

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1976

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

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*

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

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にとし、現下最も爆発災害の多い C₃H₈ 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なったものである。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、球形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 $\pm 5 \times 10^{-3}$ mm であ

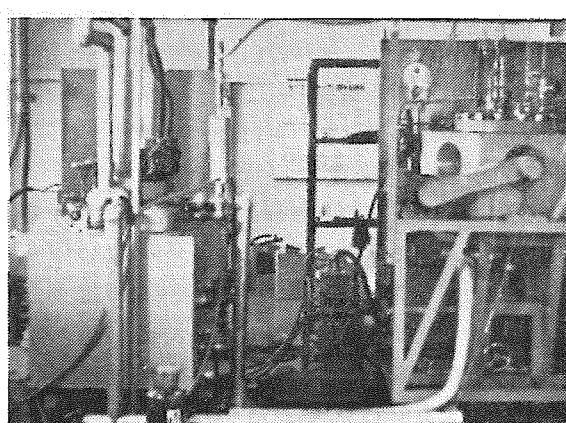


写真1 実験装置の外観

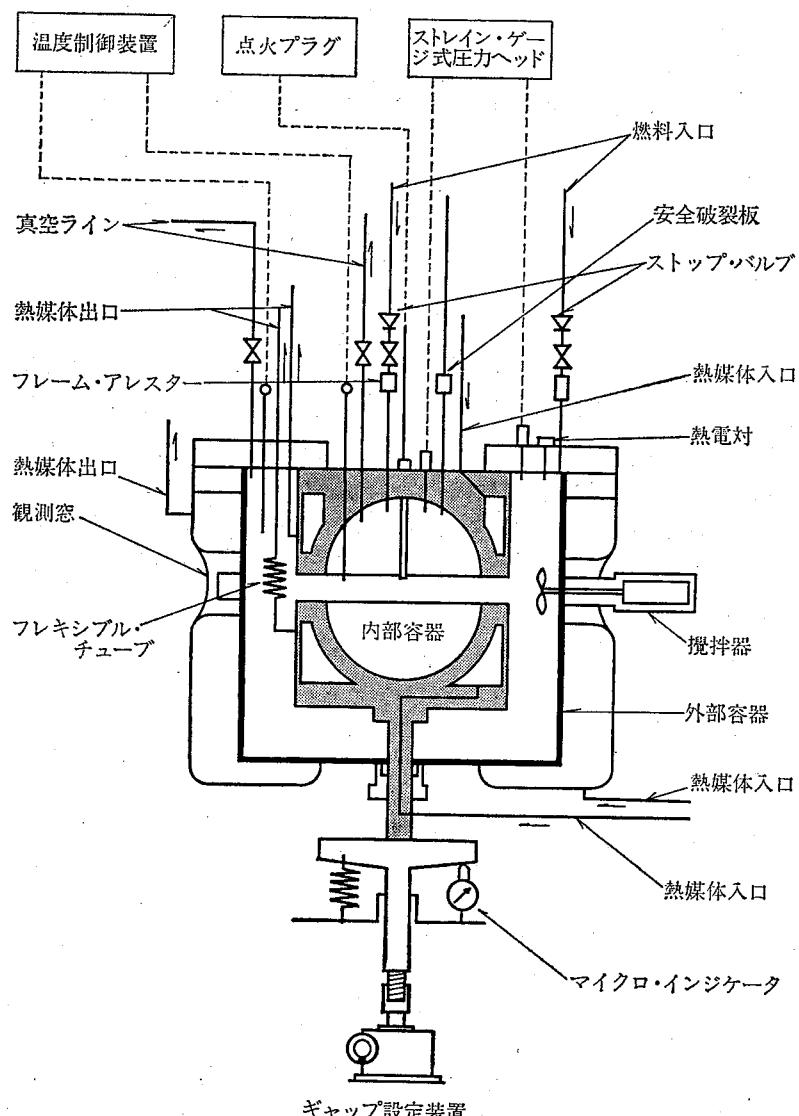


図 1 セーフ・ギャップ測定装置スケルトン

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

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± $0.5 \times 10^{-1} \text{ kg/cm}^2$ ）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、干涉計を用い、その精度は、± $1 \times 10^{-2}\%$ 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, 20mA のネオン・トランスとイグニッション・プラグを用いた。

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。

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⁸⁾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 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。

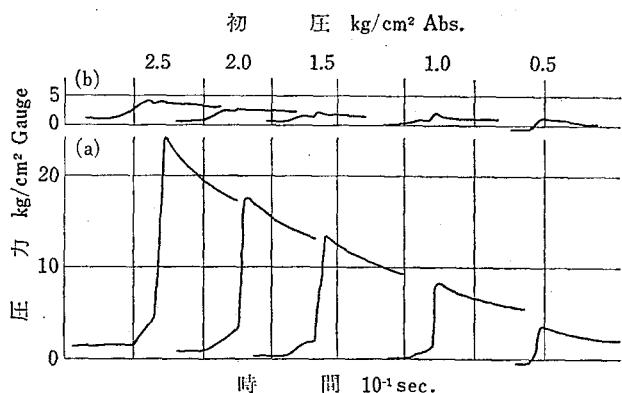


図 2 圧力-時間ダイヤグラムに対する初圧の影響
注 (a) 外部容器 (b) 内部容器

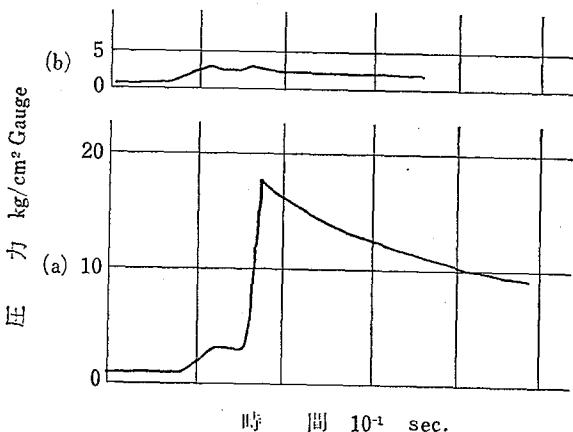


図 3 セーフ・キャップ近傍における発火遅れの挙動
条件 (1) 初圧 $2.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$
(2) ギャップ 0.60 mm
注 (a) 外部容器 (b) 内部容器

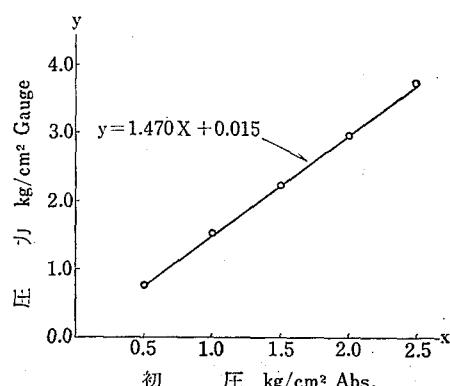


図 4 初圧と内部容器内の爆発圧力との関係
(外部容器に flame transmission をおこさないギャップの場合)

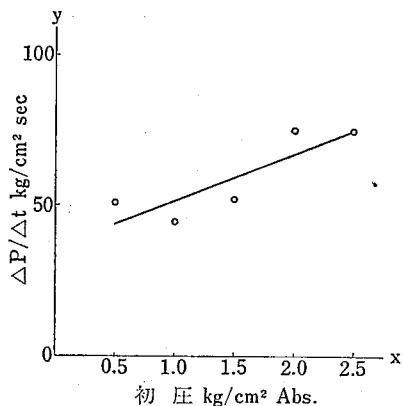


図 5 初压と内部容器内の平均昇圧速度との関係 (外部容器に flame transmission をおこさないギャップの場合)

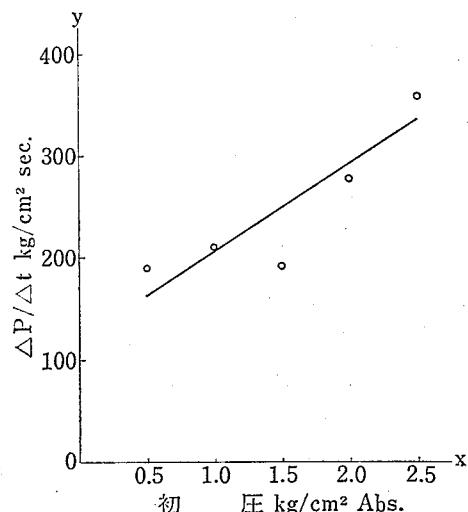


図 7 初压と外部容器内の平均昇圧速度との関係

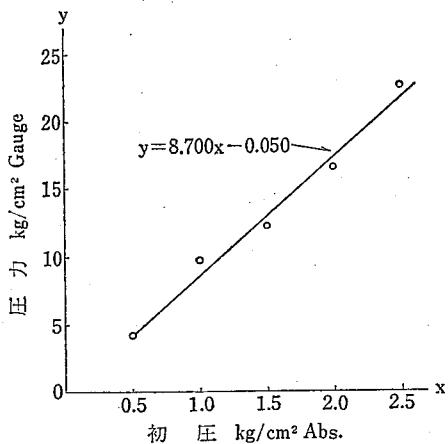


図 6 初压と外部容器内の爆発圧力との関係

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つ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. の実測結果をギ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

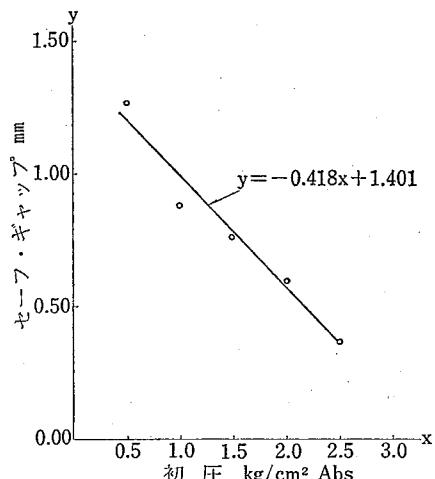


図 8 M. E. S. G. の初压に対する依存性

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。

$$\text{内部容器 } y = 1.470x + 0.015$$

$$\text{外部容器 } y = 8.700x - 0.050$$

これらの実験式は、初期圧力 $0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ から $2.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ 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バラツキがみられる。

このことは、平均昇圧速度に対する、発火遅れ τ が大きくきてくるからに外ならないわけであり、この τ 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、バラツキである。

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き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

$$y = 86.388x + 120.116$$

内部容器について

$$y = 15.174x + 36.653$$

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 $2.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ 、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⁾のさきの報告で述べたように、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/cm^2 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、 $1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs.}$ 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。

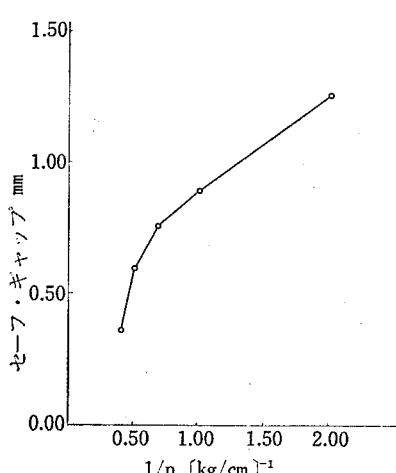
図8の、実線でしめす実験式は、すべての値を網らしたものでありコンピューターを用いて計算したものである。

さきにしめ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ーを用いて整理してみると、つぎの式がえられた。

図 9 M.E.S.G. と $1/p$ との関係

$$y = -0.418x + 1.401$$

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 α 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。

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け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なる。

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。

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

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。

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

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

- 1) K. H. Grobleben : Der Ausströmungsvorgang als Ursache der Ausserzündung bei der druckfesten Kapselung. (1967)
- 2) 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)
- 5) 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
- 7) 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)

- 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 Ausströmungsvorgang als Ursache der Ausserzündung bei der druckfesten Kapselung (1967)
- 11) K. Nabert, The Significance of a Standard Apparatus for Testing Safe Gaps for the Safety of Electrical Equipment in respect of Explosion Hazard. (1967)

産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