

# 室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究

井上 雅弘\*・月川 久義\*\*・金山 寛\*\*\*・松浦 一雄\*\*\*\*

\*九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門

〒819-0395 福岡市西区元岡 744

\*\*西部ガス株式会社 総合研究所

〒819-0162 福岡市西区今宿青木 421-4

\*\*\*九州大学大学院工学研究院 知能機械システム部門

\*\*\*\*スタンフォード大学 乱流研究センター

## Experimental Study on Leaking Hydrogen Dispersion in a Partially Open Space.

Masahiro INOUE\*, Hisayoshi TSUKIKAWA\*\*, Hiroshi KANAYAMA\*\*\*

and Kazuo MATSUURA\*\*\*\*

\*Kyushu University, Department of Earth Resources Engineering

744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

\*\*Saibu Gas Co., Ltd.

421-4 Imajuku Aoki, Nishi-ku, Fukuoka 819-0162

\*\*\*Kyushu University, Department of Mechanical Engineering

\*\*\*\*Stanford University, Center for Turbulence Research

Stanford, CA 94305, USA

Hydrogen ignites by a small energy that is almost one tenth of that for methane which is the main substance of town gas. The combustion range of the hydrogen-air mixture is very wide as between 4 to 74 %. Also hydrogen is leaky and the combustion speed is very high. Therefore, the knowledge of the safety of hydrogen is indispensable for the broad usage of hydrogen energy in our civil life.

The purpose of this study is to increase the safety in a space where hydrogen is really used. A series of experiments was carried out using a model to understand the hydrogen dispersion behavior when hydrogen leaked in a partially open space such as a room, a basement car park, and a passage. It was found how the hydrogen flows from its source to outside and how the concentration changes with height and time. The effects of the inclination of the ceiling were also observed.

There was another purpose in the experiments. Recently, CFD analysis method is widely used to examine the behavior of leaked hydrogen. However it seems that many of them were not examined the accuracy itself comparing with the reliable actual data. The reason is thought that there are few reliable experimental results which can be used to validate the accuracy. A lot of effort was paid to get accurate hydrogen concentration data from the experiments to provide the reliable results.

**Keyword:** hydrogen dispersion, ventilation, safety,

## 1. はじめに

水素は人体に対しては有害性はないので[1]水素の安全対策は燃焼あるいは爆発による危険の回避が主と考えられる。水素が屋外のような開放空間で使用されるならば多少の漏洩があっても燃焼、爆発の危険性は小さい。低濃度の予混合燃焼であれば炎は見え、音もほとんどしない。しかし、屋外での水素関連の災害が皆無かといえそうではなく、水素を運搬中の事故に起因する災害がいくつも報告されている[2]。

安全上、水素を使用する場所ではできるだけ開放的な空間が望ましく、NASA[3]は水素利用施設の好ましい構造を何段階に分けている。しかしながら、水素の利用が普及すれば、室内、トンネルあるいは地下駐車場のよう、水素使用箇所を開放空間に限定することはできないと考えられる。このような箇所で水素が漏洩すると、水素が危険な濃度で空気と混合・集積し、燃焼・爆発による災害を生じる可能性がある。

水素が漏洩した場合に、その空間から水素が容易に排出されず、集積しやすい空間を部分開放空間と呼ぶことにする。部分開放空間での水素漏洩は2重の意味で危険である。1つは水素が高濃度に集積しやすいことである。水素は高濃度では燃焼速度が他のガスに比べて格段に速く威力が大きい[1]。いまひとつは燃焼時の圧力上昇[4]が大きく、構造物の破壊に至りやすいことである。本研究はこの部分開放空間を対象に、実際に水素を用いて、水素の拡散と集積に関する実験的検討を行ったものである。この結果は水素の早期検知や最適なセンサの配置に応用できる。

筆者らはHallway model[5]、ダクトモデル、天井モデルについて一連の実験を行った。いずれも水素の拡散と集積の解明が目的であるが、Hallway model は水素の浮力により誘起される自然対流の影響、ダクトモデルはダクトのように強制流れがあるなかでの水素の挙動、天井モデルは水素の検知と排除に関する検討を主目的として行った。本論文はHallway model に関して行った実験結果について述べる。

本研究ではできるだけ高精度で水素濃度を測定することに努めた。水素の拡散や集積に関するコンピュータ・シミュレーションはいくつも公表されているが、しっかりとした実験データと比較検討されたものは少ないようである。本研究はコンピュータ・シミュレーションの精

度検証にも使用可能なデータを提供することを目的のひとつとしている。

## 2. 従来の研究

実際に水素を用いた拡散や集積に関する実験は少ないが、Hallway model といわれる部分開放空間での漏洩水素に関する実験は水素濃度の実測結果とコンピュータ・シミュレーション結果の両方が示されている。しかし、水素濃度は数分おきの値である。本研究でも実験精度の検証を兼ねて、このmodelでの実験を行ったが水素濃度は短い周期の変動を示す。このため、公表されている測定値が適正に測定箇所の濃度を代表しているかという疑問がある。

石炭鉱山で発生する主要な可燃性ガスであるメタンを用いた研究は精力的に行われ[6]ている。メタンの密度は空気の約半分であり、浮力の効果が水素に比べて小さい。しかしながら水素の濃度が50%であればその浮力効果はほぼ同じであるので、水素の拡散に関する傾向を知る重要な手がかりを得ることができる。

## 3. 水素センサの特性

本実験では図1に示すような水素センサ(新コスモス電機製)を濃度分布測定のために用いた。本センサが接続される指示計(図2)からは、濃度に応じて4-20mAの電流信号が出されるので、濃度データはデータロガーで収録した。このセンサにはその動作原理の違いにより、接触燃焼式と熱伝導率式がある。接触燃焼式は精度が高く再現性に優れる、温度・湿度の影響を受けないという特徴があるが、酸素が必要で被毒の問題がある。一方、熱伝導率式は100%まで測定可能、被毒の問題がなく経時的に安定、ヘリウムの測定にも用いることもできるという特徴がある。本研究では安全のため、また比較のために、水素の拡散試験に先立ちヘリウムによる拡散実験も行っている。このような目的には水素でもヘリウムでも測定できる熱伝導率式が便利である。ただし、100%用では分解能が落ちるので特に高濃度の測定をする箇所のみ熱伝導率式100%仕様を、それ以外は接触燃焼式と熱伝導率式ともに10%仕様を用いた。この使い分けは主にヘリウムの場合にも測定するか否かである。また、通常標準品は水素の燃焼下限界である4%までの測定範囲である

が、本実験ではこれ以上の濃度になることが予想されたので、特に10%までの測定が可能な仕様のものを用いた。



図1 実験に用いた水素センサの外観



図2 水素センサの指示計

水素センサの寸法は図3に示す通りであり、直径が30mm、長さ40mmである。図の左半分を示す外側部分はセンサが着火源とならないためのフレームアレスターであり、実際のセンサ部分は図の右半分を示す内側の網状の覆いの中にある。センサにはこれ以外にも4芯のケーブルが必要で、目的とする拡散や集積の障害となることが懸念され、できるだけ流れを乱さないように務めた。実験装置が小さい場合にはセンサの大きさが問題となるが、可燃限界以下の水素濃度が対象であれば外側の焼結合金は使用しなくても良いのでセンサは小さくなる。また、センサと指示計の距離が短い場合には細いケーブルを使用することもできる。焼結合金はセンサの反応時間に影響があるのではないかと思われたが、影響はあまりなかった。

使用した水素センサシステムは濃度を表示および電流信号として出力するものの、警報器として販売されており、濃度測定装置としては販売されていない。このため、

センサの特性についての検討を行った。本センサの理想的な使い方としては一度設置すれば動かさず通電したままということが考えられる。しかし、本研究は最大毎分60リットル程度の水素を放出するので屋外で実験する。このため、測定日ごとにセンサの設置、通電、測定、取り外しをする。センサに小さいとはいえ物理的なショックが加わることは避けられない。このため、上記の設置、通電、測定、取り外しを繰り返す場合に濃度の測定値にどのような影響が現れるかを検討した。

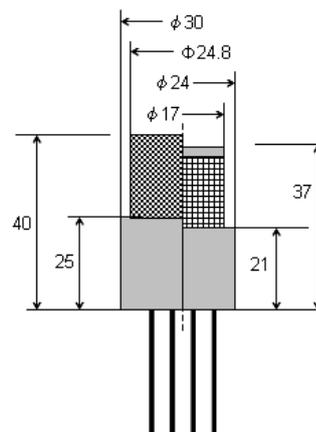


図3 水素センサの寸法

この検討のためにはセンサを任意の水素濃度の雰囲気中に置いてセンサの精度を確認する必要がある。センサの精度の確認は自作の校正器具により行った。手順は以下の通りである。

1. 内部に攪拌用の小型ファンを取り付けた、密閉容器を用意する。
2. これにセンサを設置した後密閉する。
3. センサに通電後、信号をデータロガーで取り込み続け、読みが安定するまで待つ。
4. シリンジで密閉容器に規定量の水素を注入する。
5. 一定時間後に密閉を開放し容器内の水素を排除する。

本センサを濃度測定装置としての精度で見ると、しばらく使用していないと0点ならびにスパン（出力の大きさ）がずれていることが度々あった。このため、上記の4の水素注入の前に0点を調整する。その後、4の水素注入後にセンサの出力が、与えた水素濃度と同じになるようにスパンの大きさを調整する。スパンを変えると0点がずれる。すなわち、上記5で水素濃度を0にしても、センサの出力が0にならないので、再度0点を調整する。次に再度、センサを規定の濃度の雰囲気に入れ再

度スパンを調整する。これを数回繰り返すという初期調整が必要である。

初期調整を行った後、センサ精度の確認の手順を1週間繰り返す、水素濃度を0, 1, 2, 3, 4, 5%とした場合のセンサの反応を測定した。図4はその測定結果の一部である。

同図には接触燃焼式と熱伝導率式それぞれ3個のセンサの3日間の試験結果を示しており、VCが接触燃焼式を、VTが熱伝導率式を意味する。横軸は時間ではなく測定結果を時系列的に並べたもので、濃度が上昇している1から6までは、水素濃度を1%ずつ上昇させた期間であり、実際の時間は数分しか経過していない。一方、濃度がほぼ0を示している8, 9の間はほぼ24時間が経過している。また、7はグラフが見やすいように6と同じ値を並べたものである。

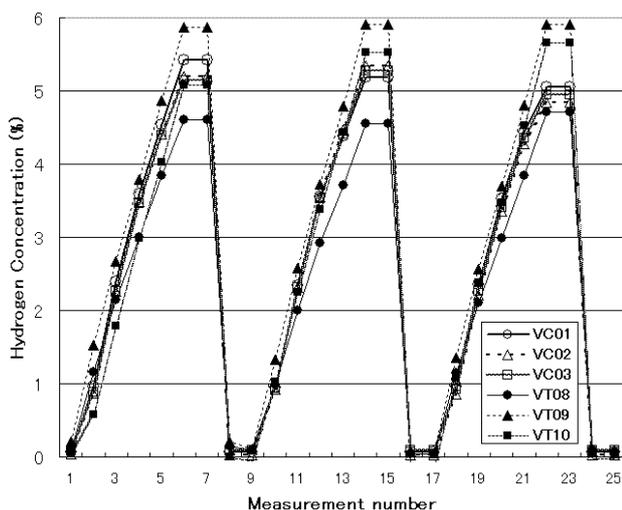


図4 水素センサシステムの安定性の試験結果

白抜きシンボルで示される接触燃焼式は3個とも最大値が5%に近い値を示しており、一般に精度が高いということを示すが、出力の大きさの順番は毎回異なる。黒いシンボルで示される熱伝導率式は出力の大きさの順番は変わらないものの、与えた濃度との差が大きい。また、どちらのセンサも直線性は良好である。このように使用した水素センサはガスクロマトグラフのように間欠的な値しか得られない方法と異なり、連続かつリアルタイムな測定が可能であり、大変有用であるが、得られる値には気をつけなければならないことがわかる。従って、本研究では、測定を行う日には本測定の前後で必ずこのセンサ精度の校正を行い、スパンおよび0点の差が小さ

いことを確認した上で最新の補正值を使用した。

センサをモデル内部に取り付けると、校正用の容器内で校正を行うことが困難になる。この場合には取り外すことが可能なセンサのみをまず校正する。次に校正が済んだセンサをモデルに取り付ける。モデルの開放部分を密閉し、一定量の水素をモデルに供給することで、モデルそのものを校正容器として用いることとした。このとき、校正済みのセンサによってもモデル内の水素濃度を確認した。

センサ精度の確認時における2つの熱伝導率式センサの出力と時間の関係を図5に示す。注入時刻は5秒である。同図から出力は10秒程度で定常に達することがわかる。本データは校正容器にシリンジから水素を注入した場合の濃度変化であり、水素を注入終了するまでに3秒程度要している。また、容器内での水素濃度の分布は不明であり、応答時間は容器内でのセンサの位置でも異なると考えられる。センサには焼結合金の覆いがあるのでこの影響もあるので、センサの素子単体の応答速度はこれより速いと考えられる。また、製造者のデータによれば濃度が低下するときの応答時間が多少長い。

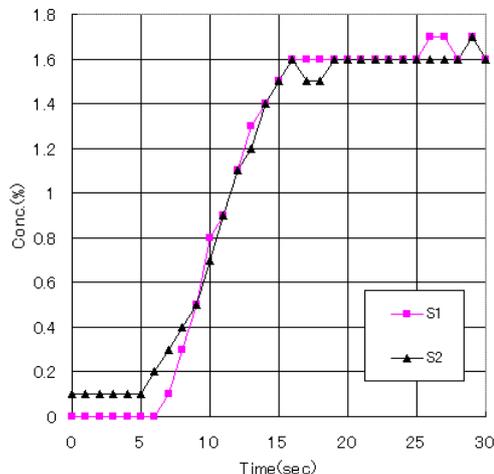


図5 センサの出力と時間の関係

#### 4. Hallway Model

##### 4. 1モデルの条件

本モデルはSwainら[5]が用いたモデルと同じ大きさ、形状である。本モデルは長さ2.9m、幅0.74m、高さ1.22mの比較的大型の直方体で、図6に示すように床面に水素を供給する部分(Hydrogen inlet)がある。天井、ならびに側面に換気用の開放部があり、それぞれ、Roof vent

およびDoor vent と呼ぶことにする。それぞれの大きさや位置の詳細を図7に示す。本モデルはアクリルで3分割できるように作成した。その写真を図8に示す。右下の黒い部分がHydrogen inlet である。

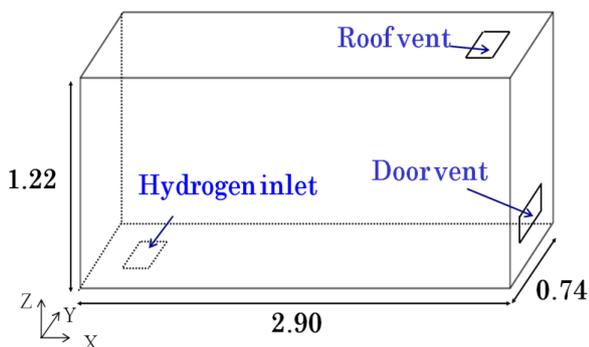


図6 Hallway Model の概観。単位はm

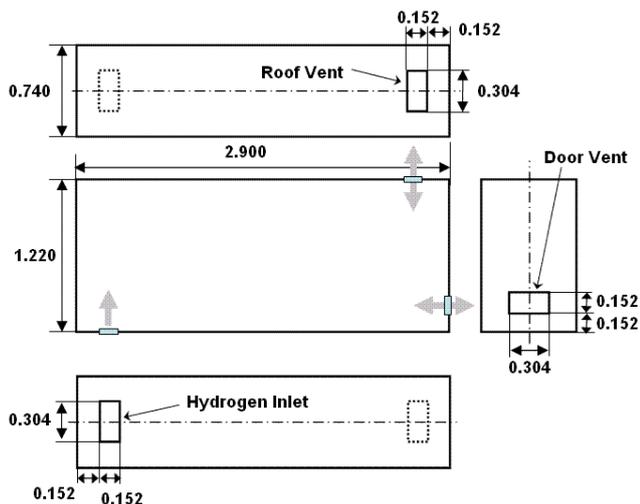


図7 Hallway Model の大きさと位置



図8 Hallway Model の写真

本実験の主目的は、Hydrogen inlet から供給された水素の浮力により誘起される自然対流によるモデル内の水素濃度分布などを把握することである。供給する水素の量は自由に設定できるが、毎分57リットルを標準条件とした。この量は40MPaの圧力差で0.06mmのピンホールから流出する水素量（大気圧下）に相当する[7][8]。ただし、本実験はピンホールから漏洩した高速の流れが何らかの障害物により速度をほとんど失ってからの挙動を対象とした。水素供給部はHydrogen inlet の下に小箱を取り付け、間に整流板やスポンジを置くとともに、水素の供給が小箱全体に均一になるように配管した。水素供給量をHydrogen inlet の面積で単純に割ると、水素の流出速度はほぼ2cm/sという遅い流れとなる。モデルから供給用の小箱を取り外して、水素供給時の小箱内の圧力を測定すると、供給直後は最大で0.2Pa程度ゲージ圧で正圧となり、その後ほぼ0になる。供給を停止すると逆に最大で0.2Pa程度ゲージ圧で負圧となる。

水素の流量はマスフローコントローラー（山武製、MQV0200 水素用）で制御した。本コントローラーの仕様によれば流量誤差は、毎分57リットルの場合には毎分0.5リットル以内となる。本コントローラーはパラメータを変更するだけでヘリウムも使用できるので、実際にヘリウムで流量を確認したが、毎分50リットルに対して毎分0.5リットル以内の誤差であった。

本実験は最大で900リットル程度の濃度100%の水素を15分間程度で放出し、モデル内には可燃濃度を越える領域ができる。このため、安全を確保するために、屋外に換気可能な屋根および3方の壁で囲まれ、残りの部分も可動壁により風を防止できるようにした施設を用意して実験した。また、実験時にはモデル全体を目の細かいネットで覆い、外部の風の影響を無視できるようにした。モデル外にも水素センサを配置し、濃度を測定したが、外部の風の影響と思われるような濃度変化は見られなかった。

#### 4. 2水素センサ位置

本実験における各センサの位置を表1、図9に示す。なお、センサVC01、02は電動スライダを用いて濃度分布を移動しながら測定する際に使用した。

表1 各センサの位置(単位:m)

センサ名	X	Y	Z	
VT	01	0.15	0.14	0.15
	02	0.15	0.52	1.01
	03	2.68	0.14	1.01
	04	2.68	0.52	0.15
VC	01	移動用 (Z 方向)		
	02	移動用 (X 方向)		
	03	1.02	0.37	0.15
	04	2.67	0.59	1.22
	05	1.88	0.37	0.15
	06	1.01	0.37	1.01
	07	1.88	0.37	1.01
	08	0.15	0.37	1.22
	09	0.15	0.22	1.01

\*原点座標は図6や図9に示す床面上の左端手前

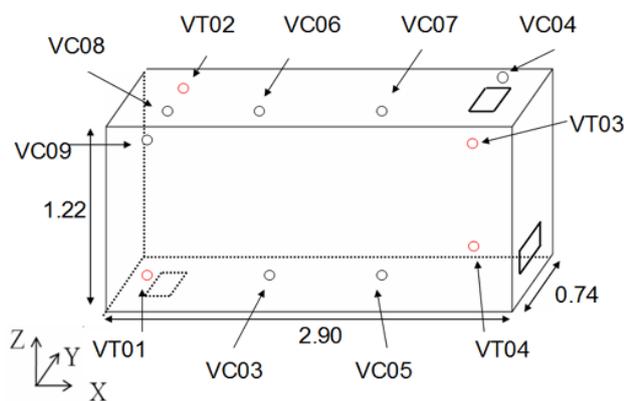


図9 各センサの配置

### 4. 3 基本的条件での水素濃度経時変化

モデルが水平に置かれている場合の VT01~VT04 の水素濃度測定結果を図10~13に示す。同じ条件の実験を4回行い、再現性を確認した。ここではそれらのなかの2回分のデータを①、②と区別して示している。水素の供給は60~1134秒である。

VT01 センサは Hydrogen inlet に隣接して、床面から15cmの高さに設置されたセンサである。ベースラインは①、②いずれもほぼ1%である。突発的に、水素濃度は上昇し、その最高値は5%に達する。これは Hydrogen inlet から上昇する水素の流れに揺らぎがあり、その流れがセ

ンサに近寄った場合にこのように濃度が上昇すると思われる。上昇する時期は一定していない。本実験のような流れのある場では、ガスクロマトグラフのような間欠的な測定方法を用いた場合には、突発的に上昇した時期の濃度を測定している可能性も十分あり、現実とかけ離れた解釈を与える危険性がある。また、センサの大きさが直径30mmあるのでこの大きさの影響も無視できない。このセンサの位置は、その位置が数センチずれるだけで濃度が大きく変わる可能性があり安定していない。

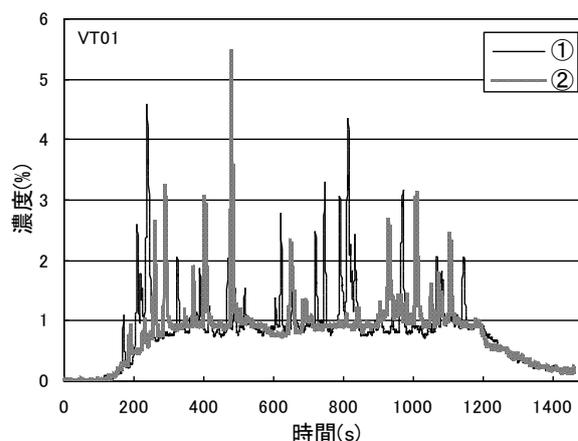


図10 VT01 センサの水素濃度経時変化の比較

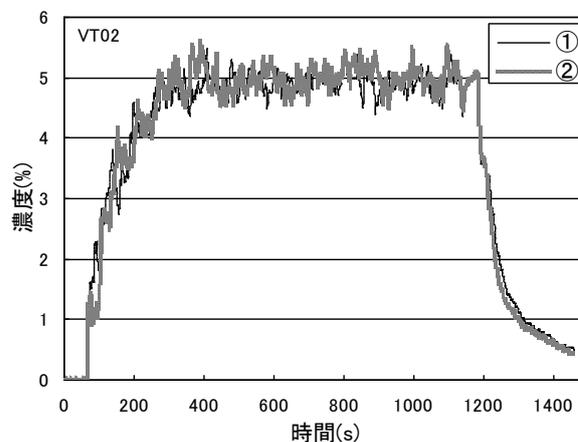


図11 VT02 センサの水素濃度経時変化の比較

VT02 センサは Hydrogen inlet の直上、かつ天井から21cm下に位置する。いずれの場合も300秒程度経過した後は、濃度はほぼ5%を中心に0.5%程度の変動を示し、これ以上高くない。すなわち、定常に達したものと考えられる。Hydrogen inlet から1.01m上昇しただけで水素濃度が100%から5%まで大きく低下している。また、濃度の変動には10秒以内の周期を示すものがあり、先に

述べたセンサの応答時間を考慮すると変動の大きさは0.5%より大きいものと推測される。水素の流入を停止した後、濃度はすぐには低下せず、供給停止から50秒程度後に急に低下し始める。

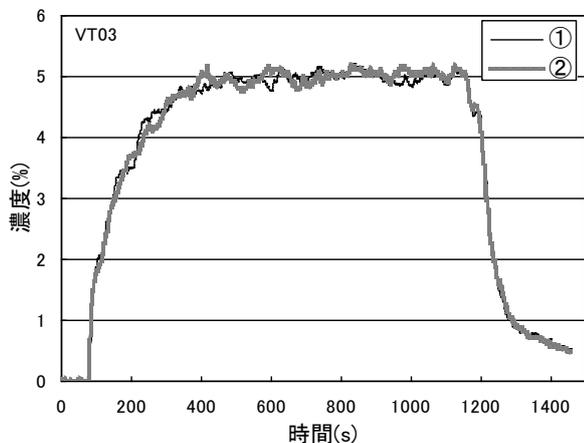


図 1 2 VT03 センサの水素濃度経時変化の比較

VT03 センサはRoof vent の横で、かつ天井から21cm下に位置する。このとき①および②はほぼ同じ傾向を示し、濃度はVT02と同じくほぼ5%で定常に達したものと考えられる。しかし、変動の大きさは小さい。水素の流入を停止した後、濃度はすぐには低下しないのはVT02の場合と類似である。比較的緩やかに低下するので判定は難しいが、供給停止から10から30秒後程度から低下し始める。また、どの場合にも最高値から1%程度低下した後一度下げ止まり、再び低下を始める。この現象は月川[9]らによるコンピュータ・シミュレーション結果でも現れており、モデル内部の水素の流れが単純でないことを意味していると思われる。

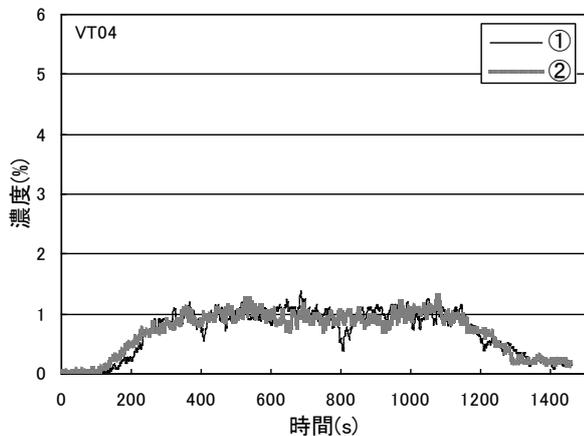


図 1 3 VT04 センサの水素濃度経時変化の比較

VT04 センサはDoor vent の近くの、床面から15cmの高さに設置されたセンサである。全ての場合で濃度はほぼ1%を示し、変動は小さい。

以上のことから本実験の再現性は良好であり、得られた値は信頼できるといえる。なお、VT01は流入部のすぐそばにあるため、ベースラインの再現性は十分であるが、変動が大きく、他の実験やコンピュータ・シミュレーション結果などとの比較には注意が必要である。

#### 4. 4 モデル内水素濃度分布

上記の結果より再現性は良好なので、ここでは①の実験結果を例として考察する。①の条件におけるモデル内各箇所濃度をまとめて図1 4および図1 5に示す。VT01とVT04、VC03とVC05は床面から15cmの高さにあり濃度はほぼ1%を示している。その他は天井面あるいはそこから20cm程度下に位置する。これらはほぼ5~6%程度の濃度を示す。VC04とVC08は天井にあり位置がもっとも高いが、これは水素の供給を停止した場合に最後まで最も高濃度を示す。Hydrogen inlet の上方にあるVC08は濃度変動が大きい。また、水素供給停止後直ちに濃度が一旦下降する。このとき出口に近いVC04が最後まで最も濃度が高い。このような結果から水素濃度には高さが最も大きな要因であることがわかる。しかし、水素が流動しているときには天井から20cm程度は同じ程度の濃度を示している。

VC08、VC06、VC04はこの順番でHydrogen inlet から天井のRoof vent に向けて、天井に並んでいる。これらの濃度上昇の順番も全くこの通りに同じような時間間隔となっており、水素はこの方向に流れていると考えられる。また、VC04は最も離れているので上昇開始時期は最も遅いが、一時的ではあるがVC06よりも早く高濃度を示す。水素の流入部から遠い箇所のセンサのほうが早く濃度が上昇するのはVT02とVT03でも同じ現象があり、やはり一時的であるが流出の初期においてVT03の濃度が一時的にVT02より大きくなる。このことからセンサの警報レベルによっては、かならずしも漏洩源に近いセンサが早く警報を発するとは限らないことになる。

定常状態に達すると、必ずしも位置が高い場所の濃度が高いとは限らない。20cm程度の高さの差では、水素と空気の混合、また、下からの水素の流れとこれにより誘起される空気の流れがどのセンサにあたるかなども観測値に影響する。このように天井付近では高さの差、水平

方向の位置、さらに流れや混合状況などの影響で濃度に差が現れる。

毎分 57 リットルの割合で水素が供給され、これが本モデルから流出しなかったとするとモデル内の平均濃度は 5 分後 (図 1 4 では 360 秒) には 11% 程度となるはずである。しかし、実際の濃度は上部で 5%、下部で 1% であり、平均としては 3% 程度と推測される。これ以降はほぼ定常状態なので、供給される水素量に相当する水素が排出されている。Roof vent の面積は天井面積に比べるとわずか 2% であるが、相当量の水素を含む気流を排出している。これはもちろん Roof vent のみの効果ではなく、Door vent から空気が入り、Roof vent から出るという効果的な空気の流れが形成されているからである。この開放部の位置と内部の濃度との関係については CFD によるシミュレーションが松浦ら [10] により行われている。

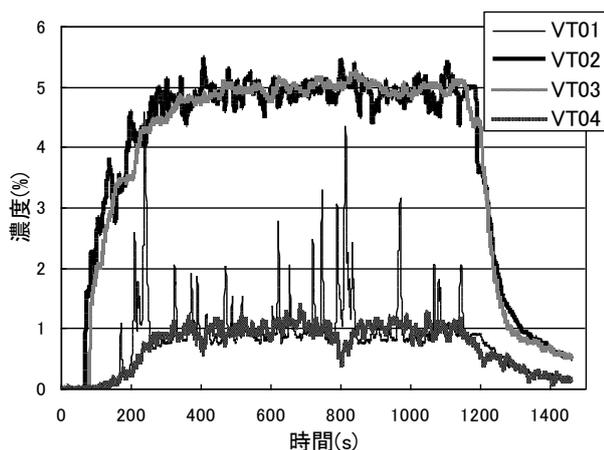


図 1 4 水素濃度経時変化、VT01 から VT04

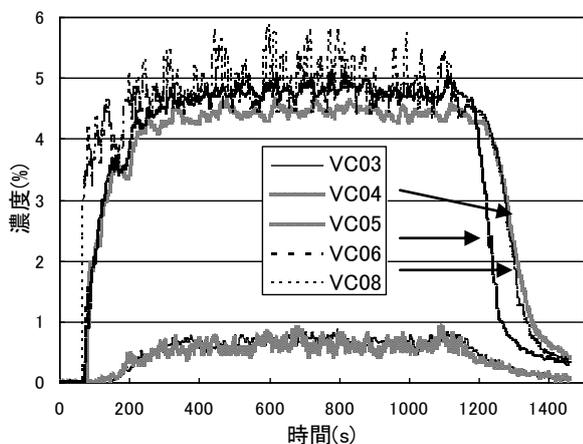


図 1 5 水素濃度経時変化、VC03 から VC08

#### 4. 5 ヘリウムを供給した場合の濃度分布

図 1 6 は供給するガスを水素からヘリウムに変えたこと以外は、先の図 1 4 の場合と全く同じ条件の場合の濃度変化を示している。同図と水素の場合の図 1 4 を比較すると、傾向はよく似ていることが分かる。全体的な濃度変化のみならず、VT01 で突発的な濃度上昇が見られること、VT03 は濃度が低下する場合に一度下げ止まることなども同じである。

一方、ヘリウムにおいては、上部のセンサ、つまり VT02 と VT03 において 5% 弱まで濃度が上がり、VT01 と VT04 においては 1% 強まで上がっている。それに対して水素では、VT02 と VT03 で 5% 強まで上がり、VT01 と VT04 では 1% 弱までしか上がらない。よって水素はヘリウムより、模型の上部に分布しやすく、下部には分布しにくいということが分かる。これは水素の密度がヘリウムの密度に比べ小さいということと整合する。このように水素の代わりにヘリウムを用いても同じような傾向の結果が得られる。これは空気との密度の差という意味では水素とヘリウムの差が小さいためと考えられる。しかし、全く同じではなく、密度の差の影響は明らかに見られる。この点に注意すれば、さほど精度を要求しないのであればヘリウムによる代替実験も意味があると考えられる。

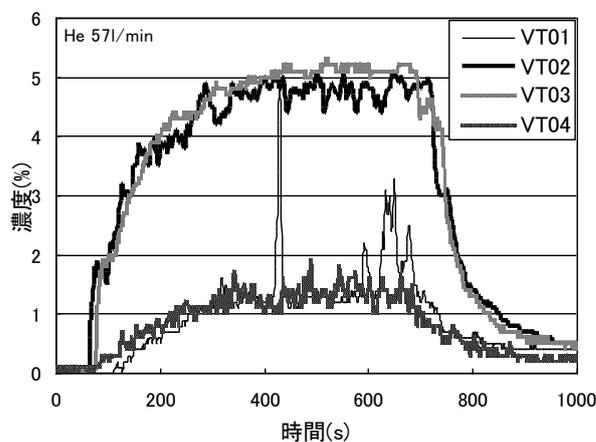


図 1 6 ヘリウム濃度経時変化

#### 4. 6 モデルが傾斜している場合

天井の傾斜が水素拡散挙動にどう影響を及ぼすのかを考察するために、モデルを傾けて実験を行った。Roof vent 側が上がっている場合の角度  $\theta$  を正、下がっている場合を負とし、 $\theta = 0^\circ, \pm 2.5^\circ, +5.0^\circ$  の場合の濃度変化を測定した。水素流量は 57L/min で固定した。測定開始 1 分後から 10 分間水素を流入させた。各傾斜角にお

ける濃度変化を図17から19に示す。また、全センサの測定を行っているがここでは代表点を用いて説明する。

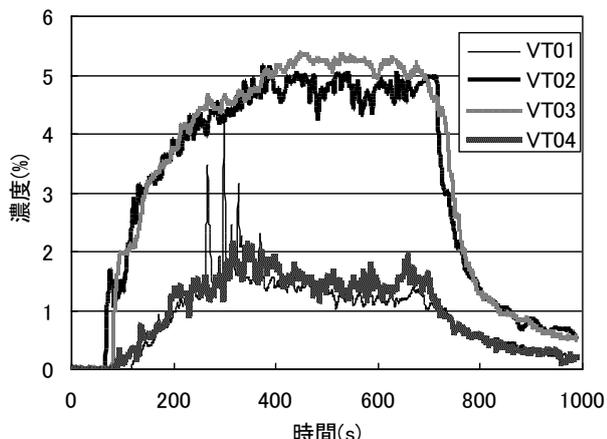


図17  $\theta=+2.5^\circ$  の時の水素濃度経時変化

図17に示す $\theta=+2.5^\circ$ の場合を水平の場合と比較すると、天井付近の平衡濃度は5%程度でほとんど同じであるが $0^\circ$ の場合よりやや低い。また、平衡になるまでの時間が遅い。一方、低位置においては平衡濃度が0.8%~2.2%と $0^\circ$ の場合より高くなっている。すなわち、Roof vent側を高くすると天井付近の水素濃度がやや低くなる一方で低位置においては逆に高くなる。模型内の水素濃度差が小さい状態となることがわかった。これは傾斜があることで水素の浮力による流れが大きく、内部の流動が大きいためと考えられる。

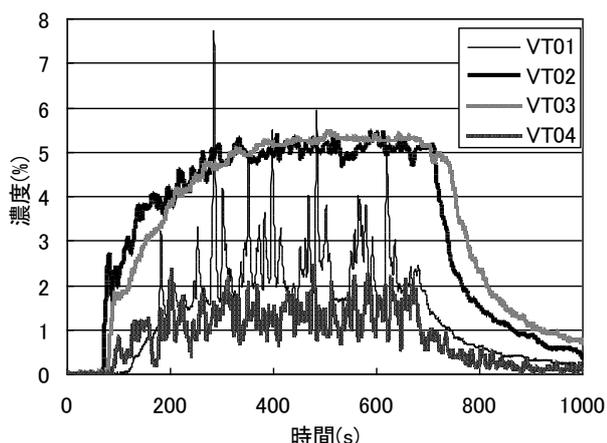


図18  $\theta=+5.0^\circ$  の時の水素濃度経時変化

図18に示すように $\theta=+5^\circ$ と傾斜をより大きくした場合でも、天井部の平衡時の平均的な濃度は $\theta=+2.5^\circ$ の場合とあまり変わらないが、 $\theta=+5.0^\circ$ の方が

各センサの濃度データが不安定である。VT01の濃度変化を見ると一時的に水素が8%弱まで上昇する。

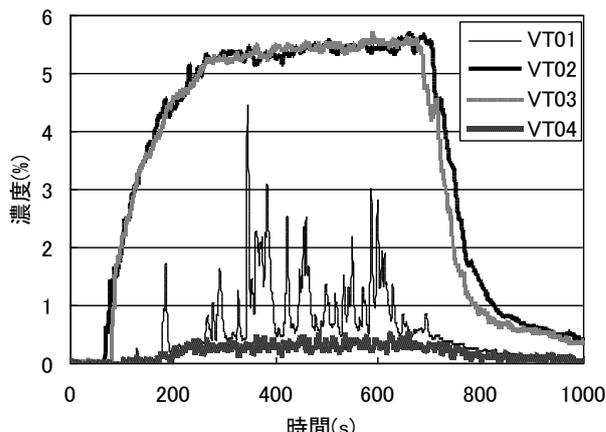


図19  $\theta=-2.5^\circ$  の時の水素濃度経時変化

図19に示す $\theta=-2.5^\circ$ の場合を水平の場合と比較すると、天井付近の平衡濃度が5.0%~6.5%と水平の場合(4.5%~6.5%)より若干高いが、低位置においては平衡濃度が0.4%程度と水平の場合(0.5%~1.3%)より低くなっている。よって、Roof vent側を低くすると天井付近の水素濃度が高くなる一方で低位置においては逆に低くなる、すなわち模型内の水素がより混合されていない状態となることが言える。

#### 4. 7 Roof vent 付近のガイド板の影響

モデルが水平の場合において、Roof vent 付近に設置したガイド板が水素の挙動に与える影響を調べた。縦10cm、横25cmの板(ガイド壁)を図20のように設置した。

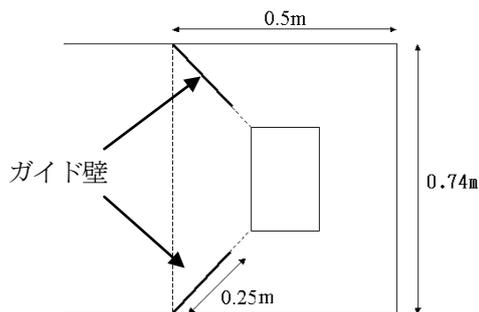


図20 モデルのRoof vent 部付近を上方から見た場合のガイド壁の位置。Hydrogen inletは左側。

ガイド壁を設置した場合の水素濃度変化を図21に示す。ガイド壁を設置しない場合と比較すると天井付近の濃度がより高く、低位置の濃度がより低くなる傾向にある。

すなわち水素が空気とより混合しなくなっている。さらに、流入口に近いVT01は濃度が安定せず一時的に7%を超えている。ガイドの設置は水素を含んだ空気をできるだけ早く外部へ排出しようとの意図であったが、かえって天井部の水素濃度が上昇した。他方、床面の濃度は減少した。このことは水素が床面に拡散している原因のひとつが、天井を流れる気流が、供給部と反対の壁に衝突するとともに、壁に沿って下向きに流れることであることを示唆する。これがガイドで邪魔されて速度が遅くなり、下向きへの流れが阻害されていると思われる。

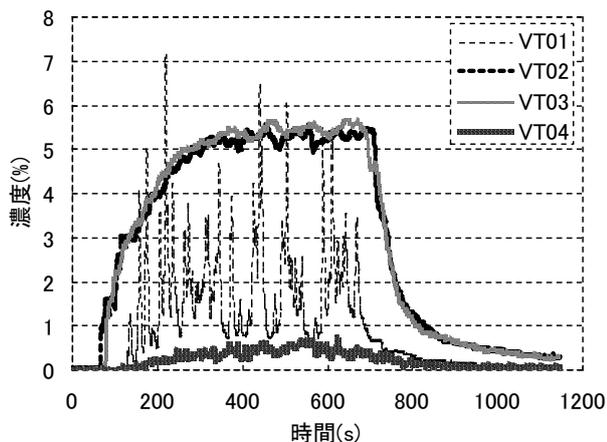


図 2 1 ガイド壁を設置した場合の水素濃度経時変化

#### 4. 8 垂直および水平方向の濃度分布

本モデルにおける水素の流れを解明するためには、多くの測点の水素濃度が必要である。しかし、センサとケーブルの大きさは有限であり、これらの数が多いほど流れが乱され正確な測定ができない。そこで、流れが定常に達したと考えられる時点で、内部でセンサを移動し、垂直及び水平方向の連続的な濃度分布を測定した。実験では実際に水素を使用しており、内部は可燃限界以上の領域があるので、万一の場合に備え測定は遠隔で自動的に行えるようにした。このためセンサの移動は電動スライダを使用した。本スライダは予め設定された動きを実行する。測定は3測線で行い、図2-2にその場所を示す。

測線1、すなわち、モデル天井の中央部、座標値 X=145(cm)、Y=37(cm)を通る垂直線に沿って、5cm 間隔で濃度を測定した結果を図2-3に示す。各測点においてセンサを10秒間停止しながら3周期分のデータを取るよう設定した。測定の結果から1回目の測定はまだ定常状態ではないと判断されたので、同図は2、3回目の測定の平均値を示している。また、使用したスライダは移動

距離が700mmなので2つのセンサで全体の高さをカバーした。つなぎの部分の2つのセンサの濃度差は0.1%程度である。

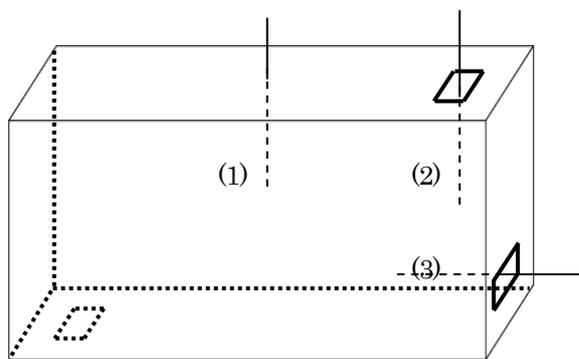


図 2 2 濃度分布測定箇所

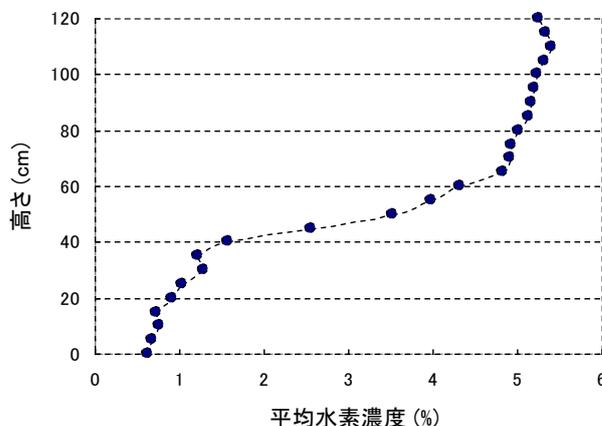


図 2 3 モデル中央部の垂直方向の濃度分布

濃度は天井付近で最も高く、上部の20cm程度はほぼ5.2%程度でありあまり変わらないが、天井から10cmの位置で最大値を示した。天井より10cm程度で最大値を示すということは、異なる時期に行った実験でも同様である。なおこの現象は本モデルより広い天井だけの模型で行った場合では見られず、周囲の壁や供給部、開口部の位置の影響が大きいと考えられる。

濃度は高さ70cm程度までは緩やかに減少し5%程度になる。ここから急激に濃度が1.5%程度まで低下するので、この部分になんらかの流れの境界があると考えられる。これ以下は濃度が0.6%程度まで緩やかに低下する。

測線2、すなわちRoof vent 付近の垂直方向の濃度分布は測線1のモデル天井中央部の測定結果と類似しているのでここでは図は省略する。天井より10cm程度下で最大値があり、70cm程度までは緩やかに濃度が低下する。しかし、その程度はより緩やかで100cmから70cmの範囲

はほぼ一定とみなすこともできる。これは水素を含んだ水素の流れが天井を水平に流れてきて、天井の開口部から排出されないものは壁にぶつかって下向きに流れるためと考えられる。

測線 3、すなわち、Door vent の中央部、座標値 X=290 (cm)、Y=37 (cm) を通る X 方向の水平線に沿って、濃度を測定した結果を図 2 4 に示す。Door vent 付近では全体的に低濃度である。Door vent に近い位置 (X=286cm、281cm) は外気に近いため濃度が低いと予想されたが、実際には高く、これは天井から壁伝いに降りてくる水素の影響のためと思われる。

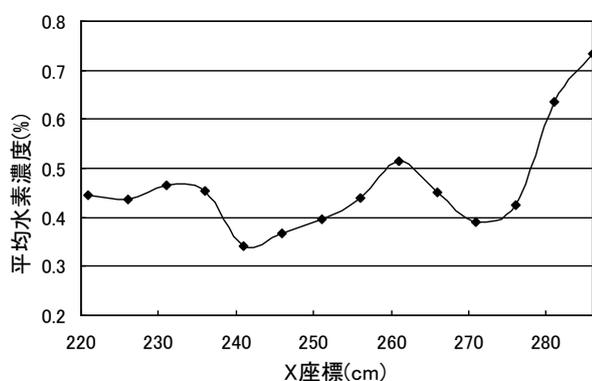


図 2 4 Door vent 付近の X 方向の濃度分布

#### 4. 9 Door vent 部の風速

Door vent 中央の風速を測定した。測定には 3 次元超音波風速計を使用した。開口面に垂直方向の速度を、図 2 5 に示す。全体的に風速が細かく変動している。水素の流入開始が 60s であり、その後、モデルの外から内部へ向かう方向への風速が増加している。770s で水素の流入を停止しており、風速が元の状態に戻っている。このような挙動を示すのは、Roof vent から水素を含んだ空気が排出され、モデル内の収支バランスをとるために Door vent からは逆に空気が流入するためである。定常状態と考えられる期間の平均流入風速は 0.34m/s であった。

Y 方向及び Z 方向も同様に風速変化を測定したが、0 を中心とする、同図の 0s~60s までと同じような細かい変動を示した。

以上の結果を総合すると、本モデル内の気流はおおよそ図 2 6 のようであると考えられる。ここで、点線矢印は水素をあまり含まない、モデル外部からの空気、実線矢印は水素を含む空気の流れである。コンピュータ・シミュレーションによっても同様な流れが推定されている [10]。

ユレーションによっても同様な流れが推定されている [10]。

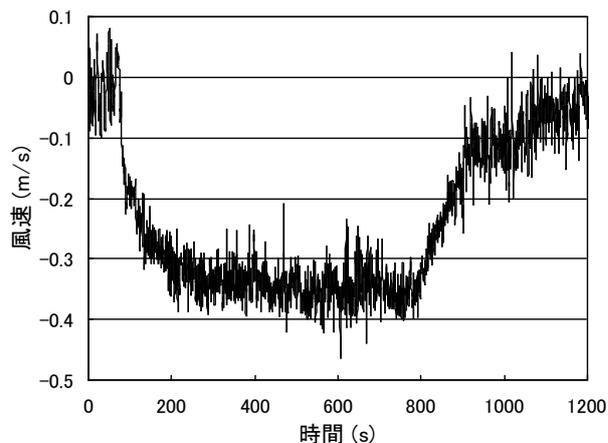


図 2 5 X 方向の風速変化

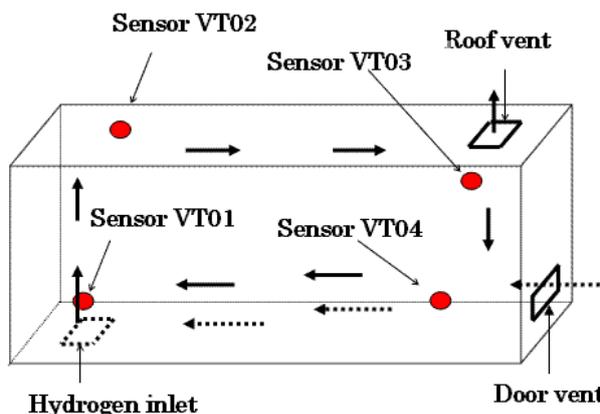


図 2 6 モデル内の気流の推定

#### 5. まとめ

水素は軽く拡散係数が大きいので、漏洩してもすぐに上昇し拡散するので、さほど危険ではないと思われる。しかしながら、水素を実際に漏洩させると、上昇の過程で、水素は周囲の空気と混合し濃度が低下し、浮力は低下する。例えば、水素濃度 20% の場合の空気に対する比重は約 0.8 であり、この値は都市ガスの主成分であるメタンの比重よりかなり大きい。可燃限界の下限である 4% では同比重はほぼ 0.96 であり、水素だからといって特に、浮力による拡散が卓越的に起こると思われる。

本研究では換気に制限がある部分開放空間に、水素が漏洩した場合の水素の拡散挙動について実際に水素を用

いて実験を行った。再現性は良好である。この結果、床面から漏洩した水素の基本的な拡散挙動がある程度解明された。測定個所によっては測定値の変動が小さい場所もあれば、安定しない個所があることがわかった。

実験においては、CFD では容易に実現できる「完全に水平な天井」の設定が必ずしも容易ではない。本実験でも天井の傾斜の誤差やたわみが測定結果に無視できない影響を及ぼすことが懸念された。この検討も兼ねて、天井に傾斜やガイド板がある場合に、どの程度濃度分布が変化するかについて調べた。

本モデルは水素の自然対流が拡散を支配するおもな要因である。水素が漏洩する状況はこれ以外にも多くのものが考えられるので、他の要因が大きい場合についても検討する必要がある。現在も水素拡散の研究にCFD が多用されているが、用いている手法の改良に本実験結果が役立てば幸いである。

## 謝辞

本研究の一部は福岡水素エネルギー戦略会議の支援で行われた。ここに記して謝意を表したい。

## 参考文献

- [1]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、p179
- [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]NASA Glenn Safety Manual、CHAPTER 6 - HYDROGEN
- [4]佐藤保和、安全に関わる水素の性質、安全工学、Vol. 44, No. 6(2005)、378-385
- [5]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.
- [6]例えば、高木英夫、北原良哉、坑道気流中におけるガスの流動拡散、安全工学、Vol. 18, No. 5(1979)、252-259
- [7]K. OKA Japan Society for Safety Engineering, Vol. 44, No. 6(2006)
- [8]A. Furukawa, T. Setoguchi and H. Hayashi, Fluid dynamics, Asakura Shoten, 1999
- [9]月川久義、金山寛、松浦一雄、井上雅弘、部分開放空間に漏洩する水素の自然換気状態における非定常濃度変動の評価に関する検討、水素エネルギーシステム、(掲載決定)
- [10]K. MATSUURA, H. KANAYAMA, H. TSUKIKAWA and M. INOUE, Numerical Simulation of Leaking Hydrogen Dispersion

Behavior in a Partially Open Space, Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, Issue 1, January 2008, 240-247