

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

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 福岡県福岡市西区元岡 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 機械工学部門

****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 Duct and under a Ceiling.

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

and Kazuo MATSUURA****

*Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University

744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

**Saibu Gas Co., Ltd.

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

***Department of Mechanical Engineering, Kyushu University

****Center for Turbulence Research, Stanford University

Stanford, CA 94305, USA

Experimental studies using models to know the behavior of the diffusion of hydrogen in a duct and under a ceiling were carried out. Two different models were used for the experiments. One of the models was a duct 5m in length with square cross-section 0.2m in one side. The duct was ventilated by a fan set on the end of the duct and the air speed was changed from 0.2 to 2.0m/s. Hydrogen was supplied from its ceiling with the flow rate from 5 to 15L/min. It was found that the diffusion of hydrogen in the ventilated air strongly depends on the air speed. In addition, hydrogen moved not only downwind direction but also upwind direction when the air speed was slow.

Another model was an octagonal plate about 2 m diagonal length to simulate a ceiling of a room to know the optimum location of hydrogen sensors in a room. The hydrogen concentrations immediately under the ceiling were considerably higher than that of 8cm under the ceiling when the distance between the ceiling and the outlet of hydrogen is small. It is preferable to set a hydrogen sensor as near as possible to the ceiling from the results of the experiment.

Key words:Hydrogen Dispersion, Duct, Ceiling, Sensor location, Safety

2009年1月26日受理

1. はじめに

筆者らは、水素の浮力による自然対流が卓越する場として、強制換気のない室内における漏洩水素の拡散についての検討結果を報告[1][2]した。トンネルや建物内ではファンによる強制換気が行われていることが多い。強制換気が卓越する場合には、水素は自然対流が卓越する場とは異なる拡散挙動を示すと考えられる。このため、本研究では、強制換気の基本的な場合としてダクトあるいは通路内で水素が漏洩した場合の挙動について検討し、風速、水素漏洩量、漏洩箇所からの距離、ダクトの傾斜などと水素濃度の関係を調べた。これらの結果はトンネルやダクト内に水素が漏洩しても、安全な環境を維持できる気流速度の設定や水素センサの設置位置の検討に役立てることができる。

水素センサの反応がどんなに早くても、接触型のセンサでは水素がセンサに接触しなければ水素の検知はできない。ある水素研究施設のヒヤリハット情報[3]では、水素漏洩事象の多くは、固定型の水素センサより先に、巡回員による携帯型の検知器で発見されている。この原因の一つはセンサの設置場所の問題と考えられ、漏洩水素をより早く検知できる、センサの最適な配置の検討が必要である。センサの合理的で経済的な配置を検討する上で、漏洩箇所から上昇し、天井下で拡がる流れは基本的であるが、可能性の高い状況であり重要である。既報[1][2]で検討した Hallway model(部分開放空間)では、自然対流が卓越している点は同じであるが、水素の流れは周囲の壁の影響を強く受けており、天井のみの空間での流れとは異なるものである。この流れは、また、他の室内や通路での漏洩箇所付近における水素挙動の基本でもある。このため、1カ所から漏洩し、垂直に上昇した後、天井下面に沿って拡がる水素の時間的・距離的变化に関する実験も行った。これらの結果について報告する。

2. ダクト内水素拡散実験

図1に示すような気流がある通路あるいはダクト内で、空気より軽い可燃性ガスが漏洩した場合を考える。その漏洩箇所が通路床面付近の中央であると、そのガスは短時間、短距離で気流と一様に混合し、爆発下限以下になることが報告されている[4]。ガスの漏洩箇所が通路の壁面に近く、ガスが壁面に沿って上昇するような場合に

は、ガスと気流の混合は遅くなる。最も混合が遅いのは天井付近でガスが漏洩した場合である。

水素が天井付近で漏洩するような状況は、天井付近の水素配管の破損、トレーラに積載された燃料電池車からの漏洩などが考えられ、通路に面する箇所水素が漏洩し、ここから水素が通路に流出する場合にも類似の状況になると考えられる。このような場合が水素と気流の混合が最も遅く、可燃濃度範囲の水素・空気混合層が通路の天井に沿って広がり、危険な状態となると考えられる。そこで、本研究ではダクトの天井付近で水素が漏洩した場合の水素拡散挙動を検討した。なお、本実験ではダクトを使用しているため、以後このような空間をダクトという呼び方で統一する。

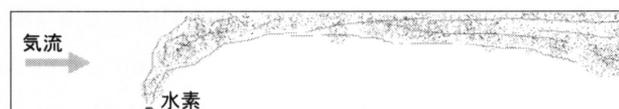


図1 気流がある通路内での水素拡散の模式図

2. 1 流れの可視化

本実験ではダクトの天井近傍で漏洩した水素がどのように拡散するかを知るために、シュリーレン法による流れの可視化を行った。このため、一辺が20cmの正方形断面をもつ長さ2mのダクト模型を作成した。左右の壁面は可視化が可能ないように透明なガラス製である。気流はファンから整流装置を通してダクトへ吹き込んでおり、ガスの流入部はダクト入り口から150cm風下の天井位置にある。ガスの流入部はダクトと同じ幅で、隙間が1cmのスリットであり、流量が一樣になるようにスポンジを挿入している。ガス流入量はマスフローメータにより調整し、9L/minとした。これをスリットの断面積で割った平均吹き出し流速は7.5cm/sである。なお、本実験は室内で行ったので、安全のために水素ではなくヘリウムを用いている。多少の差はあるものの、拡散の傾向を知るためには水素の代わりにヘリウムが利用できることは確認している[2]。

図2はダクトに天井からヘリウムが流入した場合の流れの様子である。なお、シュリーレン装置の撮影範囲の制約から、同じ条件の流れを、2回に分けて撮影している。右側の画像はガスが上から流入している部分であり、左側の画像の中心は流入部から20cm風下である。

同図の上の画像は風速が0.9m/sの場合で、下の画像

は0.18m/sと遅い場合である。いずれも天井のすぐ下にヘリウムの流れが見られる。ヘリウムは密度が小さく、下向きに流入しているガスの慣性の効果がほとんど見られない。シュリーレン法では密度差の大きい部分が可視化され、ガスと空気が完全に混合して密度差がなくなると可視化像は得られない。供給箇所より30cm程度風下では、画像が薄くなっており混合が進んでいることがわかる。

下の画像のように、風速が遅い場合、ヘリウムは風上側にも流れている、すなわち逆流していることがわかる。この現象は火災時の高温の火災ガスの流れでも見られる[5]。

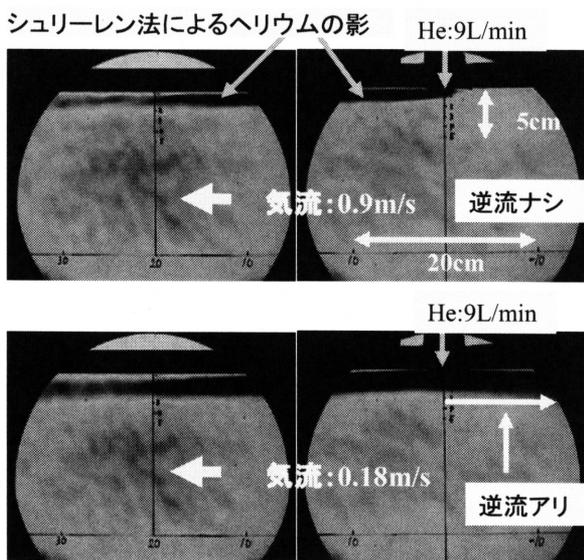


図2 シュリーレン法による流れの可視化画像

2.2 水素拡散実験装置

図3に示す装置を用いてダクト内の水素拡散について実験した。実験装置は長さ5m、一辺が20cmの正方形ダクト、ファン、水素供給部、水素供給装置、水素センサシステム、風速計で構成されている。水素供給装置、水素センサシステム、風速計は既報[2]の実験に用いたものと同じである。手前側にファンがあり、センサは天井中央に一列に並んでいる。通気風速はダクトの出口から10cm奥のダクト断面中央で測定した。

模型内に一様に水素が流入するように、水素流入口の上方に内径が幅20cm、長さ3cm、高さ10cmの小箱(水素供給部)を設け、ここに一旦水素を供給し、ここからスポンジを通してダクトに水素を供給するようにした。センサ位置の基点は水素流入口の位置で、ダクト入り口

から150cmである。本実験では水素濃度(体積分率)は20%以上になる場合があり、着火すると危険である。このため、ファンは吹き込み方式とした。ファンによる気流の乱れを少なくするために、整流装置としてファンの直後に粗いスポンジとハニカムを設置した。

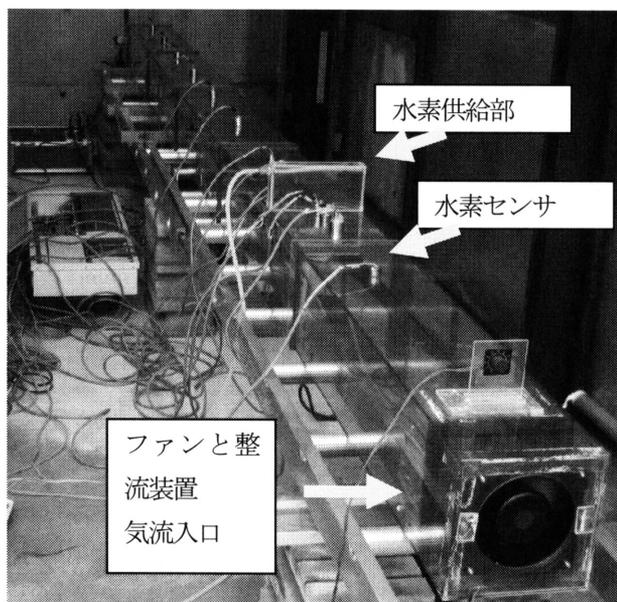


図3 ダクト内水素拡散実験装置の写真

表1 ダクト模型におけるセンサ位置

水素流入口からの距離(cm)	センサ
-50	VT03
-20	VT05
-10	VT02
-5	VC09
5	VT(100%)
10	VC08
20	VC07
50	VT01
100	VC06
150	VC05
200	VC04
250	VC03
300	VC02
350	VC01

ダクト内水素濃度は天井面での値を測定することとした。これは2.1の流れの可視化の結果からわかるように、天井から供給された軽いガスは、主に天井に沿って

流れるからである。そこで、図3に示すように、ダクトの天井中央、坑道軸に沿って、センサをはめ込むための穴を開け、ここからセンサを設置した。このときセンサの焼結合金の部分が10mm天井面からダクト内に出る。センサ位置を表1に示す。また、同表のVTは熱伝導率式、VCは接触燃焼式のセンサであることを意味する。

本実験でも全センサについて測定日毎に実験の前後でセンサの校正を行った。その方法は既報[2]と同様であり、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し、これにセンサを設置した後密閉する。シリンジで同密閉容器に規定量の水素を注入して目的の水素濃度を作成し、センサ精度の確認を行った。水素供給部から5cm風下では、ほとんどの条件で水素濃度は10%を超えられたので、100%まで測定可能なセンサを用いたが、それ以外は精度を重視して、FS10%用のセンサを用いた。このため、条件によっては測定の指示値が10%で飽和するので、データの解釈に注意が必要である。また、特に高濃度の場合に、風下10cm、20cmでは風下50cmよりも低い濃度が記録されることがあったが、これは接触燃焼式センサが酸素濃度が低いと正常に機能しないためと考えられる。本センサのメーカーによる測定保証範囲は10%までである。この点についても注意が必要である。

2.3 ダクト内風速分布

ダクト内の風速分布は水素の拡散に影響を与え、CFDなどによる解析においても風速条件として必要なので、ダクト出口より10cm内側に設置した超音波風速計で2m/sの場合の、ダクト内風速分布を求めた。なお、ダクト内風速分布は水平ダクトを対象に測定した。測定は水素流入口を基準として50cm風上、50cm風下、350cm風下の3箇所である。これらの箇所を断面中央の鉛直軸に沿い、1cm間隔で測定した。測点1つあたり30秒間ずつ風速を測定し平均した。また、50cm風下では水平方向にも測定した。これらの結果を図4に示す。垂直方向の風速分布は床面が0cm、天井が20cmで、水平方向は風下に向かって左側が0cm、右が20cmである。風速測定には日本カノマックス社の熱線式の風速変換器MODEL6332Dと風速プローブMODEL0962-00を使用した。本風速計の仕様によれば精度は \pm (指示値の3%+0.1)m/sである。

同図の白丸は50cm風上における風速分布を示す。この風速分布は中央が周囲よりやや遅いことがわかる。この理由は、ファンは図3のように中央は空気が流れない構造であるためと考えられる。ファンの後方に整流装置を取り付けているが、ファンの後方80cmではまだこの影響が残っている。白三角は50cm風下を示すが、風速の偏りがなくなりつつある。白四角の350cm風下では中央の風速が大きい。また、水平の風速分布は風下に向かって左下の風速が早い。

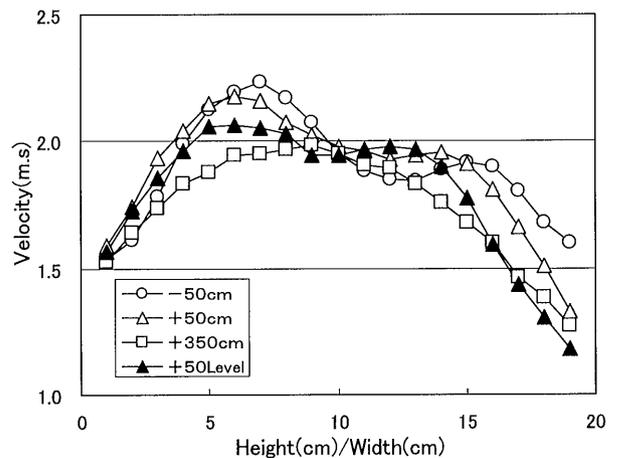


図4 ダクト内風速分布の測定結果

2.4 水素濃度測定結果 (ダクトが水平な場合)

本実験では水素の流入量と気流の風速の2つを変化させて各条件における天井部の水素濃度を測定した。水素流入量は5、10 および 15L/min の3種類、風速は0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.5 および 2.0m/s の7種類である。ただし、風速はダクト出口より10cm内側に設置した超音波風速計による風速であり、水素流入量が15L/minで低風速の場合は内部の水素濃度がかなり高くなり危険なので、実験していない。なお、本文では風速という場合には気流の速度を意味する。ダクトの水力直径は0.2mであり、ダクト内の気体の動粘性係数として空気と水素の量の加重平均による値を用いれば、水素流入量が15L/min、風速1m/sにおけるレイノルズ数は13000程度である。また、条件により水素濃度が高い部分(10%)が存在するとして、同様に気体の動粘性係数を求め、レイノルズ数を計算すると8300程度である。従って、ダクト内はファンによる気流の乱れもあり、いずれの風速においても乱流である。

図5および図6に水素流入量が5および15L/minの場

合の、風速をパラメータとした水素濃度の距離変化を示す。なお、図を見やすくするためにいくつかの風速における測定結果は省略している。一般に水素流入口付近(距離が0)で濃度が高く、開放端に向かうにつれて徐々に濃度が低くなっている。また、風速が大きいほど濃度は低い。なお同図では距離5cmの位置のセンサ(FS100%)を除き、センサの測定範囲が0~10%程度であるので、これ以上の部分は示していない。

図5の白丸のグラフで示すように風速が0.2m/sと遅い場合、風上側(距離のマイナス側)でも水素が観測され、風上側に逆流していることがわかる。この逆流は先のシュリーレン法による流れの可視化でも示されている。また、図6の白四角、黒丸のグラフを見ると、風上側で水素が観測され、やはり水素が風上側に逆流していることがわかる。

このような逆流が起こる風速は水素流入量と風速に依存し、風上20cmまで逆流するのは、流入量15L/minでは風速0.8m/s以下、流入量10L/minでは風速0.4m/s以下、流入量5L/minでは風速0.2m/s以下である。逆流があると水素が流入箇所よりも風上に移動し、予期せぬ範囲にまで水素が拡散する可能性がある。

水素の燃焼・爆発を防止するためには水素濃度を4%以下に希釈できる量の空気を供給することが必要であることは言うまでもない。しかし、これは最低限の条件である。図5および図6の条件はいずれの風速でも水素濃度を4%以下に希釈できる十分な風量がある。しかし、これらの図からダクト内に4%以上の領域が存在することは明らかである。すなわち、空気の量が十分でも、水素と空気が十分混合しなければ、濃度が4%以上の危険

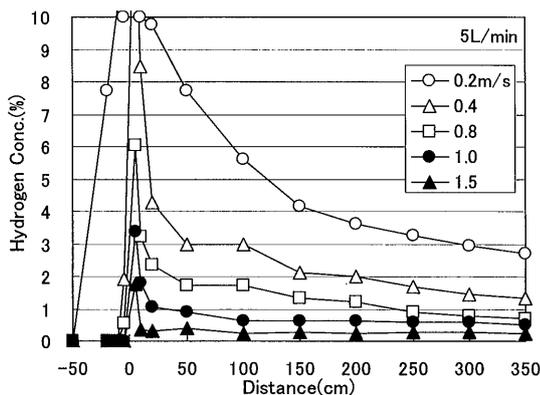


図5 各風速における水素濃度の距離変化 (水素流入量は5L/min)

な領域が存在する。この意味で水素と空気の迅速な混合が重要である。この混合は風速により大きく左右される。

ここで、ダクト内を流れる水素と空気が完全に混合した場合の、最終的な水素濃度を完全混合水素濃度とよぶことにする。例えば、水素流入量が15L/min、風速が1.5m/sであれば完全混合水素濃度は0.4%程度である。図6で、風速が1.5m/s以上では、風下10cmの部分から濃度が低く完全混合水素濃度0.4%程度に近い。すなわち、ダクト内の水素と空気の混合が良好である。しかし風速が1m/s以下になると、風速の低下割合以上に濃度が上昇し、風下100cm以上まで4%以上の濃度範囲が広がっている。これは完全混合水素濃度0.6%程度よりかなり高い。従って、この場合は混合が良好でなく、高濃度の水素が天井付近に存在している。

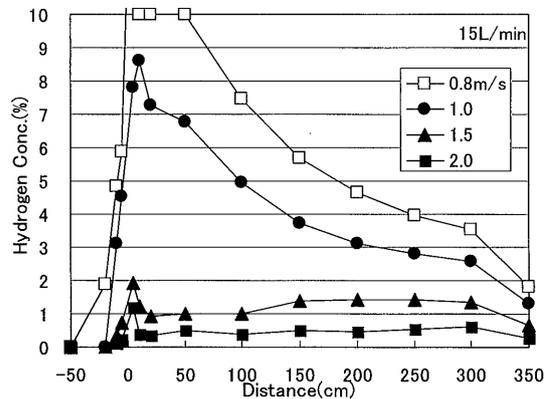


図6 各風速における水素濃度の距離変化 (水素流入量は15L/min)

図7および図8に水素流入量が5および15L/minの場合の、距離をパラメータとした水素濃度と風速の関係を示す。これらの図中の破線は、完全混合水素濃度を示している。

距離が長くなればダクト内水素濃度は完全混合水素濃度になるが、風速が1.5m/sでは、わずか10cm程度からこの完全混合水素濃度に近い値を示している。しかし、風速が1.0m/sでは水素濃度はこの完全混合水素濃度との差が大きい。

ダクトに短距離で完全混合水素濃度を与える風速を供給していれば、水素が漏洩しても着火する危険性は小さいと考えられる。ダクト内の天井付近での軽いガスと空気の混合状態を評価する基準として次のような無次元のレイヤリング数Lが提案され、Lが5以上で混合が良好

とされている[6]。これはフルード数に濃度の修正を付加したと考えられる。

$$L=U/(g \cdot \Delta \rho \cdot Q / (\rho \cdot D))^{1/3}$$

ここで、U：風速、g：重力加速度、 $\Delta \rho$ ：空気とガスの密度差、Q：ガス供給量、 ρ ：空気の密度、D：ダクト幅。

L=5 を与える風速を求めると、水素流入量5 および 15 L/min に対し、それぞれ 0.78 および 1.13m/s となる。図7、8で、水素濃度が大きく低下している風速は、これらの風速に近い。従って、レイヤリング数で混合の良否がある程度評価できると思われる。

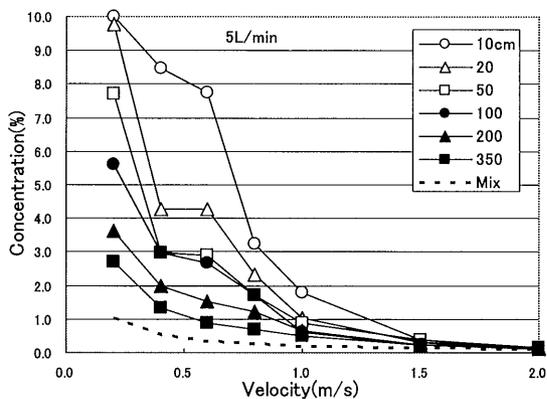


図7 風速とダクト内水素濃度の関係、5L/min

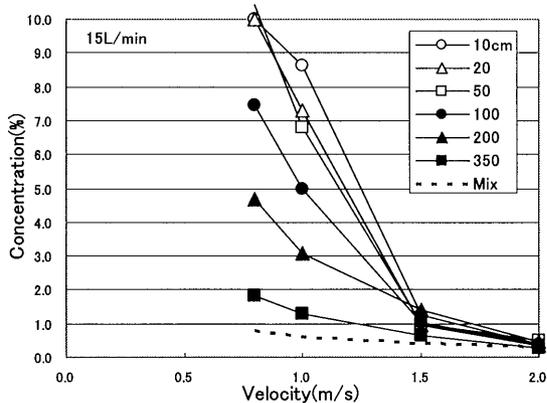


図8 風速とダクト内水素濃度の関係、15L/min

図9は水素を 10L/min で供給してから各測点の濃度が0.1%になるまでの時間を示している。このセンサの応答は 1%程度の濃度を与えた場合に 0.1%の指示を示すまでに 1秒程度を要する。ここで、距離0でも5秒程度要しているのは、水素供給部の容積が 800mL 程度あるので、水素が実際にダクト内に流入するまでに時間を要するためと考えられる。それ以降の時間と距離の関係は

比較的直線的である。これから水素の進行速度を求めると、風速0.2m/sの場合、350cm移動するのに14秒を要しているので、進行速度は約25cm/sとなり、風速より若干速い。しかし、風速が1m/sの場合、350cm移動するのに5秒を要しているので、進行速度は約70cm/sとなり、風速よりやや遅い。このグラフによる水素の進行速度は、風速と必ずしも良い比例関係にあるとは言えないが、同じ風速であれば、水素の進行速度はダクトの中ではほぼ一定である。

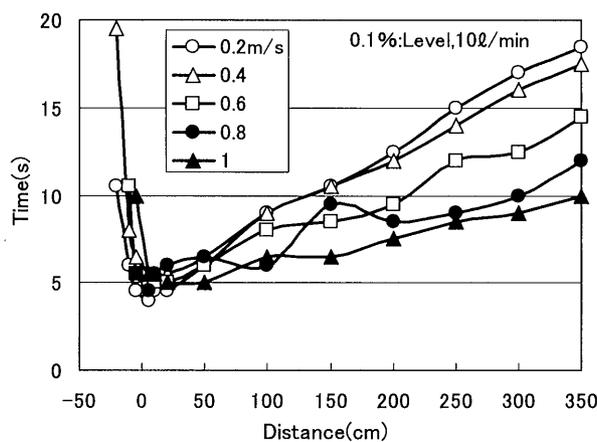


図9 各測点の濃度が0.1%になるまでの時間

2.5 水素濃度測定結果(ダクトが傾斜している場合)

ダクトが傾斜した場合の水素濃度について測定した。図10は風速0.8m/s、水素流入量10L/minの場合で、ダクトが水平、ダクトの風下側が下向きに5度(下り5度)、およびダクトの風下側が上向きに5度(上り5度)の場合の3種類の結果である。水平と上向きの場合では水素濃度あまり変化はない。下向きの流れでは水素の

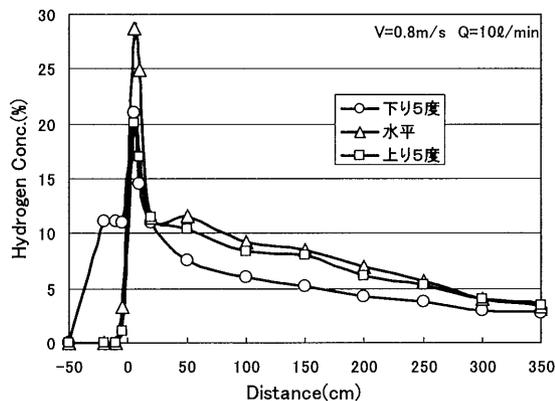


図10 ダクトを傾斜した場合の水素濃度

浮力が風上側に働くので、逆流しやすくなる。このため、風上側で水素濃度が上がり、逆に風下側は濃度が低下している。風速が2m/sの場合の図はここには示さないが、傾斜の影響より風速の影響が大きく、水素と空気は十分混合され、いずれも同じ濃度分布となった。

図11はダクトの風下側が下向きに5度の場合で、水素を10L/minで流入してから各測点の濃度が0.1%になるまでに要する時間を示したものである。水平な場合と同様に、時間と距離の関係は比較的直線である。下向き通気なので、軽いガスは逆流しようとするので水素の進行はやや遅くなっている。

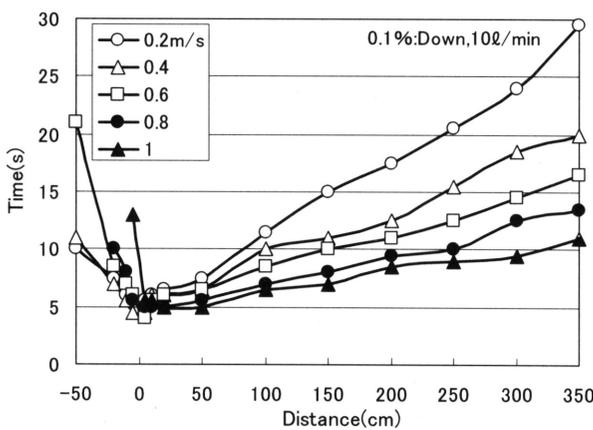


図11 ダクトを下向きに傾斜した場合の各測点の濃度が0.1%になるまでの時間

風速0.2m/sの場合、350cm移動するのに水平なダクトでは13秒であったのに対し、25秒を要している。しかし、風速が1m/sの場合、350cm移動するのに水平では5秒を要していたが、この場合は6秒程度とあまり遅くなっていない。ダクトの風下側が上向きの場合には軽いガスはより風下側に流れようとするが、実験結果は水平の場合とほとんど同じであった。

3. 天井モデルによる水素拡散実験

水平な広い平板の下に、水素の漏洩源がある場合を考える。ここから漏洩した水素は上昇し、やがて平板下面近くで水平方向に向きを変えて放射状に広がる。この流れは単純であるが、水素漏洩の場合の基本である。ここではこれを天井モデルとよぶことにする。この知見により、例えば、最適なセンサの位置、漏洩した水素の可燃範囲を知ることができる。しかしながら、このような流

れについて実際に水素を使用した実験による検討結果はほとんど見られない。このため、図12に示すような水素拡散実験を行った。

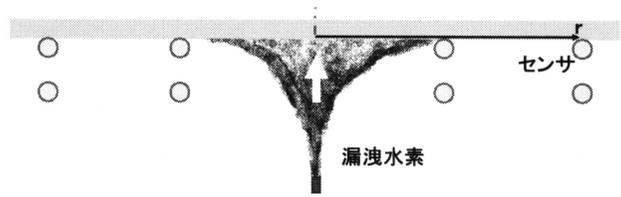


図12 天井付近における水素拡散の概念図

3.1 天井モデルの実験装置

本実験で用いた天井モデルは図13に示すように1辺が1.8mの正方形の板に、三角形の縁を付けたものである。これはモデル形状をできるだけ円に近づけて、水素の流れが一樣になるようにしたものである。水素供給装置および水素センサはダクト内水素拡散実験に用いたものと同じである。天井モデルの縁に壁はないが、周囲に壁があり、図13の横方向には壁面は0.2m、縦方向には1.0m離れている。換気は自然換気である。また水素が流出するノズルの内径は4.5mmである。

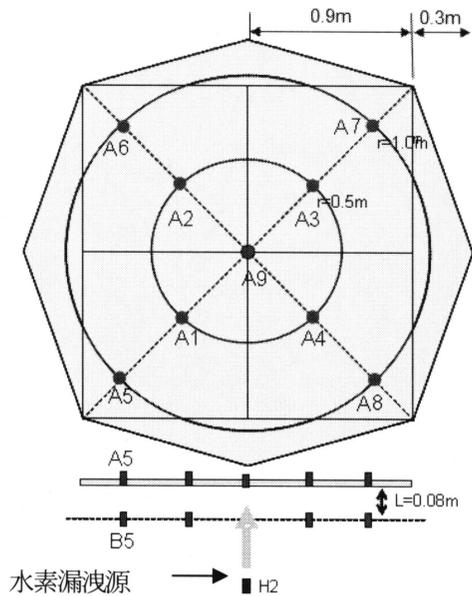


図13 天井モデルの形状、寸法

同図にはセンサの配置および水素漏洩源の位置を示している。天井面下側中央のセンサをA9とする。天井面

下側の中央から 0.5m の円周上に等間隔に配置した 4 個のセンサを A1~A4、同じく 1.0m の円周上の 4 個のセンサを A5~A8 とする。ここで、これらのセンサをさすとき「天井面のセンサ」と呼ぶことにする。天井面のセンサの先端は天井面から 1mm 程度下に出ている。

天井面から 8cm 下側の空間にあり、中央から 0.5m の円周上に等間隔に配置した 4 個のセンサを B1~B4、同じく 8cm 下側にあり、1.0m の円周上の 4 個のセンサを B5~B8 とする。これらのセンサをさすとき「天井下のセンサ」と呼ぶことにする。B1 から B8 のセンサは A1 から A8 のセンサの 8cm 下にある。なお、予備実験で天井下 10cm では水素濃度が低く、ほとんど観測されなかった。

水素漏洩源の位置は常に天井中央の真下にあり、本実験では天井と漏洩源の距離のみ変化させた。この位置をさすときには「漏洩源の距離」ということにする。

図 1 4 に天井モデルの写真を示す。地下空間におけるメタンの拡散実験結果から[7]、水素は主に天井面に沿って層のように流れると推測されたので、天井付近にはできるだけ障害物をおかず、また、設置する場合には影響が小さいように放射状に配置するようにした。

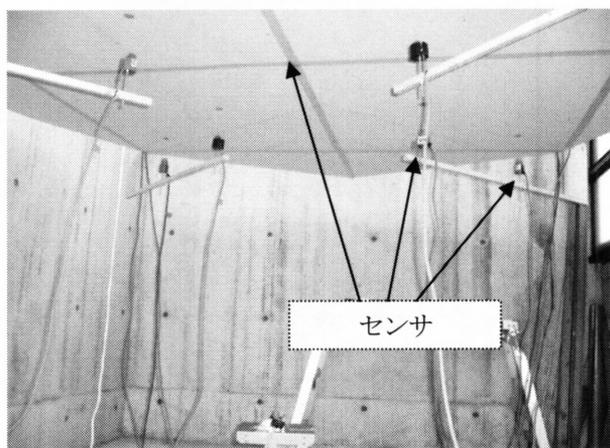


図 14 天井モデルを下から見たところ

実験の条件を表 2 に示す。水素の漏洩源の距離は 25、50、100cm、漏洩量は 6、12、24、48L/min とした。水素量の制御方法はダクトの実験の場合と同じくマスコントローラを用いた。天井は水平状態を基本としたが、各種のフードは傾斜があり、天井にも傾斜がある場合があるので、水平状態の他に、傾斜が 5、10、20 度の場合の実験を行った。

表 2 天井モデルによる水素拡散実験の条件

実験 No	水素漏洩源距離(cm)	漏洩量 (L/min)	傾斜 (°)
1	25	12	0
2	25	6	0
3	25	24	0
4	25	48	0
5	50	48	0
6	50	24	0
7	50	12	0
8	50	6	0
9	100	6	0
10	100	12	0
11	100	24	0
12	100	48	0
13	50	24	5
14	50	48	5
15	50	48	10
16	50	24	10
17	50	24	20
18	50	48	20

* センサー測定開始 30 秒後に水素の漏洩を開始。

3. 2 天井モデル実験結果

以下にいくつかの代表的な実験結果の説明を記す。なお、説明の都合上、実験の番号順の説明ではない。

3. 2. 1 実験 4 (距離 25cm、漏洩量 48L/min)

本実験は一連の実験中で最も天井面が高濃度になる条件である。図 1 5 は天井面のセンサの中で A1、A2、および中央の A9 の水素濃度の経時変化を示したものである。中心濃度は 24% 程度で 1% 程度の細かい変動がある。他のセンサは 5% 以下であるが、相対的な変動が大きい。

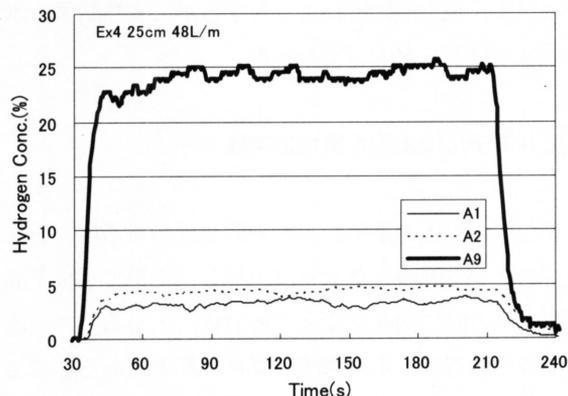


図 1 5 天井モデル水素濃度の経時変化

図16は天井面のセンサA1、A3、A5、A7の水素濃度の経時変化を示したものである。いずれも変動が大きい。A1とA3、A5とA7はお互いに中心からみて反対側にある。これらの2つの濃度は互いに逆に変動している傾向があり、何らかの原因で水素がA1の側に流れるとA3の濃度が少なくなるという関係が見られる。

図17は天井下のセンサ濃度の経時変化を示したものである。相対的な変動が大きい。図18は天井中央から0.5mの天井面のセンサA1-A4、同1mの天井面のセン

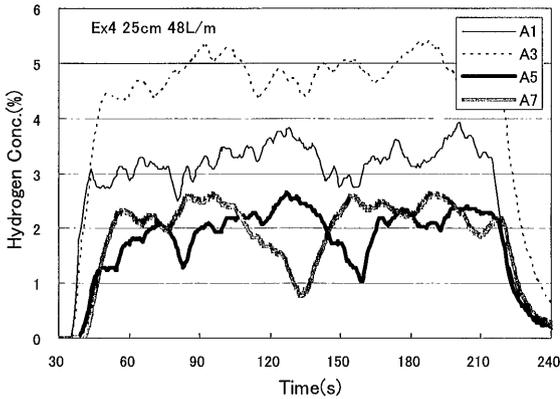


図16 天井モデル水素濃度の経時変化

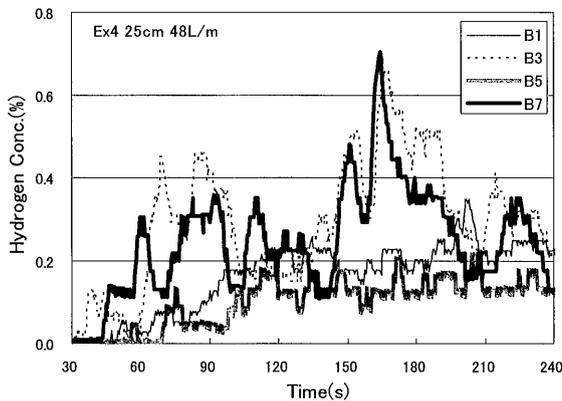


図17 天井モデル水素濃度の経時変化

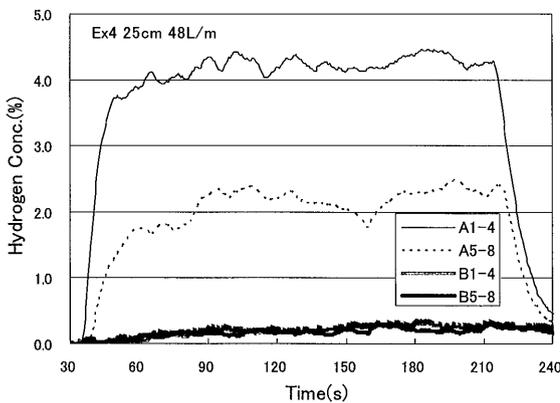


図18 天井モデル水素濃度の経時変化

サA5-A8、同0.5mの天井下のセンサB1-B4、同1mの天井下のセンサB5-B8の値を平均して示したものである。それぞれA1-4、A5-8、B1-4、B5-8と表している。こうすると、水素濃度は天井面0.5mで $4.2\pm 0.2\%$ 、1.0mで $2.2\pm 0.2\%$ 程度、天井下では短時間の変動が大きい、0.5m、1.0mどちらも $0.2\pm 0.1\%$ 程度であることがわかる。

この場合、天井面と天井下の濃度差が大きい。これは空気中を上昇する距離が短く、水素が天井に達するまでに水素と空気の混合があまり行われていないためと考えられる。以上の結果から本条件での可燃範囲は天井中央から0.5m程度で、厚さは数cmである。48L/minという少なからぬ量の水素が連続的に漏洩している状況で、強制換気がない条件でも、可燃性ガスの範囲は小さいと思われる。

3.2.2 実験12 (距離100cm、漏洩量48L/min)

本実験条件は漏洩源の距離が最も長い場合である。図19に天井面のセンサA1、A2、および中央のA9の濃度の経時変化を示す。また、図20に平均した濃度A1-4、A5-8、B1-4、B5-8を示す。これらの図から天井面中心濃度は一時的に低い場合があるが、 $1.8\pm 0.4\%$ 程度、天井面0.5mで $1.5\pm 0.2\%$ 、同1.0mで $0.9\pm 0.2\%$ 程度である。また、天井下は短時間の変動が大きい、0.5mで $0.7\pm 0.2\%$ 、同1.0mで $0.6\pm 0.2\%$ 程度である。距離が短い場合と比較すると、各位置における濃度の差が小さく、天井下の濃度は高い。これは100cmの空気中を水素が上昇する間に、水素と空気の混合がすすんだためと考えられる。この場合、どの位置でも燃焼限界以下である。この場合、万一着火するのは漏洩源から水素が立ち上がる部分だけと思われる。

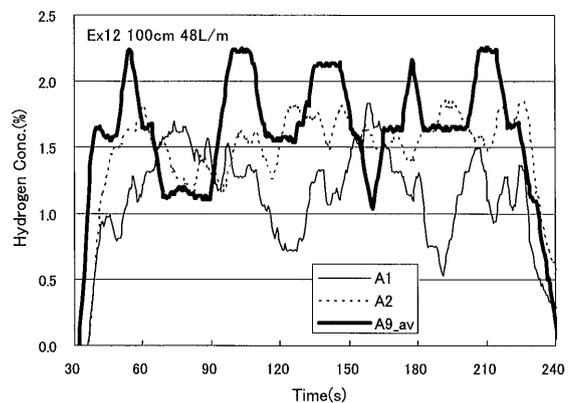


図19 天井モデル水素濃度の経時変化

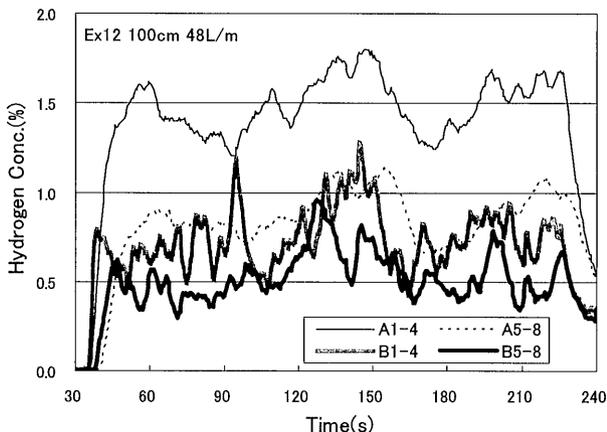


図 2.0 天井モデル水素濃度の経時変化

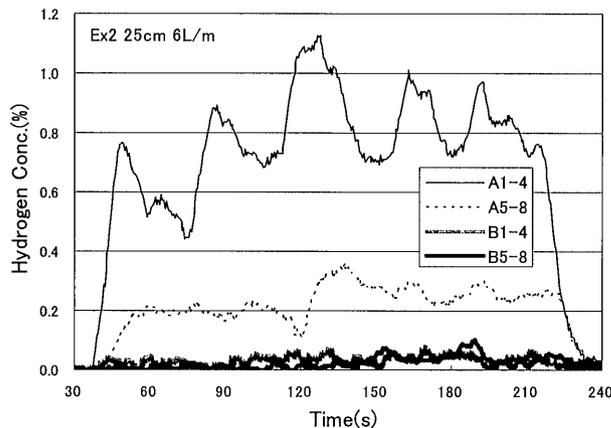


図 2.2 天井モデル水素濃度の経時変化

3. 2. 3 実験 2 (距離 25cm、漏洩量 6L/min)

図 2.1 は実験 4 と比べて漏洩量を 1/4 に減少した場合の天井面のセンサ A1、A2、および中央の A9 の濃度の経時変化である。中心濃度は平均 4% であるが変動が大きく、最高 10% 程度である。これは水素漏洩量が少ないので、上昇する水素の最も濃い部分が中央のセンサに常には接しないためと考えられる。

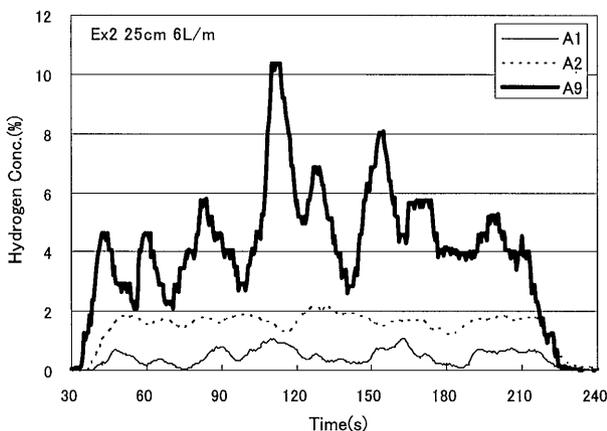


図 2.1 天井モデル水素濃度の経時変化

図 2.2 に平均した濃度変化を示す。天井面 0.5m で $0.8 \pm 0.2\%$ 、1.0m で $0.2 \pm 0.1\%$ 程度、天井下は短時間の変動が大きいが、0.5、1.0 でどちらも $0.02 \pm 0.02\%$ 程度である。水素検知の観点では天井面であればセンサで確実に検知可能と思われるが、天井下では 200ppm 程度であり、漏洩量が本条件以下になると、検知が難しくなると思われる。

3. 3 漏洩量と濃度の関係

水素漏洩源の距離が 25cm の場合の漏洩量と各測定位置における時間平均濃度との関係を図 2.3 に示す。漏洩源直上の濃度は他の場所に比べて高く、漏洩量が増えると高くなること、天井面では数%の値が観測され、天井下では濃度が低いことなどがわかる。

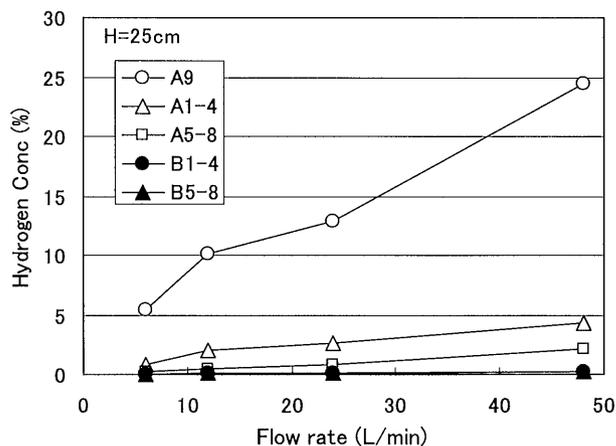


図 2.3 水素濃度と距離および漏洩量の関係

図 2.4 は流量が 48L/min の場合の、水素濃度と高さの関係を示したものである。同図から高さが増加すると天井面の水素濃度は低下するが、天井下の濃度はわずかではあるが増加することがわかる。

各位置のセンサの濃度をまとめて表 3 に示す。漏洩源の距離が小さいと天井面の濃度が高いが、天井下の濃度は低い。漏洩源の距離が大きくと天井面の濃度が低い、天井下の濃度は若干増える。距離が大きい場合、水素が必ずしも直上に上昇していない可能性もある。いずれの

場合も天井面のほうが天井下より濃度が高く、このことからセンサはできるだけ天井面直近に取り付けることが望ましい。

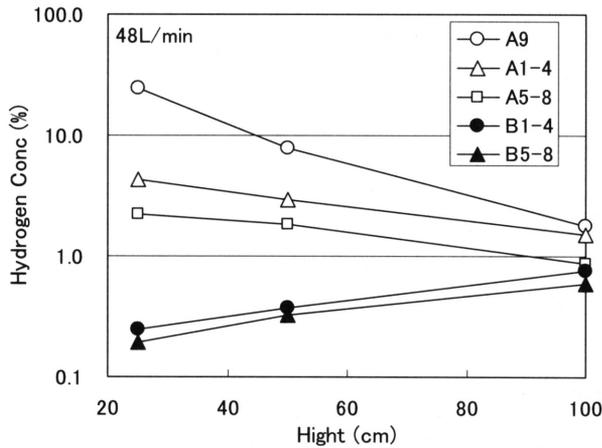


図24 水素濃度と高さの関係

表3 各位置のセンサの濃度

漏洩源の距離 (cm)	漏洩量 (L/min)	測定位置(中心からの距離 cm)				
		天井面			天井下 8cm	
		r=0	r=50	r=100	r=50	r=100
25	6	5.4	0.8	0.2	0.0	0.0
	12	10.1	2.0	0.5	0.1	0.1
	24	12.9	2.7	0.8	0.1	0.1
	48	24.4	4.3	2.2	0.3	0.2
50	6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0
	12	1.7	0.9	0.4	0.2	0.1
	24	4.5	2.1	1.0	0.2	0.1
	48	7.7	3.0	1.8	0.4	0.3
100	6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	12	0.1	0.4	0.2	0.3	0.2
	24	1.0	0.8	0.4	0.6	0.4
	48	1.8	1.5	0.9	0.7	0.6

以上のような濃度分布になる理由は図25のように水素が拡散するためと考えられる。すなわち、天井と漏洩源の間の距離が小さいと、上昇する水素と空気が途中であまり混合しないが、距離が大きくなると、途中で混合し、濃度自体は下がるが、水素を含んだ気体の体積が増え、天井における混合気の層の厚さが大きくなる。Houfら[8]の上向き水素漏洩モデル解析は天井の影響を考慮したものではないが、これによれば48L/minの漏洩量

の場合、その直上での水素濃度は高さ25cmでは15%程度、50cmでは5~6%程度、100cmでは3%以下と見積られる。天井の影響が相対的に小さい条件である、50cm、100cmの場合には比較的近い濃度が得られている。

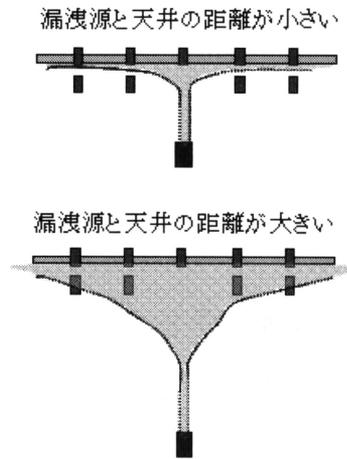


図25 漏洩水素の拡散の概念図

水素の次に軽い気体であるヘリウムが円管から流出した場合の流れを、シャドウグラフにより可視化した画像を図26に示す。このとき流量は左から10,20,および57L/minである。円管の直径は4.5mmであるので、57L/minの場合の吹き出し直後の流速は60m/s程度である。流出量が少ないとある程度の長さまではあまり拡がらないが、57L/mの場合には吹き出し口直後から広がりは始めている。

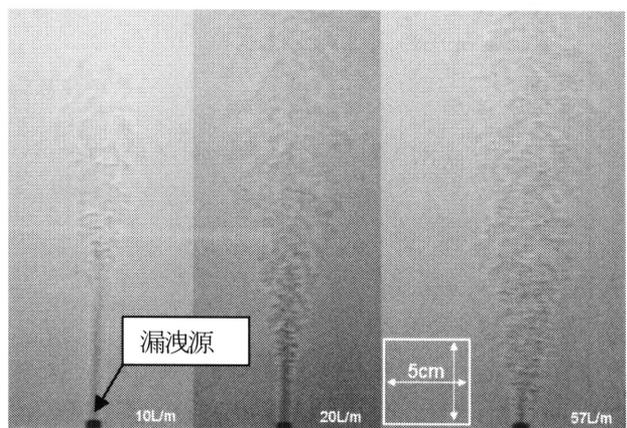


図26 円管から流出するヘリウムのシャドウグラフによる可視化画像

3.4 天井モデルの傾斜の影響

図27のように天井が傾斜している場合の実験を行っ

た。傾斜が5、10、20度の場合の実験結果を図28に示す。同図左側が下方、右が上方である。下方(左側)100cmの天井面水素濃度は傾斜が5度では水平の場合とほとんど変わらなかったが、10および20度ではほとんど0になった。また、下方50cmでは10度でも水平とほとんど変わらなかった。一方、上方では傾斜による濃度上昇がほとんど見られない。

いずれの場合も、傾斜している場合の方が天井面中央の濃度が高い。これは傾斜が無い場合は水素はどの方向にも拡散できるが、傾斜があると下方(左側)には拡散できないためと考えられる。

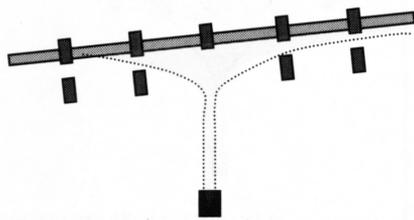


図27 天井が傾斜している場合

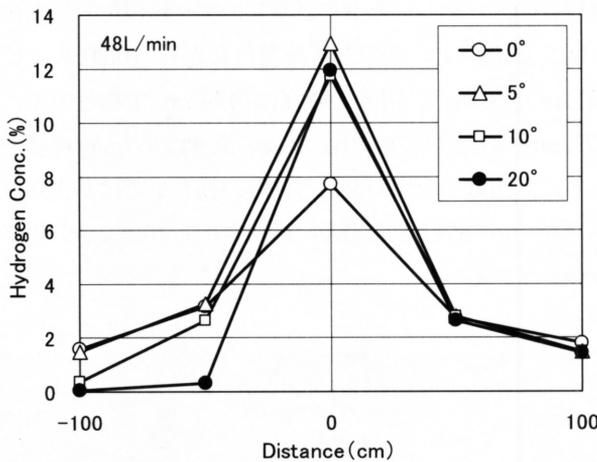


図28 天井が傾斜している場合の濃度分布
: 横軸正が上方

4. まとめ

本研究では、強制通気が行われているダクト内の水素の拡散について実験を行い、ある風速以上では水素と空気の混合が早く、安全な状況をつくりやすいことを示した。また、天井付近の水素の拡散について検討し、センサはできるだけ天井面直近に取り付けることが望ましいことを示した。固定型の検知器は一度設置すると簡単には移動できないので、その設置位置は重要であり、水

素の拡散と水素が流れる経路を考慮し、検知しやすい場所に設置しなければならない。

CFDは水素拡散現象の解明手段として用いられている[1][9]。ある流れの条件の場合に対して適切な解を与える解析手法が、別の条件の場合には適切でないということは珍しいわけではない[10]。本実験結果は強制換気が行われている場合の解の信頼性の検討にも資すると考えている。

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] K. MATSUURA, H. KANAYAMA, H. TSUKIKAWA and M. INOUE, Numerical Simulation of Leaking Hydrogen Dispersion Behavior in a Partially Open Space, *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol.33, 2008, 240-247

[2] 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, pp32-43

[3] 水素ヒヤリハット事例解析集、大塚雄市、井上雅弘、杉村丈一、九州大学、21世紀COEプログラム、2008年1月

[4] 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

[5] 中田金市編、*火災、防災科学技術シリーズ*、共立出版、1969、p569

[6] P. Bakke and S. J. Leach: S.M.R.E, Principles of formation and dispersion of methane roof layers and some remedial measures, *The Mining Engineer*, July, 1962, pp645-658

[7] 井上雅弘、*通気網の解析と掘進切羽の通気*、*資源と素材*、第116巻、81-89頁(2000年2月)

[8] W. Houf, R. Schefer, Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen, *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol.33, 2008, 1435-1444

[9] 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.

[10] 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*、Vol.33, No.4, 2008, p28-35