JULY 1970

RIIS-RR-19-1
UDC 614.838

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-19 1

爆圧放散孔に関する研究（第1報）
—熱風流動式箱型乾燥機に対する応用について—

田口　昇・鶴見平三郎・林　年宏・松井英憲

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

爆圧放散孔に関する研究（第1報）*

—熱風流動式箱型乾燥機に対する応用について—

田口　昇**　鶴見平三郎**　林　年宏**　松井英憲**

Experimental Study on the Methods of Explosion Venting (First Report)

—Application for a Certain Type of Commercial Box Dryer—

Noboru TAGUCHI**　Heizabro TURUMI**
Toshihiro HAYASHI**　Hidenori MATUI**

When flammable gases, vapours or dusts are handled in enclosed equipments, it would be better to consider that potential hazards of explosion exist unless special cautions have been took for the concentrations of flammables or the ignition sources. Therefore, some methods, not only for explosion prevention but also for explosion protection, are demanded for dangerous equipments to minimize the serious damage of explosions, if they occurred unfortunately.

Venting explosion is one of the typical methods of protection and safety apparatus for this purpose are called "Explosion Reliefs". They are classified into two types according to the internal pressure of equipments to be used. Explosion reliefs for high pressures are known as Rupture Discs or Rupture Diaphragms, being attached to, for example, reactor vessels of chemical plant ; but their responsibility for rapid change of pressure, such as like explosion, are doubtful and further experiments must be performed. Another type of exlosion reliefs is called "Explosion Door" and it may be useful only for the internal pressure of near atmospheric. With this type, experimental data for practical use are very poor and we can see only a few cases of application. This report deals with the latter type of reliefs.

Experiments are carried out using a cubical steel vessel of 1 m^3 internal capacity, whose upper side is opened and flanges with various vent areas can be bolted to it. Flammables are L.P.G. (consisted mainly of propane and butane), pure propane and methyl alcohol vapour. They are mixed with atmospheric air respectively in the vessel, and having been made homogeneous by the use of rotary blower, the mixture is ignited through a nichrome wire heater set in the center of cubical vessel. Vent covers are vinyl sheet, craft paper and aluminium foil, each of their thickness being about 0.1 mm. Pressure-time relations are recorded by the system ; straingauge transducer-dynamic strain amplifier-electro-magnetic oscillograph.

Main results are as follows ; ——

(1) Vent ratio (ratio of vent area to volume of explosion vessel) and the ratio of vent area to cross section area of the side wall, to which explosion reliefs are attached, are important factors for the

* 第1回安全工学国内シンポジウム (May 1970) において発表
** 化学研究部 Research Division of Chemical Engineering

effectiveness of explosion reliefs.

(2) When vent ratio becomes smaller than certain value, pressure-time curve shows two evident peaks (p_1 and p_2) and as the vent ratio decreases the ratio p_1/p_2 increases.

(3) When 60 cm square vent area is attainable and if vent cover is the one that is easily broken by a slight pressure increase, maximum explosion pressure may be depressed under 1 kg/cm^2, and this value has been evaluated as the limit strength of many of the practical equipments of light construction.

These results are directly applicated for a commercial type of box dryer, and three tests using propane-air mixture showed that the designed explosion relief of aluminium foil type is effective under experimental conditions. The records of high speed photography show that the expelled unburned substances explode continuously just outside of the relief and the flame reaches as so far as 4 meters.

It is then concluded that safeguard for external explosion and the selection of setting site of equipments must be carefully dealt with.

1. 緒　言

閉鎖された空間内において可燃性のガス・蒸気あるいは粉体を処理する場合には，潜在的な爆発の危険性が多分に含まれていると考えなければならず，ひとたび爆発が起ればその破壊効果によって周囲の作業者や設備に多大の被害を及ぼすことになる。しかし，こうした危険なプロセスに使用される設備（装置，機器，容器，部屋など）の一部を故意に弱い構造とし，発生する爆発圧力をこの部分から安全に外部へ放出させることができれば，その設備の破壊はもとより周囲への影響も最少限度にとどめることが可能である．

爆圧放散孔はこうした原理にもとずいた爆発防護(protection) の方法のひとつであって，爆発の発生を未然に防ぐこと，すなわち爆発防止 (prevention) の手段をこうじたあとに考えられるべき性格のものではあるが，爆発被害の抑制という立場からみれば発生後の対策を必要とするケースが多いといえよう。過去における爆発災害のうちには，もし爆圧放散孔がとりつけられていたならば被害がずっと軽減されていたとみられる例が少なくない．

筆者らは爆圧放散孔の概念を導入することにより各種の設備の爆発による被害の抑制を検討しているが，まず最初にある型式の箱型乾燥機について実験を行ない一応の成果をえたのでここに報告する．

爆圧放散孔の適用が可能であると考えられる設備の種類は極めて多いが，それらのうちで特に乾燥機をとりあげたのはこの種の機器において爆発災害が多発しており，早急な解決策が要求されているからである．

実験は箱型乾燥機をモデル化した立方体容器を用いてまず予備的に行ない，この結果にもとずいて爆圧放散孔を設計し，これを実際の乾燥機にとりつけて爆発テストによりその安全性を確認するという順序で行なった。またこの報告では，特定の機種にある形状の爆圧放散孔をとりつけた場合について述べたが，その他の機種あるいは設備については今後研究を続け報告する予定である．

2. 爆圧放散孔の適用範囲

爆圧放散孔の構造は比較的簡単で，従って安価であり，その原理から考えて内部で爆発や異常反応による過圧力の生ずる恐れのある設備はすべて対象と考えてよいが，具体的には乾燥機，集じん機，貯蔵装置（サイロ等），運搬装置（コンベア，エレベータ等），攪拌・混合装置，ダクト類のほか反応釜，高圧容器等が挙げられる．爆圧放散孔はそれが有効に作動した場合の放出容量を充分大きくすることができるという点で，従来この種の目的に供せられてきているバネ式安全弁とは明確に区別され，またこの特性の故に設備内で生ずる圧力の時間的変化の大きい場合にも利用が可能である．

使用条件からは設備の操業時の内圧によって二種類に大別され，加圧下のものは安全破裂板・薄板安全弁などと呼ばれ大気圧付近の圧力下で使用されるものは

安全ドア・爆発扉等と称されている．前者はすでに化学装置の一部等に実用されているが，爆発のような急激な圧力変化に対して有効な応答性を示すか否かは充分確認されておらず，今後解明されるべき多くの問題を含んでいる．後者についても実際的なデータは殆んどなく，その使用例は極めて稀である．

本報で以下爆圧放散孔というのは後者の場合に限定する．

3. 乾燥機の爆発災害の発生状況

乾燥というプロセスは化学工業をはじめとする多くの製造業において何らかの形で生産に関与している重要な工程であるが，乾燥機のうちでも加熱源が可燃性のもの，除去対象が可燃性溶剤の蒸気であるもの，あるいは被乾燥物が爆発性物質や易燃性粉体である場合には，濃度・温度・点火源などに関して余程の安全性が保証されない限り爆発の危険性を免れることはできない．乾燥機の爆発災害の形態的特徴および被害の程度については他の報告[1),2)]によって明らかにされているが，これらの災害が比較的小規模な箱型乾燥機(回分式)において多発している傾向に留意せねばならない．

箱型乾燥機での事故が多いことはその使用頻度に関連するが，死傷者を生ずるという点については構造上の理由を無視できない．すなわちこの種の乾燥機はたいてい正面に被乾燥物の出し入れのための扉（片開きまたは両開き）を有し，扉の一方は蝶番で固定され，他方は簡単なストッパーにより本体にとりつけられている．機内に生じた圧力によりまずこのストッパーが変形・破損し，扉は回転しつつ開く．また圧力上昇速度が大きければ蝶番の部分が破損して扉が飛来する．一方，作業者は機体の正面で作業することが多く，スイッチ類やダンパ操作レバーの取付位置にも問題があり，結果として開いた扉に頭部などを強打されることになる．また機体の材質は厚さ 1～2mm，せいぜい 3mm 程度の鋼板であるから，爆発圧力に耐えられず機体の破壊を伴なうことも多い．

本報で実験の対象とした乾燥機（便宜上A型乾燥機という）は近年連続して爆発事故を起しており，昭和40年以降の人的被害は **Table 1** に示すように死傷者6名に達している．これらはすべて製薬会社で薬品の顆粒から溶剤を除去する工程での爆発である．事例5はA型乾燥機と同じ乾燥方法の乾燥機によるものである．A型乾燥機の構造の概略を **Fig. 1** に示す．フィルターを通してとり入れた空気を蒸気ヒータで加熱し，熱風はバケット底部の網目から入りバグフィルターを抜けてブロワーにより外部へ排出される．この間に被乾燥粉体はバグフィルター内部に舞い上りながら乾燥されるので，被乾燥物を静置する方法に比べて効率がよいのが特徴である．爆発を生じた点火源は顆粒（粉体）とバグフィルター間に発生した静電気によるものと考えられている．

Table 1 Case history of explosions concerning A-type dryer A型乾燥機による爆発災害発生状況

Case	Date		Manufa-ctory	Toll	
				Dead	Injured
1	Winter	1965	A	0	0
2	Autumn	1966	B	1	2
3	Summer	1967	B	0	2
4	Autumn	1967	A	0	0
5	Summer	1968	C	0	0
6	Spring	1969	A	0	1

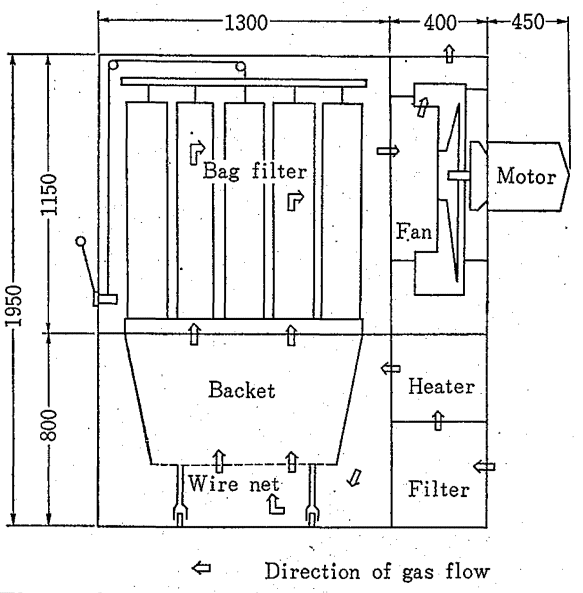


Fig. 1 Structural outline of A-type dryer (deapth 1350 mm) (refer to Figs. 2 and 14)
A型乾燥機の構造と寸法の概略

被害状況は一般の箱型乾燥機と共通することが多いが，Table 1 の事例3については次のとおりである．感冒錠剤用の顆粒からエチルアルコールを除去するため予備乾燥ののち乾燥機に入れ，扉を閉じてブロワーのモータのスイッチを押したあと排気ダンパのレバー

を操作した．この直後に機内で爆発が生じ，レバーを操作中の作業者は扉で顔面・頭部を打って重傷を，また噴出火炎により付近の作業者が火傷を負った．そのほか乾燥中にバグフィルターの目詰まりを除こうとしたときに爆発した例もあり，条件によっては排気ダクト中にまで爆発が伝播し，その他の設備や建物に多大の被害を与えた．しかし，いずれの場合にも扉が開くほかは機体に著しい損傷は受けなかった．**Fig. 2** に事故の一例を写真で示す．

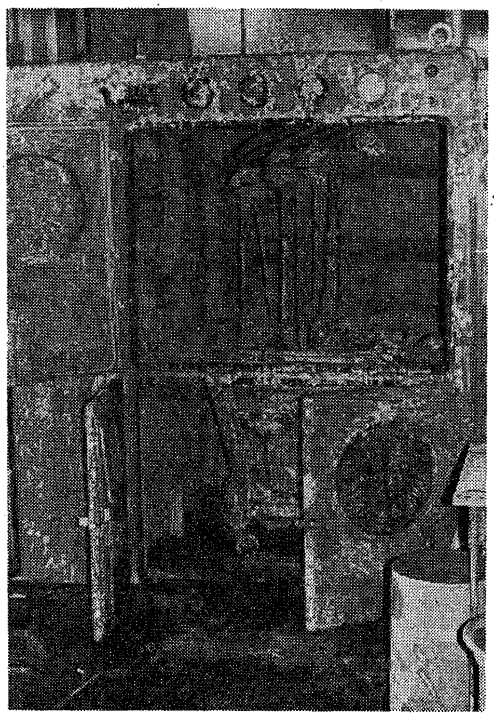


Fig. 2　An example of A-type dryer explosions
乾燥機爆発事故例

A型乾燥機は乾燥効率のよいこともあって製薬会社を中心に相当数使用されており，多少の危険性はあるにしても継続して使用されるのであろうし，従って爆発災害発生の可能性も大きい．一方，爆発防止策としては帯電除去や不活性ガスの利用などが挙げられるが，充分解決されないままに残されている．このような設備に対してこそ爆圧放散孔の応用が有効である．またA型乾燥機は主として厚さ 3.2mm の鋼板からなりアングルなどの補強があるので，一般の箱型乾燥機よりかなり強度がある（この強度を数値的に求めるのはむつかしいが，実際の爆発でも扉以外には殆んど異常がないことから確かめられる）と考えてよく，こうした設備に対する爆圧放散孔のとりつけは比較的容易である．

4. 研究の必要性

すでにのべたように爆圧放散孔により被害の抑制が可能である（換言すれば，爆圧放散孔の取付けが必要である）設備の種類は多く，そのうちの乾燥機だけを考えても形状・使用法など種々雑多である．これらの各々に適する爆圧放散孔を設けるに際しては種々の技術的な問題があり，法規[3]においても爆発の危険性ある乾燥機には爆圧放散孔をとりつけるよう定めているが，具体的な基準が明らかでないこともあってその応用例はまだ少ない．

従って，実験的裏づけにより安全な爆圧放散孔の設計方法を明確にし，実用化をはからねばならないが，我国におけるこの種の実験的研究は殆んどなく，最近これに関連した二，三の基礎的実験の報告[4),5)]がなされているにすぎない．

アメリカでは N.F.P.A. により爆圧放散孔全般に関する指針[6]が公表されているが，その対象範囲の広さとも関連して一般的概説にとどまり，個々の設備や条件にまでは言及されていないので直接的な応用には余り有効でない．イギリスでは Gas Council が中心となって乾燥機を具体的対象とする系統的研究[7),8)]を行なっており，参考となるところが多い．この研究では主として内容積 0.8～2.8m^3 の乾燥機中で都市ガス—空気混合物を爆発させ，各種の条件下で発生圧力を測定しているが，圧力値が 0.3kg/cm^2 程度であって他のデータに比して低すぎる値であることや爆発圧力の挙動について満足できない部分がある．こうした報告の他にダクトや円筒容器内の爆発の放出に関する報告[9)~12)]や爆発被害の抑制について全般的に解説した文献[13)~20)]は多いが，実験的データは極めて少ないといえよう．

筆者らは乾燥機の耐圧強度がせいぜい 1～2kg/cm^2（ゲージ圧）であると仮定し，設計上はこの値以下に圧力を抑えることのできる爆圧放散孔について実験した（ふつうの可燃性ガス・蒸気と空気の混合物の密閉状態での爆発圧力は 6～8kg/cm^2 程度である）．また，機内での爆発現象が同じであれば，爆圧放散孔の効果はその開口面積（あるいは開口比），開口部を覆う弱い構造部分であるベントカバーおよびその固定方法によって決ると考え，これらに関する考察を中心とした．

5. モデル容器による実験

5.1 実 験 装 置

実験に用いた内容積 1m³ の立方体容器(以下，角型容器という)，配管等の関係を **Fig.** 3 に，その取付状態を **Fig.** 4 に示す.

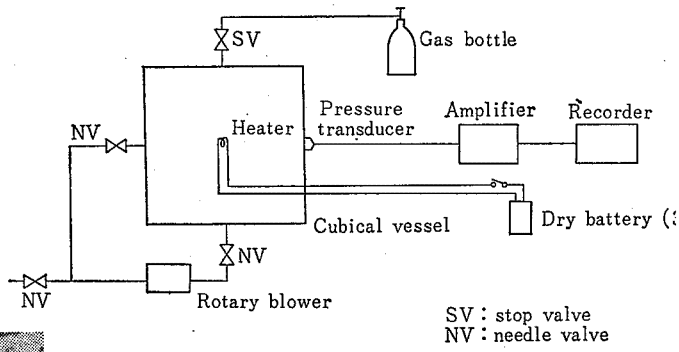


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparat
実験装置のフローシート

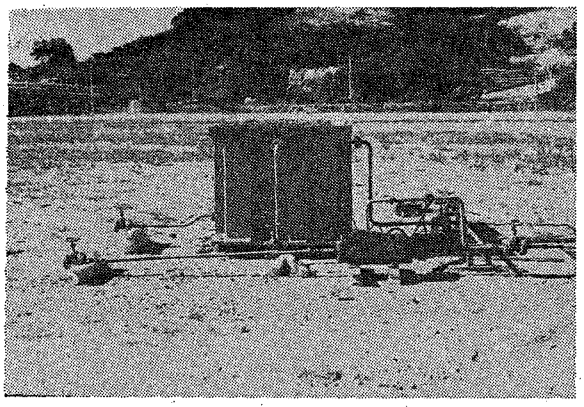


Fig. 4 Cubical vessel for explosion tests
角型容器実験状況

角型容器は上方が 1m² の開口部を有するフランジとなっており，これに各種の開口面積を有するフランジ(以下，開口フランジという)を取付け，容器フランジとの間にベントカバーをはさみこむ. 一部の実験では開口フランジに格子状の目を有するフランジ(以下，格子付フランジという)を重ねて用いたが，この場合には開口フランジに格子付フランジをボルト締めし，格子付フランジとその上の押えフランジとの間にベントカバーをはさんで実験に供した.

5.2 実 験 ガ ス

主として用いた可燃性ガスはいわゆる液化石油ガス(以下，L.P.G. という)で，このほか液化プロパン(プロパン含量 99vol. %以上のもの，以下，プロパンという)も用い，一部の実験にはメタノール蒸気を用いそれぞれ容器内において空気との可燃限界内の混合物を調整して実験に供した.

プロパンは，水素・アセチレンなど燃焼速度の特に大きいガスを除くふつうの可燃性ガス・蒸気を代表する特性を有し，L.P.G. はその主成分であるプロパンと爆発特性が酷似しており，乾燥機の熱源としてよく使用されるので実験ガスに選んだ. L.P.G. は同一ボンベのものを継続して用い，組成分析は行なわなかったが，別に密閉容器中での実験により爆発特性を把したのち用いた. **Fig.** 5 は，内容積 720cm³ の円容器(高さ/径=1.77)の中心で点火したときのL.P.G.空気混合物の最大爆発圧力，最大爆発圧力到達時間および平均昇圧速度を L.P.G. 濃度についてプロッしたものである. L.P.G. 濃度は干渉計型ガス検知(プロパン 0～10vol. % 用，有効室長 40mm)よる読みとり値であり，実験結果に示す濃度もこうた値である. Fig 5 には同じ条件におけるプロパの特性も併せてプロットした. これから明らかなよにある濃度の L.P.G.-空気混合物はプロパンの混物と同じような爆発特性を示すと考えてよい. 従っ

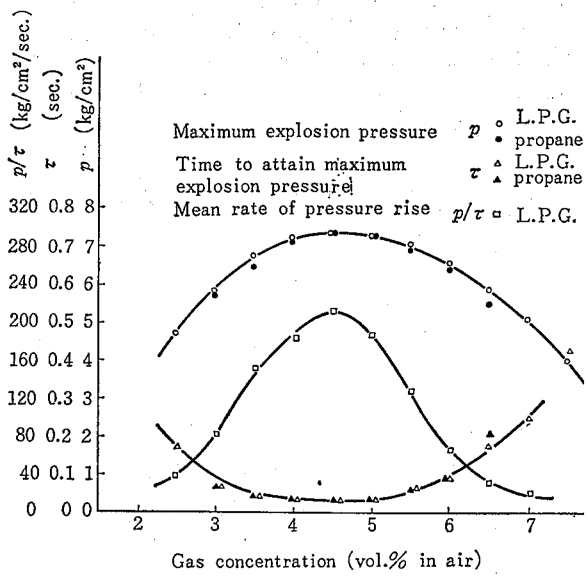


Fig. 5 Explosion characteristics of L.P.G. anc propane (in closed vessel)
密閉容器中における L.P.G. およびプロパンの爆発特性

ガス検知器によって L.P.G. のみかけの濃度を読みとる目的は分析ではなく，例えば最大爆発圧力を生ずる条件を求めるための手段であるにすぎない．

メタノールは乾燥工程における除去対象の例として選んだもので，実験は他のガスとの比較を目的として数回行なった．濃度は上述の検知器の読みとり値に係数を乗じて求めた．また，サンプリングには銅管を用いた．

5.3 爆発圧力測定装置

圧力の検出には PE-30KF 型抵抗線歪式圧力変換器を用い，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（ガルバノメータ固有振動数 1000Hz)により記録した．圧力較正は静圧で行ない，記録紙上の変位量は 1 kg/cm²/cm または 0.5 kg/cm²/cm とした．測定装置を **Fig.** 6 に示す．

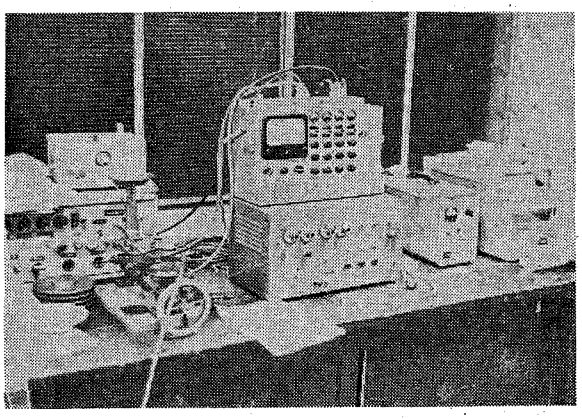


Fig. 6 Apparatus for pressure measurements
爆発圧力測定装置

5.4 ベントカバー，開口フランジおよび格子付フランジ

ベントカバーは開口部を覆うもので，実際の乾燥機では機壁の一部をなし，爆発が生じたときには開口部ができるだけ完全に露出し圧力が速かに放散されるものでなければならない．ベントカバーは材質と固定方法によって次のように大別できる．

（1） ベントカバー自体は破れるが取付部分は固定されたままの場合で，ベントカバーは圧力に対して弱い．

（2） ベントカバーは破損せず原形を保ったまま取付部分からはずれ（抜ける）場合で，鋼板の一端を蝶番で固定して回転しながら開くようにする方法も含まれる．

本報では前者についてのみ実験し，ベントカバーとしてはクラフト紙(厚さ 0.135mm)，ビニルシート(厚さ 0.1mm) およびアルミ箔（厚さ 0.1mm）を用いた．前二者は実験的観点から圧力が放散されやすいと考えられる材質として選び，アルミ箔は実際的応用が可能であるとして扱かった．これらは最も簡単な形のベントカバーである．

開口フランジは中心に一辺の長さが，50，60，75，80 および 95cm の正方形の開口を有するもので，後三者の厚さは 18mm，他のフランジは一辺 75cm の開口フランジにボルト締めして用いるもので厚さはいずれも 12mm である．開口部の切口角度はフランジ面に対して直角をなす．**Fig.** 7 は開口フランジにアルミ箔をとりつけて爆発させたあとの状態である．

格子付フランジは開口面積が 50cm 平方と 60cm

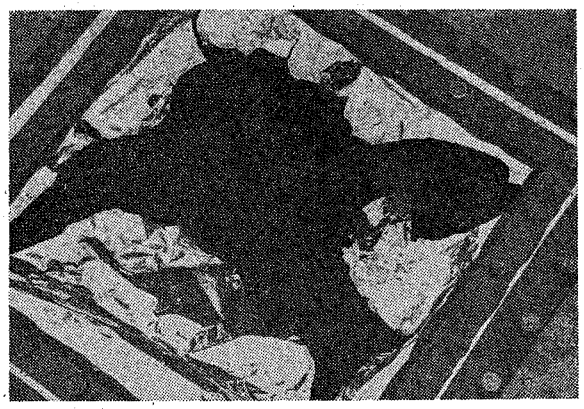


Fig. 7 Square-opend flange and aluminium foil broken by an explosion
開口フランジと爆発により破れたアルミ箔

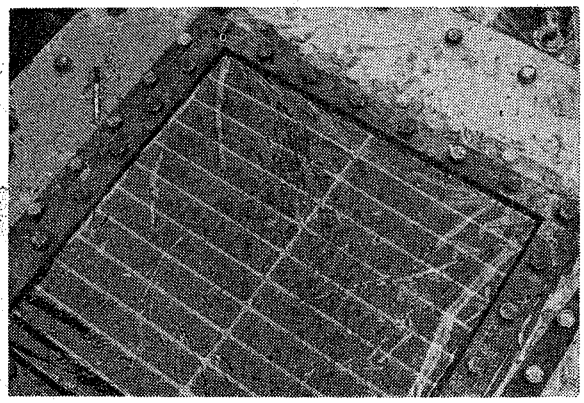
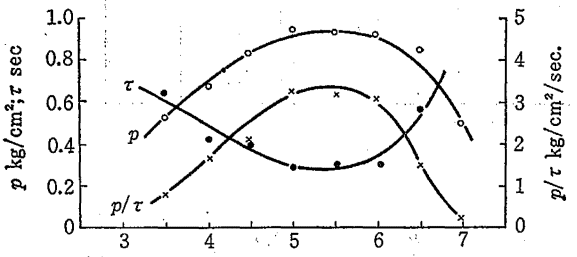
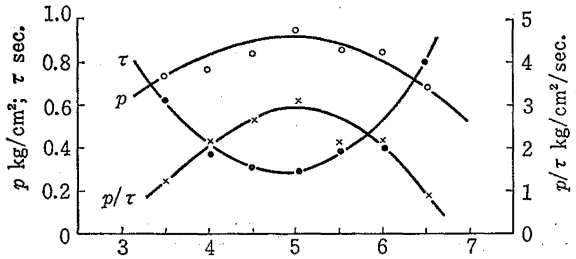


Fig. 8 Vinyl sheet attached to a latticed flange
格子付フランジに取付けたビニルシート

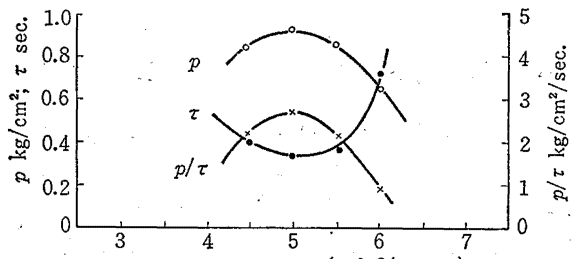
平方の開口フランジの上に重ねて併用するもので厚さ(高さ)は 50mm である．A型乾燥機のベントカバーとしてアルミ箔を使用するとしても，操業条件によっては機内が減圧となったり振動したりして破れる可能性があるので，その防止のためのサポートとして格子付フランジの安全性を検討した．実験では格子付フランジの上に押えフランジ(開口面積はそれぞれの開口フランジと同じ)をボルト締めし，両フランジ間にベントカバーをはさんだ．**Fig.** 8 は格子付フランジにビニルシートを取付けた状態を示す．格子の目の大きさは開口面積が 50cm 平方のときは約 5cm×25cm, 60cm 平方の場合は 5cm×30cm で，格子材の厚さは 5mm である．



(1) vent area: 75cm square, gas: propane, vent cover: craft paper



(2) vent area: 95cm square, gas: propane, vent cover: craft paper



(3) vent area: 80cm square, gas: L.P.G., vent cover: vinyl sheet

Fig. 9 Results of experiments under various conditions
種々の条件下における最大爆発圧力 (p), 最大爆発圧力到達時間 (τ) および昇圧速度 (p/τ)

5.5 実 験 方 法

所定のフランジとベントカバーを取付けたのち実験ガス(または溶剤)を角型容器内に送入(または注入)し，ブロワーを回転させて内部が均一濃度となるまで約5分間)攪拌し濃度チェックののち点火する．点火は容器中心のニクロム線ヒータを直流電源 (3V) で赤熱させて行ない，側面中央にとりつけた圧力変換器により爆発圧力の時間的変化を測定した．

6. 実 験 結 果

Fig. 9 には開口面積が比較的大きい場合において，開口面積，可燃性ガスおよびベントカバーが爆発圧力に与える影響を示した．これらの測定では爆発圧力波形は一般に **Fig.** 10 に示す形となり，Fig. 9 の最大爆発圧力，最大爆発圧力到達時間および平均昇圧速度はそれぞれ p, τ および p/τ で示される値と定義した．また殆んどの場合に波形の一部に振動がみられるが実質的な影響は小さいので無視した．

開口面積が減ずると Fig. 10 の振動部分はひとつのピークとしての明確な形をとるようになる．一方 Fig. 10 のピークに相当するものはやはり現われるので，波形にはふたつのピーク (p_1 および p_2) が存在することになる．その典型的な例を **Fig.** 11 に示す．実験条件によっては Fig. 10 から Fig. 11 の波形への過渡的状態がみられ，これらについては振動の中心を

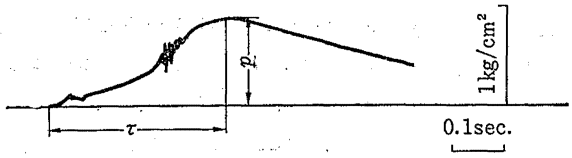


Fig. 10 Pressure-time record (single peak)
爆発圧力の波形 (単一ピーク)

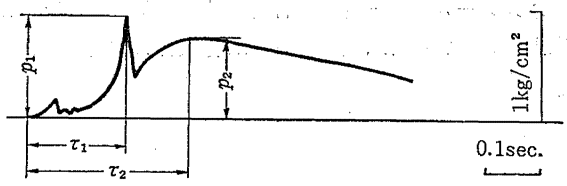


Fig. 11 Pressure-time record (double peak)
爆発圧力の波形 (二重ピーク)

Table 2 Peak pressures and rates of pressure rise (for L. P. G.)
種々の条件下における爆発圧力と昇圧速度 (L. P. G.)

Vent area cm²	Vent cover material	Latticed flange used or not	$\bar{p}_1$ kg/cm²	$\bar{\tau}_1$ sec	$\bar{p}_1/\bar{\tau}_1$ kg/cm²/sec	$\bar{p}_2$ kg/cm²	$\bar{\tau}_2$ sec	$\bar{p}_2/\bar{\tau}_2$ kg/cm²/sec	$\bar{p}_1/\bar{p}_2$	$\bar{p}_1+\bar{p}_2$ kg/cm²
60×60	vinyl sheet	not used	0.7	0.23	3.04	0.9	0.30	3.00	0.78	1.6
〃	〃	used	0.8	0.17	4.70	0.9	0.27	3.33	0.89	1.7
〃	aluminium foil	not used	0.8	0.15	5.30	0.8	0.25	3.20	1.00	1.6
〃	〃	used	0.7	0.16	4.38	0.7	0.28	2.50	1.00	1.4
50×50	vinyl sheet	not used	0.9	0.19	4.73	0.8	0.30	2.67	1.12	1.7
〃	〃	used	1.1	0 21	5.23	0.8	0.32	2.50	1.38	1.9
〃	aluminium foil	not used	1.0	0.15	6.68	0.8	0.28	2.86	1.25	1.8
〃	〃	used	1.0	0.21	4.76	0.8	0.33	2.43	1.25	1.8

Table 3 Peak pressures and rates of pressure rise (for methanol vapour)
種々の条件下における爆発圧力と昇圧速度（メタノール蒸気）

Concn. vol. %	Vent area cm²	Vent cover material	Latticed flange used or not	$\bar{p}_1$ kg/cm²	$\bar{\tau}_1$ sec	$\bar{p}_1/\bar{\tau}_1$ kg/cm²/sec	$\bar{p}_2$ kg/cm²	$\bar{\tau}_2$ sec	$\bar{p}_2/\bar{\tau}_2$ kg/cm²/sec	$\bar{p}_1/\bar{p}_2$	$\bar{p}_1+\bar{p}_2$ kg/cm²
12%	80×80	vinyl sheet	not used	—	—	—	0.8	0.40	2.00	—	—
13%	〃	〃	〃	—	—	—	0.9	0.49	1.84	—	—
14%	〃	〃	〃	—	—	—	1.0	0.47	2.13	—	—
8.5%	50×50	〃	used	0.9	0.15	6.00	0.8	0.31	2.58	1.12	1.7
10.5%	〃	alminium foil	〃	1.1	0.18	6.11	0.7	0.29	2.41	1.57	1.8
11%	〃	〃	not used	0.9	0.17	5.30	0.8	0.28	2.86	1.12	1.7

通る曲線をもって爆発圧力波形とした.

Table 2 は開口面積が 50cm 平方および 60cm 平方のとき，ベントカバーにビニルシートとアルミ箔を用いた実験の結果であり．各条件で格子付フランジを取付けた結果も併せて示した．使用ガスは L. P. G. で，各々5回の測定の平均であるが，濃度 4.6～5.1% では濃度依存性はわずかである．$\bar{p}$, $\bar{\tau}$ 等は平均を意味し，p_1, τ_1, p_2, τ_2 は Fig. 11 に定めた値である.

メタノール蒸気-空気混合物の爆発に関する結果は **Table 3** に示すが，測定回数は各条件につき 1～2 回である.

7. 考　察

7.1 実験ガスの濃度と爆発の激しさの関係

爆圧放散孔の研究においては，最大爆発圧力と昇圧速度の両者が爆発の激しさを定量的に評価する際の尺度となる．密閉容器内での爆発においては最大および平均昇圧速度は相互に近似的な比例関係にあると考えてよいが，この実験でえられたような爆発圧力の波形についても同様であるか否かは詳細な検討を要するので，本報では便宜上平均昇圧速度をもって昇圧速度とした.

可燃性ガス・蒸気と空気の混合物の爆発圧力は他の条件が一定ならば濃度によって変化し，ある濃度で最

大値に達する．この濃度は密閉容器中では当量濃度よりやや高目となる．当量濃度とは完全燃焼のために過不足ない酸素量を含むときの濃度であって，プロパン-空気混合物では約 4.0 vol. % である．Fig. 5 に示したようにプロパンの爆発圧力は 4.5% 付近で最大であり，最大圧力に達する時間もこの濃度で最少値をとるので昇圧速度は 4.5% 付近で最大となる．換言すればこうした結果のえられた条件下では空気中に 4.5% のプロパンを含む混合物が最も激しい爆発を呈することになる．

メタノールの当量濃度は空気中で 12.2 vol. % であり，最大爆発圧力を与える濃度は 15% 付近と考えられる．蒸気圧から逆算すればこの濃度がえられるのは約 20°C においてであるが，実験ではこうした濃度をえることができなかった．

密閉密器中での爆発圧力，昇圧速度などはプロパンとメタノールに余り大差はなく[6]，温度条件が同じであるならば，実験的には例えばプロパンでテストして有効な爆圧放散孔はメタノールに対しても適用されると考えることができる．

次に，爆発が外部に放散される場合はどうであろうか．Fig. 9 の各曲線のピークは 5.0% あるいはそれより高濃度側にあることから，密閉状態より高い濃度での爆発が最も激しいとみられる．この確認のためには更に実験を要するが，次の爆発圧力の波形の項でふれるように二次的な爆発が生ずると仮定すれば説明が可能である．すなわち，ベントカバーは極く弱い*1 ので爆発により容器内の圧力がわずかに上昇しただけで破れ，未燃ガスの一部は外へ放出される．これが外部の空気と混合して開口部周辺で爆発するため容器内の圧力が上昇すると考えられる．

また，このような観点に立てば，爆圧放散孔は圧力を放散するというより，まだ爆発の完了しないうちに未燃ガスを外部に放出させる（可燃物の絶対量が減ずる）という機能により圧力を低く抑えることができるとも解釈されよう．

7.2 爆発圧力の波形

爆発を外部に放散させるときの特徴ある波形はすでに示したが，条件によって少しずつ異なり，**Fig.** 12 に示す4つの型に分類できる．

Fig. 12（a）は開口面積が 75 cm 平方より大きい場合にみられ，60 cm 平方でも格子付フランジがないときに一部この波形となった．これとよく似た波形は密閉容器中で爆発限界付近の濃度の混合物の爆発に際して生ずることがある．開口面積を減ずると（b），（c）の波形をとり，これは格子付フランジのない場合の結果である．波形（d）は格子付フランジのある場合にみられ，ベントカバーがアルミ箔であれば格子付フランジの有無に関係なく，常にこのような明確なふたつのピークが記録された．ふたつのピークの発生は主として開口面積によると考えられるが，開口比（容器内容積に対する開口面積の比）よりむしろ容器断面積と開口面積の比に依存するようである．この実験（断面積一定）ではその点についての検討は行わなかった．

また，ふたつのピークが生ずる理由としては現時点では次のような説明が可能である．

立方体容器の中心で発火が起ったとすれば，球状に近い状態で広がる火炎の伝播に伴なう燃焼生成物の膨脹によって内部の圧力は増加し，ベントカバーの強度とつり合ったところでベントカバーは破れ，内部の気体は放出されて第1のピークは急速に下降する．しかし燃焼反応は続行しているので圧力は大気圧にまで下ることはない．また，ベントカバーが破れるまでに反応が終了しているわけではなく，容器内には未燃ガスが残っており，これが大気中に一部分放出される．一方，放出されなかった未燃ガスは反応を続行する．しかしながら開口部を有する容器中での爆発であるから圧力の上昇速度は小さい．このとき，外部に放出された未燃ガスは部分的に周囲の空気によって希釈されながら二次的な爆発を生じている．この生成物は当然大気中に逃散するが，容器内へ向う気体

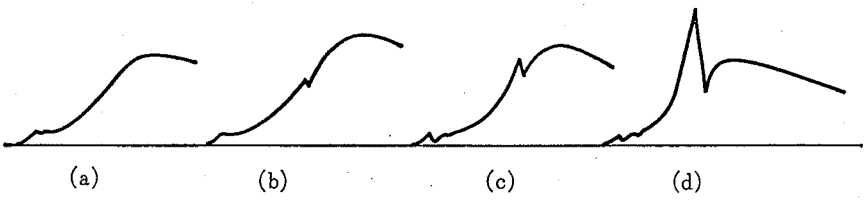


Fig. 12　Various phases of pressure-time records
爆発圧力波形の種々相

* 1　角型容器にとりつけた状態で内部に空気圧を加えたときの破裂圧力はビニルシートで 0.03kg/cm², クラフト紙で 0.04～0.06 kg/cm² のオーダである．また別の方法によって求めたアルミ箔の破裂圧力は約 0.1kg/cm² である．

の流れもあるので容器内の反応生成物の放散を妨げる結果となり，第2のピークの形成が助長される．これらの反応により未燃ガスがすべて費消されれば爆発は終了し，圧力は減少する．

7.3 爆発圧力に及ぼす開口面積およびベントカバーの影響

Fig. 9 から明らかなように，開口面積が 70cm 平方以上で，ベントカバーがビニルシートあるいはクラフト紙のときには最大圧力はほぼ一定である．換言すれば，こうした条件下では開口面積とベントカバーの影響は小さい．

開口面積が減ずると発生圧力が増し，ふたつのピーク圧力を生ずるので事情は変わってくる．第1および第2のピーク圧力を p_1, p_2 とすれば，開口面積が 60cm 平方では p_1 は 0.7～0.8 kg/cm^2 であり，ベントカバーや格子付フランジの有無にはあまり関係しないが，$p_1/p_2 \leqq 1$であってp_1+p_2がほぼ一定値をとる．開口面積がさらに減じて 50cm 平方となってもベントカバーと格子付フランジの影響はほとんどみられないが，p_1 は 0.9～1.1 とやや高くなり，$p_1/p_2>1$ なる逆転が生ずる．また p_1+p_2 が一定という関係は持続されるが，この和は 60cm 平方の開口部の場合よりやや大きい値となる．

このように，実験の範囲内では爆発圧力はベントカバーの材質や格子付フランジの有無にあまり影響されず，開口面積の効果が最も大きいことがわかった．最大圧力到達時間および昇圧速度に関してもほぼ同様のことが言えよう．

8. A型乾燥機に対する爆圧放散孔の設計

角型容器における実験の結果，開口面積・ベントカバー・爆発圧力の関係が把握できたがこれらの結果をA型乾燥機（以下，実機という）に応用するに当たって，容器の大きさが増すことによるスケール・アップの効果は別としても次のような疑問が生ずる．

（1） 実機の耐圧強度はどの程度か．

（2） 有効な爆発空間はいくらくらいと評価すればよいのか．

（3） 実際の操業条件との差異はどう考えるか．

その他細部にわたって検討すべき項目はいくつもあるが，角型容器での結果をできるだけそのままの形で利用することを原則とするためにできるだけ単純化して考え，爆圧放散孔の設計は次のように行なった．

（1） 実機の耐圧強度は 2 kg/cm^2 以上となるような補強を施すこと．

（2） 爆発事故では正面扉（Fig. 2 参照）の上部のみが開いたことを考え合わせて，実質的な爆発空間はバグフィルター収納部であると仮定し，バグフィルターを取除いた空間を放散の対象とする．

（3） 爆圧放散孔の位置は正面を除くすべての面に取付可能であるが，上部はバグフィルター用金具があり，右側面はファン・ヒータなどがあるので利用できず，放散後の噴出火炎の安全性と設置場所の関係などから本実験では背面（扉の反対側）とした．この場合，圧力放散の方向が角型容器での実験とは異なるが，大きな差異はないと仮定した．

（4） ベントカバーはアルミ箔とし，格子付フランジを用い開口部は正方形とする．

爆発空間が増した場合に開口面積をどのような割合で増加させればよいかは実用上重要な問題であるが，ふつう開口比（爆発空間の容積に対する開口面積の割合）の概念が用いられるのでここではこの方法によって開口面積を算出した．この際，発生圧力を 1 kg/cm^2 以下とすることが条件である．

実機の外形寸法から算出した内容積は 2.03 m^3 であるが，機壁材や補強材の分を差引いて有効な空間は 2 m^3 とした．角型容器での実験によれば開口面積が 60 cm 平方であれば発生圧力は 0.9 kg/cm^2 以下に抑えられ，これを 2 m^3 の容積に換算すれば 60×60×2＝7200 cm^2 となり，一辺約 85 cm の正方形の開口部を設ければよいことになる．この数値にもとずき，製作上の都合など*2 も勘案した結果，実機の開口面積は 90 cm 平方としこれに目のあらさ約 5 cm×30 cm の格子付フランジをとりつけることとした．アルミ箔（厚さ 0.1 mm）を格子付フランジと押えフランジの間にはさんで使用することは先の実験と同様である．

---

*2 ファンの部分の爆発空間が幾らか加わること，側面への放散のほうが上方放散よりも困難ではないかなども併せて考えた．

Table 4 Result of experiments with A-type dryer
実機における実験結果

Concentration of L.P.G. vol. % in air	Maximum explosion pressure kg/cm²	Time to attain maximum explosion pressure sec.	Mean rate of pressure rise kg/cm²/sec	Maximum strian ×10⁻⁶	
				+	−
4.5	0.7	0.51	1.38	140	100
4.8	0.7	0.43	1.63	126	95
5.0	0.9	0.40	2.25	85	65

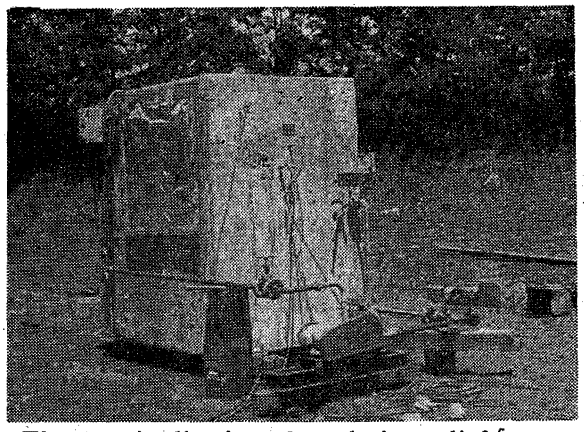


Fig. 13 Application of explosion relief for A-type dryer
実機に対する応用実験

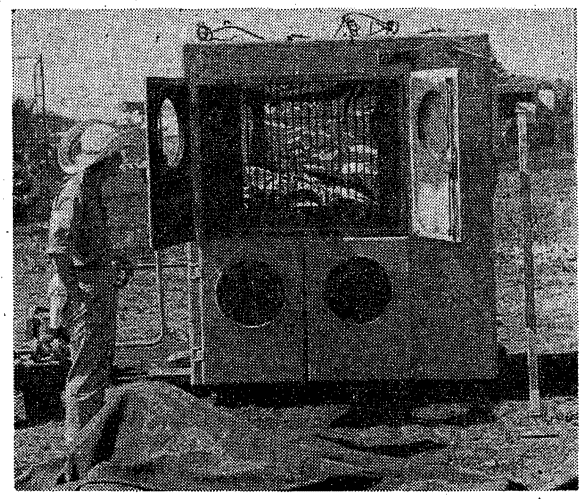


Fig. 14 Front view of A-type dryer
実機の正面写真

9. 実機における実験，結果および考察

実験方法は角型容器での実験と同じであるが，使用ガスは L.P.G. であり，爆発圧力のほかに機壁に生ずる歪量の時間的変化も測定したが，歪ゲージは単軸のベークライトゲージ (KB-6-A_1-11) で側面のほぼ中央に水平および垂直方向に接着した．歪量の測定は爆発圧力と同じ装置によって行なった．

Fig. 13 には実験状況を，**Fig.** 14 には実機の正面写真を示す．爆発実験は3回行ったが，その結果を **Table** 4 に示す．また **Fig.** 15 の一連の写真記録は機内爆発によってベントカバーが破れたのち外部で爆発が継続する状態を HIMAC-16H 型カメラにより高速度撮映したものの一部であって，各コマの時間間隔は 50 msec. (50/1000 sec.) である．

実験ではアルミ箔はいずれもフランジ固定部付近の一部から切断し有効な爆圧放散孔として作動した．この結果，実機には何らの実質的変形を認めず，弾性限界内でわずかの歪を生じたにすぎない．扉は開かず，扉ののぞき窓には金網入ガラスとアクリル板をはめこんでおいたがいずれも異常はなかった．

爆発圧力は予想どうり 0.9 kg/cm² をこえず，ピークは Fig. 10 に近い波形でひとつしか生じなかった．Fig. 11 にみられる第1のピークは，爆圧放散孔をとりつける断面の大きさに対する開口面積の比によって高い値であったり，全くピークとしての形をとらなかったりすると考えられるが，この観点に立てば実機の開口面積は断面 1 m 平方につき 74 cm 平方となり，角型容器において 75 cm 平方の開口面積を用いた場合にほぼ近くなることから，実機での結果に第1ピークの生じないことが理解される．

最大爆発圧力に達するに要する時間が角型容器の場合より長くなるのは容器の大きさの効果によるものであろう．

このように，実験した条件では実機の爆圧放散孔は有効に働らいたが，実際の使用条件とは異なる点が多く，かつそれらの因子は危険性を増す側に働らくと考えた方がよく，安全上十分な考慮を必要とする．例えば温度であるが，乾燥機内はその効率上かなり高温でなければならず，爆発が起ったときの火炎の伝播速度

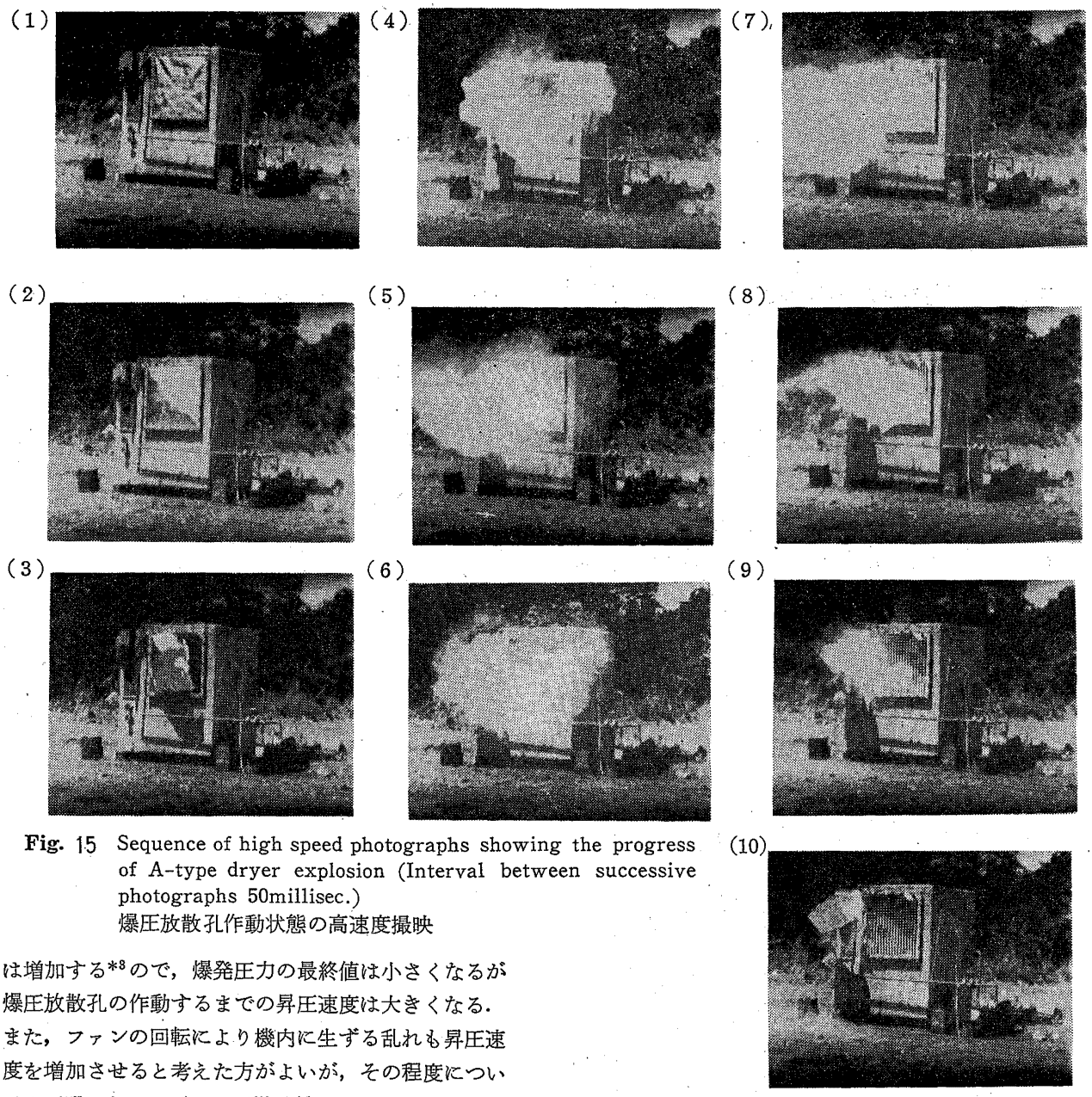


Fig. 15 Sequence of high speed photographs showing the progress of A-type dryer explosion (Interval between successive photographs 50millisec.)
爆圧放散孔作動状態の高速度撮映

は増加する*3ので，爆発圧力の最終値は小さくなるが爆圧放散孔の作動するまでの昇圧速度は大きくなる．また，ファンの回転により機内に生ずる乱れも昇圧速度を増加させると考えた方がよいが，その程度については不明である．更に，可燃性粉体が共存するときの挙動についてはデータ[21]も少ないので明確な予想はできず，今後の研究にまたねばならない．しかし，乾燥機内が最も危険な濃度の可燃性混合ガスで均一に満たされる確率が実際的には極めて小さいのは事実であり，また事故例からみても，除去すべき溶剤蒸気の濃度は操業開始後数分の間に最大値に達し，このあと時間とともに減少するようであるからこのことを防止対策上利用できそうである．

次に，爆圧放散孔の実用上重要なのは放出される熱ガス（未燃物を含む）の処理であるが，これと関連して建屋の壁面が放散面に近すぎることは圧力の放出が妨げられるので好ましくない．また，実験した乾燥機は内部に棚などの固定物がないので爆圧放散孔は簡単な形でよいが，そのほかの構造に対しては全く別の考え方が適用されねばならない．

このように実験条件と操業条件に違いがあり，かつその差異によって生ずる危険性の定量的な評価が困難

* 3　燃焼速度は一般に絶対温度の 1.5 乗に比例するとされており，例えば 27℃ および 100℃ における燃焼速度を So および S とすれば $S=So\ (373/300)^{1.5}=1.38\ So$ となる．

である現状では，爆圧放散孔の安全性を過大に見積ってはならない．従って，この種の乾燥機において例えば静電気による着火の可能性が大きいと認められているならば帯電防止策をたて，溶剤蒸気の発生が爆発の原因ならば予備乾燥を十分にすることや一時的に不活性ガスを送入する方法など，爆発防止の技術を開発する考え方が必要である．

10. 結 言

箱型乾燥機に対する爆圧放散孔の応用を目的としてモデル化した立方体容器を用いて実験し，その結果にもとずいて設計した爆圧放散孔をある型式の乾燥機にとりつけてその安全性を確認した．ベントカバーとしてクラフト紙，ビニルシート，アルミ箔などの破れやすい材質を用い，プロパン，L.P.G. などと空気の混合物を爆発させ，その圧力を外部に放出させる場合についてえられた主な結果は次のとうりである．

(1) 最大爆発圧力を生ずる濃度は，密閉容器中での結果よりいくらか高濃度側に移行する．

(2) 爆圧放散孔の有効性を支配する因子のうちで重要なのは，爆発空間に対する開口面積の割合（開口比）と，爆圧放散孔をとりつける面の断面積に対する開口面積の割合であって，いずれも大きいほど安全側へ傾く．

(3) ベントカバーが弱いものであるならばその材質の影響は小さく，また目のあらい格子をベントカバーの内側に取付けても結果にあまり影響はない．

(4) 開口面積の割合がある値以下になると，爆発圧力の波形は二つのピークを示すようになる．第1のピーク圧力は時間的変化が大きく，機体などの破壊に実質的に影響するのはこの圧力と考えてよい．開口面積の減ずるにつれて第1ピークと第2ピークの圧力値の比は大きくなる．

(5) 最大爆発圧力は開口面積の増加とともに減じ，爆発空間 1 m^3 あたり 60 cm 平方以上の開口面積を有する弱いベントカバーを用いれば，爆発圧力を 1 kg/cm^2 以下に抑えることができる．

(6) 爆圧放散孔は爆発の終了しないうちに圧力を外部に放出するため，これに伴ってかなりの量の未燃物を放出し，外部で爆発が継続すると考えねばならない．実機での実験でこうした爆発の火炎は水平方向に 4 m も広がった．故に，放出気体の安全な処理は実用上重要な課題である．

(7) ある一定条件下において有効な爆圧放散孔は実際の操業条件下での安全性を必らずしも十分に保証するものではない．従って，爆発防止対策はいかなる場合においても常に先決問題である．

参 考 文 献

1) 野々村真一，“乾燥器の爆発事故”，安全工学，Vol. 4, No. 1, 79 (1965)
2) 林 年宏，“乾燥機の爆発災害と防止上の問題点”，第 27 回全国産業安全大会研究発表集，pp. 258～261, 中央労働災害防止協会 (1968)
3) 労働安全衛生規則第二編第 10 章“乾燥設備”第 157 条 (1966)
4) 赤羽周作ら，“L.P.G. の爆発防止に関する実験”，第 58 回安全工学研究会予稿 (1967)；“容器の開口面積と L.P.G. の爆発圧力との関係”採鉱と保安，Vol. 13, No. 7, 9 (1967) および高圧ガス，Vol. 5, No. 2, 21 (1968)
5) 香月収ら，“メタンガス爆発における爆発部の容積，開口面積等の影響に関する研究”，採鉱と保安，Vol. 14, No. 5, 1 (1968)
6) National Fire Protection Association, “Guide for Explosion Venting”, National Fire Code Vol. 9 (1964)
7) Cubbage, P. A. and Simmonds, W. A., “An investigation of explosion reliefs for industrial drying ovens. Part 1. Top reliefs in box ovens. Part 2. Back reliefs in box ovens : reliefs in conveyor ovens”, Gas Council Research Communication Nos. GC 23 (1955) and GC 43 (1957)
8) Simmonds, W. A. and Cubbage, P. A., “The design of explosion reliefs for industrial drying ovens”, 1st symposium*, pp. 69～77

9) Rasbash, D.J. and Rogowski, Z.W., "Relief of explosions in duct system", 1st symposium, pp. 58～68

10) Rasbash, D.J. and Rogowski, Z.W., "Gaseous explosions in vented ducts", Combustion and Flame, Vol. 4, No. 4, 301 (1960)

11) Burgoyne, J.H. and Wilson, M.J.G., "The relief of pentane vapour-air explosions in vessels", 1st symposium, pp. 25～29

12) Rasbash, D.J. and Rogowski, Z.W., "Relief of explosions in pentane/air mixtures moving in a straight unobstructed duct", 2nd symposium**, pp. 21～28

13) Hartmann, I. and Nagy, J., "Venting dust explosions", I/EC, Vol. 49, No. 10, 1734 (1957)

14) Merewood, D.W., "Industrial explosion protection", Brit. Chem. Engng., Vol. 3, 188 (1958)

15) Mullins, B.P. and Penner, S.S., "Explosions, Detonations, Flammability and Ignition", pp. 270～271, Pergamon Press (1959)

16) "Guide for the use of flame arresters and explosion reliefs", Safety, Health and Welfare New Series No. 34, Ministry of Power, H.M.S.O. (1965)

17) Maisey, H.R., "Gaseous and dust explosion venting", Chem. and Process Engng., Vol. 46, No. 10, 527 and No. 12, 662 (1965)

18) Long, V.D., "Estimation of the extent of hazardous areas round a vent", 2nd symposium, pp. 6～14

19) Munday, G., "The calculation of venting areas for pressure relief of explosions in vessels", 2nd symposium, pp. 46～54

20) Rasbash, D.J. and Stretch, K.L., "Explosions in domestic structures", The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineer, Vol. 37, 141 (1969)

21) Grabowski, G.J., "Suppression by design", Chem. Engng. Prog., Vol. 61, No. 9, 38 (1965)

---

* Proceedings of the first symposium on chemical process hazards with special reference to plant design. The Institution of Chemical Engineers, London (1960)
難波桂芳ら訳, "化学プロセスの災害防止 1" 共立出版 (1967)

** Proceedings of the second symposium on chemical process hazards with special reference to plant design. The Institution of Chemical Engineers, London (1964)

(昭和 45 年 6 月 10 日受付)

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-19-1

昭和 45 年 7 月 30 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—4512番（代）

印刷所　新日本印刷株式会社

郵便番号 180—04

UDC 614.838

爆圧放散孔に関する研究（第1報）

—熱風流動式箱型乾燥機に対する応用について—

田口　昇・鶴見平三郎・林　年宏・松井英憲

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-19-1，1～14（1970）

密閉された状態で可燃性ガス・蒸気あるいは粉体を取扱かう設備に爆圧放散孔をとりつけることは，万一爆発が生じたときの被害を最少限度に抑えるための方法として有効である．本報では爆圧放散孔の設計データをえるために，1m 立方の容器中で L.P.G.，プロパンおよびメタノール蒸気と空気との混合物を爆発させ，ベントカバーの材質と開口面積とが最大爆発圧力に与える影響を検討した．更にこの結果にもとずき実際の箱型乾燥機に対してアルミ箔をベントカバーとする爆圧放散孔を設計し，実験によりその効果と安全性をテストした．

（表 4，図 15，参 21）

UDC 614.838

Experimental Study on the Methods of Explosion Venting (First Report)

—Application for a Certain Type of Commercial Box Dryer—

N. TAGUCHI, H. TURUMI, T. HAYASHI and H. MATUI

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-RR-19-1, 1～14(1970)

Venting explosion is one of the effective methods for the protection of equipments used in hazardous processes dealing with flammable gases, vapours and dusts. To obtain useful data for the design of explosion reliefs, experiments are carried out using a cubical vessel (1 m^3 inner capacity), in which explosive mixture of L.P.G., propane or methanol vapour with air is ignited at the center. The change of explosion pressure with time is recorded, and the effects of vent cover material and vent area are estimated. Then, certain type of explosion releief is designed for a commercial type of box dryer, and its effectiveness is tested through experiments.

(4 Tables, 15 Figures, 21 References)