じん爆発の放散(1m³)

(6)式を適用して任意の容積に対する放散面積を求めることができるようにしたものである。デキストリン(図47)の場合についてその例を述べる。放散爆発圧力を0.5atに限定するものとすれば、0.2at(G)のベント設定圧力では、1m³容積に対して0.1m²($f=0.1$, 横軸上の正しい読みは、0.095である)の面積が最低限必要であるが、30m³容積に対して、0.9m²($f=0.03$)を矢印によって求めることができる。このようなグラフから求められる大容積のベント比が実際に利用できるためには、繰り返すが実験の結果と十分に比較検討されなければならない。図50～53³⁰⁾は各粉じんに対する30m³容積を持つ箱型容器での放散実験の結果とを比較している。炭じん(図50)やデキストリン粉じん(図51)の場合は、両者はかなり良く一致するが、有機顔料(図52)では大きい容積で計算値よりも大きい面積が要求される。これらの結果から、Donat³⁰⁾

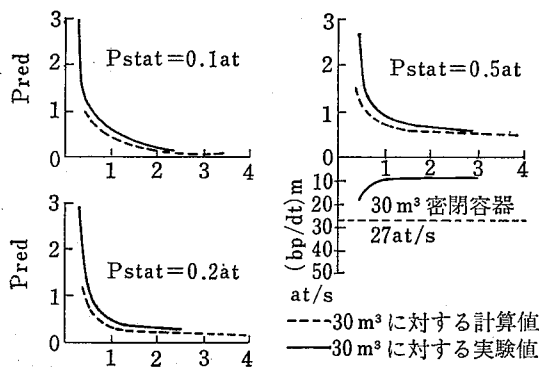


図 50 炭じん爆発の放散(30m³ 容器)³⁰⁾

p_{stat} : ベントカバーの設定圧力(気圧, G)
 p_{pred} : 放散爆発圧力(気圧, G)
 $(dp/dt)_m$: 密閉容器における最大昇圧速度(at/s)

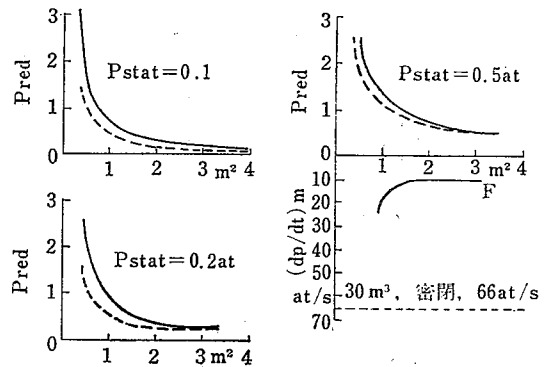


図 51 デキストリン粉じん爆発の放散(30m³)

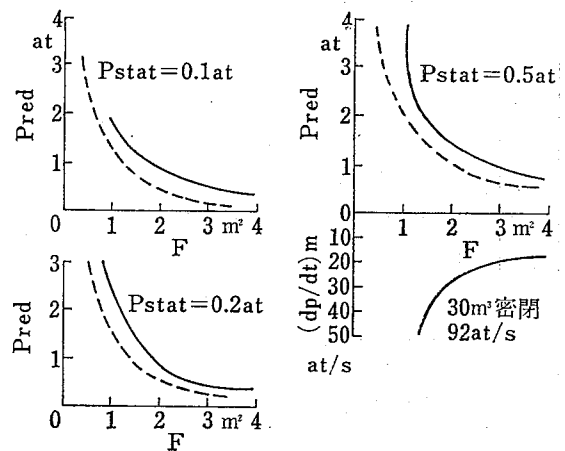


図 52 有機顔料粉じん爆発の放散(30m³)

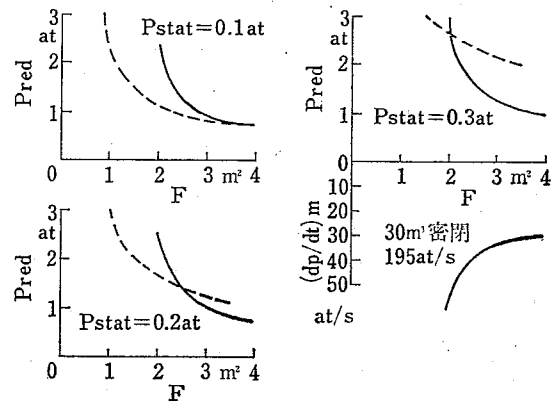


図 53 アルミニウム粉じん爆発の放散(30m³)

は破裂板の設定圧力(0.1, 0.2および0.5at, G), 容器容積(1~100m³)および放散圧力(0.2~3.0at, G)に対して適切と思われる放散面積を算出している(表6)。この場合、粉じんの分類は四段階による⁴⁶⁾⁴⁷⁾。

- St 0: 粉じん爆発の危険性がない粉体。
- St 1: 弱い粉じん爆発を示す粉体。
- St 2: 一般的な粉じん爆発を示す粉体。

表 6 放散面積の値 (m²) (p_{stat} : 破裂板の設定圧力, V : 容器容積, p_{red} : 放散圧力,
—印は十分なデータが存在しないことを示す)

Pred		St 1									St 2									St 3										
		0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0			
V	$p_{stat}=0.1$ 気圧(G)	1	0.12	0.06	0.048	0.04	0.03	0.026	0.023	0.02	0.27	0.18	0.15	0.12	0.09	0.08	0.06	0.05	0.045	0.037	0.26	0.16	0.12	0.095	0.08	0.07	0.062	0.052		
		5	0.4	0.18	0.145	0.13	0.094	0.075	0.065	0.06	0.83	0.5	0.45	0.35	0.27	0.22	0.18	0.14	0.12	0.1	0.75	0.55	0.4	0.33	0.28	0.25	0.21	0.18		
		10	0.7	0.3	0.25	0.2	0.16	0.13	0.11	0.09	1.42	0.95	0.83	0.63	0.52	0.45	0.35	0.3	0.26	0.23	1.2	0.9	0.78	0.65	0.55	0.48	0.45	0.4		
		15	1.0	0.42	0.33	0.26	0.21	0.19	0.17	0.15	1.93	1.4	1.2	1.0	0.75	0.64	0.53	0.45	0.4	0.35	1.56	1.25	1.1	1.0	0.85	0.76	0.7	0.64		
		20	1.3	0.53	0.41	0.33	0.27	0.24	0.21	0.19	2.4	1.8	1.6	1.27	0.96	0.8	0.7	0.6	0.52	0.47	1.9	1.6	1.43	1.3	1.14	1.05	1.0	0.9		
		25	1.6	0.64	0.5	0.4	0.32	0.28	0.25	0.23	2.9	2.2	1.95	1.58	1.2	1.0	0.85	0.75	0.65	0.58	2.24	1.9	1.7	1.6	1.45	1.35	1.25	1.15		
		30	1.85	0.75	0.58	0.47	0.39	0.33	0.3	0.27	3.35	2.6	2.3	1.86	1.4	1.2	1.0	0.88	0.75	0.68	2.5	2.2	2.0	1.9	1.7	1.64	1.5	1.35		
		40	2.4	0.95	0.71	0.58	0.48	0.42	0.37	0.34	4.0	3.35	2.95	2.45	1.75	1.5	1.25	1.12	1.0	0.88	3.1	2.76	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	1.8		
		50	2.9	1.14	0.85	0.7	0.56	0.5	0.44	0.4	4.0	3.55	3.0	2.2	1.8	1.5	1.33	1.2	1.05	3.6	3.3	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.1			
		100	1.9	1.4	1.15	0.9	0.8	0.7	0.65					3.5	2.8	2.4	2.2	2.0	1.7											
V	$p_{stat}=0.2$ 気圧(G)	1	0.36	0.074	0.054	0.045	0.034	0.028	0.024	0.021	0.44	0.22	0.16	0.13	0.1	0.082	0.064	0.054	0.046	0.04	0.58	0.25	0.16	0.12	0.095	0.08	0.07	0.055		
		5	1.05	0.22	0.16	0.15	0.12	0.084	0.07	0.062	1.3	0.6	0.47	0.39	0.29	0.26	0.19	0.18	0.14	0.12	1.5	0.75	0.5	0.4	0.35	0.3	0.25	0.23		
		10	1.65	0.38	0.27	0.23	0.18	0.15	0.115	0.1	2.0	1.05	0.85	0.72	0.55	0.5	0.39	0.34	0.3	0.25	2.08	1.2	0.85	0.7	0.65	0.58	0.55	0.45		
		15	2.15	0.53	0.37	0.32	0.25	0.21	0.18	0.16	2.6	1.5	1.3	1.1	0.88	0.7	0.58	0.5	0.45	0.38	2.5	1.5	1.2	1.05	0.95	0.85	0.8	0.7		
		20	2.6	0.68	0.48	0.39	0.3	0.26	0.24	0.22	3.15	1.9	1.7	1.35	1.05	0.9	0.75	0.63	0.58	0.52	2.8	1.85	1.55	1.35	1.24	1.15	1.05	0.95		
		25	3.0	0.8	0.58	0.48	0.32	0.3	0.28	0.26	3.65	2.3	2.1	1.7	1.28	1.1	0.9	0.8	0.73	0.63	3.05	2.15	1.85	1.65	1.5	1.43	1.35	1.2		
		30	3.4	0.92	0.68	0.56	0.44	0.35	0.33	0.31	2.7	2.4	1.96	1.5	1.3	1.08	0.95	0.85	0.75	3.25	2.4	2.1	1.92	1.8	1.7	1.55	1.4			
		40	4.0	1.16	0.86	0.7	0.52	0.45	0.4	0.36	3.5	3.1	2.6	1.9	1.6	1.36	1.2	1.1	0.95	3.6	2.9	2.6	2.45	2.3	2.16	2.0	1.85			
		50	1.4	1.05	0.82	0.62	0.55	0.5	0.45		3.7	3.2	2.3	1.9	1.6	1.4	1.3	1.15	4.0	3.4	3.1	3.0	2.8	2.6	2.5	2.3				
		100	2.4	1.8	1.4	1.1	0.9	0.8	0.7					4.0	3.2	2.6	2.3	2.1	1.8											
V	$p_{stat}=0.5$ 気圧(G)	1	—	0.36	0.105	0.07	0.043	0.033	0.027	0.023	—	0.44	0.28	0.2	0.125	0.09	0.07	0.058	0.05	0.044					0.35	0.22	0.16	0.13	0.1	0.07
		5	—	1.0	0.32	0.21	0.13	0.096	0.08	0.068	—	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.25	0.21	0.18	0.17					1.0	0.65	0.5	0.4	0.36	0.3
		10	—	1.65	0.6	0.4	0.28	0.2	0.18	0.16	—	2.0	1.4	1.05	0.73	0.58	0.46	0.4	0.37	0.31					1.4	1.05	0.85	0.7	0.65	0.55
		15	—	2.2	0.86	0.58	0.39	0.29	0.22	0.21	—	2.6	1.9	1.45	1.05	0.84	0.68	0.6	0.53	0.45					1.65	1.35	1.15	1.0	0.92	0.85
		20	—	2.65	1.12	0.76	0.5	0.36	0.3	0.28	—	3.14	2.36	1.88	1.35	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6					1.85	1.6	1.48	1.3	1.2	1.1
		25	—	3.1	1.38	0.94	0.59	0.43	0.38	0.33	—	3.56	2.78	2.26	1.63	1.34	1.1	0.98	0.85	0.74					2.05	1.85	1.75	1.55	1.45	1.35
		30	—	3.4	1.6	1.1	0.68	0.5	0.44	0.38	—	3.9	3.17	2.62	1.9	1.57	1.3	1.16	1.0	0.88					2.2	2.1	1.96	1.8	1.7	1.6
		40	—	4.0	2.0	1.4	0.85	0.64	0.56	0.5	—	3.8	3.3	2.4	2.0	1.65	1.48	1.28	1.12					2.7	2.56	2.4	2.3	2.2	2.05	
		50	—		2.4	1.7	1.0	0.78	0.68	0.63	—		3.9	2.8	2.4	1.95	1.76	1.55	1.37					3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	
		100	—	3.6	2.7	1.5	1.15	1.0	0.8		—			4.0	3.6	3.0	2.8	2.3	2.0											

St 3: 著るしく激しい粉じん爆発を示す粉体。

更に具体的には 1m³ 容器における電気火花を着火源とした爆発の最大昇圧速度が 100~200at/s のものは, St 2 の粉体 (デキストリンおよび有機顔料) で, 100at/s 以下の粉体は St 1 (炭じん) および 200at/s 以上の粉体は St 2 (アルミニウム) に分類される。同じく St 2 の粉体に対する標準試験装置 (1.2 l) における値は, 500~1,500at/s が相当する。このような分類によればその他の可燃性粉じんでも, 表 6³⁰⁾を参照することができよう。しかし, これらの放散面積は放散カバーとして無視できる程度の自重を持つ破裂薄板に対してのみ適当で, 爆発ドアのような重い放散面に対しては, ごく限られた場合にしか使えない。容積と放散圧力に対して, 求める値が表中の数値の間にある場合は比例配分によって算出できる。

一方, Heinrich⁴³⁾は上と同じ実験データを使用して

放散面積を求めるノモグラムを作成した (図 54~56)。

これらは表 6 の破裂設定圧力に対応したもので図 42 における昇圧速度を計算式 (10) に代入して求めたものである。図の読み取り方法は, 図 54 の点線をたどることによって示してある。この場合には各種粉体の最大昇圧速度によって異なった放散面積が与えられる利点がある。表 6 同様, 利用価値は高いが 1m³ 容器での最大昇圧速度の実測値はあまり多くはないので他の容器でのデータからの換算が必要であろう。なお容器については, 断面が円形または四角形で直径高さの比が 1:1 から 1:5 までの約 1,000m³ の容積以下の容器に限る。図 56 には, 粉じんの爆発特性を考慮して求まる容器直径と最大許容高さとの関係を二, 三の例について示した⁶¹⁾。上記のノモグラムは最近 VDI⁶¹⁾にも採り入れられたが, これとは別個に表 6 にならったノモグラムが採用されているのでこれを図 55 に示

した。ここで示したノモグラムは、いずれも同じ実験データに基づいているのであるが同じ条件に対して異った放散面積を与える事がある。そのような場合安全の見地からは、大きい値を採用すべきであろう。

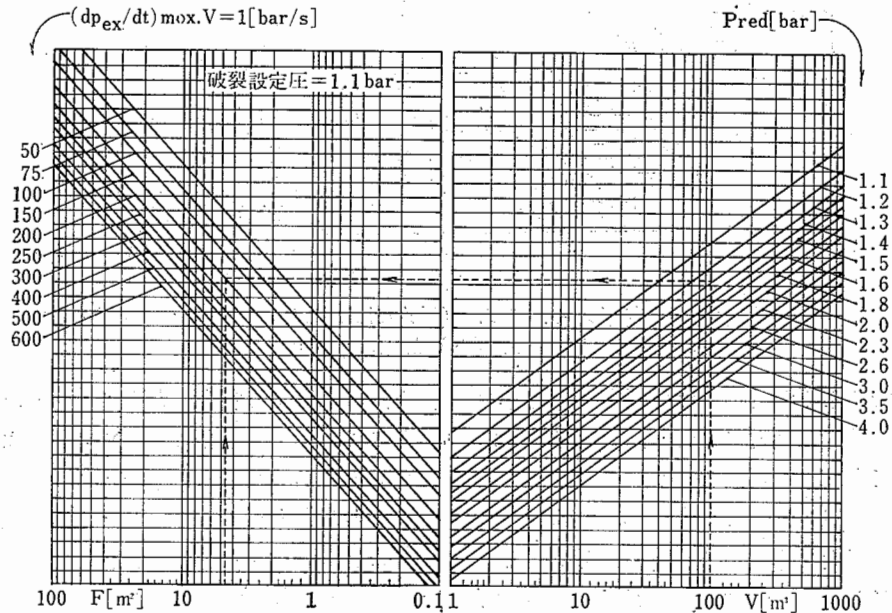
以上の例は、放散面積の大きさに及ぼす種々の因子を考慮して定められたものであるが実際には、なお幾つかの問題が関連して放散面積を決定する上で注意が必要である。それらのあるものは他の要因と関係する

ので実例をひいて次節で述べる。

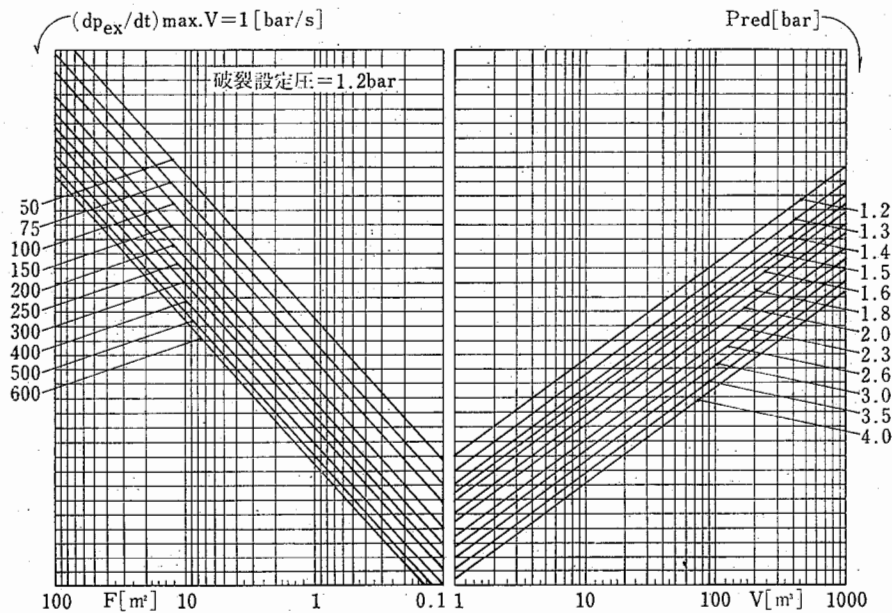
6.2 圧力放散設備の実例

6.2.1 ベントの設置場所と容器形状

これまで説明した放散実験の大部分は、立方体、球型あるいはシリンダー状容器のような単純な容器を使用しているが、これらの実験データで与えられる放散面積やベント比を更に複雑なプラント容器などにその



(a) (例：容積 100m³、放散圧力 1.3bar、粉じんの 1m³ 容器における最大昇圧速度 150bar/s に対する放散面積を求める)



(b)

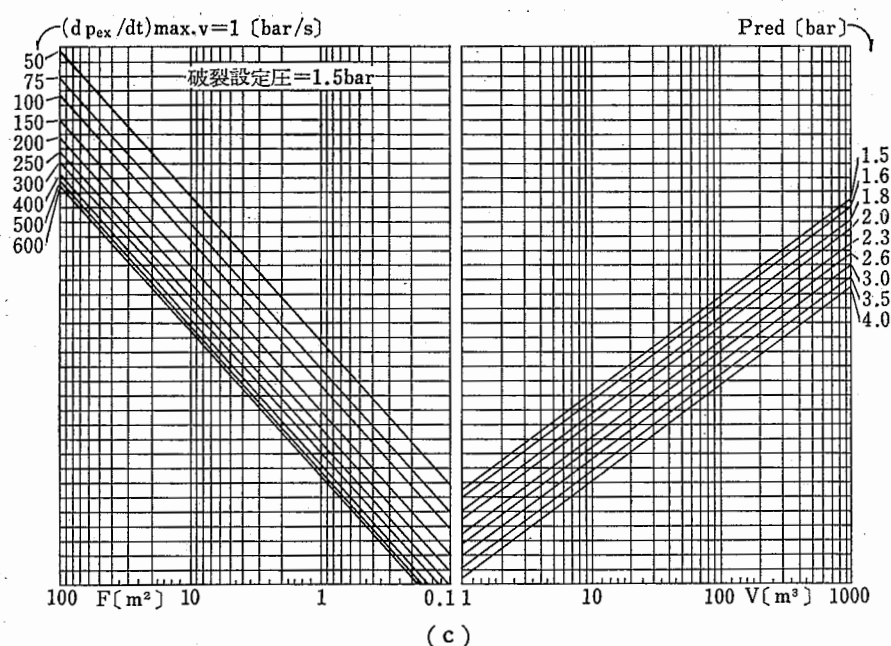


図 54 放散面積決定用ノモグラム (Heinrich による) ベントカバーの作動設定圧 (a) 1.1bar, (b) 1.2bar, (c) 1.5bar

まま適用できるであろうかという問題がある。配管中の粉じん爆発放散実験などによれば、配管のような長い容器についても適用が可能である。この場合容積とベント比の関係は(6)式で与えることは出来ない。これは、容積が大きくなっても配管などではより容易に爆発性粉じん雲を形成することが可能だからである。しかし、複雑な形状を持つプラント容器での放散実験はあまり例がなく直接関連づけることは難しい。ベントを取り付けたサイクロンでの爆発放散実験では、他の単純な容器に対するベント比よりもはるかに小さいベント比で十分であった⁸⁷⁾。これは、この実験条件でのサイクロンの稼動状態で、遠心力が働くため器壁近くの部分でしか爆発性粉じん雲を形成しえなかったからであろう。このように装置の形状によって部分的にしか粉じん雲が形成されないような場合には問題ないが、たとえば図 57 に見られるように容器と容器、あるいは配管と容器が接続されたような装置⁴⁸⁾ではどうであろうか。この場合には隣接容器ないしは接続配管中での発火・爆発の火炎が他の容器へ噴出して大きな着火源を形成する可能性がある。更に密閉された配管系などでは、デトネーション速度に達する場合も考えられ、この場合の器壁に作用する圧力は、25～30気圧とも推定される⁶¹⁾。このような場合、放散ベントによって配管系を保護することは不可能なので他の方法に依らざるをえない。しかし、利用できるベン

ト比は配管から噴出した火炎をも考慮して求めたものなので、通常の爆発においては図のような装置に対しても十分適用できると思われる。ただ重要なのは、ベントの設置場所である。たとえば図 57(A)に見られるように、最初の着火源が存在する右側の容器にも放散面を設ければ隣接容器への爆発伝ばも防げるし、爆発の初期に圧力放散が可能である。実際には着火源がどこで発生するか予測する事は難しい場合が多いので、この場合には左右の容器を独立したものとして、それに適したベント比でそれぞれ放散面を設置することになる。このように複雑な装置になる程、適切なベント比はベント取付け位置と関連して決定すべきものである。一般的なベント設置場所に関しては、着火源として予測できる場所に出来るだけ近づけて設置する事が大切である。何らかのダクトが容器に接続しているような場合にはその接続部分近くに取付けるべきである。更に配管自体では、一定の間隔(1～2m)を取って多数のベントを配管に沿って設けるのが良い。配管に曲折部分やファンが内蔵してある場合はその近くに取付ける。全体の放散面積を一定にして、これを幾つかのベントに分けて取り付ける事も可能である。単純な容器では中心着火に対していずれの側面に放散面を取っても効果は同じで、各側面に分散して全体の放散面積すなわちベント比を等しく取る事もできる。この場合、すでに述べたように放散面の形状はあまり関

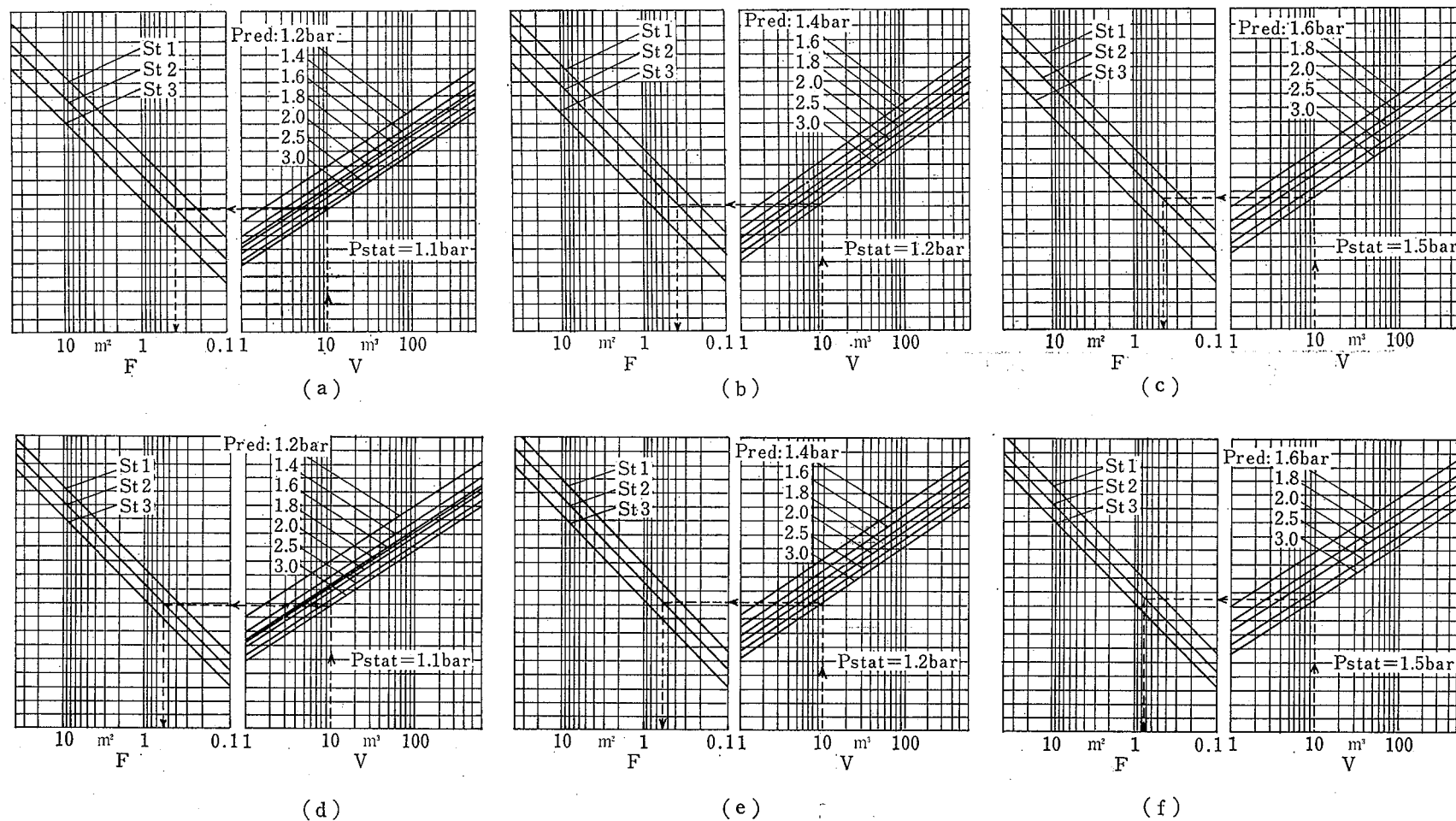


図 55 放散面積決定用ノモグラム—(VDI 3673 による)

(a)～(c)：電気火花による弱い着火源の場合

(d)～(f)：強力な着火源の場合

[容積 V , 放散爆発圧力 p_{red} , ベント設定圧力 p_{stat} ,
粉じんの爆発クラス St 1～3, 放散面積 F]

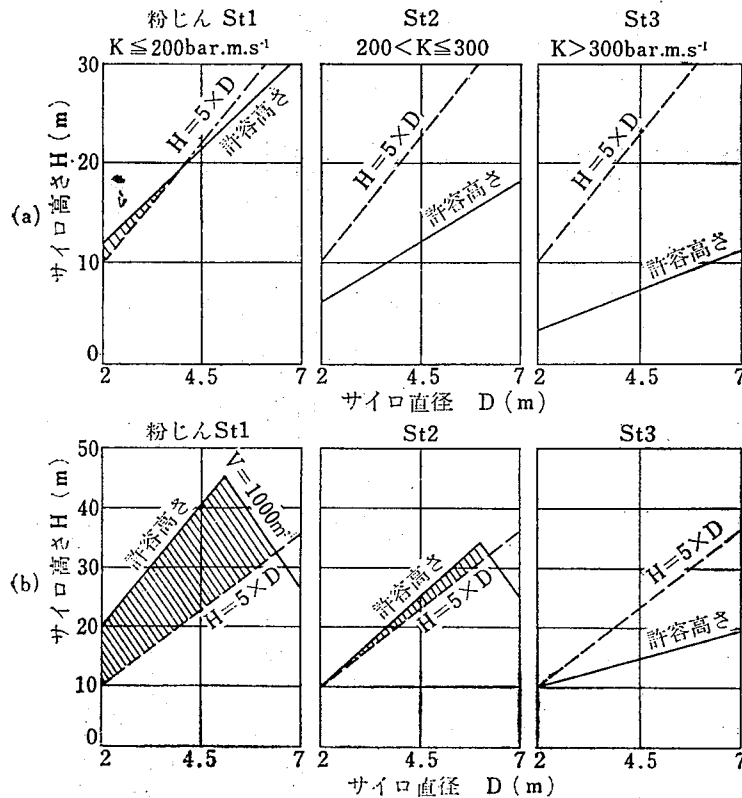


図 56 ノモグラム適用上のサイロ許容高さ

	破裂設定圧力	放散爆発圧力
(a)	1.1bar	1.2bar
(b)	1.1bar	1.4bar

斜線部分は、いずれも容器上端面全部を放散面として利用する範囲。

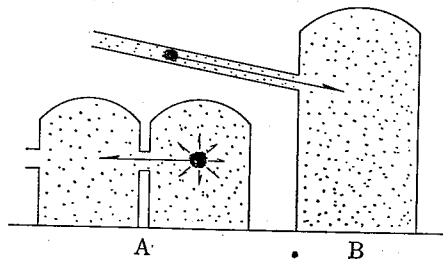


図 57 容器形状による大きな着火源の可能性⁴⁸⁾

- A. 隣接容器からの火炎噴出による場合
- B. 接続ダクトからの火炎噴出による場合

係しないが、ベントの取付け位置はそれが作動した場合大きい火災が噴出するなどによって危険を伴うので、いずれの面からみても安全な方向へ開放するように設置しなければならない。

6.2.2 装置の耐圧力と実際への応用

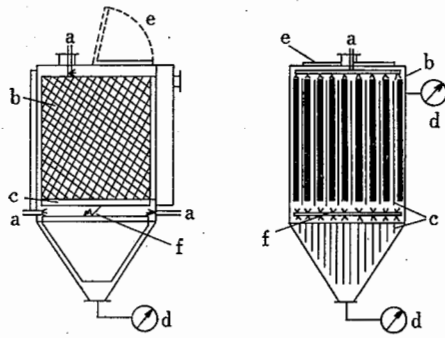
衝撃的な爆発圧力に対する装置の耐爆圧力は、放散

爆発圧力を一定値以下に抑制する上で認識しておく必要がある。十分な広さの放散面積を設けることのできない場合は、装置の耐圧力を高めなければならないであろう。有機顔料粉じんの爆発性に相当する粉じんを取扱う場合、ベントによる容器の破損防止を考慮するものとすれば、耐爆圧力は 2.5 気圧以下で良いという⁸⁰⁾。新たに装置を製造する場合は、密閉容器中での最高爆発圧力の半分程度に相当する耐圧力を持たせるとすると大抵は實際上、より小さい放散面積で希望とする圧力放散を行なえる。更に耐圧力が高ければ、万一爆発が生じた場合でも放散面より噴出してくる未燃焼の混合物は少なく容器外での爆発は軽減できよう (図 25 参照)。

しかし特別の設計を施さない通常の粉体取扱いプラントや軽量構造物では大きい損傷を被むらない程度に耐えうる圧力は、せいぜい 0.14at(G) 位である⁸⁾。このようなプラント容器は一般に金属板で製作され、サイロ、エレベーター、

軽量構造のダクト、集塵機などが相当する。このような場合には、当然十分に大きい放散面積を取らなければならないであろうが、0.1at(G) 以下の低い静的破裂圧を持つ放散カバーでは、通常の作業条件で生ずる短時間のわずかな過圧ないしは減圧によっても使用不能となることがあるので注意が必要である。

爆発放散孔を熱風流動式箱型乾燥機および箱型集塵機に対して応用した実験結果²⁷⁾²⁸⁾が詳しく報告されている。それによると、このような装置にベントを設ける事は非常に有効である事が確認された。また使用した集塵機では爆発圧力が 0.6at(G) 付近で機体の最も弱い、フィルター取付口がふくらみ、1at(G) で全体にわたって変形が生じ、1.5at(G) を越えると機体は主として溶接部から破れたという。更に、ある種の粉体取扱い装置ではフィルターがしばしば使用されるが、容器空間に集じん用フィルター (綿またはテトロ

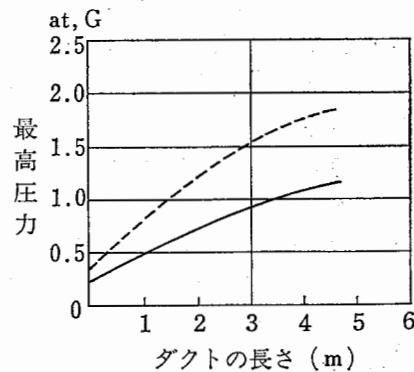

 図 58 フィルターを配列させた容器⁴⁹⁾

- a : 粉じん空気混合物装入口
 b : フィルター布 (20m², ポリアクリロニトリル)
 c : アルミ箔, d : 圧力検出器, e : 放散ドア
 f : 着火源

ン混紡) が存在する時は、フィルターによる爆発火災の熱吸収が大きく爆発圧力は非常に抑制されたものであった²⁸⁾。アルミ箔とフィルター布を組込んだ、2.4 m³ 容器 (図58) における粉じん爆発に対しても、0.25 m³ の放散ドアを取付けた場合わずかに最高圧力 0.35 at(G), 最大昇圧速度 1.6at/s にすぎなかった⁴⁹⁾。このように圧力放散設備を実際に応用するにあたっては、危険性を正しく把握した、ケース・バイ・ケースの検討が要求される面もある。

6.2.3 放散ダクトの使用

既に述べたように、ベントに放散ダクトを取付け噴出混合物を屋外あるいは安全な場所に放出させる事は容器の耐圧力が高くベントが比較的小さい場合一般に必要なことである。特にプラントが密閉された建物内に設置されているような場合には必ず放散ダクトを放散口に接続するのが好ましい。ところがダクトを取付けると放散爆発圧力が高くなり、ダクトの長さが長く、直径が小さい程噴出される混合物中の未燃焼粒子による爆発の圧力が増大するという実験結果 (図59)⁵¹⁾ が知られている。高温の燃焼生成物が噴出されてくることになるが、その中に存在する未燃焼粒子の割合や噴出火災の大きさなどは、もちろん容積、ベント比、粉じん濃度など多くの因子によって影響される。いずれにしても、容器外での燃焼、火災の形成を十分予測した噴出生成物の安全な場所への誘導が必要になるであろう。そのためには径の大きいダクトをできるだけ短くして使用し (3m⁵¹⁾ 又は6m⁶¹⁾ 以内)、曲折は避けるべきである。ダクトの強度は少なくともプラント本体と同じものとして、何らかの方法でダクトをしっかりと



..... 約 10.8 cm のベント + 約 10.8 cm 径のダクト
 ——— 約 14.7 cm " + 約 14.7 cm "
 図 59 ベントに接続したダクトの長さの影響

固定して置く事も必要である。一方、比較的大きい放散面に対してこのようなダクトを使用することはあまり実用的ではない。このような場合には、より低い噴出圧力で爆発が放散されるであろうから、場合によっては容器外での連続的ないしは二次的な粉じん爆発が生ずる可能性がある。従ってプラントを屋外とか、放散面を戸外近くに設けて密閉された建物内に爆発放散を行なってはならない。

6.3 放散カバーの選択

通常のプラント容器の放散開孔部は放散カバーによって密閉するのが実的であるが、放散カバーに要求される第一の条件はカバー設置条件において確実に設定圧力で作動するという信頼性が備わっている事であろう。放散カバーの作業条件 (特に高温、腐食性雰囲気粉じん、圧力変化など) への長期間の暴露は、しばしば放散カバーの劣化などを引き起こし、信頼性を著しく低下させる。もっとも、放散カバー材料の劣化などによって、設定圧力以下で作動すれば安全側に働くが (フェイル・セイフ)、爆発ドアの錆び付きなどで設定圧力以上になるのは問題である。爆発災害の発生はほとんど予期できないものである以上、カバーの保守点検は不可欠のものである。また、放散カバーは特に粉じんを漏洩させない密閉構造のもので、機械的なショックにさらされる場合はある程度の強度が必要である。粉じん爆発や放散の条件に対して、いろいろな構造および材質の放散設備が利用できるが、どのようなものを選択するかは適応される個々のケースに関連した注意深い検討によって決められる。

6.3.1 破裂形式の放散カバー

カバーの材質は、耐水紙、プラスチック・フィルム（またはシート）、金属ホイル、アスベストなど多くの種類のものが安価に利用できる。通常枠組みの間に狭み込んでボルト締めなどによって装置に取り付けられるが、できるだけ均一な圧力が加わるように締め付ける。枠組の縁の形（丸みがかっているか、とがっているかによって）は、カバーの切断（破裂）し易さに影響する材料もある（図 60）。従って材質の静的破裂圧力のテストは必ず実際に使用されるカバー支持枠に設定して行なうべきである。カバーの静的破裂圧力は静

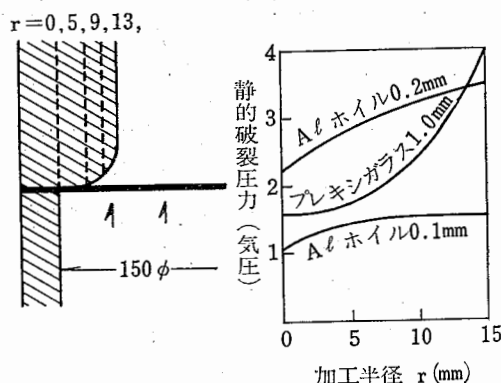


図 60 破裂圧力に及ぼす枠組の影響⁵⁰⁾

的加圧テストによって決める事ができる。セロファン、アルミホイル、プレキシガラス、ピッチペーパー（いずれも厚さ 0.5~2mm）などでは動的破裂圧力 ($p_{dyn.}$) は静的破裂力 ($p_{stat.}$) と

$$p_{dyn.} = f(\Delta p / \Delta t)_{\max} + p_{stat.} \quad (16)$$

の関係にある⁵⁰⁾。 f : 定数, $(\Delta p / \Delta t)_{\max}$: 最大昇圧速度。ただし 1,000at/s 以下。ゴムやポリエチレンフィルムでも昇圧速度とともに高くなる⁵¹⁾。しかしカバー材質の選択にあたっては静的破裂圧力を目安とした実験によらざるをえないであろう⁵¹⁾。その際放散カバーを任意の圧力で破裂させる目的でのみ放散面積を広げたりしてはならない。あくまでも十分検討されたベント面積の指定値に従うべきで、それに見合う寸法と破裂圧力を持つ材質を選択することになる。円形破裂板の静的破裂圧力は放散孔の直径 D , カバー材料の引張り強さ σ_B , 薄板の厚さ s との間に次の関係がある (R. Bestehorn⁵²⁾)。

$$p_{stat.} = K \cdot \frac{s \cdot \sigma_B}{D} \quad (K: \text{定数}) \quad (17)$$

すなわち厚さを 2 倍、直径を 2 倍にしても破裂圧力は変らないことを示している。フィルム状の放散カバーは比較的大きい面積で取り付けられる場合が多いが、

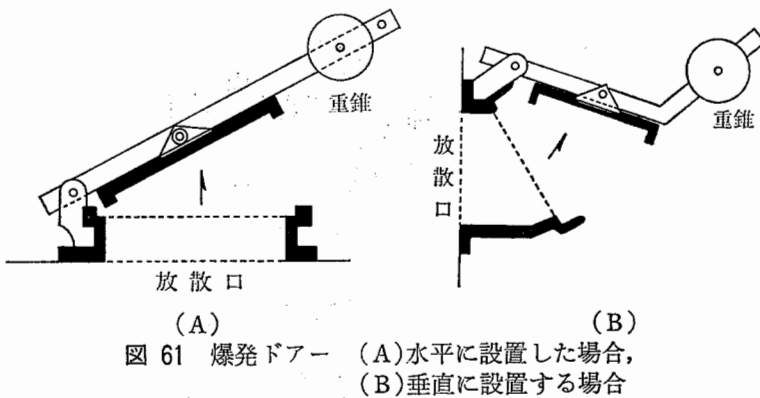
作業中におけるカバーの破損を防ぐためにも、目の荒い金属格子枠（金網でも良い）などで支持することも有効である。更に大きい格子でも放散爆発圧力に、ほとんど影響がない事がわかっている²⁷⁾。その際、カバーの内側に取付け決して外側に置いてその破裂を妨げてはならない²⁾。

事情によってはより強度の材料を使用し、その材料の破裂圧力よりも低い圧力で放散させたい場合、ナイフカッター、鋸状カッターなどの補助装置を利用して破裂圧力を低下させることが出来る¹⁾。カッター類は通常、破裂板などの外側にできるだけ接近させて設置する。このようにすれば爆発圧力による破裂板の歪みによって直ちに両者は接触し破裂作動させることができる。長期間の使用では、カッター類の刃の錆付き等も管理しなければならない。このような破裂形式のもので、焼きなまし済みの純金属または合金薄板製で技術を要するものは特にラプチャーディスクとして市販されている⁵³⁾。大部分はガスや液体の放散用に開発されたものであるが粉じん爆発についても同様に使用できるものが市販されており、平らな円板のものとドーム形にあらかじめ成形したものがサポートないしはホルダーと組合せて使用される。これに関してはいろいろな情報が利用できる所以ここでは省略する。

更に特殊なものとしては爆発の初期の段階で、圧力、光、熱などの変換信号で爆薬を起爆させ、これによって破裂板を作動させるものも製作されている⁹⁾。

6.3.2 ドア形式の放散カバー

放散カバーの破裂形式のものでは薄板が破裂した後では、ベントは開放されたままとなる。そのため容器内に空気が進入して燃焼中の粒子を舞い上げ二次的な爆発ないしは燃焼を助長する恐れも少なくない。このような目的には、放散後急速に放散孔を再び密閉する爆発ドア形式のカバーが利用できる。これは、また放散の目的には何度でも使用できる利点がある。しかし、あまり大きい危険性はないが、放散後急激に密閉した場合、条件によっては生成物の冷却によって容器内に負圧が生ずる事もある。このような場合に対しては、放散時にドアが自動的に元に戻らない構造のストッパーなどを設けて、開放状態に保つものも利用できる。この形式の代表的な例を以下に取りあげた。図 61 は、爆発ドアに任意の重錐を取付けてドアの重量を調節できるものである⁵²⁾。この場合、カバーの重量そのものよりも慣性力が重要で、この形式のものはいずれ



にせよ余り激しい爆発性の粉じんに対しては有効ではない⁵¹⁾。水平に取付ける場合は蓋の遊びを少なくするため、図のように下側をつき出すとよいであろう。しかし、気密を保つ事は難しいのでこの形式のものでは破裂板と一緒に用いる事も出来る。図 62 のパネルのようなカバーもドア形式のものとみる事ができるが、カバー自体は軽いので、クッションまたはガスケットによって気密を良くすることができよう。この放散パネルでは非常に低い圧力で作動させるのに適しているが作業圧力が大気圧よりごくわずかに負圧の場合に最も有効である²⁾。これらの例では、いずれも蝶番の部分をよく管理して常時なめらかに作動できるようにする必要がある。更に放散時においてカバーの破損を防ぐため、90° 以上は開放しないように適切なストッパーを設けるべきである。放散効果は、45° に限定しても何らの影響がないという実験結果³⁴⁾も知られているので、90° 以下にする事も可能である。ストッパーはガイド(棒)と併用することも出来るが、いずれも急激な爆発に十分耐える堅固なものとする事が必要である

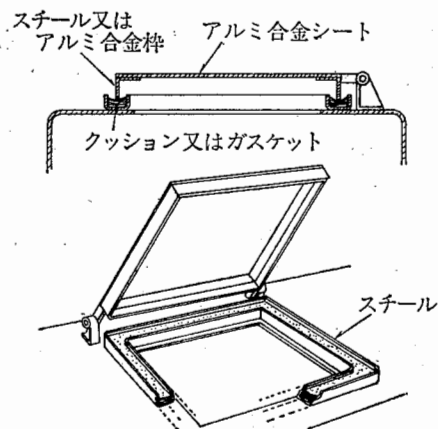


図 62 放散パネルの例⁶²⁾

(図 63)⁵⁴⁾。図 64 では固定ガイドに歯状の戻り止を取り、カバー開放後固定されるようにしたものである。蝶番が不適切な場合には、パネ式のものも利用できる。更に簡単な、一枚の鋼板も可能である(図 65)。この場合は、十分な数のガイドを設け鋼板が偏向して作動することのないようにする。またストッパーとの間にスプリングを置いて衝撃を弱めると良く、ガイドの長さは少なくとも

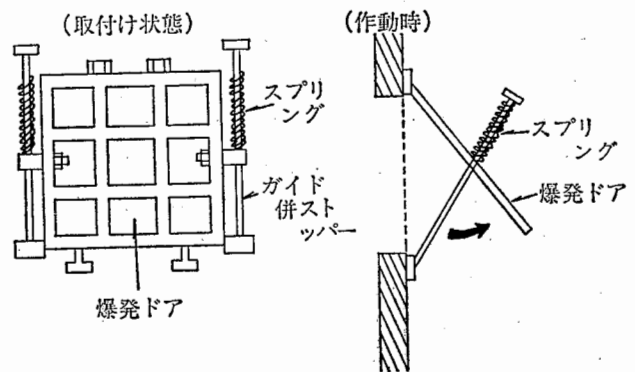


図 63 爆発ドアに取付けたガイド併ストッパーの例

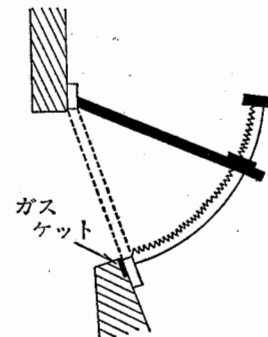


図 64 戻り止をつけた固定ガイド

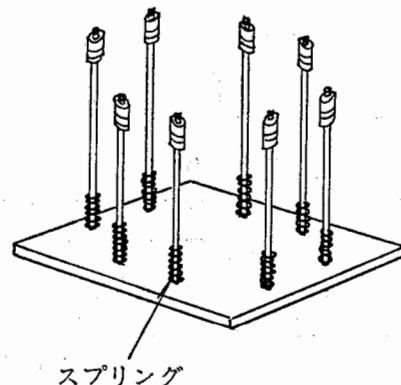


図 65 鋼板放散カバー

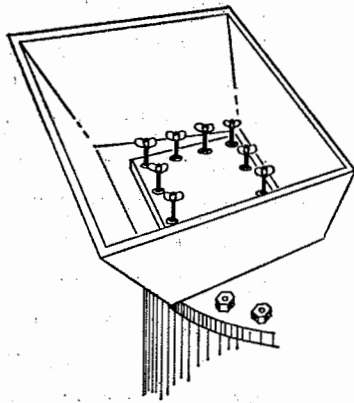


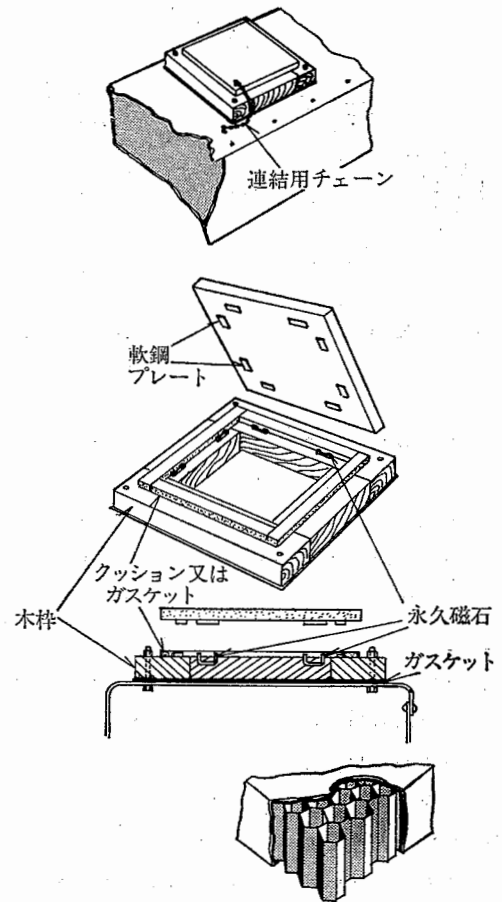
図 66 デフレクター

鋼板の一辺より長く、その2倍以内にする⁵³⁾。鋼板の面積は出来るだけペント面積に近づける事も必要である。図 66 は噴出する火炎をある方向に逸らしたり限定するためのデフレクターを取付けた例である⁵³⁾。ペントに覆い被さるような、いわゆるフード型のものはその大きさにも依り圧力に影響を与えるので使用にあたっては注意が必要である。

放散カバーを磁石によって固定する形式のものは、爆発ドア形式のものと多少異なるが、軽くて丈夫なパネルを使用しその保持力もカバーの重さとは関係なく調節できる利点がある。カバーの重さは、一般に、 $5\text{g}/\text{cm}^2$ を越えてはならず磁石とカバーの重さを合せて $15\text{g}/\text{cm}^2$ 以下とするべきである⁴⁴⁾。図 67 は磁石式の放散パネルをダクトに取付けた例を示す。カバーにはプラスチックやアルミホイル加工品が適当であろう。一般に磁石そのものは、カバーの重量を重くするのでカバーに取り付けてはならない。しかし最近では、磁化鉄粉を混合したゴムパッキンなど軽量のものが利用できるで、このようなものはさしつかえないであろう。また放散時には、それ程危険な飛来物とはならないであろうが、一応飛来防止用のチェーンやコードで、カバーを装置本体に連結しておく事を忘れてはならない。

6.3.3 建築物の爆圧放散¹⁾⁴⁾⁵⁶⁾⁵⁹⁾

建築物内に生じた爆発圧力の放散手段として、屋根、窓、壁などが使用できるであろうが、いわゆる放爆構造の建物は既に設計段階において考慮すべき問題である。平屋または最上階の軽量構造の屋根は爆発ペントとして利用できるが、特に天候に対する注意が必要である⁵¹⁾。風雪雨はもちろん、長期間の自然暴露はペント材料の有効性を減ずるであろうから、台風時の



ペントカバーの例：強化クラフト紙またはアルミホイル製の蜂の巣型加工品
図 67 磁石式ペントカバーの例²⁾

強風や雪の重みによって破損しないようにする事が肝心である。放散によって先の鋭い破片を飛散させるような材料は好ましくなく、木板、プラスチック波板、金属板その他の軽量物で爆発が生じた場合はすばやく作動するように、しかも風などで飛ばないように固定する。屋根全体を放散させる構造とすることも可能であろうが、ペント面積はかなり余裕のあるものとなる。屋根の重さは、はっきりした報告がないが、 $5\text{g}/\text{cm}^2$ を越えなければ適切であろうと言われている⁵¹⁾。屋根の耐圧力は、 0.1 気圧あればよい。すなわち屋根ペントを有効に作動させるためには、壁、窓、ドアなどは、この圧力に耐える強さが必要である。しかし、このような建築物内の圧力放散手段としてドアは小さすぎペントとして有効とは考えられない場合が多い。このような場合には爆発圧力 ($7\text{kg}/\text{cm}^2$) に耐えるだけの強度 (特に蝶番の部分など) を持たせる事が必要になる。このような強度を持ったドアは非常に開け

にくくなるので、プラントを運転する時は必ず開くように、プラント制御盤と連結（インターロック）しておくことである。同じく、屋根ベントを使用する時は、窓はできるだけ小さくして金網入りの丈夫なものを使用する。一方、窓のみを爆発ベントとして使用する場合は、ガラスが破壊して放散孔を与えるものとするよりも、窓枠ごとに吊り下げまたは両開き式に外側へ開放するものが望ましい。ガラスよりは透明プラスチック板をメタル・フレームに取付けたものが適切である。スプリングによって軽く止めて置き、容易にはずれるようにして置く事もできるであろう。窓ベントでは、放散面積を容易に分散させて設置できる利点がある。

屋根ベントの替りに同じように軽量壁を使用する事が出来る。約 5cm 厚さのポリスチレンフォームを鉄骨フレームに取付けた壁は、断熱および軽量の点で適当であるという⁵¹⁾。しかし、軽量屋根に較べて、壁は衝撃などにさらされ易く平屋建には不利である。

建築物内の爆圧放散の場合には粉じんの火災による煙や熱などによる被害も考慮する必要がある。あるいは放散される物質が有毒性、可燃性のものである場合が大部分であるから（粉じん爆発生成物には多量の一酸化炭素が含まれる）、ベント周辺は当然危険区域と見なされなければならないであろう。従って立地条件なども含めた工場配列までも検討されなければならない。これらについては他に多くの資料が利用できる^{1)55)~60)}。

6.4 実 施 例

これまでは放散設備のいろいろな面を個々に説明したが、放散設備を取り付けるプラントの設計の目的には、実際の各装置やそこで扱われるプロセスの危険性などが十分に認識されなければならない。粉体を取扱う各プロセスに付属する装置に対してどのように放散設備を設置するかは、従ってそれらの危険性に依存することになるが、ここでは幾つかの実施例をあげるにとどめた。もちろん、粉じん爆発は条件によって大きく変化するので、これらの例をそのまま模倣することは出来ないであろう。

図 68 は、粉体製品の貯蔵として四個の副貯蔵（容積各 9m³）と主貯槽（容積 40m³）から成るサイロについて圧力放散設備を取り付けた例である。粉じんは加圧空気輸送（ニューマコンベヤ）されるが、主貯槽内の空気を置き換えて粉体を投入する事になるので、

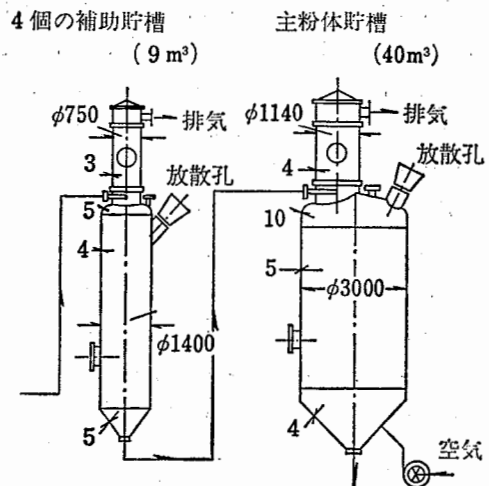


図 68 圧力放散設備を取り付けた耐圧粉体サイロ⁴⁷⁾

粉じんの漏洩を防ぐようにする事が必要である。そのため排気はフィルターを通過して行なう。器壁の厚さはその形状を適当に取る事によって比較的薄くする事ができるという。この場合径 70cm、設定圧力 0.5 気圧のラプチャージスクを各貯槽に取り付ける事によって爆発の際の圧力を 5 気圧以下に押さえることが出来る。破裂板は高さ 8m（屋外）に設置されるので放出ダクトはいらない。一般に貯蔵槽は耐火構造として容積の大きいものは屋外に設置した方がよい。

図 69 は粉体製造プラントに破裂板を取り付けた例を示す。原料（1）は傾斜した吸引ダクト（2）、磁石式異物分離器（3）を通り、ハンマーミル（4）および貯槽（5）に導入される。更にコンベヤー（6）および磁石式振動器（7）を経て粉砕機（8）から貯槽（9）および（10）に到る。経験から見ても着火源となりうる火花を生ずる異物を完全に除去することは難

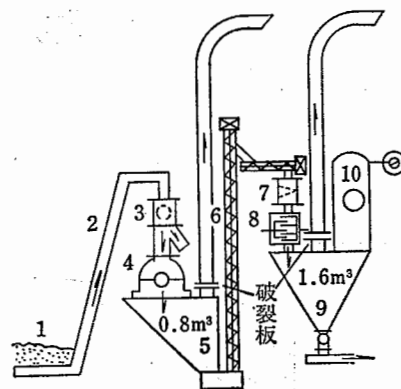


図 69 粉体製造プラントへの破裂板の使用例⁴⁷⁾

しいのでやや長い放出ダクトを伴う破裂板を取り付けた例である。このように破裂板に放出ダクトが接続している場合は、破裂板の点検等のため、ダクトの根元で開放できる頑強な小窓があれば便利である。かなり細かい粉体を扱う粉碎機やミルの場合は、機械的な強度を増すことによって粉体の出入口を爆発ペントとして役立つようにすることもできるが、大容積のものに対しては別にペントを設けることも望ましい。

コンベヤのような粉体輸送システムは、いろいろの装置を連結する役割を行なうが、爆発の伝ば防止の面からみれば、各プラント装置を分離、遮断する役割に利用することもできよう。スクリュコンベヤは、このような役割には有効であるが、パケット・コンベヤなどでは粉じん空間が大きく機械的な摩擦火花によって粉じん爆発が発生し易く、適当な爆発ペントを設ける必要がある¹⁾。サイクロンではペントの使用によって装置の破壊を守ることは比較的容易である。この場合図 70, 71 に示すように、本体に接続したダクト近くに放散孔を取るのが最も良く、正の作業圧力においても密閉構造としなければならない。また、ペントカバ

ーは著るしく重くならない程度でかつ十分に丈夫なものとする。粉じんの摩擦力（渦巻運動による）などが働くからであるが、そのような理由からもペントの位置はサイクロンの上部（図 70）か接続ダクトの上部（図 71）が好ましい事になる。

7. 結 言

粉じん爆発に対する圧力放散設備について爆発特性をも含めて大体をもうらして説明した。だが実際に圧力放散設備を設置する上で、粉じん爆発そのものの防止対策を行なう事なく単なる破壊防護対策のみを考慮することは絶対に避けなければならない大事なことである。建物自体の爆発による圧力放散などを考慮するよりも、防塵対策や粉じんの蓄積などを行なわないような清掃の方がはるかに重要な事は記すまでもない。粉じん爆発の予防対策の基本は空気中での可燃性粉じん雲の生成とその着火源の発生・存在をなくす事にあると考えられるが、現実にはその両立は困難で、そのためたとえば不活性ガス混入による限界酸素濃度法や不燃性粉体を混入する方法などの処置を第一に利用すべき場合もある。また、たとえば、爆発の発生をいち早く検出する回路を組込んで消火剤や不活性ガスなどを放出させる自動爆発抑制装置などは爆発防護手段としては、積極的な役割を持つと思われる。一方圧力放散設備は粉じんの爆発的燃焼の抑制という点からは何の防止対策にもならず場合によってはかえってその燃焼を助長させるという非常に消極的な手段にすぎない。従って、まず粉体取扱いプラントの防爆対策が優先し、それらの対策がどうしても部分的あるいは限定してしか行なえない場合にはじめてプラントの防護対策の一つとして圧力放散設備が考慮される事になる。これはすでに述べたように自動爆発抑制装置などとは比較にならない程簡便に設置できる利点があるが、その設置についてはプラントの設計段階で粉じん爆発の危険性をも含めて十分に検討されるようにすべきである。ともあれ、本書で述べた各項目について、文献を含めて十分検討の上実際に利用されるならば幸いである。

（昭和50年8月10日受理）

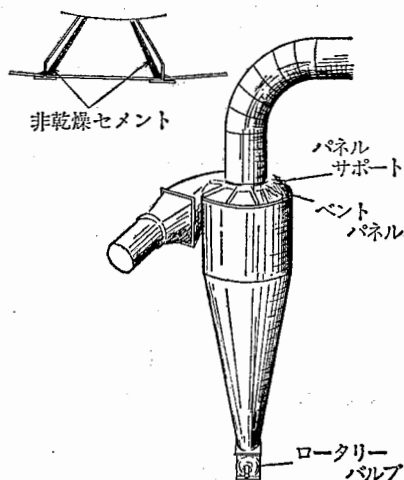


図 70 サイクロンのペントパネル

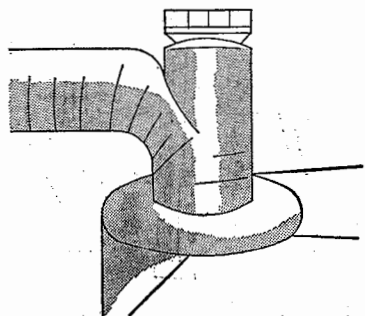


図 71 大型サイクロン出口に取付けた例

引用文献

- 1) National Fire Codes, Vol.9 Guide for explosion venting, 1954. NFPA.
- 2) Dust explosions in factories, SHW No.22, 1970, HMSO, London.
- 3) Palmer, K.N. I.Chem. E. Symposium Series No.34, p.142, 1971.
- 4) Verein Deutscher Ingenieure-Richtlinie 2263, 1969. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- 5) Schwab, R.F. and Othmer, D.F. Chem. Process Eng. 165, 1964.
- 6) Straumann, W. Chem.-Ingr.-Tech. 37(3)306, 1965.
- 7) Maisey, H.R. Chem. Process Eng. 662, 1965.
- 8) Bartknecht, W. Stahl u. Eisen 92(6)245, 1972.
- 9) Bartknecht, W. Mod. Unfallverhütung 10, 65, 1966.
- 10) Wintrich, H., Steen, H. and Schön, G. Die Berufsgenossenschaft (9) 325, 1967.
- 11) Harris, G.F.P. Comb. and Flame 11, 17, 1967.
- 12) Bartknecht, W. Mod. Unfall. 16, 60, 1972.
- 13) Scholl, E.W. Die Berufsgensft. (7) 246, 1974.
- 14) 内藤, 松田: 産安研究技術資料 TN-69-1, 1969.
- 15) Dorsett, H.G., Jacobson, M., Nagy, J. and William, R.P. U.S. Bureau of Mines RI 5624, 1960.
- 16) Bartknecht, W. Staub-Reinhalt. Luft 31(3) 112, 1971.
- 17) Heinrich, H.J. and Kowall, R. Staub-Reinhalt. Luft 32(7)293, 1972.
- 18) 石浜, 榎本, 菅野, 加藤: 第7回安全工学研究発表会講演要旨集 p.17, 1974, 安全工学協会.
- 19) Nagy, J. and Portman, W.M. U.S. Bureau of Mines RI 5815, 1961.
- 20) Jacobson, M. 他: U.S. Bureau of Mines RI 5753(1961), RI 5971(1962), RI 6516(1964).
- 21) Nagy, J., 他: U.S. Bureau of Mines RI 6597 (1965), RI 7132 (1968), RI 7208 (1968).
- 22) 内藤, 松田: 産安研究報告 RR-23-1, 1974.
- 23) Heinrich, H.J. and Kowall, R. VDI-Berichte 165, 53, 1971.
- 24) Palmer, K.N. Loss Prevention & Safety Promotion in the Process Industries (ed. C.H. Buschmann), Elsevier 1974.
- 25) Heinrich, H.J. Chemie-Ing.-Techn. 38(11) 1966.
- 26) Harris, G.F.P. and Briscoe, P.G. Comb. and Flame 11, 331, 1967.
- 27) 田口, 鶴見, 林, 松井: 産安研究報告, RR-19-1, 1970.
- 28) 同上 RR-19-2, 1970.
- 29) 香月, 清正, 鹿田, 井清, 鈴木: 採鉱と保安, 14 (5)225, 1968.
- 30) Donat, C. Staub-Reinhalt. Luft 31(4)154, 1971.
- 31) Hartmann, I. and Nagy, J. Ind. Engng. Chem. 49, 1734, 1957.
- 32) Hartmann, I. and Cooper, A.R. U.S. Bureau of Mines RI 4725 (1950).
- 33) 赤羽, 加藤, 松田, 塩田: 採鉱と保安 13(7)357, 1967.
- 34) Pineau, J., Giltair, M. and Dangreux, J. Cahiers de notes documentaires 74(1)75, 1974.
- 35) Metzner, H. Bergbautechnik 20, 554, 1970.
- 36) Brown, K.C. and Wilde, D.G. SMRE Report 119, 1955.
- 37) Palmer, K.N. Chem. Engng. Prog. 70(4)57, 1974.
- 38) Heinrich, H.J. Mod. Unfall. 10, 36, 1966.
- 39) Heinrich, H.J. Amts.-und Mitteilungsblatt der BAM 5, 5, 1970.
- 40) Zehr, J. Mod. Unfall. 7, 28, 1963.
- 41) Lewis, B. and von Elbe, G.J. Chem. Phys. 2, 283, 1934.
- 42) Heinrich, H.J. and Kowall, R. Staub-Reinhalt. Luft 31(4)149, 1971.
- 43) Heinrich, H. Arbeitsschutz (11) 314, 1974.
- 44) Palmer, K.N. Dust explosions and fires. p. 255, 1973. Chapman and hall, London.
- 45) Palmer, K.N. ²⁴⁾p.175,
- 46) Ritter, K. Mod. Unfall. 17, 74, 1973.
- 47) Ritter, K. Staub-Reinhalt. Luft 31 (3) 108, 1971.
- 48) Leuschke, G. Arbeitsschutz (1) 1, 1967.
- 49) Heinrich, B., Stockburger, D. and Thoma, P. Chemie-Ing.-Techn. 45(4)946, 1973.
- 50) Bartknecht, W. Schlägel und Eisen (7) 415, 1964.
- 51) Palmer, K.N. Dust explosions and fire. p. 249, 1973.
- 52) Freytag, H.H. Handbuch der Raum-explosionen (Wehner, E. Explosionsdruck-Entlastung.) 1965. Chemie-Verlag.
- 53) Brown, K.C. and Curzon, G.E. SMRE Report 212, 1963.
- 54) Witthaus, P.O. Staub-Reinhalt. Luft 31(4) 166, 1971.
- 55) Fire Protection Handbook, 13 ed. 1969. NFPA.
- 56) National Fire Codes, Vol.3 Combustible solids, dusts and explosives. 1972-73, NFPA.
- 57) 化学プロセスの災害防止② (共立出版) p.14 1971
- 58) 安全工学便覧 (安全工学協会編) p.492 1973
- 59) Handbook of Industrial Loss Provention, Factory Mutual Engng. Corp. 1967. McGraw Hill, New York.
- 60) Guide to the use of flame arresters and explosion reliefs. SHW No.34, 1965. HMSO, London.
- 61) Verein Deutscher Ingenieure-Richtlinie 3673 (Entwurf), 1975. VDI-Verlag, Düsseldorf.

産業安全研究所安全資料 RIIS-DS-75-1

昭和50年12月20日 発行

発行所 労働省産業安全研究所
〒108 東京都港区芝5丁目35番1号
電話 (03) 453-8441(代)

印刷所 新日本印刷株式会社
