

AUG. 1969

RIIS-RR-18-3

UDC 614.838 : 531.787 : 621.31-213

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-18-3

耐圧容器の内容積と爆発圧力の関係について
— 防爆電気機器の試験方法に関する一考察 —

鶴見平三郎・林 年 宏

労働省産業安全研究所

MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RIIS-RR-12-3 正誤表

P.	行	正	誤
1	上 9	sphe-	sphe
	上 12	hydrogen and air	hydrogen
	下 7	explosion pressures	explosions
3	Fig.1	Interferometer	Interferometer
4	Fig.3	spherical	Spherical
5	左13	水素-空気	水素空気
	Fig.4	hydrogen in air	Hydrogen in Air
6	Table 3	容積が30cm ³ および60cm ³ の容器	容積が30ccm ³ および60ccm ³ の容器
	右17	鉄の棒	鉄棒
7	右11	Wheel ^(b)	Wheel ^(b)
8	右13	小寸11.2	小寸11.2
	右10	せねは13(13.1)	せねは13(13.1)
	右13	10 Kg/cm ²	10 Kg/cm ²
9	Fig.9	The relation between	The relation between
	右24	おの始めは11.3 ⁽¹⁵⁾	おの始めは11.3

耐圧容器の内容積と爆発圧力の関係について

—防爆電気機器の試験方法に関する一考察—

鶴見平三郎* 林 年宏*

The Effect of Vessel Size on Gas Phase Explosion Pressures in Closed Vessels

—A Contribution for the Testing Methods of Flameproof Electrical Equipments—

Heizabro TURUMI* and Toshihiro HAYASHI*

The effect of vessel size on explosion pressures has been investigated in closed cylindrical and spherical vessels. The vessels were relatively small and their capacities ranged from 30cm³ to 2litres. L/D , the ratio of vessel length to inner diameter for cylindrical vessels, were all 1.77.

The flammable mixture used was that of hydrogen (30 and 50 vol. % hydrogen in air), because it had been intended to apply the results of investigation for the practical testing of Flameproof Electrical Equipments. Therefore, the initial pressures of the gas mixture were confined below 2kg/cm² (gauge).

The authors, first of all, derived from rather simple theoretical considerations that the explosion pressures had to be approximately proportional to the initial pressures for a certain vessel. The equation may be written as follows ;

$$P_e = A(P_i + 1)$$

where : P_e = explosion pressure (a difference from a initial pressure P_i).

A = constant, which is equal to the explosion pressure when $P_i = 0$ (atmospheric) for a given vessel.

And if the constant A is shown as a function of vessel size (V), the explosion pressure may be calculated for a given size (V) and initial pressure (P_i) from the following relation, other factors affecting the explosion pressure being constant or negligible.

$$P_e = \{g(V)\} (P_i + 1)$$

Experiments were carried out to ascertain whether practical explosion pressures measured showed good agreement with the above equation or not.

The results showed that the agreement was fairly good, and the experimental explosions were shown by the following equations ;

$$P_e = (4.75 + 0.55 \log V) (P_i + 1) \text{ for 30 vol. \% mixtures, or}$$

$$P_e = (2.9 + 0.7 \log V) (P_i + 1) \text{ for 50 vol. \% mixtures.}$$

The results may be applied not only for the testing of Flameproof Electrical Equipments, but also to other fields concerning to gas phase explosions in relatively small size of vessels.

* 防爆課. Explosion Prevention Section

1. 緒言

危険場所で使用される防爆構造の電気機器のうち耐圧防爆構造の機器は、その内容積に応じて強度上の要求がなされている。すなわち電気機器の外被をなす容器は、内容積が 2cm^3 以下では製作上必要な強度があればよく、 2cm^3 をこえ 100cm^3 以下では少なくとも 8kg/cm^2 、 100cm^3 をこえるものについては少なくとも 10kg/cm^2 の爆発圧力にそれぞれ耐えなければならぬ¹⁾。これらの値は主として VDE 0171/57 に準拠しているが、この耐圧強度については、ふつうの可燃性ガス蒸気と空気との混合物の爆発によって生ずる圧力に耐えるべき容器の強度に幾らかの安全率を乗じたものと解される。しかし内容積については、 100cm^3 を境として大きく二分したことは大胆な試みであると考えられる。

一方、これらの機器に対して爆発強度試験を行なう場合、特に内容積が比較的小さい機器については次のような問題が生ずる。ひとつは、圧力検出素子（圧力変換器）、点火素子（点火プラグ）および混合ガス送排用のニップルをとりつけるためのスペースが充分でない供試品がかなりあることである。したがって、これらの機器に対しては、ふつうの爆発試験の方法では強度の確認を行なうことができない。また、上述の素子を取りつけるスペースがある場合でも、必要な爆発圧力を生ぜしめるためには機器内の可燃性混合ガスの初圧* をかなり高くせねばならないケースが多いことも問題のひとつである。例えば、50 Vol. % の水素-空気混合ガスを用いて初圧が $1.5\sim 2\text{kg/cm}^2$ という例は珍らしくない。

これらはいずれも試験を行なうに際して、能率および安全の面から好ましくないことであって、何らかの形での解決策が要求される場所であるが、例えば、ある内容積の機器についてその中で生じうる爆発圧力を推定できれば圧力検出素子を取りつけることなしに試験ができるであろうし、また、実際にその機器内で生じうる最大爆発圧力とそれに対する強度上の安全率のとり方を検討することにより、試験方法を合理化できる余地はかなりある。このためには、一定の条件下における爆発圧力を定量的に求める方法を把握しておかなければならない。

* 最初の圧縮度、一般にゲージ圧で表現する。

このような観点に立って、本報では内容積の比較的小さい (30cm^3 から 2l) 容器について、その内容積と爆発圧力の関係を検討した。この結果についての考え方は、防爆電気機器の問題をはなれても応用できることは勿論である。

実験を行なうにあたり、筆者らはまず爆発圧力について簡単な理論的考察を試み、ある条件における爆発圧力が近似的に初圧に比例すること、および、初圧が大気圧に等しい時の爆発圧力がわかれば初圧と爆発圧力の関係を示す直線の式がえられることを明らかにした。これにより、初圧と内容積から爆発圧力を推定する式を求め、種々の条件で測定した爆発圧力とのズレを検討することにより、初圧-内容積-爆発圧力の関係を示す実験式を導いたものである。

2. 理論

可燃性ガス・蒸気と支燃性ガスの混合物の爆発により生ずる圧力は、熱力学的な考え方の導入により気体の状態方程式から計算によって求めることが可能であろうが、実際には反応の進み方、容器壁面の影響、実在ガスと理想気体のズレなど定量化が困難な部分が多いので、簡単に算出することはできない。しかしある程度の誤差を認めるならば、実験的に求めた幾つかのデータにもとづき種々の条件下における爆発圧力を推定することは比較的容易であろう。すなわち、爆発圧力 P_e は、ガスの種類 G 、その濃度 C 、初圧 P_i 、内容積 V 、温度 T 、その他容器の形状、点火源、湿度などの因子による関数として次のように示される。

$$P_e = f(G, C, P_i, V, T, \dots) \quad (1)$$

したがって、これら各因子が P_e に与える影響を求めればよいことになる。ここではこのうちの初圧および内容積の効果について考察する。

理想気体の状態方程式を単純化して考えれば、一般に密閉容器内の気体混合物を容積一定のまま断熱的に加熱する場合に、最初の圧力と温度を P_0 および T_0 、加熱後の圧力と温度を P および T とし、加熱前後においてモル数に変化のある時にはそのモル数の変化を μ とすれば次式を得る²⁾。

$$P = P_0 \mu \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

ただし、 P, P_0 は絶対圧力、 T, T_0 は絶対温度である。

これを密閉容器中の爆発現象に適用すれば、仮定により容積は一定であり、容器壁への熱損失を無視すれば、 T は混合ガスの最初のエネルギー状態による定数とみなしうる。すなわち、 P_0 (実験では初圧に相当する)が大なる時には発熱量は大きい、燃焼後のガスを温度 T に高めるに要する熱量もそれに応じて大きいものとする。同様に、反応過程も初圧に関係ないとすれば、 μ も定数である。したがって式(2)は k を定数として次のように表現してよい。

$$P = kP_0 \quad (3)$$

P および P_0 は絶対圧であるが、実験ではゲージ圧を用いるのが便利であるから、ゲージ圧での初圧を P_i 、初圧との差としての爆発圧力を P_e 、絶対圧とゲージ圧の差を 1 kg/cm^2 とすれば、

$$P = P_i + P_e + 1$$

$$P_0 = P_i + 1$$

これらを式(3)に代入して

$$P_e = (k-1)(P_i+1)$$

ここで $k-1=A$ とおけば (A は定数)

$$P_e = A(P_i+1) = AP_i + A \quad (4)$$

式(4)は、 P_e と P_i を直交座標軸にとれば、たて軸を切る値と勾配とが等しい直線を表わす。定数 A は $P_i=0$ の時の P_e の値に等しく、また $P_i=-1$ (絶対真空) の時に $P_e=0$ となることは理論的にも明らかである。ただし、実際には $P_i=-1$ となるまでに $P_e=0$ となるような限界圧力が減圧側に存在するから $P_i < 0$ における式(4)の意味は厳密でない部分がある筈である。

かくて、ある内容積の容器における爆発圧力は初圧に比例し、比例定数は初圧が大気圧に等しい時の爆発圧力によってきまることが近似的に示された。

(爆発圧力のうちに初圧を加える、すなわち大気圧との差をもって爆発圧力とするならば、爆発圧力 P_e' は式(4)の右辺に P_i を加えたものに等しい。故に、 $P_e' = (A+1)P_i + A$ となるが初圧と爆発圧力の本質的關係は同様に成立する。)

次に、内容積の変化が爆発圧力に与える効果について検討する。式(3)または(4)を導くに際し、容器壁への熱移動を無視したが、この仮定に従えば爆発圧力は内容積によらない一定値となるので、実際には器壁の影響を考えなければならない。

いま長さ L と内径 D の比が一定である円筒容器 (一般に形状は関係しないが) を考えれば、その内容積は α を定数として αD^3 、内部表面積 (以下、表面積という) は β を定数として βD^2 で示されるから、その比は γ を定数として γD である。この値は D により増加するから、発熱量を内容積の関数、壁への熱損失を表面積の関数とすれば、内容積の増すにつれて壁の影響は減少し、爆発温度 T が増加する。しかし爆発後のガスの膨張に費される熱量も内容積の関数であるから、内容積と T 、あるいは爆発圧力との関係は単純な形では示されないであろう。従来の報告によれば、内容積によって爆発圧力は増加するが、内容積がある値をこえるとそれ以上爆発圧力が上昇しない限度があるようである。

式(4)は、種々の内容積 V に対して $P_i=0$ の時の $P_e(P_{e0})$ がわかれば、近似的に P_i-V-P_e の関係が求まることを意味するが、 P_{e0} が V によってどう変化するかは簡単に示されないので、まず実験的に $P_{e0}=A=g(V)$ なる関係を求め、これより式(4)によって次の近似式を得ることができる。

$$P_e = \{g(V)\}(P_i+1) \quad (5)$$

式(5)の妥当性を評価するには、任意の P_i と V について爆発圧力を実測し、式とのズレを比較すればよく、この結果もし必要ならば適当な補正を加えることにより、より実際的な実験式が得られるものと考えた。

以下の実験は、式(5)に相当する近似式を得ることと、その式の実際性を検討するために行なったものであって、前述した以外の因子の影響については考察

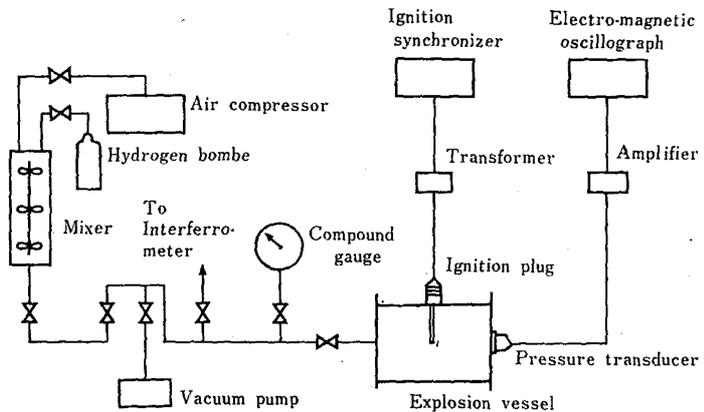


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for the measurement of explosion pressures 実験装置の概要

の項で触れるにとどめた。

3. 実験方法

3-1 実験装置

装置の概略を Fig. 1 に示す。あらかじめ混合したガスを爆発容器内に初定の圧力（初圧）になるまで送入したあと、容器に直結したストップ弁を閉じ、ネオントランス（入力 100V, 出力 15kV, 20mA）を用いて点火した。点火プラグにはノイズをさけるためにサプレッサーを装着したが、減圧側で着火しない時にはとりはずして点火した。

3-2 爆発圧力測定装置

圧力の検出には PHF 3U 型抵抗線歪式圧力変換器（容量 30 kg/cm²）を用い、DPM-AT 型動的歪測定器により増幅し、FR 101 型直記式電磁オシログラフ（ガルバ固有振動数 1000Hz）により記録した。記録紙は無現像方式で、最高直線記録速度は 750m/s である。

圧力較正は P-1 型分銅式標準圧力計により 2kg/cm² ごとに 12 kg/cm² まで静圧較正した。オシログラム上の変位量は 10 kg/cm² につき 50mm である。

初圧設定用のブルドン管連成計（-760mmHg から 2 kg/cm²）もこの方法により、圧力が 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²（ゲージ圧）について較正し、減圧側は連成計の目盛にしたがって使用した。

3-3 実験ガス

可燃性ガスとしては、現在当所において耐圧防爆構造の電気機器の強度試験に使用している水素を選び、市販ボンベ入りのものを分圧方式により大気条件の空気と混合して約30または50 vol. %の水素-空気混合物として実験に供した。30%の混合物は強度試験を独立に行なう場合に用いることが多く、50%のものは、比較的供試品数の多い爆発等級2の機器に対して爆発引火試験を併せて行なう場合に使用するガス濃度である。

毎回の点火の前には、爆発容器内の混合ガスの濃度を S-5 型干渉計（水素 100% 用、有効室長 20mm）によってチェックした。実験全体を通じての濃度は 30 ± 2% および 49 ± 2% である。

なお、実験を行った室温は 21°C ~ 28°C である。

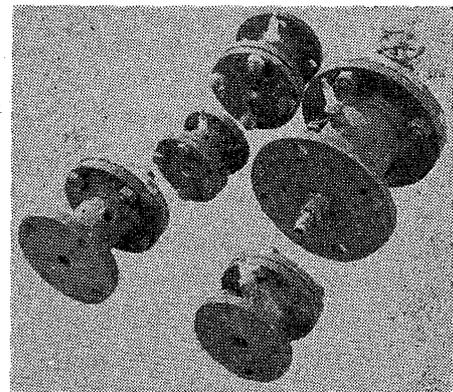


Fig. 2 Outside view of cylindrical explosion vessels
円筒状爆発容器の外観

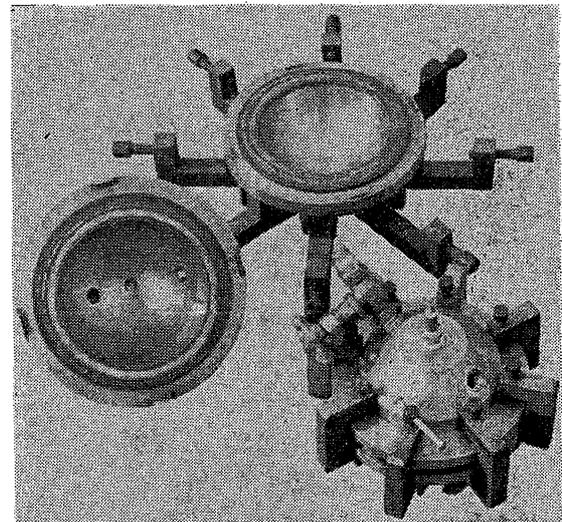


Fig. 3 Outside and inside view of Spherical explosion vessels
球状容器の外観および内部

3-4 爆発容器

容器の外観を Fig. 2 および 3 に示すが、Fig. 2 の 5 個の容器は本報で円筒容器と称するもので、配管用炭素鋼管の一定長さのものの両端にフランジを溶接してある。各々のフランジには、圧力変換器または混合ガス送排用のストップ弁をとりつけるためのネジ加工がされてある。側面の中心には点火プラグをとりつける。

円筒容器の内径、長さおよび内容積を Table 1 に示す。長さとの比は約 1.77 であるが、これは 1¹/₂ インチ管について 100cm³ の内容積を与えるようにした時の長さとの比である。内容積は内径と長さのみによって算出したものであるが、便宜上 30, 60,

Table 1 Size and capacity of cylindrical explosion vessels

円筒状容器の寸法と内容積

Vessel number	Nominal pipe diameter in.	Inner diameter D mm	Design length L mm	Capacity cm ³	L/D
1	1	27.6	48.8	29	ca. 1.77
2	1 ¹ / ₄	35.7	63	62	
3	1 ¹ / ₂	41.6	73.5	99	
4	2	52.9	93.5	203	
5	3	80.7	142.5	722	

100, 200 および 720 cm³ として扱うことにする。

Fig. 3 の 2 個の容器は球状容器であって、内部に半球状の空間を有する二つの部分からなっている。いずれもステンレス鋼製であって、内容積は 1 および 2 l である。

これらの容器内における点火位置は、足長プラグの使用によって、すべてほぼ容器の中心となるようにしたが、720 cm³ の容器ではやや側面（円筒壁側）にずれ、30 cm³ では側面の中心である。

4. 実験結果

4-1 爆発圧力の波形

記録された圧力波形の一例を Fig. 4 に示す。これに見るように、水素空気混合物の昇圧速度は極めて大きく、容器の小さいほどこの立ち上りは急激である。みかけの着火から最大圧力に達するまでの時間は 0.01 sec 前後である。

30 vol. % Hydrogen in Air
Vessel capacity 720 cm³
Initial pressure 0 kg/cm²
Explosion pressure 6.4 kg/cm²

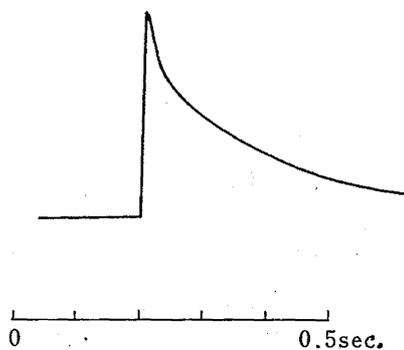


Fig. 4 Typical wave form of explosion pressure
爆発圧力波形の一例

最大圧力に達してからの時間的変化も、容器の小さいほど激しく、30 cm³ の容器では最大圧力の 1/2 程度までは立ち上りと同程度の速度で下降する波形が得られた。

4-2 内容積と爆発圧力の関係 ($P_i=0$)

初圧が大気圧に等しい時の爆発圧力を、水素濃度 C (vol. %) と内容積 V (cm³) について示したのが Table 2 である。表の値はすべて 10 回の測定の実測値である。Fig. 5 は、この結果を V について対数目盛でプロットしたものである。

Table 2 The effect of vessel capacity V (cm³) and hydrogen concentration C (vol. %) on the explosion pressure P_e (kg/cm²) when initial pressure is atmospheric

容器内容積と水素濃度が爆発圧力に与える影響 (初圧=0)

V cm ³	30	60	100	200	720	1000	2000
P_e kg/cm ²							
$C=50\%$	3.77	3.79	4.34	4.47	4.84	5.22	5.28
$C=30\%$	5.59	—	5.90	6.02	6.34	6.74	—

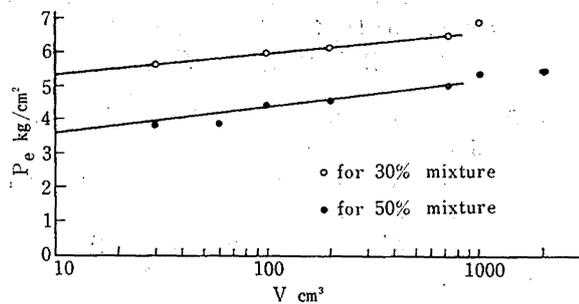


Fig. 5 The relation between vessel capacity V and explosion pressure P_e for atmospheric initial pressure

容器内容積と爆発圧力の関係 (初圧=0)

Fig. 6 および 7 の直線は、Table 2 の値が式 (4) の A に等しいとした時の初圧 P_i と爆発圧力 P_e の関係を示すものである。

Table 2 から明らかなように、濃度が 50% について V が 30 と 60 および 1,000 と 2,000 の時の P_e は殆んど同じであるので、Fig. 6 には V が 60 および 2,000 に相当する直線は省いた。

4-3 近似式と実測値のズレ

Fig. 6 および 7 のプロットは、 P_i が 0 以外の時

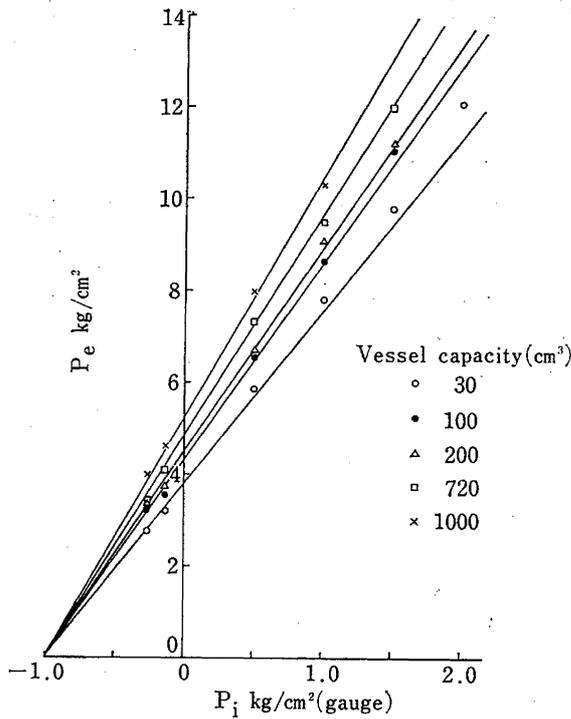


Fig. 6 The relation between initial pressure P_i and explosion pressure P_e with various vessels for 50% hydrogen-air mixture
初圧と爆発圧力の関係 (50%混合物)

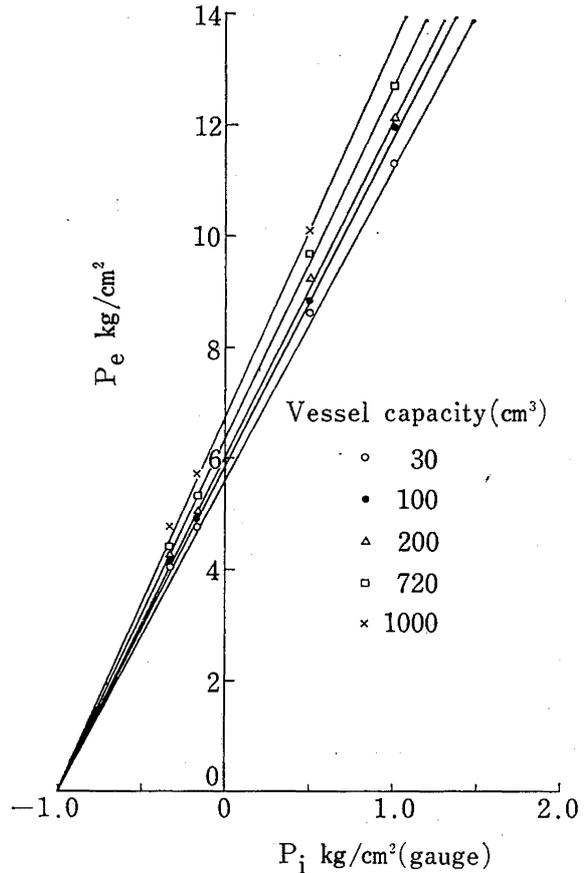


Fig. 7 The relation between initial pressure P_i and explosion pressure P_e with various vessels for 30% hydrogen-air mixture
初圧と爆発圧力の関係 (30%混合物)

Table 3 Explosion pressures P_e for various initial pressures P_i with two smaller vessels (capacity $V=30$ and 60) for 50% hydrogen-air mixture

容積が 30cm^3 および 60cm^3 の容器についての初圧と爆発圧力の関係

P_i kg/cm ² (gauge)	1.5	1.0	0.5	0	-0.13	-0.26
P_e kg/cm ²	$V=30$	9.78	7.77	5.85	3.77	3.20
	$V=60$	9.85	7.78	5.84	3.79	3.28

の発生圧力であって、各々5回の測定値の平均である。**Fig. 6**には V が30の直線のみを示したので、 $V=60$ のプロットは省いたが、 $V=30$ と $V=60$ の時の測定値を比較すると上の**Table 3**のようになり、殆んど差はなかった。

また、 V が1,000と2000の場合についてもその差はわずかであるので、 $V=1,000$ のみについてプロットした。この結果から、濃度が30%の場合には $V=60$ および2,000については測定を行わなかった。**Table 2**, **Fig. 5**および**Fig. 7**にこれらのデータが

示されていないのは、このためである。

5. 考察

5-1 初圧と爆発圧力の関係

Fig. 6 および **7** から明らかなように、各直線とプロットとの差は小さく、 $V=30$, $P_i=2.0$ の場合を除けばすべて約 0.3 kg/cm^2 の差で直線に近似している。したがって、式(4)は幾つもの仮定の上に立てはいるが、比較的正確に爆発圧力を捕えているものと考えられる。プロパン-空気混合物の初圧と爆発圧力の間には直線関係があることが他のデータ^{3),4)}でも示されているが、一般に式(4)の関係は可燃性ガスの種類の如何を問わず成立すると考えてよいであろう。

また、**Fig. 6** および **7** のプロットは全体的にみる

と、加圧側で直線より上に、減圧側で直線より下にある傾向がみられる。すなわち、直線の勾配がもう少し増せばこれらのプロットを充分満足することが考えられる。減圧側の爆発の挙動については問題もあるうが実験した程度の圧力では減圧の影響が余りないとするならば、次の説明が可能である。

前述したように、 $P_i = -1$ となる前に $P_e = 0$ となる限界圧力があり（この圧力については本実験では検討しなかったが）この限界圧力は P_i 軸上で $P_i = -1$ よりも $P_i = 0$ の側に寄る筈である。この点を通る直線は（ P_e 軸を切る値が同じだとしても）Fig. 6 または 7 の直線より勾配は大きいであろう。ただし、実際の限界圧力を通る直線の妥当性については検討の余地はあるが、それでも $P_i = -1$, $P_e = 0$ の点を通る直線より幾らか实际的であろう。

5-2 内容積と爆発圧力の関係

Fig. 5 には $P_i = 0$ の場合の関係を示したが、その他の初圧についても同じ傾向がみられる。すなわち、 $V = 30$ と 60 では圧力は殆んど等しく、 $V = 60$ と 100 の圧力差がやや大きく、このあと内容積とともに増加し、 $V = 720$ と $1,000$ では差があり、 $V = 1,000$ と $2,000$ では殆んど差がみられない。

これらについて可能な説明は次の通りである。内容積が 100 cm^3 に満たない場合には、容器壁の影響はほぼ内容積に関係しないということであって、この仮定が正しいとすれば先に緒言の項で述べた爆発試験に際しての内容積と爆発圧力の関係を 100 cm^3 で区別することは納得されるものようである。また、 720 cm^3 と $1,000 \text{ cm}^3$ のギャップは、容器の形状によるものと推定される。水素のような燃焼速度の大きいガスについては形状の影響は少ないとされているが、球状容器の方が大きい圧力を得るようである。容器材質の効果までは検討するに至らなかったが、形状の如何を問わず内容積が $1,000 \text{ cm}^3$ ($1l$) をこえると、それ以上の圧力の増加はわずかであると考えてよい。筆者らの別の測定（濃度はいずれも 30%）によれば、 $8l$ の球状容器で 7.0 kg/cm^2 、 $280l$ の近似球状容器で 6.9 kg/cm^2 という値を得ており、 $308l$ の円筒容器でも 6.9 kg/cm^2 の爆発圧力を得た。また、約 $7l$ の円筒容器内で 33% 水素-空気混合物を爆発させた時の圧力が 6.9 kg/cm^2 であったという報告⁵⁾ もある。

Statham と Wheele⁶⁾ によれば、メタン-空気混合

物の爆発圧力は内容積が $4l$ をこえると一定になるといふ。Müller-Hillebrand²⁾ は、径と高さが等しい円筒容器について都市ガスまたはメタンと空気の混合物の爆発圧力の容積依存性を示しているが、内容積が $1l$ をこすと圧力の増加は少なくなり、 $5l$ をこえればほぼ一定値となっている。また最近のデータ^{7),8)} によれば、ペンタン-空気混合物の最大爆発圧力は $0.5l$ と $4l$ では差があるが、 $4l$ をこえると内容積が 1.7 m^3 、 5.6 m^3 と増加しても殆んど変らないと報告されている。

5-3 実験式の検討

以上の結果から、爆発圧力を算出する簡単な実験式を求めてみる。

すでに考察したように初圧と爆発圧力は直線関係にあるとみなしてよいので、内容積と爆発圧力の関数関係が得られれば、式 (5) の形で実験式が得られる。

Fig. 5 から、ある濃度においては内容積の対数と爆発圧力が比例するとしてよい。濃度が 50% について、 $V = 60$ に対する圧力は $V = 30$ の場合を含めて、 $V = 60$ のプロットは除いて考えてもよいであろう。また、50% について $V = 30$ に対する値は Fig. 6 のプロットから考えて、もう少し大きい値とみなした方がより実験値に一致することも考慮に入れて、次のような直線関係を得る。ただし、 $g(V)$ はある内容積 V について初圧が 0 の時の爆発圧力であり、また、球状容器については別に考えるものとする。

30%混合物に対して、

$$g(V) = 4.75 + 0.55 \log V \quad (6)$$

また、50%混合物に対しては、

$$g(V) = 2.9 + 0.7 \log V \quad (7)$$

式 (6) による計算値は Fig. 5 の値と 0.02 以上の差はなく、式 (7) については $V = 30$ の時に 0.13 異なるほか殆んど差がなく、 $V = 30$ についての値は計算値の方が妥当な値であるのでこれらの式を用いることは不当ではない。

したがって、初圧 P_i (kg/cm^2)、内容積 V (cm^3) の時の爆発圧力 P_e (kg/cm^2) は実験した条件の範囲内では次のように示すことができる。

30%混合物に対し、

$$P_e = (4.75 + 0.55 \log V)(P_i + 1) \quad (8)$$

50%混合物に対しては

$$P_e = (2.9 + 0.7 \log V)(P_i + 1) \quad (9)$$

これらの式による計算値が実測値と 0.3 kg/cm^2 の差を示すのは ($V=60$ の場合を除けば) 容器が小さくて初圧が大きい場合の数点のみ (この場合でも 0.5 kg/cm^2 をこえることはない) についてであって、減圧下でもかなりよい一致を示している。

球状容器については式 (8), (9) による値より幾らか高いものと考えればよいが、内容積が、 $1,000 \text{ cm}^3$ をこすと増加は少ない (すなわち、 $g(V)=\text{constant}$) と考えてよく、これに対しては $V=1,000$ についてのプロットよりやや高めの値をとって次式を仮定しても、実測値とのズレは 0.2 kg/cm^2 程度であると考えられる。

30%混合物に対して、

$$P_e = 6.8(P_i + 1) \quad (10)$$

また、50%混合物に対しては次式を得る。

$$P_e = 5.3(P_i + 1) \quad (11)$$

5-4 その他の因子の影響

式 (1) に関して考察したように爆発圧力に影響する因子は数多いが、そのうちの幾つかについて、主として、上述したような実験式を求めるという立場から簡単にふれておく。

ガスの種類と濃度については、式 (4) が一般的に成立するものとすれば、初圧-内容積-爆発圧力の関係は水素と同じ形で示される筈である。濃度をかえた時には、爆発圧力は当量濃度付近で最大値を有する左右対称な曲線となるのがふつうであるから、濃度と圧力の関係は容易に求まるであろう。

次に温度であるが、本実験は室温 ($21\sim 28^\circ\text{C}$) 条件で行なったが、式 (2) によれば初めの温度は爆発圧力に影響するが、その程度は単純な式からは求められない。ただ、温度の低い方が圧力は高くなり、そうした実験的な報告⁹⁾ もなされている。

湿度については、本実験では全く無視したが、温度と圧力の高いほど空気中の飽和水蒸気量はます¹⁰⁾ ので混合ガス中の水蒸気ということで影響がある筈だが、実際には殆んど結果にひびくことはないであろう。なお、実験の際に毎回の爆発により生ずる水分の容器内の残存は、本実験では影響しなかった。Torry¹¹⁾ はセーフ・ギャップの測定に際しての水分の影響を検討したが、極端に wet または dry な場合を除けば実質的な影響はないとしているのは、参考になるであろう。

容器の形状については、球状容器の場合に爆発圧力が最大となること、また燃焼速度の大きいガスについては形状の効果が小さいことが知られている²⁾。

また、容器の材質や表面状態は壁面への熱移動あるいは反応における活性基に対する作用などの点で興味ある問題であるが、爆発圧力との関係で論ぜられたものはないようである。

容器内の混合ガスの状態も無視できないが、本実験では静止状態についてのみ測定した。乱れがあると圧力は幾らか高めになることが報告されている⁸⁾。

点火源は、その位置、種類あるいは方法などが問題となるが、容器の中心での点火が最大圧力を与えるとされている¹²⁾ ので、これにしたがって実験した。また、容器が小さい場合に特に大きなエネルギーで点火する (例えば白金線の溶断) 時には影響があると予想されるが、充分解明されていないようである。

5-5 防爆電気機器の爆発強度試験に対する応用

本実験の結果を実際の試験に利用することは、機器の形状や密閉状態などからみて、直接には困難であるが、大体の目安としての利用価値は大きいと考える。このためには、式 (8), (9) から次のような関係を求めておけば便利である。

Fig. 8 は、内容積と爆発圧力を二、三の初圧についてプロットしたものであり、Fig. 9 は 8 または 10 kg/cm^2 の圧力を得るために必要な初圧を内容積についてプロットしたものである。例えば、50%の混合物を用いて内容積 110 cm^3 の機器内で 10 kg/cm^2 の圧力を生ぜしめるためには約 1.3 kg/cm^2 の初圧が必要だということである。密閉状態でなければさらに高い初圧を要するから、試験条件の設定はかなり面倒である (30% 混合物を用いるとしても、初圧はやはり 0.7 kg/cm^2 前後という高い値にせねばならない。これを逆に言えば、最も爆発圧力が高くなるような水素-空気混合物がある雰囲気では上述の機器を使用する場合には、その内部圧力が 0.7 kg/cm^2 付近でなければ 10 kg/cm^2 もの圧力を生じないということであって、事実上大気圧下で使用する機器では到底起り得ない条件である。したがって、水素あるいはこれと同程度の爆発圧力を生ずるガス・蒸気に対しては、8 または 10 kg/cm^2 という耐圧強度は、特に内容積の比較的小さい機器に対しては、かなり安全な値とみなすことができる。

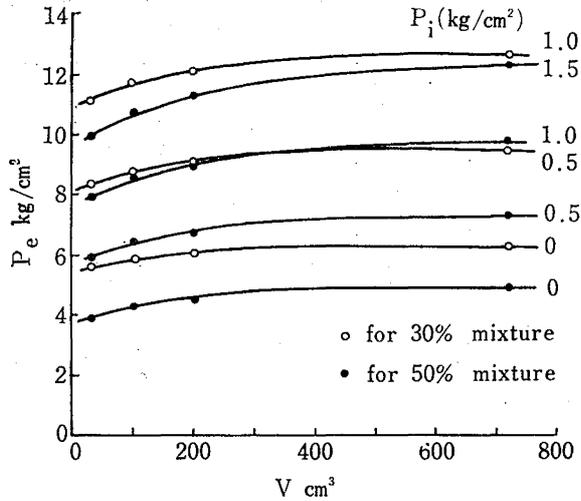


Fig. 8 The relation between vessel capacity V and explosion pressure P_e for various initial pressures

各種の初圧に対する内容積と爆発圧力の関係

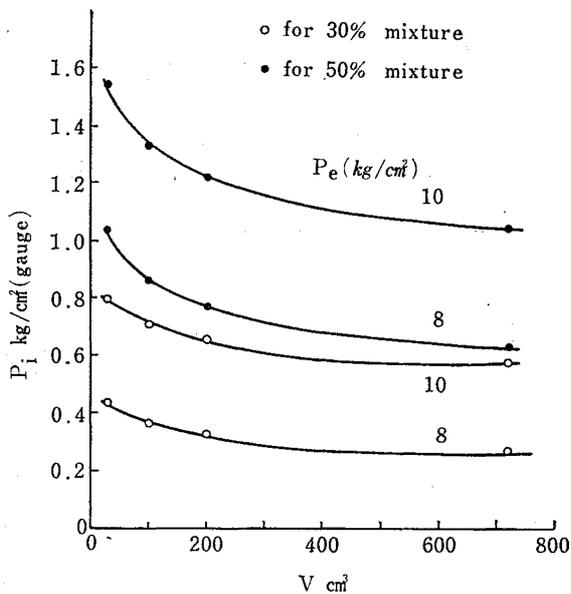


Fig. 9 The relation between initial pressure P_i and vessel capacity V to attain required explosion pressures P_e

8 または 10 kg/cm² の爆発圧力を得るのに要する初圧と内容積の関係

しかし、常温常圧で水素より相当に大きな爆発圧力を生ずるガス蒸気も多数報告¹⁹⁾されているので、これらに対しても同じ考え方をすれば、安全度が低く

なることが懸念される。

ただ、実際の機器には複雑な形状の内容物の入ること（ただし、圧力重積を生ずるような構造となるものは除く）が多く、接触や分割による熱損失が大きく、さらに、あらゆる接合面を通過しての圧力放散の効果があるから、実際に生じうる爆発圧力は、本実験のような方法で求めた値よりもかなり低いものと評価できる。圧力放散効果については、例えば次式が与えられている⁵⁾。

$$P = P_0 e^{-k(O/V)}$$

ここで、 P は爆発圧力、 P_0 は密閉時の爆発圧力、 O は開口面積、 V は内容積、 k は定数である。

このように考えれば、一般のガス蒸気に対する機器については特に内容積の小さいものに対する強度上の要求は、安全度が充分であると同時にかなり厳しいものと言えよう。一方、爆発圧力の高い幾つかのガス・蒸気に関しては必ずしもそうとはいえない場合がありうるので、慎重な検討が望まれる。

わが国では爆発等級 1 および 2 の耐圧防爆構造の機器の耐圧強度は内容積によって区分しているが、例えば英国¹⁴⁾ では、その機器内での発生爆発圧力（初圧は大気圧）の 1.5 倍の圧力で強度試験を行なう方法をとっており、国際的にもそうした方法がとられる動きがみえ始めている。わが国でも爆発等級 3 の機器に関してはこの方法により爆発強度試験をすることにしている。この方法によれば、可燃性ガスの如何を問わずに安全性が確認できるので、高い爆発圧力を生ずるガスに対する安全率のとり方に関する懸念はなくなるであろう。

また、本報では最大爆発圧力のみについて検討したが耐圧防爆構造の機器の強度を確認するためには、器壁に対してどのような時間的経過で圧力が加えられるかを検討せねばならない。爆発圧力については可燃性ガスの種類が問題となり、水圧・空気圧などの静圧による等価試験も考えられており、これらについては目下当研究所において研究中である。

6. 結 言

比較的小さな密閉容器内において、水素-空気混合物の爆発によって生ずる圧力を測定した。この結果、初圧が $-200\text{mmHg} \sim 2\text{ kg/cm}^2$ (ゲージ圧) 付近では、爆発圧力が初圧に比例して増加することがわかった。

これは理想気体の状態方程式を簡略化して理論的に導いた結果とほぼ一致し、比例定数は初圧が大気圧に等しい時の爆発圧力に近い値である。また、この比例定数と容器の内容積の間に簡単な関係を仮定することができた。

これにもとづき、内容積-初圧-爆発圧力の関係を示す実験式を導いたところ、種々の条件における実測値と極めてよい一致を示した。実験式の一例を示せば次の通りである。この式は内容積が 1l に満たない円筒容器について、30% 水素-空気混合物を用いた場合であって、 V は内容積 (cm^3)、 P_i はゲージ圧での初圧 (kg/cm^2)、 P_e は初圧との差としての爆発圧力 (kg/cm^2) である。

$$P_e = (4.75 + 0.55 \log V)(P_i + 1)$$

また、実験の条件内では内容積が 1l をこえると爆発圧力の増加はごくわずかになることが確認できた。

これらの結果は、耐圧防爆構造の電気機器の爆発強度試験の方法を検討する際に有用であるものと考ええる。例えば、圧力検出素子を取りつけるスペースのないような小さな機器でも、その内容積から混合ガスの初圧を適正に選択することにより、実質的に同程度の安全性を保証できる強度試験が可能となるであろう。

(謝辞)

本実験を行なうについて御指導を頂いた田口防爆課長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 労働省産業安全研究所技術指針、工場電気設備防爆指針 (ガス・蒸気防爆—1965)
- 2) D. Müller-Hillebrand 著、蒲生朝郷訳 “防爆電気機器原論”、コロナ社 (1939)
- 3) M. D. Creech, “Combustion explosions in pressure vessels protected with rupture disks”, Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs., 63, (7), 583 (1941)
- 4) E. W. Cousins and P. E. Cotton, “Design closed vessel to withstand internal explosions”, Chem. Engng., 58, 133 (1951)
- 5) 西堀博, 岩淵芳雄, “坑内爆発性ガスの爆発圧力”, 日立評論, 33, (4), 9 (1951)
- 6) I. C. F. Statham and R. V. Wheeler, “Flameproof electrical apparatus for use in coal mines. First Report-Flange protection”, S. M. R. B. Paper No. 5 (1924)
- 7) J. H. Burgoyne and M. J. G. Wilson, “The relief of pentane vapour-air explosions in vessels”, First Symposium on Chemical Process Hazards with Special Reference to Plant Design, The Instn. Chem. Engrs. (1960)
- 8) J. B. Harris, “The effect of vessel size and degree of turbulence on gas phase explosion pressure in closed vessels”, Combustion and Flame, 11, (1), 17 (1967)
- 9) N. F. P. A., “Guide for explosion venting”, N. F. Code vol. 9 (1964)
- 10) 佐藤一雄, “高圧ガス中の飽和蒸気量”, 高圧ガス協会誌, 21, (1), 2 (1957)
- 11) R. Torry, “Influence of atmospheric moisture on maximum safe gaps in mixture of methane and air”, S. M. R. E. Research Report No. 202 (1962)
- 12) K. N. Palmer and Z. W. Rogowski, “The use of flame arrester for protection of enclosed equipment in propane-air atmospheres”, 3rd Symposium on Chemical Process Hazards, The Instn. Chem. Engrs. (1968)
- 13) K. Nabert und G. Schön, “Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe”, (2. erweiterte Auflage), Deutscher Eichverlag GmbH (1963)
- 14) B. S. 229 “Flameproof enclosure of electrical apparatus” (1957) and Amendments, British Standard Institution
- 15) 田中隆二, “国際電気標準会議 (IEC) における防爆電気機器関係規格制定の現状について”, 日本電機工業会技術資料第 87 号, 日本電機工業会 (1967)

(昭和 44 年 7 月 1 日 受付)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-3

昭和 44 年 8 月 20 日 発行

発行所／労働省産業安全研究所

東京都北多摩郡清瀬町梅園 1 丁目 4 番 6 号

電話 (0424) 91-4 5 1 2 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 180-04

UDC 614.83 : 531.787 : 621.3.083

爆発圧力測定器の相違の測定結果に与える影響について

(防爆電気機器の試験方法に関する一考察)

鶴見平三郎, 林 年宏

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-69-2, 1~14 (1969)

爆発圧力の測定における測定器の組合せの影響について実験した。圧力変換器は抵抗線歪ゲージ式 (圧力ヘッド) およびピエゾ電気式のものを選び, これらに応じた増幅器および記録装置を種々組合せて爆発圧力の時間的变化を記録した。PE-30 KF 型圧力ヘッド-DPM-AT 型動歪測定器-FR 101 型電磁オシログラフ (ガルバ固有振動数 1000 Hz) の組合せによる測定値を基準とした時, その他の組合せによって 50% 水素-空気混合物の最大爆発圧力 (約 10 kg/cm² まで) を測定した結果, 平均 3% 以上の差は生じなかった。30% 混合物ではメモリスコープによる記録が高い値を示し, 電磁オシログラフのガルバは固有振動数の高い方が高い測定値を得た。このほか爆発圧力の波形についても若干の考察を加えた。



UDC 614.83 : 531.787 : 621.3.083

**The Influence of Measuring Instruments on the Explosion Pressure Recording
(A Contribution for the Testing Methods of Flameproof Electrical Equipments)**

H. Tsurumi and T. Hayashi

Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-TN-69-2, 1~14 (1969)

The influence of measuring instruments on the recorded wave forms of explosion pressures has been investigated in a closed spherical vessel with flammable hydrogen-air mixtures. One most common measuring system, which consists of strain gauge transducer, dynamic strain amplifier and electro-magnetic oscillograph, is nominated as a "standard system", and the results are shown in terms of the ratio of average pressure measured by one system to that by standard system. It is shown that the differences are less than 3% for 50% gas mixture.

Comparisons are also given for wave forms, and the frequency responsibilities of the instruments are discussed.

