

地中水素ガス拡散挙動 CFD シミュレーションの妥当性確認

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部	杉本 健二
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	市川 祐嗣
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	荻田 将一
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	朝日 一平

キーワード： 水素
導管
ガス漏えい
拡散
土壌
数値流体力学
妥当性

Key Words : Hydrogen
Pipeline
Leakage
Diffusion
Soil
CFD
Validation

Validation of CFD Simulation Results for Hydrogen Gas Diffusion Behavior in the Ground

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department

Kenji Sugimoto

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agri-Technology Department

Sachiyo Sugimoto, Yuji Ichikawa, Masakazu Ogita, Ippei Asahi

Abstract

Hydrogen energy is expected to be put to practical use, and it is very important to understand hydrogen gas diffusion behavior and ensure safety when hydrogen gas pipelines are damaged. Therefore, assuming hydrogen gas leakage due to damage to a buried pipeline, hydrogen gas diffusion behavior in the ground and in the atmosphere near the ground surface was investigated by full-scale experiments and CFD simulations. In this paper, validation results of the CFD simulations by comparison with the experiments were shown. Reasonable CFD simulation results were obtained without using any special physical model by setting proper geological parameters such as soil porosity, gas permeability, and effective gas diffusion coefficient in porous media at constant leakage hydrogen gas flow rates. The influence of the geological parameters on the hydrogen gas diffusion behavior was investigated by sensitivity analysis. It was confirmed that fluctuations of the geological parameters had an effect of up to about 20%.

1. はじめに

近年中の実用化が想定される水素導管供給システムの安全性評価に係る調査の一環として、埋設導管の損傷に伴う水素ガス漏えいを模擬した実大規模の実験等により、地中および地表における水素拡散挙動を調査した。本稿では、実験データとの比較による CFD シミュレーションの妥当性確認結果について報告する。

漏えい水素ガス流量一定条件の下、土壌空隙率など地質パラメータを適切に設定することで、特殊な物理モデルを使用せずに妥当な再現結果が得られた。感度解析により地質パラメータが水素拡散挙動に与える影響について検討し、地質パラメータの変動により最大20%程度の影響があることを確認した。

2. 解析方法

2.1 基礎方程式

本調査における CFD シミュレーションの基礎方程式（質量保存則、運動量保存則、化学種 i の輸送方程式）を式 (1) ~ (3) に示した。対象となる系の化学種は水素と窒素の2種で、流動様式は層流とし、地中では多孔質媒体中の物質拡散として扱った。

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = Q \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} \vec{v} \cdot \nabla \right) \vec{v} = -\nabla p + \nabla (\mu \nabla \cdot \vec{v}) - \frac{\mu}{K} \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot (\varepsilon \rho D \nabla Y_i) + Q \quad (3)$$



図1 気密ブース外観

ここで、 ρ [kg/m³] はガス密度、 \vec{v} [m/s] は速度ベクトル、 p [Pa] は静圧、 μ [Pa·s] はガス粘性係数、 D [m²/s] は有効拡散係数、 Y_i は化学種 i の質量分率、 Q [kg/s] は水素ガス放出量、 t [s] は時間、 \vec{g} [m/s²] は重力ベクトルを示す。また、 ε は空隙率、 K [m²] は透気係数で、多孔質媒体の特性を示す。本稿では、地中における空隙率 ε 、透気係数 K 、有効拡散係数 D を地質パラメータと称す。

2.2 解析対象

本調査では、舗装を施した土壌模擬槽の深さ 1.2m の位置に導管を埋設し、小口径破断による水素漏えいを想定して実験した。土壌模擬槽は、気密ブース (8.0m×8.0m×3.0m^H) 内に製作され、内径 7.0m、高さ 1.35m の円柱構造を有し、舗装 0.5m (アスファルト層 0.15m+砕石層 0.35m) と真砂土層 0.85m の構成とした (図1, 図2)。

土壌模擬槽および気密ブース内を 100%窒素ガスに置換した状態を初期状態とし、放出口から一定流量の水素ガスを 24 時間放出し、地中埋設センサ 40 点による水素濃度計測、ならびに、地表 20mm 高の光学的水素濃度分布計測による水素拡散挙動を調査した¹⁾。

2.3 解析条件

埋設導管を含む土壌模擬槽、気密ブースおよび排気口を解析範囲に選定し、境界条件として水素ガス放出口に質量流量 Q (実験値 4.84×10^{-12} kg/s、3.37L/min) を、気密ブース排気口に大気

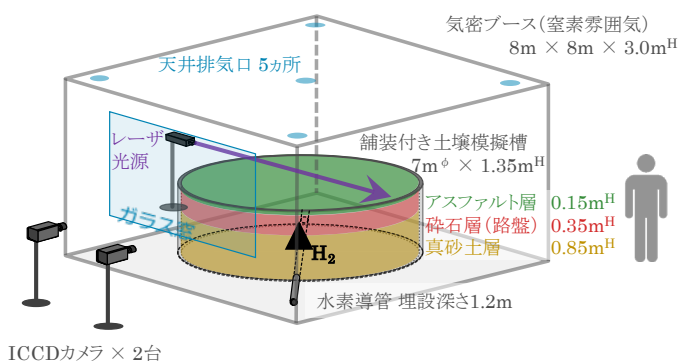


図2 実験装置イメージ

開放条件 (0 Pa) を、壁面上の運動量保存則に Non-Slip 条件および全ての化学種についてゼロ勾配条件をそれぞれ与えた。地質パラメータは、表 1 に示す各層の実測平均値を与えた。本調査において、汎用数値流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent 2019 R1 (Ver. 19.3) を使用したが、特殊な物理モデルは使用しなかった。

表 1 地中パラメータ

	ε [%]	K [m^2]	D [m^2/s]
アスファルト層	6.90	6.03×10^{-12}	1.21×10^{-12}
碎石層	23.2	25.9×10^{-12}	9.49×10^{-12}
真砂土層	27.4	27.7×10^{-12}	8.30×10^{-12}

3. 解析結果

3.1 地中水素濃度分布

実験で得られた水素濃度分布との比較により、CFD で地中水素拡散挙動を定性的に再現できることを確認した。地中代表断面の水素濃度分布について、左側に実験、右側に CFD とし、1 時間後、2 時間後、6 時間後、24 時間後の水素濃度コンター図を並べて図 3 に示した。全体的に同心円状に等方的に広がる水素拡散挙動は類似していた。

3.2 水素濃度経時変化

実験と CFD の水素濃度経時変化比較により、両者は定性的に一致することを確認した。土壤模擬槽の構成図とともに水素放出口直上の大気中計測点および地中埋設センサ点における水素濃度経時変化比較を図 4 に示した。ここで、センサ④の大気中水素濃度については、実験、CFD とも 0.1 時間ごとの時間平均にてグラフ化した。

4. 解析結果の妥当性確認

4.1 地中水素濃度比較

水素放出 12 時間後の地中埋設センサ点水素濃度に関する実験と CFD の比較図を図 5 に示した。ここで、横軸を実験値、縦軸を CFD による計算値としてプロットし、CFD/実験=1.0 を一点鎖線で、CFD/実験=0.8、1.2 を 2 本の点線で示した。ほとんどのデータは点線で挟まれる相対比±20%の範囲内にあり、定量的なデータ乖離は概ね 20%程度であることを確認した。

4.2 真砂土層空隙率再調査

実験と CFD で一部データ乖離がみられたため、実験完了後に真砂土層空隙率を再調査した。実験前後の真砂土層空隙率調査結果を図 6 に示した。

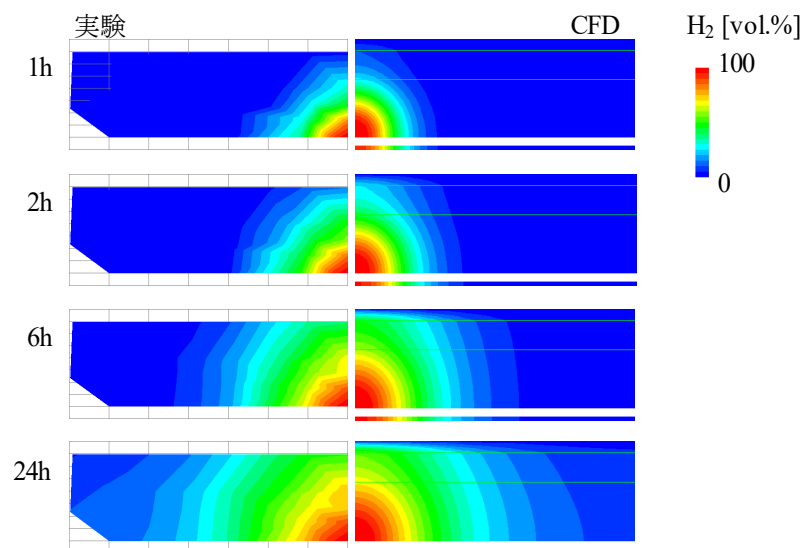


図 3 水素放出 1 時間後、2 時間後、6 時間後、24 時間後の地中水素濃度分布比較

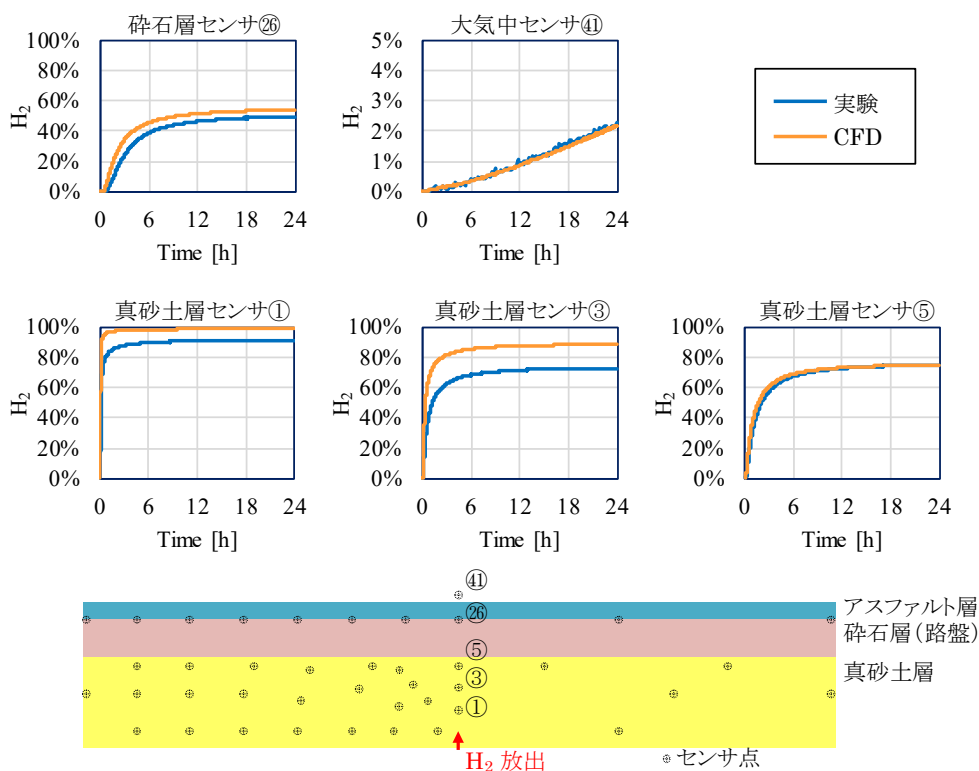


図4 水素放出口直上の大気中および地中埋設センサ点における水素濃度経時変化比較

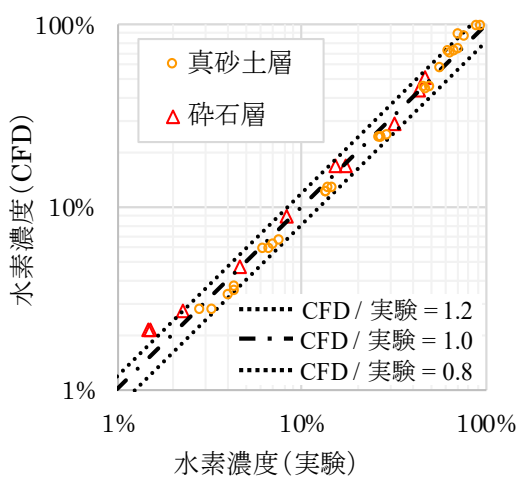


図5 水素放出12時間後の水素濃度比較

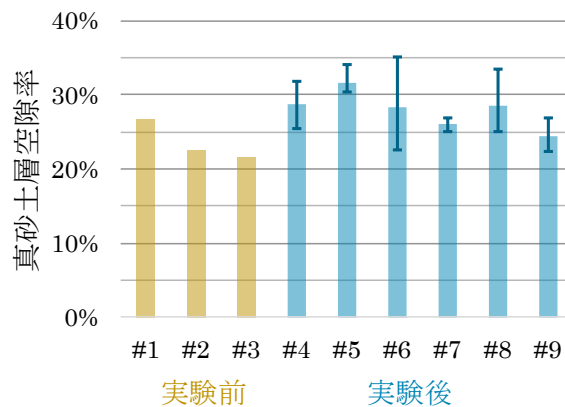


図6 真砂土層空隙率調査結果

ここで、実験前には代表点3箇所、実験後には代表点6箇所×近接領域3点の空隙率を調査した。実験後の再調査の結果、特定領域の空隙率に偏りはみられない一方で、近接領域で10%程度のバラツキが含まれる場合があることを確認した。これら地質パラメータのバラツキ等がデータ乖離要因の一つと推定された。

4.3 地質パラメータ感度解析

前項の再調査結果を踏まえ、感度解析による地質パラメータ影響度の評価を試みた。具体的には表2に示すように、真砂土層を対象として空隙率 ϵ の実測平均値を基準に大小計3ケースを想定し、透気係数 K についてはErgun²⁾の関係式(4)、有効拡散係数 D についてはMillington & Quirk³⁾の関係式(5)を用いて推定した値を用いた。

$$K = \frac{\epsilon^3 d_p^2}{150(1-\epsilon)^2}, \quad d_p = 3.27 \times 10^{-4} [\text{m}] \quad (4)$$

$$\frac{D}{D_0} = \epsilon^{\frac{4}{3}}, \quad D_0 = 4.7 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5)$$

ここで、式(4)の平均粒子径 d_p および式(5)の大気中ガス拡散係数 D_0 については、空隙率 ϵ 、透気係数 K 、有効拡散係数 D の実測値から逆算して求めた。さらに、表2の空隙率36.4%については、真砂土層無転圧時を想定した簡易実験によって求めた値を使用した。

感度解析の結果、地質パラメータによる影響は概ね20%程度であることを確認した。地質パラメータ感度解析結果を図7に示した。ここで、横軸に基準とした解析条件における各センサ点での水素濃度、縦軸に地質パラメータを変更させた条件での水素濃度としてプロットし、基準×1.0を一点鎖線で、基準×0.8、基準×1.2をそれぞれ点線で示した。ほとんどのデータは点線で挟まれる相対比±20%の範囲内であった。なお、水素放出量一定条件での感度解析において空隙率大にて水素濃度低となる傾向が示されたが、水素供給圧力一定条件での感度解析においては空隙率大にて水素放出量大、水素濃度高となることを別途確認した。

表2 感度解析条件 (真砂土層)

空隙率 ϵ 設定	ϵ [%]	K [m^2]	D [m^2/s]
実測最小値	21.7	11.8×10^{-12}	6.08×10^{-12}
実測平均 (基準)	27.4	27.7×10^{-12}	8.30×10^{-12}
無転圧 (最大値)	36.4	85.4×10^{-12}	12.2×10^{-12}

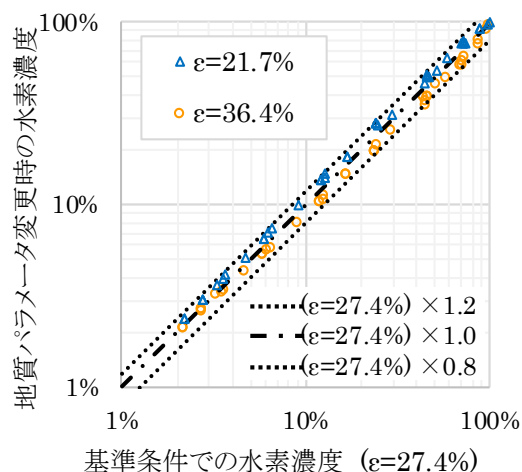


図7 地質パラメータ感度解析結果

5. まとめ

実大規模の実験で得られた水素濃度の変化をCFDにより再現し、その妥当性を確認した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 特殊な物理モデルを使用することなく、地中および地表の水素拡散挙動の再現は可能。
- (2) 地質パラメータなどの入力条件が適切であれば、水素拡散挙動の再現性は高い。

詳細な地質パラメータ分布の把握には制約があることから、CFDにおける地質パラメータについては各層一様と仮定した設定等が現実的と考えられる。本調査の範囲において地質パラメータの影響は水素濃度20%程度に相当することを確認した。

【謝辞】

本調査は、経済産業省「平成30年度水素導管供給システムの安全性評価事業」および「令和元年度新エネルギー等の保安規制高度化事業」の一環で実施されたものである^{4) 5)}。ご協力いただいた関係各位に深く感謝する。

【参考文献】

- 1) 杉本幸代、市川祐嗣、萩田将一、児玉裕美、星野礼香、朝日一平、上地優、寺田敦彦、日野竜太郎：「ラマンイメージングによる舗装路下埋設配管損傷時の漏えい水素拡散挙動計測」, 第37回レーザセンシングシンポジウム予稿集, (2019/9), pp. 51-52.
- 2) Ergun, S., “Fluid Flow through Packed Columns”, Chemical Engineering Progress, Vol. 48, No. 2 (1952), pp. 89-94.
- 3) Millington R. J. and Quirk J. P., “Permeability of Porous Solids”, Trans. of the Faraday Society, Vol. 57 (1961), pp. 1200-1207.
- 4) 「平成30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)) 調査報告書」, 経済産業省, (2019/3), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000130.pdf.
- 5) 「令和元年度新エネルギー等の保安規制高度化事業(水素導管供給システムの安全性評価事業(地中および大気中の水素拡散挙動調査)) 調査報告書」, 経済産業省, (2020/3), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000073.pdf.