産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

プロパン空気系混合ガスの実験的最大セーフ・ ギャップの圧力依存性に関する研究

鶴見 平三郎

1976

労働省産業安全研究所

プロパン空気系混合ガスの実験的最大セーフ・ ギャップの圧力依存性に関する研究

鶴 見 平 三 郎*

び蒸気の物性に対して依存性を有しているから, さら に各種のガスおよび蒸気を対象として実験値を蓄積し て行く以外に解明する方法を見出しえない。

この研究では、上述の各種文献に実験値がしめされ ていないガスおよび蒸気を対象として実験を行なうこ ととし、現下最も爆発災害の多い C_3H_8 をその対象ガ スとして取り上げ、そのセーフ・ギャップの圧力依存 性を解明したものである。

2. 実 験

2.1 実験装置

写真1に掲げた実験装置を用いて研究を行なった。 この装置は、この種の研究を行なうために新たに設 計,製作したものである。この装置は、ガス混合装置 部、爆発圧力計測装置部およびセーフ・ギャップ測定 部に大別され、前掲の写真はパネルの後側を撮影した ものであり、向って右側に見える容器が、爆発容器で あり、この中の試料ガスの圧力をパラメータとして実 験を行ったものである。なお、セーフ・ギャップ実験 装置の詳細については、鶴見⁴⁾による先の報文によら たい。

2.1.1 セーフ・ギャップ測定部

測定部は、内外二つの容器部からなり、内部測定容器(以下内部容器という。)の内容積は、8,000 ml であり、上部と下部とに分けられ、そのフランジの長さは、25.0 mm である。材質は、SUS 304 からなり、その形状は、球状であり、中心で点火することにより火炎の3次元の伝ばが均等にできる如く設計した。

フランジ間のギャップは、球状容器下半部に連結されているシャフト部に取りつけた2個のダイヤルイン ジケータのスケールを目視することにより、あるいは インジケータからの電気的出力を計測することにより 測定するものであり、その精度 ±5×10⁻³mm であ

1. まえがき

この論文においてセーフ・ギャップの圧力に対する 依存性とは、試料とする可燃性ガスおよび蒸気の着火 前の初期圧力の変動に伴ってセーフ・ギャップの値が 如何に変動するかをいうものとする。

そしてこのことは,高圧下における防爆工学上の諸 対策からみても,重要な研究項目の一つである。

これらの観点から,セーフ・ギャップの圧力に対す る依存性に関する研究は,各国の研究者によってこれ まで取りあげられてきた。

これらの研究のうち代表的なものとして K. H. Grobleben¹⁾ および K. Nabert²⁾ の研究結果 などがあげ られるが,前者は, CH₄,都市ガスおよび H₂ を対象 とし,後者は, CH₄, C₂H₄ および n-C₆H₁₄ の炭化水 素と H₂ を対象として,いずれもこれらのガスと空気 との混合物についての実験値を発表している。

この種の研究の内容の詳細については, 鶴見³⁾の調 査結果を参照して頂きたい。

いずれにしても, セーフ・ギャップに及ぼす圧力の 効果は, これらの文献値からわかるとおり, ガスおよ



写真 1 実験装置の外観

化学研究部



マネック 設定委員
図1 セーフ・ギャップ測定装置スケルトン

る。また、フランジの上下面は、スリ合せにより精密 加工が施されていて、部分的なギャップの差異がない ようになっており、その状態は、上記のとおり複数個 のダイヤル・インジケータにより絶えずモニターされ ている。

これらの詳細を図示したものが、図1であり、内部 容器のフランジの外縁と外部測定容器(以下外部容器 という。)の内壁までの距離は、61mm であり、ギャ ップより噴出したジェットが壁に激しく衝突し外部容 器内のガスがじょう乱されるという壁による影響⁵⁾ が ないように設計した。

2.1.2 ガス混合装置

- 2 -

プロパン―空気系混合ガスは,高圧ガス混合容器内 に貯えることによって,一測定値における試料ガスの 成分濃度の相違からくる誤差をさけた。なお,試料ガ スの調整法は,精密連成計(精度±0.5×10⁻¹kg/cm²) を用いて分圧法によって行ない,均質な状態になるま で約3時間そのまま放置した。濃度のチェックは,干 渉計を用い,その精度は,±1×10⁻²%である。

2.1.3 圧力計測装置

内部容器中の爆発の有無および外部容器に対する火 炎伝ばの状況をモニターするために,ストレンゲージ 方式の圧力ピック・アップを用い,その圧力上昇曲線 を電磁オシログラフおよびメモリスコープを用い記録 した。なお内部容器中の試料ガスに対する点火は,火 花放電法による中心点火であり,二次側 15kV,20 mA のネオン・トランスとイグニッション・プラグを 用いた。 プロパン空気系混合ガスの実験的最大セーフ・ギャップの圧力依存性に関する研究

この点火と発生圧力との測定は,シーケンス・タイ マを用い連続的に自動操作されるようシステム化され ている。 図3には、 M.E.S.G.+1インクリメントの内外容 器内の圧力-時間曲線を記録したものである。

- 3 --

2.2 実験方法

セーフ・ギャップの測定方法には, 鶴見⁶⁾の各報文 にしめすとおり二つの方法があり, この研究では, 内 外の容器中の試料ガスの濃度は,同一のものを用いた。

2.2.1 試料ガスの種類および濃度

試料ガスは, プロパン-空気系の混合ガスを用い, その濃度は, IEC⁷⁾ の報文により4.20%とした。使用 したプロパンの純度は, 分析の結果, 99.6% プロパ ン, レストはエタンである。

2.2.2 ギャップ

ギャップの設定方法は、ダイヤル・インジケータで モニターしながら、内部容器の接合部のギャップを微 動調整し、バックラッシュを防ぐために up 法に統一 した。ギャップのインクリメントは、 10^{-2} mm であ る。

2.2.3 実験回数

各国の研究の動向およびわが国における工場電気設備防爆指針⁵⁾ にもとづき,15回連続して外部容器のガ スに引火しない点をもってセーフ・ギャップとした。 火炎伝ばの確認は,前節に既述したとおり,電気信号 により計器に記録され,実験者によるマンエラーを完 全に排除した。

3. 研究結果

研究は、室温(冬期 16~17°C,空気調和設備付)に おいて試料ガスの初期圧力を変えることによって行わ れ、各初期圧力条件下における M.E.S.G.を測定する とともに、これに影響を及ぼす試料ガスの挙動を実測 したものである。試料ガスの初期圧力は、 0.5 kg/cm^2 , 1.0 kg/cm^2 , 1.5 kg/cm^2 , 2.0 kg/cm^2 , 2.5 kg/cm^2 の 5 測定点であり、圧力はいずれも絶対圧力(以下 abs. という。) である。

この研究の結果を各項目別に取りまとめると以下に 記載するとおりである。

3.1 圧力-時間曲線

図2には、それぞれの測定条件下における内外容器 内の圧力-時間のプロファイルをしめしたものである。



図 2 圧力-時間ダイヤグラムに対する初圧の影響
 注 (a) 外部容器 (b) 内部容器











産業安全研究所技術質料 RIIS-TN-76-3

表 1 各初圧別 M.E.S.G. 測定表

初 圧	ギャップ (mm)	実 験 の シーケンス	Non-iq. Ig.	確 率
(abs.)		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15		
0. 5 kg/cm ²	1. 34 1. 33 1. 32 1. 31 1. 30 1. 28 1. 27	0 × 0 × 0 × 0 × 0 × × × 0 × × × × × × × × × × × × × ×	0/1 0/1 1/1 1/1 1/1 3/1 15/0	100% M. E. S. G.
1. 0 kg/cm ²	0. 96 0. 95 0. 94 0. 93 0. 92 0. 91 0. 90 0. 89 0. 88	0 0	0/15 1/14 3/12 2/13 9/6 6/9 10/5 12/3 15/0	100% M. E. S. G.
1.5 kg/cm ²	0. 82 0. 81 0. 80 0. 79 0. 78 0. 77 0. 76	0 0 × × × × × × × × × × 0 0 × × × × × × × × × 0 × 0	0/1 0/1 10/1 0/1 8/1 1/1 15/0	
2. 0 kg/cm ²	0. 67 0. 66 0. 65 0. 64 0. 63 0. 62 0. 61 0. 60 0. 59	0 × 0 0 × × × × × 0 × × × × × 0 × × × × 0 × × × × 0 × × × × 0 × × × × × × × 0 × × × × × × 0 × × × × × × × 0 × × × × × × × 0	0/1 0/1 1/1 0/1 5/1 5/1 4/1 8/1 15/0	
2. 5 kg/cm ²	$\begin{array}{c} 0.\ 47\\ 0.\ 46\\ 0.\ 45\\ 0.\ 45\\ 0.\ 42\\ 0.\ 42\\ 0.\ 41\\ 0.\ 40\\ 0.\ 39\\ 0.\ 38\\ 0.\ 37\\ 0.\ 36\\ \end{array}$	O × O × × × O × 0 × × × O × × × 0 × × × × O × × × × O × × × × × × × × × × × × × × O × × × × × × × × × × × × × × × × O × O	$\begin{array}{c} 0/1\\ 1/1\\ 3/1\\ 1/1\\ 3/1\\ 4/1\\ 4/1\\ 7/1\\ 14/1\\ 1/1\\ 15/0\\ 15/0\\ 15/0\\ \end{array}$	

注:〇 火炎伝ば (Ig.), × 非火炎伝ば (Non-ig.)

• • • • • •

- 4 -



図 5 初圧と内部容器内の平均昇圧速度との 関係(外部容器に flame transmission をおこさないギャップの場合)





3.2 内部容器の圧力の挙動

図4は、flame transmissionの現象がおこらなかった場合の内部容器内に発生した最大爆発圧力をプロットしたものであり、図5は、その場合の平均昇圧速度であり、いずれも圧力の単位はゲージ圧でしめした。

3.3 外部容器の圧力の挙動

図6および図7は、外部容器内に発生した最大爆発 圧力および平均昇圧速度をしめしたものであり、この 場合は、当然 flame transmission の結果、発生した 爆発圧力であって、いずれもゲージ圧でしめした。

3.4 M.E.S.G.

表1は, M.E.S.G. の実測結果をキャップの寸度毎 に一覧表として取りまとめたものである。

図8は、上述の結果を一つの図に取りまとめたもの



- 5 -

図 8 M.E.S.G. の初圧に対する依存性

であり, M.E.S.G. を試料ガスの初期圧力をパラメー タとしてプロットしたものである。

4. 考 察

プロパン空気系の混合ガスの M. E. S. G. の,その混 合ガスの初期圧力に対する依存性については,実験的 にみた場合,つぎのことがいえる。

4.1 内外容器内の爆発圧力の挙動

M.E.S.G. の圧力に対する依存性を論ずるには,内 外容器内の爆発圧力の挙動を無視するわけにはいかない。

4.1.1 爆発圧力の初期圧力に対する依存性

図4および図6にそれぞれしめすとおり,内外容器 内に発生する爆発圧力の最大値は,いずれの場合にあ っても初期圧力に対して依存性を有しており,これら の関係は,つぎの直線の方程式であらわされる。

内部容器 y=1.470 x+0.015

外部容器 y=8.700x-0.050

これらの実験式は,初期圧力 0.5 kg/cm² abs. から 2.5 kg/cm² abs. の範囲内におけるものであり,この 直線関係は,連鎖破壊の影響により,爆発圧力の絶対 値が,低い圧力をしめす内部容器内の爆発の挙動も規 定している。

4.1.2 平均昇圧速度

図5および図7にみられる如く,平均昇圧速度は, 点火エネルギーを一定にしているにも拘らずかなりの パラツキがみられる。

このことは、平均昇圧速度に対しては、発火遅れて が大きくきいてくるからに外ならないわけであり、こ のては、ギャップの大きさに後述のように大きな依存 性を有しているからである。

したがって,特に外部容器の平均昇圧速度について は,M.E.S.G.の差に,依存性を有しているための, パラツキである。

いずれにせよ,平均昇圧速度と試料ガスの初期圧力 との関係は,直線関係であらわしうるものと考える方 が妥当であり,最小二乗法を用いてこれを求めると実 験の範囲内の初期圧力については,つぎの式が成立す

る。

外部容器について

y = 86.388 x + 120.116

内部容器について

y = 15.174 x + 36.653

内部容器の爆発圧力については、二つのパルスがみ られることは、以下に述べるとおりであるが、上記の 実験式は、最初のパルスについて解析したものである。

4.1.3 発火遅れ

τは、外部容器のガスに対する点火確率が0に近づ くにつれ増大する。 すなわち、 M.E.S.G. の近傍で は、 τ が最大の値をしめしている。

図3は、実験条件、初期試料ガス圧力 2.0 kg/cm² abs., ギャップの寸度 0.60 mm (この場合の M.E.S.G. は 0.59 mm) における爆発圧力のプロファイルをしめ したものであり、この場合の τ は、56 msec. という極 めて長い時間を記録をしめしている。このことは、セ ーフ・ギャップ近傍の火炎の挙動をあらわすものとし て注目すべきことである。

図2のデータは、すべてM.E.S.G.より3インクリ メント以上の大きなギャップを設定した場合のもの であり、いずれも内部容器より外部容器に対する未燃 ガスに flame transmission があった場合のものであ る。

鶴見⁹⁾のさきの報告でふれたように、内部容器にお ける圧力-時間曲線には、二つのピークがみられ、こ れは、内部容器内のガスの燃焼にともない、外部容器 内の未燃ガスが内部容器に侵入し、二つのパルスが発 生したものであるが、この典型的な現象は、減圧にな るにつれて減少し、0.5 kg/cm²の条件下においては、 プロファイルに、あらわれなかった。このことは、第 1のパルスの絶対値が初圧の減少にともなって減少し たため、見掛け上第1のパルスがプロファイルに顕在 化しなかったことも一つの要因と考えられる。

4.1.4 M.E.S.G.

図8にプロットされた M. E. S. G. のバラツキの状況 をみると、1.0 kg/cm² abs. の条件下の測定値がかな りの偏差をしめしているが、この測定点の実験は、た またま夏期にあたり、実験室の室温が影響したものと 思われる。

図8の,実線でしめす実験式は,すべての値を網ら したものでありコンピュターを用いて計算したもので ある。

さきにしめしたプロパン以外のガスを対象とした文 献¹⁰⁾¹¹⁾においては, 圧力の M. E. S. G. に対する依存性 は, 無限小となる曲線でしめされているが, 現実に得 られた M. E. S. G. の実測値は, 無限小となる曲線か ら著るしく偏異した。

これら研究者の考え方の基本は、断熱圧縮に基づく 流体の諸現象を一応考えないとすれば、圧力が無限大 になった場合には、M.E.S.G. が無限小になるべきで あるという概念に立っている。

しかし,筆者の実験結果からみて,この実験の範囲 内では安全工学的見地からみても,M.E.S.G.の圧力 依存性は,一次関数で近似するのが適当であると考え られ,前述の立場に立った場合よりも,高圧力側にお いてか酷な影響をしめしている。

この観点から,以上の実験値を一次関数で既述のと おりコンピュータを用いて整理してみると,つぎの式 がえられた。

-- 6 --



y = -0.418 x + 1.401

つぎに M.E.S.G. の 1/p に対する依存性をしめす と、図 9 のとおりであり、この図においても p が infinite になると M.E.S.G. は 0 に無限に近づく傾向、すなわち0に convergence するような傾向は、 認められない。

5. む す び

いままでにふれたことから,現在までに測定されて いないプロパン空気系混合ガスのセーフ・ギャップの 圧力に依存する挙動についてはつぎのことが結論づけ られる。

5.1 M.E.S.G. の圧力依存性

M. E. S. G. の値を規定するファクターの一つとし て, 圧力を無視しえないことは,広く各国の学者によ り認められていることである。

この実験結果でわかるとおり,特にM.E.S.G.に関 連を有する内部容器に発生する爆発圧力なびに昇圧速 度の初期圧力に対する依存性は,すべて直線関係でし めされる。

このことから考えても,あるいは,実験においてコ ンピュータを用いて前述の無限小となるの曲線を追跡 して行ったトライアルの結果からみても,M.E.S.G. の初期圧力に対する依存性は,安全工学上の立場から 考えると一次関数によって関係つげられていると考え ることが妥当である。つぎの章においては,これらの 関数から計算した爆発等級の転移圧力をしめすことに した。

5.2 初期圧力による爆発等級の転移

実験式より計算した結果によれば、爆発等級3と爆発等級2との限界圧力を p_{3-2} であらわすとつぎのことがいえる。

 $p_{3-2}=2.39 \text{ kg/cm}^2$ abs.

同様に,爆発等級2から爆発等級1に転移する圧力 を *p*₂₋₁ であらわすと以下のとおりである。

 $p_{2-1}=1.91 \text{ kg/cm}^2$ abs.

これらのことから例えば耐圧防爆電気機器等の高圧 下における使用は,防爆工学上慎重な考慮が必要であ る。

なお、この研究の概要については、日本化学会第33 秋季年会化学関係学協会連合協議会研究発表会合同大 会(昭和50年10月17日~20日開催)において発表し学 会の批判を仰いた。

おって,このレポートの計算は,すべて当所の計算 機システム FACOM 230/35 のコンピュータによった。 (昭和51年6月24日受理)

主要参考文献

- K. H. Grobleben : Der Ausströmungvorgang als Ursache der Ausserzündung bei der druckfesten Kapselung. (1967)
- K. Nabert, The Significance of a Standard Apparatus for Testing Safe Gaps for the Safety of Electrical Equipment in respect of Explosion Hazard. (1967)
- 3) 鶴見平三郎:産業安全研究所安全資料, セーフ・ギャップについて, RIIS-SD-74-1 (1974)
- 4) 鶴見平三郎:プロパン-空気系混合ガスの最大 実験的セーフ・ギャップの温度依存性に関する 研究,労働省産業安全研究所技術資料,RIIS-TN-75-6 (1976)
- D. W. Woodhead et al., Brit, Elec. & Alld. Ind. Res. Assn. Tech. Repts." D/T 129 (1961)
- 6) 鶴見平三郎:プロパン-水素-空気-系混合ガス を対象とする実験的セーフ・ギャップに関する 研究,労働省産業安全研究所研究報告, RR-24-1 (1975) 等
- Commission Électrotechnique International: Premier complément à la Publication 79-1, Matériel électrique pour atmosphères explosives. (1975)
- 8) 工場電気設備防爆指針, 172 (1974)

- 8 --

 9) 鶴見平三郎:プロパン-空気系混合ガスの最大 実験的セーフ・ギャップの温度依存性に関する 研究,労働省産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-75-6 (1976)

10) K. H. Grobleben : Der Ausströmungvorgang als Ursache der Ausserzündung bei der druckfesten Kapselung (1967)

 K. Nabert, The Significance of a Standard Apparatus for Testing Safe Gaps for the Safety of Electrical Equipment in respect of Explosion Hazard. (1967)

產業安全研究所技術資料 RIIS-TN-76-3				
昭和 51 年 9 月 30 日 発行				
発行所 労働省産業安全研究所				
東京都港区芝5丁目35番1号 電 話 (03)453—8441(代)				
印刷所新日本印刷株式会社				
郵便番号 108				