

# 水噴霧による水素の燃焼抑制に関する研究

井上 雅弘\*・中原真也\*\*

\*九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門

\*\*愛媛大学 大学院理工学研究科 機械工学講座

## Research on the Control of the Propagation of Hydrogen Combustion by Water Spray

Masahiro INOUE\* , Masaya NAKAHARA\*\*

\*Kyushu University, Department of Earth Resources Engineering

744 , Motooka , Nishi-ku , Fukuoka 819-0395

\*\*Ehime University, Graduate School of Science and Engineering

3, Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

### Abstract

A series of experiments on the control and the prevention of the propagation of hydrogen combustion by water spray were carried out to decrease the damage caused by the combustion of hydrogen. The hydrogen-air mixture mainly 16% or 8% hydrogen concentration was supplied in an acrylic resin duct (150mm×150mm×750mm) and ignited. The average particle size of the sprayed water was 16 $\mu$ m and sprayed with a flow rate of 0.2l/min. Inert gas was added in the duct to control the combustion if necessary. The pressure and temperature during the combustion in the duct were measured. The magnitude of the pressure change during the combustion decreased by using water spray. The propagation of combustion was prevented by using high density water spray and helium.

**Keyword:** combustion, explosion , water spray, hydrogen

### 1. はじめに

水素はその優れた環境性能の一方で、漏洩し易い、可燃範囲が広い、都市ガスの主成分であるメタンと比較すると一桁小さなエネルギーで着火する、燃焼速度が速いなど、安全に関して一層の注意が必要な物質である。水素に関わる災害[1][2]は、火災・爆発の比率が大きく、屋外での漏洩であるにも拘わらず爆発した例もある。また、その原因もヒューマンエラーから材料の破損まで様々である。このため、まず水素を漏洩させないという観点から水素利用に適した材料の研究[3]が行われている。また、漏洩した場合に備えて、センサの開発、水素の排除[4]などの研究も行われ、筆者らも水素の拡散について検討結果を報告[5][6]した。しかし、火災・爆発災害は一旦発

生すると、被害が甚大であり、例えその確率が低くても、着火に至った場合の対策を検討しておくことも必要である。

本研究では漏洩水素に着火した場合に、その燃焼を抑制あるいは防止し、被害を最小限に抑えるということを目的として水素の燃焼抑制に関する実験を行った。可燃性ガスは二酸化炭素や窒素などの不活性ガスを加えることで不燃化できることはよく知られているが[7][8]、例えば二酸化炭素のみでこれを実現しようとするとその環境では人間が生存できず、この方法を一般的に室内に利用することは困難である。このため、本研究では水噴霧と不活性ガスなどを用いた燃焼の抑制を検討した。水噴霧を用いた燃焼抑制についても研究が行われている[9]-[13]が、対象はメタン、天然ガス、炭じんあるいは火

災が多い。水噴霧による水素火炎下流側の熱負荷低減に関する研究[14]もあるが、本研究はこの燃焼そのものを抑制しようとするものである。

本研究で行った、一連の水噴霧による水素燃焼抑制実験の結果、以下のことが明らかになった。すなわち、水素の燃焼挙動はその濃度により大きく変化するが、同じ水素濃度の場合、水噴霧により燃焼による温度や圧力を低下させ、燃焼による被害を低減することが可能である。また、水噴霧を用いると不活性ガスのみの場合より少ないガス量で燃焼を抑制し火炎伝播の防止が可能である。水素濃度 8%の場合には短時間であれば人体にあまり影響がない範囲で、16%の場合でも短時間であれば深刻な影響がない範囲で火炎伝播を防止できる可能性がある。図1はこの方法による被害低減のシステムのイメージである。水素濃度の異常が検知された時点で、水噴霧（不活性ガス併用の場合には2流体ノズルなどによる）を開始し、万一の場合に備えて十分な噴霧量となるようにする。本文ではこれらの結果について報告する。

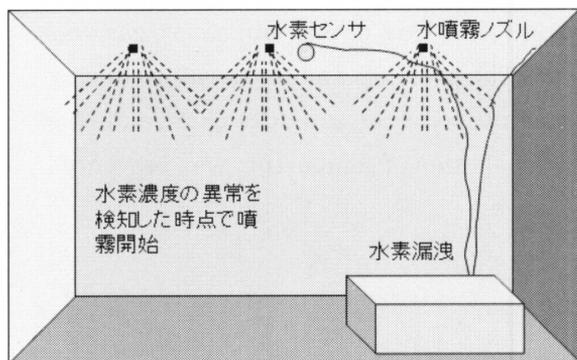


図1 水噴霧による燃焼抑制システム

## 2. 実験方法

水素の燃焼抑制実験を行う容器として、図2に示すように一辺 150mm の立方体（同図左側部分）、および、これと内側の断面が同じ形状で、長さ 600mm のダクト（同図中央から右側部分）を連結したものをを用いた。これを以後燃焼容器とよぶ。この左側は完全に閉じており、以後閉鎖端とよぶ。右側は必要に応じて密閉するが、構造上は開放されているので開放端とよぶ。容器材質は透明アクリル製で、内部の燃焼や水噴霧の状態、燃焼により生じた水蒸気の結露などを観察することができる。

大気圧下で密閉された容器内で可燃性ガスが燃焼す

ると8気圧程度まで圧力が上昇する[15]。このとき燃焼そのものも圧力による影響を受けるとされる。この圧力上昇は適切な開口部を設けることで大きく低減できる[16],[17]。本研究の目的は一般的な室内での燃焼抑制であり、適切な開口部とともに、燃焼制御を行うことで、圧力があまり上昇しない条件を想定した。このため、本実験では圧力上昇による影響を避けるために、燃焼はできるだけ圧力を上昇させないで行うこととした。一方、燃焼容器内部を任意のガス濃度とするためには、容器を密閉しなければならない。このため、図に示す容器右側の開放端をビニルシート(厚さ 0.5mm)で密閉した。

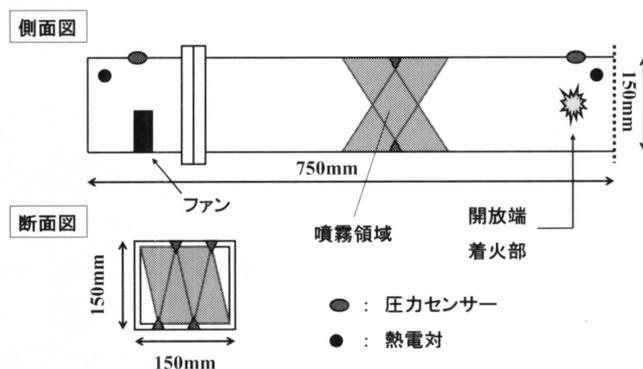


図2 燃焼実験装置の概要

燃焼容器の左側面に近接して設けた直径 4.5mm の孔から水素、空気、二酸化炭素、ヘリウムの4種類のガスを任意の流量で供給できるようにした。ガスの供給口に近接してファンを設置し、供給されたガスが直ちに攪拌・混合されるようにしている。水素、二酸化炭素、ヘリウムはボンベからのガスを使用したが、空気には圧縮機を利用した。このため、供給する空気の水蒸気の濃度が一定していない可能性がある。しかしながら、常温では水蒸気の影響は小さいとされ[8]、また、本実験では燃焼時には水を噴霧するので、この影響は小さいと判断される。各種のガスの流量はマスフローコントローラー(山武製)で制御した。本実験条件における同コントローラーの精度は $\pm 0.5\%FS$ である。水素濃度はセンサによって確認した。この測定は容器からの排気経路に水素センサ(新コスモス電機製)をおいて連続的に測定した。ただし、センサはその測定原理により複数のガスがある場合には特定のガスのみを測定できないことがある。熱伝導率式のセンサではガスを特定することはできず、含まれるガスの影響を総合した値になる。接触燃焼式の

場合も可燃ガスが複数あると特定が難しく、また酸素が少ないと正しく測定できない。本実験のように多量の不活性ガスを使用する場合には正確な測定が行えない場合がある。従って、マスフローコントローラによる流量精度は重要である。このため、各マスフローコントローラの流量精度を容積を測ることで確認し、また、適宜、ガスクロにより分析を行うことでも濃度を確認した。着火は開放端側で1万ボルトの持続的な電気スパークにより行った。

水滴粒径や水噴霧が生じる乱流は燃焼に大きな影響がある[11]。本実験では水噴霧には粒径（ザウター平均）が $16\mu\text{m}$ （カタログ値）でノズル1つの流量は $0.05\text{L}/\text{min}$ （ポンプ圧力 $6\text{MPa}$ ）のものを使用した。ノズルはダクトの中央上下に合計4個設置した。燃焼容器右側の開放端で着火した火炎が左側の閉鎖端まで伝播するかどうかで、水噴霧による燃焼抑制の可否を判断した。

筆者らはこれまでに他の2種類のノズルを使用した実験を行っている[18][19]。1つは通常の園芸用で使用されているものである。この場合、メタンの場合には水噴霧のみで火炎伝播が防止できたものの、水素の場合には防止できなかった。2つめは平均粒径 $80\mu\text{m}$ で、ノズル1つの流量は $0.08\text{L}/\text{min}$ （ポンプ圧力 $1\text{MPa}$ ）のものを使用した。この場合には、水素濃度が8%および16%の場合で、二酸化炭素が50%の場合のみ火炎伝播を防止できた。しかし、二酸化炭素がこの濃度では人間は短時間であっても生存できず[20]-[22]、実用化は困難である。文献[22]によれば、短時間暴露で致死である濃度は、酸素（欠乏）の場合6%、二酸化炭素の場合20%である。

燃焼の観察は、容器の両端付近に設置した2つの圧力計（日本電産製圧力トランスジューサー）、それぞれの圧力センサのすぐ下に設置した $0.5\text{mm}\phi$ の熱電対、および高速度カメラにより行った。水素濃度が低い場合、水噴霧をしながらの燃焼では、燃焼の様子を肉眼や圧力計で観測することは容易ではない。燃焼時間は短い、燃焼した場合には熱電対による測定温度は $150^\circ\text{C}$ 程度かそれ以上に上昇するので、温度による判断が有効である。なお、燃焼伝播の確認は目視ならびに高速度カメラの記録でも行っている。圧力および温度のデータはいずれもデータロガーにより記録した。ダクト断面の、小さな箇所にも燃焼可能な状態があると、火炎が伝ぱし、燃焼はそこから全体に広がり、火炎伝播防止はできないので、この確認には高速度カメラを用いた。

### 3. 実験結果

本研究では様々な条件で火炎伝播防止に関する実験を行った。以下それらについて述べる。

#### 3.1 密閉にビニルシートを用いた場合の燃焼におよぼす水噴霧の影響

本実験では燃焼容器の密閉に厚さ $0.5\text{mm}$ のビニルシートを用いることとし、これをグリスによってダクト端と密着させた。これは燃焼容器の圧力がある程度上昇したときにははがれる。容器内を水素濃度16%の水素・空気混合気で満たした後、次の3つの条件で燃焼実験を行った。

- 1) 単純燃焼：そのまま着火する
- 2) 噴霧後着火：10秒間水噴霧し、噴霧を停止した後3秒後に着火する
- 3) 噴霧中着火：10秒間水噴霧を継続させた状態で着火する

これら3つの条件全てで5回ずつ燃焼実験を行い、再現性の良い結果が得られることを確認した。

燃焼容器の開放端側に設置した圧力センサで測定された燃焼時の圧力変化を図3に示す。同図では上記の3種類の場合の圧力変化を比較しやすいように並べており、それぞれ大気圧を中心として振動していることを示している。それぞれの圧力変化の中心にある横線は大気圧を意味し、縦軸は目盛り1つが $1\text{kPa}$ の大きさを意味する。繰り返しになるが図の上側に描かれた圧力変化のグラフの絶対値が下側の圧力変化のグラフの絶対値より大きいことを意味しているわけではない。また、グラフは図中の凡例の順番と対応し、上から単純燃焼、噴霧後着火、噴霧中着火の結果である。時刻ゼロは電気スパークを開始した時刻である。圧力変化に関しては以降の図も同じように表示している。

開放端側の圧力は最初に圧力の上昇が見られるが、これはビニルシートがはがれるまで容器が密閉されているためである[17][23]。図4に燃焼容器の閉鎖端側に設置された圧力センサで測定された圧力変化を示す。

高速度カメラと圧力変化の記録から火炎伝播時間は圧力変動の継続時間とほぼ同じと判断されたので、この時間が短いほど火炎伝播速度は大きいと考えられる。爆薬の爆力は爆速が大きいほど大きい[24]。そこでここでは火炎伝播速度が大きいほど大略その威力が大きいと考えたこととした。さらに、火炎伝播の速い場合ほど、圧力

振幅が大きくなる傾向がある報告もある[25]。

噴霧後着火、噴霧中着火ともに火炎伝播速度が単純燃焼に比べて大きくなっており、水素の燃焼の威力が強まっていると考えられる。特に噴霧中着火では圧力の変動も単純燃焼の場合とほとんど変わらない結果になっている。これは水を噴霧することによってダクト内が乱流状態[11]となっていることが原因と考えられる。また、噴霧後着火の場合では圧力の変動が小さくなっているのは、噴霧が停止しているため、乱流状態が小さくなったためと考えられる。

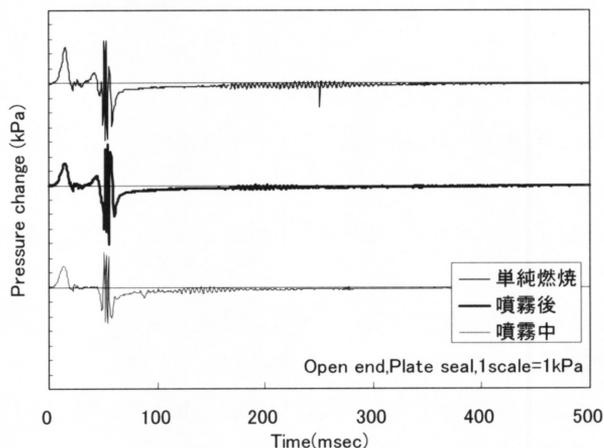


図3 密閉にビニルシートを用いた場合の圧力変化（開放端側）

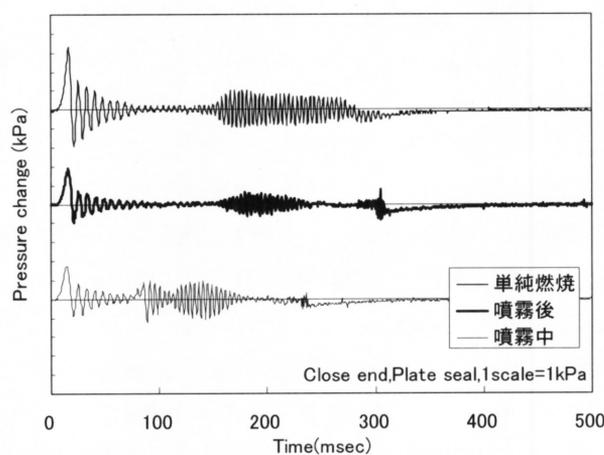


図4 密閉にビニルシートを用いた場合の圧力変化（閉鎖端側）

本実験では火炎伝播に関する圧力変動波形の前にビニルシートがはがれる際の圧力変動が発生し、同一条件の5回の実験においてもわずかではあるが波形の振幅に違いが生じた。

また、実際の水噴霧活用を想定した場合、噴霧された水滴の平均粒径は16 $\mu$ m程度とかなり小さいので、水噴霧の流れは、ノズルから1m程度で穏やかな流れになり、空間に与える乱流の影響は無視できるものであるが、本実験で使用している小さな燃焼容器内ではこの乱流の影響が大きく効いてしまうことに注意が必要である。

本実験の場合の温度変化は噴霧中の着火では開放端側の温度が50 $^{\circ}$ C程度までしか上昇しないことがあるが、閉鎖端側の温度はいずれも150 $^{\circ}$ Cから200 $^{\circ}$ Cの間を示した。従って、本実験では水素の燃焼は全て伝播したと判断できる。

### 3.2 密閉を直前開放した場合

ビニルシートのはがれかたが違うために生じるバラツキについて検討するために、密閉にビニルシートを用いるが、燃焼容器内が指定の水素濃度の混合状態になったことをセンサで確認した後、ビニルシートをスライドさせてはずした直後着火するという方法で実験を行った。以後この方法を「直前開放」と呼ぶ。この方法で、単純燃焼、噴霧後着火の実験を5回ずつ行った。図5および図6に燃焼時の、開放端側および閉鎖端側のダクト内の圧力変化を示す。

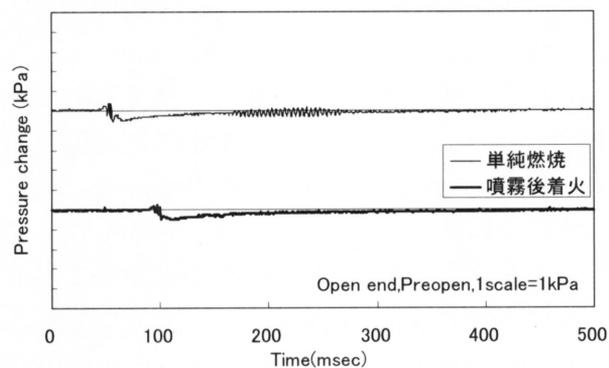


図5 密閉を直前開放した場合の圧力変化（開放端）

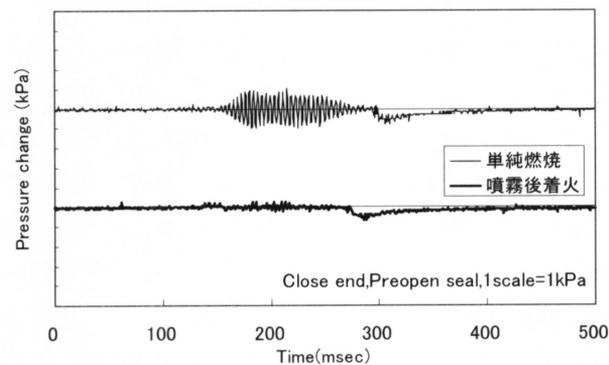


図6 密閉を直前開放した場合の圧力変化（閉鎖端）

直前開放することにより、密閉がはがれる際の圧力変動がなくなり、燃焼のみによる波形が得られるようになった。閉鎖端側の熱電対の温度上昇から火炎は伝播したことが確認されたが、本実験では単純燃焼に比べ噴霧後着火の圧力変動が大きく低下しており噴霧による燃焼抑制効果が表れていると思われる。

### 3.3 水素・ヘリウム混合状態での単純燃焼

水噴霧は火炎伝播防止に対して一定の効果が認められたものの、水噴霧のみでは火炎伝播防止までには至らなかった。そこで、不活性ガスであるヘリウムによる燃焼抑制について実験した。不活性ガスが存在する場合の水素の燃焼については既に研究され[26]ており、水素の不燃化においては、ヘリウムは他の不活性ガスと比較して、同じ濃度の場合必ずしも効果的なガスではなく、その効果は窒素と同程度で、二酸化炭素のほうが少なくてすむ。しかしながら、実際の使用を考えた場合、毒性がないことが特徴であり、水素と同じ軽いガスであるので、室内で上方に移動しやすいので、同じ軽いガスである水素と混合が効果的に行われると考えられる。

また、層流燃焼速度を揃えた特殊な希薄水素-酸素-希釈ガス混合気を用いた乱流燃焼速度特性の報告[27]には、希釈ガスをヘリウムとした場合、窒素や二酸化炭素にした場合に比べ、乱流燃焼速度特性を著しく悪化させることが示されている。

水素濃度が16%で、ヘリウム濃度が60~80%まで5%ずつ異なる水素、ヘリウム、空気混合気を作成した。ビニルシートをつけたままの状態ですべて燃焼させることにより、可燃限界濃度を調べた。図7に閉鎖端側の圧力変化を示す。ヘリウム濃度60%では明らかな圧力変動が見られるがヘリウム濃度65%以上ではほとんど見られず、燃焼が起きていないと考えられる。ヘリウムが60%の場合、最初の圧力ピークが大きい後半での圧力振動は見られない。これは最初の圧力ピークの大きさは、ビニルシートが外れる際の圧力[17]によるためであり、この場合、貼り付け方が強かったものと思われる。その後の圧力振動が見られないのは燃焼そのものはあまり強くないためと考えられる。

図には示さないが、ヘリウム濃度60%では両端の熱電対がともに150°C以上に上昇したことより燃焼が生じ、かつ伝播したといえる。ヘリウム濃度65%以上の濃度るとき熱電対で温度上昇がみられないことより、燃焼が起

きなかったと判断され、ヘリウム濃度60~65%の間に可燃限界濃度があることになる。これは先の研究結果[26]とほぼ同じである。

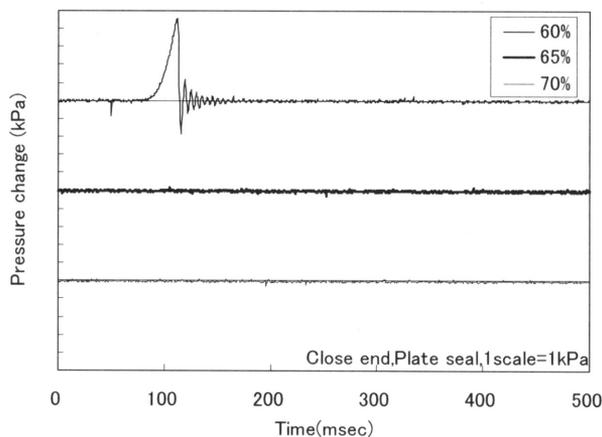


図7 水素、ヘリウム、空気混合状態で単純燃焼した場合の圧力変化（閉鎖端）

### 3.4 水素・ヘリウム混合状態での噴霧後着火

ヘリウムを濃度50%、55%、60%として、噴霧後着火を行った。図8に燃焼時の閉鎖端側の圧力変化を示す。

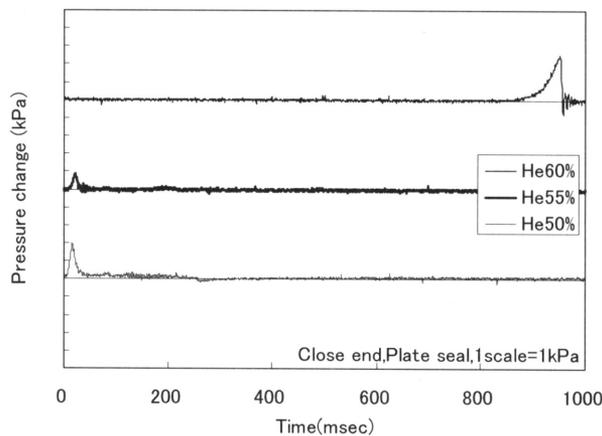


図8 水素・ヘリウム、空気混合状態で噴霧後着火した場合の圧力変化

ヘリウム濃度50、55%のときでは、電気スパーク発生と同時に着火し燃焼が起きたが、ヘリウム濃度60%ではなかなか着火せず、5回の実験全てでスパーク発生開始より約1秒後（スパークは継続している）に着火し燃焼が起きた。これは水噴霧による影響で着火遅れが生じたと考えられる。これは3.3の水素、ヘリウム、空気混合気の単純燃焼の実験で見られた、ヘリウム60~65%の間にあった燃焼の限界が水噴霧をすることでその境界が

さらに60%に近づいたためと考えられる。

なお、ヘリウムが60%のときのほうが、55および50%のときより圧力ピークが高い。この理由として高電圧のスパークを継続しているため、これが着火電極周辺の混合ガスに温度上昇、水噴霧の蒸発などの影響を与えた、他の実験と比較して着火するまで1秒程度時間が経過しているため水噴霧の濃度が変化した、などの影響が考えられる。

### 3.5 高密度噴霧による単純燃焼および噴霧後着火

これまで水噴霧により燃焼の抑制効果は見られているものの、明らかな燃焼防止効果は見られていない。この理由として水噴霧の密度が不足していることが考えられた。そこで、水噴霧の密度を増加させるために図9に示すようなダクト内部の水噴霧ノズルの両側20mmの位置に小型の内枠を設置した。以後、これを内枠と呼ぶことにする。内枠の開口部分は90mmの正方形である。この方法で2つの内枠間の水噴霧濃度を増加することができる。以後この方法による水噴霧を高密度噴霧と呼ぶ。

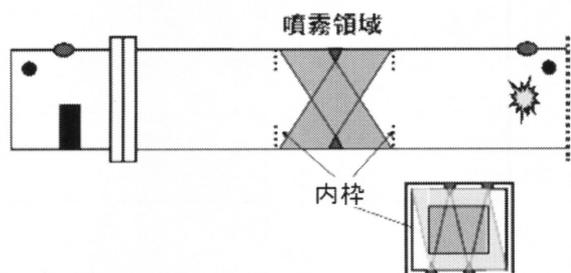


図9 水噴霧の密度を増加させる内枠

ここで内枠を中央部に置くことによりファンの送風が邪魔され、内部の気体が攪拌がされにくくなる懸念された。そこで、燃焼容器内が設定濃度の予混合気状態になり水素、空気の供給を止めた後でもしばらくファンを回し続けることとした。内枠を設置することにより水噴霧の密度が上がるが、火炎の伝播面積が小さくなる。水素-空気火炎の伝播は極めて小さい1mm程度の隙間でも可能なため、伝播に関する限り内枠の影響はないはずであるが、圧力や温度は影響を受けると思われる。そこで、内枠を置くことによる燃焼への影響を調べるために内枠を設置した状態で単純燃焼実験を行った。

図10に燃焼時の閉鎖端側の圧力変化を示す。圧力の振幅がわずかに内枠を設置した場合のほうが小さくなっているが、火炎伝播速度、着火までの時間、ビニルシートがはがれることによる圧力変動などはほとんど同じ結

果となった。また、温度変化においては、内枠を設置した場合の開放端部温度が100°C近く低い結果となったが、閉鎖端部温度はほとんど変わらなかった。

同図下側には内枠を設置し高密度で噴霧した場合の結果も示している。この結果から火炎伝播速度は若干大きくなっているが、圧力振幅が大きく低下している。ビニルシートがはがれる際の発生変動も高密度噴霧での実験のほうが小さい。これは内枠があることで噴霧濃度が増加するとともに、燃焼容器全体の気流の乱れが少なくなったためと考えられる。

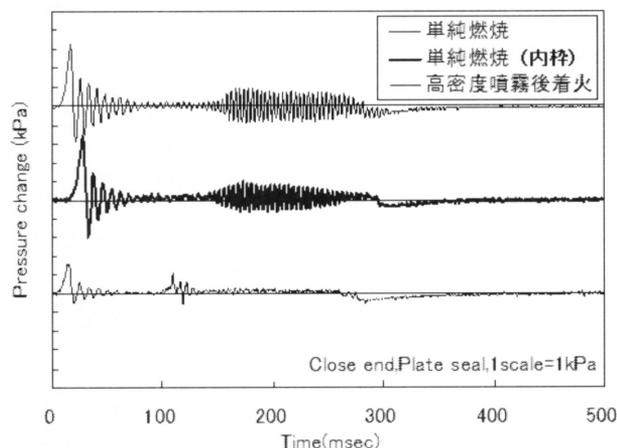


図10 高密度噴霧での内圧変化 (閉鎖端側)

### 3.6 水素濃度12および8%での高密度噴霧後着火

前節で圧力を大きく低下させることができたので、水素濃度12%と8%において同様に高密度噴霧後着火実験を行った。このとき不活性ガスは混合していない。この実験は主に高密度噴霧により火炎伝播が防止できるかという点を確認するのが目的であったので、実験は1回ずつ行った。

水素濃度12%では16%の場合よりビニルシートのはがれ方がかなり弱く、火炎伝播速度も遅くなった。しかし閉鎖端側の温度より燃焼は伝播したことが確認された。水素濃度8%ではビニルシートがはがれず、圧力変化は大気圧からほとんど振れていないので、かなり弱い燃焼になったが、やはり温度は上昇し火炎の伝播を防止することはできなかった。

### 3.7 内枠がある場合のヘリウム50, 55, 60%での単純燃焼

内枠を設置しても単純燃焼自体にはあまり影響がないことは確認したが、ヘリウムを封入した場合の、内枠の有無の影響を確認し、また、この後に行う、高密度噴霧

後着火の実験と比較するために単純燃焼実験を行った。

水素濃度は16%である。図には示さないが、ヘリウム濃度50、55%では圧力変化は大気圧からほとんど振れないほど小さかった。しかし、閉鎖端側の温度はともに250°C程度まで上昇した。ヘリウム濃度50、55%の場合ではビニルシートがはずれていたのに対し、ヘリウム濃度60%でははずれる場合とはずれない場合があった。

### 3.8 ヘリウムを添加した場合の高密度噴霧後着火

水素濃度16%、ヘリウムを60、55、50%添加した場合の高密度噴霧後着火を行った。図11に圧力変化、図12に温度変化のグラフを示す。同図では単純燃焼、噴霧後着火、および噴霧中着火の3つの場合の温度変化を一つの図に示すために、それぞれの条件で、時間を5秒ずつずらして示している。従って、例えば単純燃焼が15秒で着火したことを意味するわけではない。いずれの条件でも白抜ききのシンボルで示したものが開放端温度、黒く塗りつぶしたものが閉鎖端温度である。温度は1秒で200°C以上上昇する場合がある。ヘリウムを50%添加した実験では、閉鎖端側の温度が160°C程度まで上昇しており、火炎は伝播したと言える。

ヘリウム60%、55%添加した実験では、高密度噴霧部で火炎が消滅したと観察された。図13にこの写真を示す。温度変化を見ると、開放端側で150°C近くを示し、閉鎖端では常温の約20度であった。このことより火炎の伝播防止は実現できたといえる。以上より水素濃度16%で高密度噴霧を用いた場合ではヘリウム濃度50~55%の間に燃焼の境界条件があることがわかった。

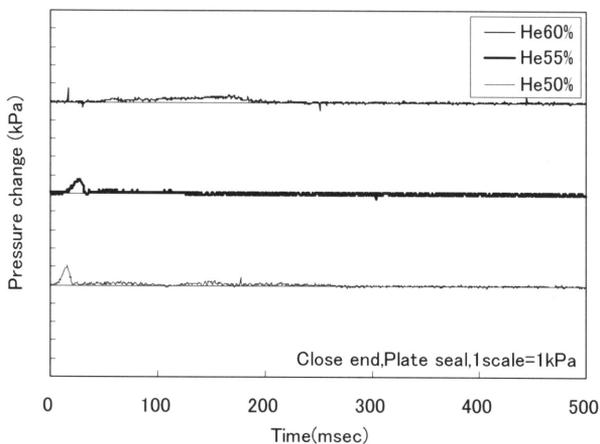


図11 ヘリウム添加&高密度噴霧での圧力変化

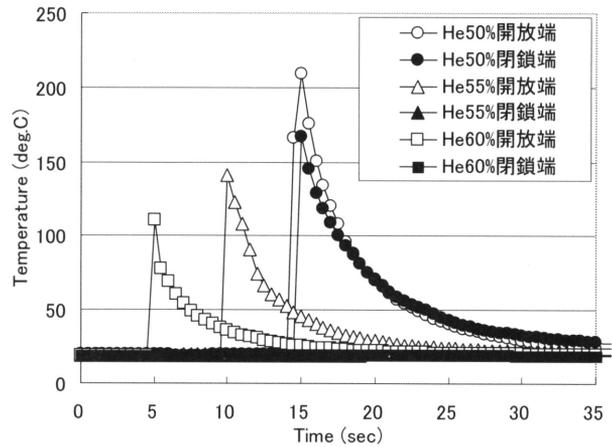
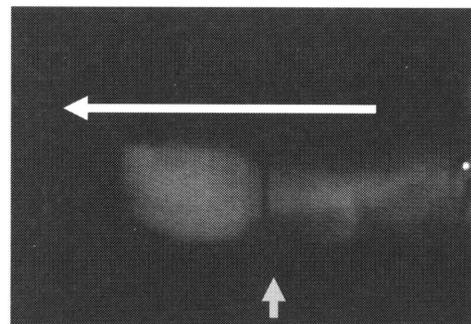
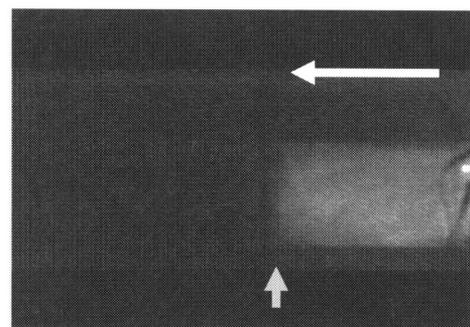


図12 ヘリウム50~60%での温度変化



火炎が水噴霧箇所を通過



火炎が水噴霧箇所ので消滅

図13 火炎伝播が防止された場合の写真。  
ヘリウム濃度55%。

### 3.9 噴霧中着火

これまで噴霧に起因する乱流の影響を避けるために着火はほとんど噴霧後に行ったが、噴霧を停止すると噴霧の密度が低下することは明らかである。そこで、内枠は使用しないで噴霧中着火の場合の燃焼について検討した。また、ヘリウム以外に、二酸化炭素を用いた実験も行った。それらの結果をまとめて表1に示す。

表1 噴霧中着火のまとめ

番号	H2	CO2	He	Air	A 噴霧無	B 噴霧有
1	8	0	0	92	可燃	×
2	8	5	55	32	可燃	○
3	8	10	50	32	可燃	○
4	8	20	40	32	可燃	不燃
5	8	30	30	32	不燃	実験なし
6	8	25	25	42	可燃	○
7	8	20	20	52	可燃	○
8	8	10	10	72	可燃	○
9	8	0	20	72	(可燃)	○
10	8	0	10	82	(可燃)	×
11	16	0	0	84	可燃	×
12	16	5	55	24	圧力減少	○
13	16	10	50	24	圧力減少	不燃
14	16	20	40	24	不燃	実験なし
15	16	30	30	24	不燃	実験なし
16	16	25	25	34	圧力減少	○
16'	16	20	25	39	(可燃)	×
17	16	20	20	44	圧力増大	(×)
18	16	10	10	64	圧力増大	(×)
21	16	20	30	34	(可燃)	○
22	16	10	40	34	(可燃)	×
23	16	15	35	34	(可燃)	×

同表の番号は実験の番号、次の4つの列の数字は混合気の組成を%で表している。ただし、「Air」は100から他のガスを差し引いたものである。「可燃」はその混合気が燃焼すること、「不燃」は燃焼しないこと、「実験なし」は不燃であったので火炎伝播防止実験をしていないことを意味する。「○」は火炎伝播防止ができたもの、「×」はできなかったものを意味する。「(可燃)」は他の実験結果から可燃であることがわかるもの、「(×)」は同様に他の実験結果から火炎伝播防止は不可能であることがわかるものを示している。「圧力増大」、あるいは「減少」は単純燃焼と比較した燃焼の記述である。

同表から同じ不活性ガス量でも二酸化炭素の割合が増えると燃焼し難くなるのがわかる。番号1から8までの実験と番号11から18までの実験は水素濃度が8%か16%かの違いはあるが、ヘリウムと二酸化炭素の量が順番に対応している。一見して16%の場合が火炎伝播防止が難しいことがわかる。ただし、不燃の条件は16%の

ほうが多い。すなわち、水素は濃度が大きいと少ない不活性ガス割合で燃焼しなくなるが、一旦燃焼すると消し難いと思われる。

番号1・A噴霧無の場合、水素8%のみの燃焼は弱いので、開放端側温度上昇は検知していないが、閉鎖端側は検知できている。燃焼していることはダクト内部の上半分ほどに燃焼による水滴が付着することからもわかる。番号1・B噴霧有の場合、噴霧が加わると乱流のためと思われるが、圧力が増大する。

これ以降の水素8%の実験ではヘリウム10%の場合を除き、噴霧により火炎伝播が防止されている。番号4・A噴霧無の場合可燃であったが、水噴霧があると着火そのものが起こらなくなった。番号5・A噴霧無の場合3.3および3.4節にもあるように、ヘリウム60%では燃焼したが、不活性ガスの濃度の合計が同じ60%でも二酸化炭素が加わると燃焼しない。9・Bは噴霧使用時の水素8%ヘリウム20%で、最も少ない不活性ガスの量で火炎伝播が防止できた例である。

11・Aの水素16%のみの燃焼は11・B噴霧が加わると圧力がやや増大する。12・A、13・A、16・Aでは燃焼の圧力が大きく減少した。17・A、18・Aでははっきりと圧力の上昇が確認された。ただし、圧力変動の振幅は大きい火炎伝播速度は遅い。容器が共振しやすい条件があるかもしれないが、これ以上は検討していない。

既報[13]で、高密度水噴霧(80 $\mu$ m)、二酸化炭素50%において水素8%、16%の火炎伝播防止に成功している。本実験では水素8%燃焼においては二酸化炭素は使用せず、ヘリウム20%と水噴霧のみを用いることで火炎伝播防止に成功した。水素16%の燃焼では、本実験では二酸化炭素20%、ヘリウム30%での火炎伝播防止に成功した(番号21)。不活性ガス総量は以前同様に50%であるが、ヘリウムとの混合により二酸化炭素の割合を大幅に削減することができ、人体への安全性が向上している。既報では水噴霧粒径が80 $\mu$ mであったのに対し、本実験では16 $\mu$ mのものを使用しており、水滴の大きさは重要であると思われる。

#### 4. まとめ

水素の燃焼を抑制し火炎伝播を防止することはかなり困難であるが、今後の水素利用の拡大を勘案すると、これを少しでも抑制することは災害防止の観点から重要と

考えられる。不活性ガスが大量にあれば燃焼は防止できることは周知の事実であるが、これは人間が生存できない条件であることもまた事実である。このため、人間が生存できる条件を見出すという観点から水噴霧による燃焼抑制を検討した。この結果、水素の濃度にもよるが、水噴霧と併用することで、水素が 8% の場合には短時間であれば人間が生存できる程度の不活性ガスの使用量で、水素が 16% の場合には避難に要するような短時間であれば耐えられる程度の不活性ガスの使用量で水素の燃焼の伝播防止できることがわかった。また、高密度噴霧ではより効果が大きいこともわかった。

今回は不活性ガスとして主にヘリウムを用いているが、これを他のガスに変えた場合の効果は検討する必要がある。また、実際の大きさの空間では水素が均一に混合しているとは考えられないので、不均一に層を形成しているような場合の燃焼についても検討する必要がある。さらに異なる水素濃度や、水噴霧ノズルを検討し、さらに効果的な水素の燃焼抑制ならびに火炎伝播防止に関する研究を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] 堀口 貞茲、HESS 水素安全技術フォーラム予稿集、(2003) ,p.21-27
- [2] 高圧ガス保安協会、事故事例データベース、平成 14 年版
- [3] 例えば E.Takeuchi, M.Hayakawa, N. Nagashima and S. Matsuoka, CAMP-ISIJ, Vol.21,(2008)-1398
- [4] Swain MR, Grilliot ES, Swain MN. Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits. Proc 1998 US DOE Hydrogen Prog Rev, NREL/CP-570-25315, (1998)
- [5] 井上雅弘、月川久義、金山寛、松浦一雄、室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究、水素エネルギーシステム、Vol.33, No.4 (2008),pp. 32-43,
- [6] 井上雅弘、月川久義、金山寛、松浦一雄、ダクト内および天井下における漏洩水素の拡散に関する実験的研究、水素エネルギーシステム、Vol.34,No.1(2009),pp.45-56
- [7] 水素エネルギー読本、水素エネルギーシステム研究会、オーム社、1982、p.176
- [8] 柳生昭三、"ガスおよび蒸気の爆発限界",安全工学協会,(1977)
- [9] S.P.Fuss, E F.Chen, W.Yang and R J Kee, Inhibition of Premixed Methane -Air Fla,es by Water Mist, 29th Combustion Symposium, (2002)
- [10] 炭鉱保安技術要覧第 1 編ガス・炭じん爆発、石炭技術研究所、資源素材学会、(1991) p.51、
- [11] Biennial Report on Hydrogen Safety,Chapter V, Hydrogen Safety Barriers and Safety Measures,(2006)
- [12] C.Joseph-Auguste, et.al., "On the use of spray systems: An example of R&D work in hydrogen safety for nuclear applications," in Int. J. Hydrogen Energy, Vol.34, Issue 14 (2009) pp.5970-5975
- [13] 消防研究所研究資料第 59 号、ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書、平成 15 年 3 月
- [14] 今村友彦、濱田祥大、茂木俊夫ほか、水噴霧による水素火炎下流側の熱負荷低減効果、第 27 回水素エネルギー協会大会、(2007),pp.13-16
- [15] NEDO、水素の物性と安全ガイドブック、(2003) 、 p.25
- [16] 佐藤保和、安全に関わる水素の性質、安全工学、Vol.44,No.6(2005),pp.378-385
- [17] Zalosh, R.G., "Gas Explosion Tests in Room-Size Vented Enclosures", Loss Prevention , 13(1979), pp.98-110
- [18] 井上雅弘、川端祥男、安全工学会、安全工学研究発表会講演予稿集、(2005),pp.55-588
- [19] 山田一貴、井上雅弘、林健太郎、安全工学会、安全工学研究発表会講演予稿集、(2006) 、 pp.67-68
- [20] 火災と建築、日本火災学会編、共立出版、p.167
- [21] 佐藤彦彦、人間工学基準数値数式便覧、技報堂出版、(1992)
- [22] 田中哮義、建築火災安全工学入門、日本建築センター、(2002)
- [23] Cooper M.G., Fairweather M., and Tite J.P., "On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosions", Combustion and Flame, Vol.65(1986), pp.1-14
- [24] 石井康夫、西田佑、中野雅司、坂野良一、最新発破技術、森北出版、(1984),p3
- [25] 中原 真也、熊谷 守晃、安川哲平、城戸 裕之；トンネル状空間を伝ばする水素予混合火炎の基礎燃焼特性に関する実験的検討に関する実験的検討、水素エネルギーシステム、Vol.32, No.3(2007), pp.24-31
- [26] Coward,H.F. and G.W.Jones. Limits of Flammability of Gases(N<sub>2</sub>,He and CO<sub>2</sub>) and Vapors, Bureau of Mines Bulletin 503, N70-74476; AD-701575 (1952)
- [27] 中原 真也、城戸 裕之、中島 健四郎；希薄水素混合気の乱流燃焼速度特性に与える希釈ガスの影響、水素エネルギーシステム、Vol.30, No.2(2005), pp.58-65