

地中及び大気中における水素拡散挙動の可視化(第一報) ーガラスビーズを用いた理想的条件下における基礎検討ー

株式会社四国総合研究所	電子アグリ技術部	市川 祐嗣
株式会社四国総合研究所	電子アグリ技術部	荻田 将一
株式会社四国総合研究所	電子アグリ技術部	杉本 幸代
株式会社四国総合研究所	電子アグリ技術部	星野 礼香
株式会社四国総合研究所	電子アグリ技術部	朝日 一平
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構		寺田 敦彦
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構		上地 優
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構		日野竜太郎

キーワード： 水素
拡散挙動
レーザ
ラマン分光
シミュレーション
CFD

Key Words : Hydrogen
Diffusion behavior
Laser
Raman spectroscopy
Simulation
CFD

Visualization of hydrogen diffusion behavior in the ground and in the atmosphere (the first report) - A fundamental study under idealized conditions using glass-beads as a soil -

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural Technology Department
Yuji Ichikawa, Masakazu Ogita, Sachiyo Sugimoto, Ayako Hoshino, Ippei Asahi
Japan Atomic Energy Agency
Atsuhiko Terada, Yu Kamiji, Ryutaro Hino

Abstract

In this study, the diffusion behavior of hydrogen when a hydrogen pipeline buried underground is damaged was visualized by experiments and simulations. In this first report, experiments and simulations were conducted under idealized conditions using glass beads as a soil. A cylindrical experimental container with a diameter of 1 m was manufactured and packed with glass beads. Hydrogen was introduced into the container through a pinhole located at the bottom of the container, simulating a damage of a pipeline. Diffusion behavior in the simulated soil was measured using gas heat conduction sensors and laser Raman spectroscopy was used to measure behavior in the atmosphere near the soil surface. The results of the experiments and CFD simulations agreed well with each other. Fundamental characteristics of hydrogen diffusion behavior under idealized conditions were clarified.

1. 序論

持続可能な社会の構築に向け、化石燃料に代わる新たなエネルギーキャリアとして、水素に対する注目が高まりつつある^{1) 2)}。水素は水の電気分解によって得られる非常にクリーンなエネルギー源であるが、燃焼濃度範囲が4%~75%と広く、また分子量の小さい極めて軽い気体であるため、漏洩や拡散が起りやすいという性質があり、実運用上での危険性が指摘されることも多い。大量の水素を製造・輸送して利用するいわゆる水素社会の実現のためには、水素運用に関する安全性並びに、社会的受容性を高めていくことが必須であると言える。

水素の輸送方法として、都市ガス等の供給と同様に地下に埋設した導管（パイプライン）を使う方法が検討されているが、経年劣化による腐食や微小材料損傷、或いは、事故や災害等でパイプラインが破断した場合の水素の地中や大気中への拡散挙動については、いまだ十分な知見の蓄積がなされているとは言えない。

本研究は、特に地中に埋設された水素導管に微小な破損が生じ、水素が漏洩した場合の地中及び大気中への拡散挙動を可視化し、水素パイプラインの実運用における安全性の向上に資する知見を得ることを目的とする。現実の水素拡散挙動は、導管が埋設された土壌の状態（含水率や締固めの程度、構造物の有無等）によって大きく異なると考えられるが、本報では、粒径の揃ったガラスビーズを土壌模擬試料として使用した理想的条件下における本質的な水素の拡散挙動について、実験とシミュレーションにより検証したので報告する³⁾。

2. 実験系の構築

2.1 実験容器の製作

地中及び大気中の空間を模擬するための実験容器を製作した。実験容器の断面図を図1に、外観を図2に示す。

内径 980mm、高さ 520mm の円筒形地中模擬槽の上部に、内寸 1180mm×1180mm の角筒型大気中模擬槽を設置した。土台となる鉄板の中心部分に水素ガス放出のためのピンホールを設け、漏洩した水素が地中模擬層を拡散して大気中模擬層に到達し、天板上部に設けた排気口から排出される構造となっている。大気中模擬層内の拡散挙動について

はレーザ計測による可視化を行う⁴⁾ため、容器全体を透明なアクリルにて製作し、大気中模擬槽の側面には、レーザ光を導入するための石英ガラス窓を設置した。地中模擬層における拡散挙動に関しては、土壌模擬試料を充填する際に複数の水素センサを埋設することにより計測を行った。容器全体はパッキンで気密されており、安全性を確保するため、実験前に都度窒素でパージを行い、容器内部の酸素濃度がほぼ 0%となったのを確認した後、水素を放出した。

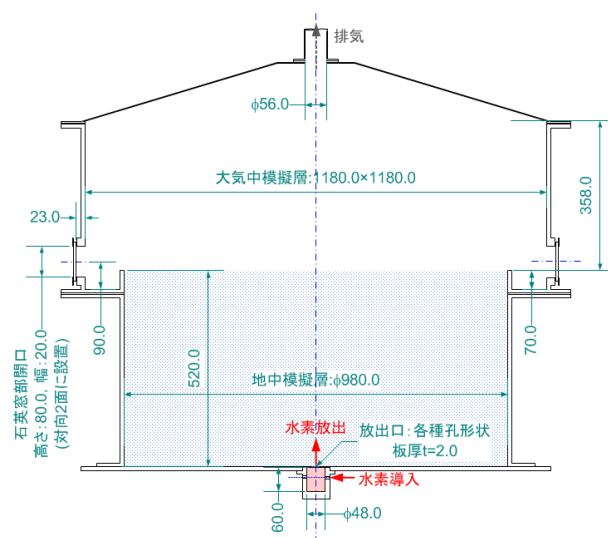


図1 実験容器断面図

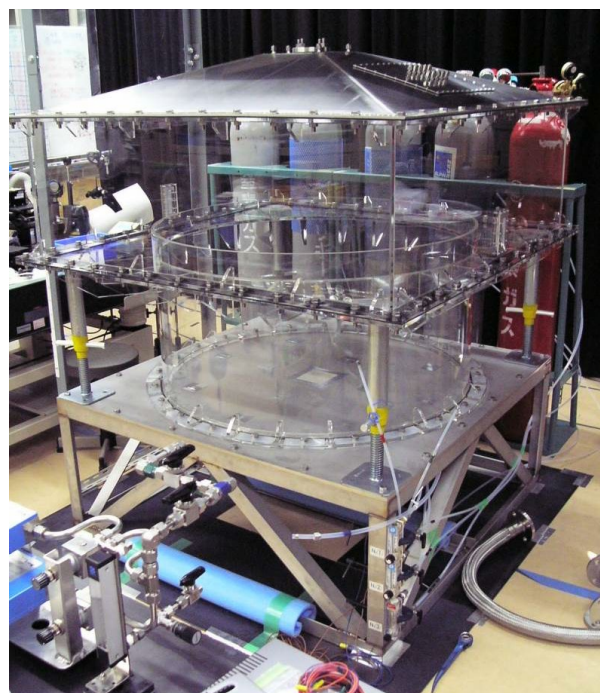


図2 実験容器外観

2.2 水素放出口の製作

実験容器の下部に取り付ける水素放出機構の断面図を図3に、外観を図4に示す。

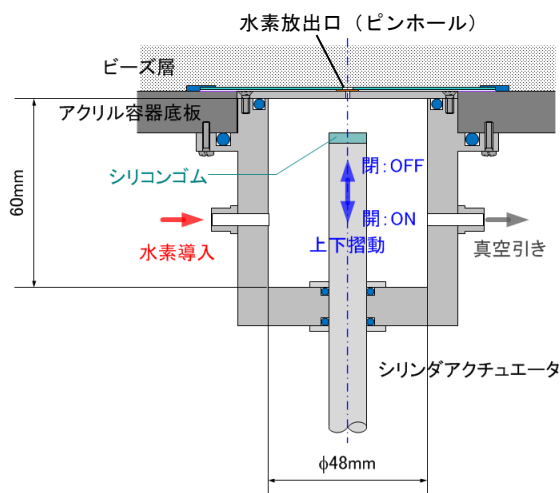


図3 水素放出機構断面図

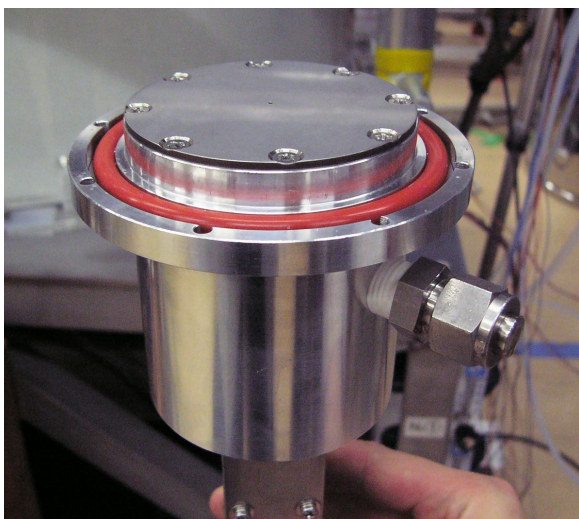


図4 水素放出機構外観

水素放出口は、鉛直方向の漏洩状態を正確に再現し、放出のタイミングを計測装置と同期させるために、シリンドラクチュエータによって開閉が可能な構造とした。水素は、上部の金属製プレート中央部のピンホールから実験容器内部に放出される。プレートを付け替えることで、複数の形状の放出口を使った実験が可能であり、導管の各種微小損傷を模擬することができる構成になっている。

2.3 土壌試料の選定

本報では、土壌模擬試料として構成粒子の粒径が比較的均一であるガラスビーズを用いることで、地中における水素拡散挙動の本質的な特徴を明らかにすることを目的とした。使用するガラスビーズの粒径については、一般的な土系舗装に最も多く用いられる真砂土の粒子構成を基に決定した。図5に実測した一般的な真砂土の粒径分布計測結果を示す。

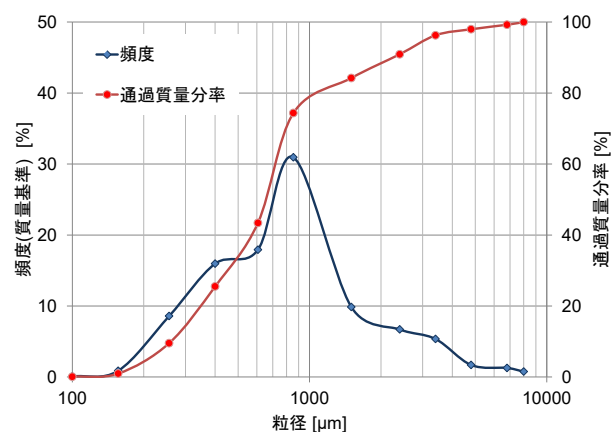


図5 真砂土の粒径分布実測結果

図5に示す真砂土の粒径分布実測結果を参考に、粒径512μmと1200μmの2種類のガラスビーズを選定し、土壌模擬試料として実験に使用した。選定したガラスビーズの顕微鏡拡大画像を図6に示す。

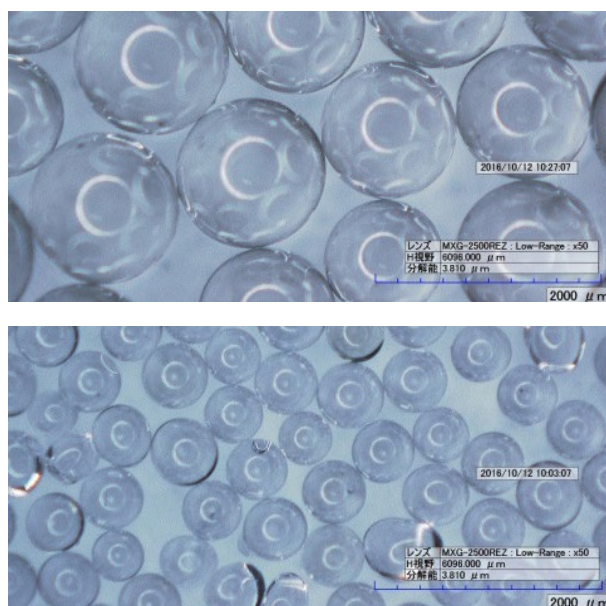


図6 ガラスビーズの顕微鏡拡大画像
(上: 粒径1200μm, 下: 粒径512μm)

2.4 水素拡散挙動の計測方法

(1) 地中拡散挙動の計測方法

地中模擬層（ガラスビーズ層）における水素拡散挙動の計測は，無酸素環境下において水素濃度の計測が可能な気体熱伝導式センサ（株式会社ネモトセンサエンジニアリング社製 NAP-21A）を使用した。センサの外観と寸法を図 7 に示す。

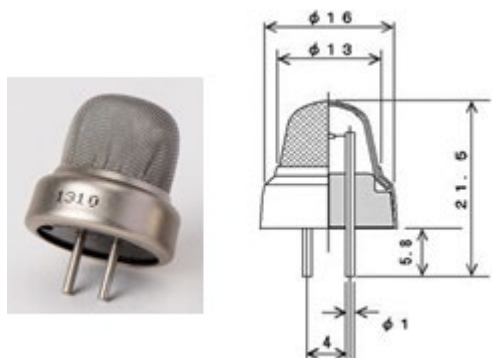


図 7 気体熱伝導式センサの外観と寸法

容器のスケールに対しセンサの体積が比較的大きく，センサの配置による地中水素拡散挙動への干渉が考えられるため，埋設するセンサの数を最小限に抑え，代表点における水素濃度の経時変化を計測することとした。地中水素濃度計測におけるセンサの配置を図 8 に示す。図 8 上図はセンサ埋設位置の上面図であり，下図は各センサの水素放出点からの半径方向及び鉛直方向への離隔距離を示した図である。水素拡散挙動は円筒形である地中模擬層の中心軸に対称であると仮定し，①から⑦まで合計 7 個のセンサを，互いに十分な空間的距離をとって配置することにより，水素拡散挙動への影響を抑制した。①～⑤までのセンサについては同時計測を行ったが，⑥及び⑦のセンサについては，水素放出口の直上に位置し，水素拡散挙動への影響が避けられないと判断したため，それぞれ個別に埋設し直し，単独で実験を行った。なお，⑦のセンサについては，地中模擬層表面から 10mm の深さに設定したが，これは次節に述べる大気計測における観測範囲の中心点と，地中模擬層表面に対して対称な位置となっている。

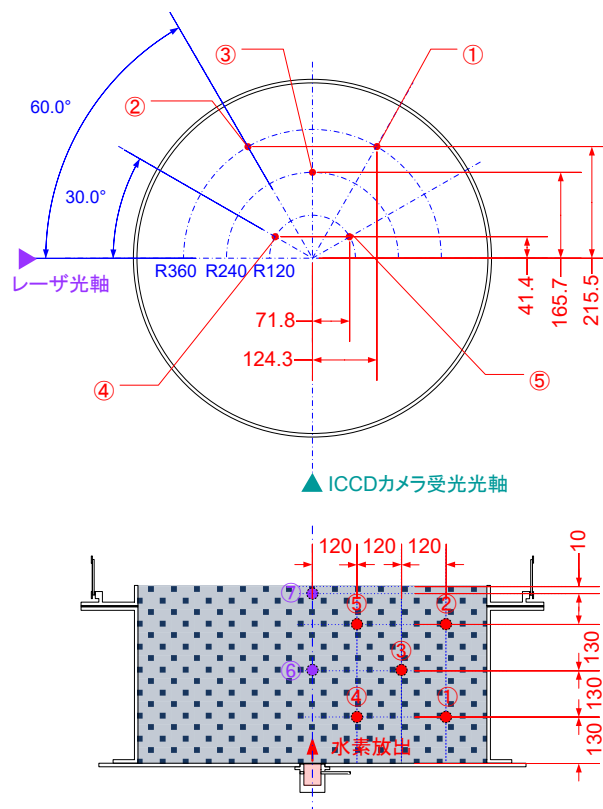


図 8 地中水素センサ配置図
(上：上面図，下：水素放出口からの離隔距離)

(2) 大気中拡散挙動の計測方法

大気中模擬層内の水素拡散挙動については，レーザラマン分光法による可視化を行った。可視化に使用したレーザ光源はNd:YAG レーザの第 3 高調波（Quantel 社製 CFR400，波長 355nm，30Hz，80mJ）である。ラマン分光法は，分子の内部エネルギーを散乱光の波長シフト量として捉える分光計測法であり，複数のガスが混在する条件下でも，特定のガスのみに着目して濃度計測を行うことができる。本実験では，実験容器の内部は窒素と水素の混合状態にあるため，これら 2 種のガスを分離して濃度計測を行う必要がある。

表 1 に，励起波長 355nm の場合の水素と窒素のラマンシフト，ラマン散乱波長，ラマン散乱断面積比を示す⁵⁾。ラマンシフトとは，励起光からの散乱光のエネルギーシフト量を表す値であり，分子種に固有の値である。これによりラマン散乱の波長が決まる。ラマン散乱断面積とは，ラマン散乱の発生確率を示す値であり，水素は窒素の 3 倍程度の値であるため，水素は比較的分光による計測に適したガスであると言える。

表 1 水素及び窒素のラマン散乱波長

分子種	ラマンシフト [cm ⁻¹]	ラマン散乱 波長 [nm]	ラマン散乱 断面積比 (窒素：1)
水素(H ₂)	4160	416.5	3.1
窒素(N ₂)	2331	387.0	1

水素拡散挙動計測時のレーザ光軸の位置を図 9 に示す。本実験では、レーザ光軸を地中模擬層上面から高さ 10mm の水平面内かつ水素放出口の直上を通るようにアライメントし、地中模擬層近傍の大気領域での水素拡散挙動を計測した。レーザの光軸上では、窒素分子もしくは水素分子が励起され、表 1 に示した波長のラマン散乱光が発生する。ラマン散乱の強度はガス濃度に比例するため、発生するラマン散乱光をレーザ光軸と 90° をなす方向からカメラによってイメージングすることにより、ガス濃度分布の可視化が可能である。レーザビームの直径を $\phi 6\text{mm}$ として計測を行ったので、水素拡散挙動の鉛直方向の観測領域は、地中模擬層上面から 10mm の位置を中心とする高さ 6mm の領域となる。水平方向の計測範囲はカメラの画角によって制限されるが、地中模擬層表面がすべて収まるようにカメラの位置を調整し、計測を行った。カメラの高さは、地中模擬層表面での光の反射が外乱となるのを防ぐため、レーザ光軸と同じ高さに設定した。

イメージングには ICCD カメラ (Princeton Instruments 社製 PI-MAX4:1024f) を使用した。ICCD カメラはナノ秒オーダーでのシャッタタイミング (ゲート時間) の設定が可能であり、レーザのパルスが容器内部の地中模擬層上面を通過するタイミングに同期させてシャッタを開くことにより、高い S/N 比で画像データを取得できる。本実験では、ゲート時間をレーザのパルス発光時間に合わせて 7ns に設定した。計測時には、水素によるラマン散乱光のみを選択的に観測するため、カメラレンズの内部に中心波長 415nm、透過帯域半値全幅 10nm の光学バンドパスフィルタを取り付けて観測を行った。

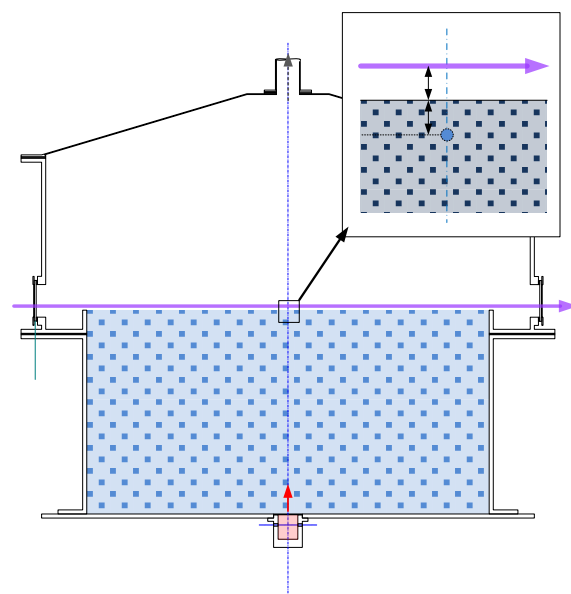


図 9 レーザ光軸の位置

3. 水素拡散挙動計測実験

3.1 実験条件の設定

水素放出口の形状は $\phi 1\text{mm}$ または $\phi 2\text{mm}$ の円形ピンポールとし、ガス供給圧力については、中低圧での水素配管供給を想定した 2.5kPa 及び 5.0kPa の 2 パターンに設定した。これらの条件下で、中心粒径 $512\mu\text{m}$ 及び $1200\mu\text{m}$ のガラスビーズを土壤模擬試料として地中模擬槽に充填し、それぞれ実験を行った。以上合計で全 8 パターンの条件において水素拡散挙動の計測実験を行ったが、本稿では、そのうち $\phi 1\text{mm}$ のピンポールを放出口とした 4 パターンの実験結果について報告する。実験は水素の放出を開始した時刻を基準として地中と大気中の計測を同時に開始し、300 秒経過するまでの拡散挙動を計測した。

3.2 地中模擬層内水素拡散挙動計測結果

全 4 条件での地中水素ガス拡散挙動の計測結果を、濃度ごとに色分けして可視化した図を、図 10～13 に示す。

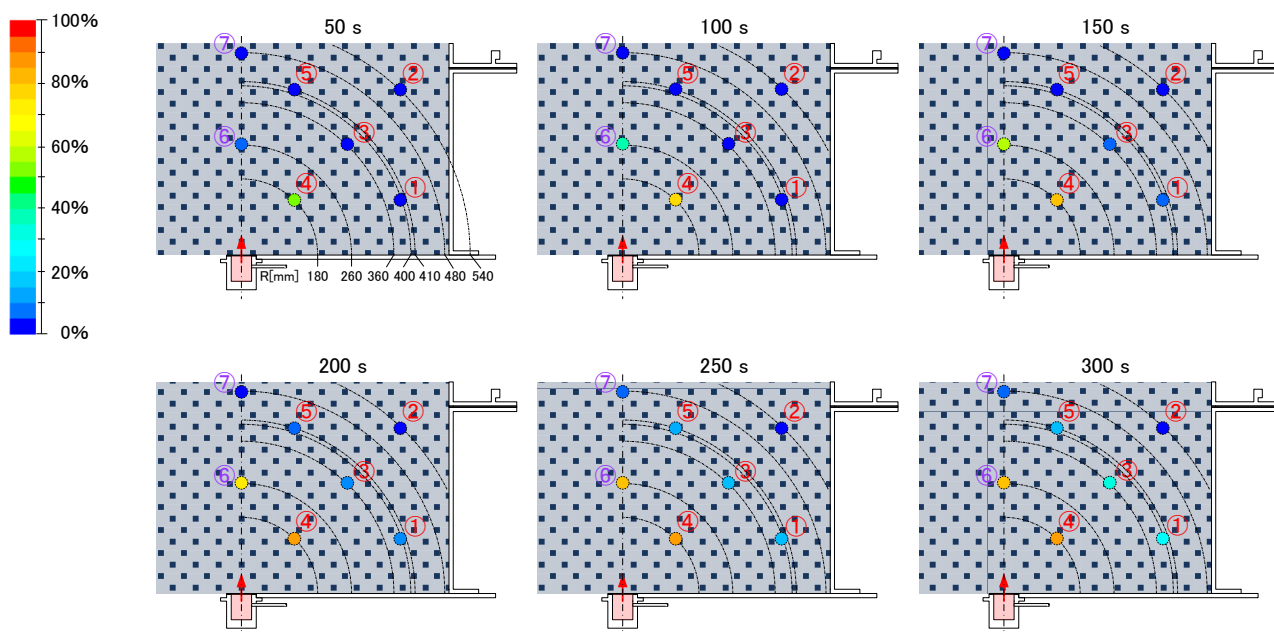


図 10 地中水素拡散挙動計測結果 (試料中心粒径 512 μ m, 供給圧力 2.5kPa)

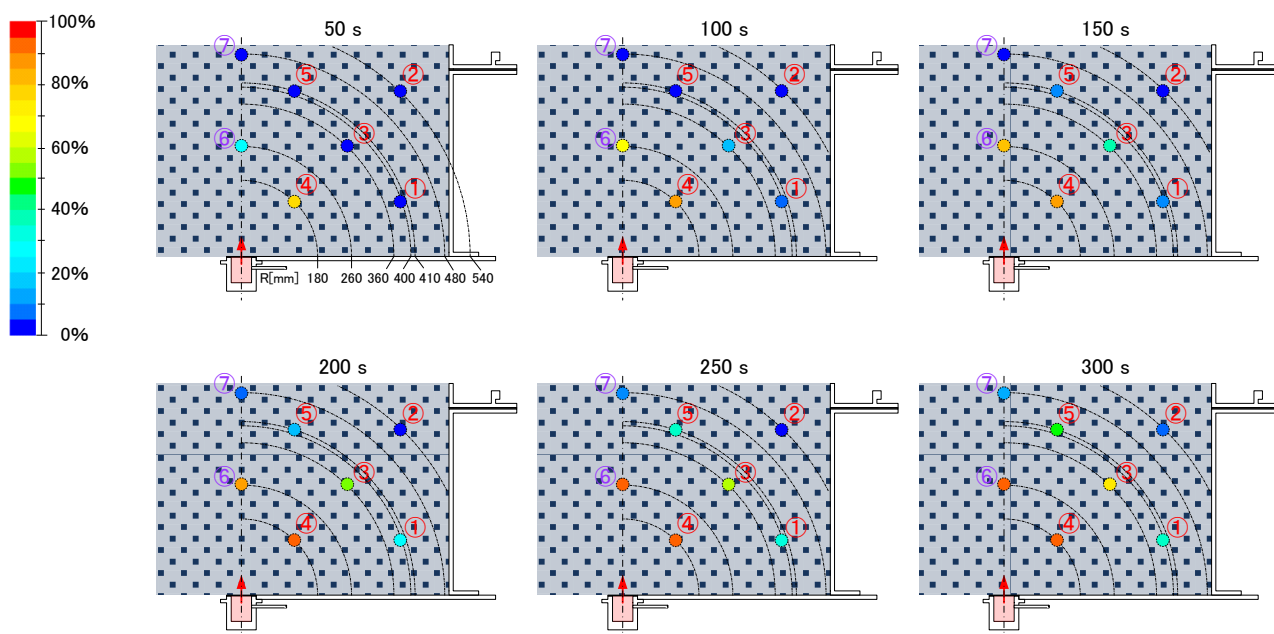


図 11 地中水素拡散挙動計測結果 (試料中心粒径 512 μ m, 供給圧力 5.0kPa)

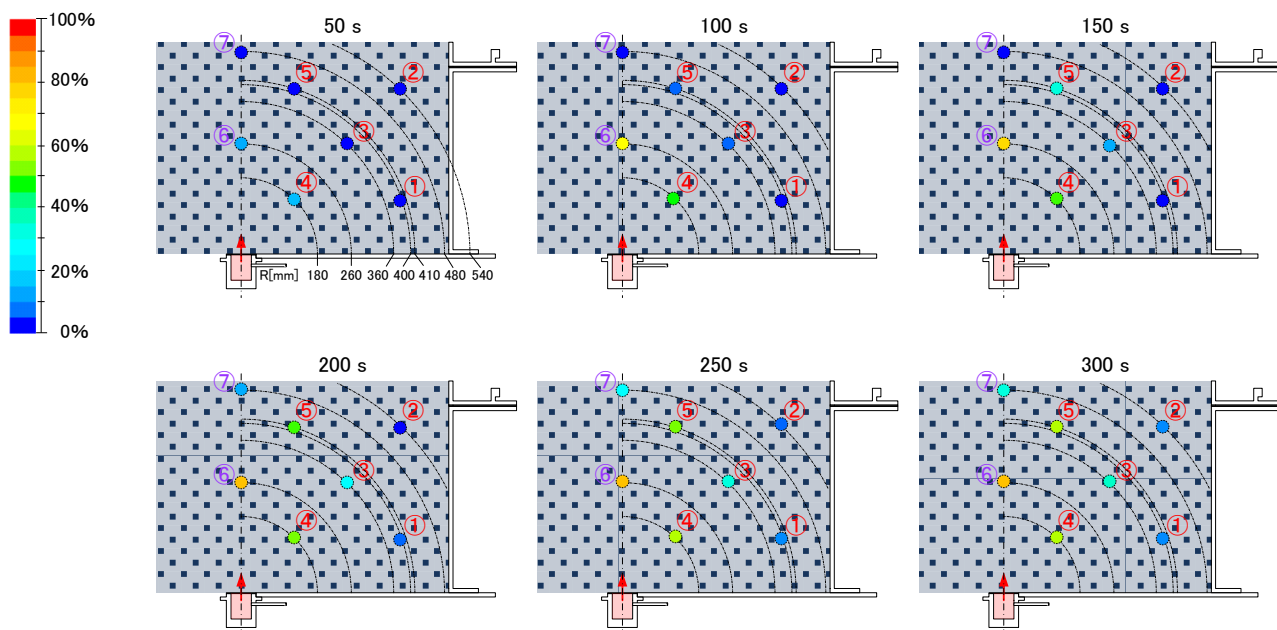


図 12 地中水素拡散挙動計測結果 (試料中心粒径 1200 μ m, 供給圧力 2.5kPa)

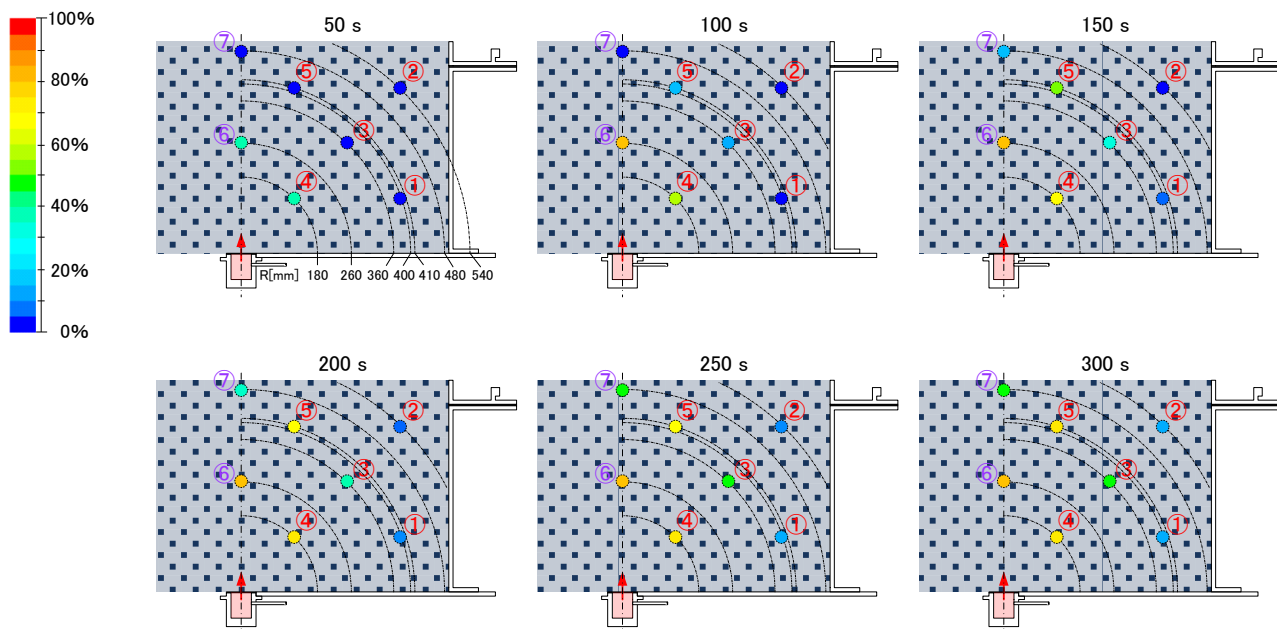


図 13 地中水素拡散挙動計測結果 (試料中心粒径 1200 μ m, 供給圧力 5.0kPa)

地中における水素拡散挙動は、おおまかには、放出口を中心とする同心円状の広がりとなるが、細かく見ると試料の粒径や供給圧力によって違いが見られた。

中心粒径 512 μm の土壌模擬試料中の拡散(図 10, 11) では、鉛直上方への拡散よりも水平方向への拡散が早いものに対して、粒径 1200 μm の場合(図 12, 13) には、水平方向よりも鉛直方向への拡散が先行する結果となった。これは、より粒径の小さな 512 μm のガラスビーズの方が透気係数が低いため、上方への拡散が抑制されるためであると考えられる。同じ試料粒径で供給圧力が高くなると、ガスの放出量が増加するため、各計測点の濃度上昇は早くなるが、全体的な拡散挙動の傾向は変わらないことが分かった。

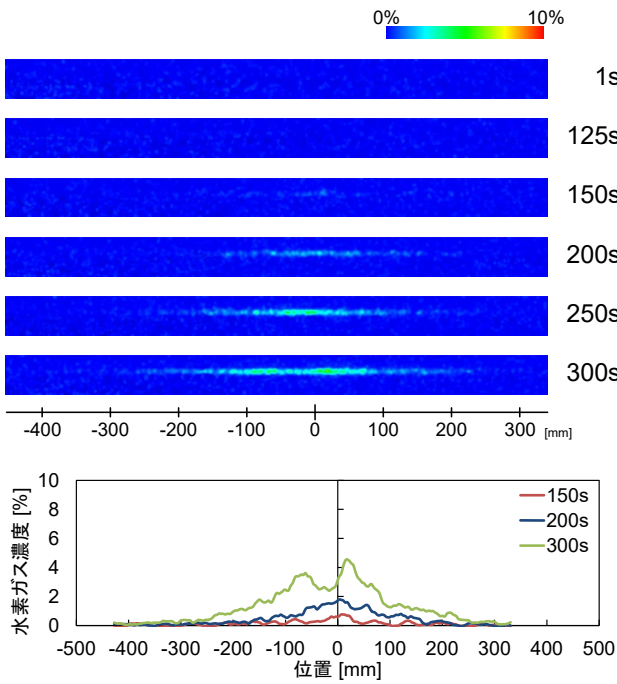
3.3 大気中模擬層内水素拡散挙動計測結果

大気中模擬層における水素拡散挙動計測結果を図 14~17 に示す。水素濃度 0%を青色、10%を赤色として、色相でガス濃度分布を可視化した。水平方向の位置は水素放出点の直上を基準点とした。また、水素放出開始後 150 秒、200 秒、300 秒経過後の水素濃度の水平分布を縦軸を濃度としてグラフ化した結果についても示した。

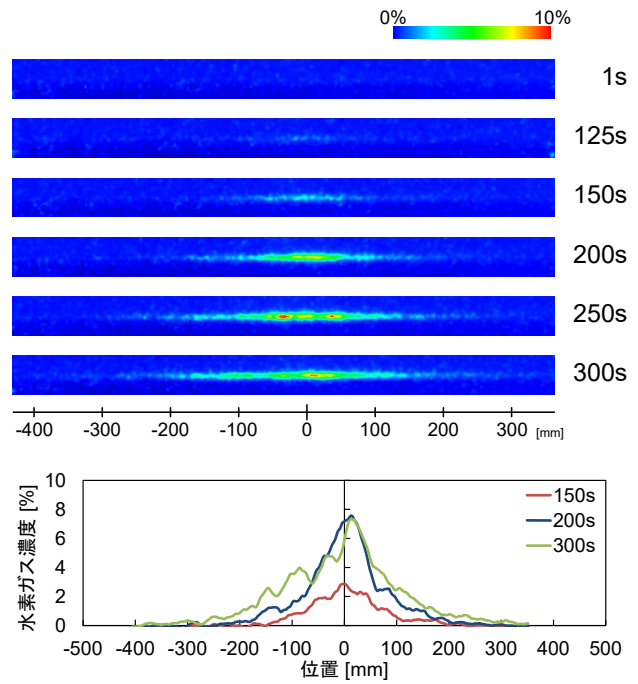
いずれの条件においても、まず最初に水素放出口直上付近に水素が観測され、時間の経過とともにガスの存在範囲が周囲に拡大していく傾向がみられた。これは、地中模擬層における水素拡散挙動が水素放出口を中心とするほぼ同心円状の広がりであり、水素放出口直上において最初に水素が大気中模擬層に到達するためであると考えられる。したがって、少なくとも粒径の揃ったガラスビーズを土壌模擬試料とした理想的な条件下では、大気中模擬層へ拡散する水素をその初期段階で検出することができれば、最初に水素が検出された地点のほぼ直下から水素が漏洩していると考えられる。その後、時間の経過とともに水素の存在範囲は水平方向に拡大し、複数のピークが確認できるようになる。以下このことの理由について考察する。

大気中模擬層内での拡散は地中での拡散に比べて圧倒的に早く、水素分子は窒素分子に比べてはるかに軽いため、地中模擬層から大気中模擬層に漏出した水素は、浮力によって急速に浮上し水素の流れが生じている可能性がある。また、大気中模擬層は、

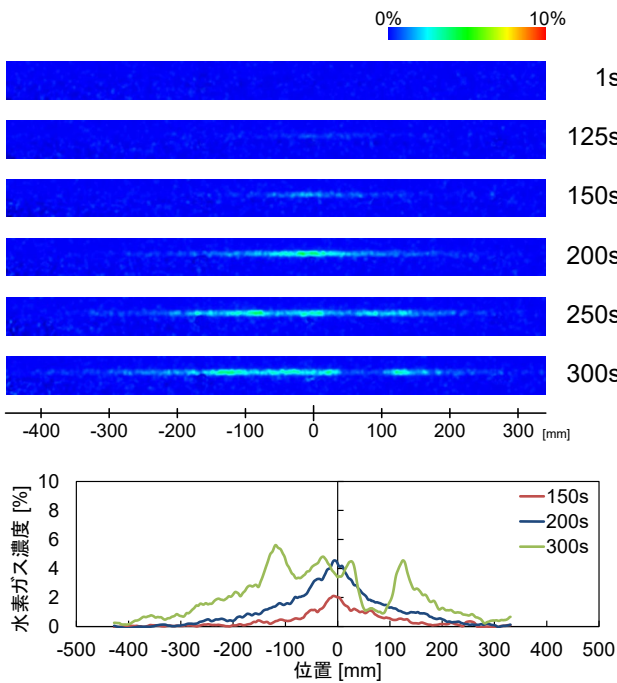
今回の実験においては、高さ 40cm 程度の限られた空間であるため、浮上した水素は容器の天井に衝突しガスの流れができることによって、大気中模擬層の内部に複雑な水素濃度分布が生じることが考えられる。これは、後述するシミュレーション解析の結果とも符合している。実現場においては、このように限定された空間内に水素が拡散する場合は限定的であると思われるため、特に屋外環境における大気中への水素拡散挙動をより正確に把握するためには、屋外計測試験或いはより規模を拡大した実験装置による検証を行う必要があると考えられる。



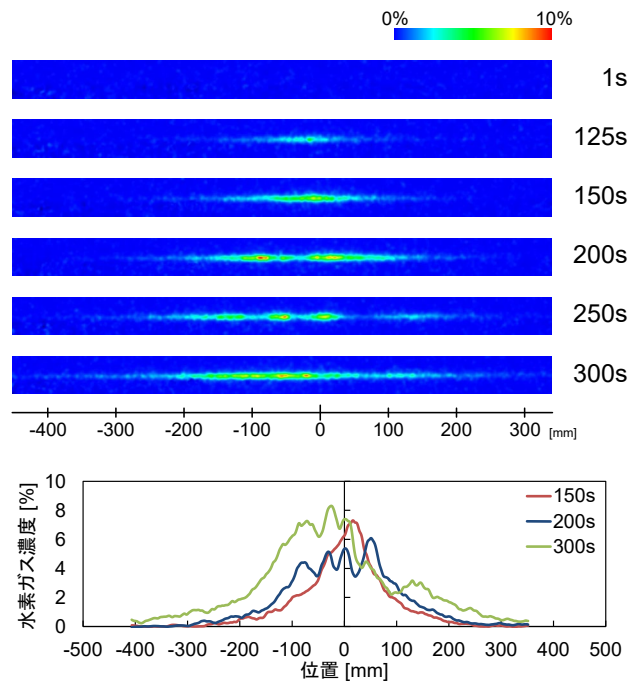
14 大気中水素濃度分布の経時変化計測結果
(試料中心粒径 512 μ m, 供給圧力 2.5kPa)



16 大気中水素濃度分布の経時変化計測結果
(試料中心粒径 1200 μ m, 供給圧力 2.5kPa)



15 大気中水素濃度分布の経時変化計測結果
(試料中心粒径 512 μ m, 供給圧力 5.0kPa)



17 大気中水素濃度分布の経時変化計測結果
(試料中心粒径 1200 μ m, 供給圧力 5.0kPa)

4. シミュレーションによる解析と再現性評価

本章では、地中及び大気中における水素拡散挙動について、前章に示した土壌を模擬したガラスビーズ充填容器内における実験条件にて CFD (Computational Fluid Dynamics: 流体解析) シミュレーションを実施し、地中模擬層内及び大気中模擬層内の空間の水素濃度変化を明らかにする。また、実験結果とシミュレーション結果を比較し再現性を評価することで、地中及び大気中における水素拡散挙動のシミュレーション解析が可能であるかどうかを明らかにする。

4.1 解析条件の設定

本解析には ANSYS 社の汎用流体解析コード FLUENT を用いた。シミュレーションの基礎方程式は、

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g u_g) = Q_g \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \nabla \left(\frac{\rho_g}{\varepsilon} u_g u_g \right) \\ = -\varepsilon \nabla p_g + \nabla(\mu_g \nabla u_g) \\ - \left(\frac{\varepsilon \mu_g}{K} u_g \right) + \varepsilon \rho_g g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g Y_i) + \nabla(\rho_g u_g Y_i) = \nabla(\varepsilon \rho_g D_{i,m} \nabla Y_i) + Q_i \quad (3)$$

で表される。(1)式は質量保存則、(2)式は運動方程式、(3)式はガス種 i の輸送方程式であり、ここで、 ε は空隙率、 ρ_g は密度 [kg/m^3]、 u_g は流速 (空塔速度) [m/s]、 p_g は圧力 [Pa]、 μ_g は粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]、 Q_g 及び Q_i は漏洩量 [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]、 K は透気係数 [m^2]、 d_p は粒径 [m]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 Y_i はガス種 i の質量分率、 $D_{i,m}$ は有効拡散係数⁶⁾ [m^2/s]である。

土壌模擬試料の影響は、主に運動方程式中に抵抗力として導入され、充填層内を流れる混合ガスの浸透性を表す透気係数 K は、Blake-Kozeny の式⁷⁾を用いた。

透気係数及び有効拡散係数には、実験において得られた空隙率を反映し、シミュレーションを行う。パラメータは、流量、圧力、放出口径、土壌模擬試料粒径であり、それぞれ実験データを反映

した。

解析条件を表 2 に示す。解析コードは FLUENT Version16 を使用し、物性は水素、窒素の密度を圧縮性としている。窒素雰囲気中への水素噴出であり、浮力の影響が大きいことから重力を考慮した計算としている。また、十分に遅い流れ場であることから、流動モデルは層流とした。空隙率は、実測した値である 0.3767 を使用した。解析における解析パラメータは、粒径 (①1200 μm , ②512.5 μm) と透気係数 (①1.32088e-9 m^2 , ②2.40459e-10 m^2) の2種類である。また、水素-窒素の2成分系の分子拡散係数については、0.736 cm^2/s (@16 $^{\circ}\text{C}$) を用いた⁸⁾。

境界条件は、下流側を大気開放とし、壁面は断熱+No slip 条件である。流量、水素供給圧力、放出口径、充填層の粒子径をパラメータとし、実験時の計測値及び寸法を用い、合計 8 ケースについて解析を実施した。各パラメータを表 3 に示す。

表 2 解析条件

モデル	
コード	FLUENT Ver16
物性	密度：圧縮性 (窒素, 水素)
重力	有り
流動モデル	層流
充填層	粒径 ①1200 μm ②512.5 μm 空隙率 0.3767 透気係数 ①1.32088e-9 m^2 ②2.40459e-10 m^2
境界条件	
下流側	大気開放
側面	断熱/No slip

表 3 解析パラメータ (実測値)

No.	流量 [L/min]	圧力 [kPa]	放出口径	充填層
①	8.99	2.54	ピンホール ϕ 1.017 mm	ϕ 512.5 μm (深さ 520 mm)
②	13.02	5.16		
③	8.58	2.90		ϕ 1200 μm (深さ 520 mm)
④	12.34	6.09	ピンホール ϕ 2.009 mm	
⑤	30.36	2.72		ϕ 512.5 μm (深さ 520 mm)
⑥	44.15	5.39		
⑦	27.94	4.02		ϕ 1200 μm (深さ 520 mm)
⑧	41.93	7.87		

4.2 解析結果

表 3 の各条件のうち, No. ①, ③, ⑤, ⑦のシミュレーション解析結果を図 18 に示す。

地中における水素の拡散挙動は, 全体的には, 水素放出口を中心とする同心円状の広がりとなっており, これは 3 章において述べた実験結果の特徴と一致している。水素放出開始から 100 秒程度までは, 鉛直及び水平方向の距離と濃度の相関がほぼ同じであり, 球状に近い拡散となっている。時間の経過と共に, 鉛直方向の発達はやや先行するようになり, 側壁近傍では壁面の影響により放射状の拡散から歪んだ形状へと変化している。土壌模擬試料の透気係数(粒径)による比較(条件①と③, ⑤と⑦)では, 粒径が大きく透気係数が高い場合には, 地中における水素拡散挙動は鉛直方向が水平方向よりも先行することが分かる。このことについても, 実験結果の特徴とよく一致している。

大気中における水素の拡散挙動は, いずれも水素放出口直上である地表面中央から開始し, 放出流量が高いほど, また, 透気係数が高いほど地表面への染み出しが早く, 大気中における水素の分布幅も早く拡大する。これらの定性的な挙動は, 実験結果と良好に一致している。

相対的に流量が高く, 水素漏洩量が増加すると, 地中における鉛直方向の水素拡散がいずれの条件でも先行し, その分水平方向への拡散の速度は緩和される傾向にある。したがって, 大気中への水素の染み出しが早期に始まり, 地表面中央で顕著であった水素の拡散が, やがて周辺の複数個所で生じる状態へと推移することがわかる。この結果は, 前述した大気中模擬層における水素濃度分布の計測実験において, 複数のピークが観測されたことと一致する。

また, 地中模擬層と大気中模擬層の境界付近での水素濃度勾配が大きく, 地表付近での大気中水素濃度があまり高くない場合でも, 地中模擬層内部では高い水素濃度となっている可能性があることが分かった。

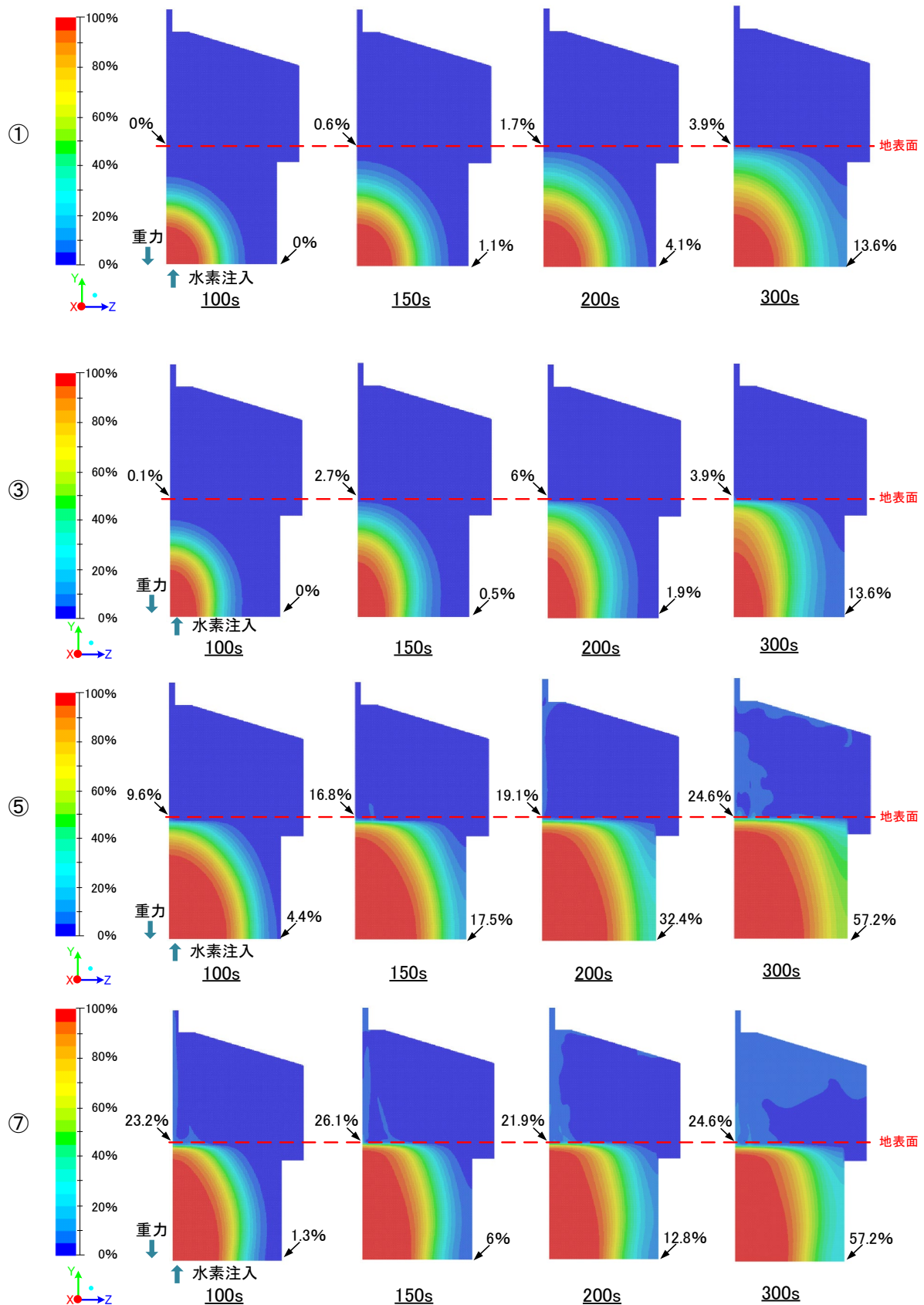


図 18 シミュレーション解析結果 (左端の番号は表 3 の No. に対応)

4.3 実験結果との比較による再現性評価

地中及び大気中における水素拡散挙動について、実験結果とシミュレーション解析結果を比較し、再現性の評価を行った。

地中模擬層内の計測点③（図 8 参照）における水素濃度の経時変化について、実験結果とシミュレーション結果を比較したグラフを図 19 に示す。

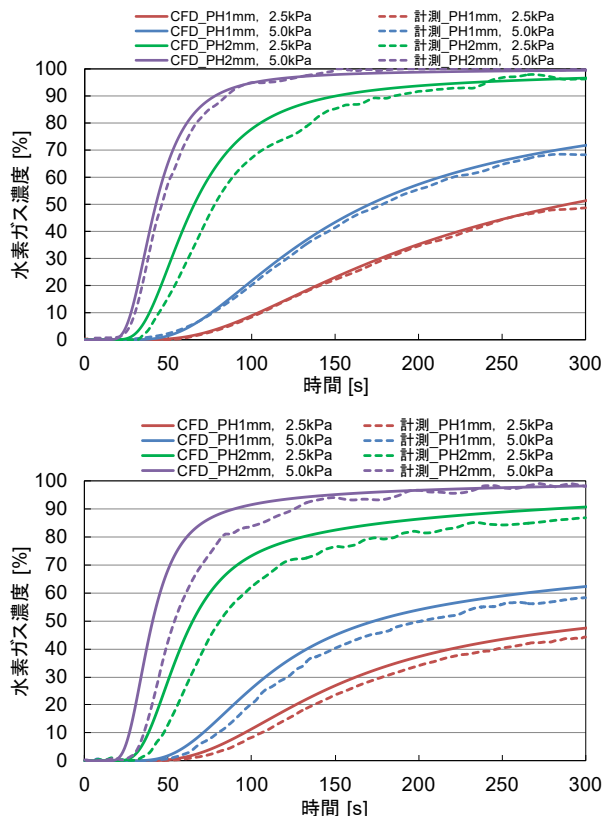


図 19 地中模擬層内の水素濃度比較（計測点③）
（上：粒径 512μm，下：粒径 1200μm）

図 19 から分かるとおり、計測点③における実験とシミュレーションの結果はよく一致した。定性的な挙動については特によく一致しており、初めは比較的早く濃度が上昇するが、次第に上昇の勾配が緩やかになっていく挙動が再現できている。定量的には、各条件における水素ガスの濃度が、実験値の方がやや低くなる結果となった。この理由については、シミュレーション解析において、水素供給の条件設定が影響している可能性がある。

次に、地表面近傍の大気中（水平位置は放出口直上）における水素濃度の経時変化を比較した結果を図 20 に示す。

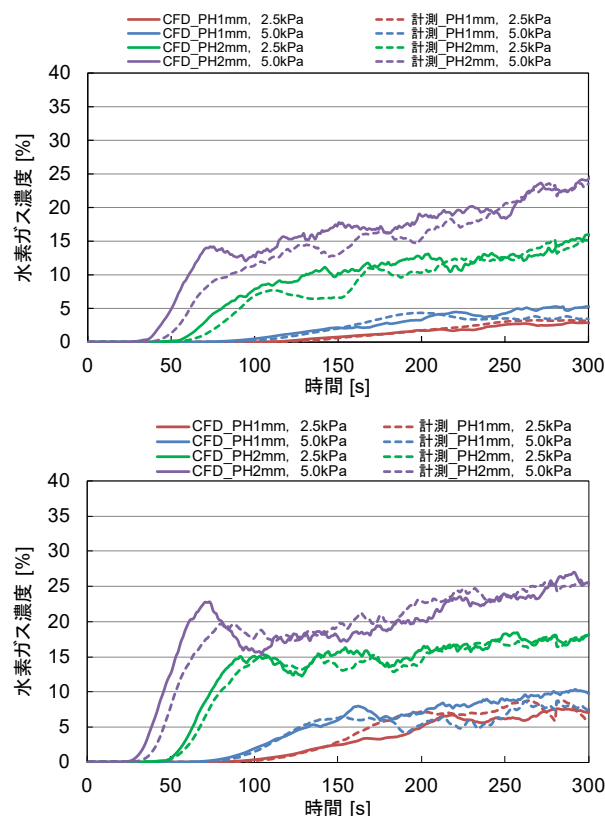


図 20 大気中水素濃度比較（地表面近傍中心）
（上：粒径 512μm，下：粒径 1200μm）

大気中における水素濃度の推移についても、実験とシミュレーションの結果はよく一致していることが分かる。全体的には、上昇と下降を繰り返しながら次第に濃度が上昇していく挙動をよく再現できている。濃度の絶対値については、地中と同様に実験結果の方がやや低い値となる傾向にあった。

以上の比較結果から、ガラスビーズを土壤模擬試料とした理想条件下において、CFD シミュレーションによって地中及び大気中の水素拡散挙動をおおむね正確に把握できることを確認した。

5. まとめ

粒径の均一なガラスビーズを土壤模擬試料とした理想的条件下における水素拡散挙動について、実験及びシミュレーションによる可視化を行った。CFD 解析によるシミュレーションは、今回設定した理想的条件下において、地中・大気中ともに高い精度で水素拡散挙動の実験結果を再現できた。実験及びシミュレーションによって得られた水素拡散挙動の特徴は以下のとおりである。

地中模擬層内においては、水素は水素放出口を中心とするほぼ同心円状の拡散挙動を示し、土壌粒径(透気係数)によって鉛直方向への拡散が先行するか、水平方向への拡散が先行するかが決まる。これは水素に働く浮力と土壌模擬試料による抵抗とのバランスで決定されと考えられる。

大気中模擬層への拡散では、地中模擬層と大気中模擬層の境界付近での濃度勾配が大きく、大気中模擬層における水素濃度が低い場合でも、直下の地中水素濃度は高くなっている可能性があることが示唆された。大気中模擬層への拡散は、水素放出口の直上付近から先行して進むが、地中模擬層内部の水素濃度が高くなってくると、水素放出口直上以外の複数の漏出点が生じ、広い範囲から大気中模擬層への拡散が進行するようになる。

以上、本報では、限られた閉空間内での理想的条件下における水素拡散挙動について明らかにした。より現実に近い条件での検証については、次報以降で報告する予定である。

【謝辞】

本研究は、経済産業省 平成 28 年度水素導管供給システムの安全性評価事業 維持管理工法の水素適用性評価「地中及び大気中の水素拡散挙動調査」により実施したものであり、関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 経済産業省：「水素・燃料電池戦略ロードマップ」, <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-2.pdf> (2019).
- 2) 経済産業省：「水素社会実現に向けた経済産業省の取組」, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/events/PDF/shiryou06.pdf (2020).
- 3) 株式会社四国総合研究所：「維持管理工法の水素適用性評価地中及び大気中の水素拡散挙動調査調査報告書：平成 28 年度水素導管供給システムの安全性評価事業」, 経済産業省, [info:ndljp/pid/11274337](http://info.ndljp/pid/11274337) (2017).
- 4) 朝日一平, 二宮英樹：「ラマン散乱光強度測定による水素ガス流の濃度分布計測」, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.7, pp.1309-

- 1314, DOI : 10.1541/ieejieiss.131.1309 (2011).
- 5) R. M. Measures: “Laser Remote Sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984).
- 6) M. Kaviany: “Principles of Heat Transfer in Porous Media”, Springer (1991).
- 7) 日本流体力学会：『流体力学ハンドブック』(初版), (1987).
- 8) 日本機械学会：『伝熱工学資料』(改訂第 4 版) (2009).