

プロパン—空気混合ガスの爆発現象

岩 淵 芳 雄*

Explosion Phenomena of Propane-Air Mixture

By Yoshio Iwabuchi

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

According to the extensive demand of propane in recent years, the propane compressors with large capacity have come to be manufactured in increasing number. But as the propane-air mixture easily explodes, it is advisable that explosion-proof construction be adopted for the electric apparatus such as induction motors, controllers and the like, which are to be in use with the compressor. For this reason, the writer has taken up the problems concerning the concentration of propane for explosion limits, relation between the propane percentage or specific sectional area of flange gaps and the explosion pressure, and running out limits of flame through flange gaps of the apparatus subjected to the propane-air mixture. From the results of the experiments, the writer has come off successfully in designing an unvented or vented explosion-proof construction for the apparatus to be used in the propane-air mixture, but for such design the strength against explosion pressure must be greater, and the clearance width be smaller than for the methane-air mixture.

〔I〕 緒 言

最近プロパンの需要増加に伴い、大容量のプロパン圧縮装置が要望されるに至った。しかし、周知の如くプロパン—空気混合ガスは爆発の危険があるから、本装置に使用する電動機並びに制御器等の電気設備はすべて防爆構造にしなければならない。

防爆機器としては内部に点火源を持たぬことが理想的であるが、電気機器としては多くの場合これは不可能である。その結果、内部爆発の際に機器自身が損傷を被らぬことと、外部ガスに引火爆発を起さしめないことが要求される。従つて、防爆機器の設計及び取扱いには爆発性ガスの爆発現象、特に爆発圧力と火焰逸走の現象が明らかにされていなければならない。しかるに、プロパン—空気混合ガスに関する文献は主として爆発限界混合率及び発火温度⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾に関するもので、防爆を目的とした爆発圧力⁽³⁾並びに火焰逸走の問題⁽⁴⁾に関するものは極めて少ない。

そこで、筆者はメタン及び水素の防爆機構に関する研

* 日立製作所日立研究所

究の経験⁽⁵⁾を活し、プロパン—空気混合ガスの爆発限界混合率、プロパン混合率と爆発圧力特性との関係、容器に通気口がある場合の通気口の比開口断面積と爆発圧力特性との関係並びに狭隙よりの火焰逸走限界を検べたので、その結果を報告する。一般ガスに対する電気機器の防爆構造の規格制定にあたり参考となれば幸である。

〔II〕 ガス爆発に関する一般的事項

可燃ガス—空気混合ガスの爆発現象はすべて防爆上直接、間接の関聯をもつているので、既往文献を簡単に紹介する。

(1) 爆発限界混合率

爆発限界混合率は点火条件、使用容器の寸法、形状、及び爆発判定条件によつて異なるばかりでなく、混合ガスの温度、圧力にも影響される。従つて、これに関する文献は比較的多いが、実験結果に相当のばらつきがあるのはこれらの原因によるものであろう。第1表(次頁参照)は比較的信頼しうる結果の一例である。

(2) 発火温度

爆発性混合ガスに点火する方法としては、加熱による

ほか電氣的点火及びその他があるが、発火温度とは加熱による場合の値である。しかし、その値は加熱方法によつて異なるばかりでなく、可燃ガス混合率、混合ガスの圧力及び使用容器の寸法、形状等によつても変化する。加熱方法としては全体的加熱と局部的加熱とがあり、前者に就いては簡単な場合には理論的取扱いが可能である。尙局部的加熱、例えば、加熱細線による点火の場合には全体的加熱に比較して発火温度が著しく高くなる。第 2 表は種々の文献から求めた最低発火温度で、第 3 表はプロパン—空気混合ガスのプロパン混合率と発火温度との関係に就いて Masson 及び Wheeler⁽¹⁾ が 85 cm³ の一様に加熱された球体で実験した結果である。

(3) 爆発圧力

密閉容器内の爆発圧力はガス混合率は勿論のこと、容器の寸法、形状及び混合ガスの最初の温度、圧力によつて異なる。一般に容器容積が大きい程、又最初の温度が低く、圧力が大きい程爆発圧力が大きくなる。しかしプロパンに就いてはこれらに関する文献が少なく、しかもその実験結果の間に相当の開きがあり、7.35~8.36 kg/cm² (3) (以下爆発圧力はすべてゲージ圧力で示す) であ

第 1 表 可燃ガス—空気混合ガスの爆発限界混合率

Table 1. Explosion Limits of Inflammable Gases/Air Mixture

可燃ガス	下部爆発限界混合率 (容積%)	上部爆発限界混合率 (容積%)	実験条件	測定者
メタン	5.35	14.9	上向管 } 管径 水平管 } 7.5 cm 下向管 }	White ⁽¹⁾
	5.40	14.0		White ⁽¹⁾
	5.95	13.4		White ⁽¹⁾
プロピレン	2.18	9.7	上向管 } 管径 水平管 } 7.5 cm 下向管 }	White ⁽¹⁾
	2.22	9.3		White ⁽¹⁾
	2.26	9.4		White ⁽¹⁾
プロパン	2.4	7.3	水平管 { 管径 } 2.5 cm	Payman ⁽¹⁾
	2.17	7.35		Thoruton ⁽¹⁾
	2.15	9.5		
水素	4.15	75.0	上向管 } 管径 下向管 } 7.5 cm	White ⁽¹⁾
	8.8	74.5		White ⁽¹⁾

第 2 表 可燃ガス—空気混合ガスの最低発火温度⁽²⁾

Table 2. Minimum Ignition Temperature for Inflammable Gases/Air Mixture

可燃ガス	最低発火温度 (C°)
メタン	645
プロピレン	455
プロパン	510
水素	530

る。防爆構造には爆発圧力の軽減を図るため、容器に通気口を設けた狭隙防爆構造と称しているものがあるが、狭隙防爆構造にするためには狭隙の比開口断面積 (内容積 1 l 当りの通気口断面積 mm²/l) と爆発圧力との関係が明らかにされていなければならない。しかし、これに就いてはメタン、水素及びその他二三のガスに就いてのみ研究されており、プロパンに関するそれは全く見当らない。

(4) 火焰速度

火焰速度は後述する最大圧力到達時間に関係するほか狭隙を通しての火焰逸走にも影響する。火焰速度の測定は主として内径が一様な管に就いて行われていて、Lewis 及び Von Elbe⁽²⁾ が提出した理論的取扱法も知られている。管内での火焰速度は管の内径の増加とともに著しく増大するが、管内面の物理的性質にはあまり影響されないようである。第 4 表は内径が 2.5 cm の管を使用して行つた Payman (メタン及び水素) 及び Haward (水素) の実験結果である。

(5) 火焰逸走限界

火焰逸走限界とは隙の限界値、即ち、それぞれの奥行の狭隙に於て外部爆発性ガスに引火爆発を起さしめない隙の最大値をゆうのであるが、プロパンに就いては Paton⁽⁴⁾ が 1 in のフランジのある半球を組合せた内容

第 3 表 プロパン—空気混合ガスの発火温度⁽¹⁾

Table 3. Ignition Temperature for Propane/Air Mixture

プロパン混合率 (容積%)	1.25	2.50	3.05	4.90	6.50	7.85
発火温度 (°C)	588	552	544	525	516	514

第 4 表 可燃ガス—空気混合ガスの火焰速度⁽¹⁾

Table 4. Propagation Velocity of Explosion Flame for Inflammable Gases/Air Mixture

メタン		プロパン		水素	
混合率 (容積%)	火焰速度 (cm/sec)	混合率 (容積%)	火焰速度 (cm/sec)	混合率 (容積%)	火焰速度 (cm/sec)
5.71	—	2.3	—	6.10	—
5.80	23.3	2.37	20.8	6.19	10
6.95	35	2.58	26	6.31	12
7.82	47.4	2.8	31.4	20.15	260
9.12	64.4	3.5	48.2	29.70	405
9.96	66.2	4.28	72.8	36.30	490
10.32	65.5	4.39	79.1	40.50	480
11.10	57	4.71	82.1	44.55	460
12.25	35	4.84	80.2	49.15	385
13.09	22	5.14	66	61.60	145
13.35	19.1	5.90	41.2	71.39	50
13.42	—	6.58	30.2	75.51	—
		7.1	23		
		7.3	20.3		
		7.35	—		

積 8 l の青銅の球体で実験した値が発表されているに過ぎない。これによるとプロパンに就いての際の限界値は 0.96 mm でメタンより 0.21 だけ小さいと報じている。

〔III〕 研究の方法

(1) 実験装置

第1図は爆発限界混合率並びに爆発圧力の測定に用いた実験装置の概略である。爆発試験容器は内容積 7 l の鋼板製円筒で、これを密閉容器とする場合は通気口を取外し、その部分を硝子板製視窓で蓋をした。点火は相対せる針状電極間に内燃機関用点火装置により電気火花を飛ばして行つた。点火位置は容器の中央部とし、火花間隙長は 3 mm に保つた。狭隙通気口の構造は第2図に示す如く、厚さ 5 mm、外径 200 mm、内径 100 mm の鋼板製中空円板の間に厚さ 0.5 mm の扇形の銅板製間隙片を重ね合せて狭隙群を形成せしめたもので、2枚の円板の間の通気口断面積は隙 0.5 mm、巾 70 mm、奥行 50 mm のもの4箇で、その積重ね枚数に応じて狭隙通気口断面積が 140 mm² の倍数となるようにした。

第3図は火焰逸走限界の測定に用いた実験装置である。主容器(点火側容器)は内径 100 mm、長さ 100 mm の鋼板製円筒2箇よりなり、内容積は約 1.6 l である。両容器の間には第2図と同様な供試狭隙を設けた。有孔円板は外径 110, 130, 160, 及び 200 mm のものを用意し、狭隙奥行を 5, 15, 30, 及び 50 mm に、又、間隙片は種々の厚みのものを使用することにより、隙を自由に変えうるようにした。点火の方法は前と同様で、点火位置は狭隙の中央より 10 mm 離れた。副容器(引火側容器)は内容積約 70 l の鋼板製円筒で、その内部に図に示す如く主容器を取付け、又、引火爆発の有無を判定するためのブルトン管型圧力計を取付けた。

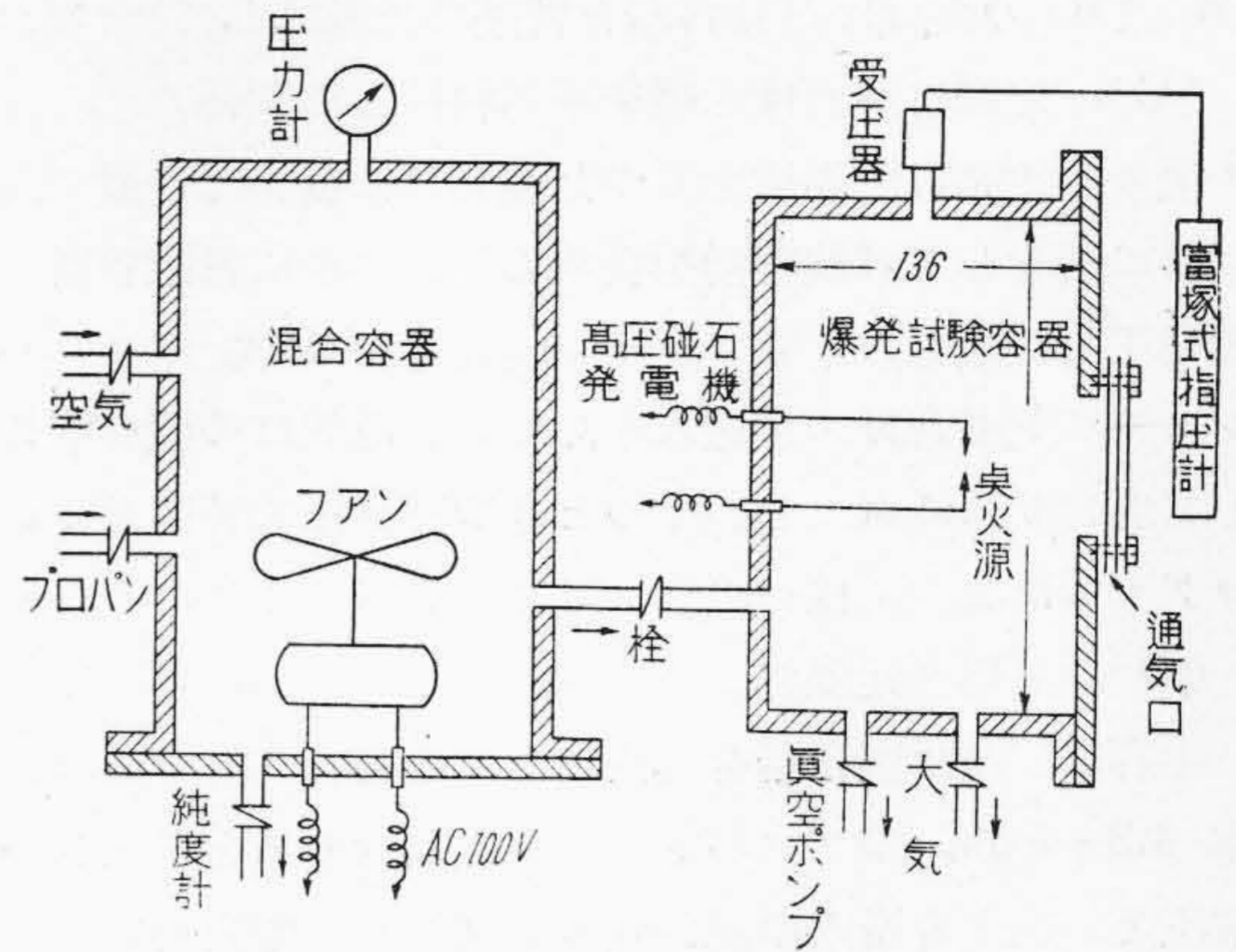
(2) 実験の方法

(A) 爆発限界混合率の測定

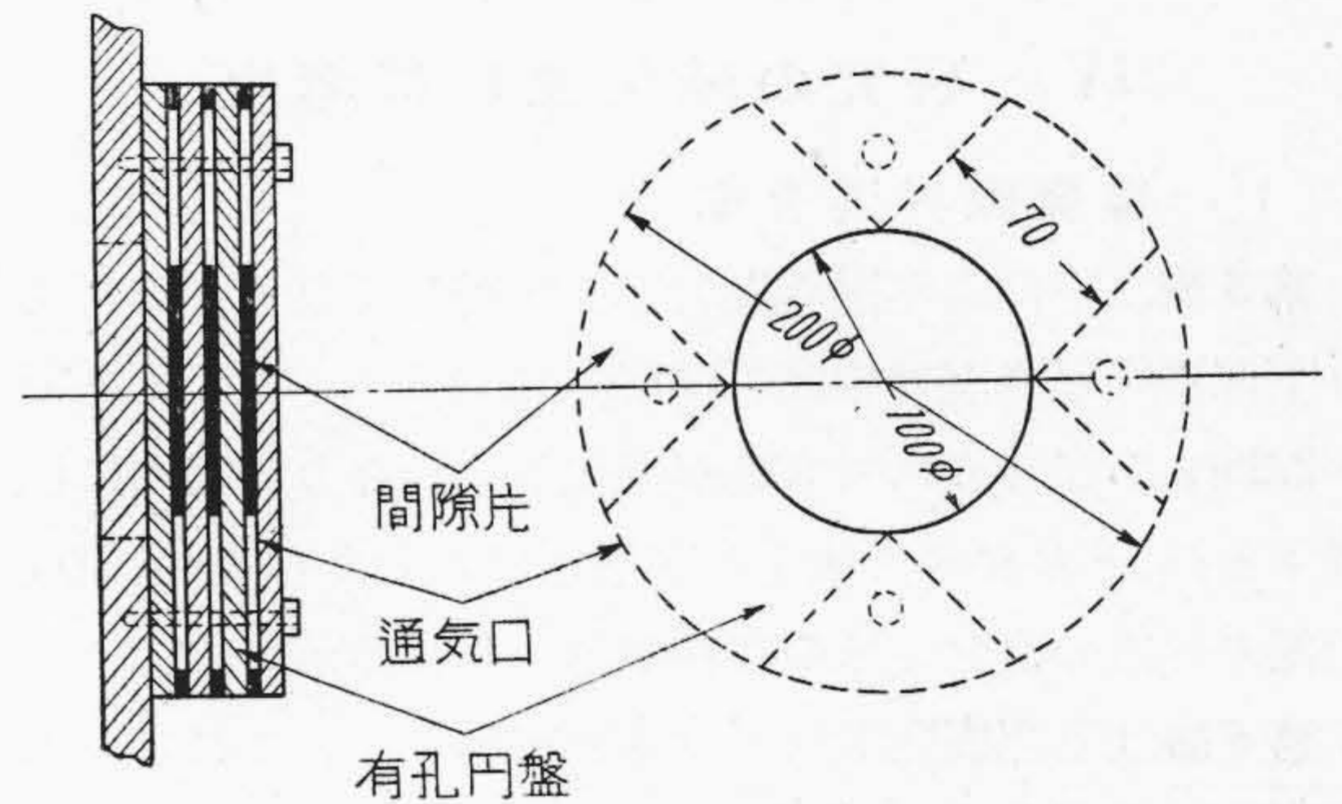
まづ爆発試験容器を真空とし、これに十分攪拌せる種々の組成のプロパン—空気混合ガスを送入して常圧とし、3 分間放置したのちこれに点火して爆発の有無を検べた。爆発の有無は内部の状態を視窓より観察し、爆発焰が容器内部全体の混合ガスに伝播したか否かによつて判定した。

(B) プロパン混合率と爆発圧力特性との関係

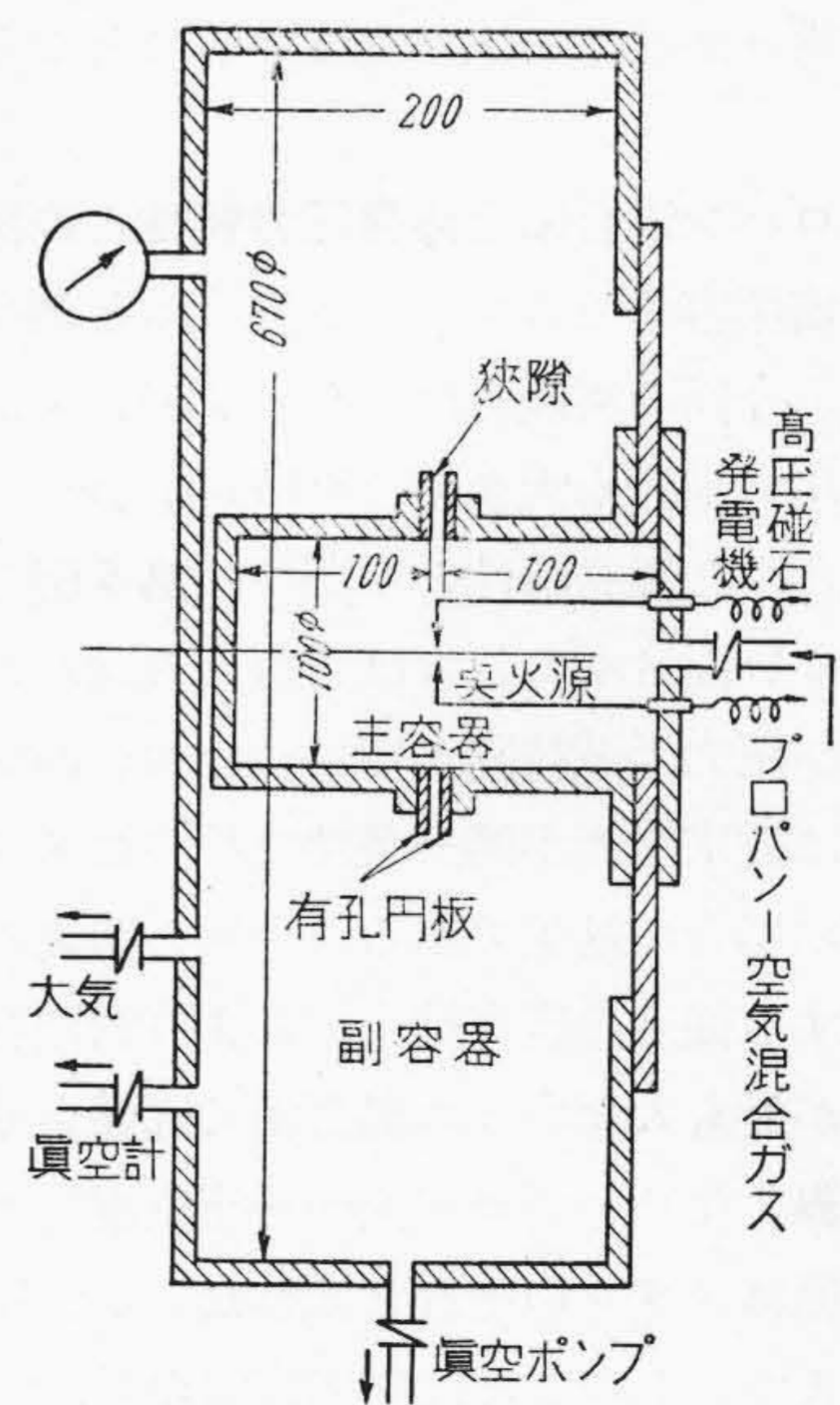
前述と同様の方法にて実験し、点火後の爆発圧力をオシログラムに記録し、爆発圧力、点火の遅れ(点火してから圧力上昇開始時までの時間)、最大圧力到達時間(圧力上昇開始から圧力が最大値に達するまでの時間)及び圧力半減時間(圧力が最大値に達してから、その圧力が最大値の 1/2 に減少するまでの時間)を測定した。なお



第1図 実験装置 (A)
Fig. 1. View of Experimental Apparatus (A)



第2図 狭隙通気口の構造
Fig. 2. Construction of Flange Gaps



第3図 実験装置 (B)
Fig. 3. View of Experimental Apparatus (B)

(A), (B) の実験は試験容器を密閉の状態にして行つた。

(C) 比開口断面積と爆発圧力特性との関係

種々の比開口断面積をもつた通気口に就いて、最初通気口に蓋をして試験容器を真空とし、これに密閉容器で爆発圧力が最も大きいプロパン混合率 4.58% のプロパン—空気混合ガスを送入したのち、通気口の蓋を取外して混合ガスに点火し、そのときの爆発圧力特性をオシログラムによつて検べた。

(D) 火焰逸走限界

主容器、及び副容器を真空にしてから、プロパン混合率 4.3~4.6% のプロパン—空気混合ガスを送入して常圧とし、主容器内の混合ガスに点火して爆発せしめ、種々の奥行及び隙の狭隙より逸走した爆発火焰によつて副容器内の混合ガスに引火爆発が起るか否かを検べて、火焰逸走限界曲線を求めた。

[IV] 研究の結果並びに考察

(1) 爆発限界混合率

第 5 表は下部爆発限界混合率測定結果である。これより下部爆発限界混合率は 2.38% になる。しかし、2.35~2.38% の混合ガスでも焰が発生し、かなり広範囲に伝播するが、それが消失後も火花附近にわずかの焰が残り、一部未反応の混合ガスの存在が認められる。

第 6 表は上部爆発限界混合率測定結果で、これより上部爆発限界混合率が 7.28% であることがわかる。しかし、前述の場合と同様に 7.28~8.75% の混合ガスでも焰が発生し、それがかなり広範囲に伝播する。この場合一部未反応の混合ガスが残つていることは若干の空気を補給すると、再びかなりの焰が発生することから明らかである。

(2) プロパン混合率と爆発圧力特性との関係

第 4 図は密閉容器でのプロパン混合率と爆発圧力との関係である。今回の実験ではプロパン混合率が 4.58% のときの爆発圧力が最も大きく、8.15 kg/cm² に達する。プロパン混合率と爆発特性との関係は第 5 図となり、爆発圧力の大きい混合率のときほど点火の遅れ、最大圧力到達時間及び圧力半減時間が短い。なお、同図に点線で示した結果は従来筆者が同一条件で行つたメタン—空気混合ガスの場合の結果である。今回と筆者のメタン及び水素に関する従来の研究結果⁽⁵⁾とより密閉容器を用いて爆発圧力が最も大きいガス混合率で爆発させた場合の特性は第 7 表となり、プロパン—空気混合ガスの爆発圧力展開状態はメタンのそれと大差ないが、圧力は約 1 kg/cm² 大きい。このことは防爆容器の設計上十分考慮する必要がある。第 6 図は爆発圧力オシログラムを例示したものである。

第 5 表 下部爆発限界混合率測定結果 (常温常圧)

Table 5. Experimental Data for Explosion Lower Limit (At Normal Temperature and Pressure)

プロパン混合率 (容積%)	爆発の判定	焰の発生状況
2.05	爆発せず	} 異状なし
2.20	爆発せず	
2.30	爆発せず	} 火花附近にのみわずかの焰が発生す
2.35	爆発せず	
2.35	爆発せず	} 広範囲に焰が発生するが、それが消失後も火花附近にわずかの焰が残る
2.38	爆発せず	
2.38	爆発す	} 全面的に焰が発生し、それが消失後異状なし
2.45	爆発す	
2.50	爆発す	

第 6 表 上部爆発限界混合率測定結果 (常温常圧)

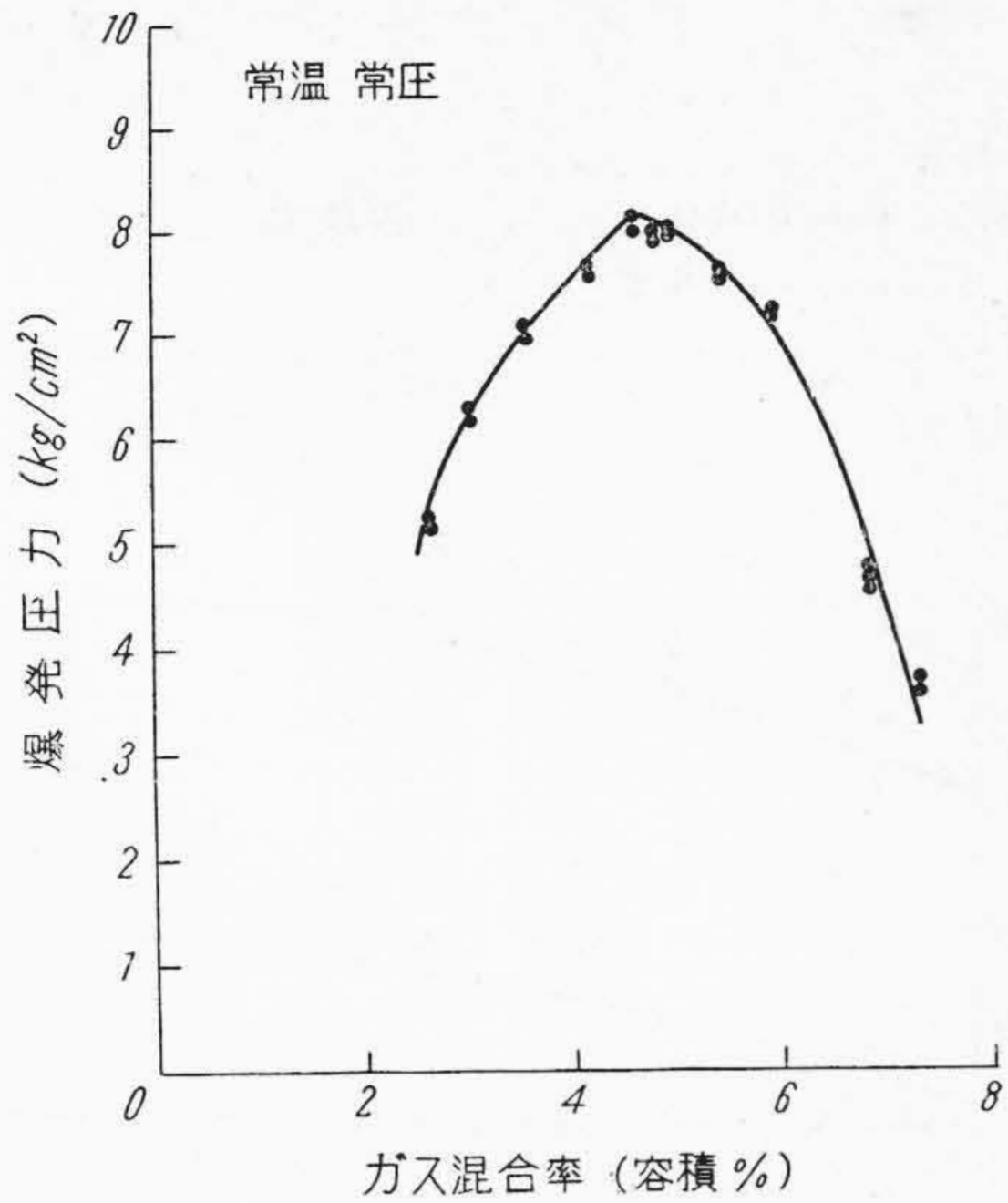
Table 6. Experimental Data for Explosion Upper Limit (At Normal Temperature and Pressure)

プロパン混合率 (容積%)	爆発の判定	焰の発生状況
7.20	爆発す	} 全面的に焰が発生し、それが消失後異状なし
7.28	爆発す	
7.28	爆発せず	} 広範囲に焰が発生するが、それが消失後も火花附近にわずかの焰が残る
7.40	爆発せず	
7.50	爆発せず	
7.80	爆発せず	
8.00	爆発せず	
8.75	爆発せず	} 火花附近にのみわずかの焰が発生す
8.86	爆発せず	

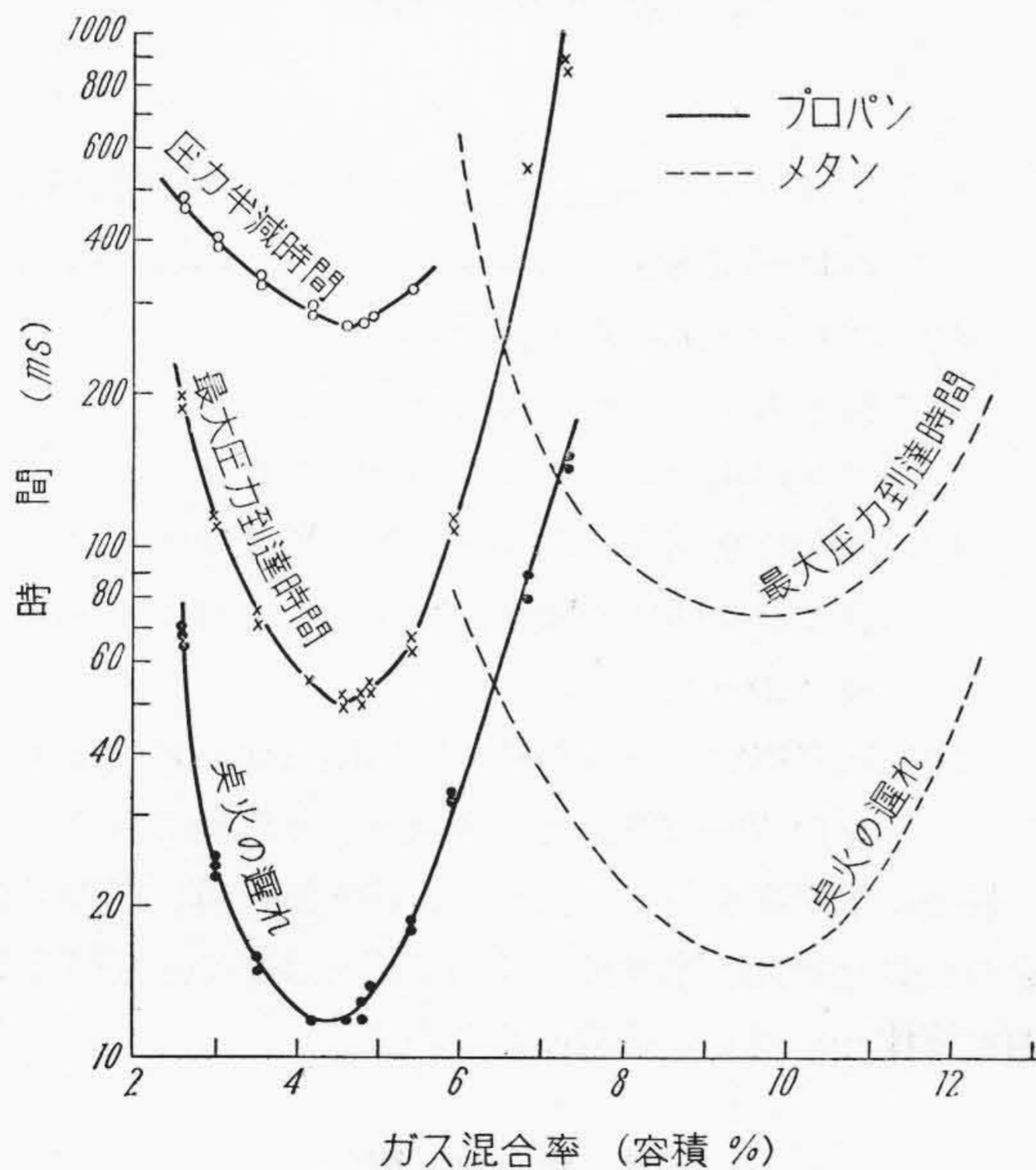
第 7 表 爆発性混合ガスの爆発特性の比較

Table 7. Comparison of Explosion Characteristics for Explosive Gas Mixture

混合ガスの種類	化学当量的混合率 (容積%)	混合率の実測値 (容積%)	爆発圧力 (kg/cm ²)	点火の遅れ (ms)	最大圧力到達時間 (ms)
メタン—空気	9.5	10.2	6.95	16	74
プロパン—空気	4.03	4.58	8.15	12	50
水素—空気	29.6	33.0	6.95	2.9	7.0



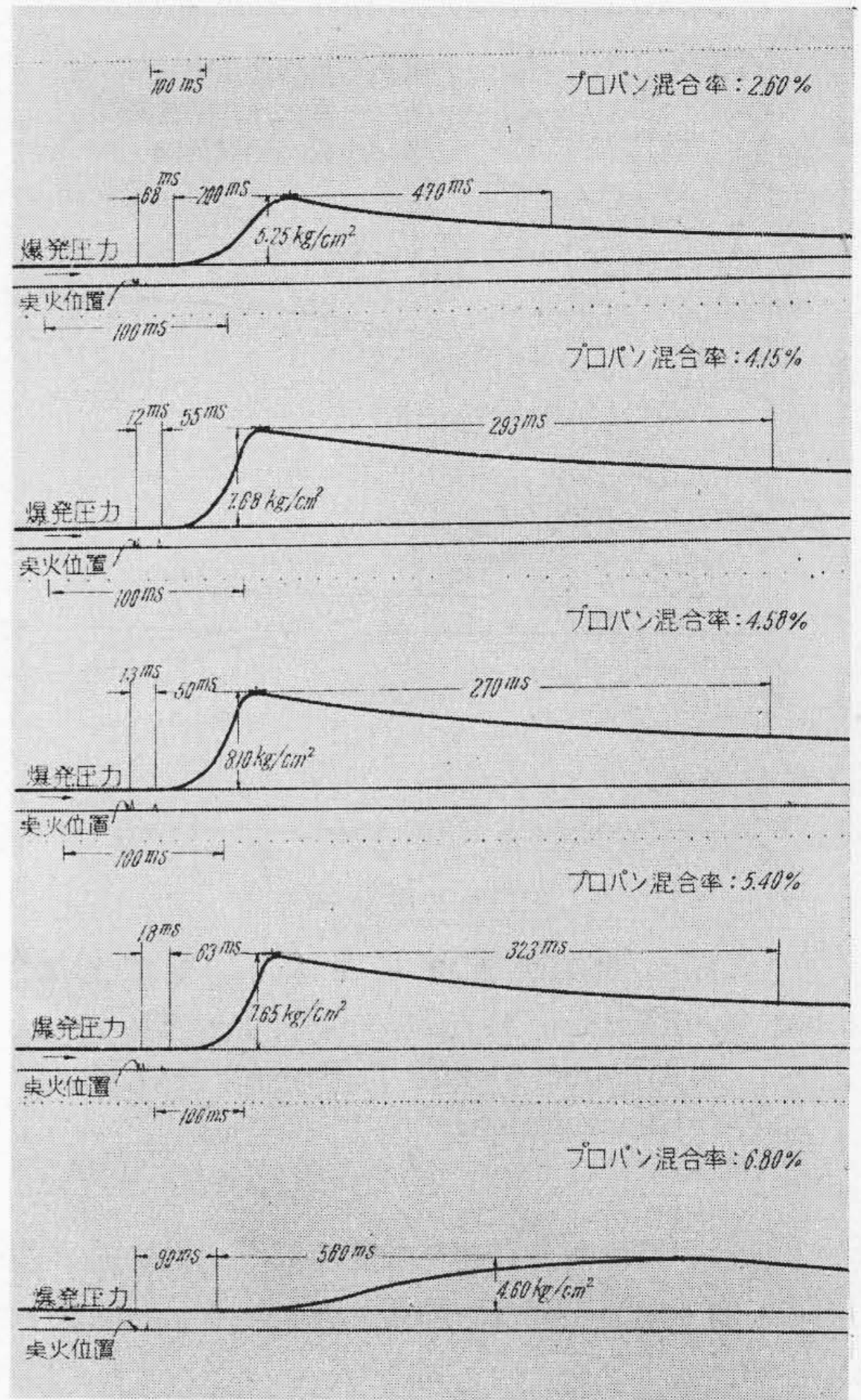
第4図 プロパン混合率と爆発圧力との関係
Fig. 4. Relation between Propane Percentage and Explosion Pressure



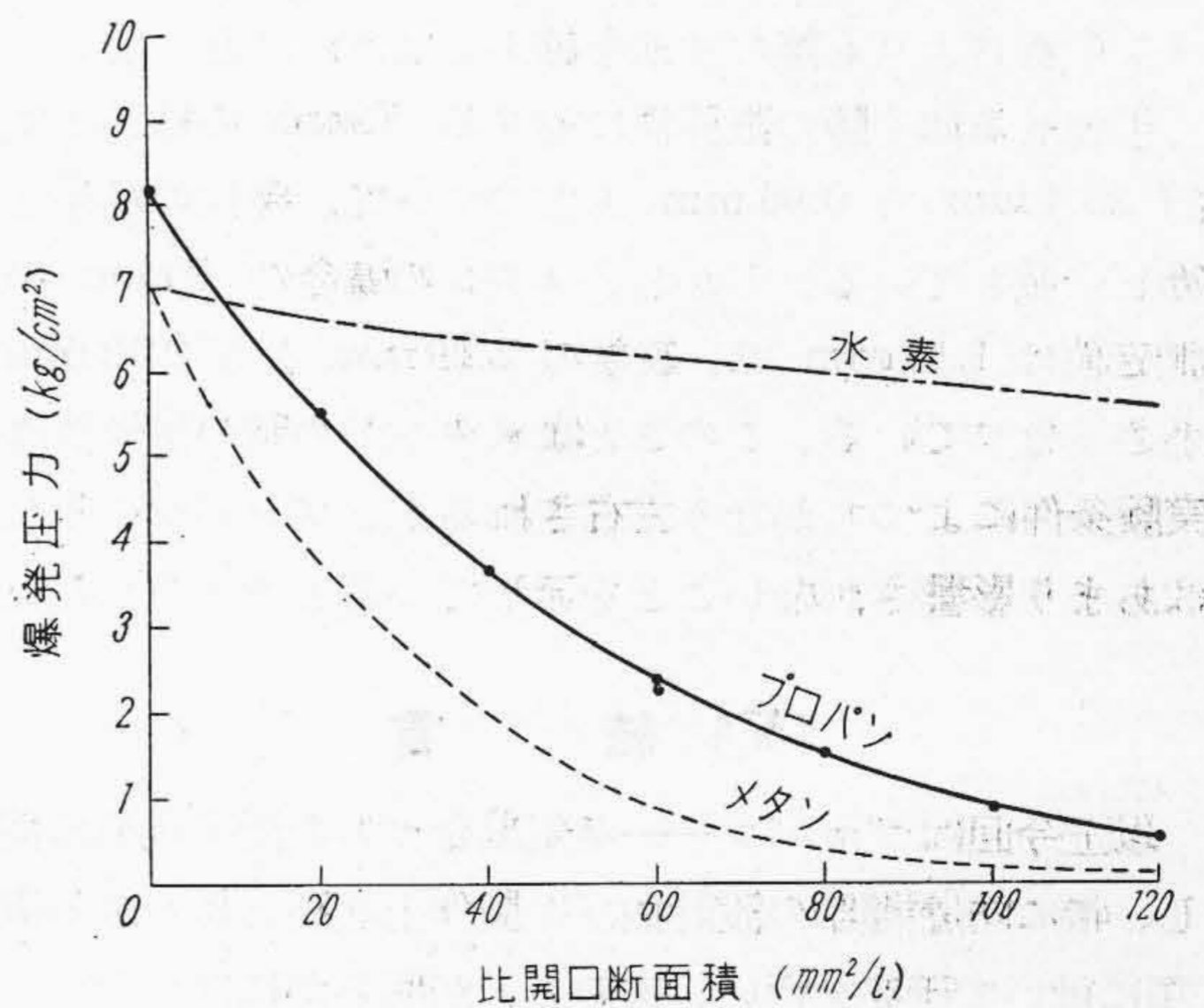
第5図 プロパン混合率と爆発特性との関係
Fig. 5. Relation between Propane Percentage and Explosion Characteristics

(3) 比開口断面積と爆発圧力特性との関係

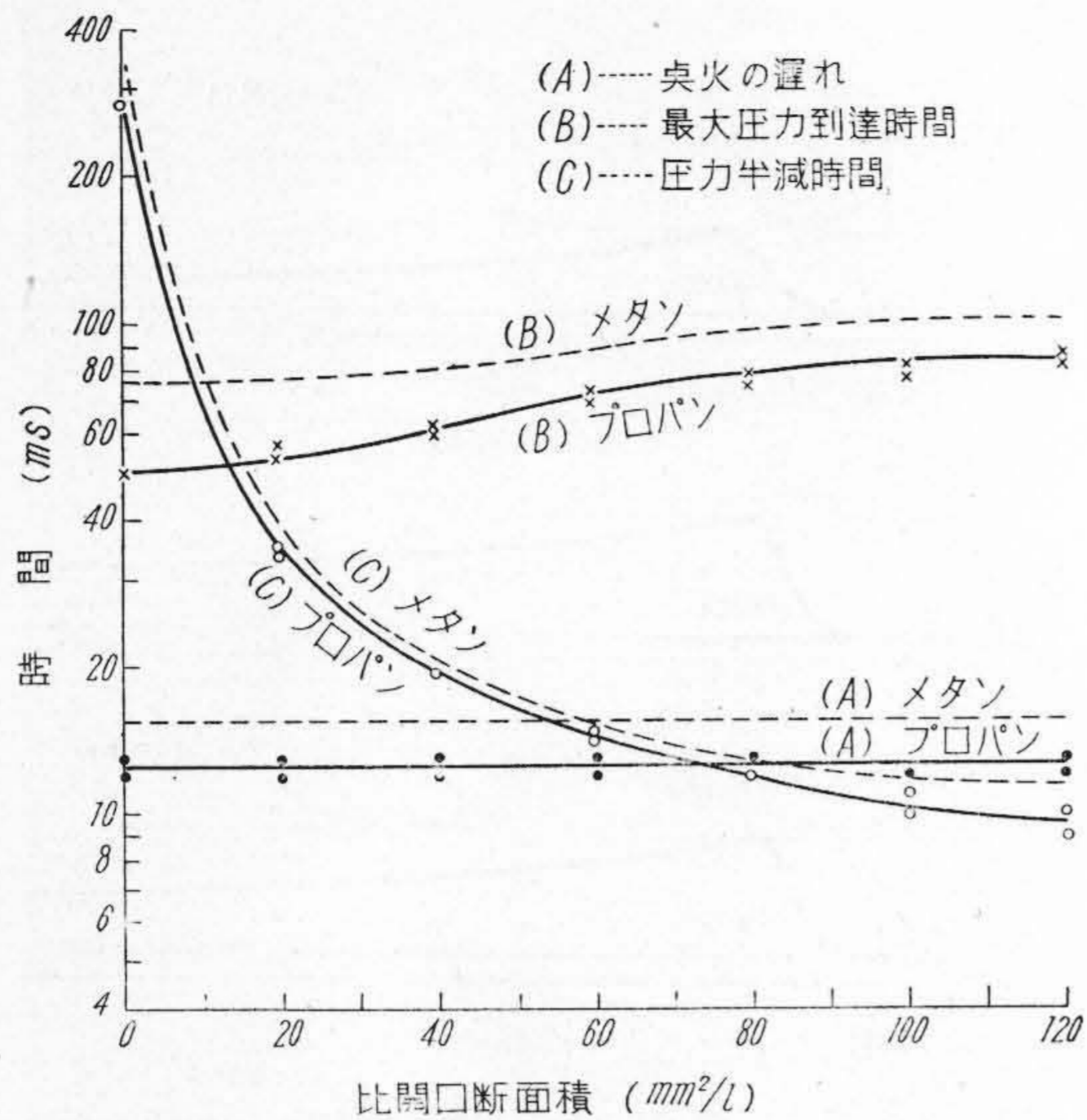
比開口断面積と爆発圧力との関係を第7図に示す。比開口断面積が大きくなるに従って爆発圧力が急激に小さくなり、その傾向はメタンとほぼ似ている。従って、プロパンに対しても狭隙防爆構造を採用し、爆発圧力の軽減を図ることができる。しかし、同じ比開口断面積のときの両者の爆発圧力を比較すると、プロパンは約1 kg/cm² 大きいから、プロパンの場合は比開口断面積を大



第6図 爆発圧力特性オシログラム
(プロパン混合率を変えた場合)
Fig. 6. Oscillogram of Explosion Pressure
(Effect of Propane Percentage)



第7図 比開口断面積と爆発圧力との関係
Fig. 7. Relation between Specific Sectional Area of Flange Gaps and Explosion Pressure



第 8 図 比開口断面積と爆発特性との関係
Fig. 8. Relation between Specific Sectional Area of Flange Gaps and Explosion Characteristics

きくとするか、又は十分必要な強度をもたせる注意が必要である。第 8 図は比開口断面積と爆発特性との関係であるが、傾向はメタンと殆ど同様で、たゞそれぞれの時間が多少短くなっているに過ぎない。

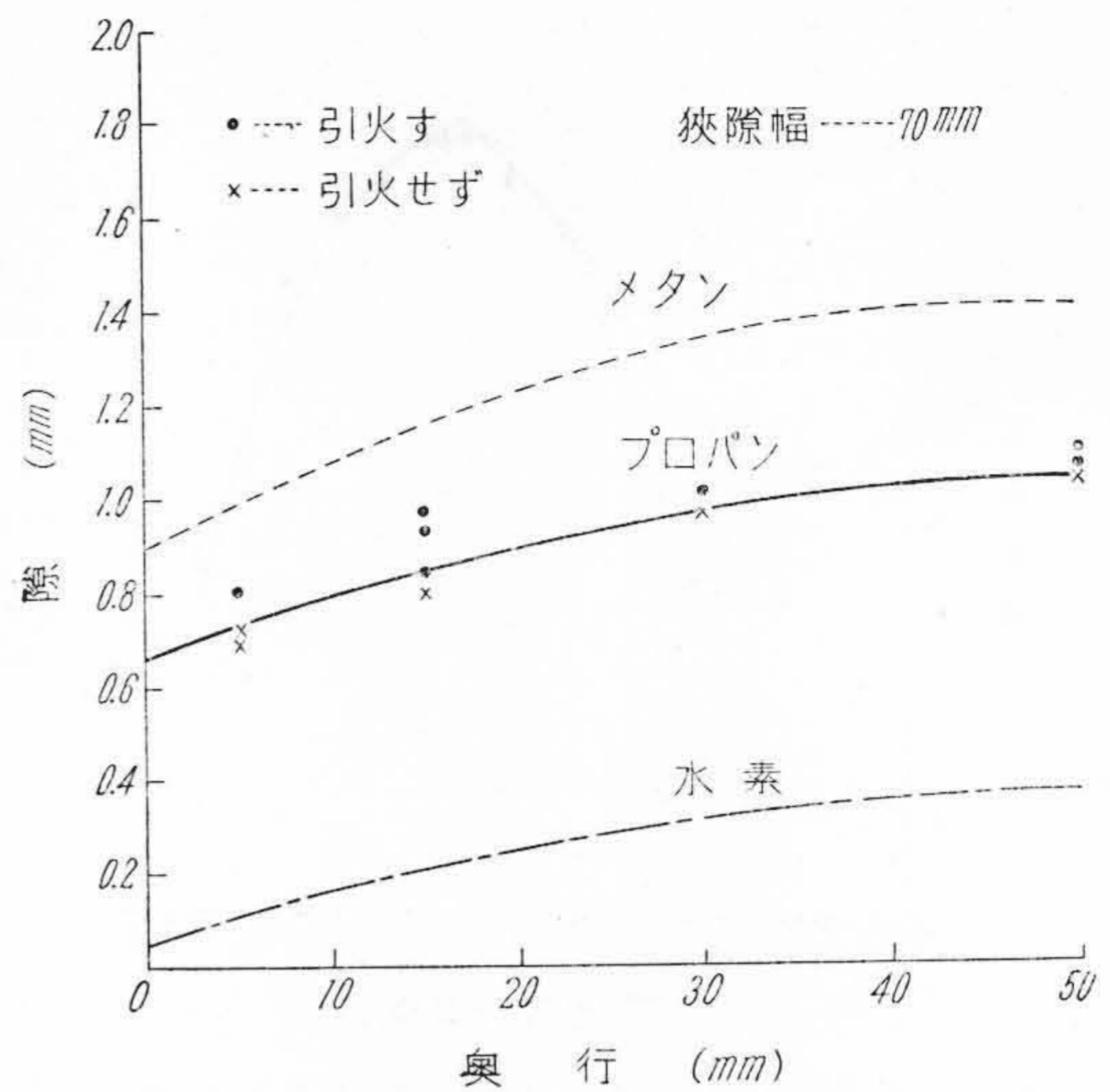
(4) 火焰逸走限界

実験結果を第 9 図に示す。奥行と隙の限界値との関係はメタン等の場合と同じ傾向を示し、奥行が長いほど隙の限界値が大きくなる。しかし、プロパンの場合の限界値はメタンのその約 70~80% で、防爆的にはメタンより危険である。従つて、同じ安全率を保つためにはメタンの場合よりも隙の寸法を縮小しなければならない。

前述せる如く隙の限界値に対する Paton の結果は奥行 25.4 mm で 0.96 mm となつていて、今回の結果と殆ど一致している。しかし、メタンの場合の Paton の測定値は 1.17 mm で、筆者の 1.29 mm より 0.12 mm 小さくなつている。このことはメタンでの隙の限界値は実験条件によつてかなり左右されるが、プロパンのそれはあまり影響されないことを示していると考えられる。

[V] 結 言

以上今回はプロパン—空気混合ガスの爆発現象に関し、特に防爆機器の設計並びに製作上必要と思われる事項に就いて研究を行い、次のことが明らかになつた。



第 9 図 火焰逸走限界曲線
Fig. 9. Limits of the Flame Running-out through Flange Gaps

- (1) プロパン—空気混合ガスの爆発限界混合率は 2.33~7.28% である。
- (2) プロパン混合率が 4.58% のときの爆発圧力が最も大きく、8.15 kg/cm² に達する。これはメタンの場合より約 1 kg/cm² 大きい。
- (3) 比開口断面積と爆発圧力との関係はメタンの場合とほぼ同様の傾向を示すが、圧力はメタンの場合より大きい。
- (4) 同じ奥行のときの隙の限界値はプロパンはメタンの 70~80% で、メタンより危険である。

最後に本研究を行うにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜つた日立研究所副所長三浦倫義博士並びに主任研究員西堀博博士に対し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) International Critical Table Vol. 2, 176 (1927)
- (2) Physikalish Chemishe Tabllen (1936)
- (3) M. Hillbrand: E.T.Z. 59, 1116 (1938)
- (4) C.E.R. Bruce: E.E. 95, 50 (1948)
- (5) 西堀、岩淵: 日立評論 33, 249 (昭 26)
- (6) Lewis & Von Elbe: Combustion Flame and Explosion of Gases (1938)