

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-88,1988
UDC 614.838

爆圧放散口に関する研究 (第4報)
—離脱式放散口の実験について*—

林 年 宏**

Experimental Study on the Methods of Explosion Venting (4th Report)
—On the Behaviours of Flying-off Type Explosion Relief—

by TOSHIHIRO HAYASHI

Abstract; Explosion venting is one of the useful method of explosion protection, which is applied to various industrial equipment of light structure such as dryers and dust collectors processing flammable gases, vapours or dusts. There are two prototypes of relief vent; one is the rupture diaphragm type and the other is called here as flying-off type. In the latter type, a vent cover flies off when it is subjected to an explosion pressure generated in a vessel to be protected, so that the combustion products are expelled through a vent opening. Characteristic features of the rupture diaphragm type vent were reported in the previous paper¹⁾. For the relief vent of flying-off type, an empirical equation has been proposed by Simmonds and Cubbage²⁾ through tests with cubical drying ovens of satisfactorily large internal volume (0.2~14m³). It seems, however, that the weights of vent cover they tested were rather small (0.15~3.4g/cm²) and that the vent openings were relatively large ($K=1\sim3$), both from a viewpoint of practical use. The present report describes the effect on vented explosion pressure of vessel size, vent ratio and the weight of vent cover through gaseous explosion tests in smaller vessels with a wide range of vent opening covered by heavier vent covers. The pressure range of vented explosion, up to 1kgf/cm², is far higher in this paper than that in the cited paper.

Three cylindrical vessels with internal volumes of 0.92, 6.8 and 94 litres are used for tests, the ratio of the height to the internal diameter of each vessel being unity. The circular vent opening on the top of vessel is covered with a disc-shaped weight which simulates a vent cover (Fig. 1). The diameter of bottom surface of the weight is just slightly larger than that of the vent opening, so that the weight of vent cover per unit area is assumed equal to W/S , where W is a weight of vent cover and S is a vent area, respectively. A 4.5% propane-air mixture is ignited at the center bottom of the vessel, and a peak pressure (P) of a vented explosion is determined.

Simmonds and Cubbage derived their equation on the assumption that P is proportional to W/S for a constant volume (V) and constant K ; vent ratio K is defined as $(D/d)^2$, where D and d are diameters of a test vessel and a vent opening, respectively. Their assumption is apparently not valid, as shown in Fig. 2, except for very small W/S , but P and W/S are most suitably related, for a wide range of W/S , by a linear relation on a logarithmic plotting. Thus, an eq. (1) stands for each vessel and for a given K ; the constants A and B_2 are functions of vessel size as shown in Fig. 7, while A is independent on K when a vent opening is not so small (see Fig. 3).

$$P = B_2 (K \cdot W)^A \quad (1)$$

* この研究の一部は第18回安全工学シンポジウム(1988年5月, 東京)において発表した。

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division

Introducing a factor $K^{1/2}$, P can be closely related to $K \cdot W$ by eq. (2) for a given vessel (Fig. 5). Further introducing $V^{2/3}$ as a factor of vessel size, P is expected to be predicted by eq. (3).

$$P/K^{1/2} = B_3 (K \cdot W)^A \quad (2)$$

$$P \cdot V^{2/3} / K^{1/2} = B_4 (K \cdot W)^A \quad (3)$$

The result shows a fairly good agreement, as seen in Fig. 6, but is not so satisfactory as to predict vented explosion pressures in larger vessels than tested. The reason is attributed not to the process of derivation of equations, but to the dependency of power constant A on vessel size; that is, the venting behaviours of flying-off type relief vent is somewhat dependent on the vessel size. In other words, the same W/S and K will give a relatively higher vented pressure as the vessel size increases, especially for a larger range of W/S , probably because of an increase of inertia of vent cover itself with an increase of vessel size. The pessimistic conclusion is that the prediction of vented pressure in a large vessel based on explosion tests in a smaller vessel is not reasonable. However, it is found, as shown in Figs. 8 and 9, that there exists a limiting value of W/S or $K \cdot W$, less than which a vented explosion pressure in a smaller vessel is higher than that in a larger vessel. Such a limiting value of $K \cdot W$ will be of use in designing relief vents, and then is related to the reference volume V_i and R ; V_i is a volume of the vessel in which explosion venting tests are made, and R is a ratio V/V_i , where V is a volume of a larger vessel to which the result of test in a reference vessel is to be applied. On the assumption that the equation derived in the present work could be extrapolated to a vessel volume of 1 m^3 , a relation is obtained which enables to estimate the effect of vessel size on limiting $K \cdot W$ (Figs. 10 and 11). As is seen from these figures, limiting $K \cdot W$ is large enough for practical use, but decreases rapidly with an increase of R .

Discussions are also made on the comparison between empirical equations by Simmonds and Cabbage, eq. (9), and by the present work, eq. (10), where a , b , A and B are experimental constants.

$$P \cdot V^{1/3} = a \cdot K (W/S) + b \quad (9)$$

$$P \cdot V^{2/3} / K^{1/2} = B (S \cdot K)^A \cdot (W/S)^A \quad (10)$$

Assuming $A=1$, then eq. (10) leads to eq. (12), and eq. (11) is derived from eq. (9) for a given vessel volume; a_1 , b_1 and B_1 are constant values.

$$P = a_1 \cdot K (W/S) + b_1 \quad (11)$$

$$P = B_1 \cdot K^{1/2} (W/S) \quad (12)$$

Taking into consideration the low value of b_1 , eqs. (11) and (12) have substantially the same meaning especially when the value of K is nearly unity. This fact suggests that the power constant A increases with an increase of vessel size but that it would not be so larger than unity. If this could be proved true, the design of relief vents for industrial equipments would become more easier by the method described in this paper.

The effects of the weight of vent cover and vent ratio on venting behaviours have been explained through the present work, even though the effect of vessel size is not yet certain. Experiments in larger vessels than tested here with vent covers heavier than tested by Simmonds and Cabbage will clarify whether $V^{1/3}$ or $V^{2/3}$ is a more suitable factor of vessel size.

Key words: Gaseous Explosion, Pressure, Safety Device, Venting

1. 緒言

内部でガス爆発や粉じん爆発を生ずるおそれのある装置類を破壊から防護する手法のひとつに爆圧放散口がある。装置が予め開口を有するという特殊な場合を除けば、原理的には、装置の一部に故意に設けた脆弱部（金属の薄板など）が爆発圧力により破断して開口を生ずる方式（破裂膜式）と、開口を覆っているカバー（ベント・カバー）が爆発圧力により離脱する方式がある。後者はさらに、カバーが装置から離脱してしまう離脱式と、蝶番によりカバーが装置に保持される蝶番式に分類される。いずれの方式においても、開口を生ずる圧力及び開口の大きさが適切であれば、開口から燃焼生成物を放出することにより装置に加わる圧力を十分に低く抑え、装置の破壊とそれに伴う災害を防止することが可能である。このうちの破裂膜式放散口の設計方法については既に報告した¹⁾。

離脱式放散口については、箱型乾燥炉を対象とした Simmonds らの研究²⁾があり、内容積 $0.2 \sim 14 \text{ m}^3$ 、カバー重量 $0.15 \sim 3.4 \text{ g/cm}^2$ 、開口比 K （後述） $1 \sim 3$ 、放散時の爆発圧力 0.28 kgf/cm^2 以下の場合について実験式を与えている。筆者の経験では離脱式放散口は爆発圧力を低く抑えるのに適する方式であるが、実用上の観点からは、大きな開口が設けられない場合や、カバーの重量が増した場合の設計データも必要と考えられる。ここでは、大きさの異なる三種類の小型容器を用いて、ガス爆発に対する離脱式放散口の特性について実験的な検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

実験装置を Fig. 1 に示す。内部でガス爆発を生ぜしめる容器は内径と高さの比が1.0の円筒容器であり、内径 D は10.5、20.5及び49.2cm、内容積はそれぞれ約0.92、6.8及び94lの三種類である。毎回の爆発実験では、容器上部の端フランジに直径 d (cm) の円形開口を有するフランジ（開口フランジ）をネジどめし、この上に中心に直径1.5mmの小孔をあけたポリ塩化ビニル・シート（厚さ0.1mm）を乗せ、さらにガスケットを介して盲フランジをボルト締めし、密閉容器とする。容器内を真空としたのち、4.5%プロパン-空気予混合ガスを圧力が大気圧よりやや高くなるように満たす。盲フランジを取外すと同時にポリ塩化ビニル・シートの小孔をセロファンテープでふさぎ、その上におもし（放散口のカバーに相当する）を乗せる。おも

しの最下段は、直径が $d+4$ (mm)、厚さ0.3cmのアルミ板とし、この上に鋼製円板を積み重ねて所望の重量とする。その際、円板の中心に通した長ネジの両端をナットで締めつけて、積み重ねた円板が一体となって離脱するようにした。点火はニクロム線ヒータ（印加電圧3V）により行い、点火位置は容器下端の中心とした。点火位置を開口から遠い方の容器端とした理由は、既報¹⁾で述べたように、現象の単純化により圧力放散の特性を理解しやすくするためであり、従って、本報の結果は実用上のすべての情況に適用できるものではない。点火後の圧力の時間的変化の記録には、歪ゲージ式圧力変換器（容量30,5及び2 kgf/cm²）、動歪増幅器及び電磁オシログラフからなる測定系（応答周波数500Hz）を用いた。

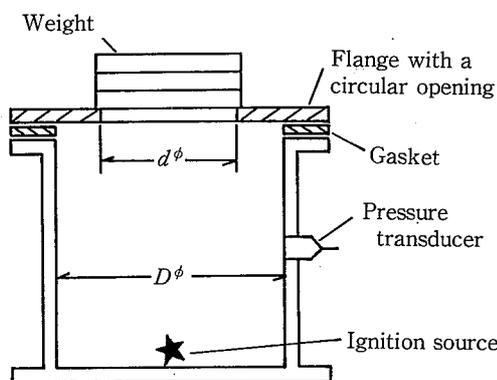


Fig. 1 Schematic showing of test apparatus.

実験装置

なお、本報で用いる記号及びその意味は次のとおりである。

K : 開口比 = $(D/d)^2$ (Fig. 1 参照)

P : 爆発時の最大到達圧力（爆発圧力）(kgf/cm²)

S : 開口面積 = $\pi d^2 / 4$ (cm²)

V : 容器内容積 (図及び数式中は cm³, 本文中は l)

W : おもし（カバー）の重量*1 (g)

*1 実用上は、開口を覆うカバーの重量と、カバーの保持力を加えたものに相当する。Simmonds らが実験に用いたカバーの重量は、実際の装置への応用という観点からみると小さすぎると思える。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験式の誘導

Simmonds らの実験式は、 V 及び K が同じであればカバーの単位面積当りの重量 w と爆発圧力 P の間に一次の比例関係があることを前提としているが、本実験によれば、 W/S が増せばこの関係は崩れ、その傾向は K が大きく V が小さいほど著しいことが示された*2。 $V=0.92l$ の容器における W/S と P の関係を Fig. 2 に示す。 W/S が十分に大きくなれば、 P は K にかかわりなく容器を密閉したときの爆発圧力に収れんするはずであるが、爆圧放散口の対象としては 1 kgf/cm^2 程度以下の圧力を考えれば十分である。

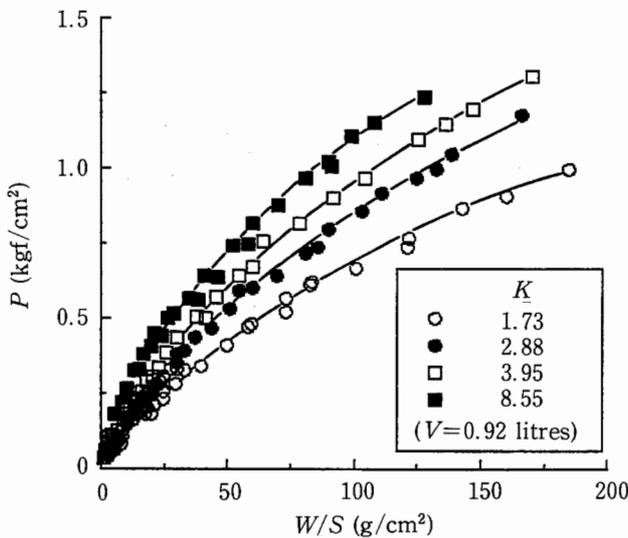


Fig. 2 Relation between explosion pressure and the weight of vent cover per unit area.

ベント・カバー重量 (単位面積当り) と爆発圧力の関係

W/S が数 100 g/cm^2 以下では、Fig. 3 に示すように W/S と P は両対数グラフ上の直線関係で近似することができ、 V 及び K (あるいは S) が一定の場合について次式が導かれる。ただし、 B_0, B_1, B_2 及び A は定数であり、これらの定数の間には、 $B_1=B_0/S^A, B_2=B_1/K^A$ などの関係がある。

$$P=B_0(W/S)^A=B_1 \cdot W^A=B_2(K \cdot W)^A \quad (1)$$

いずれの容器についても、 K が極端に大きい (この

*2 本報では $w=W/S$ として論議をすすめる。

実験では20以上)を除けば、 P が 1 kgf/cm^2 程度以下であれば、べき数 A は K によらない一定値とみなすことができる。以下の論議は K が 16.8 以下、 P が 1 kgf/cm^2 程度以下の場合を対象とする。

式(1)のべき数 A は容器により異なる。 $K=1.25$ の場合について、三種類の容器に対するべき数を比較したのが Fig. 4 であり、図の近似直線の傾き (べき数 A) は V の増すほど大きいことがわかる。この図では比較を容易にするために横軸を W としたが、式(1)からわかるように横軸を W/S としても直線の傾きは同じである。

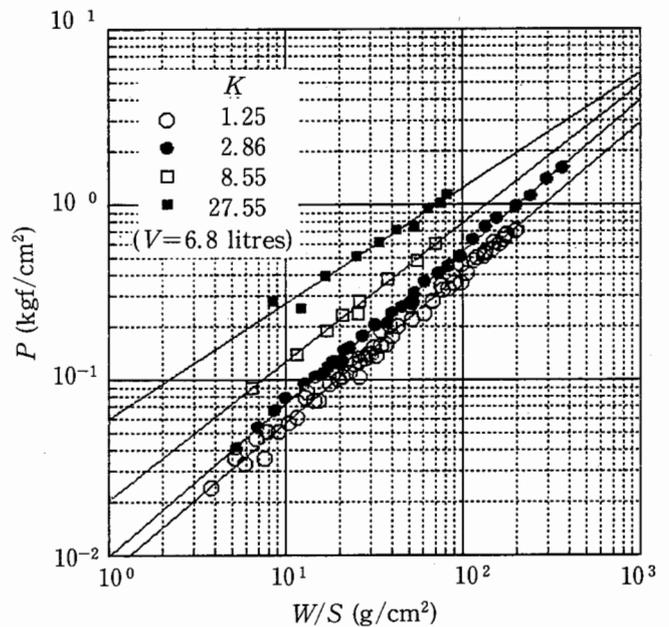


Fig. 3 Logarithmic relation between explosion pressure and the weight of vent cover per unit area.

ベント・カバー重量 (単位面積当り) と爆発圧力の関係

Fig. 5 は、 $V=6.8l$ の容器について $K \cdot W$ と $P/K^{1/2}$ の関係を示したものである。式(1)で導いたように、 V 及び K が一定のときには P は $(K \cdot W)^A$ に比例する。 K が P に及ぼす影響を示す因子として $K^{1/2}$ を導入したのは、破裂膜式放散口におけるこの因子の重要性に着目したからである。

いずれの容器においても、 $K \cdot W$ と $P/K^{1/2}$ の関係は両対数グラフ上で直線に近似できることから、次式が導かれる。ただし、 B_3 及び A は容器により異なる定数である。

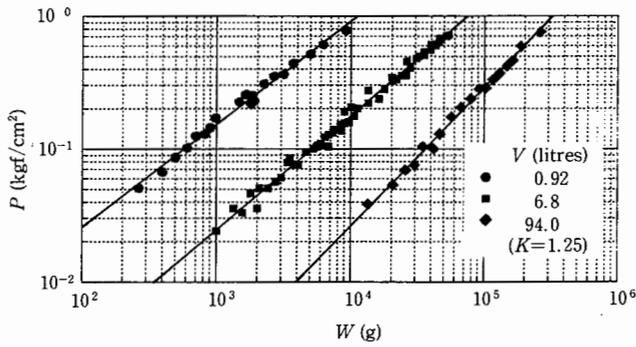


Fig. 4 Relation between explosion pressure and the weight of vent cover for different vessels.
ベント・カバー重量と爆発圧力の関係

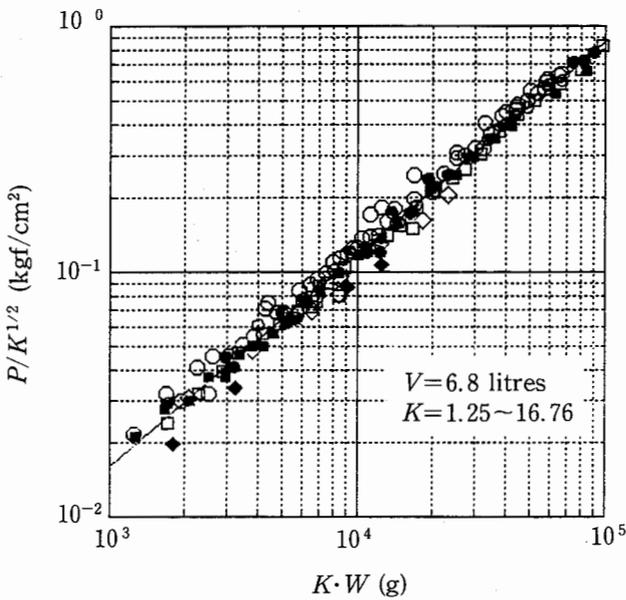


Fig. 5 Explosion pressure as a function of vent ratio (K) and the weight of vent cover (W).
K·W と P/K¹/² の関係

$$P/K^{1/2} = B_3 (K \cdot W)^A \quad (2)$$

Vが一定という条件のもとでは、 B_4 を容器により異なる定数として次式が成立するので、いずれの容器についても $P \cdot V^{2/3} / K^{1/2}$ と $K \cdot W$ の関係は両対数グラフ上で直線に近似される。

$$P \cdot V^{2/3} / K^{1/2} = B_4 (K \cdot W)^A \quad (3)$$

ここで、 $V^{2/3}$ は容器の大きさの影響を示す因子であるが、この因子を導入したのは、カバーの単位面積当りの重量と容器内の爆発圧力が釣り合うという条件が

圧力の放散に何らかの役割を果すという仮説に基づいている。すなわち、内径と高さの等しい円筒容器においては、 $P=W/S$ という関係は次式

$$P \cdot V^{2/3} = q \cdot K \cdot W \quad (\text{ただし、} q \text{ は定数})$$

を導き、この式の右辺は、べき数を除けば式(2)の右辺と同じ形を与えることに着目した。

式(3)の定数を各容器について最小二乗近似法により求めた結果は、定数 B_4 は容器の大きくなる順に 0.05785, 0.01527及び0.002782であり、べき数 A は同様に 0.736, 0.860及び1.032であった。

Fig.6 は、三種類の容器について、 $K=1.25 \sim 16.76$ に対する結果を示したものである。両対数グラフ上のデータ群はひとつの直線にかなり近いとみなせることから、容器の大きさの影響を示す因子として $V^{2/3}$ を用い、 P, V, K, W の関係を式(3)で表わすことに基本的な誤まりはないと考えるが、式(3)のべき数 A が容器によって異なることから、大きさの異なる容器に対する結果を簡単なひとつの実験式で示すことには無理があるように思える。

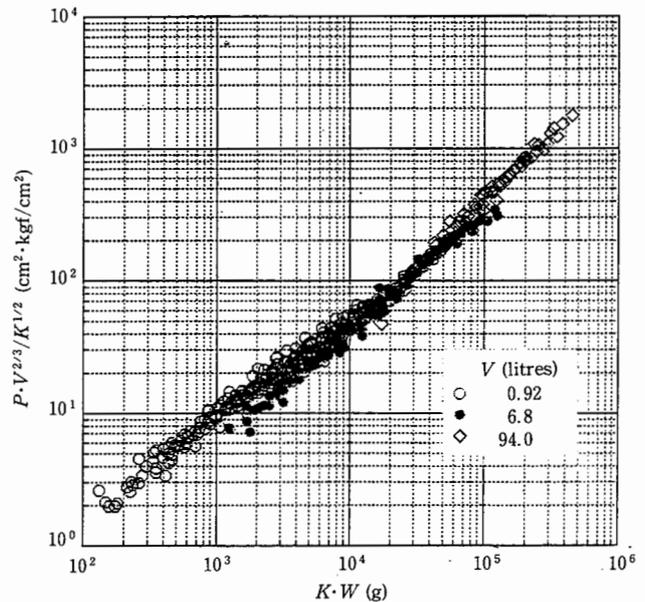


Fig. 6 Explosion pressure as a function of vent ratio (K), the weight of vent cover (W) and the volume of vessel (V).
K·W と $P \cdot V^{2/3} / K^{1/2}$ の関係

Fig. 7には、横軸を $V^{1/3}$ (cm) として容器の大きさと式(3)の定数の関係を示したが、実験の範囲内では

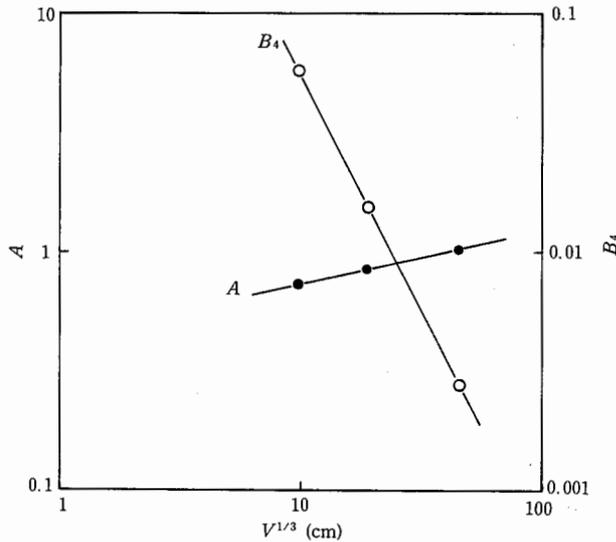


Fig. 7 Constants A and B_4 in equation (3) as a function of the vessel volume (V).
各容器に対する実験式(3)における定数 A および B_4

これらの関係は非常によい規則性を示した。

3.2 容器の大きさと放散口の設計因子

前節において導いた実験式は次のように書くことができる。ここで、式(4)、(5)及び(6)は、それぞれ0.92、6.8及び94lの容器に対する実験式である。

$$P_1 = 0.05785 (K \cdot W)^{0.736} \cdot K^{1/2} / V^{2/3} \quad (4)$$

$$P_2 = 0.01527 (K \cdot W)^{0.86} \cdot K^{1/2} / V^{2/3} \quad (5)$$

$$P_3 = 0.002782 (K \cdot W)^{1.032} \cdot K^{1/2} / V^{2/3} \quad (6)$$

定義により $K = (4V/\pi)^{2/3} / d^2$ 、また $S = \pi d^2 / 4$ であるから、上式中の $K \cdot W$ は $K \cdot W = (\pi/4)(4V/\pi)^{2/3} \cdot (W/S)$ となる。そこでこれらの式の比をとると、圧力比は W/S によって変化するが K には無関係であることが示される。たとえば式(4)と(5)の比をとれば次の関係が得られる。

$$P_1/P_2 = C (W/S)^{-0.124} \quad (\text{ただし, } C \text{ は定数})$$

この関係は、ある値の W/S に対して $P_1/P_2 = \text{一定}$ となり、対数グラフ上では任意の V に対する P_1 と P_2 の距離(間隔)は K が変化しても変わらない。Fig. 8は、このことを利用して、式(5)及び(6)による圧力値が式(4)による計算値とどの程度差があるかを、種々の W/S について示したものである。図では、

P_1 を基準にして比較してあり、 P_1 は K によって異なるので、 P_1 と P_2 あるいは P_3 との数値的な差は P_1 により異なるが、 W/S が小さいほど P_1 と P_2 の差あるいは P_1 と P_3 の差は広がることがわかる。ちなみに、 $W/S = 14.9 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ では式(4)と(6)による圧力の値は等しくなる。

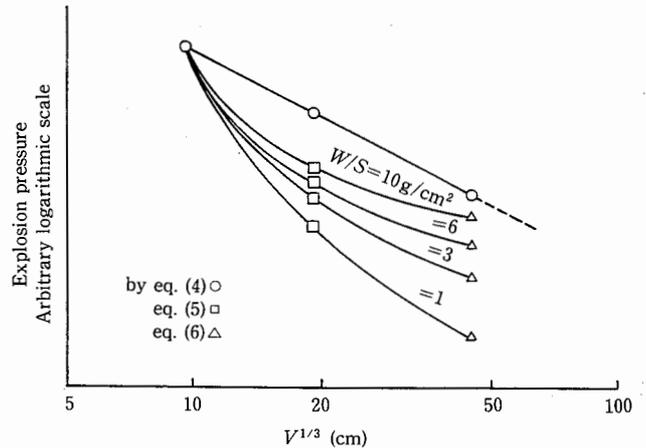


Fig. 8 Comparison of explosion pressures in three vessels calculated for different weights of vent cover per unit area.
 W/S が異なる場合の、三種類の実験式による爆発圧力の比較

これらの結果は、小さい容器を用いた実験での圧力がそれより大きい容器中で圧力に等しいとみなして大きい装置の放散口を設計する場合には、 W/S を小さくするほど安全度が高くなることを意味する。

次に、 $K \cdot W$ に着目して、同様に容器の大きさと圧力の大小関係について考察する。Fig. 9は三種の $K \cdot W$ について式(5)及び(6)から求めた圧力を式(4)による計算値と比較したものであり、横軸にはFig. 8と同様に容器の代表寸法をとってある。 $K \cdot W$ が小さいほど、式(4)による圧力は式(5)あるいは(6)による計算値よりも大きいことは図からもわかるが、 $K \cdot W$ がある限界を超えればこの圧力の大小関係は逆転する。たとえば式(4)と(6)の比をとれば、

$$P_1/P_3 = (28367 / (K \cdot W))^{0.296}$$

となり、 $K \cdot W$ が約28300 (g)以下では式(4)による圧力 P_1 のほうが高いが、 $K \cdot W$ がこの値を超えれば $P_1 < P_3$ となる。

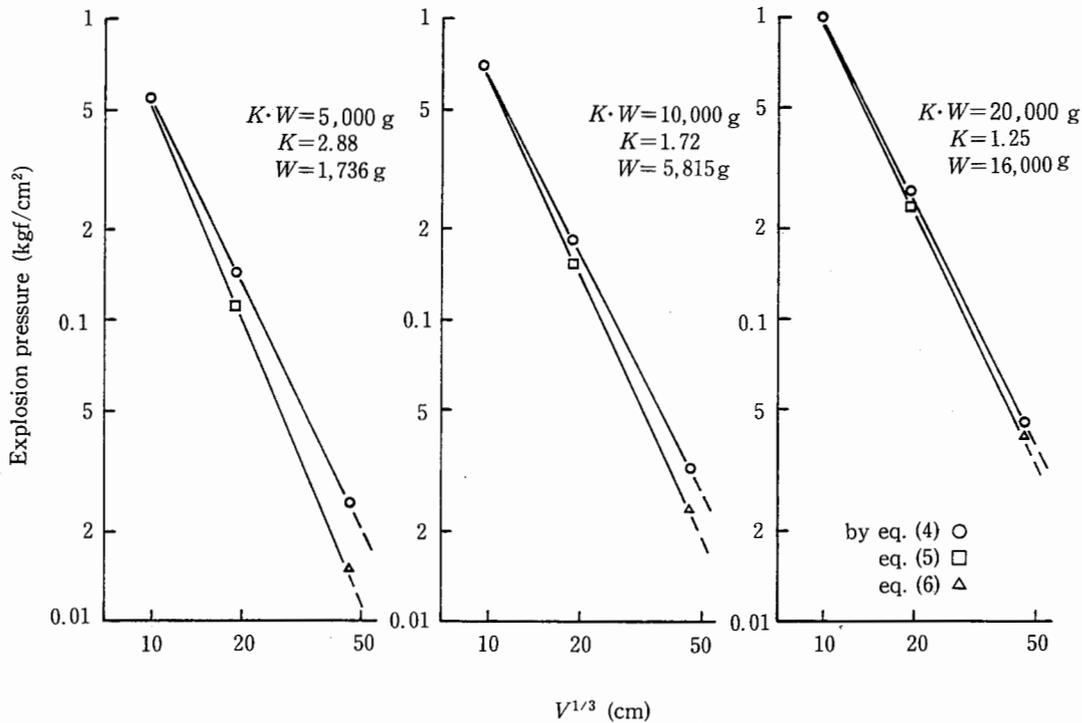


Fig. 9 Comparison of explosion pressures in three vessels calculated for different $K \cdot W$.

$K \cdot W$ が異なる場合の、三種類の実験式による爆発圧力の比較

すなわち、式(3)の定数 B_4 が容器の大きくなるにつれて減じ、べき数 A が逆に増加する場合には (Fig. 7 参照)、小さい容器について得られた実験式による圧力のほうが、大きい容器中で生ずる圧力よりも高くなる限界の $K \cdot W$ が存在する。従って、この限界値以下の $K \cdot W$ については、小さい容器中での圧力をそれより大きい容器中で発生する圧力とみなして放散口を設計することが許される。ただし、この手法により求めた圧力値は、 $K \cdot W$ が限界値よりも小さくなるにつれて、実際に生ずるとみられる圧力よりも高くなる (発生圧力を過大に評価することになる) が、逆に見れば放散口の設計上は安全側の結果をもたらすことになる。なお、 K と W の両者を一定とした場合には、この手法を適用して発生圧力を予測しようとする容器が大きくなるにつれてカバーの単位面積当り重量 W/S を減ずる必要があること、及び、 $K \cdot W$ が等しければ K が異なっても W/S が等しくなることは容易に導かれる。

3.3 限界の $K \cdot W$ に及ぼす容器の大きさの影響

前節に述べたように、内容積 V_x の容器と、これと相似形の内容積 V_y の容器中で生ずる圧力をそれぞれ P_x , P_y としたとき (ただし、 $V_x < V_y$ とする)、 $P_x > P_y$ を満足する限界の $K \cdot W$ を知ることができれば、小さい容器を用いた実験で得られる P_x をもとに大きい容器中の圧力 P_y を評価することができる。本節では、 $K \cdot W$ の限界値が V_x あるいは V_y によってどのように変化するかを考察する。ただし、実験で得られたデータだけでは論じにくいので、ここでは Fig. 7 の直線関係が内容積 1000l の容器にまで外挿できるものと仮定して述べる。この仮定には明確な根拠はないので、本節の結果は、本報で実験したよりも大きい容器における圧力放散の挙動を正しく予測するものではないが、 $K \cdot W$ の限界値が容器の大きさによってどのように変化するかを理解するには有用であると考えられる。

仮定により、 $V=0.92, 6.8, 94$ 及び $1000l$ に対して、式(3)の定数 A 及び B_4 は次式で与えられるとする。

$$A = aV^m, \quad B_4 = b/V^n$$

$$(a=0.449, b=5.06, m=0.0729, n=0.656)$$

内容積 V_1 及び V_2 の容器に対する実験式から求まる圧力をそれぞれ P_1, P_2 とすれば、

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{b/V_1^n}{b/V_2^n} \right) \cdot \frac{(K \cdot W)^{aV_1^m}}{(K \cdot W)^{aV_2^m}}$$

故に、 $P_1=P_2$ となるときの $K \cdot W$ (限界の $K \cdot W$) は、 $R=V_2/V_1$ (ただし、 $R > 1$) として次式で与えられる。

$$K \cdot W = R^{(n/(aV_1^m(R^m-1)))} \quad (7)$$

すなわち、限界の $K \cdot W$ は二つの容器の内容積の比 R の関数である。Fig. 10は $V_1=0.92, 6.8$ 及び $94l$ の場合について R と限界の $K \cdot W$ の関係を示したものである。図中の各プロットに対応する R は $1000l$ を含めた四種類の容器相互の内容積の比であるが、たとえば図中の \blacktriangle は、 $V_1=94l$ の容器中の圧力と $V_2=1000l$ の容器中の圧力が等しくなるのは ($R = V_2/V_1 = 10.64$)、 $K \cdot W$ が約2900のときであることを意味する。

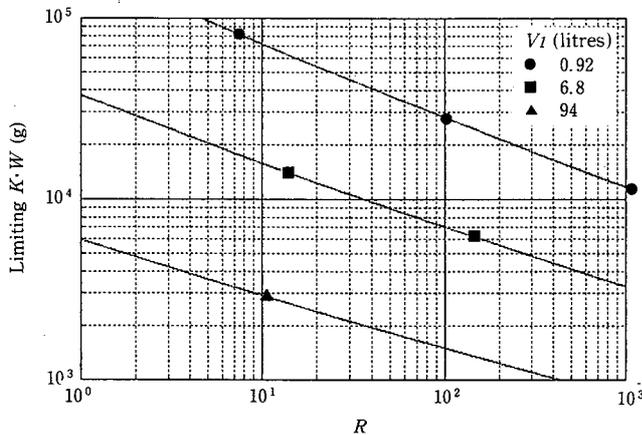


Fig. 10 Effect of volume ratio (R) on limiting $K \cdot W$, which gives a same explosion pressure in a vessel V_1 as that in a vessel of volume $V_1 \cdot R$.
 $K \cdot W$ の限界値に及ぼす内容積比(R)の影響

図の三曲線はいずれも僅かに下方に凸の曲線であり、また、試算によればこれらの曲線は R が増すにつ

れて相互に接近する。従って、これらの曲線を平行移動により重ね合わせることはできないが、図からわかるように、ある一定範囲を限ったときにはこれらの曲線は互いに平行であるとみなすことができる。ここでは、 $V_1 = 6.8$ 及び $94l$ に対する曲線を $V_1 = 0.92l$ (実験に用いたうちで最も小さい容器) に対する曲線に重ね合わせる。また、 V_1 が $6.8l$ の場合には R が約10~150、 V_1 が $94l$ の場合には R が約10の場合を対象とするが、これらの R の範囲によって結果は幾らか異なる。

$V_1 = 0.92, 6.8$ 及び $94l$ に対する $K \cdot W$ をそれぞれ $(K \cdot W)_1, (K \cdot W)_2$ 及び $(K \cdot W)_3$ として、 $R=13.8$ ($=94/6.8$) 及び $R = 147$ ($=1000/6.8$) については $(K \cdot W)_1$ と $(K \cdot W)_2$ が、また、 $R=10.6$ ($=1000/94$) の場合には $(K \cdot W)_1$ と $(K \cdot W)_3$ が、それぞれ最も近い値となるように最小二乗近似させれば、平行移動のために乗すべき係数 f は次式で与えられる。

$$f = (V_1/920)^{0.69}$$

ここに、 $920 \text{ (cm}^3\text{)}$ は実験に用いた最小の容器の内容積であり、 $V_1=920$ のときには $f=1$ である。Fig. 11は次式で与えられる $K \cdot W$ と R の関係を示したものである。

$$K \cdot W = (V_1/920)^{0.69} \cdot R^{(n/aV_1^m(R^m-1))} \quad (8)$$

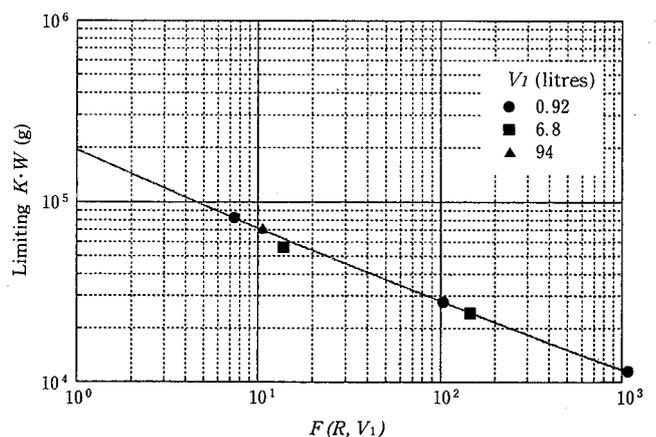


Fig. 11 Limiting $K \cdot W$ as a function of volume ratio (R) and reference volume (V_1)
内容積比(R)と基準内容積(V_1)の関数としての $K \cdot W$ の限界値

図の関係は、任意の内容積 V_1 の容器を用いた実験

により得られた式(3)の形の実験式を用いて、内容積が $R \times V_1$ の容器中での発生圧力を予測した場合に、後者の容器中の圧力が前者の容器中の圧力を超えない限界の $K \cdot W$ を与える。式(8)は実験結果を外挿した数値を一部に用いて導いたものであり、実用上の指標としては妥当性に欠ける面があるが、限界の $K \cdot W$ を V_1 及び R の関数として示すことができるであろうという予測は放散口の設計への応用という観点から重要である。なお、 R が増せば限界の $K \cdot W$ が減ずるという結果は、放散時の圧力を等しくするには R の増すにつれてカバーの単位面積当り重量 W/S を減ずる必要があることを意味するが、これは前節に述べたことから明らかであろう。

3.4 離脱式放散口の特性

破裂膜式放散口の場合には、カバー(ペント・カバー)の破断圧力が放散口の特性を代表する因子であり、破断後に生ずる開口が十分に大きいと仮定することにより、開口比や容器の大きさの影響を評価することができた¹⁾。

しかし、離脱式放散口の場合には、こうした支配的因子を単純な形で示すことはできなかった。その理由を実験式誘導の過程に求めれば、式(3)のべき数 A が実験容器の大きさとともに変化したことにある。容器の大きさによるべき数 A の変化は、定性的には次のように説明できる。

放散口の効果は、低い圧力において大きな開口を生ずることにある。破裂膜式放散口では、開口を生じたあとの燃焼の継続に伴う燃焼ガスの生成速度よりも、開口からの放出速度のほうが大きければ(すなわち、開口が十分に大きければ)発生圧力はカバーの破断圧力とみなすことができる。離脱式放散口において類似の状態が見られるのは、カバーが完全に離脱して開口が全面露出した場合であるが、これは一般にはカバーの重量 W が小さい場合に相当する。 W が大きくなれば、極端な場合には爆発によりカバーは垂直上方に僅かに浮上したのち、元の位置に落下する。従って、燃焼生成ガスの放出に寄与する開口の大きさは、カバーが完全に離脱する場合に比して実質的に著しく減少する。

容器内の圧力がカバーの単位面積当り重量 W/S を超えたときにカバーが完全に離脱すると単純に仮定すれば、 W/S が等しければ発生圧力は容器の大きさに無関係である。 W/S が十分小さければこの仮定の成

立する可能性がある。本報の実験では、発生圧力が計測に適しないほど小さいため W/S が数 g/cm^2 におけるデータは少ないが、各容器についての実験式(3.2節)をもとに外挿して6.8lと94lの容器中の圧力を K が等しい場合について比較すると、 W/S が50(g/cm^2)程度以下では6.8lの容器中の圧力のほうが高いが、 K が4以下ではその差は $0.02\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下であり、実際上ほぼ等しいとみてよい。 W/S が50を超えれば94l容器中の圧力のほうが高くなり、両者の差は W/S の増すにつれて広がる。これは、 K が等しい場合には、 W/S が等しければカバーの重量は容器の大きいほど重くなることによるとみられる。すなわち、同じ圧力を受けても、重量が重いほどカバーは移動しにくく、かつ、移動する距離も少ないので、圧力の放散は妨げられる。この結果、容器の大きいほうが、 W/S の増大による圧力の増加の度合が大となり、これは式(3)のべき数 A の増加を意味する。

なお、容器中の発生圧力はカバーの W/S と釣り合う圧力よりも相当に高かった。たとえば6.8及び94lの容器において W/S が50(g/cm^2)以下の場合には、 K が1.5では圧力(kgf/cm^2)は W/S (kg/cm^2 換算値)の約4倍、 K が4.2では同様に約8倍であった。

3.5 Simmondsらの実験式との比較

Simmondsらの実験式を本報の記号を用いて示せば式(9)となり、本報の実験式は式(10)のように書くことができる。実験ガス、点火位置、開口の形状などが異なるため、両式による圧力値を直接に比較することはできないが、両式の比較により圧力放散に影響する因子について考察する。(本節の式中の定数記号は前節までとは無関係とする。)

$$P \cdot V^{1/3} = a \cdot K (W/S) + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (9)$$

$$P \cdot V^{2/3} / K^{1/2} = B (S \cdot K)^A \cdot (W/S)^A \quad (A, B \text{ は定数}) \quad (10)$$

式(10)において、 $A=1$ とすれば次式が導かれ、圧力 P は K と W/S によって定まり、容器の大きさには関係しないことになる。事実、 A が1に極めて近い値となった94lの容器においては、いずれの K に対しても P と W/S は一次の比例関係を示し、この場合には $P \cdot V^{1/3}$ と $K (W/S)$ の関係もまた同様である。

$$P = B_1 \cdot K^{1/2} (W/S) \quad (B_1 \text{ は定数}) \quad (11)$$

一方、式(9)において V 一定とすれば次式を得る。

$$P = a_1 \cdot K (W/S) + b_1 \quad (a_1, b_1 \text{ は定数}) \quad (12)$$

すなわち、あるひとつの容器については、 P が W/S に比例するという点で式(9)と(10)は一致する。式(12)の定数 b_1 は、 $W/S=0$ であっても P が有意な値をとることを意味するが、これは点火位置の影響によるものであろう*3。 b_1 は $W/S=0$ のときの圧力であるから本来あまり大きな値にはならず、式(9)からわかるように、この値が P に及ぼす影響は V の増大につれて減ずる。いま仮に $b_1=0$ とすれば、 K が 1 に近い場合には式(11)と(12)は同じ形を与えることになる。

Simmonds らの実験容器は立方体である。容器形状の影響を無視すれば、本報の実験に用いたよりも格段に大きい容器*4において容器の大きさにかかわらず式(12)が成立するという結果は、式(10)のべき数 A について次のことを示唆する。すなわち、べき数 A は容器内容積の増すにつれて増加するが、増加の度合は次第に減少して 1 に接近し、ある内容積以上では $A=1$ となることが予測される。(Fig. 7 は、内容積の増すほど A の増加率が減ずることを示している。) この予測が正しければ本報で述べた手法の適用は容易となり、内容積が 100l 程度の容器を用いた実験をもとに、数 m^3 の内容積の装置内で発生する圧力をかなりの確に推算できる可能性がある。しかし、点火位置の異なることの影響を含めて、 K 及び W/S が大きい場合にも $A=1$ とみなせるか否かは今後の検討課題である。

開口比及びカバーの重量が放散口の効果にどのよう

*3 点火位置が開口に近ければ、開口が予め開放されていても発生圧力がゼロにはならないことが知られている。本報の実験では点火位置を開口から遠いほうの端としたため、 $W/S=0$ のときの発生圧力は実際上ゼロに等しいという結果になっている。

*4 Simmonds らの実験容器の内容積は約 0.2, 1.5, 2.8 及び $14m^3$ である。ただし、最後の容器による実験値は 1 点だけである。

*5 単位面積当りのカバー重量が広範囲にわたっても、 V の影響を評価できることが必要である。

に影響するかはほぼ明確となったが、容器の大きさの影響を示す因子については $V^{1/3}$ と $V^{2/3}$ のいずれが妥当であるかは結論し難く*5、更に実験等を通じての究明が必要である。Simmonds らの結果を比較の対象とする際には、式(9)の定数 a, b がそれぞれ異なる次元をもつ値であることに特に留意する必要がある。

4. 結 言

爆圧放散口は、これを設けようとする装置を用いた爆発実験をもとに設計することが望ましいが、一般にはそうした実験は困難である。本報では離脱式放散口を対象として、小さな容器を用いたガス爆発実験をもとにして実用上の装置の放散口を設計する方法を検討した。

実験には内径と高さの等しい三種類の円筒容器を用い、容器内容積、開口比及びベント・カバー重量と発生圧力の関係を示す実験式を得た。いずれの容器においても、実用上十分な範囲の開口比及びカバー重量について発生圧力を予測する式の形は同じであるが、容器の大きさの影響を単純な形で示すことはできなかった。これはカバーの慣性に起因するものと思われるが、特にカバー重量が大きい場合には、開口比と単位面積当りカバー重量が等しくても容器が大きければ発生圧力が相対的に高くなるという結果をもたらした。容器が大きの場合の発生圧力を予測するために、容器の内容積比を導入して、大きい容器中での圧力が小さい容器中の圧力を超えない限界条件について考察した。本報で述べた手法は、内容積が $1m^3$ 程度までの装置に対する放散口の設計には利用できると考える。

(平成元年 3 月 31 日 受理)

参 考 文 献

- 1) 林 年宏, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-85, p.11 (1986)
- 2) Simmonds, W. A. and Cubbage, P. A., 難波ら訳, “化学プロセスの災害防止 1”, p.149, 共立出版 (1967)