UDC 536.46：614.838：621.31-213

プロパン，エチレン及び水素の爆発特性の比較
—防爆電気機器の試験方法への応用を含めて—

林　年宏* 田中隆二** 坂主勝弘***

Explosion Characteristics of Mixtures with Air of Propane, Ethylene or Hydrogen
—with Special Reference to Testing Method for Flameproof Enclosure of Electrical Apparatus—

by Toshihiro HAYASHI*, Ryuji TANAKA** and Katsuhiro SAKANUSHI***

Explosion characteristics of mixtures with air of propane, ethylene or hydrogen are studied in three cylindrical vessels of the same length/diameter ratio. The flammable mixtures are ignited at one end of each vessel, and the maximum explosion pressure attained (P_m), the time to attain the maximum pressure (t_m) and the average rate of pressure rise (P_m/t_m) are determined for a wide range of flammable content under atmospheric pressure ; further tests are carried out under elevated pressure conditions for hydrogen-air mixtures only.

The general tendencies of P_m, t_m and P_m/t_m in relation to flammble gas content are those as predicted, although their numercial values have been scarcely reported except for maximum pressures for nearly stoichiometric mixtures. Pressure rise time (t_m) can be related to the size of vessel, and the present result shows that the equation proposed by Zabetakis for the prediction of t_m may not be applied to larger vessels, even when stoichiometric mixtures of saturated hydrocarbon are ignited at the center of spherical vessel. The prediction of t_m for such gases of higher burning velocity as ethylene or hydrogen may be often desirable in practical situations, and thus the relation between t_m and the distance from ignition source to vessel wall is formulated for several mixture compositions.

Effect of initial pressure (P_i) on P_m is determined for the hydrogen mixtures, and P_m is always proportional to P_i irrespective of hydrogen content. Some statistical treatments lead to a conclusion that the prediction of P_m is possible for a wide range of hydrogen content and for the variation of initial pressure, based on a few tests made with some selected compositions under atmospheric and elevated pressures. P_m/t_m proves to be proportional to P_m, thus to P_i, which implies that the dependency of t_m on P_i can be considered negligible.

The results of these discussions are applied to compare the characteristics of flammable mixtures specified in the IEC standard to be used in the tests of a flameproof enclosure of electrical apparatus.

Keywords : Gaseous explosion, Conbussion characteristics, Explosion prevention, Electrical apparatus.

* 化学研究部 Chemical Safety Research Division, **電気研究部 Electrical Safety Research Division, ***電気研究部（現．産業安全技術協会） Presently with the Technical Institution of Industrial Safety

1. 緒　言

密閉容器中において可燃性ガスと空気との混合ガスを爆発させたときに生ずる最大圧力や圧力上昇速度は，ガス爆発の危険性の評価などに際して必要な基本的特性であるが，公表されたデータは意外に少ない。最大圧力や圧力の上昇過程を推算する計算式も知られているが[1]，実際的な目的のためには実測値を用いることが多い。空気との混合ガスにおける最高爆発圧力*1は多くの可燃性ガス（以下，単にガスということがある）について実測されているが，それぞれのガスの混合組成の変化による最大圧力の変化や，同一条件下における各種ガスの爆発特性の比較に関する実験値は見当たらない。多数のガスについて組成と爆発特性の関係を求めたEastman Kodak社のデータ[2]はよく参照されるが，混合ガスの温度が高い（150°F，約339K）ので常温下での挙動を論ずる場合にそのまま利用することができない。本報では，プロパン，エチレン及び水素について，それぞれ空気との混合組成を変えて常温下における爆発特性を実験的に求め，容器の大きさと爆発特性の関係などについて検討した。本報では，後述する混合ガスの爆発特性の比較を当面の目的として三種類のガスを選んだものであるが，可燃性ガスを燃焼速度などをもとに三つのグループに分類して危険性を評価するという考え方に従えば，実験に用いたガスはそれぞれのグループを代表するとされているものであり，得られた結果は一般的にも利用価値があるものと思われる。

ところで，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，その内容積及び対象とする可燃性ガス・蒸気の種類に応じて所定の爆発圧力に耐えることが要求され，この強度を確認するための爆発強度試験は（アセチレンなどを対象とするごく一部の機器を除けば）我国では水素一空気混合ガスを用いて行うこととなっている[3]。最近，防爆機器の構造や試験方法に対する国際規格の制定や改正がInternational Electrotechnical Commission（国際電気標準会議，以下IECと略す）において急速に進められ，我国の関係規格もこのIEC規格へ整合させる必要性に迫られている。上記の爆発強度試験に関するIEC規格の特色の一つは，電気機器のグループA，B及びCに応じて，それぞれ異なる種類の混合ガスを用いて試験すると定めていることである[4]。すなわち，IEC規格に従うとすると，現在我国で水素を用いて試験している機器に対して，プロパン，エチレン又は水素の三種類のガスを使い分けて試験するということになり，試験実施上の種々の煩雑さは避け難い。一方，耐圧防爆構造の電気機器がその内部で生じた爆発に耐えるか否かという観点からすれば，基本的には，爆発により生ずる最大圧力と圧力の上昇速度（以下，昇圧速度という）の二つの爆発特性が関係する。IEC規格で水素以外の試験ガスは，プロパン4.6±0.3%及びエチレン8.0±0.5%（濃度はいずれも空気中のvol.%，以下同じ）であるが，これらの混合ガスとそれぞれ同等の爆発特性を示す水素一空気混合ガスが得られれば，試験ガスとしては水素のみを用いて爆発強度試験を行えることになる。本報では，プロパン，エチレン及び水素の三種類のガスの爆発特性の実測値をもとに，IEC規格で定めると等価な試験を水素一空気混合ガスを用いて行う方法についても検討したが，これは一般的に言えば，二種類の混合ガスの爆発特性が等価となる条件を求める方法を示すことにほかならず，こうした手法については従来ほとんど研究されていない。

実験は常温・大気圧下で行ったが，水素については組成を変化させた場合のほかに，混合ガスの初期圧力（以下，初圧という）を大気圧より高くした場合についても実験した。

2. 爆発特性の比較方法

単純な形状の密閉容器中における混合ガスの爆発圧力の時間的変化を，初圧が大気圧の場合についてモデル的に示したのがFig. 1である。図中のP_m（最大圧力），t_m（点火後最大圧力に達するまでの時間；以下，昇圧時間という）及び昇圧速度を，一般に爆発特性と呼んでいる。昇圧速度としては，最大昇圧速度（圧力一時間曲線の変曲点における勾配）と平均昇圧速度（P_m/t_m）が定義されているが，本報では後者を用い，この値とP_mによって爆発特性を示した。すなわち，異種の混合ガス相互間の爆発特性の比較に際しては，P_mとP_m/t_mが等しければ両者の圧力一時間曲線は同一の形状とみなすことにする。

一般に，混合ガスの組成によってP_m及びt_mは変化し，従ってP_m/t_mも変化するが，変化の様相はガスの種類に

*1　ある組成の混合ガスの爆発により生ずる圧力の最大値を，本報では最大爆発圧力（又は最大圧力）と呼ぶ。また，組成を変えると最大圧力は変化するが，組成一最大圧力曲線のピーク圧力をその可燃性ガスの最高爆発圧力（又は最高圧力）と呼んで，最大圧力と区別することにする。

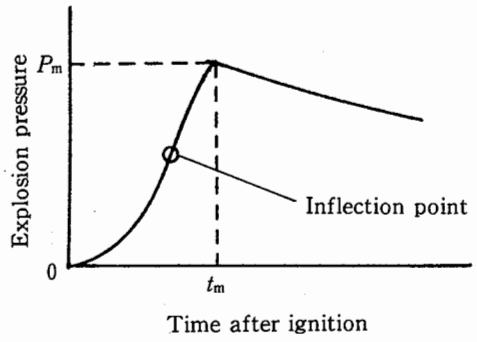


Fig. 1　Pressure-time record for a gaseous explosion in a closed vessel(schematic)
密閉容器中の混合ガスの爆発圧力波形（モデル）

よって異なる。また，組成を変えたときに P_m が増せば，t_m のほうは減ずるというふうに両者は相伴って変化する。こうした従来の知見からすれば，P_m と P_m/t_m を独立に任意の値とすることはできないと考えられる。従って，たとえば8％エチレンと同じ P_m を与える水素濃度がわかったとしても，両者の P_m/t_m は異なるはずである。二種類の混合ガスの P_m と P_m/t_m を同時に等しくするためにはもう一つ別の因子の導入が必要であるが，こうした手法については4．4節において具体的に述べる。

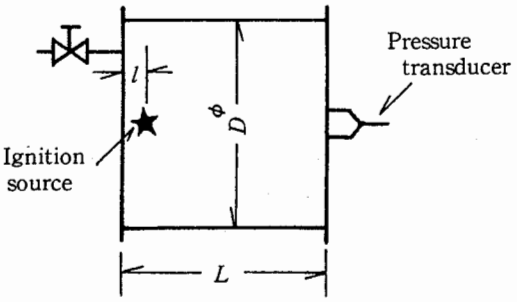


Fig. 2　Schematic showing of test vessels
実験容器の概要

3．実験方法

実験に用いた容器の概略を Fig. 2 に，各部寸法等を Table 1 に示す。容器はいずれも鋼管の両端にフランジを接続できるように加工したものである。三種類の容器を用いたのは，容器の大きさと爆発特性の関係について知見を得るためである。以下，本報では Table 1 中の「呼び径」を用いて三種類の容器を区別する。

毎回の実験の手順としては，まず容器内を真空（絶対圧 2 mmHg 以下）としたのち，所望の組成の予混合ガスを所定の初圧（ゲージ圧で示す）にまで送入し，端フランジの中心に取付けたニクロム線ヒータ（印加電圧 3 V）により点火する。ニクロム線の中心と端フランジ内面の距離は，容器の大きさと昇圧時間の関係を論ずる場合には考慮に入れたが，同一容器におけるガス相互間の爆発特性の比較には無関係である。爆発圧力の時間的変化は反点火端の中心において測定した。圧力の測定系は，抵抗線歪ゲージ式圧力変換器（容量30kgf／cm²），動歪増幅器及び直記式電磁オシログラフ（記録速度20cm／s）からなり，応答周波数特性は現象の追随に充分なものである。圧力較正は，分銅式標準圧力計を用いた静圧較正である。

実験ガスのうちプロパンとエチレンは pure grade のものを，水素は市販工業用のものを用い，いずれも大気条件の空気と混合して実験に供した。混合ガスの組成は干渉計式ガス検定器により測定した。ちなみに，空気と混合したときのこれらのガスの化学量論組成は，それぞれ上記の順に4.02，6.52及び29.50％である

実験は，プロパン4.6％及びエチレン8％については各10回，エチレン6.5～9.2％については各5回ずつ，それぞれの容器において行い，また，4.6％以外のプロパンと6.0％以下及び10.2％以上のエチレンについては，20インチ容器において2～4回ずつ行った。水素については，それぞれの容器において，P_m（初圧が大気圧より高い場

Table 1　Dimensions of cylindrical test vessels(refer to Fig. 1)
実験に用いた円筒容器の諸元（図1参照）

Nominal diameter (inch)	Inner diameter D^{ϕ} (cm)	Internal volume V (cm³)	L/D	Clearance between ignition source and end flange l (cm)
4	10.5	914		1.9
8	20.5	6812	circ. 1.0	1.3
20	49.2	93994		0.7

合には，容器に加わる最大圧力と初圧との圧力差，すなわち動的圧力の大きさを P_m と定義する）が約8 kgf／cm²となるまで，混合ガスの初圧を大気圧から200mmHg刻みで高めて実験したが，同一条件下での実験回数は2～4である。以下に示す数値は，上述の方法による実験値の算術平均値である。なお，実験期間中における大気圧及び室温の変動（それぞれ744～762mmHg及び25～31℃）の影響については考慮しなかった。

4．実験結果及び考察

4.1　大気圧下における爆発特性

初圧が大気圧のときのプロパン，エチレン及び水素の爆発特性をFig. 3，4及び5にそれぞれ示す*2。なお，この実験では，エチレン23.4%及び水素67%の混合ガスには点火することができず，また水素8.5%では火炎の伝播は認められたが最大圧力は0.5kgf／cm²にも達しなかった。

いずれのガスについても，化学量組成付近において P_m が最高，t_m が最小となることは予測されたとおりである。単純な形状の容器においては，内容積が2000cm³を越えれば P_m はほぼ一定となることが知られており[5]，本実験の4インチ容器と8インチ容器における P_m に差が生ずることは妥当な結果である。なお，20インチ容器はフランジの構造に不備があり，6 kgf／cm²を越える P_m が記録された実験では膨張ガスの噴出が認められた。こうした噴出がなければ，P_m は8インチ容器における値にほとんど等しくなるとみられるので，結果的には化学量論組成の近傍において，いずれのガスについても約5%低目の圧力が記録されたことになる。爆発特性の比較に際しては，膨張ガスの噴出によるこうした影響は無視した。

Table 2には，実験により求めた爆発特性を数値で比較した。4.6%プロパン及び8%エチレンは前述のとおりIEC規格に定める試験ガスの組成であり，また，8%エチレンを除く三種類の組成は，それぞれのガスにおいて P_m が最高になるとされている組成である（本実験では，これらの組成は必ずしも最高圧力を与えなかった）。4.6%プロパンと8%エチレンの P_m の比は，三種類の容器において1.01～1.03であり，ほぼ同等とみなすことができるが，昇圧速度はエチレン8%のほうが約30～40%大き

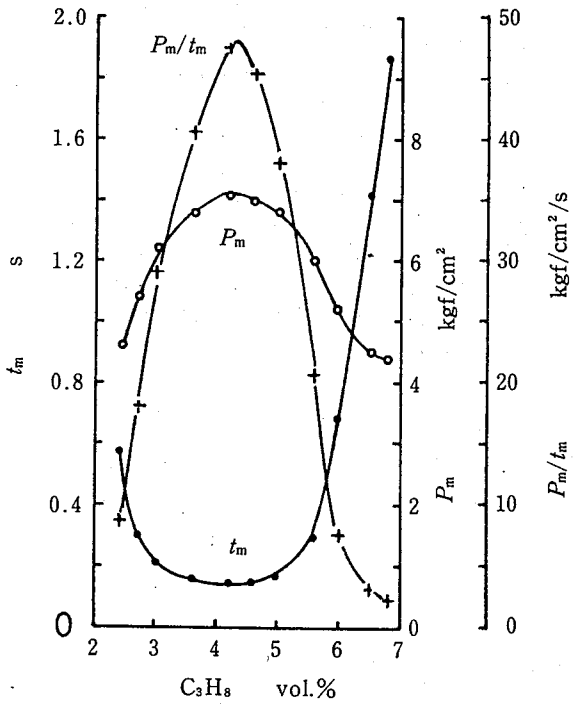


Fig. 3　Explosion characteristics of propane-air mixtures (atmospheric initial pressure ; 20-inch vessel)
プロパン一空気混合ガスの爆発特性
（初圧は大気圧；20インチ容器）

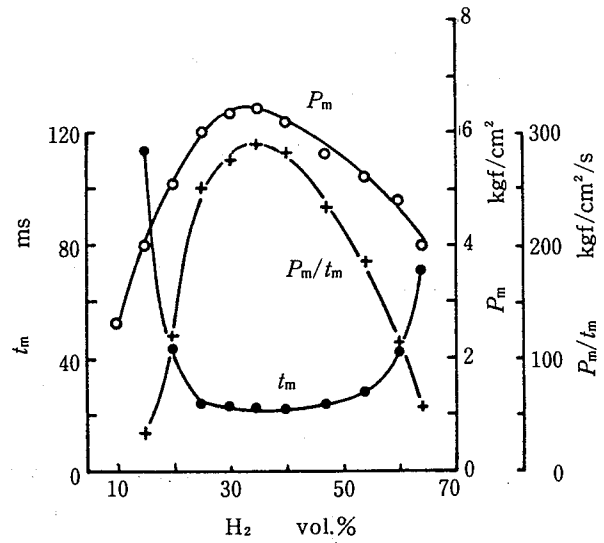


Fig. 5　Explosion characteristics of hydrogen-air mixtures (atmospheric initial pressure ; 20-inch vessel)
水素一空気混合ガスの爆発特性
（初圧は大気圧；20インチ容器）

＊2　横軸を適切な無次元数とすれば，これらの図の曲線を化学量論組成に関して対称形となるように描くことができ，すべてのガスについて爆発特性を一般化して表現することができると考えて検討したが，成功しなかった。

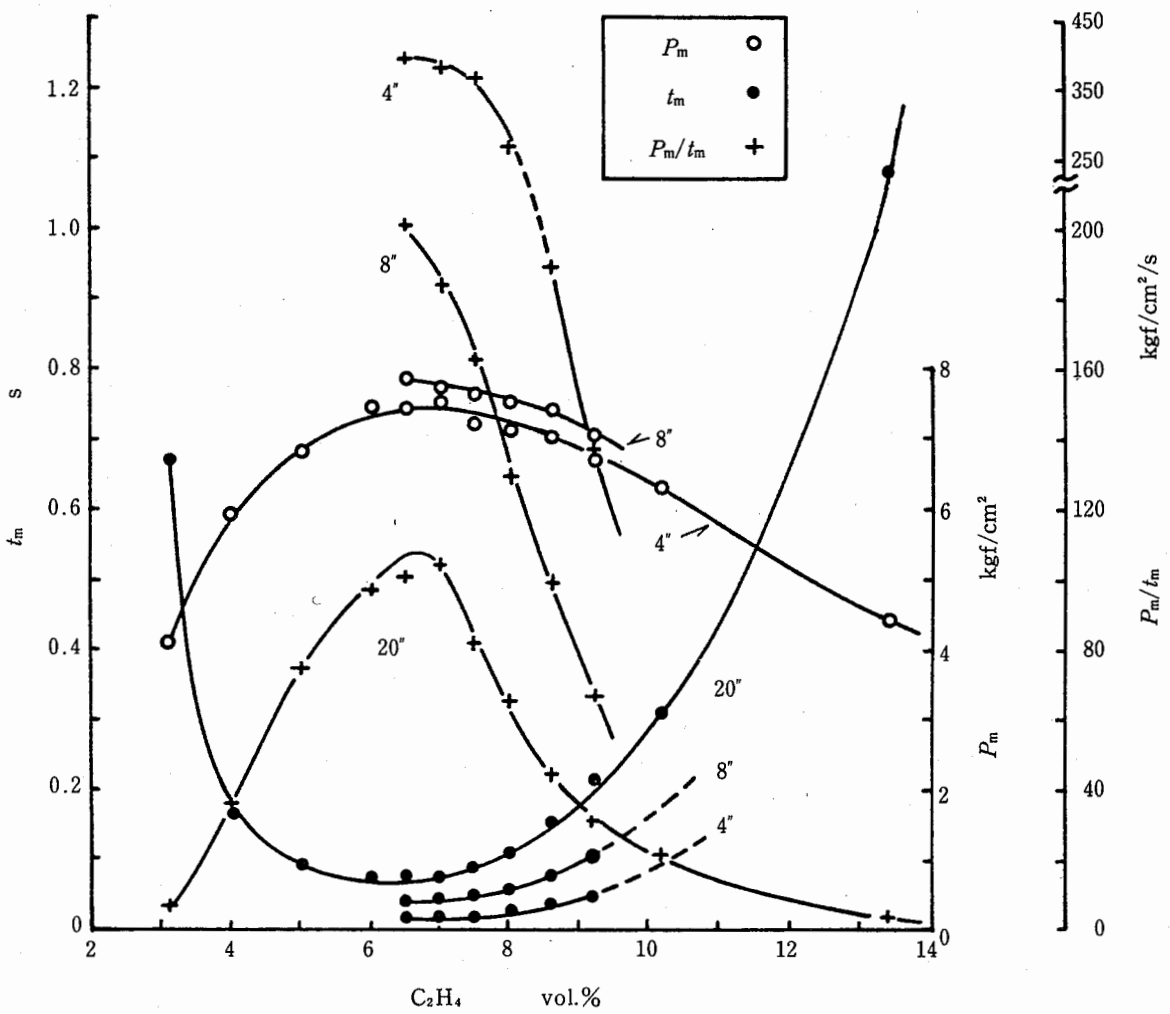


Fig. 4 Explosion characteristics of ethylene-air mixtures (atmospheric initial pressure ; nominal diameter of vessel is affixed to each curve)
エチレン一空気混合ガスの爆発特性
（初圧は大気圧；図中の 4″ などは容器の呼び径）

Table 2 Explosion characteristics of mixtures with air of propane, ethylene or hydrogen
プロパン，エチレン及び水素の爆発特性

Nominal dia. of test vessel	4.6% propane		8% ethylene		6.5% ethylene		30% hydrogen	
	P_m	P_m/t_m	P_m	P_m/t_m	P_m	P_m/t_m	P_m	P_m/t_m
4 inch	6.9	197	7.1	263	7.4	389	6.1	763
8 inch	7.3	101	7.5	129	7.8	200	6.6	550
20 inch	7.0	45	7.1	65	7.6	101	6.3	274

Note : P_m and P_m/t_m are shown in kgf/cm² and kgf/cm²/s respectively.

い。なお，IEC規格に定める8％エチレンは，エチレン—空気混合ガスのうちで最大の昇圧速度を与える組成ではないことに留意したい（Fig. 4参照）。

最高爆発圧力を生ずる付近の組成について，Table 2により爆発特性を比較すると，水素は他のガスよりもP_mがやや小さいにもかかわらず，昇圧速度は数倍も大きい。これは，昇圧時間が昇圧速度を決定する支配的因子であることを意味する。昇圧時間はガスの燃焼速度に関係するとみられるが，Table 2の昇圧速度と燃焼速度の文献値の間に直接の比例関係はみられず，また，容器が大きいほどそれぞれのガス相互の昇圧速度の比が増す傾向にあるので，単に燃焼速度だけをもとに論じたのでは，昇圧速度に及ぼすガスの種類や容器の大きさの影響は定性的にしか説明できない。昇圧速度については次節において詳しく考察する。

4.2　昇圧時間

多くの可燃性ガス・蒸気と空気との混合ガスにあっては，その組成が化学量論値の約1.1倍のときにP_mが最高となり，その値は初圧が大気圧のときに7～8 kgf／cm²であって，容器の大きさには余り影響されないとされている。従って，最高圧力に達するまでの昇圧時間を容器の大きさと関係づけることができれば，最高圧力を与える組成の混合ガスの昇圧速度を任意の大きさの容器について推測することができ，爆発圧力の放散による被害の抑制などの実際的な問題を扱う際に有益である。また，この方法を次節に述べる最大圧力の推算方法と結びつければ，容器の形状が単純な場合については，小さい容器中での実験結果をもとに，任意の大きさの容器中における任意の組成・初圧の混合ガスの爆発特性を知ることができる。

Zabetakis[1]は，球状容器の中心で点火した場合の最大圧力に達するまでの時間t（ms）は，パラフィン系炭化水素やガソリンなどと空気との混合ガス（初圧は大気圧）については次式で近似されるとしている*3。ただし，Vはft³で表わした容器内容積である。

$$t=75V^{1/3} \quad (V:\mathrm{ft}^3) \tag{1}$$

この式は，最大圧力が容器の大きさに無関係であると仮定すれば，平均昇圧速度が容器の大きさの関数となることを示している。上式はその適用範囲が不明であるが，Vに無関係に上式が成立するためには，爆発の過程における火炎速度*4がVによらないと仮定していると解される。つまり，火炎が容器壁に達したときに最大圧力に達するという仮定のもとで，火炎は点火の時点から容器壁に達するまでのあいだ（少なくとも見掛け上は）一定速度で伝播し，かつ，この速度は火炎の伝播する距離に無関係であると仮定しなければならない。

本報の実験のように円筒容器の端部で点火した場合や，ガスの種類が異なったり組成が化学量論値からはずれた場合にも上述の仮定が成立するか否かを見るために，式(1)を次のように変形した。

$$t_m=3.97R \tag{2}$$

上式におけるRは，火炎が伝播すべき距離をcm単位で表わした値であり，球状容器の中心点火の場合には球の半径，また，本報の実験の場合には点火源から反点火端までの距離である。t_mは昇圧時間であるが，式(2)における意味は距離Rを火炎が伝播するに要する時間である。

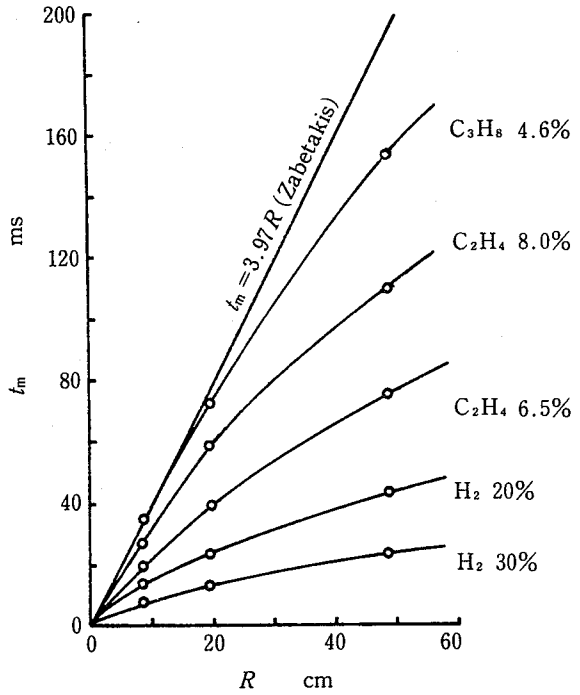


Fig. 6　Relation between time (t_m) required for flame propagation and distance (R) along which flame propagates
火炎の伝播に要する時間と伝播距離（R）の関係

＊3　ここでいうtは，空気との混合組成を変えたときの昇圧時間の最小値である。従って，本報において化学量値付近の組成の混合ガスについて求めたt_mとこのtとはほぼ同じ意味をもつ。

＊4　燃焼速度は混合ガスの組成，圧力及び温度によって決まるガス固有の物性値であり，cm³／cm²／sで定義される。火炎速度は空間を伝播する火炎の見掛けの速度であって，一般には空間の形状・寸法や火炎伝播の方向にも影響され，時間（あるいは距離）とともに変化する値であり，ふつうcm／sで示す。

Fig. 6 は，本報の実験結果を式(2)と比較したものである。

パラフィン系炭化水素の代表であるプロパンの4.6%混合ガスについては，容器が小さければ Zabetakis の近似式と極めてよく一致するが，容器が大きくなるにつれて近似式からのズレは大きくなる。これは，火炎の伝播距離とともに火炎速度が増すことを意味し，火炎伝播の様相についての従来の知見と一致する。こうした火炎速度の変化は，伝播に伴う火炎面の乱れ（火炎表面積の増大）によると説明されており，内容積が同じであれば球状容器の中心点火の場合のほうが円筒容器の端部点火の場合に比して火炎面の乱れを生じにくいことは一般的に理解されている。しかし，球状容器の中心点火の場合でも容器が大きくなれば火炎速度が増すと考えなければならず，Zabetakis の近似式には限界が存在するはずである。

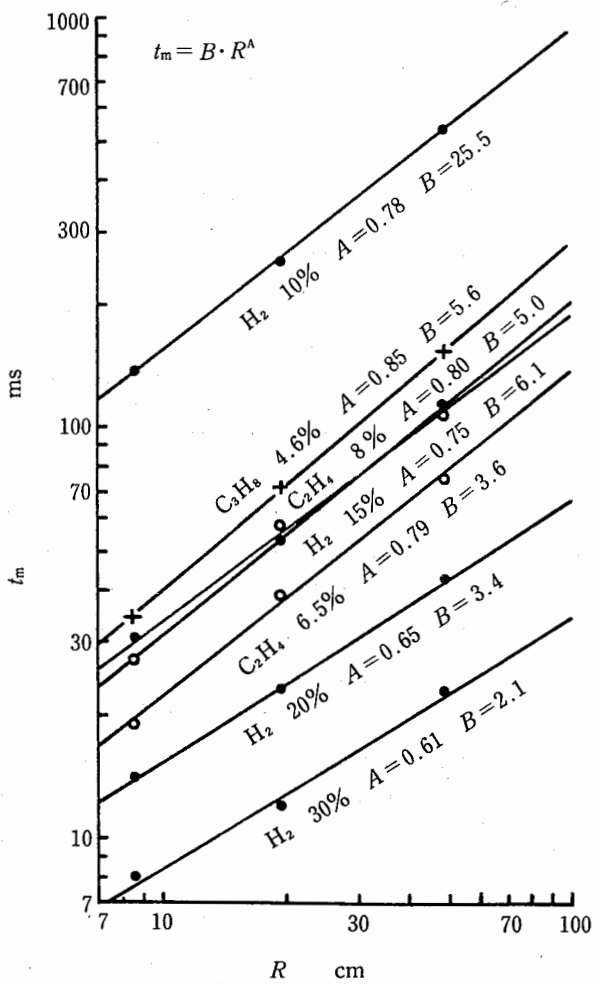


Fig. 7　Effect of vessel size on pressure rise time (atomospherjc initial pressure ; R is a distance from ignition source to far end of the vessel)
容器の大きさと昇圧時間の関係
（R は点火源から反点火端器壁までの距離；初圧は大気圧）

エチレン及び水素の昇圧時間は，特に化学量論組成付近では Zabetakis の近似式から大きくはずれるが，容器の大きさの増すにつれて昇圧時間が減ずることはプロパンの場合と同様である。伝播距離による火炎速度の変化をガスの燃焼速度と関連づける研究はほとんどなされていないので，本報における昇圧速度と燃焼速度との関係を定量的に論ずることはできなかった。

円筒容器中の爆発やエチレン，水素など燃焼速度の大きいガスの爆発における昇圧時間を求める試みは従来全くなされていないが，本実験の結果は次式で近似できることが示されたので，代表的な組成について Fig. 7 に示す。

$$t_m = B \cdot R^A \tag{3}$$

上式中の A 及び B はガスの組成による定数であるが，$A=1$ のときは Zabetakis の式と同じ形となり，燃焼速度の大きいガスほど A の値は小さいと考えられる。Fig. 7 には式(3)の定数を各直線に付記した。これらの実験式は円筒容器の端部点火の場合に関するものであり，球状や立方体の容器の中心点火の場合には昇圧時間はこれらの式による計算値よりも大きくなると考えられる。

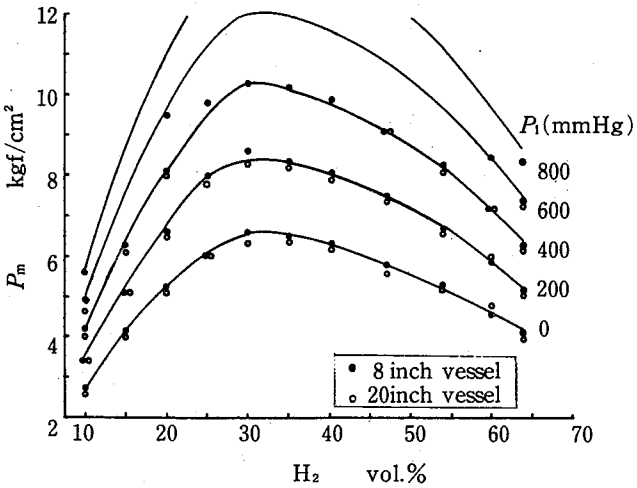
4.3　混合ガスの初圧と爆発特性の関係

混合ガスの初圧と最大圧力の比例関係については既に知られているが[5]，昇圧時間あるいは昇圧速度に及ぼす初圧の影響に関する報告は見当たらない。本節では，耐圧防爆構造の電気機器の試験方法への応用を念頭に置いて，水素一空気混合ガスの初圧と爆発特性の関係について述べる。

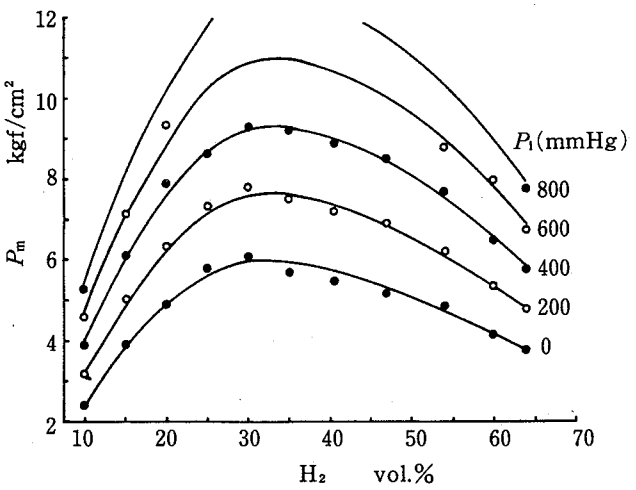
Fig. 8 は水素濃度と最大圧力 P_m の関係を種々の初圧 P_i について示したものであり，図中の各プロットは実測値である。いずれの容器及び濃度においても，P_i と P_m の間には明確な直線関係がみられ，a 及び b を容器の大きさと濃度による定数として次式で近似しても実用上の支障は全くないと考えられる。

$$P_m = aP_i + b \tag{4}$$

8 インチの容器について，上式の定数と水素濃度の関係を示したのが Fig. 9 である（ただし，a は10^3倍した値を示してある）。二つの定数の比は，可燃限界付近で減少する傾向にあるが，可燃領域の大部分において濃度によらない一定値とみなすことができる。図中の直線は各濃度における定数の比の算術平均値を示し，その値は1.40であった。式(4)が実測値に良く適合することから，$P_i=0$ のときの P_m（実測値）を b とし，これに$1.4/10^3$を乗じ



(a) For 8-inch and 20-inch vessels



(b) For 4-inch vessel

Fig. 8　Effect of hydrogen content and initial pressure on maximum pressure attained
水素一空気混合ガスの濃度及び初圧と最大圧力の関係

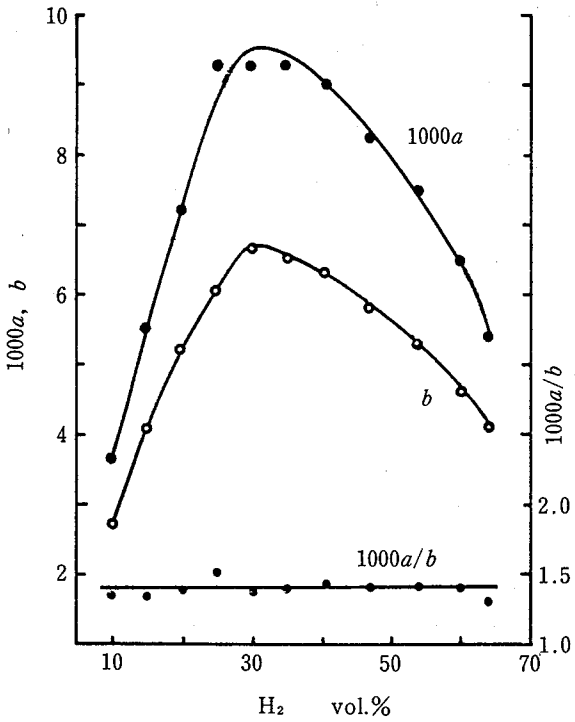


Fig. 9　Effect of hydrogen content on constants in equations which approximate the relation between initial pressure and maximum pressure attaind
(for 8-inch vessel; refer to equation (4))
初圧と最大圧力の関係を示す近似式の定数と水素濃度の関係
(8インチ容器の場合；式(4)参照)

た値を a とすれば，各水素濃度について式(4)の形の関係式が得られる。Fig. 8 (a) の各曲線はこうした式からの計算値を結んだものであるが，20インチ容器における実測値とも良く一致することに留意したい。

4インチ容器の場合についても同様の手法で P_i—P_m—水素濃度の関係曲線を描くことができるが，ここでは次の方法を試みた。$P_i=0$ のときの8インチと4インチ容器における P_m の実測値の比が水素濃度によらない一定値とみなせることに注目し，各濃度に対するこれらの比の算術平均値を求め(本実験では1.09であった)，8インチ容器について前述の方法により求めた P_m (Fig. 8 (a) の各曲線に相当する) をこの平均比で割り算する。得られた P_m を結んだものが Fig. 8 (b) の曲線群であり，実測値と良く一致している。これは，可燃限界の近傍を除く大部分の可燃領域については，二つの大きさの異なる容器中での最大圧力の比は水素濃度によらない一定値であるとみなしてよいことを意味する。

こうした手法を用いれば，適切に選ばれた条件における少数回の実験をもとに，他の広範囲な条件下における最大圧力の予測が可能であるが，水素以外のガスへの適用性については，実験的あるいは熱力学的な検討が必要である。

次に，昇圧速度に及ぼす初圧の影響について述べる。

多くのガスの燃焼速度は，圧力に対する依存性の小さいことが知られている[6]。水素一空気混合ガスの燃焼速度が圧力によらないとし，かつ，密閉容器中を伝播する火炎の平均速度が燃焼速度に比例するとすれば，ある容器中の爆発における昇圧時間 t_m は，水素濃度が同じであれば初圧によらない一定値となる。t_m=一定として式(4)を代入すれば，昇圧速度 P_m/t_m は次式のように変形でき

る。ただし，k_1～k_3は容器と水素濃度による定数である。

$$P_m / t_m = k_1 P_m = k_2 P_i + k_3 \quad (5)$$

実験によれば，水素10%では t_mは P_iとともに増加し，水素64%でも同じ傾向がみられた。水素濃度が15～60%の範囲では両者の関係は一定しなかったが，P_iによる t_m

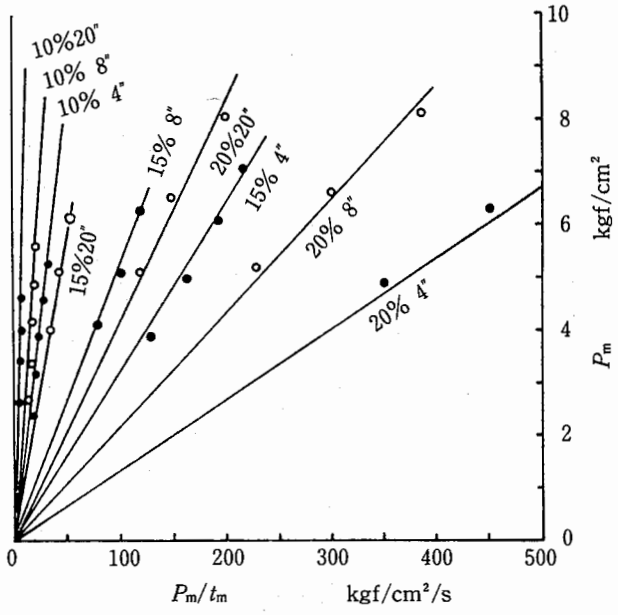


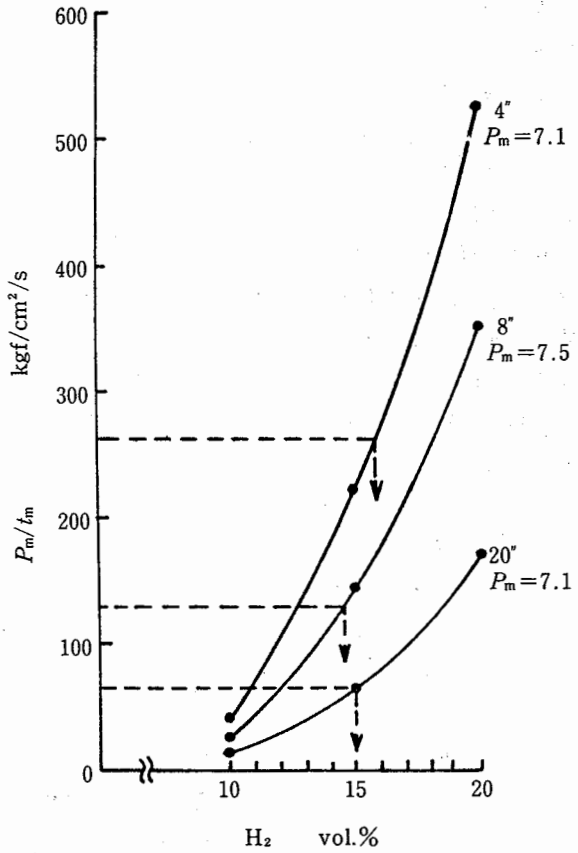
Fig. 10 Relation between average rate of pressure rise and maximum pressure attained
(for hydrogen—air mixtures)
昇圧速度と最大圧力の関係

の変動は小さく，むしろ一定値とみなすほうが適当であった。Fig. 10は，低濃度側の混合ガスについて昇圧速度と最大圧力の関係を示したものである。図の各直線は実測値に対する最小二乗法による近似式を描いたものであるが，定数の計算に際しては $P_m = 0$ のとき $P_m / t_m = 0$ という条件を加えてある。化学量論組成に近いほど直線の勾配が減ずるなどの変化はあるが，こうした直線関係は水素濃度にかかわりなくみられ，t_mは P_iによらない一定値であるとみなしてもよいようである。また，昇圧速度と最大圧力はいずれも初圧に比例するとみられるので，昇圧速度と最大圧力をそれぞれ独立に変化させることができないことも明らかである。

4.4 防爆機器の試験方法への応用

前節までに述べたことから明らかなように，水素一空気混合ガスを用いて所望の最大圧力と昇圧速度を同時に得るには，水素濃度と初圧を適切に選ぶ必要がある。IEC規格に定める4.6%プロパンあるいは8%エチレンと同等の爆発特性を示す水素濃度は，30%を境とする高低両側に一つずつ存在するはずである。しかし，実験した最高濃度である64%においては，上記のプロパン及びエチレン混合ガスの P_mに相当する最大圧力を得ようとすれば，昇圧速度が所望の値よりはるかに大きくなるので，適切な条件は見出せなかった。試験ガスの経済性を考慮に入れ，水素低濃側について検討した結果を以下に示す。

Table 2に示すエチレン8%と同等の爆発特性を示す水素濃度は次のようにして求めた。たとえば4インチ容器においては，8%エチレンの P_mは7.1 kgf/cm²であるから，Fig. 10の4インチ容器に対する各直線において



P_m=7.1としたときの P_m / t_mを求める。この結果，P_m=7.1となるときの水素濃度と昇圧速度の関係が求まる。各容器について，所望の P_mを得るための水素濃度と昇圧速度の関係を示せば上図のようになる。この図において，それぞれの容器における8%エチレンの昇圧速度と各曲線の交点を求めれば，それぞれの容器について所望の要件を満足する水素濃度が得られる(図中の破線参照)。この濃度は容器の大きさが異なっても同じ値となるはずであるが，得られた結果は，容器の大きくなる順に15.8,

14.7及び15.0%であった。IEC規格ではエチレン濃度に対し8±0.5%と許容差を認めていることを考慮すれば，これと同等の爆発特性を与える濃度として水素15%を選んだとしても実用上の支障はないと考える。水素15%における初圧と最大圧力の実測値の関係は，4インチ容器では式(6)，8インチ容器では式(7)により近似されるが，これらの式に $P_i=600$ を代入したときの P_m は，それぞれ

$$P_m=0.00535P_i+3.92 \quad (6)$$

$$P_m=0.0055P_i+4.07 \quad (7)$$

7.1及び7.4となり，Table 2に示すエチレン8%混合ガスの P_m とほとんど等しくなる。このことから，15%水素—空気混合ガスの初圧を大気圧よりも600mmHg高めた場合と8%エチレン混合ガス（初圧は大気圧）とは同等の爆発特性を示すといえる。

同様の方法により4.6%プロパンと同等の爆発特性を示す水素濃度を求めたところ，4，8及び20インチ容器についてそれぞれ14.6，13.5及び13.6%となったので，14%を所望の濃度とした。水素14%についての実測値はないのでFig. 9を用いて初圧と最大圧力の関係を求めた。初圧と最大圧力の関係を直線で近似させたときの近似式の定数は，水素濃度10%と15%の間では濃度により直線的に変化するとみてよい(Fig. 9)。水素10%と15%に対する定数から，比例配分により14%に対する定数を求めた結果，初圧と最大圧力の関係式を示す近似式は次のようになった。

4インチ容器については　$P_m=0.005P_i+3.6$

8インチ容器については　$P_m=0.0051P_i+3.8$

これらの式に $P_i=670$ を代入して得られる値は，Table 2のプロパンの P_m とほとんど等しい。従って，初圧を670mmHgとした14%水素—空気混合ガスは4.6%プロパン—空気混合ガスと同等の爆発特性を示すと考えられる。

IEC規格に定める耐圧防爆構造の電気機器の爆発強度試験を，水素だけを用いて等価的に行う際の試験条件は上記のように求まったが，こうした条件は爆発の際の動的圧力のみを対象としていることに留意せねばならない。初圧を高めた水素—空気混合ガスに点火する方法をとる場合には，容器には初圧に相当する静圧が予め加わることになるので，その影響を排除するためには，初圧に等しい外圧が容器に加わるようにせねばならない。しかし，実際には，電気機器の容器は完全密閉ではなく，かつ，一般には試験機器は密閉された試験槽内に設置されるので，機器に加わる静圧についての配慮は無用である場合が多いと思われる。

5. 結　言

密閉容器中の混合ガスの爆発特性について知見を得るため，代表的な可燃性ガスであるプロパン，エチレン又は水素と空気との混合ガスについて，大きさの異なる三種の円筒容器を用いて実験した。混合ガスの組成と初圧を変えた実験の結果，これらの因子が最大圧力，昇圧時間及び平均昇圧速度に及ぼす影響や，これらの爆発特性相互間の関連性，更には容器の大きさと爆発特性の関係について，従来知られていなかった多くの知見が得られた。また，二種類の混合ガスがどのような条件下で同じ爆発特性を示すかは興味のあるところであるが，本報では耐圧防爆構造の電気機器の試験方法に関する実用上の問題を例として検討し，初圧が大気圧の4.6%プロパン—空気及び8%エチレン—空気混合ガスと同等の爆発特性を示す水素—空気混合ガスの条件は，それぞれ，濃度15%，初圧600mmHg及び，濃度14%，初圧670mmHg（濃度はvol.%，圧力はゲージ圧）であることを導いた。

（昭和60年5月7日受理）

参考文献

1）橋口幸雄訳，高圧ガス 5，(6)，103（1968）
2）橋口幸雄・小河原徳治，安全工学 5，(3)，230(1966)
3）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　1979)〟
4）International Electrotechnical Commission, Publication79-1, "Electrical apparatus for explosive gas atmospheres, Part 1 : Construction and test of flameproof enclosures of electrical apparatus"（1971）
5）鶴見平三郎・林　年宏，産業安全研究所研究報告 RR-18-3（1969）
6）熊谷清一郎，〝燃焼〟，p.127，岩波書店（1976）