

# 高圧水素ガス漏洩時の濃度解析手法の構築と漏洩対策に関する研究

丹原 千里 小野 佳之  
田畑 侑一

## Study on a Concentration-Analysis Method and Countermeasures for Leakage of High-Pressure H<sub>2</sub> Gas

Chisato Tambara Yoshiyuki Ono  
Yuichi Tabata

### Abstract

Hydrogen gas has garnered significant attention as a promising next-generation energy source. However, the safe usage of hydrogen gas must be ensured for it to be used extensively. To analyze the safety of hydrogen gas, CFD analysis is an effective method but an extremely large high-resolution analysis load is required. Therefore, a numerical method to predict high-pressure hydrogen-gas dispersion following a leakage from a pin hole as a supersonic jet is developed via CFD, where a kinematic jet model is used as the gas source. Simulations of the effects of a wall on hydrogen-gas dispersion indicate that a system for detecting leakage that is originally developed for low hydrogen-gas leakage can be effectively applied to recently used high pressure level.

### 概要

水素は次世代エネルギーとして注目を浴びているが、万が一漏洩した際の安全面の検討が必要不可欠である。従来、水素漏洩時の濃度予測・評価は流体解析により行われてきた。ただし、近年使用される80MPa程度の高圧水素に対しては、高速で噴流する漏洩口近傍に膨大な格子点が要求され、解析負荷が大きく現実的ではない。本論文では、高圧水素漏洩時の濃度解析手法の構築を目的とし、漏洩口近傍に解析負荷を低減したモデル化手法を導入する。水素漏洩実験を実施し、得られた濃度のデータと解析結果を比較・検証することで、本モデル化手法の有効性を示した。次に、水素が高速で噴流し障害物や建物壁面に衝突することを想定し、障壁の有無が水素濃度の分布に与える影響について検討を行った。最後に構築したモデル化手法を、低圧水素ガス漏洩時に有効性が示されている漏洩検知システムに適用し、高圧水素漏洩時における同システムの適用性を明らかにした。

### 1. はじめに

水素ガスは次世代エネルギーとして注目を浴びているが、小さなエネルギーでも引火するため、取り扱いには注意が必要とされる。そのため水素ステーションや実験施設の設計プロセスには、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、水素ガスの拡散性を活かし停留させないといった対策を組み込む必要がある。これらの対策を組み込むために、数値シミュレーション(CFD)による水素ガス漏洩時の挙動把握や漏洩検知システムの検討が行われている<sup>1-3)</sup>。

水素ガスの漏洩は、配管等の微小亀裂からのピンホール漏洩と、配管破断時の非定常大漏洩が考えられる。武野<sup>1)</sup>、Okabayashiら<sup>2)</sup>は、実験や高解像度の数値シミュレーションにより水素ガス漏洩時の検討を行っている。しかしながら、微小亀裂から生じたピンホール漏洩の孔径は非常に小さいために解析負荷が非常に大きく、日常的に高解像度シミュレーションを行うことは現実的ではない。そこで、土井ら<sup>3)</sup>は漏洩口近傍のモデル化手法を提案するとともに、妥当性を検証している。さらに、1MPa程度の低圧水素ガスに対して、浮力の効果を利用した水素

ガスの漏洩検知システムを提案し、その有効性を示している。

一方、近年の水素ステーション等で使用される水素ガスは非常に高圧のため、これまで検討されてきた1MPa程度の水素ガス漏洩時とは異なり、音速を超える速度で高速に漏洩する可能性がある。そのため、80MPa程度の高圧水素ガス漏洩時における、既往研究<sup>3)</sup>にて提案されてきたモデル化手法や、浮力の効果を利用した漏洩検知システムの適用性に関しては、明らかとはなっていない。特に、高速に水素ガスが漏洩した場合、障害物や建物壁面に衝突した後に浮力により上昇することが予測されるが、その際の上下方向の水素ガスの挙動に関しては十分な検討は行われていない。

そこで本研究では、高圧水素ガス漏洩時の対策の検討を目的とし、検証用データ取得のための高圧水素漏洩実験を行った上で、数値シミュレーションモデルの構築を行う。はじめに、高速噴流に対応した解析負荷低減モデルを用いた解析を実施し、実験で得られた濃度分布との比較によりモデル化手法の精度を検証する。次に、様々な圧力において本モデルを適用することを念頭に噴流式の提案を行い、その妥当性を示す。

最後に、構築した解析手法を水素ガス漏洩検知システム<sup>3)</sup>に適用する。まず、高速に漏洩する水素ガスが壁面に衝突した場合の特性を把握した上で、高速漏洩時の漏洩検知システムの適用性の検討を行った結果を示す。

## 2. 高圧水素ガス漏洩現象のモデル化

本論文では、1MPa以下の水素ガスピンホール漏洩に対する既往の研究<sup>3)</sup>に従い、微小亀裂等から生じた漏洩口の孔径が0.8mmのピンホール漏洩を想定した実験を行った。検討に使用する水素ガス漏洩時の圧力は、近年の水素ステーション等で使用される80MPaと40MPaとしている。ただし充填時間の問題から高圧な80MPaのケースは実験回数を限定し、40MPaの水素ガスを用いた実験で測定点を多く設け、平面的な速度分布と濃度分布を把握するためのデータを取得した。そのため、速度分布と濃度分布の測定断面位置が一致していないケースがあることに注意されたい。

まず、40MPaの水素ガス漏洩実験の結果を用いてモデル化に使用する半値幅、流速、濃度などのパラメータを決定し、モデル化手法の精度確認を行う。

なお、以後の実験や解析によって得られた水素濃度は漏洩開始後の安定した濃度の平均値を使用している。

### 2.1 高圧水素ガス漏洩実験

高圧水素ガス漏洩解析時の漏洩口近傍のモデル化手法の確認と精度検証を行うために、高圧水素ガス漏洩実験を行った。実験は、爆発・燃焼のリスクのある多様な試験が可能で、(一財)日本自動車研究所城里テストセンターにある耐爆火災試験設備内で行った。実験装置の概略をFig. 1に、実験状況の写真をPhoto 1に示す。容器に蓄圧された水素を、減圧弁で一定圧力に調整し、その後エア駆動弁の開閉により、高さ1.5mに設置した直径0.8mmのノズルから水平方向に高圧水素を噴出させた。実験ケースの一覧をTable 1に示す。水素ガス圧力は40MPaと80MPaの2パターンとし、形成された自由噴流の流速分布と水素濃度分布を測定した。流速分布の測定にはParticle Image Velocimetry (PIV)を用い、散布したオイルミストにレーザーシートを照射し散乱光を2台の高速度カメラで撮影した(Photo 1)。流速分布の測定は、40MPa(ケース1)で漏洩口より1.5, 3, 6m、80MPa(ケース2)で3, 6, 9mのそれぞれ3か所ずつとした。濃度の測定には水素センサーを用い、より詳細な分布が得られるよう測定範囲の異なる2種類を用いた。測定に用いた水素センサーの濃度測定範囲と分解能をTable 2に示す。濃度は高さ1.5mを中心とした上下0.8mの範囲について、水素センサーを0.2mピッチで計9点配置し、Table 1に示す測定位置にて計測した。

40MPaの高圧水素ガス漏洩時の噴流軸上の流速分布をFig. 2に、漏洩口から1m、4m離れた箇所での鉛直方向濃度分布をFig. 3に示す(ケース1)。高圧水素ガスのピンホール漏洩時には漏洩口付近では音速を超える速度で漏洩す

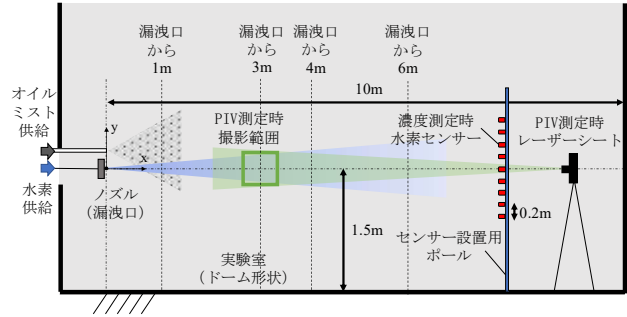


Fig. 1 実験室概要(障壁なし)  
Outline of the Test Room (without Wall)

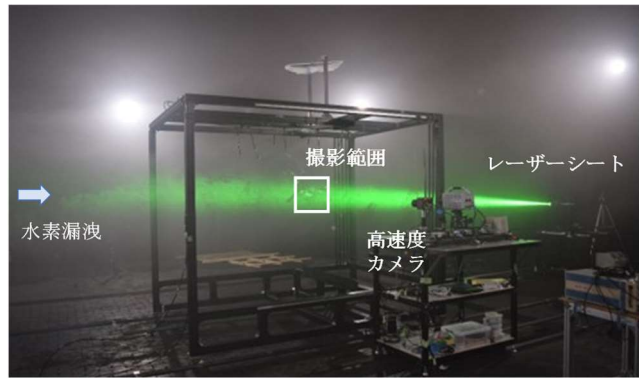


Photo 1 実験状況  
Experimental Situation

Table 1 実験ケース一覧  
List of Test Cases

	水素ガス圧力	障壁	濃度測定位置 (漏洩口より)
ケース1	40MPa	-	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.8m
ケース2	80MPa	-	3, 6, 8.8m
ケース3	40MPa	○	2.95, 2.99m (障壁より5cm, 1cm前方)

Table 2 水素センサーの測定範囲と分解能  
Specification of H<sub>2</sub> Gas Sensors

	測定範囲	分解能
低濃度用センサー	0~4vol.%	0.1vol.%
高濃度用センサー	0~100vol.%	0.5vol.%

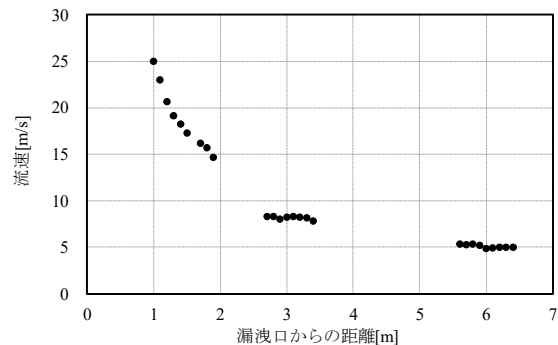


Fig. 2 噴流軸上の流速分布(ケース1)  
Velocity Profiles along the Jet Axis (Exp., Case1)

ると考えられるが、Fig. 2より高圧水素ガス漏洩実験にて測定した漏洩口から1m以上離れた箇所では、流速は音速以下となることが分かる。またFig. 3より、漏洩口から1m離れた箇所では漏洩高さに対して対称な分布となっており浮力の影響が認められないのに対し、4m離れた箇所では高濃度の位置が上方にシフトした非対称な分布となっており、浮力の影響が確認できる。

## 2.2 モデル化手法

土井ら<sup>3)</sup>の提案した水素ガス漏洩口近傍のモデル化手法について、高圧水素ガス漏洩時における適用性の確認を行う。ここでは、実際の漏洩口から離れた位置に仮想吹出し口を設け、一定の流速・濃度を与えることにより、高速噴流をモデル化した。

既往の研究<sup>4),5)</sup>より、高圧ガス漏洩後の噴流は音速を超える速度で噴出したのちに噴流口近傍で不足膨張を起こし、衝撃波を伴う複雑な構造を成すことが知られている。しかしながら、40MPaや80MPaの高圧水素ガスが漏洩した場合に上述した衝撃波を伴う構造を成すのは漏洩口から数十cm以内であると考えられる<sup>5)</sup>。そこで、2.1節で示したように水素ガス漏洩実験において、流速が音速以下であり、かつ浮力の影響を受けない、漏洩口からの距離が1mの位置に仮想吹出し口を設けた。Fig. 4に3次元円形自由噴流とモデル化手法の概念図を示す。仮想吹出し口の幅は流速の半値幅とし、仮想吹出し口に与える流速と濃度については、本来は分布があるが、モデルの簡略化のため一定値として与えた。また、流速については、濃度フラックスを一致させるため、全体の流量が仮想吹出し口位置での本来の噴流の流量と一致するように調節した流速を設定し、濃度については噴流軸上の濃度を用いた。

## 2.3 解析結果と実験結果の比較

40MPaの高圧水素ガス漏洩時の仮想吹出し口をモデル化し、Large Eddy Simulation (LES) を用いて解析を行った。LES解析は数値風洞「エアロダイナ®」を使用している。実験と同様の条件とするため、仮想吹出し口は床から1.5mの高さに設け、解析では浮力の影響を考慮している。仮想吹出し口に与える流速と濃度は実験(ケース1)や文献値<sup>2)</sup>によって得られた値を考慮して算出した(流速：20m/s，濃度：15%)。

解析結果と実験結果(ケース1)の噴流軸上の濃度分布の比較をFig. 5に示す。漏洩口から4m以上離れた箇所の濃度はよく一致していることが確認できる。一方、漏洩口から3mの範囲の濃度は解析結果の方が大きい。この範囲は、解析ではモデル化により一般的な3次元円形自由噴流の初期領域<sup>6)</sup>(Fig. 4)となるため、実験結果と流速分布の形状が対応していないものと考えられる。漏洩口付近の精度に関しては、設定の改良を含め今後の検討課題としたい。

次に、漏洩口から4m, 6m離れた箇所での鉛直方向濃度

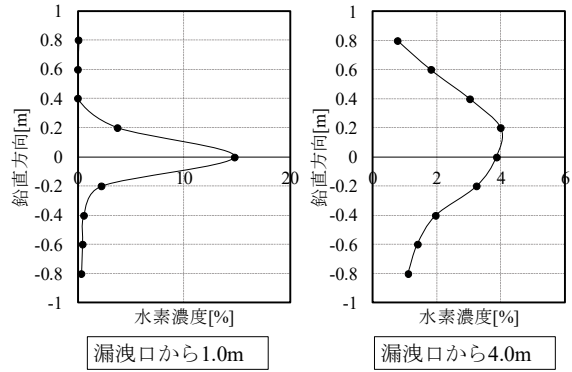


Fig. 3 鉛直方向濃度分布(ケース1)  
Vertical Profiles of Concentration (Exp., Case1)

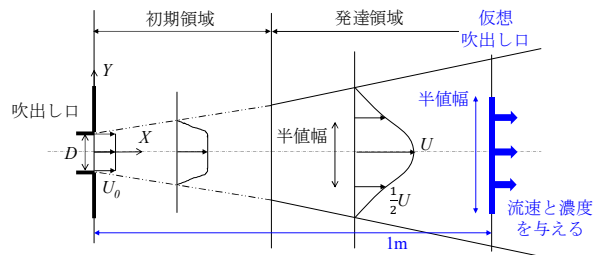


Fig. 4 3次元円形噴流とモデル化手法の概念図  
Jet Model used for Empirical Formulation and Simulation Model

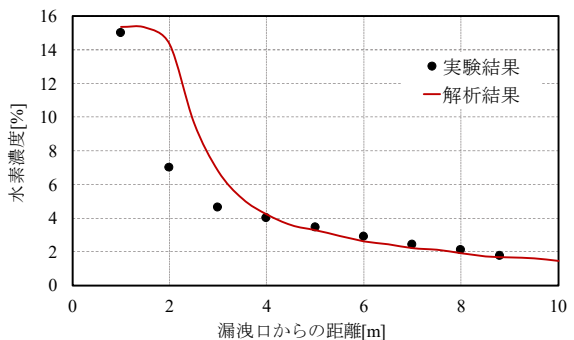


Fig. 5 実験と解析の噴流軸上濃度(ケース1)  
Concentrations of Experiment and LES (Case1)

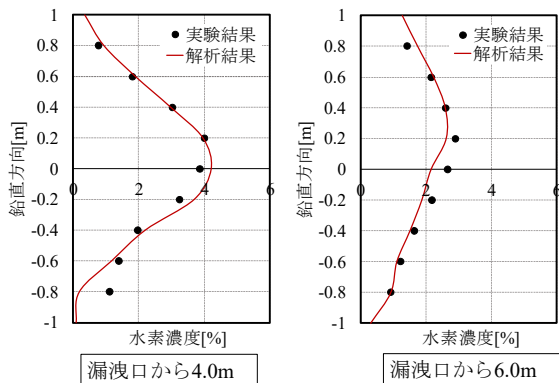


Fig. 6 実験と解析の鉛直方向濃度(ケース1)  
Concentrations in the Vertical Direction (Exp. and LES, Case1)

分布の比較をFig. 6に示す(ケース1)。漏洩口から6m離れた箇所では、浮力の影響により実験結果と解析結果ともに、最大濃度となる高さが漏洩口から4m離れた箇所よりも上方に見られる。また濃度の値は、4m, 6m離れた箇所ともに、定量的にも良い対応が確認できる。

以上より、2.2節で述べたモデル化手法を使用することにより高圧水素ガス漏洩時の濃度分布を再現できるものと判断した。

### 3. 高圧水素ガス漏洩時の噴流式の提案

#### 3.1 高圧水素ガス漏洩時の噴流式の作成

2.3節で述べた40MPa水素ガス漏洩時の仮想吹出し口に与える流速と濃度は実験値から算出した。本節では、実験を行っていない様々な水素ガス圧力においても水素ガス漏洩口近傍のモデルを適用することを目的とし、仮想吹出し口に与える流速と濃度を算出するための高圧水素ガス漏洩時の噴流式の提案を行う。

Fig. 4に示すような一般的な3次元円形自由噴流の発達領域は、以下に示す噴流式<sup>6)</sup>で表される。

$$\frac{u}{U} = \exp(-2K^2 * \frac{Y^2}{X^2}) \quad (1)$$

$$U = K * U_0 * \frac{D}{X} \quad (2)$$

X : 漏洩口からの距離[m]

U : 中心軸流速[m/s]

u : 流速[m/s]

K : スロー定数[-]

U<sub>0</sub> : 吹出し流速[m/s]

D : 漏洩孔径[m]

漏洩口から1m以上離れた箇所については、高圧ガス漏洩時の流速分布も式(1), (2)で表されると考えられる。また、濃度分布についても同様である。

そこで、40MPaの高圧水素ガス漏洩時の解析結果から、噴流式の係数の同定を行った。実験では床面から1.5mの高さにて水素ガスを漏洩させたため、水素濃度に床面の影響が出ることが考えられる。そのため、2.3節の解析とは異なり、床面の影響が出ないモデルを使用し、浮力の影響も考慮していない。これより、スロー定数は流速、濃度共にK=6となり、以下の式を得ることができた。

$$\frac{u}{U} = \exp(-2K^2 * \frac{Y^2}{X^2}) \quad (3)$$

$$U = 860K\sqrt{P_0} * \frac{D}{X} \quad (4)$$

$$\frac{c}{C} = \exp(-2K^2 * \frac{Y^2}{X^2}) \quad (5)$$

$$C = 530K\sqrt{P_0} * \frac{D}{X} \quad (6)$$

なお、2.2節で述べたように、漏洩口近傍は衝撃波を伴

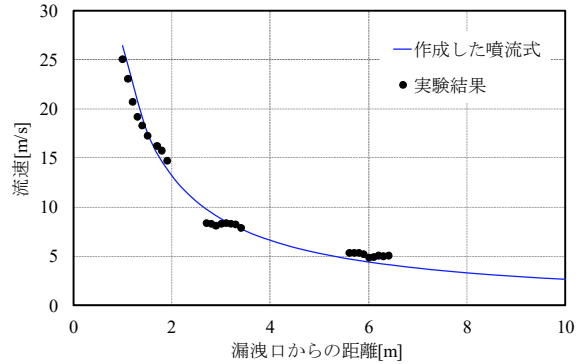


Fig. 7 噴流式と実験の噴流軸上流速(ケース1)  
Velocities on Jet Axis (Jet Model and Exp., Case1)

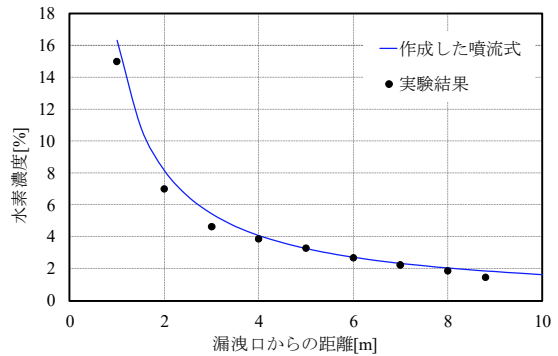


Fig. 8 噴流式と実験の噴流軸上濃度(ケース1)  
Concentrations on Jet Axis  
(Jet Model and Exp., Case1)

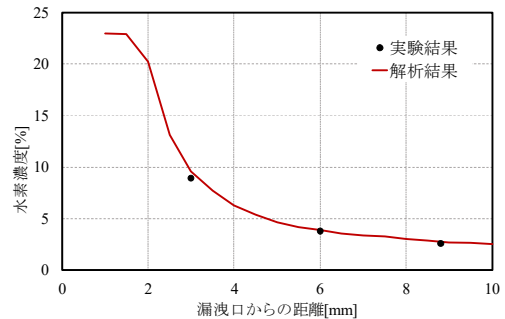


Fig. 9 実験と解析の噴流軸上濃度(ケース2)  
Concentrations on Jet Axis (Exp. and LES, Case2)

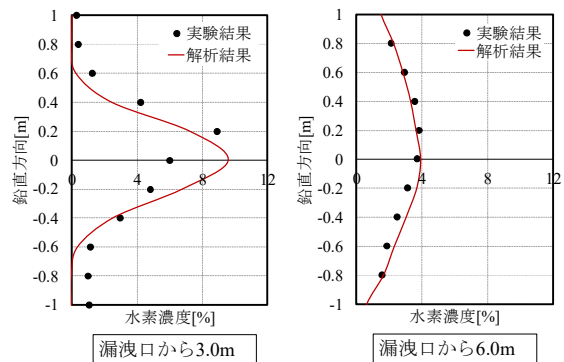


Fig. 10 実験と解析の鉛直方向濃度(ケース2)  
Concentrations in the Vertical Direction  
(Exp. and LES, Case2)



う複雑な構造を成すため、漏洩口近傍ではこの式は成り立たず、この式から得られる吹出し流速と吹出し濃度は実際のもので一致しないことに注意されたい。

40MPaの水素ガス漏洩時の実験結果(ケース1)と、作成した噴流式によって得られた噴流軸上の流速分布の比較をFig. 7に、噴流軸上の濃度分布の比較をFig. 8に示す。作成した噴流式から得られた流速と濃度は実験結果とよく一致しており、噴流式から得られた流速と濃度を使用してパラメータを決定し、様々な水素ガス圧力での水素ガス漏洩時のモデル化を行うことが可能であると考えられる。

### 3.2 噴流式を利用したモデル化の精度検証

次に、噴流式から得られた流速と濃度を仮想吹出し口に与え、80MPaの水素ガス漏洩時のモデル化を行った上でLES解析を実施し、実験結果との比較により精度検証を行う。解析結果と実験結果(ケース2)の噴流軸上の濃度分布の比較をFig. 9に、漏洩口からの距離ごとの鉛直方向濃度分布の比較をFig. 10に示す。噴流軸上の濃度分布、鉛直方向濃度分布共によく一致していることが確認できる。なお、漏洩口から3m離れた箇所の鉛直分布は実験結果が上下非対称な分布となっており、若干差が見られる。実験結果はその後方では対称な分布となり、さらに後方で浮力の影響が表れていることから、上記非対称な分布は実験時のノズルの軸のずれによるものと考えられる。

以上より、作成した噴流式を用いたモデル化の有効性が確認できる。

## 4. 障壁の影響に関する検討

### 4.1 障壁を設置した高圧水素ガス漏洩実験

実際に水素ガスが漏洩した際には、設備機器等の障害物や建物壁面に衝突し、一時的にガスが滞留し、その後浮力の影響により上昇するものと推測される。ただし、濃度に関しては、一般的に非定常性が強いことが知られ

ており、噴流が衝突した場合の濃度の特性に関しては不明な点が残されている。

そこで、噴出方向に対して垂直に障壁を設置した場合の高圧水素ガス漏洩実験(ケース3)を行った。ケース3における実験装置の概要をFig. 11に示す。水素ガス漏洩に関する諸条件については2.1節に述べた通りである。障壁の大きさは幅1.8m、高さ2.5mであり、漏洩口から3m離れた位置に設置した。水素ガスの圧力は40MPaである。

実験によって得られた、障壁近傍での障壁がある場合とない場合の鉛直方向濃度分布の比較をFig. 12に示す。障壁があることにより一時的にガスが滞留し、濃度が全体的に高くなっている。鉛直方向の分布形状は、衝突した高さ付近でフラットな分布を呈しており、一般的な噴流による分布形状と異なっている。浮力の影響を考慮すると、障壁の上部の濃度が高くなることが考えられるが、障壁の下部である床面付近の濃度も同様に高くなっていることが分かる。したがって、今回のような高圧な条件下で、漏洩口から高速噴出した水素ガスが壁面に衝突した場合、その後浮力の影響ばかりではなく、上下に移流する影響が大きいことが分かる。そこで、LES解析を実施し、濃度分布の非定常性に関して考察を行う。

### 4.2 障壁を設置した高圧水素漏洩解析

実験と同様に、40MPaの水素ガスを対象として、漏洩

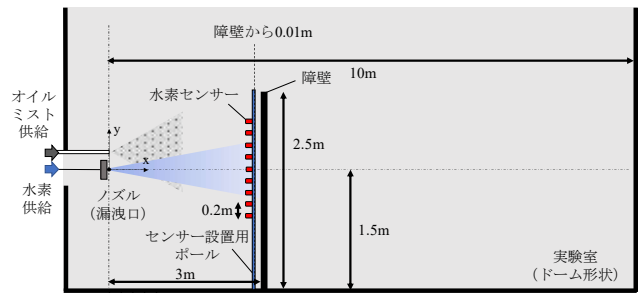


Fig. 11 実験室概要(障壁あり)  
Outline of the Test Room (with Wall)

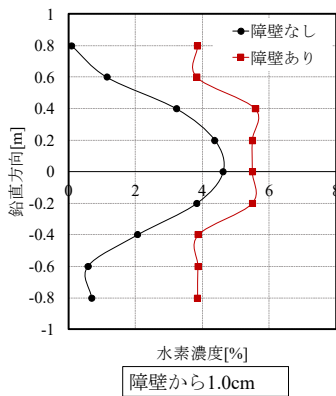


Fig. 12 障壁の有無による鉛直濃度分布(実験結果 ケース3)  
Concentration with and without Wall (Experiment, Case3)

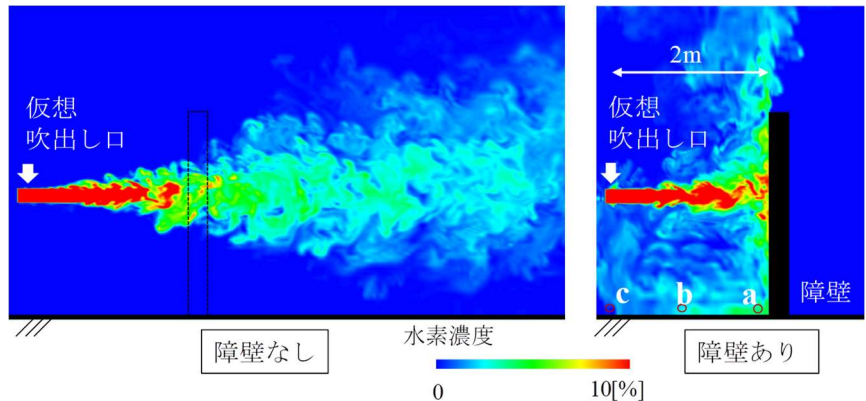


Fig. 13 障壁の有無による濃度分布(解析結果)  
H<sub>2</sub> Gas Concentration with (right) and without (left) Wall (LES)

口から3m離れた位置に障壁を設置した解析を行った。障壁がある場合とない場合について、解析によって得られた障壁近傍での濃度分布図の比較をFig. 13に示す。実験同様に障壁があることにより一時的にガスが滞留し、障壁周辺の濃度が全体的に高くなっている。また、噴流下部に広く水素ガスが滞留している様子が見られ、特に床面付近での水素濃度が高くなっている。Fig. 13に示すa, b, c点の濃度の時刻歴波形をFig. 14に示す。時間の経過と共に、水素濃度が障壁に近い点(a点)から順に上昇しており、障壁に衝突した水素ガスが障壁に沿って床面付近まで移流して滞留していることが分かる。

## 5. 漏洩検知システムに関する検討

### 5.1 検討対象とした漏洩検知システム

土井ら<sup>3)</sup>は傾斜天井方式の水素ガス漏洩検知システムを提案し、想定した全てのセンサーで水素ガスの漏洩検知が可能となることで、1MPa程度の水素ガス漏洩時にお

ける有効性を示している。従来方式と傾斜天井方式の水素ガス漏洩検知システムの詳細をFig. 15に示す。従来方式とは、既往の水素ステーションに多く用いられているものであり、周囲は覆われているが上部を開放して漏洩ガスを上方に放出する方式である。一方で傾斜天井方式とは、傾斜天井を設置して漏洩ガスを排気モニタに導くものである。傾斜天井によって漏洩ガスの流路を制限し、センサーに導くことで確実な漏洩検知ができると考えられる。

しかしながら、高圧水素ガス漏洩時の流速は非常に速く、噴流による慣性効果が支配的となる可能性があり、浮力の効果で傾斜天井に沿って水素ガスが導かれず、検知に時間を要する恐れがある。そこで、2.2節で述べたモデル化手法を用いたシミュレーションにより、傾斜天井方式の漏洩検知システムについて、80MPa程度の高圧水素漏洩時における有効性の検討を行う。センサーは従来方式については9箇所、傾斜天井方式については排気口近傍に3箇所を想定し、検知警報設備の閾値を1%(水素ガス

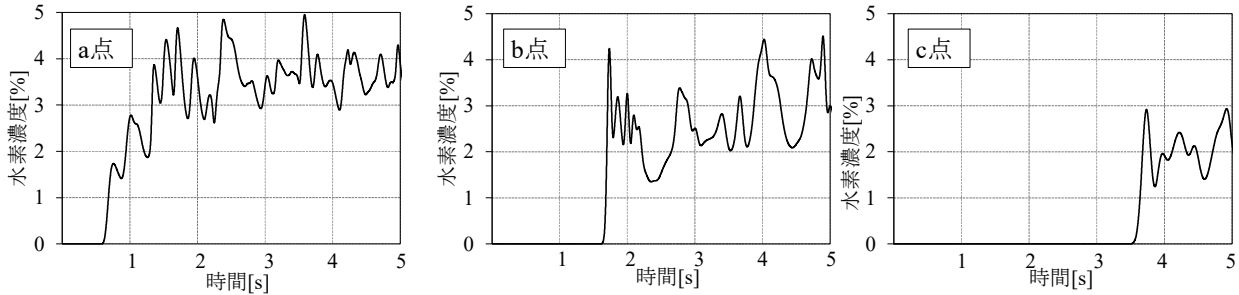


Fig. 14 障壁がある場合の濃度時刻歴波形(a, b, c点)

Variations with time of Hydrogen Concentration with Wall at the Points a, b, and c

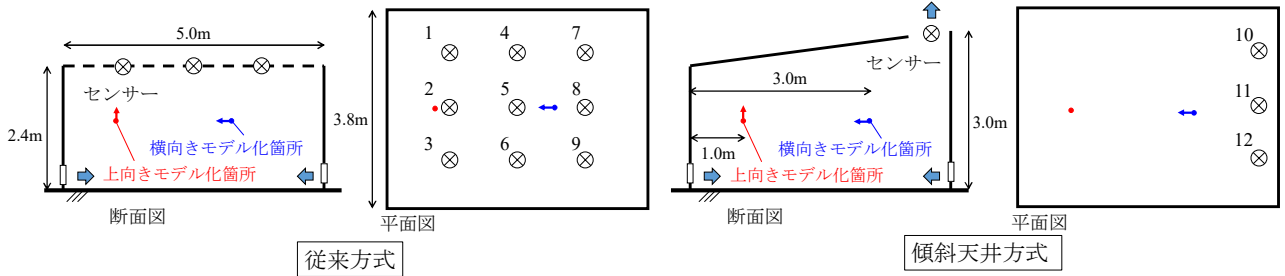


Fig. 15 検討対象とした漏洩検知システム

Leakage Detection Methods for Conventional Type (left) and Sloped Ceiling Type (right)

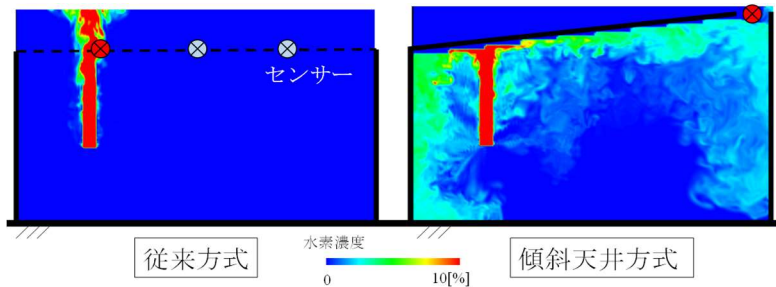


Fig. 16 上向き漏洩時の水素濃度分布

H<sub>2</sub> Gas Concentration for Upward Leakage in Conventional Type (left) and Sloped Ceiling Type (right)

Table 3 上向き漏洩時の漏洩検知時間  
Detection Time (Upward Leakage)

従来方式		傾斜天井方式	
1	4	7	10
-	-	-	2.3[s]
2	5	8	11
0.1[s]	-	-	1.7[s]
3	6	9	12
-	-	-	2.6[s]

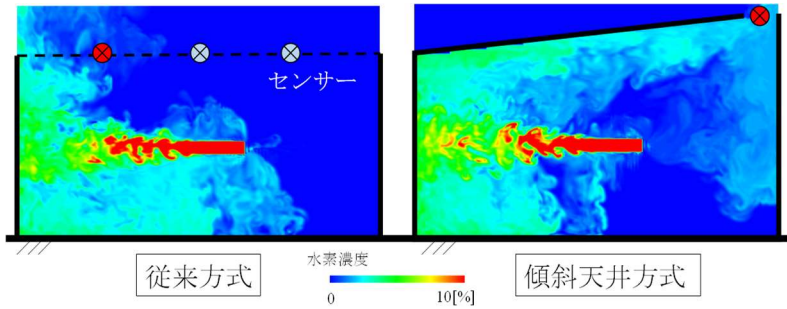


Fig. 17 横向き漏洩時の水素濃度分布

H<sub>2</sub> Gas Concentration for Horizontal Leakage in Conventional Type (left) and Sloped Ceiling Type (right)

Table 4 横向き漏洩時の漏洩検知時間  
Detection Time (Horizontal Leakage)

従来方式			傾斜天井方式
1	4	7	10
3.6[s]	-	-	5.0[s]
2	5	8	11
3.3[s]	-	-	4.8[s]
3	6	9	12
4.0[s]	-	-	5.5[s]

の爆発下限濃度の1/4)とした。

### 5.2 上向き漏洩時の傾斜天井方式の有効性の検討

上向きに80MPaの水素ガスが漏洩した際の一定時間経過後の水素ガス濃度分布の比較をFig. 16に、水素ガスが漏洩してから各センサーが検知するまでに要した時間をTable 3に示す。表中の番号は、センサー番号(Fig. 15)を示している。

従来方式では漏洩箇所直上のセンサー2のみが検知をしている。濃度分布図より、漏洩箇所からセンサーまでの距離が近いので、噴流幅が狭く天井付近では水素ガスが広がっていない。本解析の漏洩位置ではセンサー2で漏洩を検知することができたが、水素ガスの漏洩位置次第では検知できない可能性があると考えられる。一方で、傾斜天井方式では傾斜天井に衝突した水素ガスが傾斜天井に沿って排気モニタまで導かれ、想定した全てのセンサーが漏洩開始から数秒以内に検知している。

以上より、上向きに水素ガスが漏洩する場合は、既往の文献<sup>3)</sup>同様に確実に迅速な漏洩検知が期待でき、高速水素ガス漏洩時にも傾斜天井方式が有効であることを確認した。

### 5.3 横向き漏洩時の傾斜天井方式の有効性の検討

横向きに水素ガスが漏洩した場合は、高速に漏洩する水素ガスが壁面に衝突すると考えられる。また、傾斜天井方式の場合、排気モニタまでの距離が遠く、検知に時間を要することが懸念される。横向きに80MPaの水素ガスが漏洩した際の一定時間経過後の水素ガス濃度分布の比較をFig. 17に、水素ガスが漏洩してから各センサーが検知するまでに要した時間をTable 4に示す。また、従来方式にて漏洩を検知したセンサー2と傾斜天井方式にて漏洩を検知したセンサー11の水素ガス濃度の時刻歴波形をFig. 18に示す。

従来方式、傾斜天井方式ともに、水素ガスは壁面に衝突した後に浮力の影響で壁に沿って上方へと向かっている。そのため、従来方式では9個のうち衝突した壁面に近い3つのセンサーで漏洩を検知している(センサー1, 2, 3)。しかしながら、従来方式は天井が開放しているため、

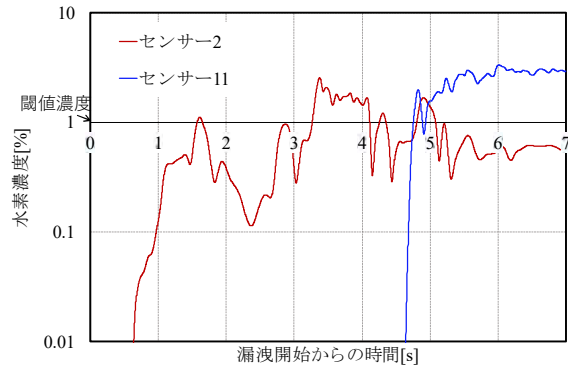


Fig. 18 横向き漏洩時の水素濃度時刻歴波形  
Time Histories of H<sub>2</sub> Gas Concentration  
(Horizontal Leakage)

Fig. 17に示されるように壁面から離れるにしたがって水素濃度は低くなるのが分かる。また、Fig. 18より、漏洩開始後に水素濃度は上昇して、閾値を超えているが漏洩検知後の水素濃度は安定しておらず閾値を下回る様子も見られる。これは、天井部分が開放していることに起因して、周囲の圧力変動の影響を受けやすいためだと考えられる。そのため、さらにセンサーが壁面から離れると水素濃度が閾値に達しない可能性があると考えられる。一方で、天井傾斜方式では壁面に衝突したのち上方へ向かった水素ガスが傾斜天井に沿って排気モニタまで導かれ、想定した全てのセンサーが漏洩を検知している。傾斜天井方式の場合、横向き漏洩時は検知までに時間を要することが懸念されたが、従来方式で検知された吹出し口上方のセンサーより1.5~2.0秒程度の遅れであり、迅速な漏洩検知ができています。また、Fig. 18より漏洩検知後の水素濃度は安定しており、周囲の圧力変動の影響を受けにくく、より確実な検知ができると考えられる。

横向き漏洩時には水素ガスが壁面に衝突するため、3章で述べたように床面で水素ガスが滞留している様子が見られる。天井面のセンサーで漏洩を検知した後に水素漏洩は遮断されるため、時間と共に床面付近の濃度は低下するものと推測される。より迅速な検知のための床面付近のセンサーの設置方法等に関しては今後の検討課題とする。

以上の結果より、天井傾斜方式の漏洩検知システムを

採用することで、従来方式より確実な水素漏洩検知が期待でき、緊急遮断などの迅速な対応が可能だと考えられるため、低圧水素ガスだけでなく高圧水素ガスでも有効なシステムであることが示された。また、検知後の排気方法等に関しては今後の検討課題とする。

## 6. まとめ

本研究では、近年使用される80MPa程度の高圧水素ガス漏洩時の対策の検討を目的とし、高圧水素漏洩実験と数値シミュレーションによる様々な検討を行った。

まず、数値シミュレーションモデルの構築を行うために、高速噴流に対応した解析負荷低減モデルの確認と実験結果との比較による精度検証を行った。その後、様々な圧力における本モデルの適用を念頭に噴流式の提案を行った。また、高速に漏洩する水素ガスが壁面へ衝突した場合の特性を把握した上で、構築した解析手法を既往の研究に示される水素漏洩検知システムに適用し、高圧水素ガス漏洩時の有効性を検討した。

得られた知見を以下に示す。

- 1) 解析負荷を低減するために漏洩口から1m離れた位置に仮想吹出し口を設けてモデル化する方法を提案し、実験結果との比較・検証を行うことで、高圧水素ガス漏洩時の解析を精度よく行えることを確認した。
- 2) 実験を行っていない様々な水素ガス圧力において本研究で提案したモデル化方法を適用することを念頭に噴流式の提案を行い、実験結果との比較・検証を行うことで、噴流式によって算出した流速や濃度を使用した解析を精度良く行えることを確認した。
- 3) 漏洩した高圧水素ガスが障壁に衝突した場合の特性を実験と解析により把握した結果、浮力の影響ばかりでなく上下に移流する影響が大きく、床面付近で水素ガスが滞留し濃度が高くなることが分

かった。

- 4) 本研究で提案したモデル化方法について、低圧水素ガス漏洩時に有効であると示されている傾斜天井を用いた漏洩検知システムに適用した。その結果、上向き漏洩時や横向き漏洩時に確実に迅速な水素ガス漏洩検知ができ、高圧水素ガス漏洩時にも有効であることを確認した。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、芝浦工業大学の諏訪好英教授、ならびに(一財)日本自動車研究所の山崎浩嗣氏より貴重なご意見を賜りました。ここに記してお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 武野計二：高圧水素噴出火炎の特性と対策技術，日本燃焼学会誌，第52巻160号，pp. 121-129，2010
- 2) Okabayashi, K et. al.: Non-steady characteristics of dispersion and ignitability for high-pressurized hydrogen jet discharged from a pinhole, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 44, Issue 17, pp. 9071-9079, 2019
- 3) 土井暁，諏訪好英：水素ガス爆発事故対策に関する研究（その3）－水素ステーションにおける水素ガスの漏洩検知性能向上に関する検討－，大林組技術研究所所報，No. 68，pp. 1-6，2004
- 4) 辻村拓，他：高圧水素噴流の噴射および噴流発達特性に関する研究，日本機械学会論文集（B編），70巻693号，pp. 224-229，2004
- 5) 近藤千尋，他：高速非定常水素噴流における混合気形成過程のLES解析，日本機械学会論文集（B編），78巻754号，pp. 130-136，2009
- 6) 社河内敏彦：噴流工学－基礎と応用－，森北出版株式会社，2004