

各種可燃性ガスの着火性状に関する検証

中山 隆裕*, 中田 季位**, 望月 真*, 鳥谷 淳*

概 要

都市ガスや液化石油ガス等のガス漏れによる火災や、整髪剤や消臭剤等のエアゾール缶及び簡易型ガスこんろの燃料として用いられるボンベのような可燃性ガスに関連する火災が例年発生している。中でもエアゾール缶等の廃棄時に清掃車で発生する火災の割合が多いが、清掃車内部での着火の瞬間を現認できないため、着火源の特定は困難である。

そこで本検証では、可燃性ガスに着火する際における着火源の判断要素を提示することを目的とし、赤熱させた電熱線及びたばこの火の2種類の着火源を用いる実験装置を作製した。プロパンガス、メタンガス及び液化石油ガスの3種類の可燃性ガスについて、各々の着火源による着火性状を検証した結果、3種類の可燃性ガスは赤熱させた電熱線によって着火し、たばこの火によっては着火しなかった。また、赤熱させた電熱線によって着火した時の電熱線の電圧及び電流を測定し、可燃性ガスの着火温度を推定した。

1 はじめに

都市ガスや液化石油ガス等のガス漏れによる火災や、整髪剤や消臭剤等のエアゾール缶及び簡易型ガスこんろの燃料として用いられるボンベ（以下エアゾール缶と簡易型ガスこんろ用燃料ボンベとを併せて「エアゾール缶等」という）のような可燃性ガスに関連する火災が例年発生している。図1は東京消防庁管轄区域（稲城市及び島しょ地域を除いた東京都全域）における最近20年間のガス漏れ火災件数の推移、図2は東京消防庁管轄区域における最近10年間のエアゾール缶等関連火災件数の推移である。

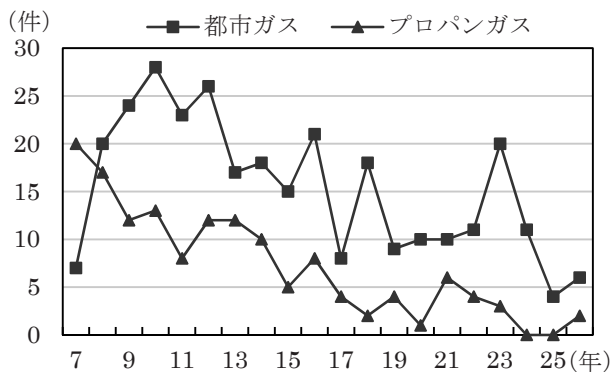


図1 ガス漏れ火災件数の推移¹⁾

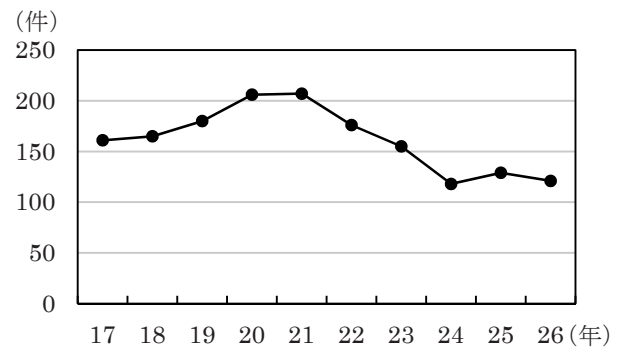


図2 エアゾール缶等関連火災件数の推移²⁾

エアゾール缶の用途は整髪剤、消臭剤、殺虫剤、エアダスター等多岐にわたるが、用途成分を噴射するための噴射剤としてジメチルエーテル、液化石油ガス等の可燃性物質が使用されている。簡易型ガスこんろ用燃料ボンベには一般にノルマルブタン、イソブタン及びプロパンを主成分とする混合ガスが使用されている。

東京消防庁管轄区域における平成26年中のエアゾール缶等種別火災発生要因を表1に示す。表1から、最も多い発生要因は廃棄時の清掃車となっている。これはごみとして収集されたエアゾール缶等が、回転板による圧縮などにより残存ガスを噴出し、何らかの着火源によって着火したものと考えられる。しかし、清掃車内部での着火の瞬間を現認できないため、着火源の特定は困難である。

*危険物質検証課 **狛江消防署

表1 エアゾール缶等種別火災発生要因
(平成26年中)³⁾

火災発生要因	合計	缶の種類											燃筒 易 料型 ガス コン ン ル ベ 用		
		エアゾール缶													
		ヘ ア ス ブ レ	殺 虫 剤	制 汗 剤	消 臭 剤	エ ア ダ ス タ リ ナ ー	塗 料	ス キ ー ワ ッ ク ス ス プ レ	セ メ ン ト ス プ レ	日 焼 け 止 め ス プ レ	芳 香 ス プ レ	潤 滑 剤		明 用	
合計	121	28	14	9	4	2	1	1	1	1	1	1	7	49	
廃棄	清掃車	45	13	5	6	2	1	1	1	1	1	1	1	5	10
	穴あけ その他	29	9	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	12
取扱不適	その他	3	2											1	1
	厨房器具	10	1	2											7
	装着不良	8													8
	暖房器具 その他	5 21	1 2	3 3										1	1

可燃性ガスの着火のしやすさを示す指標として、最小着火エネルギーがあるが、実際の火災において着火源となる、たばこの火のような微小火源、車両の排気管等の高温体により着火するか否かについては、文献等のまとまった資料がない。

2 検証目的

本検証では、可燃性ガスに着火する際における着火源の判断要素を提示するため、着火源として、微小火源であるたばこの火及び高温体である電熱線を使用し、可燃性ガスに対する着火性状を明らかにすることを目的とする。

3 検証方法

(1) 実験装置の作製

以下の実験装置を作製した。

ア 電熱線着火実験装置

電熱線を着火源とする実験を行うために作製した装置を図3に示す。

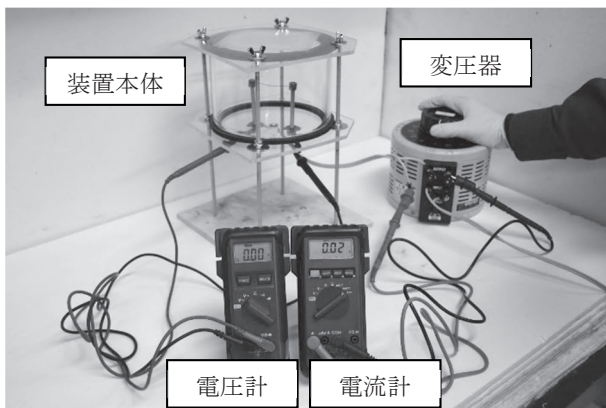


図3 電熱線着火実験装置全体図

装置本体は、内径157mm、高さ100mm、厚さ6mmのガラス製円筒容器を、厚さ5mmの亚克力板で上下から挟

んだ構造となっており、亚克力板とガラス製円筒容器の間はゴムパッキンを挟むことで気密性を保持している。上面亚克力板の中央には排気口を設けてあり、実験時はパラフィンフィルムで覆い、四辺を粘着テープで塞いだ。着火時には熱でパラフィンフィルムが溶融し、穴が開くことで生成した気体が排気される。下面亚克力板には可燃性ガス注入コックを取り付けてあり、注射器を用いて可燃性ガスを注入する。また、2本のボルトを電極として取り付け、電極間にねじで電熱線を固定する構造となっている。電熱線は、日本工業規格(JIS C 2520:1999)で定める電熱用ニッケルクロム線第1種(ニッケル77%以上含有しているもの)で、直径0.5mmのものを使用した。この電熱線を長さ55mmに切断し、電極のボルトにねじで固定した。この電極の装置外部で、電圧計(CUSTOM、CDM-27D DIGITAL MULTIMETER)を並列に、電流計(CUSTOM、CDM-25 DIGITAL MULTIMETER)を直列に接続した。電熱線は、100V商用電源から変圧器(山菱電機株式会社、摺動型単巻変圧器S-130-10)を介して電源供給され、変圧器によって出力電圧を0Vから130Vの間で調整することができる。

イ たばこの火による着火実験装置

たばこの火を着火源とする実験を行うために作製した装置を図4に示す。

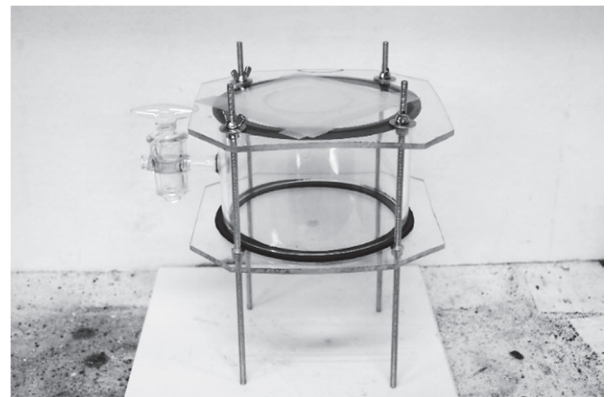


図4 たばこの火による着火実験装置全体図

本装置は電熱線着火実験装置と同様、ガラス製円筒容器、上面亚克力板、下面亚克力板及びゴムパッキンで構成されている。ただし、円筒容器側面に開閉コックがあり、コックを開にすることでたばこを円筒容器内に挿入可能な構造となっている。

(2) 試料

試料として実験に使用した可燃性ガスは次の3種類である。

ア プロパン標準ガス(プロパン99.5%)

イ メタン標準ガス(メタン99.9%)

ウ 液化石油ガス(ブタン70~80%、プロパン20~30%)

以下、それぞれの可燃性ガスの名称はプロパン、メタン、液化石油ガスと記す。

(3) 実験方法

ア 電熱線を着火源とした実験

(実験1) 電熱線温度測定実験

電熱線に通電した時の電圧、電流、温度の関係を調べるため電熱線温度測定実験を行った。電熱線着火実験装置を用いて、図5のように、ガラス製円筒容器及び上面アクリル板を外した状態で、電熱線を電極に接続し、通電した。変圧器で徐々に電圧の上昇、維持を繰り返し行い、電圧計、電流計の値を記録した。同時に、放射温度計(株式会社チノー、携帯型デジタル放射温度計 IR-AHIS、測定温度範囲 600~3000℃、外観を図6に示す)を用いて、電熱線中央の温度を測定した。600℃以上に熱せられた時点で記録を開始し、電熱線が溶断した時点で実験を終了した。



図5 電熱線温度測定実験の様子



図6 放射温度計外観

(実験2) 電熱線着火実験

電熱線着火実験装置を用いて、試料の各種可燃性ガスについて着火実験を行った。実験手順を以下に示す。

まず、55 mm の長さに切断した電熱線を装置の電極に取り付け、通電させて電熱線が赤熱することを確認した。

次に、下面アクリル板、上面アクリル板及びガラス製円筒容器を、ゴムパッキンを間に挟みながら取り付け、支柱のねじで締めつけた。上面アクリル板の排気口は、適当な大きさに切断したパラフィンフィルムを外側に置いた状態で四辺に粘着テープを貼り、円筒容器を密封した。

可燃性ガス混合気の調製は、下面アクリル板のコックにガラス製注射器を取り付け、実験で用いる体積の可燃性ガスと同体積の空気を円筒容器内から取り出した。次

に、可燃性ガスをサンプリングバッグに分取し、実験で用いる体積の可燃性ガスをガラス製注射器にはかりとった。この可燃性ガスを下面アクリル板のコックから実験装置内に注入し、可燃性ガスと空気の混合気を調製した。例を図7に示す。

図7のように電圧計、電流計及び変圧器が配線接続されていることを確認し、通電を開始した。電圧を徐々に上昇させていき、混合気が爆発したときの電圧値及び電流値を記録した。

この実験を、各種可燃性ガスについて注入量を 10mL ずつ変化させながら実験を繰り返した。

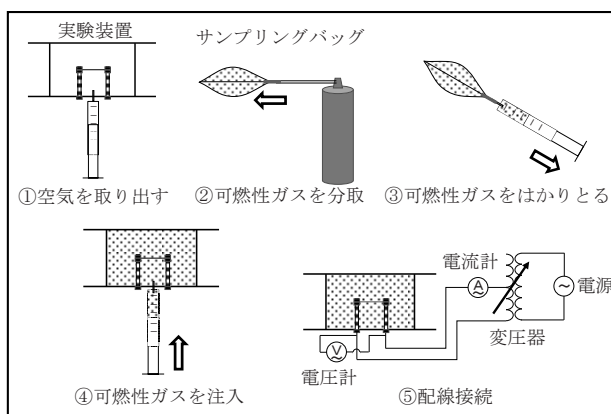


図7 可燃性ガス混合気の調製手順

イ たばこの火を着火源とした実験

たばこの火による着火実験装置を用いて、試料の各種可燃性ガスについて着火実験を行った。実験手順を以下に示す。

まず、下面アクリル板、上面アクリル板及びガラス製円筒容器を、ゴムパッキンを間に挟みながら取り付け、支柱のねじで締めつけた。上面アクリル板の排気口は、適当な大きさに切断したパラフィンフィルムを外側に置いた状態で四辺に粘着テープを貼り、円筒容器を密封した。

可燃性ガス混合気の調製を電熱線着火実験と同様に行った(図7参照)。

着火源に用いたたばこは、市販されている一般的な形状の紙巻たばこの銘柄1種類を使用した。外観を図8に示す。

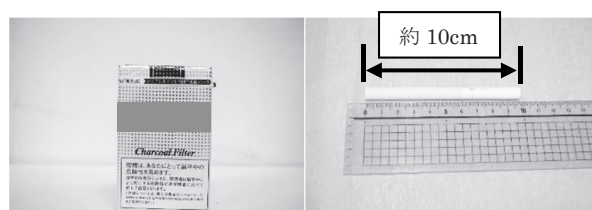


図8 着火源に用いたたばこ外観

実験には、たばこ葉中の水分を除去するため、デシケーター内にてシリカゲルにより1週間以上乾燥させたも

のを用いた。

混合気を調製した後、ガラス製円筒容器の側面に取り付けてあるコックから、火をつけたたばこの先端を挿入し、着火性状を確認した。

4 検証結果

(1) (実験1) 電熱線温度測定実験

同条件で行った3回の結果から、電圧と電流の関係を図9に、電圧と温度の関係を図10に、電流と温度の関係を図11に、電力と温度の関係を図12にそれぞれ示す。電力は電圧と電流の積であり、電熱線の力率を1として算出した。なお、実験時における放射温度計の放射率の設定は、0.90とした。図10から図12の各図中に、全ての測定値から得た回帰式とその決定係数 R^2 の値を記した。

(2) (実験2) 電熱線着火実験

電熱線着火実験において観察した爆発までの推移の一例を、表2に示す。なお、表2中の着火直前から燃焼終了までの画像は、デジタルビデオカメラにより毎秒60フレーム撮影する設定で動画を撮影したもののうち、連続のフレームをキャプチャーしたものである。

電熱線が通電開始から徐々に赤熱し、可燃性ガスに着火した。着火直後は電熱線周辺において青い炎が見られるとともに上面アクリル板の排気口を塞いでいるパラフィンフィルムを突き破って実験装置の上方にも火炎が上昇した。火炎は円筒容器内全体へと拡大した後、縮小して中心部のみとなり、その後燃焼を終了した。着火直後から燃焼終了までの連続した5フレームの様子から、爆発の開始から収束まで、5/60秒程度で完結していた。

ア プロパン

実験は、プロパン50mLを使用した時の濃度2.3vol%から、180mL使用した時の8.2vol%の間で行った。

実験結果から、プロパン濃度に対する、着火に要した最小の電圧、電流及び電力の関係を図13から図15に示す。ここで濃度は、円筒容器の体積を2.2Lとして、注入した可燃性ガス量から算出した。

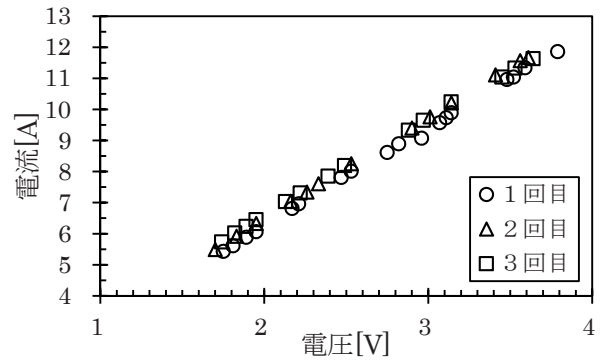


図9 電熱線温度測定実験結果の電圧 - 電流関係図

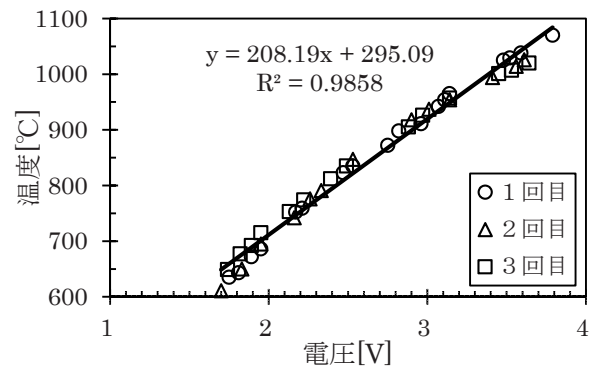


図10 電熱線温度測定実験結果の電圧 - 温度関係図

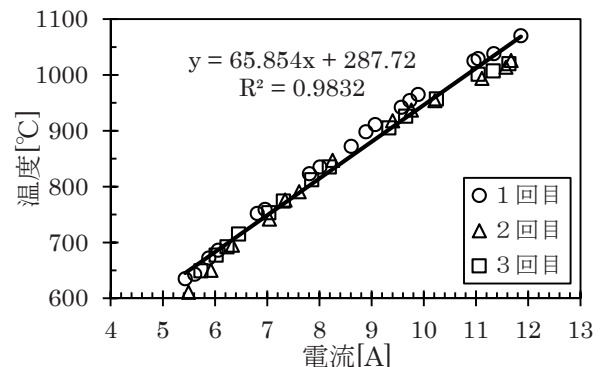


図11 電熱線温度測定実験結果の電流 - 温度関係図

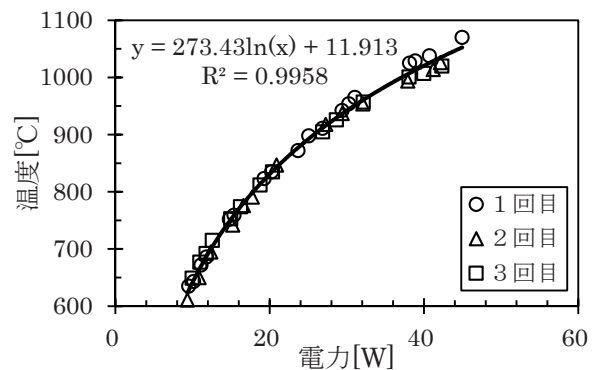
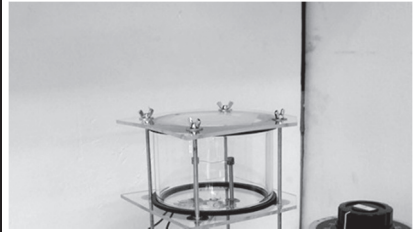



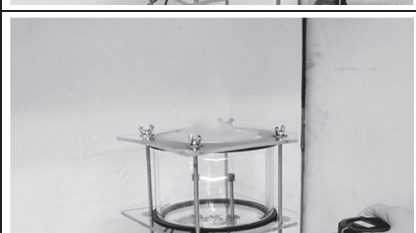
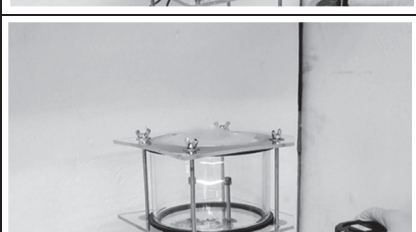
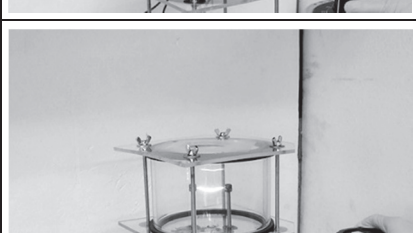


図12 電熱線温度測定実験結果の電力 - 温度関係図

表2 電熱線着火実験における爆発までの推移の一例
(液化石油ガス 80mL)

実験装置の様子	
①通電前	
②着火直前 火炎は見られないが電熱線が徐々に赤熱	
③着火直後 電熱線付近で着火し、排気口から火炎が上昇	
④燃焼中 ③と比べて容器内の火炎が拡大	
⑤燃焼中 火炎が容器内全体へと拡大	
⑥火炎縮小 ⑤と比べて火炎が縮小	
⑦燃焼終了 火炎が消失し燃焼が終了	

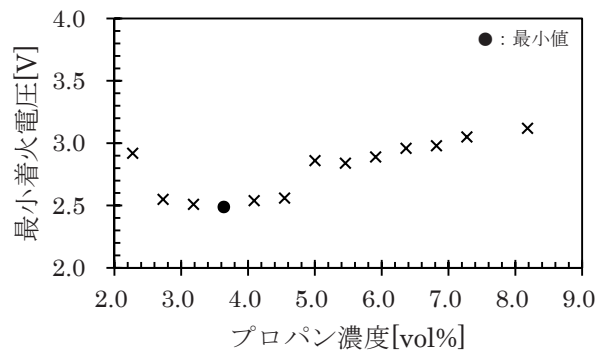


図13 プロパン濃度に対する最小着火電圧

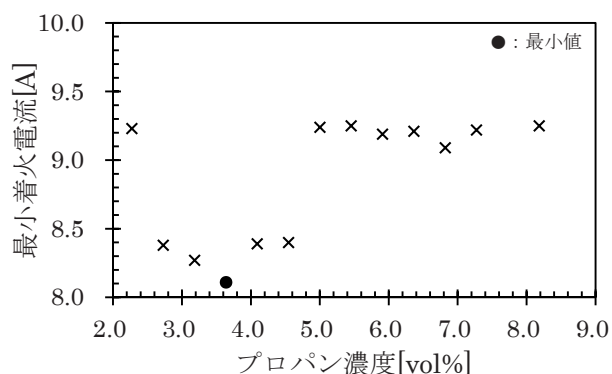


図14 プロパン濃度に対する最小着火電流

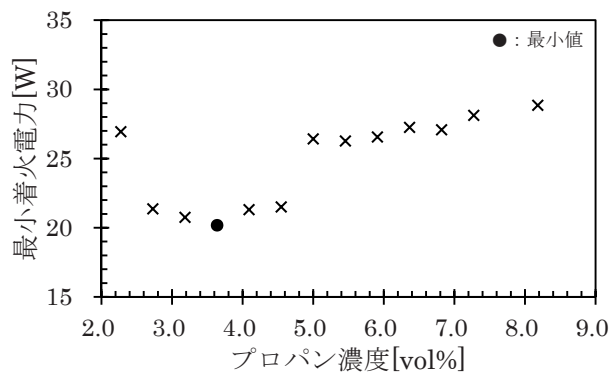


図15 プロパン濃度に対する最小着火電力

プロパン濃度が 3.6vol%の時に最小の電圧、電流、電力で着火した。

この時の最小着火電圧は 2.49Vであった。図 10 中に示した回帰式より温度を推定すると、電圧から計算した最小着火温度 T (V)は、

$$T(V) = 208.19 \times 2.49 + 295.09 \\ = 813^{\circ}\text{C}$$

となった。

また、最小着火電流は 8.11Aであった。図 11 中に示した回帰式より温度を推定すると、電流から計算した最小着火温度 T (A)は、

$$T(A) = 65.854 \times 8.11 + 287.72$$

$$= 822^{\circ}\text{C}$$

となった。

さらに、最小着火電力は 20.19W であった。図 12 中に示した回帰式より温度を推定すると、電力から計算した最小着火温度 $T(W)$ は、

$$T(W) = 273.43 \times \ln(20.19) + 11.913$$

$$= 834^{\circ}\text{C}$$

となった。

以上より、プロパンの着火する温度は 813°C から 834°C と計算された。

イ メタン

実験は、メタン 140mL を使用した時の濃度 6.4vol% から、250mL 使用した時の 11.4vol% の間で行った。

実験結果から、メタン濃度に対する、着火に要した最小の電圧、電流及び電力の関係を図 16 から図 18 に示す。

メタンが着火する最小値は、電圧と電力に注目するとメタン濃度が 6.8vol% の時、電流に注目するとメタン濃度が 9.5vol% の時であった。

図 16 及び図 18 を見ると、メタン濃度が 6.8vol% から大きくなるほど高い数値を示す傾向が見られるが、図 17 から、電流については濃度による相関が見られなかった。

各項目の最小値から、その着火温度を推定する。

最小着火電圧 3.25V から、図 10 中に示した回帰式より、電圧から計算した最小着火温度 $T(V)$ は、

$$T(V) = 208.19 \times 3.25 + 295.09$$

$$= 972^{\circ}\text{C}$$

となった。

最小着火電流 10.61A から、図 11 中に示した回帰式より、電流から計算した最小着火温度 $T(A)$ は、

$$T(A) = 65.854 \times 10.61 + 287.72$$

$$= 986^{\circ}\text{C}$$

となった。

最小着火電力 35.33W から、図 12 中に示した回帰式より、電力から計算した最小着火温度 $T(W)$ は、

$$T(W) = 273.43 \times \ln(35.33) + 11.913$$

$$= 987^{\circ}\text{C}$$

となった。

以上より、メタンの着火する温度は 972°C から 987°C と計算された。

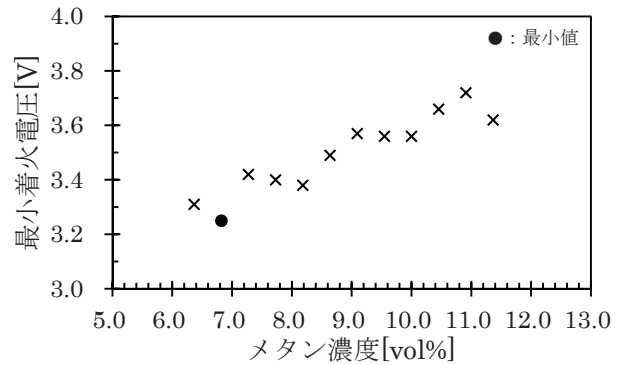


図 16 メタン濃度に対する最小着火電圧

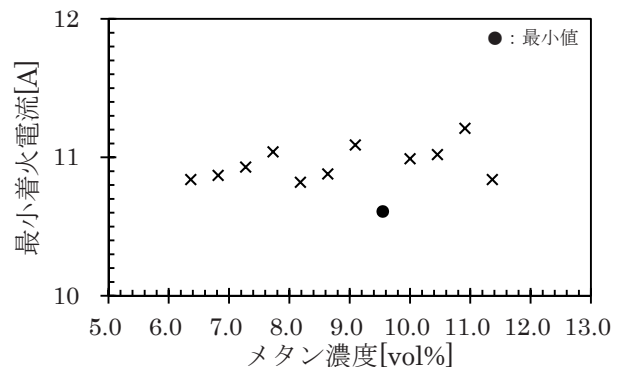


図 17 メタン濃度に対する最小着火電流

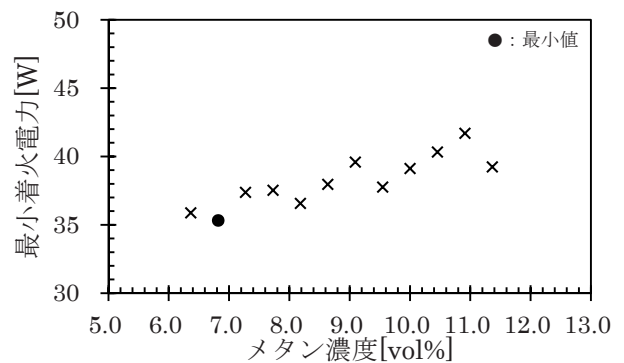


図 18 メタン濃度に対する最小着火電力

ウ 液化石油ガス

実験は、液化石油ガス 40mL を使用した時の濃度 1.8vol% から、130mL 使用した時の 5.9vol% の間で行った。

実験結果から、液化石油ガス濃度に対する、着火に要した最小の電圧、電流及び電力の関係を図 19 から図 21 に示す。

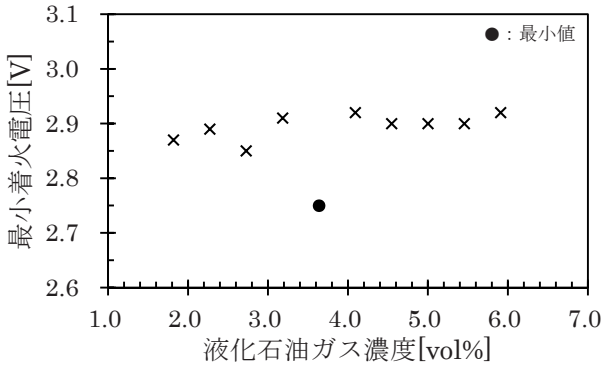


図 19 液化石油ガス濃度に対する最小着火電圧

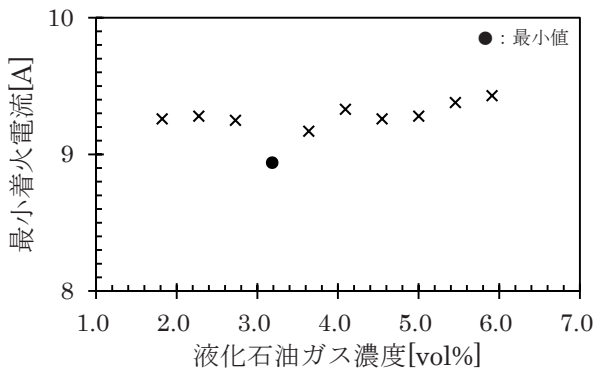


図 20 液化石油ガス濃度に対する最小着火電流

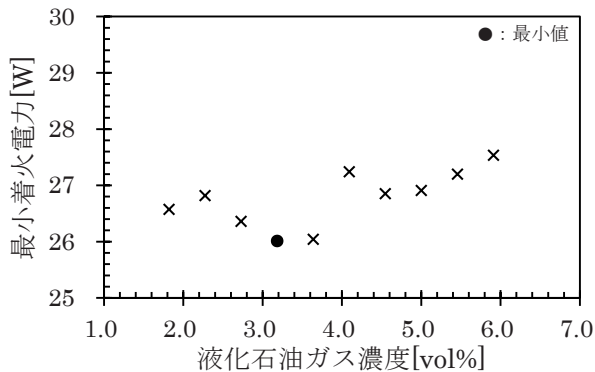


図 21 液化石油ガス濃度に対する最小着火電力

液化石油ガスが着火する最小値は、電圧に注目すると液化石油ガス濃度が 3.6vol%の時、電流及び電力に注目すると 3.2vol%の時であった。

各項目の最小値から、その着火温度を推定する。

最小着火電圧 2.75V から、図 10 中に示した回帰式より、電圧から計算した最小着火温度 $T(V)$ は、

$$T(V) = 208.19 \times 2.75 + 295.09$$

$$= 868^\circ\text{C}$$

となった。

最小着火電流 8.94A から、図 11 中に示した回帰式より、電流から計算した最小着火温度 $T(A)$ は、

$$T(A) = 65.854 \times 8.94 + 287.72$$

$$= 876^\circ\text{C}$$

となった。

最小着火電力 26.02W から、図 12 中に示した回帰式より、電力から計算した最小着火温度 $T(W)$ は、

$$T(W) = 273.43 \times \ln(26.02) + 11.913$$

$$= 903^\circ\text{C}$$

となった。

以上より、液化石油ガスの着火する温度は 868°C から 903°C と計算された。

(3) たばこの火を着火源とした実験

まず、たばこに着火し放置した状態で実験を行った。この時の可燃性ガス濃度は、電熱線着火実験で最小着火電圧となった濃度、すなわちプロパンと液化石油ガスは 3.6vol%、メタンは 6.8vol% としたが、全ての可燃性ガスで着火には至らなかった。

次に、たばこの燃焼温度は放置時に比べて吸引時の方が高いと考えられることから、図 22 のようにしてたばこのフィルターに容量 200mL の注射器を接続し、燃焼部分を円筒容器内壁より内側まで挿入し、注射器ですばやく 200mL 吸引して実験を行った。

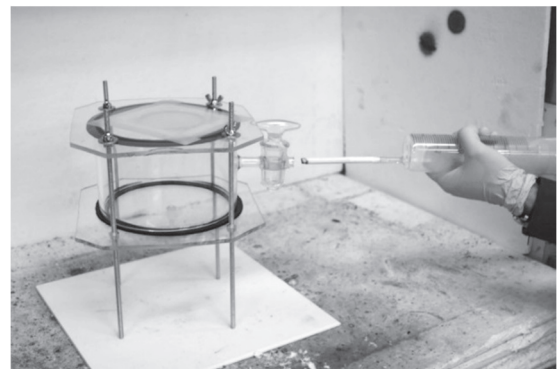


図 22 たばこの火を着火源とした実験の様子

吸引時にたばこの燃焼部分が赤くなっている様子が見られたが、全ての可燃性ガスで着火しなかった。

5 考察

(1) (実験 1) 電熱線温度測定実験

図 9 から、電圧と電流には正比例の相関が見られた。電熱線の電気抵抗は温度により変化すると考えられるが、測定した温度範囲においては、図上で確認できるほどの影響はないといえる。

図 10 から図 12 より、それぞれ決定係数は 0.9858、0.9832、0.9958 となり、回帰式は測定結果からよく当てはまっているといえる。

(実験 1) 電熱線温度測定実験から得た回帰式を用いることで、(実験 2) 電熱線着火実験において可燃性ガスが着火したときの電熱線の電圧と電流の値から、その着火温度を推定できることを確認した。

(2) (実験2) 電熱線着火実験

3種類の可燃性ガスについて、電熱線の電圧、電流、電力の各々の数値から、着火時の温度を計算した。まとめると表3のとおりとなる。

表3 電熱線の電圧、電流、電力から計算した各種可燃性ガスの着火温度

試料	電圧から計算	電流から計算	電力から計算
プロパン	813	822	834
メタン	972	986	987
液化石油ガス	868	876	903

※表中数値は温度[℃]

電圧、電流及び電力のいずれの項目からも、プロパンが最も低い温度で着火した。液化石油ガスにも20～30%の濃度でプロパンが含まれているが、液化石油ガスの着火温度は純粋なプロパンよりも高いことから、70～80%の成分であるブタンは、プロパンよりも着火温度が高いと考えられる。メタンは3種類のうち最も高い着火温度であった。

メタンを使用した実験では、着火時に電熱線が溶断する現象が見られたが、これはメタンの着火温度が、実験で使用した電熱線が耐えうる上限温度に近かったためだと考えられる。また、実験に用いた変圧器の仕様上の許容電流上限が10Aであり、着火には上限を超える電流を要した。

これらのことから、この程度の高温度域においても精密な結果を得るためには、電熱線や変圧器等の実験方法についてさらなる検討が必要である。

(3) たばこの火を着火源とした実験

たばこの火を着火源とした実験では、放置したたばこの火及び吸引を再現した時のたばこの火によって、3種類の可燃性ガスに着火しなかった。

飯田らの報告⁴⁾では、自然燃焼中のたばこの平均温度は、銘柄によるが、中心部で593.9～667.8℃、周辺部で333.7～452.2℃とある。これらのことから、放置時のたばこの火の温度では実験に用いた可燃性ガスが着火するまでには至らなかったと言える。ただし、飯田らの報告では燃焼により形成した灰部が落下した瞬間の最大温度で800℃のものがあつたとしており、本検証の電熱線着火実験でプロパンが813℃で着火することが示されたことから、たばこの銘柄、周囲の可燃性ガス濃度、たばこの火から発せられる熱の拡散等の条件次第では可燃性ガスに着火する可能性を否定できない。

また、たばこの火が周囲の可燃物に着火して延焼拡大すれば、そこから可燃性ガスに着火し、爆発することも考えられる。

6 おわりに

本検証では、高温体として通電して赤熱させた電熱線と、微小火源としてたばこの火の2種類の着火源について、それぞれの着火源用に実験装置を作製し、プロパン、メタン及び液化石油ガスの3種類の可燃性ガスに対する着火性状を確認した。

電熱線を着火源とした実験では、3種類の可燃性ガスはそれぞれ電熱線から着火、爆発した。電圧、電流、電圧と電流の積である電力、この3種類の値は、電熱線の温度との間で相関性が確認されたことから、着火時の電熱線の電圧、電流を測定し可燃性ガスの着火温度を計算した。その結果、プロパンは813～834℃、メタンは972～987℃、液化石油ガスは868～903℃で着火することがわかった。ただし、メタンが着火するような高温では、作製した実験装置に改良の余地がある。

たばこの火を着火源とした実験では、電熱線を着火源とした実験結果をもとに着火しやすい濃度に調製した3種類の可燃性ガスにおいて、全て着火することはなかった。

[参考文献]

- 1) 東京消防庁：平成27年版 火災の実態、東京消防庁予防部調査課、P59、2015
- 2) 東京消防庁：平成27年版 火災の実態、東京消防庁予防部調査課、P83、2015
- 3) 東京消防庁：平成27年版 火災の実態、東京消防庁予防部調査課、P84、2015
- 4) 飯田明彦ほか2名：「たばこ」火災に関する基礎的検証、消防技術安全所報49号、P124、2012

Study on the Ignition Properties of Various Types of Flammable Gas

Takahiro NAKAYAMA*, Hidenori NAKADA **, Makoto MOCHIZUKI*

Sunao TORIYA*

Abstract

Fires related to gas leaks, including town gas and liquefied petroleum gas, and those related to flammable gases, including the aerosol type, for example hairstyling products and deodorants, and the cylinder type, for example gas cassettes, occur every year. Since the aerosol fires, which dominate a large part of such fires, occur inside the garbage truck and the moment of ignition cannot be witnessed, it is difficult to detect their ignition sources.

The Fire Technology and Safety Laboratory made an experimental device in which two fire sources: a red-burning electric wire and a lit cigarette are set in order to collect and provide useful information for determining the ignition source of flammable gas fires. Studying how the three flammable gases: propane, methane, and liquefied petroleum gas ignite, the Fire Technology and Safety Laboratory concluded that they were ignited by the red-burning wire, but were not ignited by the cigarette lit. In this experiment, in order to estimate the ignition temperature, it also measured the voltage and current of the wire when it ignited the gases.

*Hazardous Materials Identification Section **Komae Fire Station