

火災時の高圧水素ガス放出燃焼実験について

自動車安全研究領域

松島 和男

谷口 哲夫

成 波

関根 道昭

1. まえがき

本実験は当所が平成 15 年度～16 年度に実施した「燃料電池自動車実用化促進プロジェクト検討会」において、保安基準および技術基準作成のための課題のひとつである燃料電池自動車用ガス容器の水素ガスの排出基準作成のための資料を得ることを目的に行ったもので、車両火災時に高圧水素容器の容器安全弁または圧力逃がし弁（以下PRDベント管という）が作動し、放出される水素がどのように燃焼するかを調査したものである。

今回の実験は、高圧水素ガス容器に付属しているPRDベント管からの放出を上方及び水平方向に放出した場合の燃焼実験を模擬装置を使用して実施したものであり（昨年度、下向き及び斜め後方に放出した場合の燃焼実験の報告を行っている。）昨年度の実験結果も含めて、車両周囲への影響について検討したので、その結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は模擬装置を用いて行ったもので、実験装置の概略を図1に示す。水素容器の容量は燃料電池自動車1台分に相当する140L（35L×4）もので図2に示す。

また、水素容器の内圧は実験直前に35MPaまで充填した。なお、1回の実験で使った水素の総重量は3.1kgであった。

実験用の模擬装置は実車両を模擬しており、厚さ6.3mmの2m×2m鋼板と高さ0.3mの4本の柱からなるものである。ノズル位置は装置の中心に設置され、着火源は放出された水素の流れが地面に衝突する場所付近に設置した。

水素燃焼時の周辺温度と熱流速などを熱電対（K型）と熱流束計により計測し、水素燃焼の様子を1台の赤外線カメラと4台のビデオカメラで撮影した。

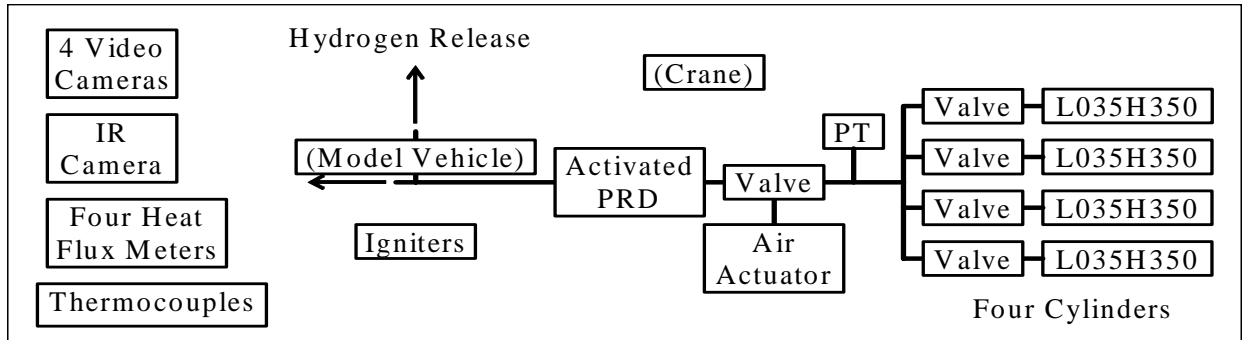


図 1 実験装置



図 2 水素容器

2.2 実験条件

実験条件を表1に示す。本実験では、水素ガスを上方に放出した場合（放出流量を代えた場合の比較）及び水平方向に放出した場合（じゃま板の置き方による火災の広がり等の比較）について観察した。

表 1 実験条件

| Test | Direction | Obstacle Plate (θ^*) | W** | Flow Rate | Model Vehicle |
|------|------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------|
| F1 | Upward | N/A | N/A | High | Used |
| F2 | " | " | " | Low | " |
| G1 | Horizontal | " | " | High | N/A |
| G2 | " | " | " | Low | " |
| G3 | " | Perpendicular (90°) | 0.1 m | High | " |
| G4 | " | Diagonal (45°) | " | " | " |
| G10 | " | Perpendicular (90°) | 0.3 m | " | " |
| G5 | " | N/A | N/A </td <td>"</td> <td>Used</td> | " | Used |
| G6 | " | Perpendicular (90°) | 0.1 m | " | " |
| G7 | " | Diagonal (45°) | " | " | " |
| G8 | " | Perpendicular (90°) | 0.3 m | " | " |

2.3. 上方放出燃焼実験 (実験 A)

高圧水素ガス容器に付属している P R D ベント管からの放出流量を変えた場合 (High と Low の 2 種類、流量については表 2 に示す。) の上方放出燃焼実験を図 3 に示したように模擬装置を使用した方法で実施した。

なお、火炎範囲、火炎温度と熱流速を評価するために、ビデオ撮影および温度と熱流速の計測を行った。熱電対と熱流束の位置を図 4 に示す。

表 2 放出流量

| Flow rate | Radius of nozzle | Area |
|-----------|------------------|--------------------|
| High | 3/8 inch | 71 mm ² |
| Low | 1/4 inch | 32 mm ² |

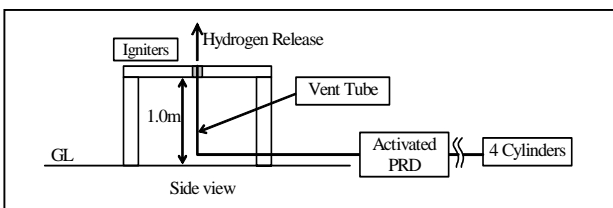


図 3 上方放出燃焼実験 (実験 A)

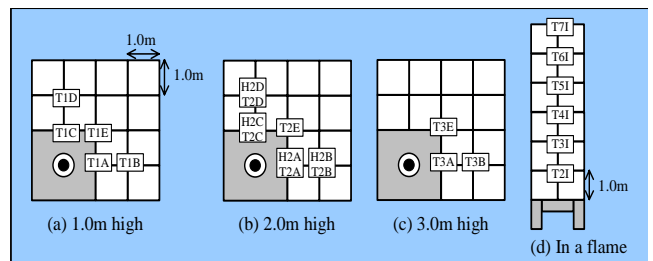


図 4 熱電対と熱流速の設置位置 (実験 A)

2.4. 水平放出燃焼実験 (実験 B)

高圧水素ガス容器に付属している P R D ベント管からの放出流量を変えた場合 (High と Low の 2 種類) の水平放出燃焼実験を図 5 に示したように模擬装置を使用しない方法で実施した。なお、放出流量が大きい条件で放出口から 0.1m の距離にじゃま板を 45 度と 90 度に設置した場合と 0.3m の位置にじゃま板を 90 度に設置した条件での燃焼実験も行った。

なお、火炎範囲、火炎温度と熱流速を評価するために、ビデオ撮影および温度と熱流速の計測を行った。熱電対と熱流束の位置を図 6 に示す。

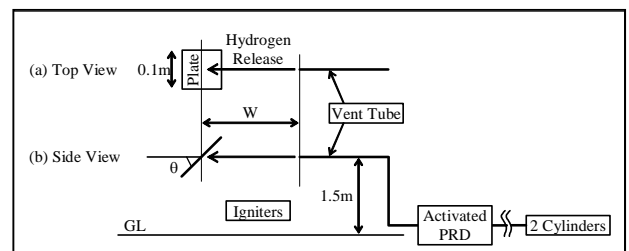


図 5 水平放出燃焼実験 (実験 B)

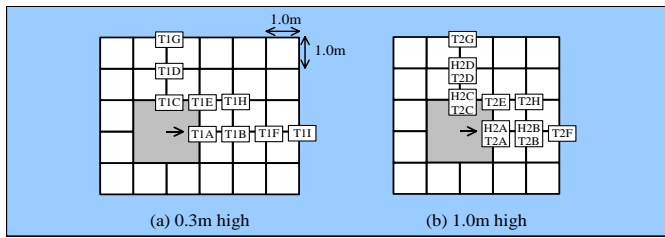


図 6 熱電対と熱流速の設置位置 (実験 B、C)

2.4. 水平放出燃焼実験 (実験 C)

高圧水素ガス容器に付属しているPRDベント管からの放出流量が大きい条件での水平放出燃焼実験を図7に示したような模擬装置を使用して実施した。なお、放出口から0.1mの距離にじゃま板を45度と90度に設置した場合と0.3mの位置にじゃま板を90度に設置した条件での燃焼実験も行った。

なお、火炎範囲、火炎温度と熱流速を評価するために、ビデオ撮影および温度と熱流速の計測を行った。熱電対と熱流速の位置は水平放出燃焼実験 (実験 B) の図6に示したとおりである。

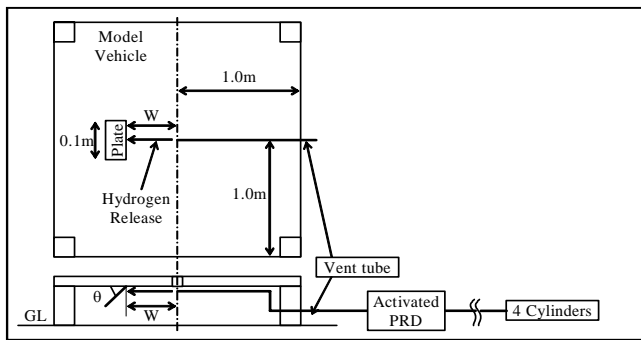


図 7 水平放出燃焼実験 (実験 C)

3. 試験結果および考察

3.1. ビデオ画像

実験の様子を、4台のビデオカメラと1台の赤外線カメラによって撮影した図8及び図9はそれぞれ水素が上方及び水平方向に放出した場合のビデオ映像である。図示の映像によると、水素の放出と着火はほぼ同時に起こっていた。また、着火直後に水素火炎が最大に達することが観察された。

3.2. 上方放出燃焼実験結果 (実験 A)

図10は火炎温度と水素放出流量の影響を示すもので、火炎中心部の放出口からの距離と最高温度を比較したものである。この結果をみると、今回の流量条件 (表2) では放出流量の影響が見られなかった。

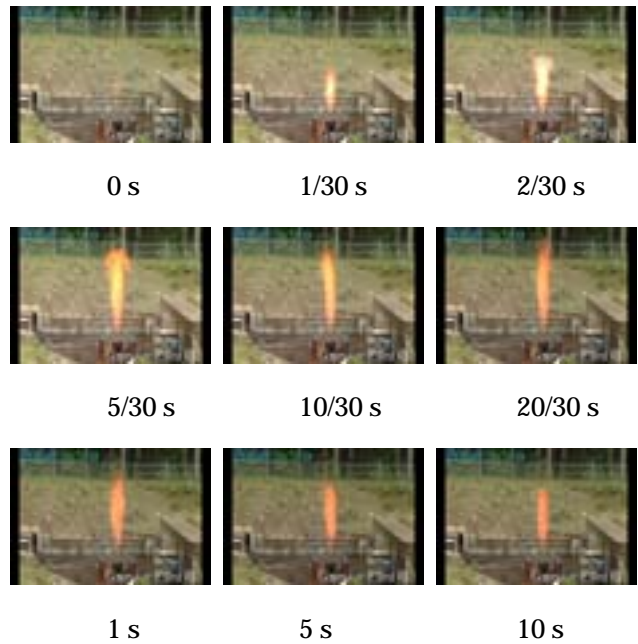


図 8 上方放出燃焼実験結果 (実験 A)

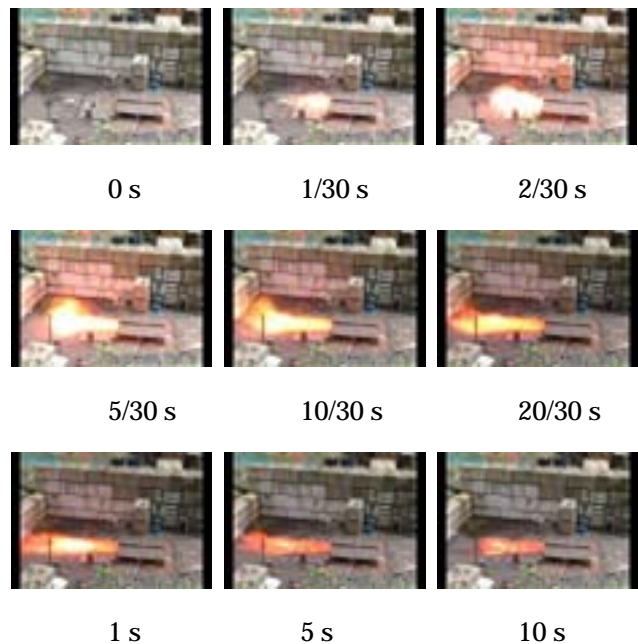


図 9 水平放出燃焼実験結果 (実験 C)

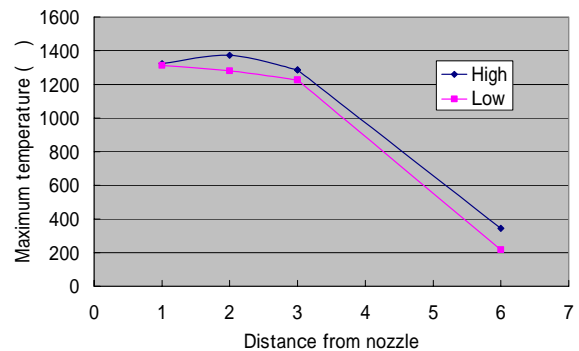


図 10 放出口からの距離と最高火炎温度 (実験 A)

図 11 は放出口から上方 1 m の位置で前方及び左方にそれぞれ 1 m、2 m 離れた位置での熱流速の時間的変化を示したものである。水素放出し、着火直後に熱流速が最大になることが分かった。水素放出口から水平に 1 m の位置で最大 0.4 kW/m² 程度、2 m の位置で最大 0.2 kW/m² 程度で何れにしても人間が我慢できる 2 kW/m² を超えていないため、水素放出の火炎から 1 m 以上離れていれば安全であることが分かった。

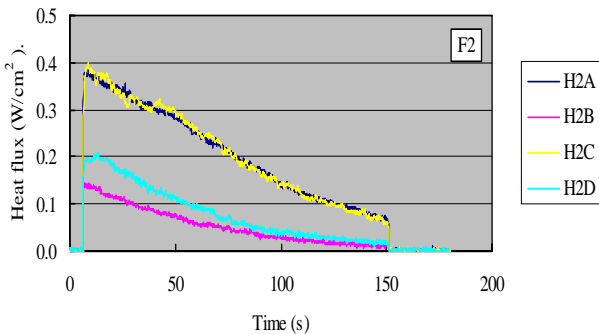


図 11 熱流速の変化状況 (実験 A)

3.3. 水平放出燃焼実験結果 (実験 B)

図-12 は水素放出口と同一の高さでの各実験条件での最大火炎温度を示したものである。これによると、放出流量の違いによる火炎温度の差はほとんどなく、放出口から 2m 程度離れた地点で最大値 1400 を示し、4m 離れても約 800 あった。

また、じゃま板を設けた場合、0.1m の位置で 45 度傾けた場合が 200 であったが、90 度の場合には常温のままだった。また、0.3m 離れた位置にじゃま板を 90 度に立てた場合火炎温度の最高温度は 400 になった。

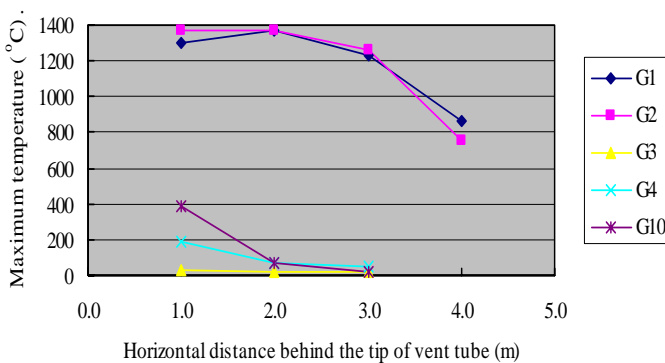


図 12 火炎中心線上での最高火炎温度 (実験 B)

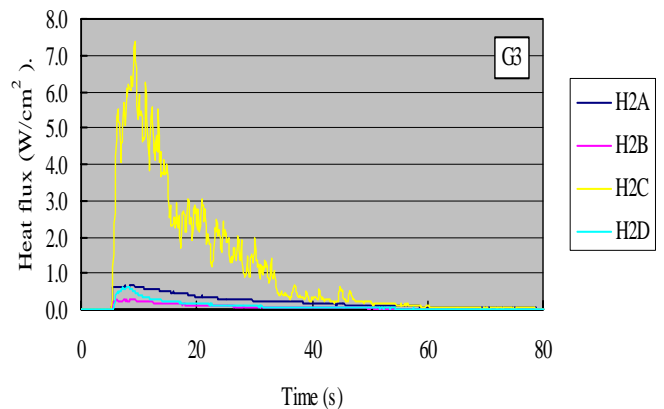
次に、じゃま板がない場合の水素放出流量の大小による差もなく、熱流速値についても、上方放出と同じく、最大でも 0.2 kW/m² 程度で水素放出の火炎から 1 m 程度離れていれば安全であることが分かった。

しかし、じゃま板がある場合については、じゃま板に火炎が衝突し、そのため、火炎の広がりが大きくなる。熱流速値は図 13 の結果のようにやや大きな値となった。

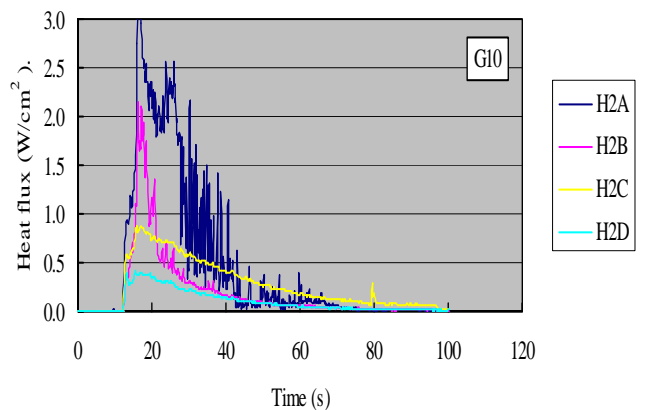
図 13(1)は放出口から 0.1m の位置にじゃま板を置いた場合の結果を示したもので、火炎中心線から 0.5m 下側に離れた位置での熱流速の最大値がで約 7 kW/m² であった。

また、図 13(2)は放出口から 0.3m の位置にじゃま板を置いた場合の結果を示したもので、熱流速の最大値は約 3 kW/m² であった。

いずれの場合も人間が我慢できる 2 kW/m² を超えているため火傷を生じる恐れがあることが分かった。



(1) じゃま板を 0.1m に置いた場合の熱流速の変化



(2) じゃま板を 0.3m に置いた場合の熱流速の変化

図 13 熱流速の変化状況 (実験 B)

3.4. 水平放出燃焼実験結果（実験C）

この実験は模擬装置を使用して実施したもので、車両床下から水素を水平に放出させ、燃焼させた実験を想定したものである。

図14は水素放出口と同一の高さ0.3mで、火炎中心性上の各実験条件での最大火炎温度を示したものである。これによると、じゃま板がない場合は、放出口から2m程度離れた地点までは最大値1400を示し、4mは離れても約800あった。

次に、じゃま板を0.1mの位置で45度傾けた場合、1m離れた位置で900、4m離れた位置でも700あったが、90度の場合は1m離れた位置で約100で、3m離れた位置では約500まで上昇した。また、0.3m離れた位置にじゃま板を90度に立てた場合は1m離れた位置で約800であったが、3m離れた位置では常温まで下降した。

図15は水素放出口と同一の高さ0.3mで、火炎放出方向から横方向の各実験条件での最大火炎温度を示したものである。これによると、じゃま板がない場合は、横方向への火炎の広がりはなく常温であるが、じゃま板を0.1mの位置で90度に設置した場合、横に1m離れた位置で1200、2m離れた位置でも約350あり火炎が横に大きく広がっていることが分かります。また、90度の場合は1m離れた位置で約200で、2m離れた位置では常温まで下降していることから火炎の広がり直径で2～3m程度であることが分かる。

次に0.3m離れた位置にじゃま板を90度に立てた場合は1m離れた位置で約200で、2m離れた位置では常温まで下降して、0.1mの位置にじゃま板を立てた場合と同様、火炎の広がり直径で2～3m程度であることが分かった。

熱流速地については、火炎中心線から上側に0.7mの位置で測定した結果、じゃま板がない場合は、最大0.2kW/m²程度で水素放出の火炎から1m程度離れていれば安全であることが確認できた。

しかし、じゃま板がある場合については、じゃま板に火炎が衝突し、そのため、火炎の広がりが大きくなるため、熱流速値も少し大きな値となった。最も大きな値となったのが、放出口から0.3mの位置にじゃま板を置いた場合で、熱流速の最大値が約3kW/m²であった。結果を図16に示す。

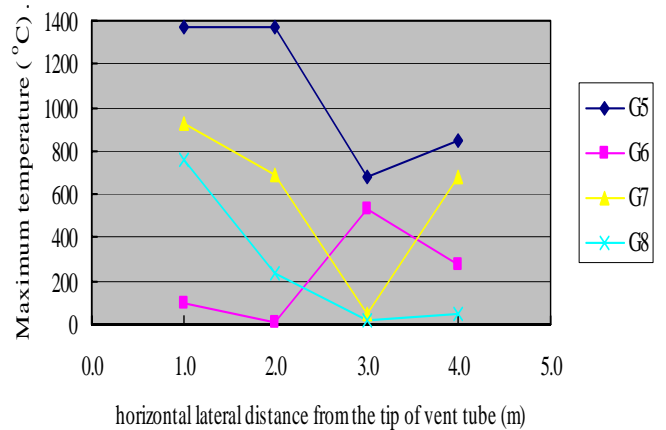


図 14 火炎中心線上での最高火炎温度（実験C）

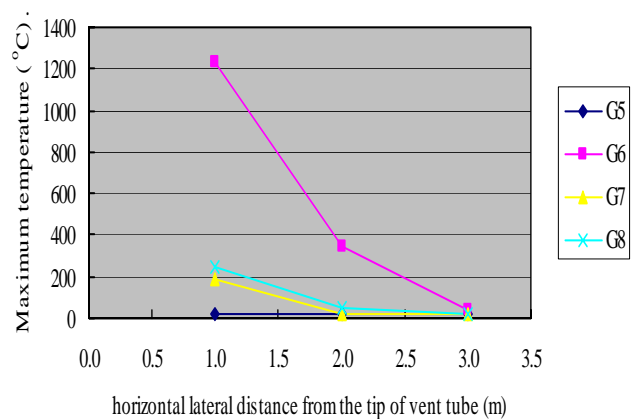


図 15 火炎横方向の最高火炎温度（実験C）

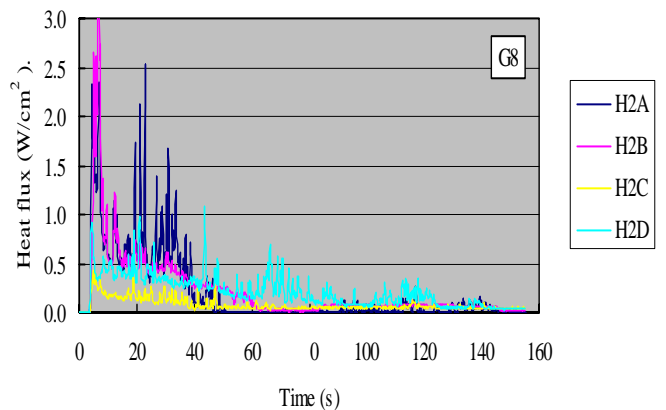


図 16 熱流速の変化状況（実験C）
（じゃま板を0.3mに置いた場合の熱流速の変化）

3.5. 放出方向と火炎範囲

昨年、報告した下向き及び斜め後方への水素放出の燃焼実験と今回報告した水平及び上方放出の燃焼実験の結果も併せ、火炎の放出方向(後方)と横方向(左右)の広がりをまとめたものを図17に示す。

この結果によると、水素を直接空気中に放出した場合、火炎は6m以上となるが、火炎幅は車両幅とほぼ同じ(2m)である。また、水素の放出方向が下方に傾くと、後方への広がりが小さくなり、左右の広がりが大きくなるのが分かる。斜め後方に放出した場合には前後方向、左右方向とも約2mの火炎になった。

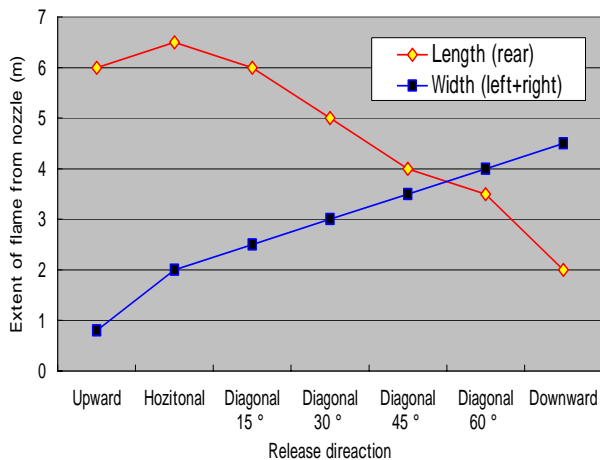


図 17 放出方向と火炎範囲

4. まとめ

本実験では、模擬装置を用いて、容器安全弁からの水素ガスを上方向及び水平方向に放出し、それに放出流量及び放出形態を変えた場合の燃焼実験を行い、車両周囲への影響を調べた。その結果は以下の通りである。

- (1) 水素の放出と着火はほぼ同時に起こっており、着火直後に水素火炎が最大に広がることが観察された。
- (2) 水素を直接空気中に放出した場合、火炎が6m以上広がり、最高温度が1400 となることから、水素の水平方向(前後左右)への直接放出を避けたほうがよいと考えられる。
- (3) 水平に放出した場合、水素の放出方向にじゃま板をおいた場合、火炎の長さが小さくなり、左右への広がりが大きくなった。

(4) 昨年報告した、鉛直下方へ放出した場合には、前後方向、左右方向とも約2mの広がりであった。

(5) 今回の実験では、2ベルの放出流量を設定し、上方向と水平方向への放出燃焼実験を行ったが、昨年の斜め下方に放出した実験結果と同様、放出流量の大小による影響はなかった。

参考文献

- (1) 松島ほか、燃料電池自動車の高圧水素容器からの水素ガス放出燃焼実験について、平成16年度(第4回)交通安全環境研究所講演概要、P.133-138
- (2) 燃料電池自動車実用化促進プロジェクト検討会：平成15年度、燃料電池自動車に係る保安基準策定事業に関する調査報告書(平成17年3月)