

# 部分開放空間における水素拡散挙動に関する研究

松浦 一雄\*・金山 寛\*・月川 久義\*\*・井上 雅弘\*\*\*

\*九州大学大学院工学研究院 知能機械システム部門

〒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 地球資源システム工学部門

## Researches on Hydrogen Dispersion Behavior in a Partially Open Space

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

\*Kyushu University, Department of Intelligent Machinery and Systems, Faculty of Engineering

744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

\*\*Saibu Gas Co., Ltd.

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

\*\*\*Kyushu University, Department of Earth Resources Engineering

744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

Numerical simulation of hydrogen dispersion in a partially open space is performed in this paper. The transient behavior of hydrogen and the process of hydrogen accumulation in the space are discussed. Also, the effects of changing vent positions and conditions on the distribution of hydrogen concentration are shown. Based on the results, conditions for preventing dispersion and accumulation of hydrogen in the space are discussed.

**Key words:** Hydrogen, Dispersion, Computational Fluid Dynamics, Unsteady Flow, Compressible Flow

### 1. 緒言

化石燃料に替わる将来的な燃料として水素が注目され、盛んに研究が行われている。水素は、炭化水素系燃料に比べ、水素-空気混合気の着火に必要なエネルギーが小さく僅かな静電気で着火する、可燃範囲が広い、また空気中での拡散係数が大きいなどの性質を有している。そのため、水素燃料の広範な普及にあたっては、安全性に関する検討が必須である。

従来、水素による金属材料の脆化、水素利用機械におけるシーリングの向上、着火・爆発など、事前的から事後の対処に至るさまざまなレベルにおける安全性の研究が行われてきた。中でも、漏洩した水素に対する検討は、直接着火にいたる危険性を防ぐものであり、水素脆性やシーリングの不具合に対するフェイルセーフとしても位

置づけられる。そのため、水素が万一漏洩した場合の拡散挙動を事前に把握しておくことは、安全確保のために重要である。特に、水素は上記のような性質を有するため、漏洩開始から十分に時間が経過したときの定常分布のみならず、それ以前の過渡挙動も含めた、長時間にわたる挙動の把握が求められている。

一方で、水素は大流量の漏洩[1]でない限り、開放度の高い場所では漏洩しても比較的短時間で拡散し、可燃限界以下の濃度に至るであろう。しかしながら、密閉度の高い空間では、たとえ小流量でも長時間漏洩すれば、大いに危険性がある。

従来、密閉度の高い室内における水素漏洩・拡散に関しては複数の研究報告がなされているが[2-5]、水素の集積に至る過渡挙動や、濃度分布に対する換気の影響は報告が未だ数少なく、水素の拡散や滞留を抑制する構造に関

しても、更に検討する必要があると考えられる。

そこで本論文では、Hallway Model [2]と呼ばれる部分開放空間における水素拡散挙動の数値解析を行う。これにより、漏洩した水素の過渡挙動や、換気口の位置やその圧力変化が拡散・滞留に与える影響について示す。さらに、これらの結果に基づき、水素の拡散や滞留を抑制するための条件について考察を行うことも、本研究の目的である。

### 2. 解析対象

解析対象はFig. 1に示すHallway Model [2]と呼ばれる  $L_x [m] \times L_y [m] \times L_z [m] = [0, 2.9] \times [0, 1.22] \times [0, 0.74]$  の寸法を有する部分開放空間である。解析条件は、このモデルの床部から純水素が2SCFM (Standard Cubic Feet Per Minutes)の流量で漏洩し、Roof VentおよびDoor Ventを自然換気とする条件である。流入口、Roof VentそしてDoor Ventの面積は全て、 $4.65 \times 10^{-2} [m^2]$ である。また、それらの位置と寸法は付録に記載する。Table 1には本解析における主要な無次元パラメータを示す。同表における Reynolds数( $Re$ )、Schmidt数( $Sc$ )、Mach数( $Ma$ )、Richardson数( $Ri$ )そして密度比 $k_\rho$ はそれぞれ、以下の様に定義される。

$$Re = \frac{UL}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}, \quad Ma = \frac{U}{a},$$

$$Ri = \frac{(\rho_{air} - \rho_{H_2})gL}{\rho_{H_2}U^2}, \quad k_\rho = \frac{\rho_{air}}{\rho_{H_2}}.$$

ここで、 $U$ は入口における水素ガスの流入速度、 $L$ はオリフィスの大きさ、 $\nu$ は水素ガスの動粘性係数、 $D$ は空気中における水素ガスの拡散係数、 $a$ は水素ガスにおける音速、 $\rho_{air}$ は空気密度、 $\rho_{H_2}$ は水素ガスの密度そして、 $g$ は重力加速度をそれぞれ表す。

また、計算領域内では、Table 2に示す座標位置にある Sensor 1~Sensor 4の4箇所水素濃度の時系列データを取得し、対応する実験データと比較している。Fig. 2は実験に使用したアクリル製の実スケールモデルを示す。

### 3. 解析手法

解析は質量保存式、重力を考慮した圧縮性Navier-Stokes方程式、エネルギー方程式および水素、窒素、酸素の三化学種の質量分率に関するスカラー保存式からなる方程

式系に標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを導入し行った。ここで、多成分系における拡散はStefan-Maxwellの式[6]により考慮した。解析に当たっては、有限体積法に基づく商用熱流体解析用ソフトウェアCFD-ACE+を使用した。

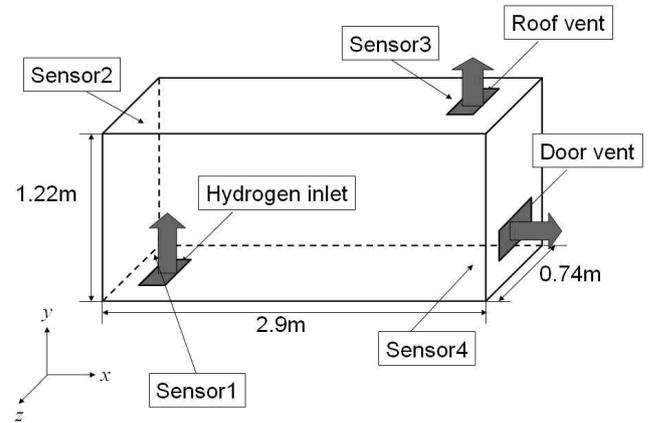


Fig. 1 Computational domain



Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Non-dimensional parameters

Reynolds数、 $Re$	58.0
Schmidt数、 $Sc$	1.72
Mach数、 $Ma$	$1.53 \times 10^{-5}$
Richardson数、 $Ri$	$1.00 \times 10^5$
密度比、 $k_\rho$	14.4

Table 2 Sensor locations

	x [m]	y [m]	z [m]
Sensor 1	0.152	0.152	0.596
Sensor 2	0.152	1.009	0.219
Sensor 3	2.676	1.009	0.596
Sensor 4	2.676	0.152	0.219

本研究では圧縮性Navier-Stokes方程式を基礎方程式としているが、通常、Mach数が0.3以下では、圧縮性が無視できるとされる[7]。熱駆動による低速の浮力流では、Boussinesq近似を導入した非圧縮の基礎式に基づく解法や、低Mach数近似[8]による解法などが知られている。しかしながら、濃度成層を伴う流れの解析に対しては、Boussinesq近似のアナロジーによる試み[4]も一部提案されているものの、低Mach数流れに対する一般的な解法は整備されていない[9]。そのため、定式化には上述の方程式を基礎においている。

境界条件に関しては、水素流入部で流速と温度を指定、Roof Vent部およびDoor Vent部で静圧を固定した。尚、本研究では静水圧を考慮しているが、Door Vent部でy方向の静圧変化を指定することが困難であったため、Fig. 3のように、ダクト部を領域外部に設け、Roof VentとDoor Ventダクトの出口境界の高さを揃えている。それにより、Door Vent部に所望の静圧が課されるようにしている。このようなダクトを用いることの有効性は、ダクト以外にもDoor Vent部で接続される別室を設けた計算でも同様の結果を与えることから確認してある。壁面では、滑り無し、断熱境界条件を課した。化学種に関しては、水素流入部で前述のように水素のみの流入、Roof Vent部では外挿、そしてDoor Ventでは空気のみ流入となっている。乱流物理量 $k$ および $\epsilon$ に関しては、流入部と出口境界において、乱れ強さ( $T_{in}$ )および長さスケール( $l$ )をそれぞれ指定した。ここで、水素流入部における乱流エネルギー、y方向速度( $v_{in}$ )、そして乱れ強さとの関係は、 $k=3/2(T_{in} \times v_{in})^2$ であり、散逸率、乱流エネルギー、そして乱れスケールとの関係は、 $\epsilon=C_{\mu}k^{3/2}l$ である。 $C_{\mu}$ は0.09の値をとる定数である。格子点数は合計約3万点であり、また、時間刻みは1秒に設定した。

#### 4. 結果と考察

Fig. 4に各センサー位置における水素体積濃度の時間履歴に関して、計算結果と実験結果を比較したものを示す。実験結果は2種類あり、一方は文献[2]に示されているデータ、他方は著者の一人である井上らにより、気体熱伝導式センサーを用いて取得されたデータである。このセンサーによる計測は、センサーの時定数により10秒程度経過しないと真の濃度値を示さないという限界もあるものの、現状では有効な測定法の一つとなっている。

ところで、文献[2]のデータの測定手法に関しては、実験モデル、水素流入量の条件を除き不明である。

Sensor 2における100秒以前の計算結果と実験結果の間、250秒以後の実験結果同士間には、若干の不一致も見られるが、本計算結果は、Sensor 2およびSensor 3における濃度の時間履歴と、Sensor 1における150秒以降の濃度に関して、実験結果を概ね良く再現している。

一方で、Sensor 1の100秒以前、およびSensor 4の濃度に関しては、実験値との比較的顕著な相違も見られる。この理由は、三つ考えられる。一つは、本研究で扱っている水素の自然対流において、水素自体の密度が非常に小さいため、換気口における境界条件の相違が濃度分布に対して、強い影響を与えていることである。後述のように、境界の圧力における0.5[Pa]程度の僅かな圧力変化さえも、室内の濃度分布に対して、数%にも至る極めて大きな影響を与える。上述の二つの実験結果では、計測の不確かさは現状では必ずしも明確ではない。二つ目の理由は、後述のFig. 9におけるModel 1の速度ベクトルより分かるように、モデル内下部領域では、Door Ventからの吸気により、y方向のせん断流が形成されていることである。また、この流れは、漏洩源における上昇気流を強く変動させている。そのため、複雑な乱流場が形成され、数値解析の観点からも、予測が困難なものになっているためである。三つ目の理由は、特にSensor 1に関するものである。先に、計測の不確かさに関して述べたが、実験におけるセンサーの位置に関しても、設置の困難さからミリオーダーの誤差を含んでいる。Sensor 1が設置されている水素流入部近傍は濃度勾配が密なところであり、センサー位置のわずかなずれによっても、計測値が顕著に変わる可能性がある。

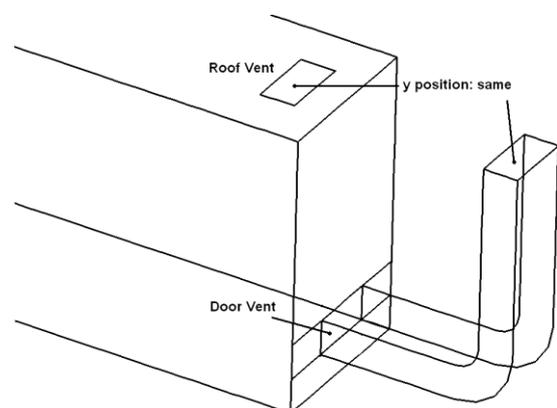


Fig. 3 Extension duct of the door vent

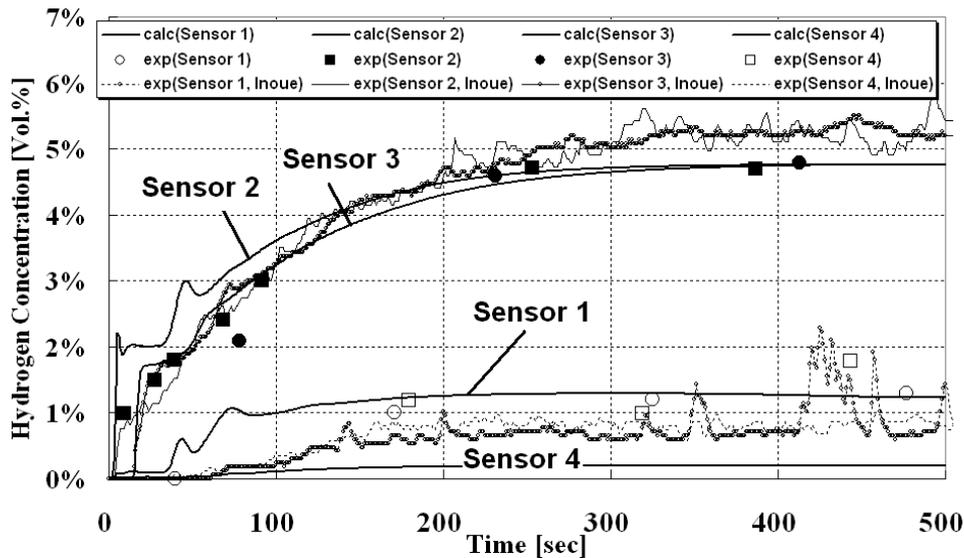


Fig. 4 Comparisons of the time histories of hydrogen concentration between the computations and the experiments

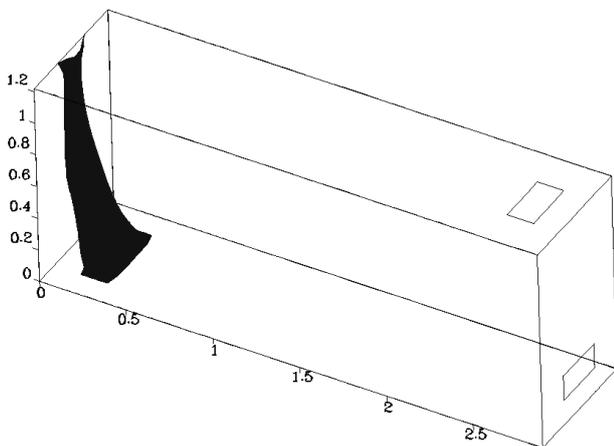


Fig. 5 Iso-surface of 4.0 [vol.-%] H<sub>2</sub> concentration at 70 [sec] after the leakage

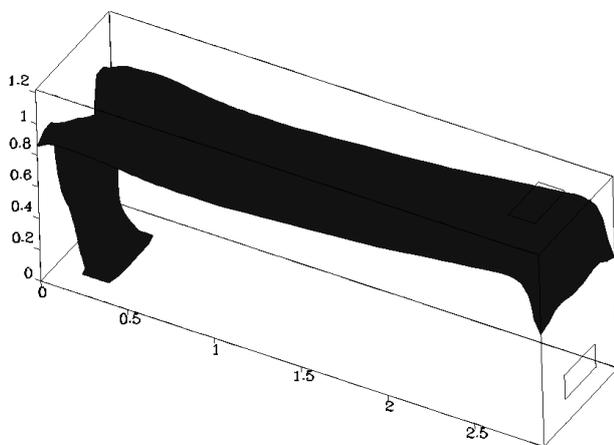


Fig. 6 Iso-surface of 4.0 [vol.-%] H<sub>2</sub> concentration at 160 [sec] after the leakage

Fig. 5およびFig. 6に漏洩開始後70秒および160秒における水素体積濃度4%の等値面をそれぞれ示す。漏洩した水素は天井へ到達し、1分程で天井付近のガスも可燃限界内に入る。その後、天井付近に水素が集積していく様子が分かる。また、Fig. 7には、各時刻におけるxz面中央壁垂直方向(y方向)の水素体積濃度分布を示す。漏洩開始後約100秒経過すると、下部領域の水素濃度は2%程度以下の濃度にほぼ収束する一方で、専ら天井付近の濃度が継続して上昇し、室内に濃度成層が形成されていく。Fig. 6および後述のFig. 9と併せると、流入部からの水素ガスの移動およびDoor Ventからの吸気により、室内に循環が形成され、この濃度成層が維持されると同時に、xz面にはほぼ平行な濃度等値面が徐々に、天井から下降することが分かる。

Fig. 8には、換気位置の相違が濃度分布に与える影響を明らかにするため、それぞれ換気位置を変化させたModel 1からModel 5を作成して解析を行った結果を示す。以降のFig. 8～Fig. 12には、長時間経過後の定常結果を示している。Model 1はFig. 1において説明した換気位置変更無しモデルであり、Model 2からModel 4は、Model 1に対してRoof Ventの位置のみをFig. 8左下に示すように変化させたものである。またModel 5はFig. 8右下に示すようにDoor Ventの位置のみをModel 1に対して変化させている。Model 4の結果は、Model 1からModel 3と比較して、Sensor 2およびSensor 3の濃度値が低下している。一方、Model 5の結果は、その他のモデルと比較し、

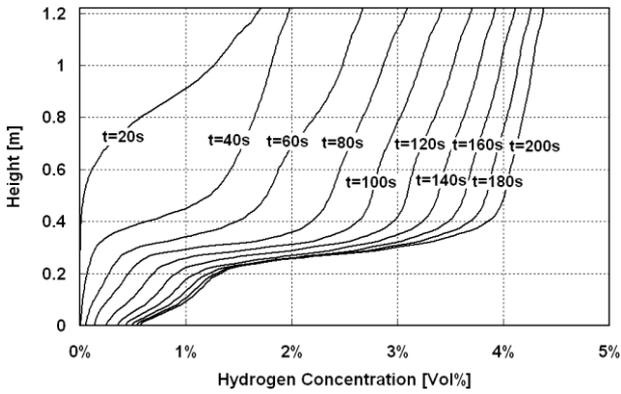
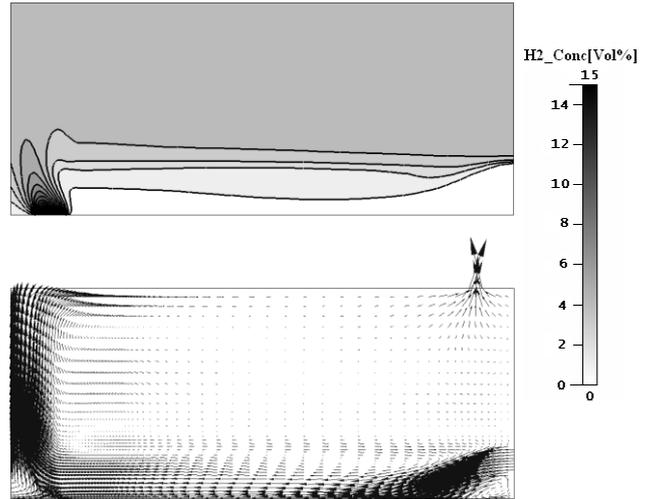


Fig. 7 y-dir. distribution of H<sub>2</sub> volumetric concentration at each time step



Model 1 (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)

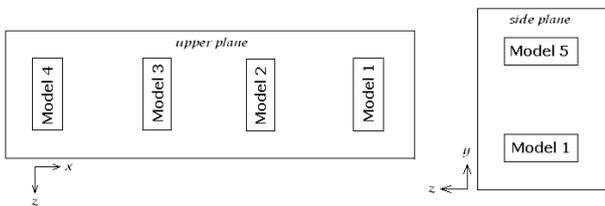
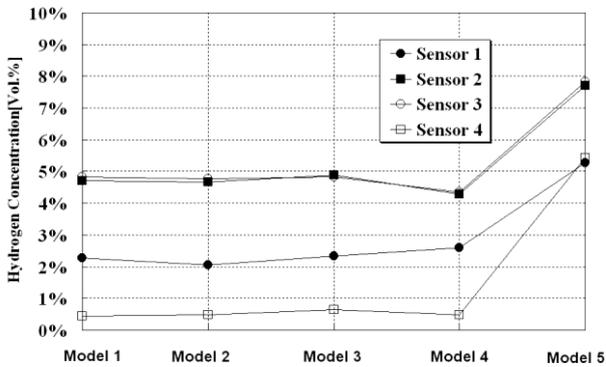
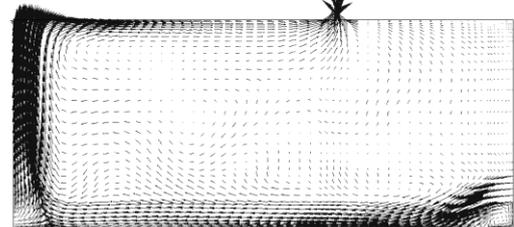
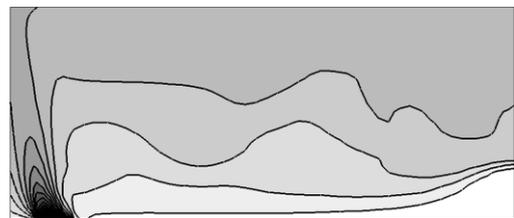
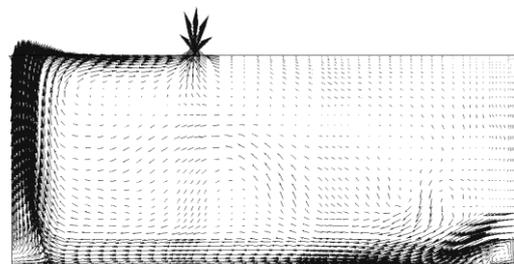
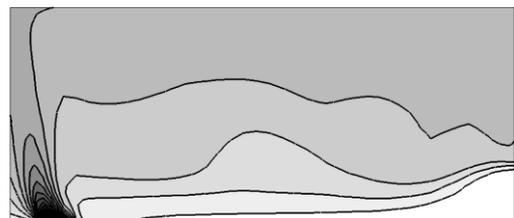


Fig. 8 Variations of hydrogen concentration due to changes in vent position (upper) and the vent position in each model (lower)

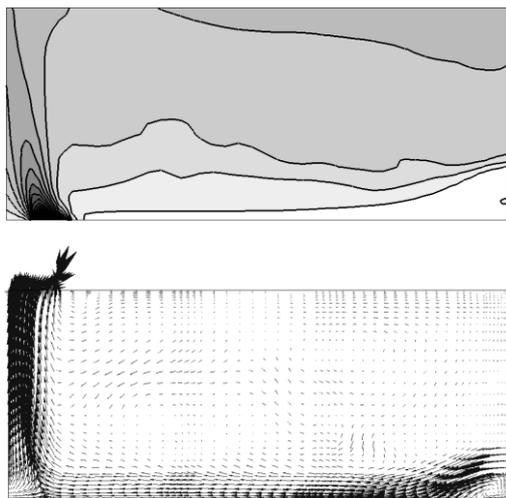
全てのセンサー濃度値が大幅に増加している。その理由を明らかにするため、Fig. 9に、室内の空間濃度分布に対する換気位置の影響を示す。図中、コンタは水素の体積濃度を、矢印は速度ベクトルを表している。Door Ventの位置を変化させることにより、天井付近から吸気が行われるため、天井に溜まった混合ガスが下部領域へと誘起される。その結果、Fig. 7に見られた濃度成層が大きく乱され、下部領域へ水素が拡散するため、室内全体の濃度が上昇する。これらの結果に基づき、Roof Vent位置の



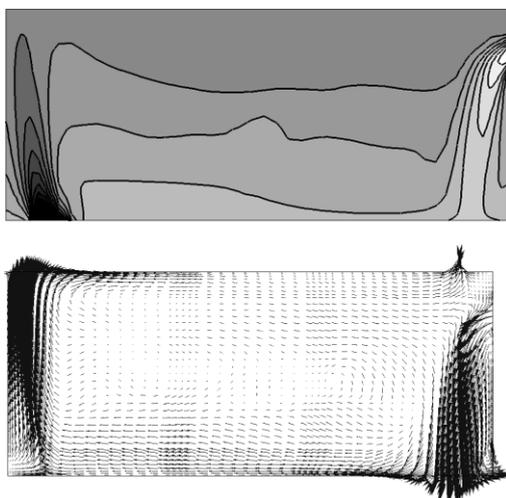
Model 2 (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



Model 3 (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



Model 4 (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



Model 5 (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)

Fig. 9 The effect of vent position on hydrogen concentration

変更は、上部領域の濃度分布に、Door Vent位置の変更は、下部領域の濃度分布に対しても強い影響を持っていることが分かる。

次に、換気口における圧力が換気ファンや外乱などの原因により変化した時に、室内の濃度分布がどのように変化するか議論する。Fig. 10は、Door Ventの圧力を保ったまま、Roof Ventの圧力を前述の計算より0.5~3.0 [Pa] 低下させたときのセンサー濃度変化を、Fig. 11はRoof Ventの圧力を保ったまま、Door Ventの圧力を低下させたときのセンサー濃度変化をそれぞれ表している。Fig. 10より、Roof Ventの圧力を0.5~3.0 [Pa] 低下させることで、室内下部領域の水素濃度はほとんど変化しないが、上部

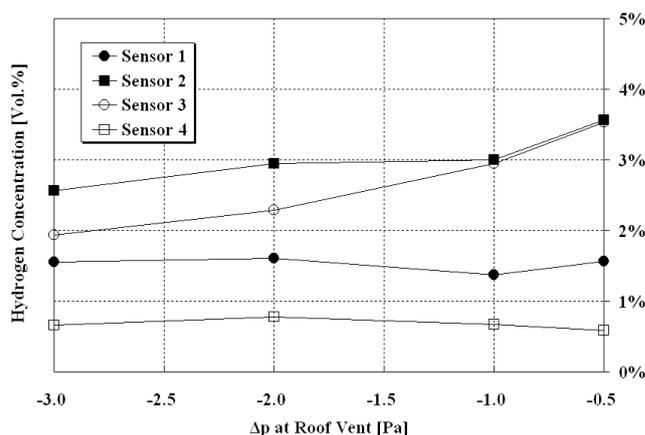


Fig. 10 The effect of roof vent pressure on hydrogen concentration

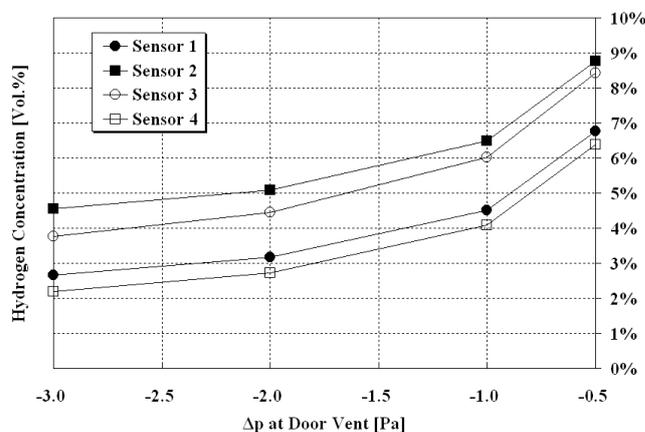
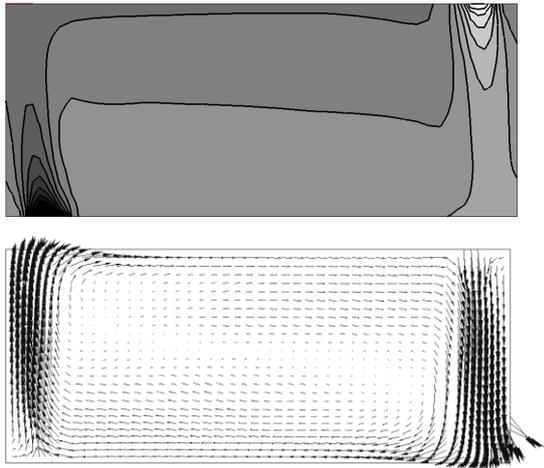


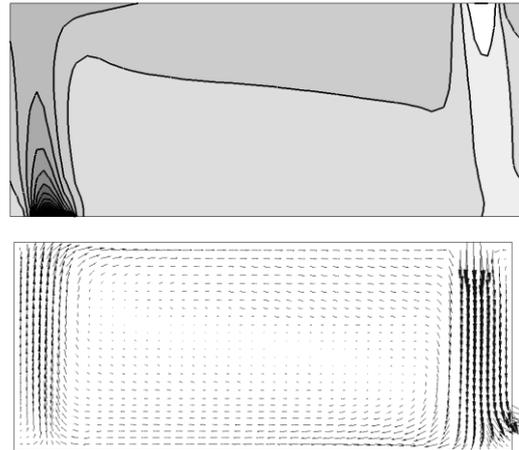
Fig. 11 The effect of door vent pressure on hydrogen concentration

領域の水素濃度は約1~1.5%変化する。一方、Fig. 11より、Door Ventの圧力を0.5 [Pa]と僅かに低下させるとき、センサー濃度が急激に上昇し、3.0 [Pa]と大幅に圧力低下させるときよりも高い濃度値となる。この理由を明らかにするため、Fig. 12にDoor Ventの圧力変化が室内の空間的な濃度分布に与える影響を示す。Δp=0.5 [Pa]と僅かにDoor Ventの圧力を低下させるとき、上部領域の混合ガスは、領域下部へと誘起される一方で、Δp=3.0 [Pa] とするときと比較するとDoor Ventから排出される量は少ない。そのため、室内に水素が充満する。これは、見方を変えると、水素が非常に軽い気体であるため、Door Ventにおける僅かな圧力低下に釣り合うのは、排出される水素ガス濃度が高いときである、ともいえる。

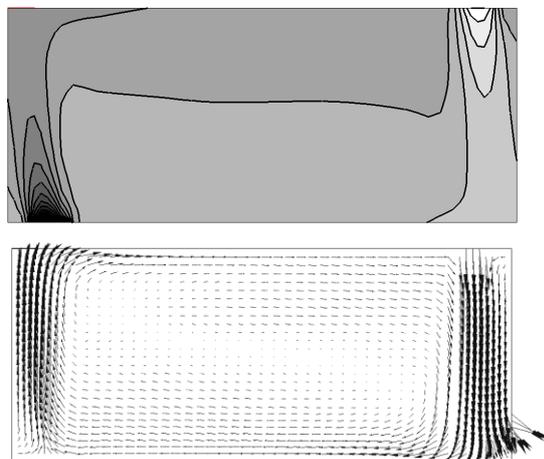
以上の結果に基づくと、水素の拡散や滞留を抑制する



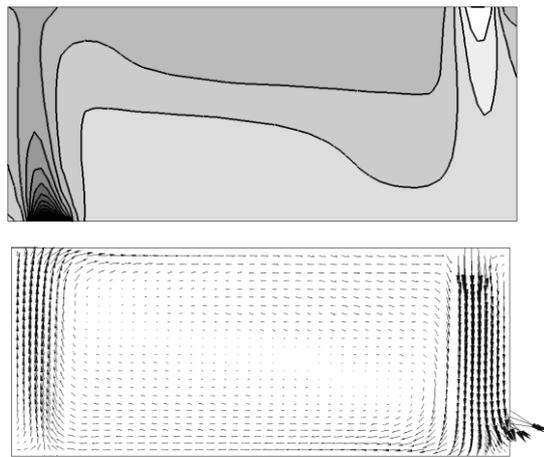
$\Delta p = -0.5$  [Pa] (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



$\Delta p = -3.0$  [Pa] (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



$\Delta p = -1.0$  [Pa] (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)



$\Delta p = -2.0$  [Pa] (upper: H<sub>2</sub> concentration, lower: velocity vectors)

Fig. 12 The effect of door vent pressure on spatial hydrogen concentration

ためには、圧力条件が僅かに変化しても、室内の濃度成層が乱れないように、空間形状を変更あるいは、換気口位置を設定することが必要であると考えられる。

### 5. まとめ

Hallway Modelと呼ばれる部分開放空間における水素拡散挙動の数値解析を行った。それにより、漏洩した水素の過渡挙動や、換気口の位置やその圧力変化が拡散・滞留に与える影響、さらに水素の拡散や滞留を抑制するための条件について考察した。その結果、以下の新たな知見を得た。

- ①漏洩した水素は強い浮力により天井へと上昇し、集積する。流入部からの水素ガスの移動およびDoor Ventからの吸気により、室内に循環が形成され、濃度成層が維持される。
- ②Roof Vent位置の変更は、上部領域の濃度分布に対して影響を与える一方で、Door Vent位置を天井付近へと移動させると、天井付近に溜まったガスの領域下部に対する拡散が助長され、室内の水素濃度が大幅に増加する。
- ③Roof Ventの圧力低下は、室内上部領域における水素濃度を低下させるが、下部領域の濃度にはほとんど影響を与えない。一方で、Door Ventの圧力が僅かに低下すると、天井付近に溜まったガスの領域下部に対する拡散が助長され、室内の水素濃度が大幅に増加する。

④水素の拡散や滞留を抑制するためには、圧力条件が僅かに変化しても、室内の濃度成層が乱れないように、空間形状を変更あるいは、換気口位置を設定することが有効である。

今後、詳細な検討を進めていくことが課題である。また、水素を検知するセンサーの最適配置、漏洩源の変化や粉塵、湿度変化などの不確定要因が存在する環境下での水素の確実な拡散・滞留の抑制に関しても議論を展開していく予定である。

## 謝辞

本研究は、九州大学21世紀COEプログラム「水素利用機械システムの統合技術」の一環として行われた。ここに記して謝意を表したい。

## 参考文献

1. Venetsanos, A. G, Huld, T., Adams, P., Bartzis, J. G., "Source, Dispersion and Combustion Modelling of an Accidental Release of Hydrogen in an Urban Environment," *Journal of Hazardous Materials*, A, 105, 2003, pp. 1-25.
2. Swain, M. R., Grilliot, E. S., Swain, M. N., "Risks Incurred by Hydrogen Escaping from Containers and Conduits," *Proceedings of the 1998 U. S. DOE Hydrogen Program Review*, 1998.
3. Agarant, 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. Kanayama, H., Maeda, K., Mino, M., Matsuura, K., "Finite Element Simulation of Hydrogen Dispersion," *Computational Fluid Dynamics JOURNAL*, Vol. 15, No. 1, 2006, pp. 101-106.
5. 松浦一雄, 金山寛, "部分開放空間における水素拡散挙動に関する研究," 日本機械学会2006年度年次大会講演論文集—計算力学, 材料力学, 機械材料, 材料加工, Vol. 1, 2006, pp. 45-46.
6. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lighfoot, E. N., "Transport Phenomena," 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
7. Schlichting, H., Translated by Kestin, J., "Boundary-Layer Theory," 6<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, 1968.
8. Rehm, R. G., Baum, H. R., "The Equations of Motion for Thermally Driven Buoyant Flows," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 83, No. 3, 1978, pp.

297-308.

9. 小林敏雄編, "数値流体力学ハンドブック," 丸善株式会社, 2003, p. 198.

## 付録

以下の図に、Hallway Modelの各寸法を示す。図中、数値の単位はメートルである。

