## 平成26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27年 3月

独立行政法人産業技術総合研究所

## 目次

1.	調査	研究の目的等	1
	1.1	調査研究の目的	1
	1.2	調査研究の概要	1
2.	調査	研究の結果・評価	2
	2.1	野外実験場及び設備の概要	2
	2.2	実験方法	6
	2.3	実験結果	8
	2.4	模擬空間内水素漏えい拡散挙動シミュレーション	214

#### 1. 調査研究の目的等

### 1.1 調査研究の目的

本調査研究の目的は、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 全基準や工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、 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である。

#### 1.2 調査研究の概要

水素は、燃焼や燃料電池での酸化反応によりエネルギーを放出する際、生成物として水 のみを排出するクリーンな燃料としてその普及が期待されている。水素の物性は古くから よく研究・報告されており、近年では最小着火エネルギー、火炎伝播速度、予混合爆発に おける爆風圧、爆轟遷移転移距離等、燃焼爆発に関する危険性を評価するための実験的デ ータも多く報告されている。しかしながら新たなシステムを用いて可燃性ガスを供給・使 用するにあたっては、そのシステム全体の安全性の確認が必要であり、そのためには新た なシステムで起こりうる事故の発生頻度と被害程度が許容できる程度かを調査し、必要な 場合には許容可能な範囲に収めるための対策をとる必要がある。

平成23年度から平成25年度の3年間、同様のテーマにおいて、中低圧の水素導管を対象とし、漏えい時の水素の拡散・着火挙動調査(平成23年度及び平成24年度)、及びさまざまな径の導管における空気から水素への置換挙動調査(平成24年度及び平成25年度)などを行ってきた。平成26年度は、一般集合建物内への水素配管の保安確保対策へと軸足を移し、実際に水素の供給を行った際の、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、パイプシャフトを模擬した空間内への水素の流入が可能な環境を構築した上で、模擬空間内における水素の拡散挙動を確認することを目的とした調査を行った。また、実験で得られた水素の濃度変化をシミュレーションによって再現し、実験結果との比較検証を実施した。

調査に当たっては、平成25年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査の他の受託者や パイプラインガス供給事業者等と連携し、適切な想定を十分吟味した。調査事業を遂行す るにあたっては、扱う水素が大量となり最終的には大気に放出せざるを得ないため、安全 に十分配慮した上で野外実験において行うことを中心に実験計画を立てた。併せて野外実 験の前後に予備及び検証の実験を研究所内にて行った。 2. 調査研究の結果・評価

2.1 野外実験場及び設備の概要

実験に際しては、茨城県 日立セメント株式会社 太平田鉱山(日立市諏訪町1233)の 旧堆積場を借用し、平成26年12月8日~12月12日、12月15日~12月19日の2週間、 合計10日間に渡って行った。野外実験場の配置については図2.1.1に示す。民家までの距 離は最短で約1kmである。実験の実施にあたっては、可燃性のガスを扱うために事前に日 立市役所、多賀消防署等への説明を行った。



図 2.1.1 野外実験場内設備配置概略図

実験は、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、模擬空間内への水素の流入が可能な環境を構築した 上で、模擬空間内における水素の拡散挙動を確認した。

模擬空間は、幅 960mm、奥行き 1600mm、高さ 3000mm の鋼製の箱で、一面(前面)の みを内部観察のために塩化ビニル製とした。野外実験の際の周囲の風による影響を受けな いように、風除け用の空間(防護室)を外部に構築した。この防護室は太陽熱等の影響の対策 も兼ねた。換気条件を変更するために前面の塩化ビニル製の壁面は、着脱可能とし、換気 口有りのものと換気口無しのものを準備した。換気口有りの場合は、上部および下部に高 さ 10cm、幅 80cm、開口面積 800cm<sup>2</sup>の開口部を設けた。開口部のサイズが 100cm<sup>2</sup>の場合 は、この開口部の中央部の 10cm を除いてアルミニウムテープにより閉止し、高さ 10cm、 幅 10cm の開口部とした。模擬空間の概要図を図 2.1.2 に示す。

模擬空間防護室は、幅 3.7m、奥行き 3.7m、高さ 5.5m の プレハブ様式建造物(風、温 度などの影響から模擬空間を保護)で、耐火性と熱遮断性能のある素材で内部壁面と天井 を補強した。また、強制換気が可能な排風機 2 台をダクトで接続し、防護室の下部に 2 箇 所の送気口を設け、排風機で空気を送り込むとともに、防護室の上部に 2 箇所の排気口を 設け、ダクトと通じて水素が拡散した後の防護室内の空気を排出できるようにした。ただ し、実験中は送気口および排気口のダクトの末端を金属製のカバーで封止し、養生テープ ですき間を塞いで、外からの風の侵入を防いだ。防護室の概要図を図 2.1.3 に示す。



図 2.1.2 模擬空間概要図 (前面は着脱可能な塩化ビニル製の壁面でその他は鋼製)





# 図 2.1.3 防護室概要図

水素は充填圧 14.7MPa 未満、容積 47L のボンベ1本を用い適宜交換して供給した。パージ用の窒素も同じく充填圧 14.7MPa 未満、容積 47L のボンベ1本を用い適宜交換して供給した。空気は充填圧 14.7MPa 未満の 47L ボンベ5本を簡易マニホールドで連結し適宜交換して供給した。他に遠隔操作用の空気圧作動弁を駆動するための窒素を観測所横に設置し使用した。この窒素は填圧 14.7MPa 未満、容積 47L のボンベ1本を用い適宜交換した。

ガスを供給するためのフローについては図 2.1.4 の通りである。ボンベから減圧弁を通じ 流量調整部へと至る。流量調整部では微小流量対応の減圧弁を通じマスフローメーターに 供給される。マスフローメーターによって流量を読みつつ目標値となるように流量の微調 整を行った。流量調整部からは 1/2 インチ銅配管を用いて計測設備までガスを導いた。流量 調整部から計測設備までの配管は全て断熱材を巻いて外気・太陽熱の熱的影響から保護し た。



図 2.1.4 ガス供給フロー図

#### 2.2 実験方法

実験の手順については以下の①~⑩の通りである。

(事前準備)

漏えい孔からの水素漏えい量が目的値となるよう調整 排気ダクトも末端を蓋で封止、防護室扉をシールテープで封止 模擬空間内部は防護室内に設置したビデオカメラで監視

- 初期状態、模擬空間、防護室内全て空気で充満 水素供給管内が水素で充填された状態でAV3、AV4 閉 AV11、AV12、AV13 閉、マグネット式換気口閉
- ② データロガーによる水素濃度及び熱電対測定の開始
- ③ AV4 を開
- ④ AV3を開操作と同時にトリガーパルスを発信・データロガーに記録、この操作を 行った時点を実験開始時間とする(操作から実際に AV3 が閉じるまで 10 秒未満の 遅れ)、即時に AV4 を閉の操作(操作から実際に AV4 が閉じるまで 10 秒未満の遅 れ)

### $\downarrow$

水素漏えい 漏えい中水素流量と管内圧力はデジタル表示器によって目視による監視

- ⑤ 以下のいずれかの条件に達した時点で水素漏えい終了とみなす
  - ・最長で360分経過
  - ・いずれかの水素濃度センサーが1%に達する
  - ・模擬空間内水素濃度がいずれの測定点でも平衡に達する
  - ・その他、何らかの要因で実験継続が無意味もしくは困難と判断された場合
- ⑥ AV3を閉操作と同時にトリガーパルスを発信・データロガーに記録、この操作を行った時点を水素漏えい終了時間とする(操作から実際に AV3 が閉じるまで 10 秒未満の遅れ)、ただし水素濃度と熱電対測定は継続
- ⑦ 安全を確認しつつ排気ダクトの蓋を外し続いて送風機を運転、防護室内の換気を開始
- ⑧ AV12を開、圧力上昇によりマグネット式換気口の開をビデオモニタによって確認
- ④ AV12 閉、AV13 開、AV11 開、模擬空間内を空気で換気
- ① 全ての測定点(携帯式検知器含む)で水素濃度が0.1%未満であることが確認された時点で実験終了、すべてのデータを保存、防護室の扉を開け内部での作業開始

実際に行った実験の条件分類を表 2.2.1 に示す。

問口方氣	漏えい高さ	漏えい量		実際に行われた実験	
两口有黑			目初志と	水素流量	開口面積
	上面から12cm	小	50mL/min以上で6時間以内に滞留が観測される 最小値	50mL/min	密閉
		中	6時間以内であらゆる測定点の滞留が4%未満である 最大値	133mL/min	
索門		大		550mL/min	
密闭	底面から12cm	小	50mL/min以上で6時間以内に滞留が観測される 最小値	50mL/min	密閉
		中	6時間以内であらゆる測定点の滞留が4%未満である 最大値	133mL/min	密閉
		大		550mL/min	密閉
	上面から12cm	小	問ロで進ゆが10月にわることを変列	50mL/min	
		ф	用口で滞留が抑めされることを確認	133mL/min	800cm <sup>2</sup> 、100cm <sup>2</sup>
本 야 태		大	最も滞留が大きく観測される計測点を含む数点で 4%に達する量(速度)未満(~3.2L/min程度)	550mL/min	
干部闭	底面から12cm	小	問ロで濃ゆが加制されてことた変列	50mL/min	800cm <sup>2</sup>
		中	対ロて7年田小が中心になってて唯認	133mL/min	800cm <sup>2</sup> 、100cm <sup>2</sup>
		大	最も滞留が大きく観測される計測点を含む数点で 4%に達する量(速度)未満(~32L/min程度)	550mL/min	800cm <sup>2</sup>

表 2.2.1 実験条件分類一覧

- 2.3 実験結果
- 2.3.1 実験データ
- (1) 実験番号:14121103

水素流量	133mL/m	in	
漏えい位置	床面から	12cm 上方、	上向きに噴出
開口面積	$800 \mathrm{cm}^2$		
天候	雨		
風速	1m/s	(測定開始時	<del>F</del> )
気温	温度計不調	調により計測	できず

センサー配置は表 2.3.1 及び表 2.3.2 の通りである。なお、基準点は塩化ビニル設置面左 下を 0,0,0 としてある。濃度計測は熱電式水素濃度センサーを H1~H24 として 24 点配置 した。温度の計測には K型シース熱電対 ( $\phi$ 1/16 インチ)を 10 個使用し 10 点の計測に使 用した。このうち熱電対 1~6 は模擬空間外部の各面の中心点近傍に金属テープを用いて貼 り付けて模擬空間筐体の温度測定に使用した。熱電対 7~9 は模擬空間の壁を貫通させて模 擬空間内部に設置し気体温度の測定に使用した。熱電対 10 は防護室内空間に浮かせて設置 し防護室内の気体の温度測定に使用した。

	x	У	z		х	У	z
H1	50	50	2950	H13	950	1050	2950
H2	50	550	2950	H14	950	1550	2950
H3	50	1050	2950	H15	650	50	2950
H4	50	1550	2950	H16	650	1550	2950
H5	350	50	2950	H17	950	800	2500
H6	350	1550	2950	H18	950	800	2000
H7	50	800	2500	H19	950	800	1500
H8	50	800	2000	H20	650	800	3000
H9	50	800	1500	H21	500	1550	2500
H10	500	1600	3000	H22	500	1550	2000
H11	950	50	2950	H23	500	1550	1500
H12	950	550	2950	H24	防護室ダクト		

表 2.3.1 熱電式水素濃度センサー設置位置

	x	У	Z		
熱電対 1	ᄷᄧᇢᅮᄮᆂᅅᅘ				
(天井)	[1] [1] [[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[				
熱電対 2					
(右側面)	[1] ····································				
熱電対 3	模擬室左側面外部				
(左側面)					
熱電対 4	模擬室背面外部				
(背面)					
熱電対 5	模擬室床面外部				
(床)					
熱電対 6	措格会抜ルビール あめ 約				
<ul><li>(塩ビ)</li></ul>		, לום			
熱電対 7	50	800	2900		
(空間内上部)					
熱電対 8	50	800	1700		
(空間内中部)	50				
熱電対 9	熱電対 9 (空間内下部) 50	800	500		
(空間内下部)		000	500		
熱電対 10	<b>佐港</b> 安中				
(防護室内)					

表 2.3.2 熱電対設置位置

図 2.3.1 にセンサーの配置を図示する。図 2.3.2・1~図 2.3.2・24 に水素濃度の測定波形を、 図 2.3.3 に熱電対による温度測定波形を示す。本実験では熱電式水素センサーの設定が上限 0.2%未満となっていたためにいくつかの測定点(H14、H21)では測定値が頭打ちとなり 正しい測定ができなかった。但し、他のセンサーの測定値と併せほぼ 0.1%程度で水素濃度 は平衡に達しており問題はないと判断された。なお、センサーの設定は電気的な信号のカ ットによるものであり他のセンサーの測定については問題がないことを確認済みである。



図 2.3.1 センサー設置位置 黒:H1~24 赤:熱電対 7~9



図 2.3.2-1 H1 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-2 H2 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-3 H3 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-4 H4 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-5 H5 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-6 H6 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形







図 2.3.2-8 H8 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-9 H9 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-10 H10 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-11 H11 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-12 H12 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形







図 2.3.2-14 H14 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-15 H15 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-16 H16 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-17 H17 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-18 H18 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-19 H19 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2·20 H20 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-21 H21 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-22 H22 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2·23 H23 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.2-24 H24 (実験番号 14121103) 水素濃度測定波形



図 2.3.3 熱電対 (実験番号 14121103) 温度測定波形

K型シース熱電対は測定精度が高くなく個体差もあり、またデータロガーまでの配線(間 に接点を挟みながら10m以上の補償導線で防護室外に設置)による影響なども免れないの で生の測定値は正確な温度を示していない。但し、実験14121103は良好な天候(気温・風 速)下で行われており、熱電対測定値も測定期間(90分)に渡りほぼ安定している。後述 する他の実験結果や前後の調査も併せ図2.3.3は熱電対の固有性による差を示しており、実 際には全て同じ温度であると判断できる。 (2) 実験番号:14121201

水素流量	50mL/min		
漏えい位置	床面から	12cm 上方	
開口面積	$800 \mathrm{cm}^2$		
天候	曇り		
風速	1m/s	(測定開始時)	
気温	7℃	(測定開始時)	

センサー配置は実験番号(2) 14121103 と同じく図 2.3.1 の通りである。図 2.3.4-1~ 図 2.3.4-24 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.5 に熱電対による温度測定波形を示す







図 2.3.4-2 H2 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-4 H4 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-6 H6 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-8 H8 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-10 H10 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-12 H12 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-14 H14 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-15 H15 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-16 H16 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-17 H17 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-18 H18 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形







図 2.3.4-20 H20 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形






図 2.3.4-22 H22 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-23 H23 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.4-24 H24 (実験番号 14121201) 水素濃度測定波形



図 2.3.5 熱電対(実験番号 14121201)温度測定波形

(3) 実験番号:14121501

水素流量	50mL/min	ı
漏えい位置	床面から	12cm 上方
開口面積	開口なし	
天候	晴れ	
風速	3m/s	(測定開始時)
気温	4°C	(測定開始時)

この実験より水素濃度センサーとして接触燃焼式センサー5 個 (Cs1~Cs5) を追加した。。 また、熱電式水素濃度センサーのうち H3、H6、H13、H16 をアクリル面近くに移動した。 追加・移動後のセンサー配置を表 2.3.3 及び表 2.3.4 に示す。

	x	У	z
Cs1	650	800	3000
Cs2	250	1350	2910
Cs3	250	1350	2710
Cs4	250	1350	2490
Cs5	250	1350	2320

表 2.3.3 接触燃焼式水素濃度センサー(Cs)設置位置

	x	У	z
H3	50	1050	2950
変更後	500	50	2300
H6	350	1550	2950
変更後	500	50	2510
H13	950	1050	2950
変更後	500	50	2710
H16	650	1550	2950
変更後	500	50	2920

表 2.3.4 熱電式水素濃度センサー設置位置移動

図 2.3.6 に追加・移動後のセンサーの配置を図示する。図 2.3.7-1~図 2.3.7-24 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.8 に熱電対による温度測定波形を示す。





図 2.3.7-1 H1 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-2 H2 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-3 H3 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-4 H4 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-5 H5 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-6 H6 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-7 H7 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-8 H8 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-9 H9 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-10 H10 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-11 H11 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-12 H12 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-13 H13 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-14 H14(実験番号 14121501)水素濃度測定波形



図 2.3.7-15 H15 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-16 H16 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-17 H17 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-18 H18 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-19 H19 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-20 H20 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-21 H21 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-22 H22 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-23 H23 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.7-24 H24 (実験番号 14121501) 水素濃度測定波形



図 2.3.8 熱電対(実験番号 14121501)温度測定波形

(4) 実験番号:14121601

水素流量	133mL/m	in
漏えい位置	床面から	12cm 上方
開口面積	開口なし	
天候	曇り	
風速	0m/s	(測定開始時)
気温	$5.4^{\circ}\mathrm{C}$	(測定開始時)

センサー配置は実験番号(3) 14121501 と同じく図 2.3.6 の通りである。図 2.3.9-1~図 2.3.9-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.10 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.9-1 H1 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-2 H2 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-3 H3 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-4 H4 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形







図 2.3.9-6 H6 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-7 H7 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-8 H8 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-9 H9 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-10 H10 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-11 H11 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-12 H12 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-13 H13 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-14 H14 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-15 H15 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-16 H16 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-17 H17 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-18 H18 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-19 H19 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-20 H20 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-21 H21 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-22 H22(実験番号 14121601)水素濃度測定波形



図 2.3.9-23 H23 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-24 H24 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-25 Cs1 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-26 Cs2 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-27 Cs3 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-28 Cs4 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.9-29 Cs5 (実験番号 14121601) 水素濃度測定波形



図 2.3.10 熱電対 (実験番号 14121601) 温度測定波形

(5) 実験番号:14121602

水素流量	550mL/m	in
漏えい位置	床面から	12cm 上方
開口面積	開口なし	
天候	雨	
風速	0m/s	(測定開始時)
気温	$7.2^{\circ}\!\mathrm{C}$	(測定開始時)

センサー配置は実験番号(3) 14121501 と同じく図 2.3.6 の通りである。図 2.3.11-1~図 2.3.11-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.12 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.11-1 H1 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-2 H2 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形


図 2.3.11-3 H3 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-4 H4 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-5 H5 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-6 H6 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-7 H7 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-8 H8 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-9 H9 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-10 H10 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-11 H11 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-12 H12 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-13 H13 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-14 H14 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-15 H15 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-16 H16 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-17 H17 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-18 H18 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-19 H19 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-20 H20 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-21 H21 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-22 H22 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-23 H23 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-24 H24 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-25 Cs1 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-26 Cs2 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-27 Cs3 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-28 Cs4 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.11-29 Cs5 (実験番号 14121602) 水素濃度測定波形



図 2.3.12 熱電対 (実験番号 14121602) 温度測定波形

(6) 実験番号:14121603

水素流量	550mL/min	
漏えい位置	床面から	12cm 上方
開口面積	$800 \mathrm{cm}^2$	
天候	曇り	
風速	0m/s	(測定開始時)
気温	7.1℃	(測定開始時)

センサー配置は実験番号(3) 14121501 と同じく図 2.3.6 の通りである。図 2.3.13-1~図 2.3.13-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.14 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.13-1 H1 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·2 H2 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·3 H3 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-4 H4 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-5 H5 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-6 H6 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-7 H7 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-8 H8 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-9 H9 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·10 H10 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-11 H11 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·12 H12 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-13 H13 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-14 H14 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-15 H15 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-16 H16 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-17 H17 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-18 H18 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-19 H19 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·20 H20 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-21 H21 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·22 H22 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·23 H23 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-24 H24 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-25 Cs1 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13·26 Cs2 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-27 Cs3 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-28 Cs4 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.13-29 Cs5 (実験番号 14121603) 水素濃度測定波形



図 2.3.14 熱電対 (実験番号 14121603) 温度測定波形

(7) 実験番号:14121701

水素流量	133mL/min	
漏えい位置	天井面から 12cm 下方	
開口面積	$800 \mathrm{cm}^2$	
天候	晴れ	
風速	2m/s	(測定開始時)
気温	3°C	(測定開始時)

この実験より熱電式水素濃度センサーのうち H7 を模擬空間背面外部に移動した。また、 H9 を模擬空間床面近傍に移動した。移動後のセンサー配置を表 2.3.5 に示す。

	x	У	z		
H7	50	800	2500		
* 変更後	500	1600	2920		
H9	50	800	1500		
変更後	500	50	50		

表 2.3.5 H水素濃度センサー設置位置移動

図 2.3.15 に追加・移動後のセンサーの配置を図示する。図 2.3.16-1~図 2.3.16-29 に水素 濃度の測定波形を、図 2.3.17 に熱電対による温度測定波形を示す。

<sup>\*</sup>模擬室外部





図 2.3.16-1 H1 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16·2 H2 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形







図 2.3.16·4 H4 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-5 H5 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-6 H6 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-7 H7 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-8 H8 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形


図 2.3.16-9 H9 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-10 H10 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-11 H11 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-12 H12 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-13 H13 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-14 H14 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-15 H15 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-16 H16 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-17 H17(実験番号 14121701)水素濃度測定波形



図 2.3.16-18 H18 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-19 H19(実験番号 14121701)水素濃度測定波形



図 2.3.16·20 H20 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-21 H21 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-22 H22(実験番号 14121701)水素濃度測定波形



図 2.3.16-23 H23 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16·24 H24(実験番号 14121701)水素濃度測定波形



図 2.3.16-25 Cs1 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-26 Cs2 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形







図 2.3.16-28 Cs4 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.16-29 Cs5 (実験番号 14121701) 水素濃度測定波形



図 2.3.17 熱電対 (実験番号 14121701) 温度測定波形

(8) 実験番号:14121702

水素流量	133mL/min			
漏えい位置	天井面から 12cm 下方			
開口面積	800cm2			
天候	晴れ			
風速	1.8m/s	(測定開始時)		
気温	$3.9^{\circ}\!\mathrm{C}$	(測定開始時)		

センサー配置は実験番号(7) 14121701 と同じく図 2.3.15 の通りである。図 2.3.18-1~図 2.3.18-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.19 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.18-1 H1 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-2 H2 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形







図 2.3.18-4 H4 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-5 H5 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-6 H6 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形







図 2.3.18-8 H8 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-9 H9 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-10 H10 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-11 H11 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-12 H12 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-13 H13 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18·14 H14 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-15 H15 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-16 H16 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-17 H17 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-18 H18 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-19 H19(実験番号 14121702)水素濃度測定波形



図 2.3.18·20 H20 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-21 H21 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-22 H22 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-23 H23 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-24 H24 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-25 Cs1 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-26 Cs2 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-27 Cs3 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-28 Cs4 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.18-29 Cs5 (実験番号 14121702) 水素濃度測定波形



図 2.3.19 熱電対 (実験番号 14121702) 温度測定波形

(9) 実験番号:14121703

水素流量	133mL/m	in		
漏えい位置	天井面から 12cm 下方			
開口面積	$100 \mathrm{cm}^2$			
天候	晴れ			
風速	4m/s	(測定開始時)		
気温	6.1°C	(測定開始時)		
	いわゆる	る「爆弾低気圧」が到	来し、午後~	翌日にかけ非常な
	荒天とな・	った		

センサー配置は実験番号(7) 14121701 と同じく図 2.3.15 の通りである。図 2.3.20-1~図 2.3.20-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.21 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.20-1 H1 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-2 H2 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形







図 2.3.20-4 H4 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-5 H5 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-6 H6 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-7 H7 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-8 H8 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-9 H9 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-10 H10 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-11 H11 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-12 H12 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-13 H13 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-14 H14 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-15 H15 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-16 H16 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形


図 2.3.20-17 H17 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-18 H18 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-19 H19 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-20 H20 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-21 H21 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-22 H22 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-23 H23 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-24 H24(実験番号 14121703)水素濃度測定波形



図 2.3.20-25 Cs1 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-26 Cs2 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-27 Cs3 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-28 Cs4 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.20-29 Cs5 (実験番号 14121703) 水素濃度測定波形



図 2.3.21 熱電対 (実験番号 14121703) 温度測定波形

(10) 実験番号:14121801

水素流量	133mL/min			
漏えい位置	床面から 12cm 上方			
開口面積	$100 \mathrm{cm}^2$			
天候	晴れ			
風速	$4.5 \mathrm{m/s}$	(測定開始時)	最大風速:10m/s 超を記録	
気温	0.7°C	(測定開始時)		
	前夜の	「爆弾低気圧」	の影響で非常に悪天候となった	
	前日の社	令え込み(氷点	下)の影響が終日残った	

センサー配置は実験番号(7) 14121701 と同じく図 2.3.15 の通りである。図 2.3.22-1~図 2.3.22-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.23 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.22-1 H1 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-2 H2 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-3 H3 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-4 H4 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-5 H5 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-6 H6 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-7 H7 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-8 H8 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形







図 2.3.22-10 H10 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-11 H11 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-12 H12 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-13 H13 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-14 H14 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-15 H15 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-16 H16 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-17 H17 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-18 H18 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-19 H19(実験番号 14121801)水素濃度測定波形



図 2.3.22-20 H20 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-21 H21 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-22 H22 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-23 H23 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-24 H24 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-25 Cs1 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-26 Cs2 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-27 Cs3 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-28 Cs4 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.22-29 Cs5 (実験番号 14121801) 水素濃度測定波形



図 2.3.23 熱電対 (実験番号 14121801) 温度測定波形

(11) 実験番号:14121803

水素流量	50mL/mi	in		
漏えい位置	天井面から 12cm 下方			
開口面積	開口なし			
天候	晴れ			
風速	3.1m/s	(測定開始時)	継続的な強風下での実験	
気温	$2.7^{\circ}\!\mathrm{C}$	(測定開始時)		

センサー配置は実験番号(7) 14121701 と同じく図 2.3.15 の通りである。図 2.3.24-1~図 2.3.24-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.25 に熱電対による温度測定波形を示す。







図 2.3.24·2 H2 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形







図 2.3.24-4 H4 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-5 H5 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-6 H6 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-7 H7 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-8 H8 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-9 H9 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24·10 H10 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-11 H11 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24·12 H12 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-13 H13 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-14 H14 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-15 H15 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-16 H16 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-17 H17 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24·18 H18 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-19 H19 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-20 H20 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-21 H21 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24·22 H22 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-23 H23 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24·24 H24 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形


図 2.3.24-25 Cs1 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-26 Cs2 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-27 Cs3 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-28 Cs4 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.24-29 Cs5 (実験番号 14121803) 水素濃度測定波形



図 2.3.25 熱電対 (実験番号 14121803) 温度測定波形

(12) 実験番号:14121804

水素流量	133mL/m	iin
漏えい位置	床面から	12cm 上方
開口面積	$100 \mathrm{cm}^2$	
天候	晴れ	
風速	1.7m/s	(測定開始時)
気温	3.8℃	(測定開始時)

センサー配置は実験番号(7) 14121701 と同じく図 2.3.15 の通りである。図 2.3.26-1~図 2.3.26-29 に水素濃度の測定波形を、図 2.3.27 に熱電対による温度測定波形を示す。



図 2.3.26-1 H1 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-2 H2 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-3 H3 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-4 H4 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-5 H5 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-6 H6 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形







図 2.3.26-8 H8 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形







図 2.3.26·10 H10 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-11 H11 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-12 H12 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-13 H13 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-14 H14 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-15 H15 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-16 H16 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-17 H17 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-18 H18 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-19 H19 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26·20 H20 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-21 H21 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-22 H22 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-23 H23 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-24 H24 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-25 Cs1 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-26 Cs2 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形







図 2.3.26-28 Cs4 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.26-29 Cs5 (実験番号 14121804) 水素濃度測定波形



図 2.3.27 熱電対 (実験番号 14121804) 温度測定波形

以上の実験結果をまとめたものが以下の表 2.3.6 となる。

実験番号	水素流量 ml/min	噴出方向	開口面積	水素濃度上昇速度 もしくは平衡濃度	濃度平衡
14121103	133	t	800cm	0.06~0.1%で平衡 14番は0.1%超	0
14121201	50	1	800cm <sup>*</sup>	200~250min程度まで0.02%程度に単調増加 急激に上昇⇒0.06~0.1%に到達	濃度平衡に達するのに 時間がかかりすぎる
14121501	50	1	—	1.4×10 <sup>-3</sup> %∕min	—
14121601	133	1	_	<b>4.2</b> × 10 <sup>-3</sup> % ∕ min	—
14121602	550	1	_	18×10 <sup>-3</sup> %∕min	—
14121603	550	t	800cm <sup>*</sup>	1.7×10 <sup>-3</sup> %∕min	濃度平衡に達するまでの実験が できない(プレハブ内滞留)
14121701	133	Ļ	800cm <sup>*</sup>	0.1%以下で平衡	0
14121702	133	Ļ	800cm <sup>*</sup>	0.5%以下で平衡	0
14121703	133	Ļ	100cm <sup>4</sup>	0.8%以下で平衡	0
14121801	133	1	100cm <sup>4</sup>	0.1%近辺をピークに減少と増加が混在	?
14121803	50	Ļ	_	0.35%で平衡	0
14121804	133	t	100cm	平衡に達する前に中止	×

## 表 2.3.3 実験結果まとめ

2.3.2 考察及びまとめ

各実験の結果をそれぞれ一括してまとめたものを図 2.3.28~図 2.3.39 に示す。



図 2.3.28 (1) 実験番号 14121103



図 2.3.29 (2) 実験番号 14121201



図 2.3.30 (3) 実験番号 14121501



図 2.3.31 (4) 実験番号 14121601



図 2.3.32 (5) 実験番号 14121602



図 2.3.33 (6) 実験番号 14121603



図 2.3.34 (7) 実験番号 14121701



図 2.3.35 (8) 実験番号 14121702



図 2.3.36 (9) 実験番号 14121703



図 2.3.37 (10) 実験番号 141211801



図 2.3.38 (11) 実験番号 14121803



図 2.3.39 (12) 実験番号 14121804

・密閉条件、床面側からの漏えいにおける水素漏えい量の違いによる比較

水素流量条件のみが異なる実験 (3)14121501、(4)14121601、(5)14121602 を比較する と、ほぼ流量の増加に応じた濃度上昇が観測されており、これは密閉状態では本調査の模 擬空間の構造及び濃度測定方法が妥当であることを示している。

・密閉条件、等しい水素漏えい量における漏えい位置の違いによる比較

水素流量が 50mL/min であり漏えい位置が異なる実験 (3)14121501 (床面側)、及び (11)14121803 (天井面側) を比較すると、床面側から上方に向かっての濃度上昇はほぼ時 間に比例したものとなっているのに対し、天井面側から下方に向かっての濃度上昇は漏え い孔に近い H20 のセンサーにおいて漏えい開始直後急峻となるもののすぐに濃度は 0.35% 程度で平衡に達し、より下方のセンサーでは時間の経過と共に上昇を示す。これは空気中 の水素の濃度勾配に応じた拡散が支配的であり、より濃度の薄い側である下方へと拡散が 促進されていることを示している。空気への拡散速度が大きい水素に特に顕著な現象であ ると考えられる。

・防護室の内容積による影響

開口がある実験においては開口から排出された水素が模擬空間内に滞留することによる 濃度の上昇が防護室に設置した水素濃度センサー(H24、及び(7)14121701以降のH7)に おいて観測される。特に(6)14121603のように水素の流量が多め(550mL/min)であると 防護室内の水素の滞留が顕著となる。これは開口が存在しても理想的な換気が行われない 場合、即ち開口から水素が排出されても開口の外に水素が滞留するスペース(たとえば廊 下)が存在する状態に相当する。開口があっても水素の滞留リスクが排除できない状態で あり、現実にはこのような状態が施工によってもたらされる可能性が十分考えられるので 注意が必要である。

・外的擾乱要因による現象

開口がある条件では模擬空間外の要因による擾乱の影響が観測される。例えば (2) 14121201においては計測開始から200分位まではほぼ時間経過に比例した濃度上昇を示し ながらいずれのセンサーでも突如濃度が上昇している。また、(7)14121701~(12)14121804 では開口がある場合において水素濃度がやや非定常な振る舞いを示す場合が観測される。 特に2014年12月18日に測定した(10)14121801及び(12)14121804において顕著である。 外的要因としては防護室外部の風圧による圧力変動、及び模擬空間の筐体を含む防護室内 部での温度ムラが考えられる。このうち、外部の風圧による影響については風速が非常に 大きい環境(瞬間風速10m/s超)の下において測定時と同じ締め切った状態にした防護室 の内部で注意深く線香の煙による観測を行ったが、特に風圧による明確な影響は見られな かった。一方、熱電対による測定が示す通り、前夜が低温であり防護室内部の構造物、特 に模擬空間の筐体の温度が低くなる場合には温度ムラが大きくこの影響は水素の拡散に大 きく関わっていると考えられる。この影響は図 2.3.40 に示すように模擬空間下部の開口か ら排出される気流として観測された。これは本来想定している換気(水素が上部の開口か ら排出される)とは逆の流れが生じてしまっていることを示している。



図 2.3.40 下部開口から排出される気流の発生

気流の発生要因としては模擬空間筐体の温度ムラと同時に模擬空間外の防護室内に設置 した発熱源によるものも考えられる。測定時には無停電電源装置(UPS)3台、並びに水素 濃度センサーに電源を供給する安定化電源5台が設置・稼働されており、防護室内の気温 が低い状態では体感として発熱を感じ取ることができる程度であった。野外実験終了後に 実験時と同じセッティングで電源測定装置によって機器が消費する電力を測定したところ、 安定化電源1台15W~25W程度であることがわかった。UPSの消費する電力と併せ、常 時100W~200Wが機器全体で消費されており、これは全て最終的に熱として放出されるこ とになる。この機器からの発熱による影響は開口のある実験において全て関与しているこ とになり、特に防護室内の構造物の温度が低くなっている際に影響が大きくなる。また、 実験条件の変化に伴い模擬空間のセッティングを変更する際には塩化ビニル面を取り外す ことになり、また筐体本体も作業員が触れるので人体の発熱による温度ムラの発生もあり、 この影響が熱電対での計測にみてとれる。熱電対の個体差による測定値の差をなるべく緩 和して比較するために、筐体の各熱電対の測定値から塩化ビニル面の測定値を減じたもの を図 2.3.41~図 2.3.52 に示す。特に模擬空間筐体が冷やされているときに温度ムラが大き くなっていることがわかる。また、作業時の人体からの熱による影響による温度差が発生 し、それが時間の経過と共に緩和されていく様子が見てとれる。

模擬空間が模しているパイプシャフトの温度ムラの発生や外部に発熱源が存在する状態 は実際の需要家での使用を考えると容易に有り得るものであり、本調査の範囲ではこれら の影響はいずれも模擬空間=パイプシャフト内での水素の滞留リスクを増大させている。 パイプシャフト外の空間での滞留の可能性も併せ、実際の施工に関しては換気のための開 ロの有無や大きさだけでなく周囲の構造物との関係などにも注意を要する重要な示唆であ ると言える。



図 2.3.41 熱電対測定値の差:実験番号 (1)14121103



図 2.3.42 熱電対測定値の差:実験番号 (2)14121201



図 2.3.43 熱電対測定値の差:実験番号 (3)14121501



図 2.3.44 熱電対測定値の差:実験番号 (4)14121601



図 2.3.45 熱電対測定値の差:実験番号 (5)14121602



図 2.3.46 熱電対測定値の差:実験番号 (6)14121603



図 2.3.47 熱電対測定値の差:実験番号 (7)14121701



図 2.3.48 熱電対測定値の差:実験番号 (8)14121702



図 2.3.49 熱電対測定値の差:実験番号 (9)14121703



図 2.3.50 熱電対測定値の差:実験番号 (10)14121801



図 2.3.51 熱電対測定値の差:実験番号 (11)14121803



図 2.3.52 熱電対測定値の差:実験番号 (12)14121804

## 2.4 模擬空間内水素漏えい拡散挙動シミュレーション

数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)シミュレーションコードを用い て、集合住宅等のパイプシャフト内における配管継ぎ手からの微少漏えいを想定し、模擬 空間内における水素漏えい拡散シミュレーションを実施した。まず、開口がない場合につ いて各計測点における濃度履歴計測結果と数値シミュレーション結果とを比較した。また、 模擬空間における水素漏えい拡散挙動を数値シミュレーションより明らかにした。つぎに、 開口を有する場合について濃度履歴計測結果と数値シミュレーション結果とを比較し、計 算場における温度差などの影響等を検討した。さらに、複数のCFDコード用いて模擬空間 内における水素漏えい拡散挙動をシミュレートし、それらの結果を比較した。

2.4.1 計算条件

図 2.4.1 に模擬空間に対する計算場と計算格子を示す。数値シミュレーションには主に米 国立標準技術研究所(NIST: National Institute of Standards and Technology)が開発し、 水素の漏えい拡散シミュレーションにも実績のある Fire Dynamics Simulator (FDS) を 用いた。座標系は模擬空間底面の短辺方向、長辺方向をそれぞれ X 軸、Y 軸、高さ方向を Z 軸とし、原点は底面の中心とした。模擬空間の大きさは幅 1m、奥行き 1.6m、高さ 3m と した。計算場は X、Y、Z 軸方向に対して 64×80×140 の等間隔矩形格子で構成した。水素 は底面中央から高さ 130mm の位置で 16.5mm×20mm の矩形断面 (それぞれ 1 格子幅に 相当する長さ)から漏えいするものとし、所定の水素漏えい流量と合うように漏えい条件 を設定した。

開口がある場合の計算場を図 2.4.2 に示す。模擬空間は防護室の中に設置され、前面 (X-Z 面、Y=-0.8m)の上部と下部に開口 (100×800mm)を有する。それぞれ、上面から開口 中心までの距離 80mm、底面から開口中心までの距離 120mm で設置した。LES (Large-Eddy Simulation) パラメータと空気および水素の物性値を表 2.4.1 および 2.4.2 に示す。

Deardorff Model (C_DEARDORFF)		
Turbulent Prandtl Number	0.5	
Turbulent Schmidt Number		
Ambient Temperature (C)	11	

表 2.4.1 LES 計算パラメータ
空気		水素	
Molecular Weight (g/mol)	28.80577	Molecular Weight (g/mol)	2.01588
Ambient Density (kg/m³)	1.235	Ambient Density (kg/m³)	0.086
Viscosity (kg/m/s)	1.75x10⁻⁵	Viscosity (kg/m/s)	8.55 x10⁻ <sup>6</sup>
Therm. Cond. (W/m/K)	3.54 x10 <sup>-2</sup>	Therm. Cond. (W/m/K)	2.47 x10 <sup>-1</sup>
Spec. Heat (J/kg/K)	1.01 x10 <sup>3</sup>	Spec. Heat (J/kg/K)	1.44 ×10 <sup>4</sup>
Diff. Coeff. (m²/s)	1.89 x10 <sup>-5</sup>	Diff. Coeff. (m²/s)	6.89 x10 <sup>-5</sup>

表 2.4.2 計算に用いた空気と水素の物性値(室温 11℃)



(c) X-Y 面から見た模擬空間





(a) X-Z 面方向から見た模擬空間

(b) X-Z 面の計算格子
(d) Y-Z 面から見た模擬空間
(64×140)

図 2.4.1 模擬空間計算場と計算格子



(a) 防護室内に設置された模擬空間(開口あり)



(b) 模擬空間と防護室の寸法

図 2.4.2 模擬空間計算場と計算場寸法(防護室含む、開口有の場合)

実験における水素濃度センサーの位置 とシミュレーションにおける出力点との 関係については以下の通りである。

図 2.4.3 は野外実験における水素濃度セ ンサー設置位置を表している。実験で得ら れた水素濃度計測履歴と数値シミュレー ション結果との比較は、主に以下の水素濃 度センサー位置について実施した。ここで、 実験における水素濃度センサー位置を示 す場合、番号の前に H をつける。

天井は中心を H20 とし、前方の左角を H1、後方の左角を H4、右側面近傍の H14、 ならびに前方の H16 について比較した。

右側面の中心(Y=0)に沿って、H17(高 さ2.5m)、H18(高さ2.0m)、ならびに H19(高さ1.5m)で比較した。左側面では、 右側面と対称の位置にH7(高さ2.5m、図 中に水素濃度センサー無し)、H8(高さ 2.0m)、ならびにH9(高さ1.5m)で比較し た。

後方面では H21 (高さ 2.5m)、H22 (高 さ 2.0m)、ならびに H23(高さ 1.5m)で比 較した。

左側面と後方面から離した位置(X= -0.25、Y=0.55)で、高さ2.9mから200mm 間隔で新コスモス電機株式会社製、水素濃 度センサーを4個設置した。模擬空間内の 気流の流れを阻害しないように壁面近傍 を中心に水素濃度センサーを設置したが、 同水素濃度センサーのみ壁から離れた空



図 2.4.3 水素濃度センサー設置位置 (模擬空間周辺の数字は長さを示す。 座標原点は底面の中央)

間の濃度履歴として計測した。これらの結果については CS センサーとして実験による水素 濃度計測履歴と数値シミュレーションとの比較の際に参照した。

## 2.4.2 シミュレーション結果

2.4.2.1 野外実験と数値シミュレーション結果との比較(開口なし)

図 2.4.4~図 2.4.6 では水素漏えい速度 130mL/min について、模擬空間内の各点における 野外実験の水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果とを比較した。図 2.4.4 は天井部 の各点での比較を示している。水素漏えい孔(模擬空間底部の中央)の真上である天井中 心(同図(a))で若干の違いが確認される。これは水素漏えい孔を一格子で模擬したことに よる計算格子解像度の不足を示唆する。しかしながら、水素を含む流れが天井部に到達し てすぐに観測される水素濃度 0.1%程度までの上昇等は再現されている。さらに、天井部で の他の計測点との比較では(同図(b)~(e))、水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果 が良い一致を示している。これらのことから、模擬空間底部の中央から漏えい拡散した水 素が、浮力によって上昇気流を模擬空間中央部近傍に生じさせ、さらには上部壁面との干 渉で拡散が進み、天井部近傍での水素濃度計測履歴が変化する様子を数値シミュレーショ ンによって再現できたと考えられる。

図 2.4.5 は右側面と後方面を示しており、水素濃度センサー位置は底面から高さ 1.5~ 2.5m である。水素濃度計測履歴は実験と数値シミュレーション結果で良く一致する結果が ほとんどであった。同図(d)、(f)では水素濃度の値に 1 割程度の違いがあるものの、濃度変 化の傾き等はほぼ一致している。実験では中央軸からの対称性の確保は困難であることを 考えると、数値シミュレーションは、濃度変化の底部方向への進展挙動を再現できている と考えられる。

図 2.4.6 は CS センサー位置 (X=-0.25、Y=0.55 で、高さはそれぞれ 2.9、2.7、2.5、2.3m) における水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との比較である。水素濃度計測履 歴と数値シミュレーション結果とは良い一致を示している。以上の結果から、漏えい条件 130mL/min について実験を再現する水素漏えい拡散数値シミュレーションが実施できたと 判断する。



(漏えい量130mL/min、開口なし、天井部)





図 2.4.6 水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との比較 (130mL/min、開口なし、CS センサー位置、左側面から 250mm(X=-0.25)、 後方面から 250mm(Y=0.55)で高さ、2.9、2.7、2.5、2.3mの4点)

図 2.4.7~図 2.4.9 では水素漏えい速度 550 mL/min について、模擬空間内の各点における 野外実験の水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果とを比較した。 図 2.4.7 は天井部 における水素濃度計測履歴の比較である。同図(a)で水素到達と同時に水素濃度が 0.1%程度 まで上昇する挙動は水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果とで一致している。そ の後、実験では数値シミュレーションと違い水素濃度上昇変化率(同図の傾き)が一定で はない。しかしながら、最初に上昇した濃度から 3000 秒程度の傾きで比較すると水素濃度 計測履歴と数値シミュレーション結果とは良い一致を示している。この傾向は天井部の他 の計測点でも同様である。水素漏えい速度 130 mL/min の時にも示唆された漏えい孔位置 の計算格子解像度の不足の影響で、数値シミュレーション結果の方が実験よりも若干拡散 の影響が大きいと考えられる。その影響で図 2.4.8 の右側面、後方面で高さ 2.5m~1.5m の 水素濃度計測位置では数値シミュレーション結果の方が水素濃度上昇開始時間が早い。一 方で、同図において水素濃度計測履歴は良い一致が確認される。さらに、図 2.4.9の水素濃 度計測履歴については、両者の違いは1割以内で濃度上昇率の変化は水素濃度計測履歴と 数値シミュレーション結果とでは同じである。拡散による効果を過大評価しているものの、 漏えい条件 550mL/min についても実験を再現する水素漏えい拡散数値シミュレーション が実施できた。



(漏えい量 550mL/min、開口なし、天井部)



 (e) 右側面中心、高さ 1.5m
(f) 後方中心、高さ 2.5m
図 2.4.8 水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との比較 (550mL/min、開口なし、右側面、後方面)



図 2.4.9 水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との比較 (550mL/min 開口なし、CS センサー位置、左側面から 250mm(X=-0.25)、 後方面から 250mm(Y=0.55)で高さ、2.9、2.7、2.5、2.3mの4点)

2.4.2.2 水素漏えい拡散シミュレーションの結果と模擬空間内拡散挙動

図 2.4.10 は水素漏えい量 130mL/min について、模擬空間内水素濃度分布(体積分率%)の時間変化を示したもので水素の最大濃度を赤色(0.45%)で表している。図 2.4.11~2.4.15 に数値シミュレーションで得られた模擬空間内各点における水素濃度計測履歴を示す。これらの結果より、模擬空間内における水素濃度の時間変化について以下のように考えられる。

まず、空間内中央部を上昇する水素漏えいに原因する気流に着目する。図 2.4.11 より、 漏えい源から 130mL/min の流量で漏えいした水素は、底面から高さ 1m で 0.35%、2m で は 0.2%、さらに天井では 0.1%に拡散した状態で到達する。水素が到達した後、高さ 1m で約 30分間 0.35%の水素濃度で一定で、その後緩やかな濃度上昇を始める。高さ 2m と天 井位置でも初期の水素濃度変化に若干の違いはあるものの、緩やかな濃度上昇を示した。 緩やかな水素濃度上昇率(水素濃度計測履歴の傾き)は各点で同等であり、0.178/時であっ た。これは天井部で 1%の水素濃度に到達するのに要する時間が約 5 時間半となる水素濃度 上昇率である。中央部に形成される上昇気流部では微量の水素の継続した供給により、一 定の割合で緩やかな水素濃度上昇が続く。

水素漏えいに起因する上昇気流が天井と干渉することで水素の拡散が進み、天井付近か ら水素濃度が緩やかに上昇していく様子が図 2.4.10の水素濃度分布の時間変化から確認で きる。漏えい後 6 分の水素濃度分布では天井部でも色の変化が確認でき、水素濃度分布が 存在する。12 分経過すると中央部からの一定した水素の供給により、天井部で水素濃度は ほぼ一定となる。24 分経過した時には模擬空間の上半分以上が 0.07~0.14%の範囲の水素濃 度分布になっている。結局、底部近傍を除き、比較的近い水素濃度値が分布する領域が天 井部から徐々に底部方向へ広がり、空間内全体で水素濃度上昇が進行する。密閉空間であ っても局所的に水素濃度が上昇する箇所はない。

初期の段階での天井部の中央付近での高い水素濃度分布の存在は図 2.4.12(a)からも確認 できる。また同図(b)から時間の経過とともに天井部で水素濃度分布が無くなり、さらに水 素濃度の変化率も一定なっていることが確認できる。図 2.4.13 より壁から離れた位置でか つ高さが 2.9~2.3m の範囲でも、最初の 10 分程度は水素濃度分布が確認されるが、時間の 経過とともにほぼ一定の水素濃度で濃度の変化率も一定になっていることがわかる。図 2.4.14 の右側面と背面との濃度履歴は底面からの高さ 1.5、2.0、2.5m の位置ので水素濃度 計測履歴であり、各点での水素濃度値の違いは比較的小さい。一方、図 2.4.15 では底面か ら高さ 1m 以下の水素濃度計測履歴も示した。底面に近づくに従い水素の到達が顕著に遅れ、 その結果、低い水素濃度分布になる。しかしながら、どの位置であっても時間の経過によ り 0.178/時で水素濃度の変化率が一定となった。模擬空間内の体積をもとに、気体の密度 変化を無視して空間内に 130mL/min で水素が供給される場合の水素濃度の変化率を算定 (単純試算) すると 0.163/時であった。



図 2.4.10 模擬空間内水素濃度分布(体積分率%)の時間変化 (130mL/min、開口なし、

上部左より順に漏えい開始後6分、12分、24分、48分、72分、96分および120分)





<sup>(130</sup>mL/min、開口なし、天井部 9 点)





(130mL/min、開口なし、左側面、背面)

水素漏えい量 550mL/min の数値シミュレーション結果を図 2.4.16 と図 2.4.17 に示す。 定性的には 130mL/min と同様な水素拡散挙動であることが計算結果から予測された。図 2.4.16 より 550mL/min の場合の水素濃度の変化率は 0.742/時で単純試算の約 1.08 倍であ った。



(130 mL/min および 550mL/min、開口なし、天井中央)
Simple estimation:模擬空間内の体積をもとに、
気体の密度変化を無視して漏えい量から
空間内の全体の水素濃度の変化率を算出



図 2.4.17 模擬空間内水素濃度分布(体積分率%)時間変化 (550mL/min、開口なし、

上部左より順に漏えい開始後6分、12分、24分、48分、72分、96分および120分)

2.4.2.3 室外実験と数値シミュレーション結果との比較(開口有)

水素漏えい量 130mL/min について、開口がある場合の模擬空間内水素濃度履歴(体積分 率%)を図 2.4.18(a)~(d)に示す。各図とも開口がない場合に数値シミュレーションで得られ た水素濃度計測履歴を1点プロットした。同図(a)は天井に設置した水素濃度センサーの内 3つの水素濃度センサー点(左手前角部,中央部、右奥角部)について水素濃度計測履歴と 数値シミュレーション結果とを比較したものである。実験において水素は中央部、右奥角 部、左手前角部の順番で到達した。特に、左手前角部(開口部側)への水素の到達は 10 分 以上遅れた。一方、数値シミュレーション結果では水素到達時刻に顕著な差は確認されな い。水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果共に、開口がない場合は水素濃度が上 昇を続けるのに対して、開口がある場合は、比較的低い水素濃度で濃度上昇が止まり、ほ ぼ一定の値で推移した。水素濃度の値については天井部では数値シミュレーション結果は 水素濃度計測履歴と比して半分程度であった。天井部以外の計測点では水素の到達時刻は 比較的良く一致した。しかしながら、数値シミュレーション結果の水素濃度値が水素濃度 計測履歴よりも低い値で一定になる傾向は天井部の結果と同様に確認された。また、背面 で水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果の濃度値が比較的良い一致を示したこと で、水素漏えい源である中央部から離れるに従い、水素濃度の値が近づく傾向にある。開 口なしの場合で水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果は良い一致を示した結果か ら、開口ありの場合に確認された水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との違い については、温度差などにより発生する模擬空間内の流れの影響等の検討が必要である (2.4.2.4 節)。

図 2.4.19 に模擬空間内の濃度分布の時間的変化を1時間おきに4時間まで防護室内の濃 度分布も含めて示す。上部開口から水素が放出され、一方、下部の開口から空気が取り込 まれるような流れが発生し、その流れによって水素漏えい口から放出される水素の流れも 曲げられて、漏えい拡散が進んでいる様子が確認される。また、3時間以上時間が経過する と防護室内下部にまで水素が到達し(0.04%程度)、防護室も含めた空間全体で濃度上昇が 進む。結局、開口がある場合はその外部空間も含めた水素拡散挙動により、模擬空間内の 濃度上昇は極めて緩やかになった。



図 2.4.18 模擬空間内水素濃度履歴(130 mL/min、開口有(100mm×800mm))
各図中開口がない場合の水素濃度履歴をプロット(Closed)
(a;中央部、b~d;2.5m)



 図 2.4.19 模擬空間内水素濃度分布(体積分率%)時間変化 (130 ml/min,開口有(100mm×800mm)、
漏えい開始後 1~4 時間(1時間間隔)の水素濃度分布) 2.4.2.4 模擬空間ならびに防護室内温度差が空間内の気流に与える影響

水素漏えい量 130mL/min について開口がない場合、水素濃度計測履歴と数値シミュレー ション結果を比較した結果、良い一致を確認した。一方、開口がある条件では天井部で水 素の到達時間に違いが確認されたこと、ならびに、数値シミュレーションで得られた水素 濃度が水素濃度計測履歴よりも低い値であった。さらに、実験では開口がある場合、模擬 空間の下部から防護室へ流れ出す気流が確認された。そこで、温度差によって模擬空間内、 防護室に内に発生する流れについて検討した。

2.4.2.3 節で取り上げた水素漏えい量 130mL/min について開口有の実験の際の熱電対に よる温度計測結果を図 2.4.20 に示す。これらの温度計測結果を参考にして、模擬空間の前 壁(開口部のある壁)の温度を 12℃、それ以外の壁の温度を 11℃とし、また、模擬空間内 温度を 11℃ならびに防護室内の温度を 11.5℃を初期条件として、空間内の流れを数値シミ ュレーションした。FDS による数値シミュレーション結果を図 2.4.21 に示す。温度差に起 因して最大で 0.115m/s の流れが発生し、上部開口からは模擬空間に流れ込む方向、下部か らは模擬空間内から流れ出す方向の流れ場が確認された。図 2.4.22 には線香を用いた模擬 空間内から防護室への流れの可視化の写真を示した。数値シミュレーション結果は図 2.4.22 の現象を定性的によく再現している。開口がある条件では模擬空間やその内外の微小な温 度差が水素拡散挙動に影響を及ぼす可能性がある。



(a) 模擬空間壁面温度履歴(b)模擬空間および防護室内温度履歴図 2.4.20 熱電対による模擬空間壁および空間内温度計測結果



図 2.4.21 模擬空間内 Y 方向気流速度分布の時間的変化 (水素漏えい無し、開口有(100mm×800mm) 紙面に向かって左側が Y のプラス方向

(上部は防護空間から模擬空間に流れ込む、下部は流れ出すような流れ場が生じた)



図 2.4.22 線香を用いた模擬空間内から防護室への流れの可視化 (水素漏えい無し、開口有、左側が模擬空間,右側が防護室) 2.4.2.4 異なる解析コードによる模擬空間内水素漏えい拡散シミュレーションの比較

模擬空間内水素漏えい拡散シミュレーションでは主に Fluid Dynamic Simulator (FDS) を用いた。並行して複数の汎用 CFD コードを用いて開口なし、漏えい量 130mL/min の条 件について漏えい拡散シミュレーションを実施した。

Advance/FrontFlow/red (アドバンス株式会社製) 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。ただし、水素漏えい源の模 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図 2.4.23 に示すように中央部 に計算格子を集中させた。そのため、FDS のシミュレーションと比較して、中央部で細か い格子、中央部から離れると粗い格子形成になっている。乱流モデルは LES を採用した。 商用 CFD コード FLACS (FLame ACceleration Simulator) を用いたシミュレーションも 実施した。FLACS はノルウェーGexcon 社が開発したコードで水素・可燃性ガスを対象と して、ガス・石油設備における火災・爆発等のリスク評価に用いられている。FLACS にお いて乱流モデルは RANS を採用した。

図 2.4.24 に実験と Advance/FrontFlow/red (図中 Simulation 2)と FDS (図中 Simulation 1) との比較を示す。図 2.4.25 は Advance/FrontFlow/red により計算された模擬空間内水 素濃度分布である。さらに、図 2.4.26 に FLACS により得られた模擬空間内水素濃度分布 を示す。Advance/FrontFlow/red による水素濃度履歴は中央部では実験値に近く、中央部 から離れるに従い実験値よりも低い傾向を示した。FLACS のシミュレーション結果では水 素濃度履歴が実験値と比較して 1 割以上低い結果となった。FLACS の計算では時間を短縮 のために格子数を減らして実施したことが計算精度に影響した可能性がある。いずれのコ ードで得られた模擬空間内水素漏えい拡散挙動も 2.4.2 節で説明したものと定性的には一致 しており、計算精度を保証する格子形成条件などを把握して使用すれば水素漏えい拡散評 価の強力なツールとなると考えられる。

237



図 2.4.23 Advance/FrontFlow/red で採用した計算格子



図 2.4.24 水素濃度計測履歴と数値シミュレーション結果との比較 (130mL/min、天井部)



(a) 漏えい後1時間の濃度分布



(b) 漏えい後2時間の濃度分布

図 2.4.25 模擬空間内水素濃度分布(Advance/FrontFlow/red)



図 2.4.26 模擬空間内水素濃度分布 (FLACS) (漏えい開始後、6分、12分、24分、48分)