

室内に漏洩した水素ガスの挙動に関する研究

丹 原 千 里 小 野 佳 之
田 畑 侑 一

Study on Behavior of Hydrogen Gas Leaked Indoors

Chisato Tambara Yoshiyuki Ono
Yuichi Tabata

Abstract

Research has been conducted to quickly detect hydrogen gas and prevent it from reaching a lower explosion-limit concentration. However, when the location of the leak is unclear or when leak detection is delayed, preventing hydrogen gas from stagnating is considered effective. This study aims to investigate an effective ventilation method for preventing hydrogen gas retention. First, we studied the changes in hydrogen gas concentration when hydrogen gas leaked into the room. Next, we analyzed and modeled the behavior of hydrogen gas and confirmed that the conditions for the stable existence of a high-concentration retention layer near the ceiling could be studied.

概 要

水素ガスを扱う施設において万が一水素が漏洩した場合に備え、爆発濃度範囲に到達させないための迅速な検知を目的とした研究がこれまで行われてきた。しかしながら、漏洩箇所が明確ではなく、漏洩検知が遅れてしまう状況では、水素ガスを滞留させないといった対策が有効であると考えられる。そこで本研究では水素ガスを滞留させないための効果的な換気方法の検討を最終目的とし、まず水素ガスが漏洩した場合の室全体の水素ガス濃度の変化を検討した。これより、換気回数を増やすことによる循環流の影響で、水素ガス濃度が上昇してしまうケースを確認した。そこで、水素ガス漏洩時の換気状態をモデル化することにより、天井付近の高濃度の滞留層が安定して存在するためには、濃度に起因した浮力が下降流速度を上回る必要があることが分かった。

1. はじめに

水素エネルギーは次世代エネルギーとして大いに期待されているが、本格的な利用は実現していない。これは、水素ガスの燃焼範囲が広く、小さなエネルギーでも引爆するため、取り扱いに注意が必要とされることが理由の1つと考えられる。そのため、水素ガスを取り扱う施設の設計時には、水素ガスを漏洩させない、万が一漏洩した場合には検知して漏洩を止める、水素ガスの密度の小ささによる浮力を活かし滞留させないといった対策を組み込む必要がある。これらの対策により、室内の水素ガス濃度を爆発濃度範囲に到達させない、あるいは爆発濃度範囲となる時間をできるだけ短くするように制御することができると考えられる。

水素ガスを取り扱う施設のような閉空間における漏洩時のリスク評価を目的とした研究はこれまでにも実施されている^{1,2)}。その中でも、Matsuura et al.³⁾は、閉空間内の水素ガスの濃度分布を数値解析によって把握し、排気口を漏洩口に近い位置に設置するほど換気性能が向上することを示している。また、米国立標準技術開発研究所(NIST)により、ガレージ内における水素ガス漏洩時の強

制換気性能評価に関する実験が⁴⁾、朝原⁵⁾により解析が実施され、換気量や排気口位置が水素ガスの排出性能に与える影響を確認している。

一方で、換気が行われている一般的な室を対象とした検討はあまり行われていない。また、迅速な検知を目的とした研究は行われているが、岡ら⁶⁾は天井の梁によって水素ガスが滞留する可能性を示唆しており、検知後に水素ガスの漏洩を止めた場合にも、迅速に水素ガスを排出できない可能性がある。さらには、水素ガスの漏洩箇所が明確であり緊急遮断が可能な場合であれば迅速な検知は有効であるが、漏洩箇所が明確ではなく、漏洩検知が遅れてしまう状況も想定される。このような想定条件では、水素ガスを滞留させないといった対策が有効であると考えられる。

そこで本研究では、水素ガスを滞留させないための効果的な換気方法の検討を最終目的とし、まず、換気が行われている一般的な室を対象に、水素ガスのスローリークを想定した場合の、換気回数や水素ガスの漏洩量が室全体の水素ガス濃度に及ぼす影響を検討した。また、室内に漏洩した水素ガスの挙動について分析し、モデル化を試みた結果について報告する。

2. 水素ガス漏洩時の挙動把握

2.1 解析概要

解析対象は、実在する実験室を模擬した Fig. 1 に示すような床面に吹出口、天井面に排気口を有する室である。吹出口と排気口の位置関係によって 2 種類のモデルを想定した。モデル 1 は吹出口と排気口の平面上の位置が同じ条件、モデル 2 は吹出口と排気口の平面上の位置が異なる条件である。換気回数は一般的な作業環境を想定した 5 回/h と水素ガスを迅速に流出するために換気量を増やした 10,15 回/h とした。換気量を増やした際の吹出口と排気口の個数と大きさは変化させないため、換気回数の増加にともなって流入風速が大きくなる。水素ガス漏洩箇所は室中央とし、スローリークを想定した 50,500,1000NL/min の 3 種類とし、漏洩方向はいずれも上向きとした。なお、FCV 用の水素ガスタンクの容量は 40MPa で 5.0×10^4 NL, 70MPa で 1.0×10^5 NL であり、これらが脆性破裂して瞬時に充填されたガスが漏洩した場合に比べると、本解析の条件はもう少しゆっくりした漏洩を想定している。解析ケースの一覧を Table 1 に示す。ケース 1,2,3 はケース 2 を基準として水素ガス漏洩量を変化させたもの、ケース 4,5 はケース 2 を基準として換気回数を変化させたものである。ケース 1 から 5 はモデル 1 を使用しているが、ケース 6 はケース 2 に対して吹出口と排気口の位置関係を変化させたモデル 2 を使用した。解析には、数値シミュレーションの手法として Large Eddy Simulation(LES)を採用した自社開発ソフトウェアである数値風洞「エアロダイナ®」を使用し、室外の一定範囲も解析対象としてモデル化を行った。解析条件を Table 2 に示す。既報⁷⁾にて本報と同様のモデルでのヘリウムガスを使用した実験の再現解析を実施し、解析結果の妥当性を検証した。測定点は x,y 方向に 1500mm 間隔、z 方向に 500mm 間隔の計 80 点設けた (Fig. 1)。漏洩した水素ガスは浮力の影響で天井面近傍に滞留する。そのため、漏洩口直上と天井面近傍の水素ガス濃度は非常に高くなると考えられるが、本報では室全体の濃度の変化に着目するため、測定点の水素ガス濃度の空間平均値を室全体の水素ガス濃度とすることとする。

2.2 水素ガス漏洩量が及ぼす影響

水素ガス漏洩量を変化させた、ケース 1・ケース 2・ケース 3 について漏洩開始後 200 秒と 400 秒の断面 1 の水素ガス濃度分布を Fig. 2 に示す。いずれのケースも漏洩した水素ガスは浮力の影響で天井面近傍に滞留しており、漏洩量が多いほど天井面近傍に滞留している水素ガス濃度が高い。漏洩開始後 500 秒までの室全体の水素ガス濃度の時間変化を Fig. 3 に示す。時間が経過とともに、どのケースでも少しずつ濃度が上昇しており、漏洩量が多いほど室全体の濃度も高い。これは、排気口から排出しきれない水素ガスが室内に少しずつたまつてしまい、漏洩量が多いほど排出しきれない水素ガスの量が大きくなるためと考えられる。

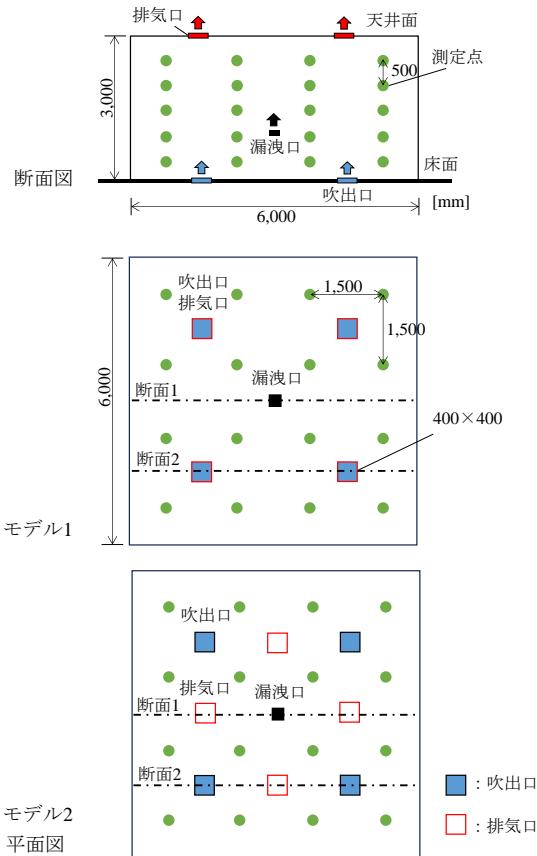


Fig. 1 解析モデル詳細
Outline of the Simulation Model

Table 1 解析ケース

Lists of Simulation Case

ケース名	漏洩量 [NL/min]	換気回数 [回/h]	モデル
ケース 1	50	10	1
ケース 2	500	10	1
ケース 3	1000	10	1
ケース 4	500	5	1
ケース 5	500	15	1
ケース 6	500	10	2

Table 2 LES 解析条件

Summary of Method Used in Simulation

SGS モデル	Coherent Structure Smagolinsky Model
密度差による浮力	ブシネスク近似
時間刻み	0.001[s]
格子サイズ (室内)	25[mm]~50[mm]
格子数	7,000,000

きくなるためと考えられる。

2.3 換気回数が及ぼす影響

室の換気回数を変化させた、ケース 4・ケース 2・ケース 5 について漏洩開始後 200 秒と 400 秒の断面 1 の水素ガス濃度分布を Fig. 4 に示す。Fig. 2 の水素ガス漏洩量を

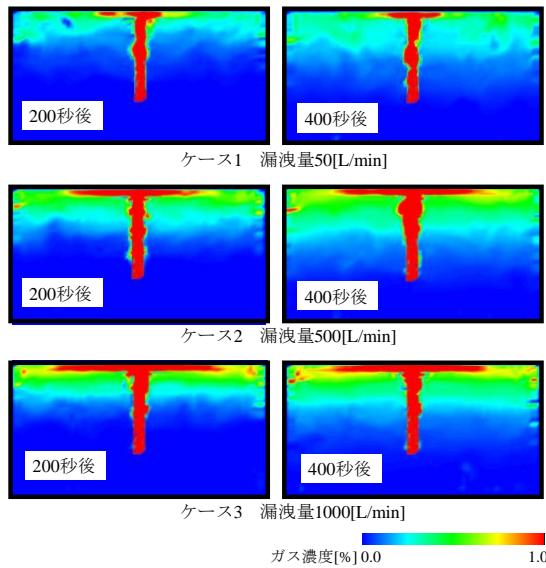
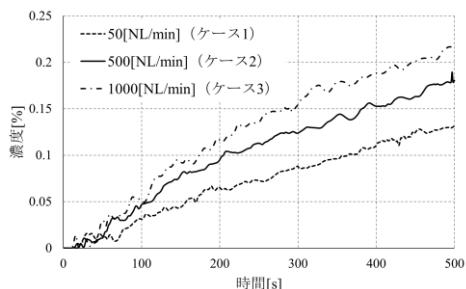


Fig. 2 水素ガス濃度分布 (ケース 1,2,3)

Hydrogen Gas Concentration (Case1,2,3)

Fig. 3 水素ガス濃度の時間変化 (ケース 1,2,3)
Variations with Time of Hydrogen Gas Concentration
(Case1,2,3)

変化させた場合と同様に、天井面近傍に水素ガスが滞留していることが分かるが、その濃度分布には換気回数によって大きな差異がある。また、換気回数が大きいケースでは、時間の経過とともに、気流によって室全体に水素ガスが拡散し、少しづつ水素ガス濃度が上昇する搅拌現象が起きている様子がみられる。漏洩開始後 500 秒までの室全体の水素ガス濃度の時間変化を Fig. 5 に示す。これより、時間が経過するとともに、どのケースでも濃度が上昇しており、その程度は特に換気回数が 15 回/h の時に大きい。瞬時一様拡散を仮定した換気理論における漏洩開始後 500 秒までの室全体の水素ガス濃度の時間変化を Fig. 6 に示す。一般的に、換気理論に基づくと換気回数が大きいほど水素ガス濃度の上昇を小さく抑制できると考えられるが、本報で検討したモデルにおいては換気回数が大きいほど水素ガスの濃度の上昇が大きくなっていることが分かる。換気回数の小さいケース 4 と換気回数の大きいケース 5 の断面 2 の漏洩開始後 200 秒の流速分布を Fig. 7 に示す。これより、換気回数の大きいケー

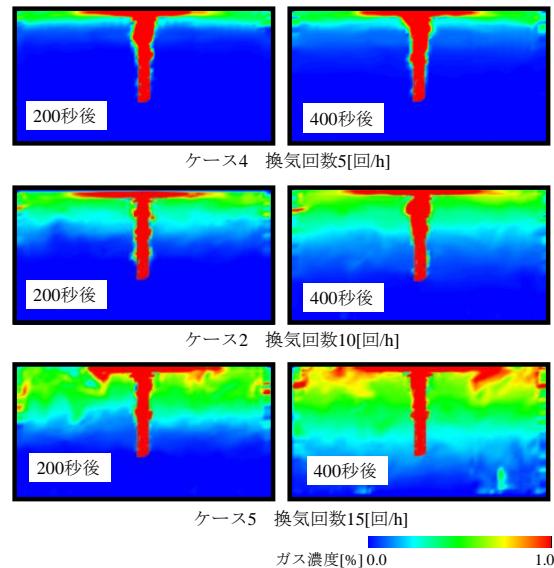
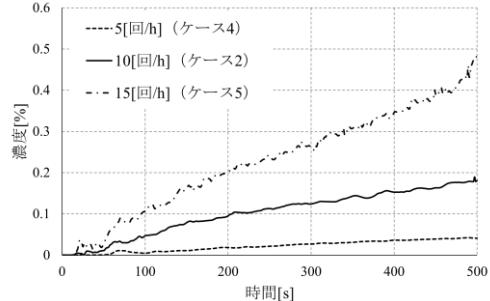
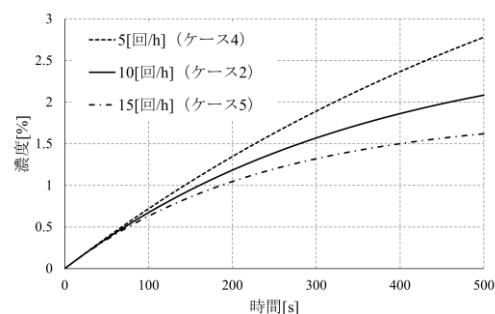


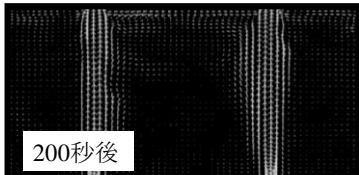
Fig. 4 水素ガス濃度分布 (ケース 4,2,5)

Hydrogen Gas Concentration (Case4,2,5)

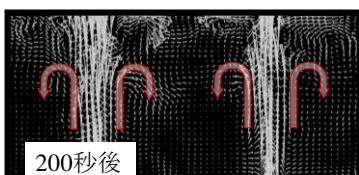
Fig. 5 水素ガス濃度の時間変化 (ケース 4,2,5)
Variations with Time of Hydrogen Gas Concentration
(Case4,2,5)Fig. 6 水素ガス濃度の時間変化 (換気理論)
Variations with Time of Hydrogen Gas Concentration
(Ventilation Theory)

ス 5 では、吹出口からの流入風速が大きく、室全体に大きな循環流が形成されている様子がみられる。この循環流により天井面近傍に滞留している水素ガスが搅拌され、室全体の水素ガス濃度が大きくなると考えられる。

解析結果より、換気回数を増やすことが必ずしも水素



ケース4 換気回数5[回/h]



ケース5 換気回数15[回/h]

Fig. 7 流速分布 (ケース 4,5)

Flow Velocity Distribution (Case4,5)

ガスの迅速な排出につながらず、循環流の形成による攪拌の影響で水素ガス濃度の上昇を引き起こすことが示唆された。従って、吹出口と排気口の位置によって決まる換気経路によっては、水素ガスを扱う施設の換気回数の設定には注意が必要ということが分かった。

2.4 吹出口と排気口の位置関係が及ぼす影響

吹出口と排気口の位置関係を変化させた、ケース 2 (モデル 1) とケース 6 (モデル 2) の水素ガス漏洩開始後 200 秒と 400 秒の断面 1 の水素ガス濃度分布を Fig. 8 に示す。吹出口と排気口の位置関係により濃度分布は大きく異なり、モデル 1 の方が天井面全体に水素ガスが拡散している様子がみられる。漏洩開始後 500 秒までの室全体の水素ガス濃度の時間変化を Fig. 9 に示す。いずれのケースも時間経過とともに水素ガス濃度の上昇がみられるが、モデル 1 の方が水素ガス濃度が大きい。これは、モデル 1 では排気口が吹出口の直上にあるため、吹出口から流入した外気がそのまま排気口から流出してしまい、水素ガスをうまく排出できていないためだと考えられる。ケース 2 とケース 6 の断面 2 の漏洩開始後 200 秒の流速分布を Fig. 10 に示す。これより、どちらのケースでも天井面付近で循環流が形成されているが、その程度はモデル 2 の方が大きい。これは、モデル 2 の吹出口直上が天井面であるためであり、循環流による攪拌の影響はモデル 1 より大きいと考えられる。一方で、モデル 1 では排気口が吹出口の直上にあり、水素ガスをうまく排出できないため、天井面近傍に滞留した水素ガスはモデル 2 の方が排気口から排出されやすい。これより、Fig. 9 に示されるようにモデル 1 では室全体の水素ガス濃度の上昇の傾向が時間経過とともにやや鈍化しているのに対し、モデル 2 では攪拌の影響に起因してほぼ同じ傾きで上昇する結果となったと考えられる。

吹出口と排気口の位置関係によって、室内の気流の流

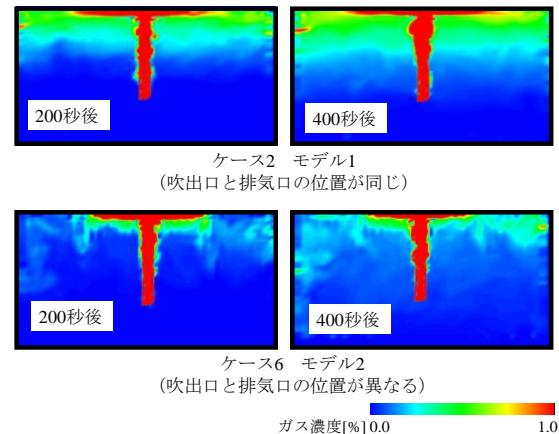


Fig. 8 水素ガス濃度分布 (ケース 2,6)

Hydrogen Gas Concentration (Case2,6)

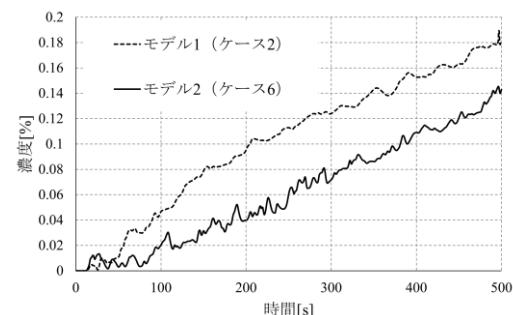
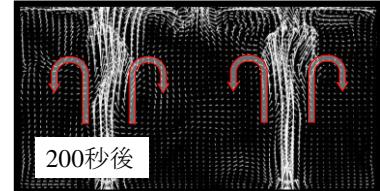


Fig. 9 水素ガス濃度の時間変化 (ケース 2,6)
Variations with Time of Hydrogen Gas Concentration
(Case2,6)

ケース2 モデル1
(吹出口と排気口の位置が同じ)ケース6 モデル2
(吹出口と排気口の位置が異なる)Fig. 10 流速分布 (ケース 2,6)
Flow Velocity Distribution (Case2,6)

れが変化して水素ガスの攪拌の様子に差異が生じるため、水素ガスを扱う施設の換気経路設計にも注意が必要であることが分かった。

3. 現象の分析とモデル化

3.1 水素ガスの漏洩と攪拌現象について

前章の Fig. 5・Fig. 6 のように、換気回数と室内の水素ガス濃度の関係が、瞬時一様拡散を仮定した換気理論の傾向とは逆になった理由として、水素ガスの浮力と換気によって生じる循環流による影響が考えられる。

水素ガスは密度の小さいガスであるため、室内で漏洩した場合、空気との密度差により大きな浮力を得ることとなる。そのため、Fig.11 に示すような天井面付近の高濃度滞留層を形成する。一方で、換気によって生じる循環流が天井付近の滞留層を攪拌し、特に換気回数が大きい場合には気流によって水素ガスが室全体に拡散してしまうと考えられる。これにより、室内水素ガス濃度が上昇していくとともに、水素ガスが浮力によって天井面付近に滞留せず、水素ガスの排出効果は低下してしまう。

3.2 水素ガス漏洩時の換気状態のモデル化

水素ガスの滞留を防ぐ効果的な換気方法の検討を行うために、水素ガス漏洩時の換気状態について分析結果を基にモデル化を試みる。Fig. 11 に示すように、換気による吹出口からの流入風速に起因した循環流が水素ガスの攪拌の原因と仮定すると、この気流による力が滞留層の水素ガスと空気の混合気体の浮力（以下、水素ガスの浮力）よりも大きい場合に水素ガスが室全体に拡散してしまう現象が生じると考えることができる。

水素ガスの浮力は水素ガスと空気の密度差によって生じる。その大きさは水素ガス濃度に依存するので、滞留層内の単位体積当たりの水素ガスに働く浮力は式(1)で示される。

$$(\rho_A - \rho_H) \cdot C_H \cdot g \quad (1)$$

ρ_A : 空気の密度 [kg/m^3]

ρ_H : 水素ガスの密度 [kg/m^3]

C_H : 水素ガス濃度 [-]

g : 重力加速度 [m/s^2]

一方で、換気に伴って生じる循環気流の下降流速度よりも浮力が大きい場合に天井付近の滞留層が安定して維持されると考えられる。この下降流が水素ガスを押し下げようとする力は、ニュートンの第2法則より式(2)で示される。

$$\rho_A(v_d - v_0)/\Delta t \quad (2)$$

v_d : 下降流速度 [m/s]

Δt : 下降流速度が v_0 ($=0$) となるまでの時間 [s]

滞留層を下降する間に下降流速度が 0 まで減衰するものとすると式(3)が成り立つ。

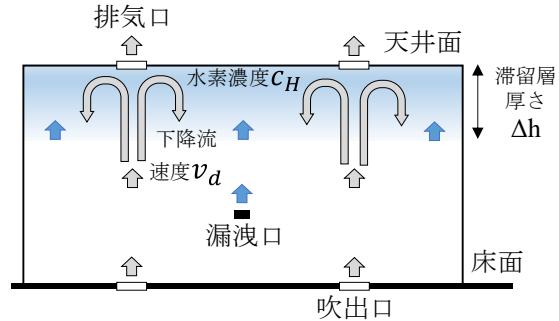


Fig. 11 水素ガス漏洩時詳細図
Outline of the Hydrogen Gas Leakage

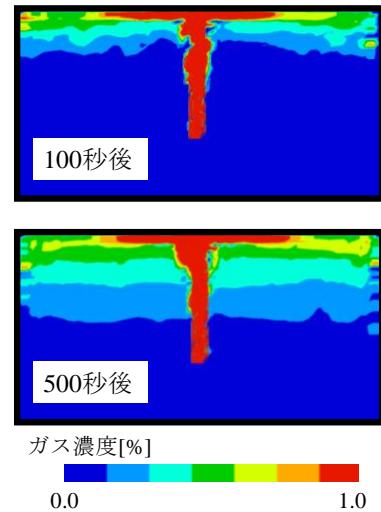


Fig. 12 水素ガス濃度分布 (ケース 2)
Hydrogen Gas Concentration (Case2)

$$\Delta t = 2 \Delta h / v_d \quad (3)$$

Δh : 滞留層の高さ方向の厚さ [m]

したがって、天井付近の高濃度の滞留層が安定して存在できる条件は、換気回数と換気経路によって設計上決まる下降流速度による力を水素ガスによる浮力が上回ることであるため、式(1),(2),(3)より式(4)で示される。

$$\{\rho_A(v_d - v_0)/(2 \Delta h / v_d)\} \leq (\rho_A - \rho_H) \cdot C_H \cdot g \quad (4)$$

式(4)を下降流速度に関して整理すると、式(5)となる。下降流速度が式(5)のような条件となる場合に高濃度の滞留層が安定することを示している。

$$v_d \leq \{2(\rho_A - \rho_H) \cdot C_H \cdot g \cdot \Delta h / \rho_A\}^{1/2} \quad (5)$$

ケース2の水素ガス漏洩開始後100秒と500秒の断面1の水素ガス濃度分布をFig.12に示す。このケースの場合、濃度が1.0%を超える高濃度の滞留層は時間が経過しても安定している。一方で、式(5)に示す通り、濃度が小さい場合には右辺が小さくなるため滞留層が安定して存在できる下降流速度は小さくなり、Fig.12に示される濃度が小さい領域は搅拌によって水素ガスが広がっている。これらより、提案したモデルのように、水素ガスの搅拌の状況は下降流速度と水素ガスの浮力とのバランスに影響され、高濃度の水素ガスの滞留層が安定して存在するためには、濃度に起因した浮力が下降流速度による力を上回る必要があることが分かった。

3.3 今後の展望

冒頭で述べた通り、漏洩箇所が明確ではなく、漏洩検知が遅れてしまうような想定条件では、水素ガスを滞留させないといった対策が有効であると考えられる。そのため、まずは水素ガスを搅拌させず、高濃度の滞留層が安定して存在するような条件とした後、浮力により天井面に滞留した水素ガスを迅速に排出させる設計とする必要があると考えられる。今後は、換気量は確保しつつ、下降流速度を低減させることのできる効果的な換気方法の検討をしていく予定である。また、本報では実在する実験室を模擬した吹出口と排気口の位置関係であったが、その他の位置関係については今後検討をしていく予定である。

さらに、実際の施設では発熱機器による熱上昇流の形成も考えられる。まずは水素ガスの浮力による影響を解明した上で換気方法の検討を実施し、熱上昇流の影響については今後の検討課題としたい。

4. まとめ

本研究では、水素ガスを滞留させないための効果的な換気方法の検討を最終目的とし、本報では、水素ガスのスローリークを想定した場合の、換気回数や水素ガスの漏洩量が室全体の水素ガス濃度に及ぼす影響を検討した。また、室内に漏洩した水素ガスの挙動について分析し、モデル化を試みた結果について報告した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 換気回数を増やすことが必ずしも水素ガスの迅速な排出につながらず、循環流の形成による搅拌の影響で水素ガス濃度の上昇を引き起こすことが示

唆された。これより、水素ガスを扱う施設の換気回数の設定には注意が必要ということが分かった。

- 2) 吹出口と排気口の位置関係によって、室内の気流の流れが異なることにより、水素ガスの搅拌の様子に差異が出るため、水素ガスを扱う施設の換気経路設計にも注意が必要であることが分かった。
- 3) 水素ガスに働く浮力と換気に伴って生じる下降流が水素ガスを押し下げようとする力の関係より、天井付近の高濃度の滞留層が安定して存在できる条件をモデル化した。

謝辞

本研究では、芝浦工業大学の諏訪好英教授とのコンサルティング契約に基づき、多大なるご助言をいただいた。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Swain, M.R. and Swain, M.N.: Passive ventilation systems for the safe use of hydrogen, Hydrogen Energy, 21-10, pp. 823-835, 1996
- 2) 井上雅弘, 月川久義, 金山寛, 松浦一雄: 室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究, 水素エネルギーシステム, 33-4, pp.32-43, 2008
- 3) Matsuura, K., Kanayama, H., Tssukikawa, H. and Inoue,M.: Numerical simulation of leaking hydrogen dispersion behavior in a partially open space, Hydrogen Energy, 33, pp. 240-247, 2008
- 4) Pitts, M.W., Yang, J.C., Prasad, K. and Fernandez, M.: Experimental Characterization of Helium Dispersion in a 1/4-Scale Two-Car Residential Garage, NIST Technical Note, 1694, 2011
- 5) 朝原誠: 閉空間内水素漏洩における強制換気性能評価 -換気位置と換気量が水素濃度に与える影響-, 安全工学, 56, pp.49-58, 2017
- 6) 岡秀行, 緒方雄二, 岡泰資, 太田進: マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 80, pp177-178, 2010
- 7) 丹原千里, 小野佳之, 田畠侑一, 諏訪好英: 室内水素ガス漏洩時における拡散挙動と天井面濃度に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023