

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651160

研究課題名(和文) 不活性ガスを充填したゴム風船によるプール火災の消火法の研究

研究課題名(英文) Extinguishment of Pool Fire with Rubber Balloon Inflated with Inert Gas

研究代表者

鳥飼 宏之 (Torikai, Hiroyuki)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50431432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：消火剤の火源への輸送方法を工夫することで消火剤の消火効果の増大と消火活動による二次的な被害の抑制を目指すExtinguishing Agent Deliveryというコンセプトに基づく新しい消火法として、ゴム風船を用いた不活性ガス消火法について実験的に検討した。その結果、その消火特性は、完全消火が達成できる不活性ガスの最小体積つまり消火限界 V_{ex} の値によって決まる熱容量 CpV_{ex} で、液体燃料の単位質量あたりの発熱量 Q を除いた Q/CpV_{ex} の値が、火災規模が決まると1つの値を示すことがわかった。これはゴム風船消火での消火成功が、不活性ガスの熱的效果によって達成されていることを示している。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the characteristics of rubber balloon extinguishment, blowoff experiments have been performed. Physically acting inert gases are used. Ethanol, 1-butanol and n-heptane are used to form a small scale pool fire. From the experimental results, we can define the extinguishment limit, which means the minimum inert gas volume required for achieving flame extinguishment with the rubber balloon filled with inert gas. By using the magnitude of the extinguishment limit value, the extinguishing ability of inert gas in the rubber balloon extinguishment can be evaluated. As a result, the effectiveness ranking of the inert gas in rubber balloon extinguishment agrees well with that of the cup-burner test. Moreover, it is found that when the size of the pool fire (fuel pan diameter) is same, the value of the lower heating value of fuel divided by the inert gas heat capacity at the extinguishment limit shows a certain constant value independent of inert gas and fuel species.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：火災 消火 不活性ガス カプセル消火 ゴム風船 水損低減 プール火災 拡散火災

1. 研究開始当初の背景

従来から広く利用されている消火剤は水である。水は簡単かつ大量に手に入れることができ、人体・環境に対して無害という利点がある。また水は、その蒸発潜熱そして比熱が大きく火源を冷却する効果が高い。しかし火源へ放出された水の一部は、その周囲へ流れだし水浸しにする。その結果、水損・汚損という、火災によってではなく消火活動による二次的な被害・損害を水は引き起こす。そして消火器に充填されているリン酸二水素アンモニウムなどの粉末消火剤は、火災中で生じている燃焼反応の進行を化学的に阻害・抑制することで消火を達成する。そのため粉末消火剤は消火効果が高い。しかし大量の粉末を放出した空間の現状復旧は簡単なことではない。他方、不活性ガスを用いたガス消火法では水損・汚損が生じない。しかし気体消火剤は周囲空気と相互拡散によって容易に混合するため、消火機器から消火ガスが放出されて火源まで到達する間に濃度低下が生じる。従って、ガス消火の場合、遠方火源に対して高い消火効果が得られない。他にも泡消火剤もあるが、これも水による消火と同様、消火活動による二次被害を伴い、また遠方火源への輸送も簡単ではない。このように、従来の消火法では、水損と汚損を回避して遠方からの消火を達成する方法はない。

2. 研究の目的

そこで、消火剤の火源への輸送方法を検討・工夫することで、その消火剤の消火効果の増大と使用量の低減、水損・汚損の回避し、そして、これまでに使用そして開発されてきた消火剤の汎用性や使用性を高めることを目的とした **Extinguishing Agent Delivery (EAD)** というコンセプトに基づいた新しい消火法の開発を目指して研究を行った。

上記のコンセプトに沿った消火法としてカプセルを用いた消火法が考えられる。その方法では、カプセルに消火剤を充填することで周囲空気との拡散・混合を抑制し、そのカプセル膜を火炎との接触または固体壁面への衝突によって破壊することで、至近距離から高濃度の消火剤を火源へ供給して消火を達成する。本研究ではゴム風船をカプセルとして用いた。ゴム風船はどのような不活性ガスも充填することができ、また火炎と接触することでゴム膜が熔融して簡単に破膜する。またゴム膜に働く張力によって、ゴム風船に充填された消火ガスは周囲大気より高い圧力を有するため、その破裂と共にゴム風船から火源に向けて比較的大きな速度を有して高濃度の消火ガスを供給できる。そして不活性ガスが高速で火炎に供給されることで、燃料や酸素濃度の希釈や火炎からの熱吸収というような不活性ガスの消炎効果だけでなく、吹き飛びによる消炎効果も加わることが期待できる。このように、ゴム風船の利用により消火ガスの能力を向上し使用量を低減することで、従来

の消火法にはない迅速でクリーンな消火を達成する方法の確立を目指した。そのための実験として、消火対象にプール火炎を用いて、その火炎規模と消火達成に必要なガス量との関係性を解明した。また、消火特性を決定する消火メカニズムの解明も行った。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

ゴム風船消火の実験装置の概略を図1に示す。不活性ガスは高圧ボンベからゴム風船に充填した。ゴム風船に充填した不活性ガスは、窒素、二酸化炭素、アルゴンそしてアルゴン80%と窒素20%の混合気を使用した。

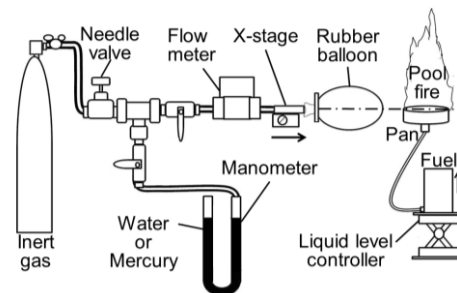
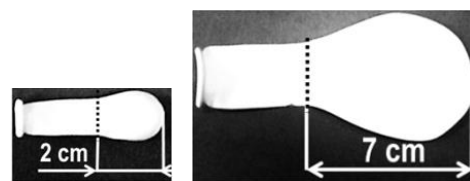


図1 ギュム風船消火の実験装置の概略

プール火炎を形成する燃料容器は、火炎の大きさを変化させるために異なる内径を有する4つの黄銅製の円形火皿を用いた。各火皿の内径とリムの厚みは、内径 47 mm (リム厚さ 1mm), 56 mm (リム厚さ 2mm), 76 mm (リム厚さ 2mm) そして 94 mm (リム厚さ 3mm) とした。火炎形成には発熱量の異なる3つの液体燃料を用い、n-ヘプタン、1-ブタノールそしてエタノールとした。



(a) Type A (b) Type B

図2 使用したゴム風船

カプセルとして使用したゴム風船は、図2に示す寸法の異なる2種類の天然ゴムラテックス製の風船(マルサ斎藤ゴム社)を使用した。火炎の大きさが比較的小さい燃料容器径 47 mm と 56 mm のプール火炎では、図2の Type A のゴム風船を用いた。他方、比較的火炎規模が大きい燃料容器径 76 mm と 94 mm のプール火炎の場合は、図2の Type B のゴム風船を使用した。不活性ガスのゴム風船への充填口は、その中心を燃料容器のリム上端と同じ高さに配置し、膨らんだゴム風船の先端中心が火炎基部に接触して破裂するようにした。火炎基部にゴム風船先端が接するように配置したのは、消炎するか否かの火炎の安定性を火炎基部が支配しているからである。

また燃料容器に注いだ液体燃料の液面の

高さは、燃料容器のリム上端とは一致させず、リム上端から 2.5 mm 下げた位置に液面がくるように調整した。これはゴム風船が破裂したときに生じる不活性ガスの流れで液体燃料が大量に吹き飛ぶのを避けるためである。また燃焼状態と火炎高さを安定させるため、液体燃料は各燃料種で適切な余燃時間を設けて消火実験を行った。n-ヘプタンとエタノールでは全てのパン径で予燃時間を 2 分に設定した。1-ブタノールだけは全てのパン径で余燃時間を 4 分とした。

(2) 消火実験の方法

ゴム風船消火実験は次のように行った。はじめに消火対象であるプール火炎を形成した。次に、目的とする不活性ガスの体積 V [cm³] をゴム風船に充填した。充填量の決定には、不活性ガス流量を一定でゴム風船に供給し、その充填時間を計測することで行った。そしてその後、ゴム風船を送り台により火炎側方から火炎基部に風船先端が接するまで移動そして停止し、火炎によってゴム膜が融けて破裂するまで待った。ゴム風船が破裂し、火炎全体が完全に消滅した場合を消火成功とし、その判定は目視で行った。消火の確率は消火成功回数を 10 回の実験回数で除することで算出した。そして同一条件で 3 回行って得た消火確率の値を平均化したものを消火確率 P [%] として算出した。

4. 研究成果

(1) 消火確率分布

ゴム風船に充填する消火ガス量 V [cm³] を変化させて得られた消火確率 P の典型的な分布を図 3 に示す。燃料容器径は 76 mm、液体燃料に n-ヘプタンそして不活性ガスには窒素を用いている。図 3 から V の値が小さすぎると、 $P=0$ となり消火が全く達成されないことがわかる。そして V が増加すると、ある値で P が 0 でなくなり、その後は V の増加に伴い単調に P も増加することがわかる。そして、不活性ガスの充填量がある値以上になると常に $P=1$ となる不活性ガス量の条件が現れることがわかる。他方、空気をゴム風船に充填して消火実験を行った場合についても、その結果を図 3 に示している。図 3 から空気をを用いた場合、どれほど充填ガス量を大きくしても常に $P=0$ であり、消火が達成できないことがわかる。この空気の結果から、ゴム風船消火では不活性ガスの消火効果が重要であり、また同時に単純な流れの効果による吹き飛びによって消火が達成されているわけでは無いことがわかる。

ここで常に $P=1$ となる領域における最小ガス量の条件を消火限界 V_{ex} と定義する。 V_{ex} の値が小さい消火ガスほど、火炎の完全消火を達成するのに必要なガス量がより少ないことを示し、その不活性ガスの消火能力が高いことを意味する。このように消火限界 V_{ex} の大小が、消火において重要であるため以降の議論では V_{ex} の値に注目して検討を進める。

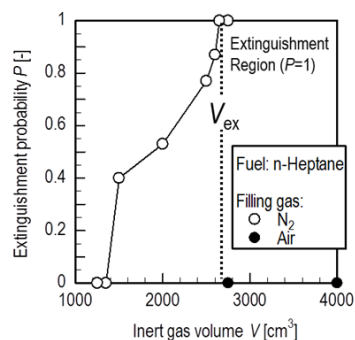


図 3 消火確率分布

(2) 消火限界時の不活性ガス量 V_{ex} の分布

図 4 に燃料容器径を変化させた場合に得られる消火限界 V_{ex} の分布を示す。液体燃料は n-ヘプタン、不活性ガスは窒素、二酸化炭素そして 80% アルゴン+20% 窒素の混合気を使用している。また V_{ex} は対数軸で表している。

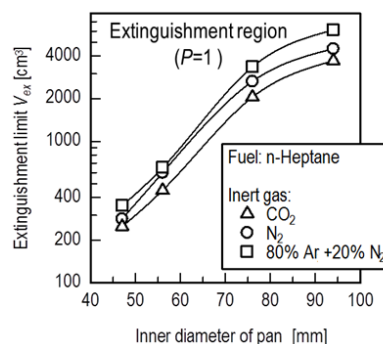


図 4 消火限界 V_{ex} と燃料容器径の関係

まず図 4 から、燃料容器径が増加すると火炎規模が大きくなり、それに伴って完全消火に必要な不活性ガス量が、不活性ガス種によらず増加することがわかる。また、同じ燃料容器径の値で V_{ex} の大きさを比較すると、二酸化炭素 < 窒素 < 80% アルゴン+20% 窒素 混合気という順で、 V_{ex} の値が大きくなっていることが分かる。この結果は、ゴム風船に充填した不活性ガスの消火効果の大きさが、二酸化炭素 > 窒素 > 80% アルゴン+20% 窒素 混合気であることを意味している。このゴム風船消火における不活性ガスの消火効果の大きさの順は、Cup burner 法を用いて決定した不活性ガスの消火効果の大きさの順番と同じである。これらの過去の研究から不活性ガスの単位体積当たりの熱容量の大きさが、不活性ガスの消火効果の大きさの順番を決定する要因であることが知られている。そこで次に、各不活性ガスで得られた消火限界 V_{ex} を用いて計算できる不活性ガスの熱容量に注目して議論を進める。

(3) 消火限界における不活性ガスの熱容量の大きさと燃料容器径の関係

図 4 の結果からゴム風船消火の消火限界 V_{ex} の大きさは、不活性ガスの単位体積あたり

の熱容量の大きさに依存していると考えられる。そこで図3の縦軸の値を、消火限界での不活性ガス体積 V_{ex} に密度 ρ と比熱 C_p をかけて熱容量に変更したグラフとして図5に示す。横軸は燃料容器径である。この図5から、消火限界での消火ガスの熱容量の値が、不活性ガスの種類に依存せず1つの曲線上に統一的に表されることがわかる。この結果は、燃料容器径つまり火源の大きさが決まると、その火源で形成される火炎を完全に消火するのに必要な消火ガスの最小の熱容量の大きさが、消火ガスの種類によらず1つの値に定まることを意味している。次に、この熱容量による消火限界の整理が、液体燃料種を変化させ、発熱量が変わった場合でも成立するかを検討する。

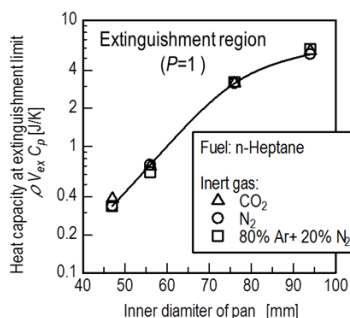


図5 消火限界での不活性ガスの熱容量

(4) 消火限界における不活性ガスの熱容量の大きさと燃料容器径の関係

図6は、エタノールのプール火炎を窒素、二酸化炭素そして80%アルゴン+20%窒素混合気で消火して得られた消火限界 V_{ex} 、そして1-ブタノールのプール火炎を窒素、二酸化炭素そしてアルゴンで消火して得られた消火限界 V_{ex} を、熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ の値にして図5に加えたものである。

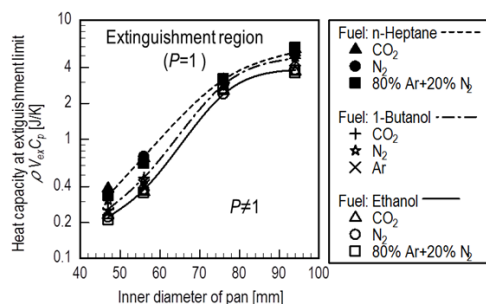


図6 不活性ガスの消火限界での熱容量と液体燃料の発熱量との関係

図6から、図5で示したn-ヘプタンでの消火限界時の熱容量の分布と同様に、エタノールそして1-ブタノールにおいても、燃料容器径が決まると消火に必要な不活性ガスの最小熱容量の値が不活性ガス種によらず1つの値に定まっていることがわかる。ただし、どの容器径においても消火限界時の熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ の大きさは、エタノール火炎の値が最

も小さく、そして次いで1-ブタノール火炎、そして最も大きな値はn-ヘプタン火炎が示している。この消火限界時の不活性ガスの熱容量の値の順番は、燃料の単位質量当たりの発熱量の大きさの順番と等しく、発熱量に比例していることがわかる。つまり図6の結果は、単位質量当たりの発熱量が大きな燃料の火炎ほど、消火するのに必要となる不活性ガスの最小の熱容量が増加することを意味している。そこで次に、縦軸に発熱量の影響を反映させた結果を用いて更に議論を行う。

(5) 液体燃料の燃焼熱と消火限界時の不活性ガスの熱容量との関係

図6で示したように消火限界時の不活性ガスの熱容量の値は、燃料種の発熱量に比例していることがわかった。そこで単位質量当たりの燃料から燃焼反応によって生成される発熱量の値を示す低発熱量 Q を、消火限界での不活性ガスの熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ で除した $Q/\rho C_p V_{ex}$ [K/kg]として縦軸を表したグラフを図7に示す。図7から再び全てのプロットが燃料種に依存せず1つの曲線上に統一的に表されることがわかる。このことは燃料容器径の大きさ、つまり火炎の大きさが決まると不活性ガス種だけでなく、燃料種にもよらず $Q/\rho C_p V_{ex}$ が1つの値に定まることを意味している。また図7から燃料容器径の値が増加すると $Q/\rho C_p V_{ex}$ の値が減少傾向を示すことがわかる。この図7の結果から、ゴム風船消火で得られる消火限界での不活性ガス量の決定には $Q/\rho C_p$ [K・cm³/kg]の大きさが重要であることがわかった。

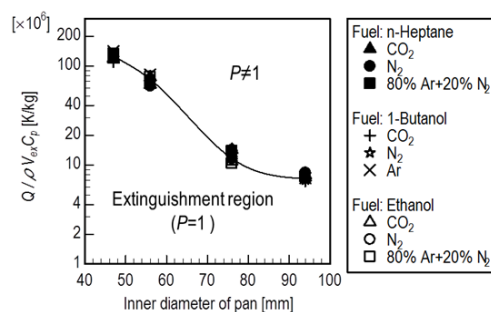


図7 $Q/\rho C_p V_{ex}$ と火炎規模との関係

不活性ガスによる拡散火炎の最小消火濃度(MEC)はCup burner法を用いて決められ、消炎に至るときの火炎温度がほぼ一定となることが知られている。ゴム風船消火はカップバーナ法のように徐々に消火剤を火炎に供給するわけではないため、その消炎過程の詳細は大きく異なる。しかし、もしゴム風船消火でも消炎時の火炎温度がCup burner法と同様にほぼ一定あるならば、ゴム風船消火においても不活性ガスが火炎から熱を奪うことによって火炎温度を限界の温度まで減少させ、最終的に完全消火を達成していると考えられる。その場合、不活性ガスが火炎から奪う熱量の大きさは $\rho C_p V_{ex}$ に依存し、

発熱量が大きい燃料の火炎ほど $\rho C_p V_{ex}$ の値が増加する必要があることになる。その考えに基づけば、図 7 に示したように同一の燃料容器径で発熱量 Q が大きい火炎ほど $\rho C_p V_{ex}$ が大きな値を示したことは理解できる。

以上の結果から、ゴム風船に充填した不活性ガスで消火を行うことにより、その消火特性として、不活性ガスの単位体積当たりの熱容量と液体燃料の単位質量当たりの燃焼熱の大きさによって消火限界の不活性ガス量が決定されることがわかった。また、不活性ガスには酸素や燃料の希釈を通して消炎をもたらす効果と火炎からの熱吸収によって火炎温度を低下させて消炎を達成する熱的な消火効果の 2 通りがあるが、ゴム風船消火では熱的な消火効果によって消火が達成されていることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①Takumi Murashita, Hiroyuki Torikai, Akihiko Ito, Flow Visualization of Extinguishing Gas Released from Bursting Soap Bubbles, Visualization of Mechanical Process, 査読有り, Vol. 1 (4), 2011, pp.1-16

DOI: 10.1615/VisMechProc.v1.i4.70

②Yasushi Iwatani and Hiroyuki Torikai, Flame Extinguishment by a Prototype of an Aerial Extinguisher with an Inert Gas Capsule, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有り, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 168-172.

<http://www.sice.jp/pub/vol7no3.html#paper6>

[学会発表] (計 20 件)

①Hiroyuki Torikai, Takumi Murashita, Akihiko Ito, Takumi Metoki, Extinguishment of Laminar Jet Diffusion Flame by Using a Soap Bubble Filled with Nitrogen Gas, 10th International Association for Fire Safety Science, June 21, 2011, Maryland, USA.

②Takumi Murashita, Hiroyuki Torikai, Akihiko Ito, Flow Visualization of Extinguishing Gas Released From Bursting Soap Bubbles, The 11th Asian Symposium on Visualization, June 7, 2011, Niigata, Japan.

③鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 液体燃料種のゴム風船消火特性への影響, 平成 24 年度火災学会研究発表会, 2012 年 5 月 21 日, 栃木.

④Hiroyuki Torikai, Manato Narita, Akihiko Ito, Extinguishment of Pool Fire with Rubber Balloon Inflated with Inert Gas, The 24 International Symposium on Transport Phenomena, 2013/11/03, Yamaguchi.

⑤成田学人, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 破裂したゴム風船から放出される消火ガスの流れ, 第 51 回燃焼シンポジウム, 2013 年 12 月 5 日,

東京.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

日本機械学会熱工学部門ニューズレター, TED Newsletter No. 71, December 2013
http://www.jsme.or.jp/ted/NL71/TED-Plaza_Torikai.htm

6. 研究組織

(1)研究代表者

鳥飼宏之 (TORIKAI, Hiroyuki)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 50431432

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :