

# 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

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

\*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

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744

\*\*\*スタンフォード大学 乱流研究センター

\*\*\*\*九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門

Unsteady Diffusion Analysis of Leaking Hydrogen  
in a Partially Open Space under Natural Ventilation

Hisayoshi TSUKIKAWA\*, Hiroshi KANAYAMA\*,  
Kazuo MATSUURA\*\*\* and Masahiro INOUE\*\*\*\*

\*Saibu Gas Co., Ltd.

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

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

744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

\*\*\*Stanford University, Center for Turbulence Research  
Stanford, CA 94305, USA

\*\*\*\*Kyushu University, Department of Earth Resources Engineering  
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

Numerical simulation of leaking hydrogen in a partially open space under natural ventilation is performed. Computation with the LVEL turbulence model (a zero-equation model) and the laminar model showed good agreement with experimental data. The transient behavior of hydrogen diffusion in the space is discussed. Also, adequate and important boundary conditions, grid division, and the time step are discussed.

**Key words:** Hydrogen diffusion, Natural ventilation, LVEL model, CFD

## 1. はじめに

地球温暖化現象、石油エネルギーの枯渇から水素エネルギーが重要視されており、水素エネルギーの実用化に向けて水素設備が増加するものと思われる。水素設備を設置する室は、水素が漏洩したときに滞留しないように、十分な面積の開口部を設けるか機械換気設備を設け

なければならない。水素が滞留するおそれのある場所に、漏洩検知警報設備を設けなければならない。しかし開口部面積、換気風量、漏洩検知警報設備の設置場所を設計する具体的な基準がない。水素の漏洩を検知してから水素設備を安全に停止するまでの運転操作においては、水素が漏洩したときの拡散に対する知見が必要である。このように水素が漏洩したときの拡散挙動について把握し

ておくことは保安上大変重要である。このとき水素の時間平均濃度のみならず濃度変動の検討も必要である [1]。水素が漏洩したときの換気状態を把握するために設備毎に実験を行うことは経済面から、また所要時間から実用性に欠ける。CFD解析(Computational Fluid Dynamics 数値流体力学)は、PCの性能が向上し、種々のソフトウェアが簡便に利用出来るようになってきており、有効で現実的な方法と考えられる。境界条件の設定間違い、不適切な要素分割(以下文脈に応じ格子、セルと記載)、あるいは不適切なアルゴリズムの選択などを避ければ、見当違いの解析結果を得ている危険性は低い。水素設備の保安には多くの人が携わるので、CFDソフトウェアをある程度ブラックボックスとして利用出来るようにすることが必要となる。著者らは、適切な境界条件、要素分割、アルゴリズムを提示することを目的とする研究を行っている。

本論文では、実験結果が示す水素の拡散挙動はどのようなものであるかをCFD解析し、境界条件、要素分割、アルゴリズムが解析結果に与える影響を評価した。これにより水素設備の換気設備の評価にCFDを用いる際に考慮すべき妥当な境界条件、要素分割、アルゴリズムを明確にした。

## 2. 解析対象

本研究では、Hallway Modelと呼ばれる部分開放空間における水素拡散挙動を対象とした。略図を図1に、その詳細諸元を表1に示す。天井右側のRoof Ventと右壁面のDoor Ventとの2個の外気開口部を有し、床面左側のHydrogen Inletから水素が流量57L/min( $9.5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ )で600秒間漏洩する。漏洩量をHydrogen Inletの面積で除すと、鉛直(z)方向速度は $2 \times 10^{-2} \text{m/s}$ と遅い。この部分開放空間は、流れを支配する主流が無く、水素が浮力によりRoof Ventから流出するとDoor Ventから新鮮な外気が流入して、自然換気状態となる。浮力によって駆動される自然換気空間は、強制換気空間と比較して境界条件の設定などCFD解析が難しいこと、高速の水素漏洩領域を含まず、CFDソフトウェアをブラックボックスとして利用出来ない圧縮性流れではないこと、また先行研究があることからこのモデルを用いた。このモデルはSwain [2]らが漏洩水素の危険性評価を目的として、CFDソフトウェアFLUENTを用いて解析モデルの検証のために、1/2の

寸法でヘリウムを用いた実験と比較したのに始まる。しかし解析手法、実験方法については不詳である。Agranat [3]らはDOEプログラムの実設備に応用するために、CFDソフトウェアPHOENICSにより乱流モデルにLVELモデルを用いて、格子分割が $36 \times 10 \times 18$ と粗い格子で解析している。水素濃度はSwain [2]らの結果と10~20%程度の誤差であること、その差は乱流モデル、格子、境界条件等の違いであろうこと、精度評価には水素で実験を行う必要があることを示した。松浦 [4]らはCFDソフトウェアCFD-ACE+により乱流モデルにk-εモデルを用いた解析を行い、Roof ventとDoor Ventの位置及び圧力の影響について示している。

先行研究と同様に本CFD解析でもセンサー 1~センサー 4の4箇所で水素濃度の時系列データを取得する。

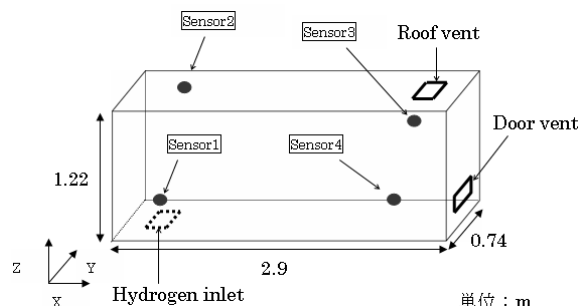


図1. Hallway Modelの略図

表1. Hallway modelの諸元 単位: cm

	X	Y	Z
Hallway 寸法	290	74	122
センサー 1 位置	15	14	15
センサー 2 位置	15	52	101
センサー 3 位置	268	14	101
センサー 4 位置	268	52	15
Roof vent 位置	260	22	122
Roof vent 寸法	15	30	0.0
Door vent 位置	290	22	15
Door vent 寸法	0.0	30	15
Hydrogen inlet 位置	15	22	-2.5
Hydrogen inlet 寸法	15	30	0.0
水素漏洩量: 57L/min; 漏洩継続時間: 600 秒			

座標原点は図1に示す床上面の左端手前

## 3. 水素漏洩実験

共著者の井上[5]が実験に用いたアクリル製Hallway の写真を図2示す。水素流量はフルスケールが200L/minの

株式会社MQV 0200水素ガス用デジタルマスフローコントローラーで制御した。水素ガス濃度はフルスケールが10vol%の新コスモス電機株式会社EK-3A 気体熱伝導式水素ガスセンサーを用いて0.5秒間隔で計測した。フレームアレスターを含む外形寸法は直径 30mm、長さ40mmである。6L容器を用いる応答速度測定では、水素の爆発下限の1/4濃度の1.6倍に相当する量の導入から、水素濃度1.6vol%を指示するまでの時間は約10秒であった。センサー1とセンサー4は床面から支持され、センサー2とセンサー3は天井から吊るされている。実験結果は文献[2]～[4]の解析のように定常値とはならず時間経過後もかなり変動している。結果は示さないが、超音波風速計を用いたDoor Ventの中央の速度も常に変動している。



図2. 実験装置

#### 4. CFD解析手法

解析には市販の汎用CFDソフトウェアPHOENICS Ver. 2006を用いた。このソフトウェアの解法は、構造格子に基づくスタッガード格子を用いる有限体積法、速度と圧力のカップリングにSIMPLEST法、空間差分近似法に1次風上差分と中心差分とを組み合わせたハイブリッド法、非定常計算の時間発展に後退オイラー法を採用している。また全ての保存式は密度変化を考慮した次式(1)を解いている。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\Phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

ここで $\rho$ は密度、 $\Phi$ は従属変数(輸送量)、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 $\Gamma_{\phi}$ は交換(拡散)係数、 $S_{\phi}$ は生成項を表す。

本解析では質量保存式、浮力を考慮した運動量保存式、

全エンタルピー保存式、水素と酸素についての化学種保存式を解き、窒素を $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 1.0$ から求めた。混合気体の密度、エンタルピー、運動量保存式の $\Gamma_{\phi}$ に対応する粘性係数、化学種保存式の $\Gamma_{\phi}$ に対応する拡散係数はCHEMKIN-II [6]を用いて計算されている。CHEMKIN-IIは単位系がCGS系であるため、本論文では必要に応じてMKS単位系と使い分けしている。乱流モデルは0方程式モデルの1種で、Spaldingの壁法則を用いて層流粘性係数から有効粘性係数を計算するLVELモデルを用いた。

格子分割を図3に示す。Roof VentとDoor Ventの圧力損失及びHallway内部と外部の密度差による圧力差(水頭圧)を考慮するために外部空間を設定し、Roof VentとDoor Ventからそれぞれ120cm、60cm外側までを計算領域としている。セルの基本サイズは水平(x, y)方向が3.75cm、鉛直(z)方向が3.0cmであり、Hallway内部の分割は $77 \times 20 \times 45 = 69,300$ セルである。床面近傍では解析精度向上のためにz方向セルサイズを漸次密にし、Hallway外部は計算時間短縮のためにセルサイズを漸次粗くしている。

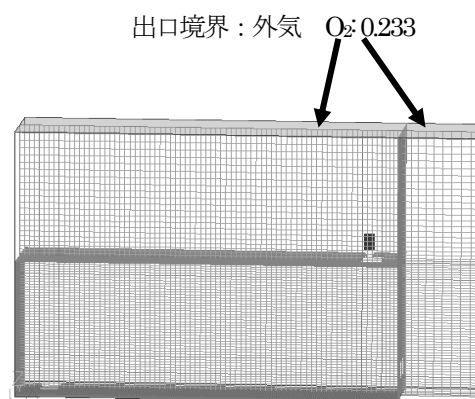


図3. 格子の分割図

Hallwayの壁面は全て断熱、滑りなし条件を与えている。壁の厚さは床面を2.5cm、その他の5面は厚さ0.0cmとした。Hydrogen Inlet部は箱形で、床面と同一高さにある整流板を通してHallway内部に水素が漏洩する。この箱形底部( $z=2.5\text{cm}$ )をHydrogen Inletとし、床面での浮力を考慮するため鉛直方向のセル分割数を2として解析した。Hydrogen Inletは境界条件として、1気圧、15°C、水素の質量分率1.0、この状態での水素の密度と体積流量を与えている

外部空間の出口境界条件の外気は、1気圧、15°C、酸

素濃度が21vol% に相当する酸素の質量分率0.233 を与えている。

水素漏洩開始時刻を1秒、漏洩停止時刻を601秒とし、時刻851秒まで、時間刻み0.5秒で非定常計算し、1秒毎に解析結果を出力した。計算所要時間は、事務用の一般的なPCを用いて、85時間程度であった。

### 5. 解析と実験との比較

4つのセンサー位置における水素の体積濃度の経時変化について、計算結果と実験結果を比較したものを図4に示す。凡例CFD-1~CFD-4がセンサー1~4の解析結果、EXP-1~EXP-4がセンサー1~4の実験結果である。表1に示すようにセンサー1とセンサー2のx方向位置はHydrogen Inletの境界に位置し、センサー4のz方向位置はDoor Ventの境界に位置している。本解析の格子分割では各センサーは2つ又は8つのセルの境界近くに位置するので、各センサー位置周りのセルで座標原点に近いセルと遠いセルの2つのセル値の平均値として求めた。

CFD解析結果と実験結果とは良く合っているが、実験と解析との差が少し大きい部分もある。平均処理に用いた2つのセル値と実験値との比較をセンサー1について図5に、センサー4について図6に示す。凡例中のX,Y,Zの後の数字はセルの位置を示す番号である。実験と良く整合

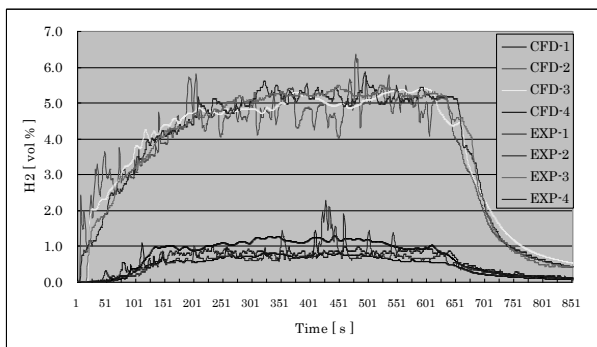


図4. 水素濃度の経時変化

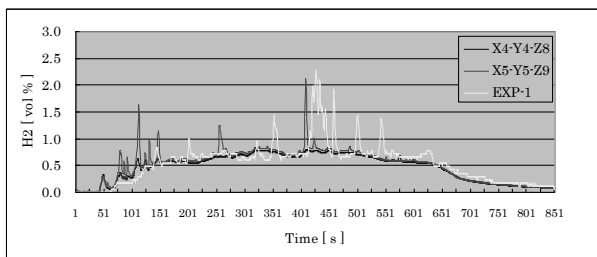


図5. センサー1の水素濃度経時変化

するセルが有ることが分かる。突発的に水素濃度が変動する状況も解析出来ており、漏洩する水素の非定常拡散挙動の把握にCFD解析が有効であることが確認できた。

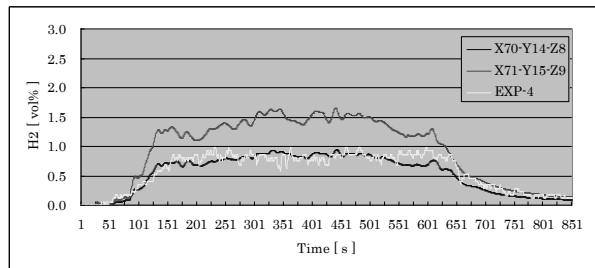


図6. センサー4の水素濃度経時変化

### 6. 解析手法の評価

#### 6.1 境界条件の設定位置

Hydrogen Inletを床面以下に設定している効果をセンサー1について図7に示す。-2.5cm-1は図4のCFD-1と同一である。一般的にこの境界条件は、床面と同一高と仮定される。その解析が0.0cm-1である。突発的な水素濃度の変動が解析出来ない。浮力によって生じる変動を解析するには、この部分の鉛直(z)方向のセル数は2以上必要であることが分かった。

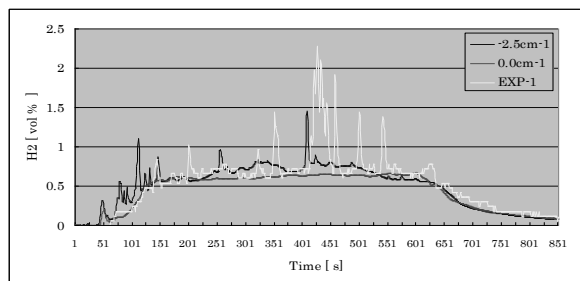


図7. Hydrogen Inlet の位置の影響

本解析ではDoor Vent右側に外部空間を設け、Roof VentとDoor Ventの外部空間の高さを揃えている。これは松浦[4]らが示した様に、Door Ventで鉛直方向に変化する静圧を境界条件として与える困難性を避ける手法である。またDoor Vent における圧力損失を自動的に与えられるので、部分開放空間を自然換気条件に設定するために必要な設定である。

Roof Ventの外部空間の鉛直(z)方向の寸法を120cm、80cm、30cmとした場合のセンサー1の水素濃度の経時変化を図8に示す。この外部空間の大きさがRoof Ventから最も遠い位置にあるセンサー1の水素濃度に影響を与え

ていること、またこの外部空間を設けると、RoofVent部における圧力損失を自動的に与えられることからこの空間も必要である。

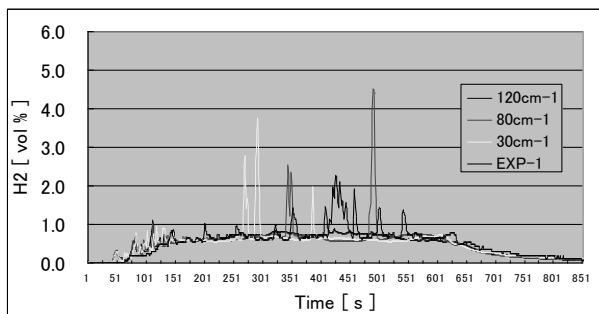


図8. RoofVent外部空間のセンサー1への影響

6.2 セルサイズの依存性

セルサイズの依存性についてセルサイズを7.5cm, 5cm, 3.75cmとした場合の解析を行った。その結果をセンサー1について図9に示す。Z3cm-1は図4のCFD-1と同一である。セルサイズ7.5cm, 5cmでは変動が解析出来ないことが分かる。セルサイズを小さい3cm, 2.5cmとした解析において平均化処理に用いた2つセル値の差は図5、図6と同程度であった。

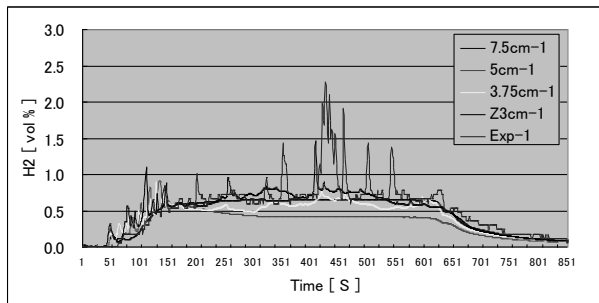


図9. セルサイズの依存性

水素センサーの外形寸法はセルサイズと同程度であり、水素センサー自体が水素の拡散流動に与える影響を本解析では考慮していない。表1に示す水素センサーの設置位置は円筒形フレームアレスターの底面中央であり、フレームアレスター内の実際のセンサー位置とは差がある。また各センサーは水素濃度勾配の大きい位置にあり、セルサイズを1/2程度に小さくして解析しても実験との整合性の向上は望めないと思われる。

6.3 時間刻みの影響

非定常計算の時間刻みを2秒、1秒、0.1秒とした場合の解析を行った。その結果をセンサー1について図10に示す。0.5sec-1は図4のCFD-1と同一である。時間刻み2秒で

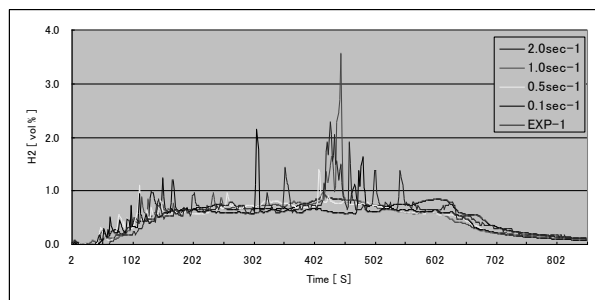


図10. 時間刻みの影響

は解がなまることが分かる。

Swaim [2]らのHydrogen Inlet位置を床の中央位置とした解析では、時間経過後の水素濃度はゆっくり変動している。これは当時のPCの性能から、本解析程度の小さな格子、小さな時間刻みを用いることが出来なかったと推定される。

井上の実験程度の小刻みな水素濃度の変動まで解析するには、セルサイズと時間刻みを1桁ないし2桁程度小さくした大規模解析が必要と思われる。

6.4 乱流モデルの効果

CFD解析においては一般的にk-ε乱流モデルがよく用いられる。そこで同一解析条件でLVELモデル、層流条件、標準k-ε乱流モデル、低レイノルズ数型k-ε乱流モデルを用いて解析を行った。その結果をセンサー1について図11に、センサー2について図12に示す。k-ε系の2方程式乱流モデルは、LVELモデルおよび層流条件と比較すると計算時間が長くなるし、実験との整合は良くないことが分った。

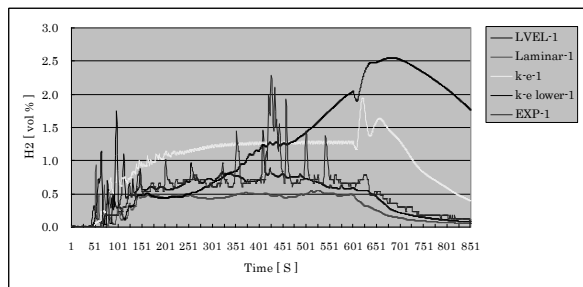


図11. 乱流モデルの比較 センサー1

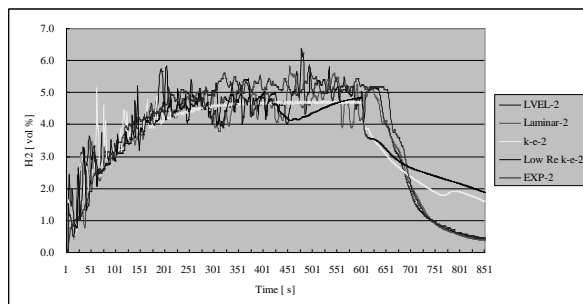


図12. 乱流モデルの比較 センサー2

7. 水素濃度の変動評価

Y軸中央断面の水素の拡散状況を時刻5秒、60秒、70秒について図13～図15に示す。水素濃度の分布が判り易い様にセルサイズを2.5cm、時間刻みを1/3秒で解析した。表示の水素濃度上限を6vol%に制限している。白抜きの部分は水素の濃度が6vol%を超えている領域である。

床下から漏洩する水素は浮力により加速され上昇する。上昇流の基部は圧力が低下し、周囲の空気が潜り込む。Roof Vent から水素が流出してHallway内の圧力が低下するとDoor Vent から新鮮な外気が流入する。この流入してきた外気は水素の上昇流を押し流す。水素の上昇流は壁面に引き寄せられたり、時々壁から離れたりする挙動を

する。これが水素濃度の変動として現れる。

100秒における水素の濃度が4 vol%以上となる領域を図16に、2~5vol%範囲の領域を図17に、密度を図18に示す。密度の表示単位はg/cm<sup>3</sup>である。

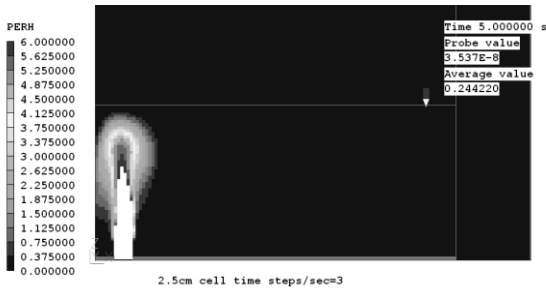


図13. 5秒のY中央断面の水素濃度

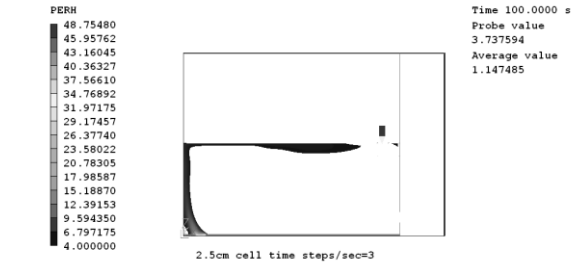


図16. 100秒の水素濃度4vol%以上の分布

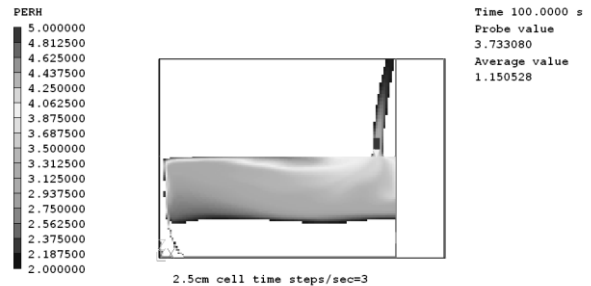


図17. 100秒の水素濃度2~5vol%の分布

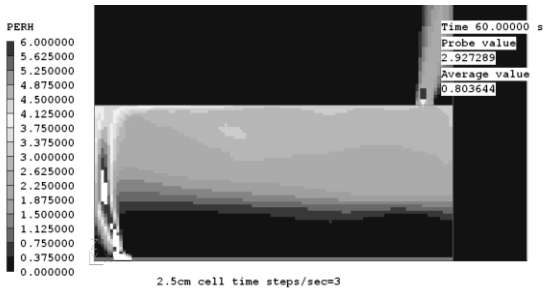


図14. 60秒のY中央断面の水素濃度

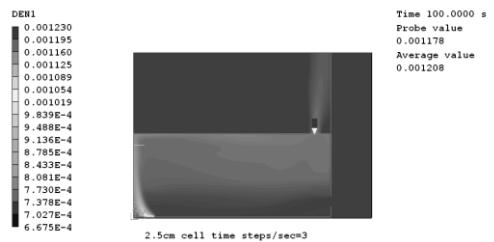


図18. 100秒の密度分布

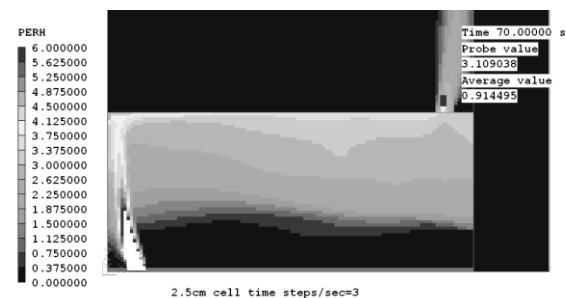


図15. 70秒のY中央断面の水素濃度

図16～図18から漏洩した水素は成層化し、燃焼下限界付近の濃度で広範囲に拡散していることが分かる。これはこの部分開放空間の換気性能が良好ではないこと、水素の拡散速度が大きいことによると思われる。

水素濃度が高いのは水素上昇流の基部のみであり、Hydrogen Inlet部で水素濃度は48.8 vol%に低下している。Roof Vent から流出する混合気の水素濃度は3.73vol%、密度は0.00118 g/cm<sup>3</sup>であり、水素上昇流の基部を除く殆どの領域で外気(0.00122 g/cm<sup>3</sup>)との密度差は2割以内であ

る。運動量保存式に浮力項を適切に組み込めば、密度、粘性係数、拡散係数を定数として解析出来る可能性を示唆している。

### 8. 天井の傾斜の効果

天井に傾斜を付ける効果を評価するために、HallwayをY軸周りに-5度回転[Roof Vent側が上がる方向]させた。センサー周りの2つのセル値と井上の未発表の実験との比較を図19~図22に示す。この実験ではセンサー1

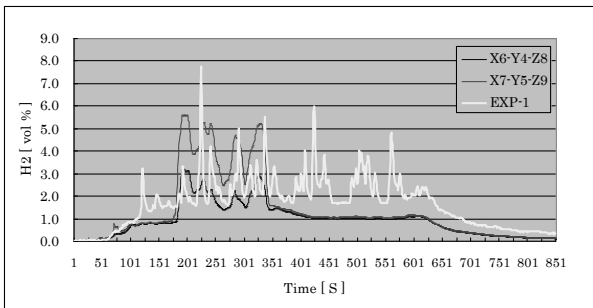


図19. -5度傾斜時のセンサー1

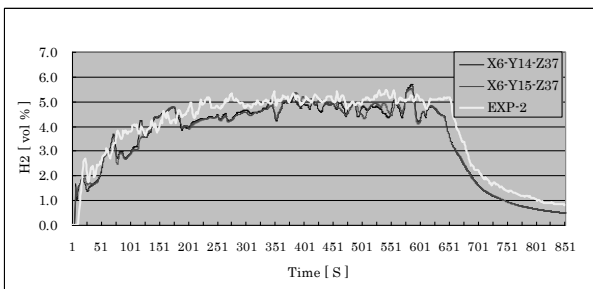


図20. -5度傾斜時のセンサー2

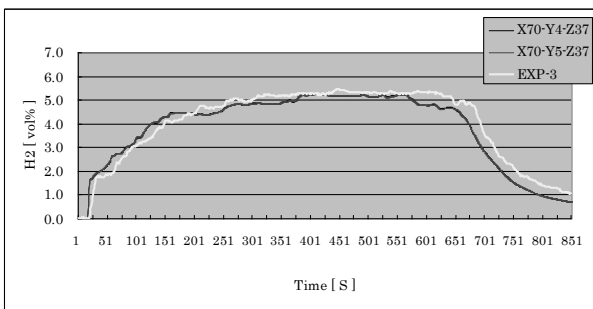


図21. -5度傾斜時のセンサー3

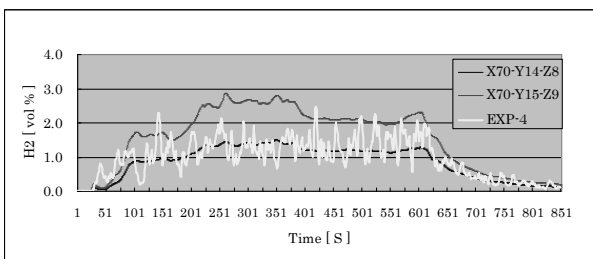


図22. -5度傾斜時のセンサー4

とセンサー2のx方向位置は22cmに変更されている。水素濃度が大きく変動しているのは、Hallwayを傾斜させると、床面も傾斜するので流入してくる外気の影響が大きくなるためと思われる。

Hallwayを-5度回転させた50秒におけるY軸中央断面の水素の拡散状況を図23に示す。白抜きの部分は水素濃度が4vol%以上の領域である。天井右端はRoof Ventよりも高い位置となり、水素が滞留する領域が生じている。水素濃度からだけでは換気性能向上の評価が難しい。Roof Ventが最も高い位置となるモデルを用いてDoor Ventから流入する外気の流速を比較した結果を図24に示す。-5度回転させると流速が増加していることから換気性能が向上することが確認出来た。

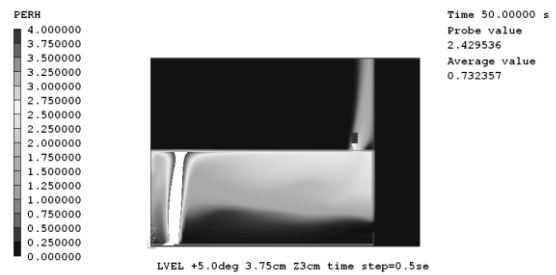


図23. -5度傾斜時の50秒のY中央断面の水素濃度

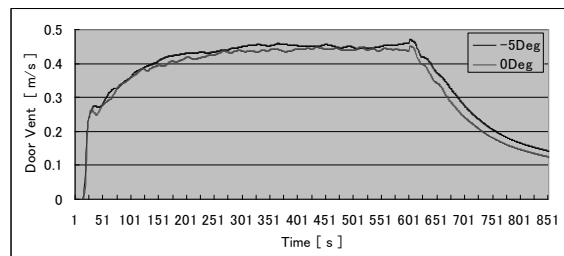


図24. Door Ventから流入する外気の流速

### 9. まとめ

Hallway Model を用いて自然換気状態における漏洩水素の拡散挙動についてCFD解析を行い実験と比較した。またCFD解析の課題である境界条件、セルサイズの依存性、時間刻みの影響、乱流モデルの効果について検討した。浮力に影響を与える境界条件が明確になり、非定常解析にはセルサイズは3.75cm程度、時間刻みは1秒以下、乱流モデルはLVELモデル又は層流条件が良いことが分かった。解析結果を可視化し、水素濃度の変動と天井の傾斜について評価した。漏洩する水素の拡散状況が把握

でき、CFD解析は有効で現実的な方法であることが確認された。

SAND86-8246, 1986.

CFD解析手法の精度評価の観点から水素センサーについて考察する。水素センサーの実際の応答速度は、実験の濃度変動速度から判断して、応答速度計測で得られる値より2桁程度速いようである。現在の容器を用いた測定方法は水素濃度の拡散速度が律則になっていると思われる。水素濃度が変化するときの応答速度の計測方法の開発が望まれる。また外形寸法が数mm程度の小型水素センサーの開発も望まれる。

今後、大きな空間について解析する場合、水素の噴出速度が速い解析をする場合、セルのサイズは本解析程度のもので良いか、また時間刻みはどうか、更なる検討を進めていく。また漏洩した水素が滞留しない構造、良好な換気状態にすることに関して議論を展開していく予定である。

## 謝辞

井上の実験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] 河内昭紀, 岡林一木, 武野桂二, 千歳敬子, “風洞実験による水素ガス拡散時の濃度変動特性と着火確率に関する研究,” 第25回水素エネルギー協会大会論文集, 2005, p 21.
- [2] Swain, M, R., Grilliot, E, S., Swain, M, N., “Risk Incurred by Hydrogen Escaping from Containers and Conduits,” Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review, 1998.
- [3] Agranat, V., Cheng, Z., Tchouvelev, A., “CFD Modeling of Hydrogen Releases and Dispersion in Hydrogen Energy Station,” Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2004.
- [4] 松浦一雄, 金山寛, 月川久義, 井上雅弘, “部分開放空間における水素拡散挙動に関する研究,” 水素エネルギーシステム, Vol.31, No2, 2006, P50.
- [5] Inoue, M., Hiroba, Y., Kawabata, Y., “Experimental Study about Hydrogen Flow Diffusion,” Asia Pacific Symposium on Safety 2007, Pusan.
- [6] Kee, J., Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, E., Miller, A., “A FORTRAN Computer Code for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties,” Sandia Report