平成27年度

水素ネットワーク構築導管保安技術調査

(水素拡散挙動調査)

報告書

平成28年 3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

目次

1. 課	査研究の目的等	2
1.1	調査研究の目的	2
1.2	調査研究の概要	2
2. 課	査研究の結果・評価	3
2.1	水素の拡散挙動計測実験	3
2	1.1 実験手法	3
2	1.2 実験結果	11
2	1.3 実験まとめ	44
2.2	水素の拡散挙動シミュレーション	45
2	2.1 シミュレーション手法と計算条件	45
2	2.2 シミュレーション結果	49
2.	2.3 数値シミュレーションによるパイプシャフト内濃度変化に関する検討	57
2.	2.4 詳細シミュレーションおよび模擬空間換気量の検討	72
2	2.5 シミュレーションまとめ	79
3. ま	とめ	81

1. 調査研究の目的等

1.1 調査研究の目的

一般需要家向けの水素のパイプライン供給に際して、保安確保のために必要となる導管 等のガス工作物について、そのネットワークとしての運用に係る安全基準や配管の設置・ 維持管理方法等の具体的措置を明確化するため、これに有用な基盤技術、知見を整理し、 当該調査の成果を将来的にガス事業法の技術基準等の見直しに反映させることで、水素ネ ットワーク社会構築における保安確保を図ることを目的とする。

1.2 調査研究の概要

一般集合建物内への水素配管供給を行った際の、パイプシャフト内における配管継手部 からの水素漏えいを想定した水素の拡散挙動(濃度分布の経時変化)を調査するため、一 般集合住宅のパイプシャフトを模擬した試験空間を、配管等爆発実験施設の大空間内に構 築して、都市ガス用配管と類似の配管継手部からの漏えいを想定した条件で水素を放出し、 模擬空間内外に37点設置した水素センサーで水素濃度の時間履歴を計測した。パイプシャ フト内における様々な条件が水素の拡散挙動に与える影響を調べるため、放出量、放出位 置、模擬設置機器の配置の有無、日射等を想定した扉温度分布の有無、換気口面積を変え た実験を行った。放出量、放出位置を変えた実験において、水素放出口近傍以外で最大の 水素濃度を示したのは、設定した最大流量条件の実験の天井付近であり、その値は水素の 爆発下限界濃度の1/4をわずかに超える1.2vol%程度だった。模擬空間内に燃料電池を想定 した発熱体を設置、加熱した場合と、日射を想定して扉の加熱を行った場合には、空間内 での水素濃度の大幅な減少が確認された。空間内気が加熱され対流、換気が促進された結 果だと考えられる。また、燃料電池を想定した大型の構造物を設置した場合と、換気口面 積を上下ともおよそ100平方センチメートルに制限した場合には、模擬空間内の対流、換 気への影響が観測されたが、水素濃度分布や最大値に大きな影響は見られなかった。

また、実験で得られた水素の濃度変化のシミュレーションによる再現を行い、実験結果 と比較検証して、水素の拡散挙動について既存の手法によるシミュレーションが可能かど うかの検証を行った。

 $\mathbf{2}$

2. 調査研究の結果・評価

2.1 水素の拡散挙動計測実験

一般集合建物内への水素配管供給を行った際の、パイプシャフト内における配管継手部 からの水素漏えいを想定した水素の拡散挙動を調査するため、一般集合住宅のパイプシャ フトを模擬した試験空間を、配管等爆発実験施設の大空間内に構築して、配管継手部から の漏えいを想定した条件で水素を放出し、模擬空間内外に設置した水素センサーで水素濃 度の時間履歴を計測した。また、パイプシャフトにおける様々な条件が水素の拡散挙動に 与える影響を調べるため、放出条件違い(放出量、放出位置)と模擬空間条件違い(模擬 設置機器の配置の有無、日射等を想定した扉温度分布の有無、換気口面積違い)の実験を 行った。

2.1.1 実験手法

2.1.1.1 実験場所

実験は、独立行政法人労働安全衛生総合研究所本部清瀬地区にある配管等爆発実験施設 内、中規模爆発実験室において行った。図 2.1.1-1 に配管等爆発実験施設の内部を示す。中 規模爆発実験室は、床面の広さ 20 m×20 m 以上、高さ 10 m の空間を持つ多目的実験室で ある。



図 2.1.1-1 配管等爆発実験施設内部

2.1.1.2 パイプシャフト模擬空間

水素を放出し拡散挙動を計測するための空間として、本調査研究で水素配管からの漏え いを想定している一般集合住宅のパイプシャフトを模擬するため、幅 100 cm、奥行き 160 cm、高さ 224 cm の直方体の模擬空間を製作した。左右壁面、奥壁面、床・天井は 15 mm 厚のベニヤ板で構成し、前面には実際のパイプシャフトで使用実績のある換気口付き金属 扉を設置した。扉外側には、幅 150 cm、長さ 5 m、高さ 230 cm で、床面、天井、片側の 壁面を持った廊下を、壁面の中央に模擬空間扉がくるように設置した。全ての壁面及び床・ 天井面の内側は、水素や外気の流通を防ぐためビニルクロス張りとし、外側は、断熱条件 で実験を行うため厚さ 50 mm の断熱材を貼り付けた。模擬空間の外観を図 2.1.1-2 に、扉 の外観を図 2.1.1-3 示す。

扉は上部に、幅およそ 85 cm、高さおよそ 18.5 cm で、金属製メッシュ(有効開口率 70%) で覆われた固定式の換気口を持っている。扉の上部換気口以外の部分は固定式の柱をはさ んで左右非対称の観音開きの 2 枚扉となっており、それぞれの可動扉は、上部に直径およ そ 15 cm の円形の開口部と、下部に幅およそ 28 cm とおよそ 43 cm、高さおよそ 22 cm で、 金属製メッシュ(有効開口率 70%)で覆われた換気口を持っている。2つの円形の開口部 はアルミテープで塞いで実験を行った。上部換気口の最上部は模擬空間内天井から 50 mm 低い位置、下部換気口の最下部は模擬空間床面の高さより 10 mm 高い位置にあり、換気を 妨げにくい構造になっていると考えられる。



図 2.1.1-2 実験に用いた模擬空



図 2.1.1-3 模擬空間扉

2.1.1.3 水素放出条件(放出方法、位置と放出量)

配管からの漏えいを模擬するため、パイプシャフト内を床から天井に通して垂直に設置 される配管の位置を想定し、幅 100 cm の中央、奥壁から 25 cm 手前の位置を放出口位置 とした。高さは床面から 12.5 cm(下部換気口中央高さ)と、天井面から 14.2 cm(上部換 気口中央高さ)の 2 通りであり、それぞれ上方向、下方向に水素を放出した。

水素は、およそ 50 ml/min、140 ml/min、570 ml/min の流量で放出した。本研究で最大 流量として採用した、およそ 570 ml/min の流量は、 φ 0.2 mm のピンホールに 10kPa の圧 力をかけることで流れる水素の流量である。この φ 0.2 mm のピンホール径は、水素ステー ションの危害想定で、高圧水素配管の腐食漏れ事故が起きる場合に想定する最大の腐食口 径である。10kPa の圧力は、家庭用燃料電池が内部で昇圧せずに発電できる、およそ 6kPa を十分にかけることのできる配管内圧として選んだ。140 ml/min の流量は φ 0.1 mm のピ ンホールに 10kPa の圧力を、50 ml/min の流量は φ 0.1 mm のピンホールに 2.5kPa の圧力 を、それぞれかけることで流れる水素の流量である。

実験では、実際に放出口近くの配管内に設置した φ 0.1 mm および φ 0.2 mm のオリフィ ス付ガスケット (フジキン製 UJR-9.52RE-RG-0-0.1、UJR-9.52RE-RG-0-0.2)に、コンデ ンサー型圧力計 (MKS Instruments 製バラトロン 627D13T)を用いて圧力調整して加圧 することで調整した流量を、マスフローメーター (フジキン製 FCSTM1005L)で計測した。 放出口の先端には、 φ 19 mm の焼結金属エレメント (SMC 製 ESKA-Z2812-010)を設置し、 線流速を落として放出した。流量 570 ml/min の場合の平均線流速は 3.4 cm/s であり、焼結 金属を使わない場合のおよそ 9000 分の 1 である。図 2.1.1-4 に水素放出口外観を示す。



図 2.1.1-4 水素放出口

2.1.1.4 模擬空間条件実験のための装置

模擬空間内での様々な条件が水素拡散挙動へ与える影響を検討するため、4 つの比較実験 を行った。

模擬空間内に設置される燃料電池が発熱し、模擬空間内の空気の循環を促進することに より、水素拡散挙動へ与える影響を検討するため、模擬空間内に温水式ヒーター(東京ガ ス製クリアウォーム UR-0410AVN2403、図 2.1.1-5)を設置し、表面温度をおよそ 40℃に 調整して水素放出実験を行った。また模擬空間扉が日光で加熱された状態を想定して、模 擬空間扉に電熱ヒーター(スリーハイ製シリコンラバーヒーター、図 2.1.1-6)を貼り付け、 扉内側温度をおよそ 40℃に加熱して水素放出実験を行った。



図 2.1.1-5 模擬空間内に設置した 温水式ヒーター



図 2.1.1-6 模擬空間扉に貼り付けた 電熱ヒーター

さらに、模擬空間内に設置される燃料電池が相応の体積を持って空間を占め、模擬空間 内の空気の循環を阻害することにより、水素拡散挙動へ与える影響を検討するため、模擬 空間内に断熱材で作成した幅 82 cm、奥行き 45.5 cm、高さ 175 cm の直方体(図 2.1.1-7) を設置し、水素放出実験を行った。また換気口面積が小さい場合を想定して、上部換気口、 下部換気口の有効開口面積が、それぞれおよそ 100 cm² となるよう、換気口の中央高さ部 分を残してアルミテープで塞ぎ(図2.1.1-8)、水素放出実験を行った。



図 2.1.1-7 模擬空間内に設置した直方体



図 2.1.1-8 アルミテープで塞ぎ、有効開口面積およそ 100 cm² とした換気口

2.1.1.5 計測機器類

模擬空間内の水素濃度計測には、接触燃焼・熱電式水素センサー(ピュアロンジャパン 製 THS100A)を用いた。センサー検知部は、直径 10 mm、長さ 10 mm の円筒形の焼結金 属である。図 2.1.1-9 にセンサー検知部を示す。この水素センサーを模擬空間天井に 4 点、 模擬空間内部に 29 点、模擬空間扉外側廊下に 4 点の計 37 個、設置した。図 2.1.1-10 にセ ンサー配置図を示す。水素センサーからの信号は、専用基板 (ピュアロンジャパン製 MG4R) を通してアナログ電圧信号として出力し、デジタルデータロガー (HIOKI 製 LR-8400)で、 しきい値 60Hz の高周波フィルターをかけ 1 秒ごとに記録した。



図 2.1.1-9 水素濃度センサー検知部

表 2.1.1-1 水素センサー仕様

検知ガス	水素
検知原理	接触燃焼熱電変換
検知範囲	20ppm-4vol%
応答速度	90%応答3秒



図 2.1.1-10(1/3) 水素濃度センサー配置図(平面図、単位:mm)



図 2.1.1-10(2/3) 水素濃度センサー配置図(平面図、単位:mm)



図 2.1.1-10(3/3) 水素濃度センサー配置図(垂直断面図、単位:mm)

模擬空間内等の温度計測には、K型熱電対を用いた。模擬空間内には水素濃度センサー に対応する壁面と空間に設置した。空間内に発熱体として設置した温水ラジエタには、表 面中央高さと行き帰りの加温用温水配管内に設置した。扉には各扉内側と支柱の上中下に 設置した。また環境温度計測用として、模擬空間外廊下の天井面と床面、廊下外の試験設 備床から高さ 2.5 m、3.0 m、10 m に設置した。熱電対は補償導線を用いてデジタルデータ ロガー(HIOKI 製 LR-8400)に接続し、しきい値 60Hz の高周波フィルターをかけ 1 秒ごと に記録した。

模擬空間扉の換気口における換気の状況を確認するため、熱線風速計を設置した。模擬 空間扉の上部換気口、下記換気口の中央高さに検知部がくる様に設置した。



図:2.1.1-11 実験装置概略図

2.1.2 実験結果

2.1.2.1 実験条件

本研究で行った水素放出実験の実験条件を表 2.1.2-1 に示す。

宇玲	力	放出条件		 描 路 空 問 与 ව	計測時間
番号	放出	流量	模擬空間条件		1 例时间
	位置	/ ml•min-1		7 C	/ 叶子[日]
1	下	50	_	8.5-8.7-8.2	6
2	下	140	_	8.1—9.8	3
3-1	下	570	—	6.7—9.5—9.2	6
3-2	下	560	—	8.9—11.3	5
4	下	570	機器の発熱を模擬	10.0—11.1	3
5	下	570	扉を加熱	10.3—10.6—9.9	3
6	下	560	機器を模擬した直方体	10.1—12.4—11.9	5
7	下	570	換気口 100 cm ²	8.5—11.1—10.8	6
8	上	51	—	7.7—10.9	3
9	F	140	—	11.3—11.6—11.2	3
10	F	570	_	7.8—10.1	6

表 2.1.2-1 実験条件

下部放出位置から水素放出量およそ 570 ml/min で放出する実験を基本条件実験とし、放 出条件違いや模擬空間条件違いの実験の比較対象とするため、全 11 点の実験の最初(実験 3-1)と最後(実験 3-2)に計 2 回行った。従って、模擬空間条件の実験は、基本条件実験 と同じ放出条件で行った。

実験は、午前10時頃から3時間または5,6時間か、午後2時頃から3時間行っており、 表中の模擬空間外気温は、おおよその温度変化を表している。実験では計測を行う前に毎 回、全37点の水素センサーの校正直線補正を行った。0.992vol%の水素空気標準ガスで水 素センサー周辺の空気をパージしながら印加し、20秒以上経って安定した電圧信号の後半 10秒を平均し、水素を印加しない場合の出力と合わせて校正直線を得た。実験期間中、多 くの水素センサーの感度(印加水素濃度に対する電圧出力の比)は低下したが、ほとんど のセンサーの感度低下は10%未満だった。しかし5つのセンサーでは感度低下は20%以上 であり、感度低下が70%以上になった3つのセンサーでは、校正作業中や計測中に水素を 印加している間にも感度低下していることが観測された。具体的にはA-10、A-12、A-13 のセンサーであり、それらの指示値は実際の水素濃度を過小評価していると考えられる。

校正作業の後には模擬空間内にわずかに放出された水素をパージするため、排風器を用いて扉外の廊下側から送風を行った。発熱体等がある場合の加温や、模擬空間への立ち入

りが制限される構造物の設置は、校正作業後に行った。設定した温度に安定するなど準備 が整った後、扉を閉め換気口以外の部分を養生テープで目張りして、遠隔操作により設定 した流量で水素の放出を開始した。放出から 3 時間以上経過し、各計測点での水素濃度が おおよそ安定するか、安定した後に緩やかに減少することを確認して計測を終了した。実 験終了後には遠隔操作で圧縮空気を模擬空間内に放出し、水素濃度の低下を確認してから 大空間に立ち入り模擬空間の扉を開いた。

観測された水素濃度および温度は毎秒1点のサンプリングレートによって記録している。 次項以降で示す水素濃度の時間履歴は、数秒から数十秒程度の間にも増減する時間変動を 示すが、この変動は次項で説明するように計測時の電気的なノイズではないと考えている。 しかし、最短で3時間の計測における時間履歴を表示する際の視認性を向上させるため、 本節では特に断らない限り、水素濃度および温度の時間履歴は、それぞれ標準偏差5秒お よび10秒のガウス関数を用いてスムージングした値をプロットしている。ただし水素濃度 の瞬間最大値は毎秒1点の元データから抽出した値を用いている。

2.1.2.2 基本条件の濃度・温度の時間履歴

基本実験条件における空間内濃度履歴を図 2.1.2-1 (実験 No.3-1) および図 2.1.2-2 (実 験 No.3-2) に示す。また、それぞれの実験における温度履歴を図 2.1.2-3 (実験 No.3-1) お よび図 2.1.2-4 (実験 No.3-2) に示す。ほぼ同条件での観測であり、水素濃度変化の定性的 な傾向および到達濃度は互いにおおよそ一致している。模擬空間中の水素濃度は、水素放 出開始からおよそ数 10 から 100 分程度の時間オーダーで上昇し、その後ほぼ定常となる。 定常時の水素濃度は空間的に分布があるが、天井で約 0.6-1.2 vol%、上部換気口高さで約 0.4-0.8 vol%、中央部で 0.1-0.6 vol%、そして下部換気口高さでは約 0-0.4 vol%であった。

今回実験に用いたような、前面の扉の上下だけに換気口を持つ、比較的に外気の気流な どの影響を受けにくいと考えられる空間で水素を放出した場合には、密度が空気の15分の 1 程度である水素自身の浮力によって対流を起こしながら空間内に拡散し薄まっていくと 考えられる。そしてこの対流によって、空間内気が空間の下から上に移動し、下部換気口 からの外気の流入と上部換気口からの空間内気の排出を促すことで緩やかな換気が起こり、 空間内の水素濃度分布が平衡に達すると考えられる。しかし、水素濃度の時間履歴につい て、図 2.1.2-1 および図 2.1.2-2 に見られるように、いずれの計測点でも水素濃度値はある 程度の時間変動を示しており、またいくつかの計測点ではより大きな振幅を持った変動を 示している。さらに実験 No.3-1 では放出開始後の時間 170 分付近で水素濃度の急激な減少 が現れている。これら 3 種類の濃度時間変動の要因について検討した。

まず、比較的小さな変動幅を持つ濃度変動について考察するため、実験 No.3-1 の水素放 出開始から 10 分までの時間履歴を図 2.1.2-5a に示す。この図では、時間履歴のスムージン グは行っていない。水素放出開始から 30-40 秒程度後に天井付近で水素の濃度上昇が観測 されはじめ、その後 0.1-0.2vol%程度の濃度域で徐々に濃度が上昇していくが、センサー A-21 と A-22 では時折 0.6vol%程度まで急激に上昇して降下する時間変動が観測される。こ の変動について時間幅を 250-400 秒まで拡大した図 2.1.2-5b で見ると、センサーA-21 と A-22 の時間履歴は変動の様子も含めとても似かよっている。2 つのセンサーは水素放出口 から 2 m 上方の互いに近い位置に設置されているため、それぞれが示す時間変動は、ほぼ 実際の水素濃度の変動を示していて、計測における電気的ノイズ等の影響は小さいと考え られる。そしてこの放出口から 2 m 上方での濃度変動は、放出開始後の模擬空間内の水素 濃度が低い状態にあって、流れの揺らぎによって濃度変動の大きい水素空気混合気が届い ているためだと考えられる。

次に、水素放出開始から 30 分程度以上経ってから現れる、より大きな振幅を持った変動 について考察するため、実験 No.3・2 の上部換気口内側(A-16)、扉内面中央(A-17)、およ び下部換気口外側(B-18)のセンサーにおける水素濃度指示値の、時間 200分付近を拡大 したプロファイルを図 2.1.2・5 に示す。センサーA-16 は、数分の時間間隔で一時的な減少 を示している。いずれの減少ピークにおいても、その時間幅は数十秒程度であった。また、 センサーA-16 での水素濃度の減少に対応して、センサーA-17 および B-18 の指示値が一時 的に増加している様子が観測されている。従ってこれらの変動は、上部換気口から一時的 に外気が流入した結果であると考えられる。上下換気口の内外 30 mm に設置されたセンサ ーA-16、A-18、B-18 に大きな時間変動が見られるこの挙動は実験 No.3・1 と No.3・2 で共通 しており、また実験 No.2 や No.6 のように模擬空間内の流速が大きくないと考えられる条 件において同様の現象が観測されている。さらに、水素放出量が小さい実験条件では観測 されず、観測される実験条件でも水素濃度がある程度上昇した後に観測されることから、 この上部換気口からの断続的な外気の流入は、外的要因に依らず起こっている可能性があ る。このような断続的な流入が起こっている際の上下換気口付近の風速は、いずれも風速 計の計測下限界の 5 cm/s 未満であった。

最後に、実験 No.3-1 と No.3-2 の顕著な違いである、No.3-1 で放出開始後 170 分付近に 現れる水素濃度の急激な減少について考察する。(図 2.1.2-1) この時間において、上部換気 口の内側に配置したセンサーA-16 が観測した水素濃度は他のセンサーよりやや早く減少を 始めており、(図 2.1.2-1 (1/3)中段)また、下部換気口の外側に配置したセンサーB-18 が同 じ時間において水素濃度の増加を観測している。さらに、その増加した値は、下部換気口 の直ぐ内部に設置してある A-18 の濃度とほぼ等しくなっている。(図 2.1.2-1 (3/3)下段)こ れらのことから、この時間において上部換気口から外気の大きな流入があり、模擬空間内 部の水素が予想外に大きく換気されたと考えられる。また同時刻において一部の熱電対(特 に上部換気口内側に近い A13 および A16)に若干の温度上昇が観測されているが、(図 2.1.2-3 上段)模擬空間の壁面は断熱に設計されているため、これも温度の高い外気の流入 の影響を受けたものであると推定される。このような外気の大きな流入は、模擬空間外の 施設空間において何らかの予想しない外的要因により気流が発生したことが原因であると 考えられ、その際の上下換気口付近の風速は、5-8 cm/s 程度であった。この急激な濃度減 少は、全 11 実験中の 2 点、実験 No.2 と No.3-1 に見られたが、それぞれの実験日は同日で はなく、連続してもいない。

この外的要因によると考えられる大きな濃度変化を除けば、実験 No.3-1 と No.3-2 の結果はほぼ一致しているため、次節以降での、他の実験条件による結果との比較については、 実験 No.3-2 を基本条件として用いる。



図 2.1.2-1 (1/3) 実験 No.3-1 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-1 (2/3) 実験 No.3-1 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-1 (3/3) 実験 No.3-1 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-2 (1/3) 実験 No.3-2 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-2 (2/3) 実験 No.3-2 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-2 (3/3) 実験 No.3-2 における水素濃度の時間履歴



図 2.1.2-3 実験 No.3-1 における温度履歴



図 2.1.2-4 実験 No.3-2 における温度履歴



図 2.1.2-5 実験 No.3-1 における天井位置(A-21, 22, 23, 24)の水素濃度の時間履歴 (時間 0—600 秒と 250—400 秒付近の拡大図、スムージングなし)



図 2.1.2-6 実験 No.3-2 における A16、A17、および B18 位置の水素濃度の時間履歴 (時間 200 min 付近の拡大図)

2.1.2.3 流量違いによる水素濃度への影響

下部放出条件における放出流量の違いによる水素濃度への影響を評価した。実験 No.1、2、 および 3・2 の条件における水素濃度の時間履歴を図 2.1.2・7 に比較して示す。流量はそれぞ れ 50、140、および 560 ml/min である。図の左列では、空間内水平方向への拡がり挙動を 検討するために、上部開口部位置(天井から 142 mm)の水平面における計測点(奥:A1 および B1、中央:A4 および B4、開口近く:A16)における水素濃度を比較している。ま た、図の右列では、鉛直方向への挙動を把握するため、右壁から 30 mm 位置における計測 点(鉛直上方から下方に向かって B4、B11、B5、B14、B6)での水素濃度をプロットして ある。

水素放出流量 140 ml/min の実験 No.2 では、放出後の経過時間 100 分付近において水素 濃度が一斉に減少しているが、これは前述の実験 No.3-1 と同様に、意図しない何らかの外 的要因において模擬空間外の施設空間に気流が発生し、上部換気口から外気が流入したた めであると考えられる。しかし、他の放出流量での計測結果から、時間 100 分程度でも水 素濃度はほぼ定常に達していると予想できるため、実験 No.2 については一斉減少が開始す る以前の濃度データを用いて挙動を評価することが可能である。

どの空間内位置においても、放出流量の増加変化に従って水素濃度は増加していること が定量的に示されている。140 ml/min 条件では、定常濃度は 560 ml/min 時のおよそ 1/2 から 1/5 倍程度であり、最小流量の 50 ml/min の条件では定常濃度は 560 ml/min 時の約 1/10 から 1/40 倍であった。これらは流量比と概ね対応していると捉えることができる。

空間内における相対的な水素濃度分布については、まず、鉛直方向の分布(図 2.1.2-7 右 列)についてはいずれの条件においても上方ほど高濃度となるという傾向で一致している。 上部開口部位置での水平方向への分布については、140 ml/min および 560 ml/min の条件 ではほぼ同様であり、開口直前位置(A-16)のみ、他の位置に比べやや濃度が低い傾向に ある。これは前節で述べたように、上部換気口からの短時間の断続的な外気の流入が影響 しているものであると考えられる。一方で 50 ml/min の条件では、開口部への距離と水素 濃度の間に明確な相関は観測されていない。この条件では開口直前位置(A-16)での水素 濃度指示値の変動も少なく、短時間の断続的な外気の流入が発生していないと考えられる。 このことは、断続的な外気の流入現象は水素の放出流量に依存しているということを示唆 しており、それが模擬空間内の水素濃度分布に少なからず影響を与えている可能性がある。



(実験 No.1: 50 ml/min、実験 No.2: 140 ml/min、実験 No.3-2: 560 ml/min)

2.1.2.4 発熱体の設置および扉加熱による水素濃度への影響

発熱体の設置および扉加熱条件による水素濃度への影響を評価した。実験 No.3-2(基本 条件)、No.4(発熱体設置)、および No.5(扉加熱)における水素濃度の時間履歴を図 2.1.2-8 に比較して示す。流量は 560-570 ml/min である。また、加熱条件における温度履歴を図 2.1.2-9(実験 No.4)および図 2.1.2-10(実験 No.5)に示す。No.4 で発熱体である温水ラ ジエタに循環させた行き帰りの温水の温度と流量から計算した発熱体の発熱量は、およそ 250W だった。

空間内の温度分布については、加熱を行った二つの条件ではいずれも定性的な傾向は同様であり、天井付近の温度は床付近に比べ 2-5℃程度上昇している。この温度分布によって 模擬空間内の対流と換気が促進されたと考えられ、空間内の水素濃度は基本条件に比べ著 しく低下している。発熱体および扉加熱はどちらも同じような挙動を示しており、これら の条件下では温度分布の影響は同じように表れると整理することができる。上下換気口付 近での風速は、いずれの実験でも 20-30 cm/s 程度だった。

2.1.2.5 直方体設置の有無と換気口面積違いによる水素濃度への影響

模擬空間内への直方体の設置、および換気口面積違いによる水素濃度への影響を評価した。実験 No.3-2(基本条件)、6(構造物設置)、7(換気口面積 100 cm²)における水素濃度の時間履歴を図 2.1.2-11 に比較して示す。

まず、構造物の有無については、上部では水素濃度への目立った影響は見られなかった が、下部換気口高さの位置については構造物の設置によってやや濃度が増加する傾向にあ った。これは構造物の設置により上向きの流れがやや阻害されたためであると考えられる。 上部換気口の直前位置(A-16)における水素濃度の変動挙動についても、構造物がある場 合は振幅がより顕著になっている。これは模擬空間内の流れがやや阻害されたことが、上 部換気口からの断続的な外気の流入挙動に影響を与えていると考えられる。

次に換気口の開口面積を制限した場合の結果と比較する。この場合、基本条件と比べ全体 的な傾向はほぼ同様であり、濃度も同程度かわずかに増加した程度であった。上部換気口 の直前位置(A-16)における水素濃度の挙動については明確な差が現れている。開口を制 限した場合、基本条件等で観測された、短時間の濃度変動はほぼ抑えられており、また、 他の位置における水素濃度のふらつきも小さい傾向にある。これは開口面積が小さいこと により、断続的な外気の流入が抑えられたものであると理解できる。換気口面積を制限し た場合も、到達水素濃度はやや増加したが、大きな変化は見られなかった。内部の対流に よる換気が促されるという見方をすれば、換気口からの流入出の総量自体は開口面積に顕 著には依存しないと考えられる。従って、本試験で採用した条件内では、開口面積の制限 は、前述の通り微視的な流れには明確な影響をもたらすが、大局的な濃度挙動には大きな 影響はないということが示唆された。上下換気口付近の風速は、直方体設置実験では、風速計の計測下限界の5 cm/s 未満であったが、換気口制限実験では 5-20 cm/s 程度だった。



(実験 No.3-2: 基本条件、実験 No.4: 発熱体設置、実験 No.5: 扉加熱)



図 2.1.2-9 実験 No.4 (発熱体設置) における温度履歴



図 2.1.2-10 実験 No.5 (扉加熱) における温度履歴



(実験 No.3-2: 基本条件、実験 No.6: 構造物設置、実験 No.7: 換気口制限)

2.1.2.6 模擬空間上部での放出による水素濃度への影響

水素放出位置の違い、および上部放出時の流量条件の違いによる水素濃度への影響を評価した。まず、実験 No.3・2 (基本条件、下部放出 560 ml/min)、No.8 (上部放出 51 ml/min)、No.9 (上部放出 140 ml/min)、および No.10 (上部放出 570 ml/min) における、天井面へ設置した計測点における水素濃度の時間履歴を図 2.1.2・12 に示す。上部放出では、放出口付近の濃度が特に顕著に増加している。ただし、実験 No.10 のセンサーA21 および A22 位置では濃度指示値がそれぞれ 4 vol%以上、3 vol%以上で振り切れており、濃度が大きく変動している様に見える際の濃度低下は、センサー基板による保護機能により信号出力が停止したためだと考えられる。

放出位置の違いによる水素の空間分布への影響を検討するため、実験 No.3-2(下部放出 560 ml/min) および No.10(上部放出 570 ml/min) における水平(上部開口位置) および 鉛直方向への水素濃度履歴の比較を図 2.1.2-13 に示す。上部放出条件において、上部換気 口の高さでは、放出挙動の影響を受け、明確な水素濃度の分布が現れている。鉛直方向へ の分布については、上部放出条件では上部開口高さでの濃度は増加傾向にあるものの、中 央付近および下部における濃度は低く、その値もほぼ一定であった。

次に、上部放出時の流量条件の違い(実験 No.8-10)における結果の比較を、図 2.1.2-14 に示す。予期される通り、流量の減少に従い水素濃度は単調に減少する結果となった。





(実験 No.3-2:下部放出 560 ml/min、実験 No.8:上部放出 51 ml/min、
実験 No.9:上部放出 140 ml/min、実験 No.10:上部放出 570 ml/min)
*No.10 のセンサーA21 および A22 では濃度指示値が振り切れている。この 2 つのセンサーではスムージングは行っていない。



(実験 No.3-2:下部放出 560 ml/min、実験 No.10:上部放出 570 ml/min)


(実験 No.8:上部放出 51 ml/min、実験 No.9:上部放出 140 ml/min、 実験 No.10:上部放出 570 ml/min)

2.1.2.7 最大水素濃度と水素滞留量の推定

全ての実験条件における各計測点での水素濃度の最大値を図 2.1.2-15 にまとめて示す。 また、各計測点での水素濃度の最大値の、計測点高さごとの最大値と平均値を表 2.1.2-2 に 示す。上部放出の実験 No.8、No.9、No.10 では水素放出口近くのセンサーA21、A22 を除 いて計算している。下部放出の実験条件で、各実験を通して最大の水素濃度を示す計測点 が天井以外に現れるのは、実験 No.1、No.4、No.5 である。実験 No.1 のような小さな流量 条件の場合や、実験 No.4、No.5 のように模擬空間に高温部分があり対流が促進されている 条件では、放出された水素の拡散、希釈が早く進み、天井付近での水素の滞留が起こらな いと考えられる。上部放出の実験でも、小さな放出量の実験 No.8 では、放出口高さと同じ 天井から 14.2 cm の計測高さの計測点が最大値を示している。それ以外の実験では天井付 近の計測点で水素濃度の最大値を示し、高さが低くなるごとに水素濃度の最大値もおおよ そ小さくなっている。これらの実験条件では、放出された水素は拡散、希釈しながら自身 の浮力によって上方に移動するが、上に向かうほど水素濃度が高く浮力が大きい空気希釈 水素の層を作ることで、あまり対流、拡散の進まない状態になり滞留していると考えられ る。またこれらの条件では、換気口からの断続的な外気流入によって希釈されることで、 表 2.1.2-2 に示されるような濃度でほぼ平衡していると考えられる。

実験	実験条件	天井		天井から 14.2 cm		中央高さ		床から 12.5 cm	
留万		最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均
1	50 ml/min	0.04	0.03	0.13	0.04	0.17	0.05	0.12	0.03
2	140 ml/min	0.42	0.37	0.33	0.26	0.25	0.20	0.22	0.17
3-1	570 ml/min	1.27	1.14	1.02	0.92	0.61	0.52	0.51	0.39
3-2	560 ml/min	1.05	0.87	0.82	0.69	0.57	0.52	0.36	0.29
4	発熱体あり	0.05	0.05	0.07	0.05	0.38	0.17	0.07	0.03
5	扉を加熱	0.08	0.07	0.09	0.06	0.39	0.18	0.07	0.03
6	構造物あり	1.34	1.22	1.09	0.95	0.61	0.51	0.48	0.42
7	換気口を制限	1.07	0.98	0.93	0.75	0.82	0.76	0.45	0.38
8	上部放出・51 ml/min	*0.05	*0.03	0.29	0.08	0.04	0.02	0.20	0.07
9	上部放出•140 ml/min	*0.49	*0.48	0.43	0.27	0.11	0.08	0.15	0.09
10	上部放出•570 ml/min	*1.86	*1.76	1.00	0.79	0.29	0.22	0.41	0.21

表 2.1.2-2 各計測点での水素濃度の最大値の計測点高さごとの最大値と平均値 単位: vol%

*水素放出口近くのセンサーA21、A22を除いた値

実験 No.3-1 と No.3-2 は、水素放出速度が 2%弱異なる、ほぼ同じ実験条件での計測であ るが、水素濃度の高い計測位置である天井近傍と天井から 14.2 cm の計測高さでは、水素 濃度の最大値にそれぞれ 20%以上の違いが、平均値にはそれぞれ 30%以上の違いが見られ る。これは模擬空間内での水素拡散挙動に対して、模擬空間外の気流等の環境要因が与え ている影響によるものと考えられるため、計測結果の判断には、この程度の環境要因によ る拡散挙動の任意性を勘案する必要がある。

各計測点での水素濃度の最大値が、水素の爆発下限界濃度である 4vol%を超えた可能性が あるのは、実験 No.10 の水素放出口近くの計測点のみであった。これらのセンサーA21、 A22 では、それぞれおよそ 3.0 vol%、4.0 vol%で出力が振り切れ、それ以上の濃度計測は 出来なかった。実験 No.10 以外の上部放出実験である実験 No.8、No.9 でも放出口付近で は、それぞれ 0.8 vol%、1.8 vol%の濃度が観測されたが、これらのセンサーを除いた天井付 近の計測値は、それぞれ 0.05 vol%以下、0.5 vol%以下と、1 vol%を超える水素の滞留は観 測されなかった。

水素放出口近傍以外で、水素濃度の最大値が、水素の爆発下限界濃度の1/4 である 1 vol% を超えるのは、実験 No.3-1、No.3-2、No.6、No.7、No.10 である。上記の環境要因による 拡散挙動の任意性を考慮すると、模擬空間に高温部分がなく、560-570 ml/min で水素を放 出する実験条件では、天井から 14.2 cm 下の位置から天井までの空間には、1.0-1.5 vol%程 度の水素が滞留する可能性があると考えられる。また、換気口面積を制限した実験 No.7 で は、中央高さまで 0.8 vol%程度の水素が滞留しており、拡散挙動の任意性を考慮すると注 意が必要である。およそ 1 vol%以上の濃度の水素が滞留する可能性がある空間の体積を多 めに概算すると、天井から 14.2 cm 下の位置から上の体積はおよそ 240 L、中央高さから上 の体積はおよそ 1800 L である。



図 2.1.2-15 (1/6) 各測定点における最大水素濃度



図 2.1.2-15 (2/6) 各測定点における最大水素濃度



図 2.1.2-15 (3/6) 各測定点における最大水素濃度



図 2.1.2-15 (4/6) 各測定点における最大水素濃度



図 2.1.2-15 (5/6) 各測定点における最大水素濃度



図 2.1.2-15(6/6) 各測定点における最大水素濃度

- 2.1.3 実験まとめ
 - ・模擬空間内での水素の拡散挙動を調べるため、漏えいを模擬した水素放出速度の違い、 漏えい位置を模擬した水素放出位置の違い、模擬空間に部分的な加温部分がある場合、 模擬空間内の構造物や換気ロ形状で換気に制限がある場合の計10条件で、水素放出実 験を行った。
 - ・10条件、全11実験において2つの実験では、外部環境要因と考えられる外気の模擬空間への流入により、模擬空間内の水素濃度が急激に低下する様子が観測された。また 模擬空間内の部分的な加温や換気口制限がない実験で、水素濃度がある程度高い場合 に、上部換気口からの断続的な外気流入が観測された。
 - ・模擬空間に部分的な加温部分がある場合には、空間内の水素濃度は明確に低くなった。
 - ・模擬空間内で換気を阻害すると考えられる大きな構造体の存在や、換気口面積の制限 は、拡散挙動に影響を与えるが、水素濃度の最大値に大きな影響は見られなかった。
 - ・水素放出口付近以外で、水素濃度が水素の爆発下限界濃度である 4vol%を超えている 部分はないと考えられる。爆発下限界濃度の 1/4 である 1vol%を超えている部分の体積 を大きめに推定すると、560 ml/min 程度の放出量での基本条件と上部放出、構造体設 置では、240L 程度、換気口制限条件では 1800L 程度であった。

2.2 水素の拡散挙動シミュレーション

本項では、実験で使用の模擬空間および周辺構造物を形状モデル化し、水素漏えい流量 や漏えい位置の違い、発熱体の加熱や模擬空間扉の温度などを条件に水素拡散挙動を数値 シミュレーション解析した。これらの条件の違いが漏えい拡散挙動に与える影響を事前調 査し、また実験で得られた結果については数値解析結果と比較・検証した。数値シミュレ ーションは実験における環境温度変化などの擾乱要因を起因とする濃度変化を除けば、定 性的にだけでなく、定量的にも実験再現性のある解析結果を示した。次に、各条件下で模 擬空間内濃度分布、流速分布を比較することで模擬空間内での拡散挙動について調査する とともに模擬空間内換気に対する有効性等を評価した。

2.2.1 シミュレーション手法と計算条件

2.2.1-1 シミュレーション手法

模擬空間内での水素漏えい、漏えい拡散挙動を解析し、模擬空間内外での水素濃度分布を シミュレーションするため、本研究ではアメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)で開発・公開されている Fire Dynamics Simulator (FDS)を採用した[FDS,2013]。FDS の特徴としては、低マッハ近似 LES、陽的二次精度 保存式、スタッガード構造格子、埋め込み境界法、Deardorff 乱流クロージャモデル[Deadorff, 1980]、などをデフォルトのモデルとしている。名前の通り火災現象を解析対象としている が、閉鎖空間への水素漏えいを想定したヘリウム代用での漏えい実験を元に検証も行って おり[FDS, 2013-2, and Pitts, 2011]、模擬空間内での水素漏えい拡散挙動解析にも適用でき ることが期待される。

水素漏えいは計算モデル中に放出口を設け、この表面に実験と同じ流量となるように流入 境界を設けた。また、温度場がある場合には模擬空間内部に流れ場が形成されるので、一 定時間経過後に水素漏えいを開始した。FDS では物体は基本的に伝熱を考慮するが、模擬 空間内部壁面、および廊下壁・天井・床面は実験を模擬するため断熱条件とした。模擬空 間扉部分は断熱条件とせず、初期条件を環境温度とした以下の熱伝達モデルを基本条件と して適用した。

$$h = \max\left[C\left|T_g - T_w\right|^{\frac{1}{3}}, \frac{k}{L}N_u\right] \left(W/(m^2 \cdot K)\right)$$

hは熱伝達率、 T_w は壁面温度、 T_g は接触ガス温度、Lは代表長さ、kはガスの熱伝達率、Cは自然対流に関する経験的係数である。Nuはヌセルト数で以下の形式で表される、

Nu =
$$C_1 + C_2 \operatorname{Re}^n \operatorname{Pr}^n$$
; Re = $\frac{\rho |\boldsymbol{u}| L}{\mu}$; Pr = 0.7

平面では C1=0, C2=0.037, n=0.8, m=0.33, そして L=1 m をデフォルト値としている。扉加

熱条件でのシミュレーションについては定温条件を適用した。FDS では重力は z 軸負の方向に働くようデフォルト設定されており、そのまま適用した。LES パラメータについても FDS では Deardorff の乱流粘性係数をデフォルトで適用しておりそのまま適用した。

$$\mu_{\rm LES} = \rho C_v \Delta \sqrt{k_{sgs}}$$

Cv はモデル定数 (0.1)、k_{sgs は}サブグリッドスケール運動エネルギーで Bardina のモデル [Bardina、1980]をベースにしている。圧力に関しては、低マッハ数近似に基づく NS 方程 式を使用しているが、本解析においても流れ場の速度は十分に音速より低いためこのまま 適用した。その他具体的な計算場などの条件については次項で述べる。

2.2.1-2 計算条件

模擬空間内の寸法は高さ 220 cm,幅 100 cm、奥行き 160 cm である。模擬空間前面扉に 対して、幅 85 高さ 18.5 cm の開口部を天井から 14.25 cm の位置が開口部中心になるよう に設けて上部換気口とした。さらに、高さ 23 cm、幅それぞれ 28、43 cm の二つの下部換 気口を底面から 16.5 cm の位置が開口部中心になるよう設置した。扉以外の模擬空間内壁 は断熱条件とした。 模擬空間内に扉面から 30 cm 離れた位置を起点に、高さ 220 cm,幅 5 cm、奥行 29 cm の小型の構造物を設置した。なお、小型の構造物は燃料電池を模擬するも ので、周辺環境と同じ温度とし、発熱がない場合を模擬した。以上を基本条件とする。図 2.2.1-1 に計算場を示す。模擬空間内は発熱体(発熱無し)を標準とするが、扉加熱の場合 は、実験との比較のために、発熱体も存在しない条件とした。発熱体の他、構造物による 拡散挙動影響を評価する条件として、扉から 15 cm 離れた位置を起点に、幅 80 cm、奥行 45.5 cm、高さ 175 cm の構造物を設置した(図 2.2.1-1 (d))。

開口部有効面積の効果を見るため、基本形状の開口部の他、上下換気口ともに有効面積が 100 cm²になるよう、上換気口は高さ 1.2 cm、下換気口 2 口はともに高さ 1.6 cm となるよ う換気口を設けたモデルを構築した。この場合換気口高さが狭くなるため、計算メッシュ を部分的に細分化させて換気口を介しての流体流れを模擬できるようにした。

46





(a) 正面

(b) 側面





(c) 模擬空間内部(発熱体のみ)(d) 模擬空間内部(構造物あり)図 2.2.1-1 計算場



数値シミュレーションとの比較に用いた計測点(計測点)は以下のようである。 天井高さ A21, A22, A23 上換気口高さ A10, A13, A16 パイプシャフト中心高さ A11, A14, A17 下換気口高さ A12, A15, A18 天井 A21 と A22 は水素放出口の直上でそれぞれ右と、手前に 5cm 離れた点 天井を除いて数字の小さい順で奥の壁近傍、奥行き方向の中間点、扉近傍の計測点である。 実験との比較において数値シミュレーションはパイプシャフト幅中心ライン上の出力値 を用いた。

図 2.2.1-2 実験と数値シミュレーションとの比較における濃度計測点との対応

2.2.2 シミュレーション結果

2.2.2-1 実験と数値シミュレーションとの比較

模擬空間内で各点の水素濃度履歴について実験と数値シミュレーション結果との比較を ml/minの結果であり、実験では他の条件との比較のために基本条件とした。天井(同図(a)) では水素濃度の推移は両者とも 0.1—0.15 %程度である。ただし、実験において 500 秒経過 した後に、数十秒で水素濃度が 0.55 %程度まで上昇した後に下降し、もとの 0.1-0.15 % 程度に戻る履歴が得られている。この状況はシミュレーションでは見られないことから、 実際はシミュレーションに比べて拡散の進行が遅く局所的に高濃度の分布が存在している と考えられる。同図(b)は上換気口高さの結果である。実験で高い濃度履歴を示しているの は奥の壁近傍の計測点(A10)であり、扉に近いほど低い水素濃度になっている。この傾向 はシミュレーションでも得られており、さらに、扉近傍では両結果が重なる程度の良い一 致が確認された。模擬空間中心高さ(同図(c))では奥の壁近傍では 0.2%を超える濃度が実 験とシミュレーションの両者で確認され、奥行き方向の中間点と扉近傍では、両者とも 0.04%以下の濃度となった。下換気口高さでは、他の高さと比べて水素濃度は極端に低く、 瞬間的な濃度上昇を除いて、おおよそ 0.01 %以下の濃度での推移で両者が一致している。 以上の結果ら本数値シミュレーションは基本条件について定性・定量的に実験と良い一致 を示しており、実験を再現する結果となっている。

図 2.2.2-4 ならびに図 2.2.2-5 の条件は放出流量をそれぞれ 130 ml/min, 50 ml/min とし た以外は基本条件と同じである。流量が 130 ml/min では、概ね基本条件における比較と同 様であり、実験とシミュレーションはよく一致している。一方、50 ml/min の場合、実験結 果はシミュレーションと比べて、天井、上部換気口高さ、ならびに模擬空間中心高さ位置 では低い値となっており、逆に下換気口高さでは高い濃度となっている。550 ml/min なら びに 130 ml/min の両方で実験とシミュレーションが良い一致を示したことから、流量が少 ない場合は模擬空間外部からの影響を受けやすく、本シミュレーションではその影響を考 慮できないために流量 50 ml/min では両者違いが現れたと考えられる。

図 2.2.2-6 は模擬空間内に 40 ℃発熱体が配置された場合の結果である。天井、模擬空間 中心高さ、上換気口高さそれぞれの位置において実験とシミュレーションは良い一致を示 している。図 2.2.2-7 は扉温度 40℃の場合、図 2.2.2-8 は換気口有効面積を 100 cm² とした 場合の実験とシミュレーションの比較であり、両条件で両者の良い一致が確認された。

49



図 2.2.2-3 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出,基本条件(発熱体の発熱無し)、実験の流量は 570 ml/min



図 2.2.2-4 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出,発熱体の発熱無し、実験の流量は 139 ml/min



図 2.2.2-5 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出,発熱体の発熱無し、実験の流量は 50 ml/min



図 2.2.2-6 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出,発熱体(40℃)、実験の流量は 570 ml/min



図 2.2.2-7 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出, 扉加熱(40℃)、実験の流量は 570 ml/min



図 2.2.2-8 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 下部放出、換気口の有効面積 100 cm²、570 ml/min





(b) 50 ml/min

図 2.2.2-9 実験とシミュレーションとの比較(水素濃度履歴) 上部放出、実験の流量はそれぞれ 51, 140, 570 ml/min:

2.2.3 数値シミュレーションによる模擬空間内濃度変化に関する検討

シミュレーション結果をもとに、放出流量、発熱体の発熱、扉温度、換気口面積、漏位 置の影響について検討する。

2.2.3-1 放出流量の影響(550, 130, 50 ml/min)

図 2.2.3-1 は基本条件(550 ml/min) について、水素放出開始 15 分後の濃度と速度を示 す。水素放出に伴い、上部換気口からは内部の気体を流出し、下部換気口からは外部から の空気が流入する流れが生じ、その結果、放出口から模擬空間内に供給される水素が壁の 奥の方に曲げられ上部から水素濃度の高い分布が生じる様子が確認された。この傾向は流 量が 50,130 L/min の場合も同様である。また、550 ml/min の流量では上下換気口からの 流速は概ね 0.06 m/s 以下であった。図 2.2.3-2 は各条件で最も水素濃度が高くなる天井中央 の濃度分布を各流量で比較した。本数値解析ではどの放出流量でも模擬空間内水素濃度は 定常になり、天井での濃度が流量の大きい順に 0.11,0.048,0.028 vol%であった。

2.2.3-2 模擬空間内に熱源が存在する条件について(発熱体(40℃)、扉加熱(40℃))

基本条件、発熱体(40℃)、扉加熱(40℃)について、図 2.2.3・3 では濃度分布を、図 2.2.3・4 では速度分布をそれぞれ比較した。図 2.2.3・3 では、基本条件では上部ほど濃度が高い分布 となるのに対して、模擬空間内の熱源がある場合、すなわち、発熱体(40℃)(同図(b))、扉 加熱(40℃)(同図(c))の場合は上部よりも模擬空間中間高さ付近で、他の場所より高い濃 度分布が存在する。図 2.2.3・4 は流速分布を比較した。上換気口から流出し、下換気口から 流入する模擬空間内流れは、基本条件と同様であった。模擬空間内の熱源がある場合、そ の影響で模擬空間内に基本条件より大きい流速を持った複雑な流れ場が生じ、同時に上下 換気口からの流速が大きくなっている。このため、熱源がある場合は模擬空間内の換気が 促進され、基本条件と比べて濃度上昇が抑えられる。また、熱源がある場合、換気口から の放出速度は 0.27 m/s 以上であった。図 2.2.3・5 に換気口から流入・流出する気体の質量流 量を基本条件と発熱体(40℃)の場合について示す。図中 mass flow+が流出を、mass flow - は流入を示す。上換気口から流出量は基本条件で 0.01 kg/s 程度で、発熱体(40℃)場 合では 0.03 kg/s 程度で安定し、後者は前者の 3 程度になった。

57





濃度(10⁻² vol%) 速度(m/s)

図 2.2.3-1 基本条件の濃度分布(上)と速度分布(下)(水素放出開始から 15 分の分布)



図 2.2.3-2 水素放出流量の影響(出開始から 15 分の分布)



 (c) 扉加熱(40℃)
図 2.2.3-3 基本条件、発熱体(40℃), 扉加熱(40℃)における結果の比較 (流量 550 ml/min, 放出開始から15分の濃度分布)



 (c)扉加熱(40℃)
図 2.2.3-4 基本条件、発熱体(40℃),扉加熱(40℃)における結果の比較 (流量 550 ml/min,放出開始から15分の速度分布)



図 2.2.3-5 換気口から流入・流出する気体の質量流量の比較(基本条件と発熱体(40℃))

2.2.3-3 構造物、換気口面積 100 cm² に対するシミュレーション結果

模擬空間内の換気を阻害する要因として模擬空間内に構造物が存在する場合、ならびに 換気口面積が100の場合についてシミュレーション結果より検討する。図2.2.3-6では基本 条件、構造物あり, 換気口 100 cm²における濃度分布を、図 2.2.3·7 では流速分布をそれぞ れ比較した。模擬空間内では3者とも上換気口から流出し、下換気口から流入する流れに なっている。また、基本条件では放出口から放出した水素は下換気口からの流れで曲げら れていることが確認されたのに対し、構造物がある場合と、換気口 100 cm²の条件では水 素はほぼ直上へ浮上している。模擬空間内の濃度上昇は換気口 100 cm²の条件で顕著に高 く、構造物がある場合が次に高い濃度分布を示している。模擬空間内流れについては図 2.2.3-7 の流速分布でも同様である。図 2.2.3-8 基本条件,構造物あり,換気口 100 cm²におけ る濃度分布および質量流量の比較を示した。すべての条件で天井における濃度が最も高い ため、同図(a)では天井中央での濃度履歴を比較した。最初の 150 秒程度では 3 者とも履歴 が一致しており、その後の挙動が換気の違いの影響である。基本条件と構造物では濃度履 歴に大きな差はないのに対して、換気口 100 cm²の条件では、他者と比較して顕著な濃度 上昇を示した。同図(b)—(d)には各条件での換気口からの質量流量を示した。同図(b)と(c) の縦軸が同じであるのに対して、(d)は1/10のスケールでプロットした。上換気口からの質 量流量を比較すると基本条件 0.01 kg/s, 構造物ありの場合で 0.07 kg/s で安定した質量流量 であるのに対して、換気口 100 cm²の条件では、同一時刻でまだ安定していない条件では あるものの基本条件と比べて約 1/10 であった。換気口 100 cm²の条件は他の条件と比べて、 模擬空間内の換気が促進されずに水素濃度の上昇が顕著になるものと考えられる。



(c) 換気口面積 100 cm²

図 2.2.3-6 基本条件、構造物あり, 換気口 100 cm² における濃度分布の比較 (流量 550 ml/min, 放出開始から 15 分の速度分布)



 (c)換気口面積 100 cm²
図 2.2.3-7 基本条件、構造物あり,換気口 100 cm²における流速分布の比較 (流量 550 ml/min,放出開始から 15 分の分布)



(c)換気口から流出入する気体の質量流量(障害物)



図 2.2.3-8 基本条件,構造物あり,換気口 100 cm²における濃度分布および質量流量の比較 (流量 550 ml/min) 2.2.3-4 上部放出に関するシミュレーション結果

図 2.2.3-9 と図 2.2.3-10 はそれぞれ、濃度分布と流速分布を示しており、基本条件、上部 放出(550 ml/min),上部放出(130 ml/min)の条件を比較した。下部放出の場合は、全 ての条件で放出口近傍を除いて1 vol%よりも低い濃度分布であったのに対して、上部放出 では 1vol%を超える濃度が天井で確認されたため、濃度は最大値(赤色)を1.5vol%として 表示した。図 2.2.3-9 で確認されるように上部放出の場合は、同図(b)、(c)とも天井から上部 換気口の高ささでのみ濃度上昇が確認されそれ以外の空間では濃度上昇がない。この傾向 は実験とよく一致している。同図(b)の 550 ml/min の条件で、放出口近傍の天井付近では 1.5vol%程度のまで濃度上昇があった。図 2.2.3-10 より、上部放出の場合でも上換気口から 流出、下換気口から流入の流れができた。流速は上部放出の方が下部放出よりも小さく、 上部放出の方が模擬空間内の流れの乱れが小さいと判断できる。



(c) 上部放出(130 ml/min)

図 2.2.3-9 基本条件(550 ml/min)、上部放出 (550 ml/min), 上部放出(130 ml/min)における濃度分布の比較(放出開始から 15 分の速度分布)



(c) 上部放出(130 ml/min)

図 2.2.3-10 基本条件(550 ml/min)、上部放出 (550 ml/min), 上部放出(130 ml/min)にお ける速度分布の比較(放出開始から 15 分の速度分布)

2.2.3-5 実験とシミュレーションの比較の考察

数値シミュレーションでは、模擬空間内の水素濃度は一部の条件(換気口面積 100 cm²) を除き 15 分程度で定常、あるいは準定常状態で安定した。一方、たとえば基本条件に代表 されように、実験では 15 分よりも後の時刻でも模擬空間内の濃度上昇が続いた。さらに、 それらの条件では上換気口の外部 20 cm の位置で顕著な濃度変動が確認されており、原因 として、上換気口からの一時的な外気流入が挙げられた。また、顕著な変動が起こる場合 は、全て換気口からの流出速度が弱い条件であった。この現象をシミュレーションと実験 を比較することで検討する。

上述の上換気口からの外気流入に着目するために、評価点として上換気口の外部 20 cm の位置についても示した。2.2.2-1節で放出開始後 15 分程度は実験とシミュレーションがよ く一致することを示した。図 2.2.3・11 に、時間軸を 1 時間として、再度基本条件について 実験とシミュレーション結果を比較する。同図(a)は天井における濃度履歴の比較であり、 水素が放出された後、15 分よりも以降の時刻で両者の顕著な違いがある。同図(b)は天井 (A23)、上換気口高さ断面の外部 20 cm (B15)、ならびに下換気口高さ断面の中央での濃度 履歴を示した。B15 の濃度が低下する時刻とほぼ連動して、A23 の濃度上昇が起こってい る様子が分かる。このことは外気の流入で B15 の濃度低下が生じ、その流れは水素を模擬 空間内に停留させる原因となり模擬空間内の濃度上昇につながると考えられる。同図(b)で は下換気口高さ中央部での濃度履歴も赤線で示した。1000 秒程度で微量の濃度が確認され て初め、2000 秒程度からは明らかな濃度上昇となっており、模擬空間内部全体で濃度上昇 が進行しつつあると考えられる。同図(c)と(d)により実験と数値シミュレーションにおける B15 での濃度履歴を比較した。同図(d)の数値シミュレーションでは水素濃度は 0.06vol%を 中心に同じ振幅で振動しながら推移するのに対して、実験(同図(c))では水素放出後1100、 2600 秒後に明らかな水素濃度の減少がある (図中→で示す)。 この濃度変動については上換 気口からの流速との相関も疑う必要がある。すなわち、ある弱い流れが模擬空間外に発生 し、それが水素を模擬空間内に停留させる原因となり、上換気口からの流れが最も弱い 50 mL/min の条件では、外部からの流れによって天井の濃度まで影響を受けて、実験で得られ る濃度履歴は数値シミュレーションよりも低くなったと考えると尤もらしい。いずれにし ても、基本条件 550 mL/min における上換気口からの流速は数値シミュレーションにより 0.06 m/s 程度と評価されており、現実的には外部空間の気流が弱くとも、その影響を考慮 する必要がある。



(a) 天井における実験とシミュレーションとの比較
(b) 天井、PS 外部、下換気口
(基本条件)



(a) 天井における実験とシミュレーションとの比較
(b) 天井、PS 外部、下換気口
(基本条件)

図 2.2.3-11 実験とシミュレーションとの比較(基本条件(550 ml/min))

発熱体が発熱する場合は模擬空間内外に比較的強い気流が発生するために、実験室空間 でおこるゆるやかな気流の影響が相対的に小さくなると考えらえる。そこで、代表的なケ ースに対してシミュレーションを長時間実施して、実験との比較を行った。

図 2.2.3-12 には発熱体の発熱(40℃)条件に対する実験と数値シミュレーションの比較 を示す。実験とシミュレーション結果は良い一致を示している。模擬空間内に高温部分が 存在することによりドラフト効果が発生して換気流量が大きい場合は、模擬空間外部で起 こるゆるやかな流れ場の変動の影響は相対的に受けにくく、数値シミュレーションは実験 を再現すると考えられる。一方、実験で見られる濃度変動は外部のゆるやかな流れ場の影 響であるとするならば、実験室内で発生しているゆるやかな流れ場を数値シミュレーショ ンで再現すれば、実験で見られるような濃度変動も少なくとも定性的には再現できると考 えられる。



図 2.2.3-12 発熱体の発熱(40℃)条件に対する実験と数値シミュレーションの比較 (下部放出 560 ml/min)
2.2.4 詳細シミュレーションおよび模擬空間換気量の検討

模擬空間内水素漏えい拡散シミュレーションの検討では、主に FDS を用いて数値シミュ レーション評価した。評価の結果、FDS による計算で定量的な評価が可能であることを示 したが、汎用 CFD コードを使用して大規模計算による拡散シミュレーションの検討を行 い、メッシュ解像度の点で FDS の結果と比較した。また、実験では未評価の換気口を介し ての模擬空間換気量について検討した。

2.2.4-1 詳細シミュレーション

FDS も並列計算は可能だが、並列性能の面からも大規模並列計算には向いておらず、大 規模計算用の汎用 CFD コードとして Advance/FrontFlow/red(アドバンス株式会社製、ffr) を今回適用した。比較時の条件は放出量 550 ml/min の下部放出とし、換気口開口部を標準 (約 1000 cm²) サイズ、構造物がある場合を評価した。

FDS については 2.2.1-1 の通りなので、ffr について述べる。本コードは流体を低マッハ 数近似による圧縮性流体として取扱い、LES (Large Eddy Simulation)ならびに RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)によるシミュレーションが可能である。本問題では、 空気と水素の混合気体を取扱い、各化学種の質量分率による拡散方程式を解いた。

計算格子の概要を 2.2.4-1 に示す(下部放出 550 ml/min、構造物あり)。水素放出源の模擬空間底部中央部にて、可能な限り高解像度を確保するため中央部に計算格子を集中させ、中央部で細分化格子、中央部から離れるにつれて粗格子となるようメッシュ形成している。最大格子拡大率は模擬空間内で約 1.4 倍、外部領域で約 2 倍である。水素放出口は φ20 と等価面積の正方形で置き換えた。Case1 の格子数は節点数が 4,130,193、要素数が 3,990,884、Case2 は節点数が 4,689,066、要素数が 4,568,042 である。原点はいずれも正面扉最下部の中心位置とした。換気口は有効面積 70%をソフトの設定で反映させた(メッシュは設計通りの寸法で作成)。外部領域は模擬空間内の計算に影響を与えないように広めに設け、幅 3m、奥行き 2.2mとした。Case2 においては換気口を上・下共に 100 cm2 相当になるように上記指示どおりの寸法でふさいである。放出高さは下換気口中心の高さである。

流体は圧縮性流体として取り扱い、乱流モデルは LES モデルを採用し非定常解析を行っ た。LES のモデル定数 Cs は 0.1 とした。重力はその点の混合気体の密度 ρ を用いて鉛直 下方に大きさ ρg で計算される。ここで g は重力加速度である。水素の質量分率の分布に むらがあると、水素濃度の高い部分の重力は相対的に小さくなるために実効的な浮力が発 生し上昇する。時間積分については、運動方程式はクランク・ニコルソン法を用いた。空 間差分は有限体積法を用いて離散化を行っており、精度は 2 次精度中心差分法を採用した。 時間刻みは 0.01 秒とした。空気及び水素の物性値を表 2.2.4-1 に示す。



図 2.2.4-1 基本計算格子概要

	空気	水素
分子量[kg/mol]	0.02897	0.002
生成エンタルピー[J]	0	0
参照温度[K]	298	298
比熱[J/kg/K]	1006.1	14317
Lewis 数[]	1.00	0.30

表 2.2.4-1 空気及び水素物性値

ffr の計算結果を FDS で代表メッシュサイズ 1cm(、および 2cm で実施したの同じ水素放出・構造物設置条件の結果と比較した。

図 2.2.4-2 に Y 方向断面における水素の体積分率図を示す。時間は放出から 5 秒、10 秒、 20 秒、30 秒秒経過後の様子である。放出開始直後から浮力により水素が上昇を始め、天井 まで至る。天井から徐々に水素濃度が上昇していくことが確認できる。放出後の水素の上 昇挙動は、解像度の影響をうけ、FDS では細かな乱れが表現されていないが、ffr では細か な乱れが再現されている。図 2.2.4-3 には X 方向の断面図を示す。FDS1cm もしくは ffr の 結果を見ると、放出口から放出した水素は天井に至った後、模擬空間側壁面に沿って流れ る挙動が見られ、また次第に水素は天井から下に向かって濃度が高くなっていることが分 かる。全般的な挙動は FDS と一致している一方、格子を細かくしているため、FDS による 解析より放出後の水素の立ち上り挙動が高精細に解像している。ffr では、水素放出による 中心軸での上方向の流れ場のほか、左右非対称な流れ場となっており、水素放出による流 れ場が準定常的になっても、時間的にはゆらぎをもってながれ場が変動することを示して いる。このような模擬空間内の空間的に微細な挙動を解析するには必然的にメッシュ解像 度を高くする必要がある。一方で、ffrでの計算 intel xeon x5590 プロセッサ(3.33GHz)を 16CPU(128 コア)で計算した場合実時間 10 秒の計算に1日を要する計算負荷となってお り、本事業のように多数の要因をパラメータとして調査する場合は、使用する計算機資源 と計算精度と調査項目数の兼ね合いから、計算精度を調整する必要がある。実験で見られ たような外部環境要因と考えられる外気の模擬空間への流入による模擬空間内の水素濃度 の急激な低下や、上部換気口からの断続的な外気流入などの現象などの検討には、ffr など での大規模詳細計算による評価が必要になってくると考えられる。



	FDS	5(2cm)			
FDS(2011)					
FDS(1cm)					
		2			
frontflow/red(fine)					
図 2.2.4-3 X 方向断面水素分布					
(水素体積分率、X=-135 cm : 放出口位置)					
放出開始後 5, 10, 20,30 秒					

数値シミュレーションでは、上下各換気口を介して模擬空間に流入・流出する流体をモニ タリングし、これをもとに単位時間当たりの換気流量を検討した。図 2.2.4-4 に実験 No.1-4、図 2.2.4-5 に No.5-10 の単位時間当たりの流入・流出量を示した。No.7 に関しては流量 が完全に定常に至っていないため、換気量はより大きくなると考えられる。水素放出位置 は下部にあるほうが、水素の上昇による効果により換気が促進される傾向がある。模擬空 間に温度差が発生する発熱体条件(No.4)や扉加熱条件(No.5)では発熱物がない条件に比べ 換気量が数倍も増大し、換気に関して最も換気の促進に影響を与えている。

換気流量をもとに、1時間当たりの模擬空間換気回数を評価したものを表 2.2.4-2 に示した。 換気口 100cm²が換気回数 1回程度になるのに対し、換気量が大きく評価された No.4 およ び No.5 の条件では換気回数は 20 倍以上の換気回数となった。



図 2.2.4-4 各換気口流入・流出量(上部換気口は外方向、下部換気口は内方向)



		上換気口から	換気回数
実験 番号	実験条件	の排気速度	(回•hour ⁻¹)
, I		(•s ⁻¹)	
1	50 ml/min	4.9	5
2	130 ml/min	5	5
3	550 ml/min	8.5	8.7
4	発熱体あり	27	27.6
5	扉を加熱	19.5	20
6	構造物あり	6.4	6.5
7	換気口を制限	1	1
8	上部放出・50 ml/min	1.3	1.3
9	上部放出•130 ml/min	1.3	1.3
10	上部放出•550 ml/min	1.85	1.9

表 2.2.4-2 各条件における換気回数

2.2.5 シミュレーションまとめ

本項では、模擬空間および周辺構造物を形状モデル化し、水素放出流量や放出位置の違い、発熱体の加熱や模擬空間扉の温度などを条件に水素拡散挙動を数値シミュレーション 解析した。

- 水素放出条件、および模擬空間内での各種機器の設置条件が漏えい拡散挙動に与える影響を調査して実験で得られた結果と比較・検証した。
- 数値シミュレーションは実験における環境温度変化などの擾乱要因を起因とする濃度 変化を除けば、定性的にだけでなく、定量的にも実験再現性のある解析結果を示した。
- 各条件下で模擬空間内濃度分布、流速分布を比較することで模擬空間内での拡散挙動について調査するとともに模擬空間内換気に対する有効性等を評価した。
- 実験では評価できなかった、模擬空間内での流れ場の形成過程や、換気量の評価などを 評価し、実験結果の再現ではなく、換気の阻害要因の検討や、改善対策を行うための設 計支援にも有効に活用できることを示した。

参考文献

- [FDS, 2013] Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume1, NIST Special Publication 1018-1, NIST (2013).
- [Deardorff, 1980] J.W. Deardorff. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. Boundary-Layer Meteorol., 18:495–527, 1980.
- [FDS, 2013-2] Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume3, NIST Special Publication 1018-3, NIST (2013).
- [Bardina, 1980] J. Bardina, J. H. Ferziger, and W. C. Reynolds. Improved Subgrid Scale Models for Large Eddy Sim- ulation. In AIAA 13th Fluid & Plasma Dynamics Conference, AIAA-80-1357, Snowmass, Colorado, July 1980. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [Pitts, 2011] W.M. Pitts, J.C. Yang, and M.G. Fernandez. Experimental Characterization of Helium Dispersion in a 1/4-Scale Two-Car Residential Garage. NIST Technical Note 1694, NIST (2011).

3. まとめ

本研究では、一般集合建物内への水素配管供給を行った際の、模擬空間内における配管 継手部からの水素漏えいを想定した水素の拡散挙動(濃度分布の経時変化)を調査するた め、室内実験を実施した。

- ・ 模擬空間内での水素の拡散挙動を調べるため、漏えいを模擬した水素放出速度の違い、 漏えい位置を模擬した水素放出位置の違い、模擬空間に部分的な加温部分がある場合、 模擬空間内の構造物や換気ロ形状で換気に制限がある場合の計 10条件で、水素放出実 験を行った。
- 10条件、全11実験において2つの実験では、外部環境要因と考えられる外気の模擬空間への流入により、模擬空間内の水素濃度が急激に低下する様子が観測された。また模擬空間内の部分的な加温や換気口制限がない実験で、水素濃度がある程度高い場合に、上部換気口からの断続的な外気流入が観測された。
- ・ 模擬空間に部分的な加温部分がある場合には、空間内の水素濃度は明確に低くなった。
- ・ 模擬空間内で換気を阻害すると考えられる大きな構造体の存在や、換気口面積の制限は、
 拡散挙動に影響を与えるが、水素濃度の最大値に大きな影響は見られなかった。
- 水素放出口付近以外で、水素濃度が水素の爆発下限界濃度である 4vol%を超えている部分はないと考えられる。爆発下限界濃度の 1/4 である 1vol%を超えている部分の体積を 大きめに推定すると、560 ml/min 程度の放出量での基本条件と上部放出、構造体設置 では、240L 程度、換気口制限条件では 1800L 程度であった。

数値シミュレーションでは、模擬空間および周辺構造物を形状モデル化し、水素放出流 量や放出位置の違い、発熱体の加熱や模擬空間扉の温度などを条件に水素拡散挙動を数値 シミュレーション解析した。

- 水素放出条件、および模擬空間内での各種機器の設置条件が漏えい拡散挙動に与える影響を調査して実験で得られた結果と比較・検証した。
- 数値シミュレーションは実験における環境温度変化などの擾乱要因を起因とする濃度 変化を除けば、定性的にだけでなく、定量的にも実験再現性のある解析結果を示した。
- 各条件下で模擬空間内濃度分布、流速分布を比較することで模擬空間内での拡散挙動について調査するとともに模擬空間内換気に対する有効性等を評価した。
- 実験では評価できなかった、模擬空間内での流れ場の形成過程や、換気量の評価などを 評価し、実験結果の再現ではなく、換気の阻害要因の検討や、改善対策を行うための設 計支援にも有効に活用できることを示した。