

Research Report of the Research Institute of
Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.
UDC 614.838

定容複雑形状空間におけるガス爆発の特性と 破裂板式安全装置による爆発圧力の軽減*

林 年宏**, 松井 英憲**

Characteristics of Gaseous Explosions in a Vessel with a Complex Inner Structure,
and Pressure Venting by Rupture Disks.*

by Toshihiro HAYASHI** and Hidenori MATSUI**

Abstract : It has been known that explosion venting is one of the useful methods of protecting equipment or a vessel in which a gaseous or dust explosion may occur. Although many papers have been reported on explosion venting, most of them are concerned with explosions in vessels with simple shape and simple inner structure. Therefore, there always arises a doubt if the design criteria based on experiments with such a model vessel can be applied safely to protect real equipment used in hazardous situations. As is well known, the behaviors of gaseous explosion depend largely on such factors of a vessel, in which a flame propagates, as the size, the shape and the inner contents (*i.e.* the existence of obstacles which may induce any turbulence resulting in the acceleration of flame speed). However, at present, no one can predict quantitatively how such factors affect on maximum pressure attained or other explosion characteristics.

This report describes the behaviors of gaseous explosions in a complicated vessel and also the venting of explosion pressure when the vessel is equipped with rupture disks.

The test vessel, as shown in Fig.1, is a miniature model of a certain reactor, and is composed of outer and inner cylindrical shells, rod obstacles and two series of coils resembled to a heat exchanger. Each of the four openings at the top of the vessel is to be covered with a rupture disk or a blank flange.

A 70% methane-30% hydrogen mixture is used as a fuel gas. The pre-mixed gas of the fuel with air is prepared in a storage tank and is fed into the test vessel, following gaschromatographical analysis. The fuel content in the test gas mixture ranges from 6.5% ($\phi=0.5$) to 12% ($\phi=1.0$), where ϕ is a corresponding stoichiometric ratio. Initial pressure of the test gas mixture is varied from atmospheric up to 3.5 kg/cm²G.

Ignition is made, by a nichrome-wire heater, at the bottom center of the vessel. A flame originated in the lower vacant space of the inner shell propagates upwards, at first, through the rod obstacles. After passing through the peripheral clearance, with a width of 11 mm, at the upper part of the vessel the flame propagates downwards through the coil obstacles. The whole length of flame path is about 2 meters.

* 昭和 60 年 12 月 6 日, 第 18 回安全工学研究発表会において発表。

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division.

Explosion pressure-time histories at six different locations are recorded simultaneously in each test, by using a strain gauge-type pressure transducer, strain amplifier and electro-magnetic oscillograph. Six measuring points are shown in Fig.1 as encircled numbers ①~⑥.

In order to find out general behaviors and to characterize explosions in this test vessel, a first series of experiments are carried out with a totally closed vessel, varying the fuel content and initial pressure of the test gas mixture. With mixtures of lower fuel content, the rate of pressure rise just before attaining the maximum pressure (P_e) is assumed to be constant (Fig. 2). Subsequently the average rate of pressure rise (V_p) is read out on a pressure-time record, and the time to attain the maximum pressure (t) is calculated by the equation $t = \Delta P / V_p$ or $V_p = (P_e - P_0) / t$, where P_0 is an initial gauge pressure and ΔP is a difference between P_e and P_0 . With mixtures of 10% and 12% fuel content, pressure-time records suggest the transition of deflagration into detonation in the course of flame propagation. Explosion characteristics (P_e , t and V_p) in the closed vessel are shown in Figs. 3, 4 and 5. The well-known explosion hazard index K_G , which is calculated from maximum rate of pressure rise $(dP/dt)_{\max}$ determined by igniting the quiescent flammable mixture in a vessel of an internal volume (V) by the equation $K_G = (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3}$, is compared between typical flammable gases and the test gas mixtures in the present work (Tables 2 and 3), in order to predict the effect of the existence of obstacles on the flame path or the effect of turbulence induced by those obstacles.

In a second series of tests, the effect of rupture disk on explosion pressure relief is determined. Two types of rupture disk with different static bursting pressure (P_{rupture}) are used (Table 1). Effective diameter for each type of disk is defined here as an average diameter of the opening of the disk after explosion test, and the total vent area (S) is calculated from this diameter and the number of disks provided for the vessel. Results of experiments are shown in Figs. 6~11 and in Photos 1 and 2. From the viewpoint of practical application or the scaling-up of the test results, discussions are also made on the use of non-dimensional vent area (A) defined by $A = S / V^{2/3}$.

Main results obtained are summarised as follows :

- 1) The rate of pressure rise of an explosion in a complicated vessel can be far higher than that observed in a simple vacant one. Under suitable conditions, depending on the complexity of the inner structure of the vessel and the composition of flammable mixture, a transition of a deflagration into a detonation may occur.
- 2) For explosions of lower pressure rise rate (less than 100 kg/cm²/s), the only one rupture disk can reduce the vented pressure (*i. e.* maximum pressure attained) to the static bursting pressure of the disk, provided that the effective diameter of the disk is adequately selected (*i. e.* non-dimensional vent area shall be larger than 0.025).
- 3) For explosions of higher pressure rise (*e. g.* several thousands kg/cm²/s, but for detonation), the vented pressure may be reduced to a pressure higher by several kg/cm² than the static bursting pressure of the rupture disk, provided that the number and/or the effective diameter of the disk used is satisfactorily large (*i. e.* non-dimensional vent area shall be larger than 0.12). The provision of rupture disk for a vessel is almost useless for venting pressures where a detonation occurs in an early stage of flame propagation.
- 4) Scaling-up effect of the size of complicated vessel has to be studied furthermore. But, the authors make bold to consider that the vented pressures for different vessels will be substantially equal where the vessel size is scaled-up with the same value of non-dimensional vent area.

5) From the viewpoint of explosion pressure venting, no difference is found between tension loading type and reverse buckling type rupture disk.

Keywords ; Gaseous explosion, Detonation, Safety device, Venting, Combustion characteristics

1. 緒言

可燃性ガスを原料とする反応器や、可燃性ガス・蒸気を生ずるおそれのある反応器・装置などにおいては、不測のガス爆発により生ずる過圧に対する防護手段として圧力放散装置を設けることが多いが¹⁾、反応器等の耐圧に対して有効な圧力放散装置をいかにして設計するかが常に問題となる。この問題についての研究は多いが、その大部分は、大気圧下において、単純な空間形状の容器中で生ずる爆発圧力に及ぼす容器内容積や放散面積の効果を調べたものである^{2),3)}。実際には、防護すべき反応器等の形状や内部構造が単純でない場合のほうが多いが、こうした場合には、爆発圧力の上昇速度（以下、単に昇圧速度という）が、単純な形状の容器中のそれを大幅に上回ることが予測され^{4),5)}、圧力放散の挙動も異なるとみななければならない。これらを考慮に入れた対応が必要である。複雑な形状の空間におけるガス爆発の挙動は予測が困難であり、個々の場合について実験的に確認せざるを得ない。ここでは、内部空間の形状が複雑な容器の一例について、密閉状態におけるガス爆発の特性と、破裂板式安全装置（ラプチャー・ディスクともいう。以下、単に破裂板という）を取り付けたときの爆発圧力軽減効果を調べた結果について報告する。

2. 実験

実験に用いた爆発容器は、内径 0.53 m、長さ 1.05 m、有効内容積約 0.2 m³ の鋼製（SB 42）の円筒容器（設計耐圧 34 kg/cm²G、水圧試験圧力 51 kg/cm²G）であり、容器内部には、内筒（内径約 0.32 m、肉厚 10.3 mm）のほかに、棒状障害物（直径 34 mm、長さ 0.74 m のもの 19 本）及びコイル状障害物（内筒外壁に沿って直径 22 mm のもの、外筒内壁に沿って直径 34 mm のもの）を有する。容器頂部には、直径約 102 mm の開口部が 4 箇所設けてあり、これらは破裂板又は盲板で覆うこと

ができる。実験容器の概略を Fig.1 に示す。

実験には、メタン 70%-水素 30% の混合物を燃料ガスとして用い、空気中の燃料ガス濃度（以下、ガス濃度という）を 6.5% から 12% まで（当量比 $\phi=0.5\sim 1.0$ ）、初圧を大気圧から 3.5 kg/cm²G まで変化させて、これらのガスを容器内に満たして点火したときの爆発圧力を測定した。また、開口部を破裂板で覆った場合については、破裂板の種類と破裂板を取り付ける開口部の数（1~4）を変えて、爆発圧力の軽減効果を調べた。破裂板の仕様を Table 1 に示す。

Table 1 の「有効径」は、破裂板の作動後に生ずる開口の平均的な直径であり*1、これから算出される開口の大きさに、破裂板を取り付けた開口部の数（以下、これを破裂板の枚数ということがある）を乗じた値を

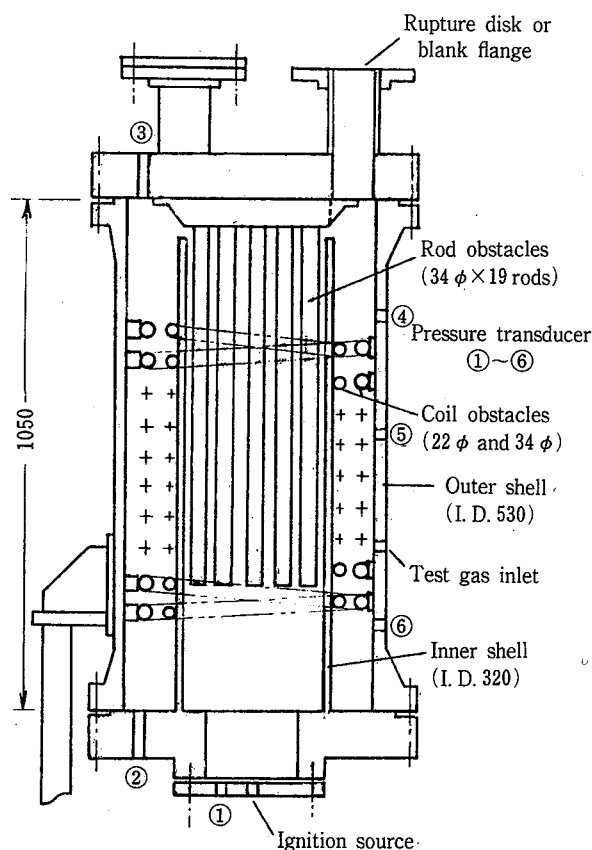


Fig.1 Schematic showing of the test vessel. (dimensions in "mm").

実験容器の概略

*1 破裂板の取り付け部分の構造の詳細は省略したが、取り付け用のフランジ及びホルダーの内径が容器頂部の開口部の直径より大きいため、有効径は開口部直径よりやや大きくなっている。

Table 1 Specifications of the rupture disks.
実験に用いた破裂板の仕様

Type	Material	Thickness	Effective diameter	Static bursting pressure
Tention loading	Aluminum	0.2 mm	114 mm	6.9 kg/cm ² G
Reverse buckling	316 SS	0.3 mm	104 mm	8.0 kg/cm ² G

開口面積と呼ぶことにする(例えば、引張型破裂板1枚当りの開口面積は約100 cm²である)。引張型破裂板は、アルミニウムの平板を打ち抜いたものであり、開口部のフランジ間にパッキンを介して取り付けられた。反転型破裂板は市販品であり、メーカー指定の十文字形カッター付きのホルダーに組み込んだのちフランジ間に取り付けた。

圧力の測定には、歪ゲージ式圧力変換器(容量50 kg/cm²G, 応答周波数25 kHz), 増幅器及び電磁オシログラフから成る測定系を用い、容器壁の6箇所(測定点はFig.1に①~⑥で示した)における圧力波形を同時に測定した。一部の測定点の圧力波形の記録にはデジタルメモリを併用し、オシロスコープにより波形の細部を観測した。

実験ガスは、混合タンクを用いて分圧法により調整し、ガスクロマトグラフにより分析したのち実験に供した。

点火は、ニクロム線ヒータを用いて、容器底部の中心において行った。点火により生じた火炎は、最初、内筒底部の障害物の無い空間を伝播し、棒状障害物の間を通り、内筒上部の円周状の隙間(幅11 mm)から外筒の上部へ出たあと、コイル状障害物のある外筒部を下方へ伝播するという経路をたどる。なお、予備実験において、ガス濃度5.0%で発火しなかったため、この点火方法による場合には、実験に用いた燃料ガスの空気中の燃焼下限界濃度は5.5~6.0%付近であるとみられる。

3. 実験結果及び考察

3.1 密閉状態における爆発圧力特性

まず最初に、容器頂部の開口をすべて盲板で覆った場合(以下、密閉状態という)について、ガス濃度と初圧が爆発圧力に及ぼす影響を調べた。Fig.2は、初圧を大気圧としガス濃度を変えたときの、測定点③(外筒部上端)における圧力波形の例である。ガス濃度が

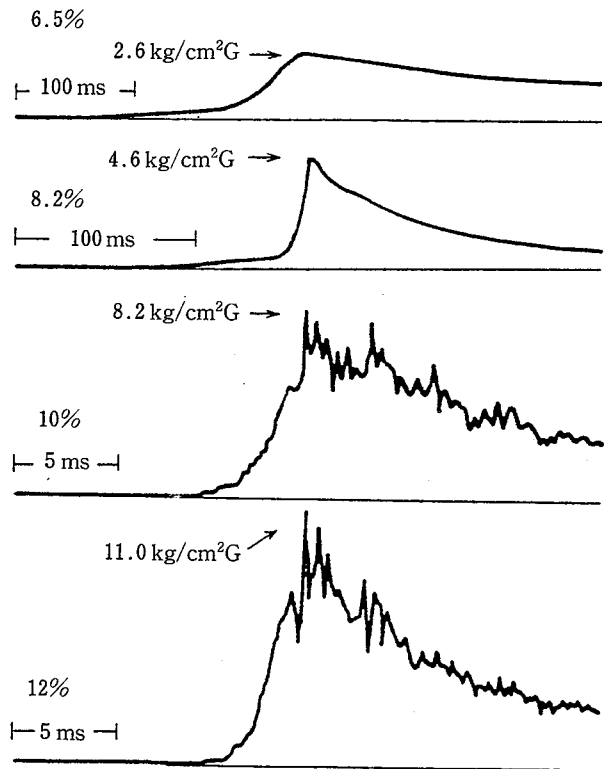


Fig.2 Explosion pressure-time histories in closed vessel for various gas compositions (measured at point ③, at atmospheric initial pressure).
ガス濃度による爆発圧力波形の変化(密閉状態, 測定点③, 初圧は大気圧)

6.5% ($\phi=0.5$) 及び8.2% ($\phi=0.67$) では、最初に緩やかな昇圧が続いたあと、比較的急速な昇圧がみられる。これは、前者が内筒底部の障害物の無い空間での層流火炎伝播に対応し、後者がその後の障害物により生じた火炎速度の大きい乱流燃焼の火炎伝播に対応すると考えられる。これらのガス濃度では、ピーク圧力に達する直前の急速な昇圧部における昇圧速度はほぼ一定とみなせるので、この昇圧速度 V_p を圧力波形から読み取り、爆発圧力のピーク値 P_e と初圧 P_0 の差 ΔP を V_p で除した値を実効昇圧時間(以下、昇圧時間という) t とした ($t=\Delta P/V_p$, あるいは、 $V_p=(P_e-P_0)/t$)。

ガス濃度が10% ($\phi=0.8$) 及び12% ($\phi=1.0$) では、昇圧速度は格段に大きくなり、衝撃波の発生によるとみられる圧力ピークが観測された。これは、燃焼速度が大きいガス濃度では、内筒部での爆燃に続いて内筒と外筒の間隙から未燃ガスが外筒部へ噴出すること、及び、外筒部にコイル状障害物が存在することによって、火炎面が乱されて火炎速度の加速を生じて爆ごうへ転移し、この結果生じた爆ごう波からの反射衝

撃波によるものとみられる。このことは、測定点②および⑥の圧力波形が爆ごう波の特徴を示していることから明らかである (Fig.10 参照)。

以上のことから、ガス濃度を 6.5% から 12% まで変化させることによって、火炎速度が比較的遅い爆燃から、火炎速度が超音速の爆ごうまで、多様なガス爆発現象が得られることが判明した。次に、密閉状態における爆発圧力の特性を、それぞれのガス濃度について詳しく考察する。

ガス濃度 6.5% において初圧 P_0 を変えたときの爆発特性 (P_e , t , V_p) を Fig.3 に示す。図には、6 箇所の測定点における測定値の分布範囲とそれらの平均値を示した。図からわかるように、ピーク圧力は初圧に比例して増大し(初圧の約 3.6 倍)、昇圧時間もまた初圧に比例する。昇圧速度は実験の範囲内では 50~100 kg/cm²/s であるが、初圧が 1 kg/cm²G 以上では初圧の影響は小さい。昇圧時間が初圧に比例して増大するのは、燃焼速度の遅い領域 (文献によれば 50 cm/s 以下) では燃焼速度が初圧の増加とともに減少する*2 ことによると考えられる⁶⁾。なお、このガス濃度における平均火炎速度は、火炎伝播経路の全長を約 2 m とすれば、17~40 m/s と推算される。

ガス濃度が 8.2% の場合の爆発圧力特性を Fig.4 に示す。この濃度では、測定点①におけるピーク圧力は他

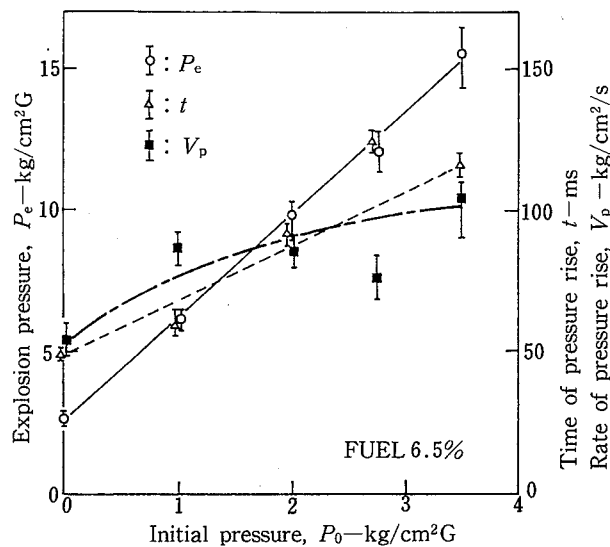


Fig. 3 Effect of initial pressure on explosion pressure (peak pressure), time to attain peak pressure and average rate of pressure rise, for 6.5% mixture in closed vessel.

密閉状態における初圧と爆発特性の関係(ガス濃度 6.5%)

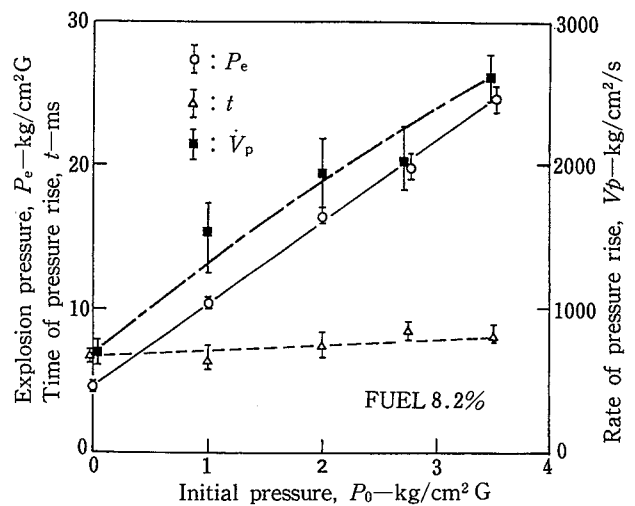


Fig. 4 Effect of initial pressure on explosion characteristics for 8.2% mixture in closed vessel (measuring points ②~⑥).

密閉状態における初圧と爆発特性の関係(ガス濃度 8.2%, 測定点②~⑥)

の測定点における値よりも 6~20% 低い、①以外の測定点におけるピーク圧力はほぼ等しい値を示した。図には、測定点②~⑥における測定値の分布範囲とそれらの平均値を示した。ピーク圧力は初圧の約 5.6 倍で、ガス濃度 6.5% の場合と同様に初圧とともに増大した。昇圧時間は、実験の範囲内では、初圧に依存しない一定値 (7~8 ms) を示した。このため、昇圧速度は初圧に比例して増大することになる。初圧が大気圧及び 3.5 kg/cm²G では、昇圧速度はそれぞれ 700 及び 2600 kg/cm²/s であり、火炎伝播経路を 2 m としたときの平均火炎速度は約 250~300 m/s となり、かなり急速な火炎伝播が生じているものと推定される。

ガス濃度が 10% 及び 12% では、爆ごう波が生ずるので、歪ゲージ式圧力変換器を用いて衝撃波によるピーク圧力を定量的に測定するのは無理であるため、ここでは、得られたピーク圧力を用いて定性的に爆発特性の比較を行う。これらのガス濃度では、爆ごうへの転移が早期に生ずるので、圧力波形から昇圧時間や昇圧速度を求めることはできない。Fig. 5 は、初圧が大気圧の場合について、各測定点におけるピーク圧力と初圧の比 P_e/P_0 を、ガス濃度に対してプロットしたものである。図中の破線は、定容燃焼における化学平衡計算

*2 燃焼速度の圧力依存性は混合ガスの種類によって異なるが、本実験に用いた燃料ガスの主成分であるメタンと空気の混合ガスの場合には、初圧の増加とともに燃焼速度は減少する。

をもとにした断熱最高火炎温度から求めた理論爆発圧力を意味する。10及び12%のガス濃度では、①を除くすべての測定点において、理論値を超える過大な爆発圧力が観測され、また、測定点によるピーク圧力の差異も著しいが、これは、爆ごうの発生による衝撃圧力が容器内において複雑に反射した結果である。こうした傾向は、初圧が異なってもほぼ同じであった。

National Fire Protection Associationの爆発圧力軽減に関する指針⁷⁾では、ガスの爆発特性を評価する指標として K_G 値を用いているが、この手法を本実験に適用して、代表的な可燃性ガスと本実験に用いた燃料が

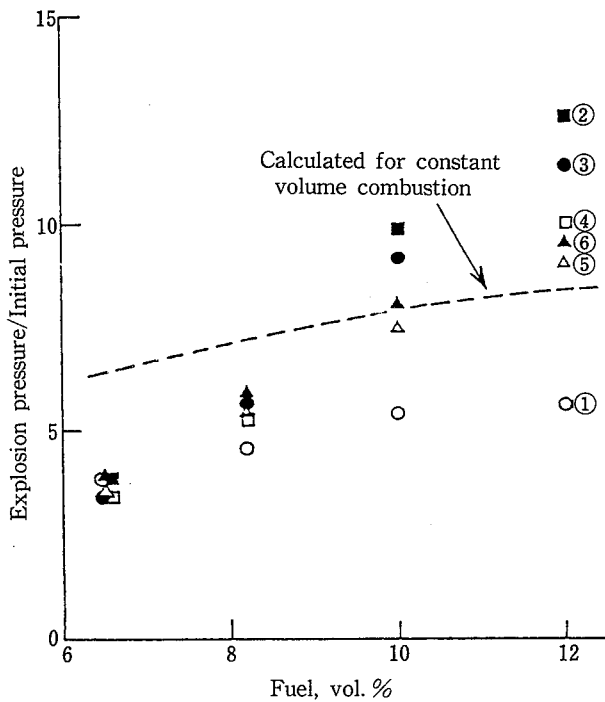


Fig. 5 Effect of gas composition on explosion pressure measured at different locations in closed vessel, for atmospheric initial pressure.

密閉状態における容器各部の爆発圧力とガス濃度の関係 (初圧は大気圧)

Table 2 K_G values for typical gases⁷⁾.
代表的な可燃性ガスの K_G 値

Fuel gas	Initially static gas mixture		Initially highly turbulent gas mixture	
	P_e (bar)	K_G	P_e (bar)	K_G
Methane	7.3	55	8.7	460
Propane	7.3	75	8.7	500
Hydrogen	7.0	550	7.7	1270

* Values determined with electric spark ignition source of about 10 Ws at $P_0=1$ bar; K_G ($\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

スの爆発特性を比較してみる。 K_G 値とは、内容積が 1 m^3 以上の試験容器中において、可燃性ガスと空気の混合物に電気火花で点火・爆発させたときに得られる最大昇圧速度 $(dP/dt)_{\text{max}}$ に、試験容器の内容積 V の立方根を乗じた値である ($K_G=(dP/dt)_{\text{max}}\cdot V^{1/3}$, 単位は $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$)。Table 2 に代表的な可燃性ガスの K_G 値を、また、Table 3 には、本実験に用いた燃料ガスについて、昇圧速度 V_p と実験容器の内容積をもとに算出した K_G 値を示す。これらの表の比較からわかるように、ガス濃度が 6.5% の場合には、これが燃焼下限界に近い濃度であるにもかかわらず、単純な形状の容器中における静止状態のメタンの爆発の場合にほぼ等しい K_G 値となっている。また、ガス濃度が 8.2% の場合には、初圧が $1 \text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ (2.0 bar) 以下においては、単純な形状の容器中において強い外乱を与えたメタンの爆発、あるいは静止状態の水素の爆発とほぼ等価な爆発特性を示し、また、初圧が $2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ (3.0 bar) 以上では、強い外乱を与えた水素の爆発あるいはそれ以上の激しい爆発を生ずることが推測される。

このように、内部の形状が複雑な容器内でのガス爆発は、ガス濃度が化学量論組成からかなりはずれた場合であっても、極めて急速な火炎伝播を伴う激しい爆発となることが示された。

3.2 破裂板による爆発圧力の軽減効果

本節では、上述の特性を有するガスの爆発圧力が、容器に破裂板を取り付けることによりどの程度軽減されるかについて述べる。

Fig. 6 は、ガス濃度が 6.5% の場合について、密閉状態と、引張型破裂板を 2 箇所に取り付けたときについて、圧力波形を比較した例である。図は測定点③における圧力波形であるが、測定点による圧力波形の差異はほとんどみられなかった。破裂板が作動 (破裂) するまでの圧力波形は密閉状態の場合と同じであり、図

Table 3 K_G values for test gas mixtures in this report.
本実験に用いたガスの K_G 値

Gas composition	6.5% ($\phi=0.5$)		8.2% ($\phi=0.67$)	
	P_0 (bar)	P_e (bar)	P_e (bar)	K_G
	1.0	3.6	5.5	400
	2.0	7.0	11.1	855
	3.0	10.6	17.0	1100
	3.7	12.8	20.3	1140
	4.4	16.3	25.1	1490

* K_G ($\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

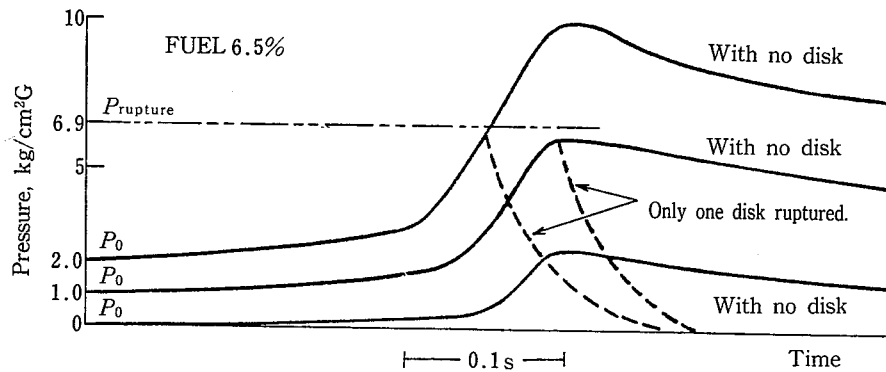


Fig. 6 Explosion pressure-time histories when the vessel is provided with two rupture disks or with no disk, for 6.5% mixture with various initial pressures (measuring point ③).

初圧を変えたときの、密閉状態及び破裂板作動時の圧力波形の比較 (ガス濃度 6.5%, 測定点③)

では、破裂板の作動後の圧力変化を破線で示した。初圧が大気圧のときは、ピーク圧力は $2.6 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ であり、破裂板の設定破裂圧 $P_{rupture}$ (Table 1 の静的破裂圧) が $6.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ であるため、破裂板は作動しなかった。初圧が $1.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ のときは、2枚の破裂板のうち1枚が作動したが、このときのピーク圧力は $6.2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ となり、設定破裂圧にほぼ等しかった。初圧が $2.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ のときも破裂板は1枚だけが作動し、ピーク圧力と設定圧力はほぼ一致し、設定圧力を超える昇圧はみられなかった。

Fig. 7 は、ガス濃度を 6.5% として初圧を変えたときの、6箇所の測定点におけるピーク圧力の分布範囲とその平均値を、破裂板の枚数に対してプロットしたものである。破裂板の枚数ゼロは密閉状態での実験に相応する。このガス濃度では、取り付けられた破裂板の枚数にかかわらず、作動するのは常に1枚のみであった。いずれの種類破裂板であっても、ピーク圧力は設定圧力に一致しており、昇圧速度が小さい ($50 \sim 100 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$) このガス濃度では、1枚の破裂板を取り付けるだけで、ピーク圧力を破裂板の設定圧力に抑え得ることが示された。ここで、開口面積 S と容器内容積 V から、 $A = S/V^{2/3}$ で示される無次元開口面積 A を定義すると、破裂板1枚当りの A は、二種類の破裂板について $0.025 \sim 0.03$ となる。この値は、昇圧速度が同程度の爆発現象に対して、容器の大きさが増した場合の開口面積の設定に役立つが、その根拠については後に述べる。作動後の破裂板の状態を Photo 1 に示す。

ガス濃度が 8.2% の場合は、密閉状態での昇圧速度が

$700 \sim 2600 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ と極めて大きいので、破裂板の効果もガス濃度 6.5% の場合と異なることが予測された。ガス濃度 8.2%、初圧 $2.75 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ において、引張型破裂板の枚数を変えたときの圧力波形を Fig. 8 に示す。図には測定点③における圧力波形を示したが、測定点①を除けば位置による差異はほとんど無かった。なお、測定点①におけるピーク圧力は、密閉状態の場合と同様に、他の測定点におけるピーク圧力よりも 10~40% 低かったが、これは、内筒部ではガスの乱れが小さいために高い爆発圧力には至らず、また、外筒部で生じた高い圧力が (内筒部との間隙が狭いため) 内筒部内へ急速には伝わらないことなどによるものと考えられる。密閉状態では、①以外の測定点におけるピーク圧力は $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ にも達するが、破裂板1枚を取り付けることにより、この圧力は $15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ にまで軽減される。破裂板4枚では、ピーク圧力は $9.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ となり、開口面積の効果がみられる。Fig. 8 の実験に用いた破裂板の設定破裂圧は $6.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ であるが、実際に開口が生ずる圧力は、Fig. 8 における圧力波形の分岐点に相応する圧力 (約 $9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) と推定される。

Fig. 9 は、ガス濃度 8.2% において初圧と破裂板の種類を変えたときの、①を除く 5箇所の測定点におけるピーク圧力の分布範囲とそれらの平均値を、破裂板の枚数に対してプロットしたものである。図からわかるように、ピーク圧力は、破裂板の設定破裂圧を超えはするものの、破裂板の枚数の増加とともに軽減される。破裂板の枚数が等しければ、初圧が高いほど圧力軽減効果が大きい、その理由は、初圧が高いほど破裂板

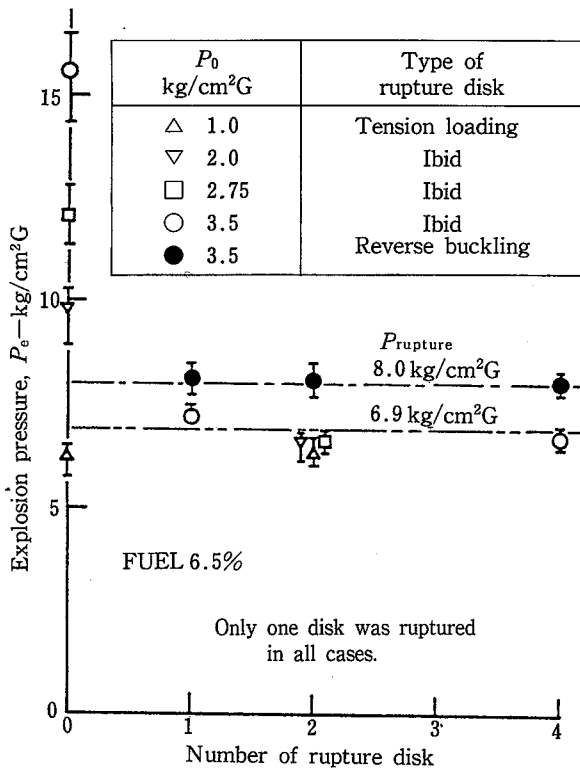


Fig. 7 Effect of the number of rupture disk on explosion pressure, for 6.5% mixture with various initial pressures.
破裂板の枚数と爆発圧力の関係 (ガス濃度 6.5%)

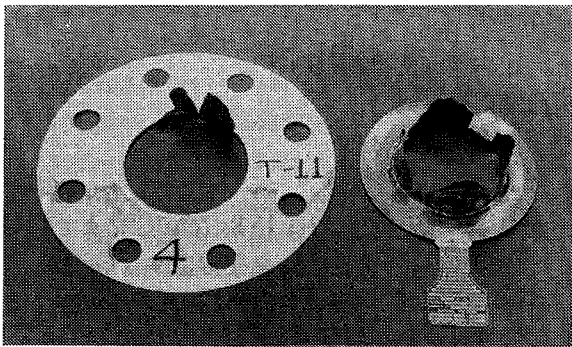


Photo 1 Two types of rupture disk after test : tension loading type (left) and reverse buckling type (right).
作動後の破裂板 : 引張型 (左) 及び反転型 (右)

の作動までの圧力上昇差が小さく、また昇圧速度が相対的に小さい爆発の初期段階において破裂板が作動するためと考えられる。このように、昇圧速度が極めて大きい場合においても、破裂板による爆発圧力の軽減効果がみられ、開口面積を十分大きく (本実験では、

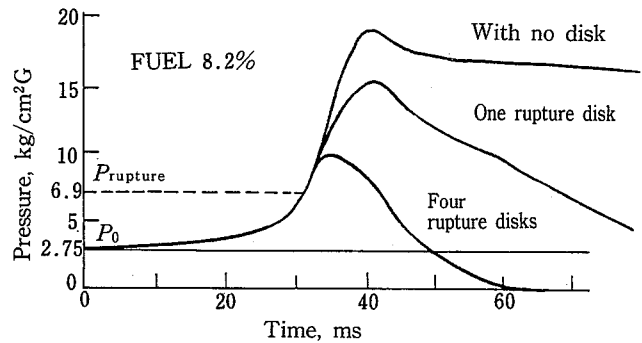


Fig. 8 Explosion pressure-time histories for different numbers of tension loading type disk ruptured, for 8.2% mixture with initial pressure of 2.75 kg/cm² G (measuring point ③).
破裂板の枚数を変えたときの圧力波形の比較 (ガス濃度 8.2%, 初圧 2.75 kg/cm²G, 測定点③)

無次元開口面積を 0.12 以上) とれば、爆発によるピーク圧力を破裂板の設定破裂圧より数 kg/cm² 高い過圧力に抑え得るといふ新しい知見が得られた。

ガス濃度が 10 及び 12% のときには、破裂板を取り付けた場合においても外筒部で爆ごうを生じ、①以外の測定点では反射衝撃波による過大な圧力が測定され、それらの値は密閉状態におけるピーク圧力にほぼ等しかったが、測定点②では密閉状態のときよりも高いピーク圧力も記録された。反転型破裂板 4 枚を取り付けた場合の、作動後の破裂板の状況を Photo 2 に示す。実験に際しては、破裂板の作動とともに激しい爆発音を生じ、噴出火炎は開口部から約 1 m の高さに達した。火炎の輝度は弱かったが、これは、燃料ガス中の炭素分が少なく、かつ、ガス濃度が燃料希薄側であったためである。

ガス濃度 12%、初圧 1.0 kg/cm²G の場合について、測定点②及び③における圧力波形を、密閉状態の場合と引張型破裂板 4 枚の場合について比較して Fig. 10 に示す。測定点②では、最初から爆ごうの衝撃波による急激な圧力の立上りがみられ、測定点③においても、不規則な圧力上昇のちに、容器外筒部の下端からの反射衝撃波による急激な圧力の立上りが認められる。Fig. 11 は、ガス濃度 12%、初圧が大気圧の場合について、測定点①、②及び③におけるピーク圧力を破裂板の枚数に対してプロットしたものである。図からわかるように、測定点③ (外筒部上端) よりも測定点② (外筒部下端) におけるピーク圧力のほうが高く、測定点①におけるピーク圧力は他の測定点の値よりも大幅に

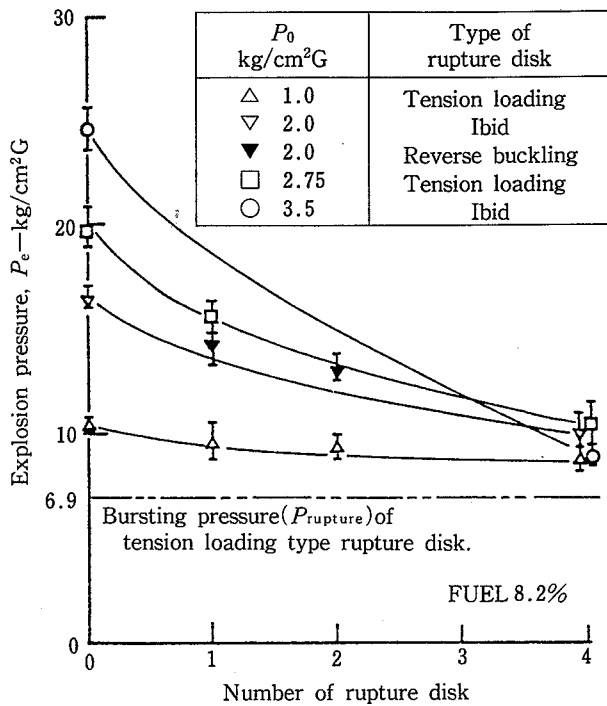


Fig. 9 Effect of the number of rupture disk on explosion pressure, for 8.2% mixture with various initial pressures (measuring points ②~⑥).
破裂板の枚数と爆発圧力の関係(ガス濃度 8.2%, 測定点②~⑥)

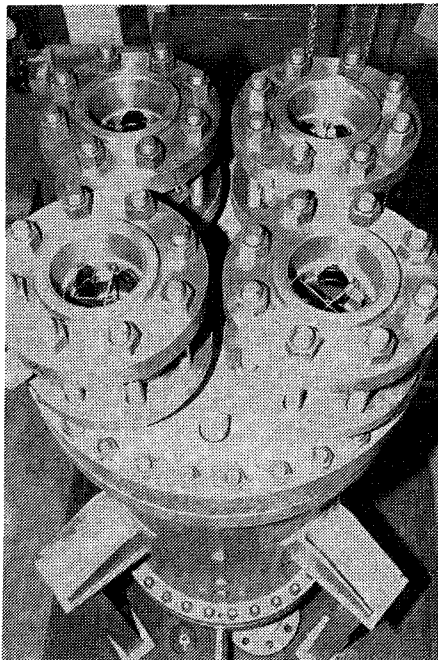


Photo 2 Reverse buckling type rupture disks after test.
反転型破裂板の作動後の状況

低い。また、いずれの測定点においても、破裂板の枚数による圧力の軽減効果はほとんど認められず、破裂板の種類による差異も顕著ではない。ガス濃度が 10% の場合の結果も、ほぼ同様であった。こうしたことから、密閉状態において容易に爆ごうを生ずる条件下では、破裂板は爆ごう波の発生阻止や爆発圧力の軽減にはほとんど効果のないことが確認された。これは、爆ごう波の発生がもつぱら未燃ガスの乱れに依存すること、及び、爆ごう波の伝播速度が超音速であるのに対して、破裂板の作動による膨張波の伝播速度は音速であることから理解される。

容器内部のガス・蒸気・粉じん等の爆発に対する破裂板の圧力軽減効果に関する研究では、爆発時の挙動は実験条件によって多様に変化するもので、実用上の観点からは実機（実際に破裂板を取り付けようとする装置）を用いての実験が望ましいが、現実には、実機よりも小さいモデル容器を用いた実験の結果をもとに、破裂板の設計を行うことが多い。こうした場合には、スケール効果が常に問題となる。内部構造と外形がともに単純な容器の場合には、無次元開口面積が一定となるようにスケール・アップすると、容器内容積が大きくなる（ $\sim 35 \text{ m}^3$ ）になったときの爆発のピーク圧力が、内容積の小さい場合に比して高くなるということが指摘されている⁹⁾。その理由は、容器の形状・構造が単純であるため、破裂板の作動により開口が生じると容器内部の未燃ガスに乱れを生じ、容器内部で再度激しい爆発が生ずる結果、第 2 の過大なピーク圧力を生ずるからである。この第 2 のピーク圧力は、容器内容積が大きいほど、開口面積が小さいほど、また燃料ガスの燃焼速度が大きいほど高くなる⁹⁾。NFPA の指針⁷⁾には、大型の容器（内容積が $\sim 60 \text{ m}^3$ ）を用いた実験結果に基づいたノモグラフから、 K_G 値を用いてスケール・アップ時の開口面積を算出する方法が述べられている。この方法は、大型容器の場合に生ずる過大なピーク圧力を含む多数の実験結果の包絡線を計算の基礎としており、密閉容器内での爆発の挙動が 3 乗根則 $(dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = K_G$ (一定) に従い、燃焼速度があまり大きくないガスの爆発であって、かつ開口面積が十分大きい場合には、無次元開口面積が一定という条件のもとでスケール・アップ（あるいはダウン）すればよいことを示唆している¹⁰⁾。

本実験に用いた容器は、内部空間の形状が複雑であるため、開口の発生による未燃ガスの乱れよりも、容器内部の障害物による乱れのほうが格段に大きいので、

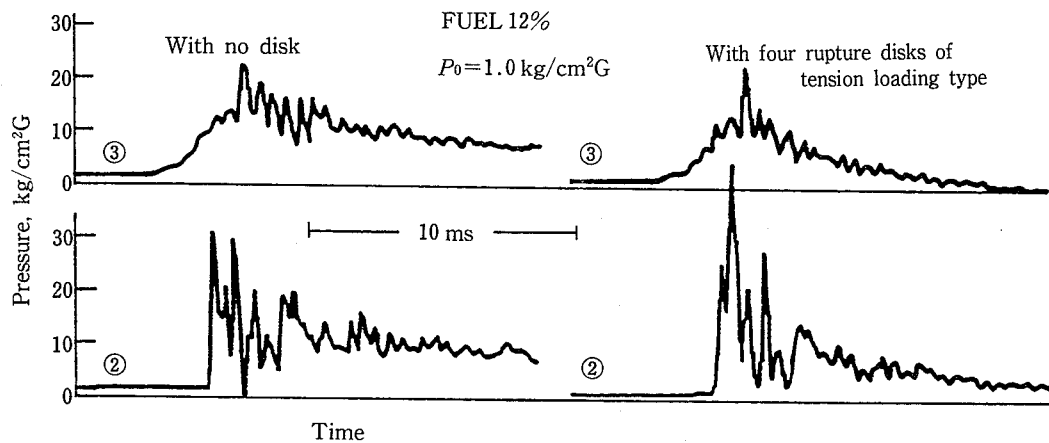


Fig.10 Typical explosion pressure-time histories at measuring points ② and ③, for 12% mixture.

測定点②及び③における爆発圧力波形の比較 (ガス濃度 12%)

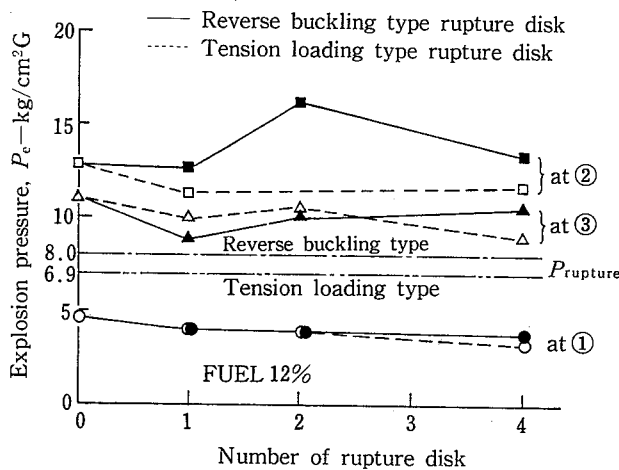


Fig.11 Effect of the number of rupture disk on explosion pressure in case of occurrence of detonation, for 12% mixture of atmospheric initial pressure.

爆発が生じた場合の破裂板の枚数と爆発圧力の関係 (ガス濃度 12%)

開口後の過大な第2ピーク圧力は発生しない。また、スケール・アップにより条件が苛酷となるような他の要素も考えにくい。従って、本実験の結果を、無次元開口面積を等しくしてスケール・アップした場合には、実験容器を用いた場合に測定されたとほぼ等しい大きさの圧力ピークが発生するものと考えられる。

4. 結言

この研究で得られた結果は次のように要約される。

- (1) 複雑な形状の空間を有する容器内のガス爆発においては、単純な形状の容器の場合に比して昇圧速度

が極めて大きくなることがあり、ガス濃度によっては爆発への転移もあり得る。

- (2) 昇圧速度が $100 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ 程度以下であれば、適切な有効径 (無次元開口面積で 0.025 程度) の破裂板 1 枚を取り付けることによって、爆発時のピーク圧力を破裂板の静的破裂圧力とほぼ等しい圧力に抑えることができる。
- (3) 昇圧速度が数千 $\text{kg/cm}^2/\text{s}$ であっても、爆発を生じない範囲であれば、破裂板の枚数又は有効径を十分大きく (無次元開口面積で 0.12 以上) とることで、爆発時のピーク圧力を破裂板の静的破裂圧力より数 kg/cm^2 程度高い圧力に抑えることができる。なお、爆発を生ずる場合に対しては、破裂板による圧力の軽減効果はほとんど期待できない。
- (4) 容器寸法をスケール・アップしたときの爆発の挙動については更に研究が必要であるが、無次元開口面積が等しいという条件のもとでは、発生するピーク圧力はほぼ等しくなるものと予測される。
- (5) 爆発圧力の軽減効果という観点から見れば、破裂板の種類 (引張型と反転型) による差は無いと考えられる。

(昭和 61 年 12 月 22 日受理)

謝辞

本研究は、関西電力㈱の協力により実施したものである。実験に際して格別の助力を頂いた関西電力㈱の山本唯志氏、㈱テクノ・サービスの小泉道夫氏らに対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安全工学協会編；“爆発”，海文堂，p.290 (1983)
- 2) 松田東栄，内藤道夫；産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-75-1 (1975)
- 3) 林 年宏；“破裂膜式放散孔の設計方法について”，産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-85-2 (1985)
- 4) I.O.Moen, *et al.*；“Flame Acceleration Due to Turbulence Produced by Obstacles”，*Combustion and Flame*, 39, pp.21~32 (1980)
- 5) B.H.Hjertager；“Influence of Turbulence on Gas Explosions”，*Journal of Hazardous Materials*, 9, pp.315~346 (1984)
- 6) 平野敏右；“ガス爆発予防技術”，海文堂，p.51 (1983)
- 7) National Fire Protection Association；“Guide for Explosion Venting (NFPA 68-1978)”，*National Fire Codes*, 14 (1979)
- 8) D.M.Solberg and J.A.Pappas；“Observation of Flame Instabilities in Large Scale Vented Gas Explosions”，18th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1607~1614 (1981)
- 9) 平野敏右；“ガス爆発予防技術”，海文堂，p.119 (1983)
- 10) C.Donat；“Pressure Relief as Used in Explosion Protection”，*Loss Prevention*, 11, pp.87~92 (1977)