

爆圧放散孔に関する研究 (第3報)

—破裂膜式放散孔の設計方法について*—

林 年 宏**

Experimental Study on the Methods of Explosion Venting (3rd Report)
—Practical Method of Design for Rupture-Diaphragm Type Explosion Reliefs—

by Toshihiro HAYASHI**

Explosion venting, or explosion relief, is one of the useful methods of explosion protection, which is applied to various industrial equipments of light structure such as dryers and dust collectors in which flammable gases, vapours or dusts are handled. Even though the effectiveness of its use is generally understood, the present status is far from the practical use in this country by lack of any comprehensive design guide.

Although there have been proposed several experimental formulae for the prediction of the vented explosion pressure, or the maximum explosion pressure generated in a vented vessel, most workers have used their own test vessels or equipments with arbitrary dimensions and shapes, so that none of them could have discussed, with theoretical background, the effect of the size of a vessel on the vented explosion pressure.

This report describes a reasonable method of calculating a vented explosion pressure in a larger vessel based on explosion tests in a rather small vessel. Experiments were carried, with 4.5% propane-air mixture, in four cylindrical vessels with different internal volume, each of them having a circular vent of various diameter covered by a polyvinylchloride diaphragm (PVC sheet). From the results of those experiments with smaller three vessels, a simple relation was derived between a vented explosion pressure (P), a vent ratio (d/D) and a internal volume of a test vessel (V). Such a relation was applied to predict vented explosion pressures in the largest vessel used to find a good agreement between observed pressures and calculated ones. Theoretical explanations were also satisfactory.

Four vessels used in explosion tests are shown in Fig.1 and Table 1. Diameters of flange opening (d) were arbitrarily selected in order to obtain almost the same diametral vent ratio (d/D) for each vessel; additional vent ratios were tested with No.1 vessel. In every test, a PVC sheet punched with a central hole of 1.5 mm diameter, and an open flange under test were fastened previously with bolts to the flange of the vessel, and then the blank flange was bolted to complete the test vessel. After evacuating the whole volume, the premixed test gas was fed to a pressure slightly higher than that of atmosphere. The blank flange was removed and the hole in PVC sheet was closed with a piece of cellophane tape. Then the mixture was ignited at the far end of the vessel from the vent, and the pressure development was recorded. In the present work, the ignition site was so selected that only one pressure peak was observed as shown in Fig.2. The fact that the pressure-time record showed no apparent pressure deflection just before attaining the maximum implied the equality of vented explosion pressure to bursting pressure of PVC sheet.

The relation between d/D and P is shown in Fig.3, from which is seen the linear proportionality, on logarithmic graph, between them for any one of three vessels. Then the following equations can be written:

$$P = B / (d/D)^A = B (D/d)^A \quad (1)$$

$$= BK^{A/2} \quad (2)$$

where A and B are positive constants, the latter being the pressure for $d/D=1$, and K is the ratio often

* この研究の一部は、第14回安全工学シンポジウム (1984, 東京) において発表した。

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division

used in the study of explosion venting and is defined by $K = (D/d)^2$.

If the gradients of lines drawn in Fig.3 are assumed to be equal, the constant A in above equations is a fixed value irrespective of vessel size. Thus, providing that the constant B is related to vessel size, the vented explosion pressure can be formulated as a function of the vent ratio and the vessel size. Fig.4 shows a logarithmic plot of the dependency of P on vessel volume for some vent ratios. The following relation is derived, where E and F are positive constants:

$$P = E / V^F \quad (3)$$

The numerical value of F calculated by least squares method for four lines lies between 0.331 and 0.335. This result means undoubtedly the dependency of P on the reciprocal of the cubic root of V . In other words, with vessels of $L/D=1$, the ratio of the vented pressure for one vessel to that for another vessel is equal to a reciprocal ratio of L (or D) of these two vessels for any d/D tested.

These discussions lead to Fig.5, in which the relation between d/D and converted pressure P' is plotted on a logarithmic graph. P' is calculated by the following equation:

$$P' = P \cdot (V_n/V_1)^{1/3} \quad (4)$$

where P is a vented explosion pressure observed in a vessel of internal volume V_n , n being the number of vessel shown in Table 1, and V_1 is the internal volume of No. 1 vessel, which is used arbitrarily as a reference volume in this study.

As shown in Fig.5, equation (4) explains well the effect of vessel size on vented explosion pressure. Reminding that P and d/D have been related by equation (1) and that V_n/V_1 is a constant value for a given vessel, the following relation is derived:

$$P' = P \cdot (V_n/V_1)^{1/3} = b \cdot (d/D)^a \quad (5)$$

where a and b are positive constants inherent to both explosive gas mixture and vent cover material. Numerical values of a and b for this study are 1.22 and 0.98, respectively. From the viewpoint of practical use, V_n is a internal volume of an equipment to be vented, and V_1 is a volume of test vessel in which explosion tests are carried to obtain above two constants. Equation (5) is then applied to No.4 vessel, internal volume of which being 100 times larger than that of No.1 vessel, and the result is shown in Fig.6. The difference between calculated pressures and observed ones can be explained by the expansion of vent cover itself before bursting when subjected to an explosion pressure.

The validity of experimental formula (5) is also proved theoretically on generally accepted assumptions that an explosion pressure develops as a function of t^3 (t being the time after ignition) and that the time required to attain a maximum pressure in a closed vessel is directly proportional to a cubic root of the vessel volume.

In the latter half of this report, discussions are made on the prediction of vented explosion pressure by means of pressurization test other than explosion test. As experimentally shown, the vented explosion pressure can be assumed equal to the bursting pressure of a vent cover with the same vent ratio. Therefore, if a pressure other than by an explosion can be applied with a same rate of pressure rise as that of an explosion, the vent cover is expected to show the same behaviour as if it was subjected to the explosion. Apparatus to determine bursting pressures of PVC sheet is schematically shown in Fig.7. No.1 test vessel with decreased length was used to obtain the relation between bursting pressure (P'') and average rate of pressure rise (Δ) by nitrogen gas injection, the result being shown in Fig.8. This relation is then extrapolated to the average rate of pressure rise observed for an explosion generated in No.1 vessel with full length and closed entirely.

Fig.9 shows a comparison and good agreement between bursting pressures subjected to dynamic pressure of pressure rise rate of 200 kgf/cm²/s and vented explosion pressures observed in explosion test using No.1 vessel. Such a result means that the constants in equation (5) can be obtained through pressurization test mentioned above. This method of predicting vented explosion pressure can be also applied to full-scale equipments directly, even though are necessary some experimental techniques and informations concerning the characteristics of explosions to be occurred in those equipments.

Keywords : Gaseous explosion, Pressure, Safety device, Venting.

1. 緒 言

乾燥機や集じん機を、可燃性蒸気を生ずる物品の乾燥や可燃性粉体の処理に用いる例は多いが、一般には内部での爆発の発生を考慮した構造ではないため、爆発が生じたときには機体の破損や内容物の飛散により災害へ発展するおそれがあり、そうした事例も少なくない。

爆圧放散孔（以下、放散孔という）は、内部で爆発を生ずるおそれのある軽構造の装置を破壊から防護するための圧力放出用安全装置であって¹⁾、その原理はよく知られており、法規上その設置が要求されている装置もあるが（たとえば労働安全衛生規則第294条の乾燥設備）、構造や設計方法に関する利用しやすい指標がないため、我国ではほとんど実用に供されていないのが現状である。

放散孔は、装置の一部を爆発圧力自体によって開口を生ずる構造としておき、爆発による膨張ガスをこの開口から大気中に放出することにより装置に加わる圧力を軽減するものである。従って、低い圧力で大きな開口を生ずるものが望ましいが、実用上は装置の強度や運転条件を考慮に入れた最適な放散孔の設計が要求される。放散孔を設けた装置内での爆発によって装置に加わる圧力の最大到達値（以下、発生圧力という）は、装置の形状・寸法、運転時に開口を覆っておくベントカバーの材質・寸法、開口の大きさ、可燃物の種類など多くの因子に影響される。放散孔は実際の装置を用いての実験をもとに設計することが望ましく、筆者らもこうした方法を試みたが²⁾、一般には爆発実験の実施は困難であり、この意味では大きな装置の放散孔を設計する手法の確立が特に重要である。

放散孔に関しては多くの研究があり³⁾⁴⁾、近年は実験規模が大型化する傾向にある。しかし、放散孔の構造や応用形態が多岐にわたることもあって、研究者はそれぞれ独自の試験装置と手法を用いて解析を試みており、発生圧力を予測する実験式の変数も様々である。このため現象の本質が必ずしも明確にされておらず、得られた結果を他の条件下における放散孔の設計に利用することは容易ではない。

本報では、薄膜や薄板からなるベントカバーが圧力によって破断して開口を生ずる方式（破裂膜式放散孔という）を対象とし、単純化したガス爆発のモデルを用いて装置の大きさと発生圧力の関係について実験した。得られた結果から、小さい容器中での実験値をもとに大きな装置中での発生圧力を予測する実験式を導き、その適用

性を検討した。実験は円筒容器中のプロパン-空気混合ガスの爆発について行い、ベントカバーとしてはポリ塩化ビニルシート（以下、ビニルシートという）を用いた。

本報ではまた、ガス爆発実験の代わりに、加圧した気体（窒素など）を用いて放散孔の動的特性を等価的に評価する方法についても検討した。

2. 実験方法

本節ではガス爆発の実験方法を述べ、加圧気体による実験については4節において述べる。

実験に用いた4種類の円筒容器の構造を Fig. 1 に、各部寸法と内容積を Table 1 に示す。（以下、各容器は表の容器番号で呼ぶ。）容器の長さ L と内径 D はほぼ等しくしたが、形状の効果をみるために容器2では長さ L を内径 D の倍とした。開口フランジの開口径 d は、各容器について d/D が等しくなるように5種類を任意に選んだが、容器1においてはこれ以外の d についても実験した。実験は、容器1～3についてまず行い、得られた結果から容器4における発生圧力を予測し、実測値との一致をしらべた。

いずれの容器の場合も、中心に直径1.5mmの小孔を

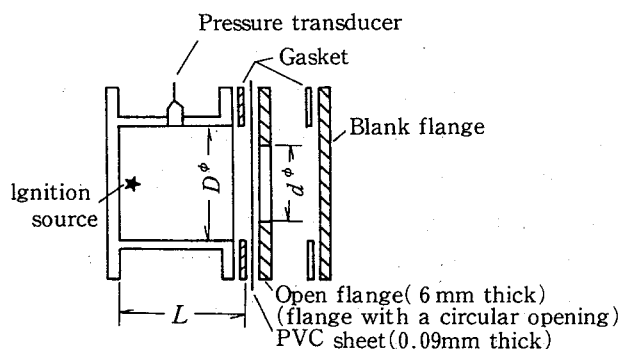


Fig. 1 Schematic showing of test vessel
実験容器

Table 1 Dimensions of test vessels (Refer to Fig. 1)
実験容器の諸元 (Fig. 1 参照)

Number of vessel	$D\phi$ (cm)	L/D	$d\phi$ (cm)	Internal volume V (cm ³)
1	10.5	1.01	2.0~9.4	923
2	10.5	1.93	2.0~9.4	1768
3	20.5	1.01	3.9~18.3	6796
4	49.2	1.00	9.4~44.0	93994

あけたビニルシートと開口フランジを容器のフランジに予め固定し、さらに盲フランジをボルト締めしたのち容器内を真空とし、4.5%プロパン—空気の予混合ガスを内圧が大気圧よりやや高目となるまで送入する。実験ガスは pure grade のプロパンと大気条件の空気を混合したもので、プロパン濃度は干渉計式ガス検定器により測定した。なお、この実験ガスはプロパン—空気混合ガスのうちでは密閉容器中で最も高い爆発圧力を生ずる組成のものである。

盲フランジを取外し、ビニルシートの小孔をセロファンテープの小片でふさいだのち、ニクロム線ヒータ（印加電圧 3 V）により混合ガスに点火し、容器内の圧力の時間的変化を測定した。圧力の測定には歪ゲージ式圧力変換器、動歪増幅器、電磁オシログラフからなる系（応答周波数 500 Hz）を用い、圧力較正は静圧によった。なお、実験期間中の大気圧と温度の変動の影響は無視した。

本実験では、次の理由により点火位置を開口から遠い方の容器端とした。放散孔の実験では、条件によっては圧力波形に二つ（あるいはそれ以上の）ピークが観察され、最初のピークはベントカバーの破断に対応し、その後の圧力変化は開口を生じたあとの爆発の継続に起因するとされている⁹⁾。すなわち、ベントカバーは容器内の混合ガスの一部が燃焼した時点で破断するので、開口を生じたあとも爆発は継続し、膨張ガスの生成速度が開口からの放出速度を上回れば、ベントカバーの破断により一旦低下した圧力は再び上昇する。開口後の圧力上昇は安全上無視できないが、開口の大きさと位置を適切に選択すれば実用上は解決できる問題である。ここでは、ベントカバーの破断に伴って生ずるピーク圧力が最も重要であることに注目し、開口後の大気流入による容器内の現象の複雑化を排除することを試みた。点火位置を反開口端とすれば、ベントカバーの破断後は火炎伝播につれて火炎前方の未燃混合ガスは開口から排出される。開口が小さければベントカバーの破断圧力は高いので、それまでの間に混合ガスの大部分は燃焼を終えており、一方、開口が大きければ未燃混合ガスの排出効果が大きく、いずれにせよ開口後の圧力上昇は抑えられ、第 2 の圧力ピークが生じにくいことが期待される。このようなモデルでは、ベントカバーの破断圧力と発生圧力が等しいとみなすことができる。実験によれば、容器 4 において開口径を 16.8 cm とした場合の一部の圧力波形に二つの圧力ピークが見られたほかは、圧力ピークは常に一つであった。圧力ピークが二つ生じた場合には第 1 ピークの圧力

値をとった。実験は同一条件下で 5 回ずつ行い、そのうちの最大値を発生圧力としたが、算術平均値を用いたとしても論議の展開は全く同じである。

3. 実験結果及び考察

3.1 開口比と発生圧力の関係

代表的な圧力波形を Fig. 2 に示す。点火後の圧力は徐々に昇圧速度を増しながら上昇するが、この過程は密

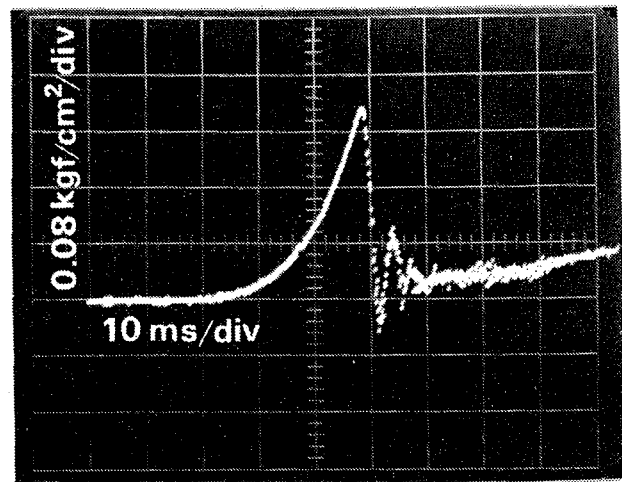


Fig. 2 Typical pressure-time record for vented explosion
代表的な爆発圧力波形

閉容器中の爆発と同じである。ピーク圧力に達したあとは急激に低下し、振幅の小さな振動圧力を記録したのち大気圧に落ち着く。ここで注目すべきことは、ピーク圧力に達する直前において昇圧速度に著しい変化がないということである。開口後の爆発の昇圧速度は密閉容器中の場合より大きくはないので、開口後に圧力が上昇し続けたとしても昇圧速度には何らかの変化を生ずるはずであって、Fig. 2 のような圧力波形が記録される場合には、開口後の圧力上昇は無視できる、換言すれば、容器内の発生圧力はベントカバーの破断圧力に等しいとみてよい。Fig. 2 のピーク圧力を発生圧力 P (圧力は kgf/cm^2 , ゲージ圧。以下同じ) と称する。

Fig. 3 は、三種類の容器について開口比 d/D と発生

* 1 開口比として $K=(D/d)^2$ で表わされるファクター（断面積比）を用いるべきだとする研究者もあるが、発生圧力に及ぼす影響という観点からすれば、いずれの開口比を用いても本質的には同じ結果が導かれることが後に明らかになる。

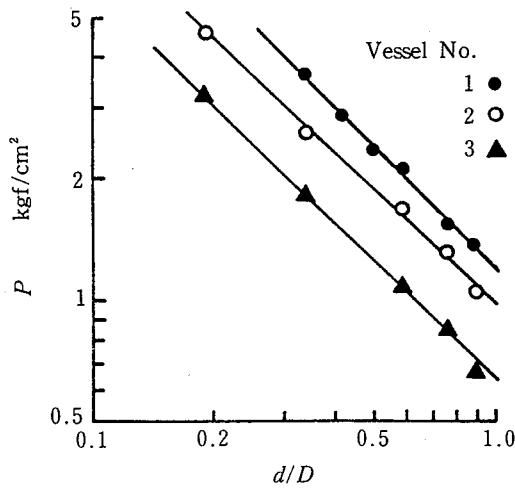


Fig. 3 Relation between vent ratio (d/D) and vented explosion pressure (P)
開口比と発生圧力の関係

圧力の関係を示したものである*1。両対数プロットでは、いずれの容器についても P と d/D は直線関係にあり、かつ、これらの直線は互いに平行であるとみてよい。図の直線は最小二乗法による近似直線である（以下、近似式はいずれも最小二乗法により求めた）。 $d/D=0$ のときの P は密閉容器中の最大爆発圧力であり、実験に用いた容器では $7.0\sim 7.3\text{kgf/cm}^2$ となる⁹⁾ことを考慮すると、実験したよりも小さい開口比においては、発生圧力は図の直線からずれるはずであるが、本報では実用上の開口比の最小値は 0.2 程度であるとして論議をすすめる。

P と d/D の直線関係から次式が導かれる。ただし、 A 及び B は正の定数であり、また、 $K = (D/d)^2$ である。

$$P = B / (d/D)^A = B(D/d)^A \quad (1)$$

$$= BK^{A/2} \quad (2)$$

Fig. 3 の近似直線の勾配がすべて等しいとすれば、上式中の定数 A は容器によらない一定値である。従って、 B を容器の形状・寸法の関数として表わすことができれば、上式を用いて、ある容器を用いた実験の結果から他の容器中の発生圧力を、任意の開口比について計算により予測することができる。なお、式(1)からわかるように、定数 B は各容器において $d/D=1$ としたときの発生圧力であるから、定数 A が既知であれば $d/D=1$ のときの実験値をもとにして、その容器中の発生圧力を任意の開口比について予測することができる。

動的圧力を受けたときのベントカバーの破断圧力を計算により求めることは容易ではなく、本報では実測により求める立場をとった。また、破裂膜式放散孔では特別

な工夫を加えない限りベントカバーの破断状態を一定にすることはできず、生じた開口の大きさ（開口面積の実効値）を算定することもできない。本報では開口径 d を開口の大きさの尺度としたが、発生圧力がベントカバーの破断圧力に等しいとすればベントカバーの破断によりどのような開口を生ずるかは問題ではない。Fig. 3 は、ベントカバーの破断圧力が開口比と容器の大きさに依存することを意味しており、破断圧力が受圧面積と昇圧速度によって決まるのではないかという予測と一致する。

3.2 容器の大きさの影響

Fig. 3 は、 d/D が等しければ容器が大きいほど P が減ずることを示している。Fig. 4 は容器の内容積 V と P の関係を種々の d/D についてプロットしたものである。図中の各点は Fig. 3 の直線の近似式からの計算値であるが、実験に際しての d/D は（各容器について厳密には等しくないものの）図中に記した値に極めて近い値であるから、各プロットは実測値に等しいとみなして差

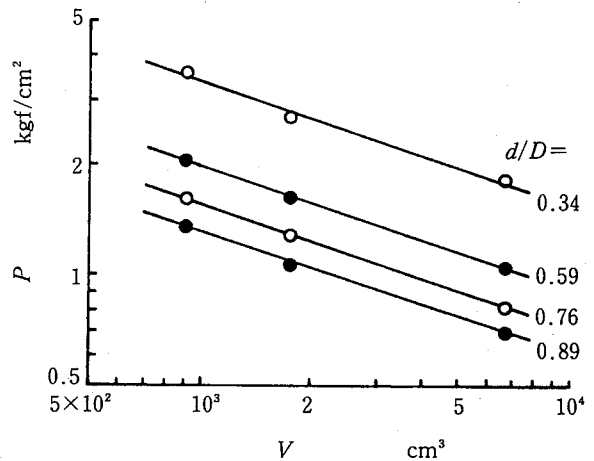


Fig. 4 Effect of vessel volume (V) on vented explosion pressure
容器内容積が発生圧力に及ぼす影響

支えない。Fig. 4 は、両対数グラフ上で P と V が直線関係にあり、直線の勾配は d/D に無関係であることを示している。 E 及び F を正の定数とすれば、 P と V の関係は次式で近似される。

$$P = E / V^F \quad (3)$$

図の 4 直線の近似式中の F の値は $0.331\sim 0.335$ となり、 P が $V^{1/3}$ に反比例することを示唆している。この結果は Fig. 3 から予測される。Fig. 3 の実測値を容器 1 と容器 3 について比較すると、4 種類の d/D に対する

P の比の算術平均は1.98であり、一方、容器の長さの比は1/1.95である。いずれの容器も $L/D \approx 1$ であるから、 P は容器内容積の1/3乗に反比例することがわかる。

3.3 実験式

前節で導いた P と V の関係は、Fig. 3 の各直線が平行移動により1本の直線に近似でき、平行移動に際して乗すべき係数は各容器の内容積の1/3乗の比であることを示している。すなわち、次式で与えられる P' (これを発生圧力の変換値あるいは変換圧力と呼ぶ) は、開口比が等しければいずれの容器についてもほぼ等しい値を与えるはずである。

$$P' = P(V_n/V_1)^{1/3} \tag{4}$$

上式中の V_n は各容器の内容積 (n は容器番号)、 V_1 は容器1の内容積である。小さい容器での実験結果から大きい容器中での発生圧力を予測するという実用上の観点から言えば、上式中の P' は、内容積 V_1 の小容器において開口比をある値としたときに実測される発生圧力であり、 P は、内容積 V_n の容器に同じ開口比の放散孔を設けたときに発生すると予測される圧力である*2。

式(4)中の P はもともと式(1)により d/D の関数であり、 V_n/V_1 は定数であるから、 P' と d/D は両対数グラフ上で直線関係にあるはずである。三種類の容器にお

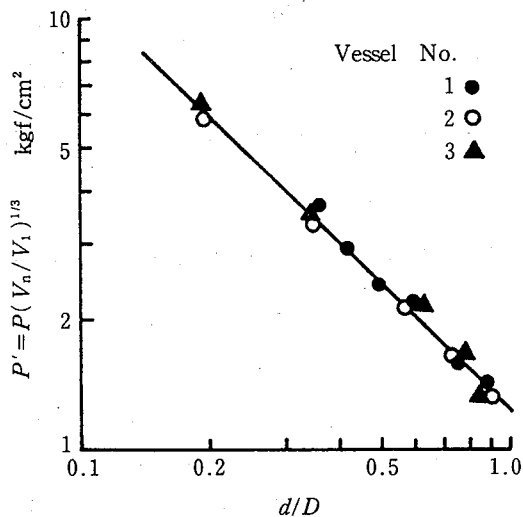


Fig. 5 Relation between vent ratio and converted value (P') of vented explosion pressure
発生圧力の変換値と開口比の関係

* 2 実用上の理由から、最も小さい容器の内容積を比較の基準としたが、式(4)の V_1 が V_2 又は V_3 であっても論議の展開は同じである。

る発生圧力の全測定値を式(4)により変換した P' と d/D の関係を Fig. 5 に示すが、容器内容積の効果を式(4)により適確に予測できることがわかる。図の近似直線の式は次のようになる。

$$P' = P(V_n/V_1)^{1/3} = 1.22/(d/D)^{0.98} \tag{5}$$

また、それぞれの容器ごとの P' と d/D の関係は式(6)~(8)により近似される。

$$P' = P(V_n/V_1)^{1/3} = 1.21/(d/D)^{1.02} \text{ (容器1の場合)} \tag{6}$$

$$= 1.23/(d/D)^{0.94} \text{ (容器2の場合)} \tag{7}$$

$$= 1.21/(d/D)^{1.00} \text{ (容器3の場合)} \tag{8}$$

式(5)の d/D のべき数は0.98であるが、これを1.0と置きかえても計算値には大きな差はない。べき数を1.0とすると、容器1~3についての実験結果は次のような単純な実験式で示され、変数相互の関係が理解しやすくなる。

$$P' = P(V_n/V_1)^{1/3} = 1.22/(d/D) = 1.22D/d = 1.22\sqrt{K} \tag{9}$$

3.4 実験式の検討

前節によれば、内容積 V_0 の容器を用いた実験をもとに内容積 V_n の容器中での発生圧力 P を予測する実験式は、次式で示されることが導かれた。

$$P(V_n/V_0)^{1/3} = b/(d/D)^a \tag{10}$$

ここで、定数 a 及び b は内容積 V_0 の容器を用いた実験から求まる正の定数であり、上式において $V_n = V_0$ したときの式は、内容積 V_0 の容器における開口比 d/D と発生圧力の関係にほかならない。また、式(1)及び(2)からわかるように、式(10)の右辺の開口比を直径比、断面積比のいずれで示したとしても、容器内容積と発生圧力の関係を示す左辺の型は変わらない。式(10)で示される実験式の妥当性及び適用範囲について以下に述べる。

Fig. 6 は、最も大きい容器4を用いた実験における発生圧力を、最も小さい容器1を基準とした実験式(6)による計算値と比較したものであり、図中の破線は容器4における実測値に対する近似直線である。Fig. 5 からわかるように、容器1~3に関しては、いずれの容器における実験をもとにしても、他の容器中での発生圧力の予測値と実測値はよく一致する。容器4 (内容積は容器1の約100倍) の場合には、Fig. 6 にみるように予測値と実測値の間にはいくらか差が生じている。図中の近似式から予測値と実測値の比を求めると $1.18(d/D)^{0.05}$ となり、開口比の増すにつれて僅かずつではあるが両者の差は広がる傾向にある。開口比が大きいほど実測値が低くなる理由は次のように考えられる。

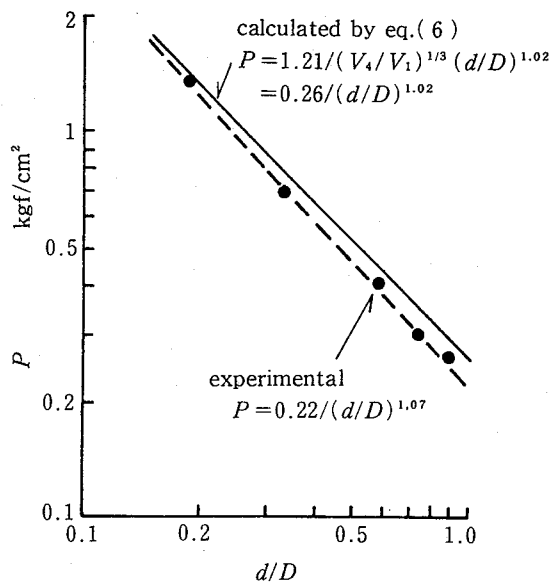


Fig. 6 Relation between vent ratio and vented explosion pressure in No.4 vessel (comparison of experimental values with calculated ones)
 容器4における発生圧力の予測値と実測値の比較

式(10)は開口比が等しければ内容積の増すほど発生圧力が減ずることを意味するが、実験に用いたビニルシートのように延性に富むベントカバーは、点火後の圧力上昇によりふくらんだのちに破断する。破断前のこうしたふくらみは容器内容積の実質的な増加と、厚さの減少に伴うベントカバーの強度の低下をもたらす。この傾向は開口径が大きいほど著しいので、大きい容器において開口比が増すほど発生圧力が予測値より低くなるという事実は、先に導いた実験式の妥当性を否定するものではない。延性に富むベントカバーを用いた放散孔に対して本報の手法を適用する場合には、容器が大きくなるほど発生圧力を高目に予測するという安全側の結果を与えるが、逆に設計上の観点からみれば、より過大な開口を要求することにもなる。次に内容積の効果について述べる。

北川ら⁷⁾は破裂板の破裂圧力が昇圧時間の関数であると述べており、Thompsonら⁸⁾はガラス窓の破損圧力が昇圧速度に比例することを示している。後述するように、本報でベントカバーとして用いたビニルシートについても、破断圧力と昇圧速度の間には比例関係がある (Fig. 8 参照)。先に述べたように、本報の実験ではベントカバーの破断圧力が発生圧力であるとみてよいので、発生圧力は昇圧速度に比例するとみなすことができる。一方、Zabetakis⁹⁾は、球状の密閉容器の中心で混合ガスに点火

したときには、点火からピーク圧力に達するまでの時間 (昇圧時間) は容器内容積 V の $1/3$ 乗に比例すると述べており、ピーク圧力は V によらない一定値とみなせるので、平均昇圧速度は $V^{1/3}$ に反比例することになる。本実験に用いた容器 1 及び容器 3 を密閉した場合について実測したところ、平均昇圧速度は 198 及び 101 (kgf/cm²/s) となり、一方、 $V^{1/3}$ は 9.7 及び 18.9 (cm) である。従って、円筒容器の端部で点火した場合についても $V^{1/3}$ と平均昇圧速度の反比例関係は保持されるとみてよい。

(Zabetakisの述べた関係は、爆発に際しての火炎の伝播速度が見掛け上は伝播距離によらない一定値であることを仮定していると思われる。従って、 $V^{1/3}$ の代わりに球の半径を用いても同じことが言え、本実験のように $L/D = 1$ の場合には容器の内径又は長さを用いても同じである。本報では $V^{1/3}$ の比が重要な因子であるが、 $L/D = 1$ の容器ではその内径又は長さの比を用いても同じ結論が導かれる。)

ベントカバーの変形を無視すれば、ベントカバーの破断までの圧力変化は密閉容器の場合と同じである。点火後ある圧力に達するまでの間の平均昇圧速度が密閉容器中でピーク圧力に達するまでの間の平均昇圧速度に比例し、かつ、その比例定数が容器の大きさに無関係であるとすれば*³、ベントカバー破断までの平均昇圧速度は $V^{1/3}$ に反比例することになり、発生圧力が $V^{1/3}$ に反比例するという実験結果及びそこから導かれる実験式が妥当なものであることがわかる。容器 2 ($L/D \approx 2$) の場合には、容器が一方に長いために圧力上昇の様相が異なり、上述のような説明のための根拠が充分ではないので、ここでは、実験結果にもとづいて、こうした形状の容器であっても容器の大きさの代表値として内容積を用いることを示唆するにとどめる。

Simmondsら⁵⁾は、圧力により容器の一部が離脱して開口を生ずる方式の放散孔について実験し、発生圧力が容器内容積の $1/3$ 乗の関数であるという実験式を示した。彼らはこの実験式について何ら理論的説明を加えていないが、内容積が $0.2 \sim 14 \text{m}^3$ のほぼ立方体の容器について実験式はよく適合している。離脱式ベントカバーの挙動は破裂膜式の場合と異なると考えられるが、発生圧力が容器内容積の $1/3$ 乗に依存するという同じ結論が得られたことは、放散孔の問題を解明する有力な手掛りとなるで

* 3 この仮定が妥当なものであることは、圧力が点火後の時間の 3 乗に比例し容器内容積に反比例して上昇し、かつ、ピーク圧力に達するまでの時間が容器内容積の $1/3$ 乗に比例するという従来の知見 (参考文献(9)を見よ) から容易に導くことができる。

あろう。

次に実験式中の定数について述べる。式(10)の定数 a 及び b は、いずれも混合ガスの組成とベントカバーの材質・厚さ・取付け方法などによって決まる値であると思われる。定数 b は、式(10)において $V_n = V_0$ とおけばわかるように、ある容器において開口比を1としたときの発生圧力という意味をもつ。定数 a は本実験ではほぼ1に等しかったが、混合ガスやベントカバーによってこの定数がどう変化するかは最大の関心事であり、これを予測することができれば放散孔の設計は容易になるであろう。

本報の手法がどの程度の大きさの装置にまで適用できるかは実用上重要な点であるが、爆発に際しての火炎伝播の様相が装置の大きさによってどう変化するかについては不明な点が多く、具体的な適用限界を示すことは困難である。しかし、先に昇圧速度に関して述べた仮定が成立することが必要であるという前提に立てば、点火後の圧力がベントカバーの破断するまで時間とともに（ほぼ時間の3乗に比例して）増加し、かつ、途中で急激な圧力変化や振動圧力を生じないことが条件となる。筆者らの実験（未発表）によれば、直径1.6m、長さ2mの円筒容器中での爆発圧力はこの条件を満足したので、この程度の大きさまでの装置であれば本報の手法を適用できると考える。

4. 加圧気体を用いた実験と放散孔の設計への応用

既に述べたように、放散孔の作動に伴う発生圧力は容器内の（爆発圧力の）昇圧速度に依存するとみられるが、そうだとすれば昇圧の原因が爆発でなくても、昇圧速度さえ等しければ同じ挙動を示すはずである。ここでは、ベントカバーとして用いたビニルシートについて、窒素ガスにより加圧したときの昇圧速度と破断圧力の関係を実験により求め、この結果を利用して、爆発圧を受けたときの破断圧力（すなわち発生圧力）を予測する方法を検討する。

実験装置をFig. 7に示す。実験容器は前出の容器1の長さを減じたものである。開口フランジとビニルシートの寸法や取付け方法は爆発実験の場合と同じであり、これらを容器に取付けたあと、急速に弁を開いてホルダー内の窒素ガスを容器内に流入させ、ビニルシートの破断までの圧力変化を測定する。所望の昇圧速度を得るために容器の長さやホルダー内の窒素ガスの初期充填圧力を変えたが、装置の制約上、開口比の大きい場合には高い昇圧速度が得られなかった。弁はいずれも呼び径3/8イ

ンチの手動ボール弁と電磁弁を用いた。弁の種類により圧力波形は異なるが、平均昇圧速度で比較した場合には両者の間に差異は認めなかったため、測定値の取扱いに際しては弁の相異の影響は無視した。

Fig. 8には、ビニルシートの破断圧力 P'' と破断までの平均昇圧速度 Δ の関係を、三種類の開口比について示した。開口比が大きい場合の測定値の数は充分ではないが、 Δ と P'' の間には直線関係がみられる。従って、爆発時の昇圧速度がわかれば、これに相応する破断圧力を外挿により求めることができる。

爆発圧力によりベントカバーが破断する場合の平均昇圧速度は、破断圧力と破断までの時間により定義されるが、この破断圧力こそが本報において求めようとする値であるから、これをもとにした昇圧速度は未知数である。ここでは、これに代わるものとして密閉容器中の平均昇圧速度を用いるが、その理由は二つある。まず第一に、密閉容器中の平均昇圧速度は（厳密にはではないにせよ）予測が可能だからである⁶⁾。第二の理由は、密閉容器中の

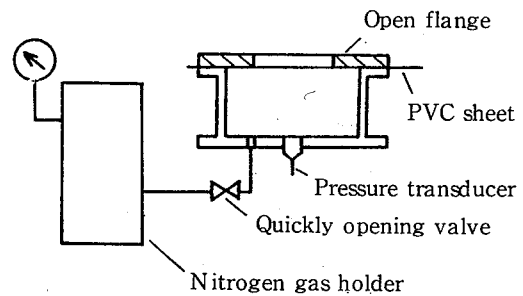


Fig. 7 Apparatus for measurement of bursting pressure of PVC sheet (dimensions are same as No.1 vessel except for decreased length)

ビニルシートの破断圧力を測定する実験装置

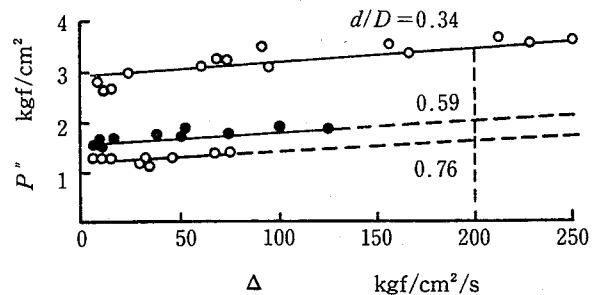


Fig. 8 Effect of average rate of pressure rise (Δ) on bursting pressure (P'') of PVC sheet, for No.1 vessel
ビニルシートの破断圧力に及ぼす平均昇圧速度の影響

平均昇圧速度は (Fig. 2 の圧力波形からもわかるように) ベントカバーの破断までの平均昇圧速度よりも常に大きく、従って、密閉容器中の昇圧速度に相応する破断圧力は実際にベントカバーが爆発圧力により破断する圧力よりも大きい値 (実用上は安全側の予測値) を与えるからである。

容器 1 を密閉して爆発させたときの平均昇圧速度は約 $200 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ であったので、Fig. 8 の近似直線の式に $\Delta=200$ を代入してそれぞれの d/D に対する P''_{200} を算出した。Fig. 9 は P'' の計算値と爆発実験において実測した発生圧力 P とを、それぞれの d/D について比較したものである。両者は極めてよい一致を示しており、これは、容器 1 における発生圧力と開口比の関係が爆発実験によらなくても求められること、換言すれば、単なる加圧実験によって式(1)の関係式 (定数を含めて) が求まることを意味する。容器 1 についてこの関係が得られれば、これをもとに大きい容器中の発生圧力を予測できること

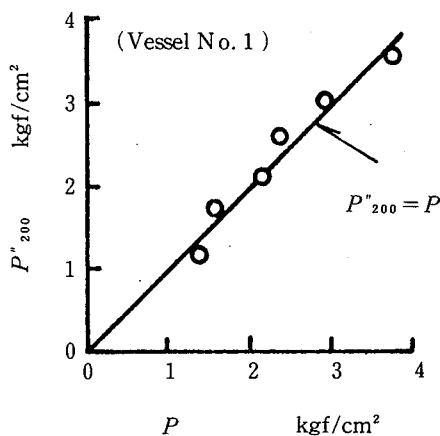


Fig. 9 Relation between vented explosion pressure and bursting pressure of PVC sheet at the rate of pressure rise of $200 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ (P''_{200})
 ガス爆発と等価な昇圧速度におけるビニルシートの破断圧力とガス爆発における発生圧力の関係

は既に述べたとおりである。

なお、Fig. 8 からわかるように、ビニルシートの場合には Δ による P'' の変化は小さいので、爆発の際の平均昇圧速度をどのような値としても Fig. 9 の結果はそれほど異なる。しかし、ベントカバーの強度が増せば Fig. 8 の直線の勾配も増すと思われるので、この場合には爆発の平均昇圧速度はある程度厳密に評価しなければならない。

加圧気体を用いるこの方法は、小さい容器に対してだ

けでなく、実用上の装置に対して直接に応用することも可能である。実験手法には工夫が必要であるが、原理的には、実験容器の一面を放散孔を設ける装置面と同じ構造・寸法にしさえすれば、実験容器の長さ (奥行き) は十分に小さくてもよい。また、所望の昇圧速度 (その装置内で生ずる爆発の平均昇圧速度) を得るためには、複数のガスホルダーを用いて複数の弁から同時に多量の窒素ガス (あるいは空気) を送入することが必要となるであろう。

5. 結 言

放散孔は、これを設けようとする装置を用いた爆発実験に基づいて設計することが望ましいが、一般にはこうした実験は困難である。本報では、小さな容器を用いたガス爆発実験に基づいて実用上の装置の放散孔を設計する方法を検討した。実験は単純な形状の円筒容器について行ない、容器内容積、開口比、発生圧力の三者の関係を示す実験式を求め、その適用性について検討した結果、実用上有効であり、かつ、従来の爆発理論にも適合するとの結論を得た。本報の手法は、これをそのまま適用できる条件は限定されているものの、放散孔の挙動の本質の解明にも有益な示唆を与えるものと考えられる。

本報ではまた、容器内の昇圧速度と発生圧力の比例関係を利用するという発想のもとに、ベントカバーを窒素ガスによる単なる加圧によって破断させる実験を行ない、ガス爆発に相当する昇圧速度における破断圧力が爆発実験における発生圧力とよく一致することを導いた。この方法は、放散孔を設けようとする装置内で生ずる爆発の特性値さえ予測することができれば、大きな装置に対して直接に適用することが可能であり、加圧実験の装置には多少の工夫が必要ではあるが、放散孔の設計手段としては実用性が高いと考えられる。

(昭和60年5月7日 受理)

参考文献

- 1) 安全工学協会編, "爆発", p.290, 海文堂出版(1983)
- 2) 田口 昇ほか, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-19-1 (1970) 及びRIIS-RR-19-2 (1970)
- 3) 松田東栄・内藤道夫, 産業安全研究所安全資料RIIS-SD-75-1 (1975)
- 4) Marshall, M. R., 6th Symposium on Chemical Process Hazards, p.21, Instn. Chem. Engrns.

(1977)

- 5) Simmonds, W. A. and Cubbage, P. A., *Symposium on Chemical Process Hazards*, p.69, Instn. Chem. Engrs, (1960) 難波桂芳他訳, “化学プロセスの災害防止1”, p. 149, 共立出版 (1967)
- 6) 林 年宏, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-85-1 (1985)
- 7) 北川徹三・中村喬樹, 安全工学, 7, (3), 217(1968)
- 8) Thompson, N. J. and Cousins, E. W., *J. Amer. Ceramic Soc.*, 32, (10), 313 (1949)
- 9) Zabetakis, M. G., *Bulletin 627, Bureau of Mines* (1965)
橋口幸雄訳, 高圧ガス, 5, (6), 104 (1968)