

漏れ試験の最新研究と現状

水素の埋設導管による供給の保安確保

大阪ガス (株) 岡本 英樹 東京ガス (株) 五味 保城 早稲田大学 赤木 寛一

Ensuring Supply Security through Hydrogen Buried Pipelines

Osaka Gas Co.Ltd. Hideki OKAMOTO
 Tokyo Gas Co.Ltd. Yasuhiro GOMI
 Waseda University Hirokazu AKAGI

キーワード ガス拡散, 地中, 埋設配管, 保安, 実規模実験, 数値シミュレーション

1. はじめに

将来のクリーンエネルギーとして期待されている水素について一つの活用形態として、埋設導管による一般家庭や企業の燃料電池への供給が考えられている。図1に埋設導管による燃料電池への水素供給ビジネスのイメージを示す。

これら水素ガスの埋設導管による供給を検討する上で重要となるのが保安確保である。これには配管材料に関する長期信頼性だけでなく、万一のガス漏出時の地中での移動範囲、速度や地上への浮上などの拡散状況に関する知見は極めて重要である。これらは安全な設備の設計や、維持管理を行う上で基盤となるものである。

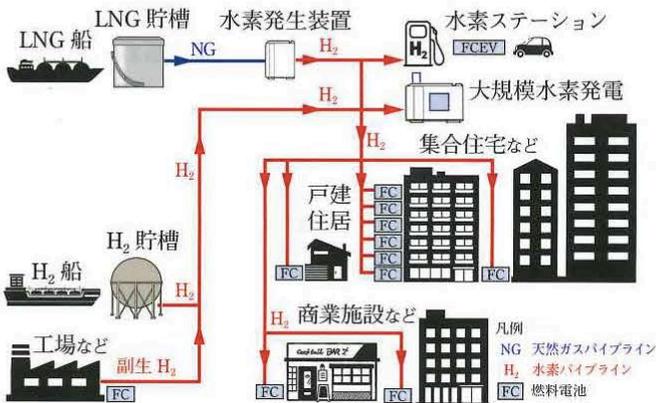


図1 埋設導管による燃料電池への水素供給ビジネスのイメージ

2. 研究方針

本研究は、水素ガスの埋設配管からの漏出を想定し、都市ガスの供給条件を参考に地下1~2mから供給圧力に相当する低い圧力で100VOL%の水素ガスが漏洩した場合の拡散状況および漏出の発見手法をポイントに行う^{1)~3)}。

具体的には下記の3点をポイントに、安全・安心な水素供給、水素社会の実現に資する技術知見の調査・研究を行う。

2.1 実大規模の水素ガスの地中漏出実験により拡散状況を調査

都市ガスの埋設配管を参考に実大規模の実験土槽を製作し、実際にガスを漏出させて地中でのガスの滞留や地上への浮上状況を確認する。

2.2 数値シミュレーションの適用調査

2.1で得た実測のガス濃度分布データを基に、解析モデルの適用性を検証し、様々な事象でのガス漏出時の拡散状況把握

への活用の可能性を確認する。

2.3 付臭剤の適用調査

無色・無臭で着火など危険性のあるガスについて、漏出時の有効な保安対策の一手法として、付臭による早期の漏れ発見が挙げられる。2.1の実験時に付臭剤を添加して、その適用の可能性を確認する。

3. 研究内容と結果

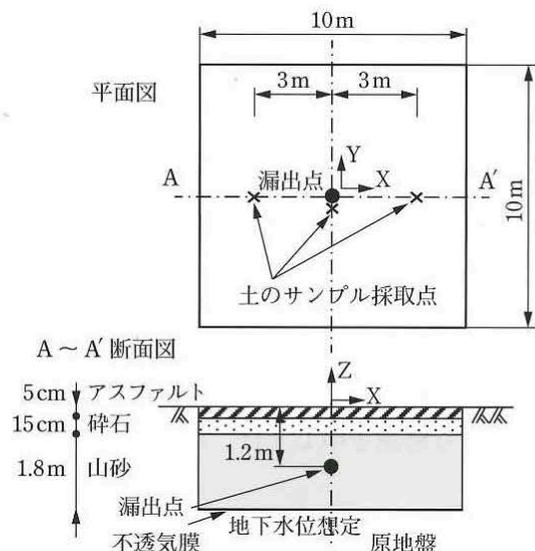
3.1 実大規模の水素ガスの地中漏出実験により拡散状況を調査

3.1.1 実験概要

水素ガス導管の道路埋設を想定し、都市ガスの知見を参考に実大規模の実験フィールドを製作した。図2(a)に示すよ



(a) 実験フィールドの外観および内部

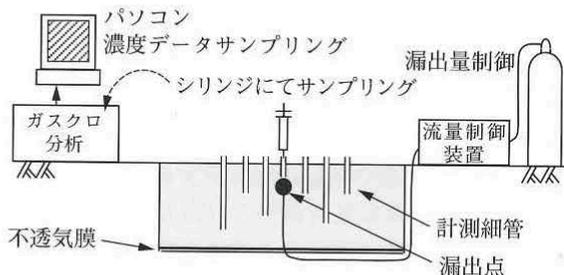


(b) 平面および断面図

図2 実験フィールドと試験地盤構成

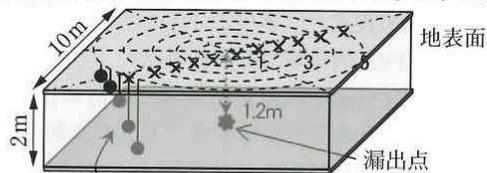
うに安全確保のために、テント内に縦10m×横10m×深さ2mの試験地盤を作成した。なお、座標軸は水素ガス漏出点直上地表面を原点とする図2(b)に示すようなものを採用した。

水素ガスは、図3(a)に示すように水素ガスボンベより流量制御装置を通して、後述の不透气膜の下部に予めパイプ配管して実験フィールドの中央点でパイプを立ち上げその先端に図3(c)に示す多孔質セラミック製の球体を取り付けて漏出点とした。



(a) 濃度計測の概況

×: 測定位置 (水平方向) 左右: 漏出点, 1m, 2m, 2.5m, 3m, 4m, 5m



測定位置 (深さ方向): 地表面, 0.12m, 0.3m, 0.5m, 1m, 1.5m

(b) 濃度計測の位置



(c) 漏出点球体



(d) フィールド転圧



(e) 不透気膜敷設



(f) 計測細管

図3 地中内水素ガス濃度の計測

漏出圧力は、表1に示すように都市ガスの供給圧力による漏出と同程度の0.2kPa、漏出量は、過去の地中における腐食孔や管継手などからの漏出量実測値に相当する1000cc/minにて実験を行った。

試験地盤は、通常の道路工事を想定して導管埋戻しに一般

表1 実験条件

ガス種類	水素 (比重 0.07)		
漏出量	1000 (cc/min)		
漏出圧力	0.2 (kPa)		
漏出位置	GL -1.2 (m)		
想定地下水位	GL -2.0 (m)		
試験地盤構成と物性値	空隙率 (VOL%)	湿潤密度 (g/cm ³)	
	アスファルト	7.5 ± 2.5	2.33 ± 0.01
*アスファルトは乾燥密度	砕石	22.1 ± 1.0	1.94 ± 0.01
	山砂	19.5 ± 3.0	1.91 ± 0.09
	原地盤	18.8 ± 3.0	1.92 ± 0.15

的に利用されている14号山砂(土粒子密度2.66g/cm³, D50 = 0.9mm, 平均含水比9.2%)を用いて、漏出点を設置した実験フィールド内で図3(d)に示すように30cmごとの埋戻し転圧を行い、路盤には15cm厚さの砕石(D50 = 6.2mm)を、表層には5cm厚さのアスファルトを用いた。

なお、地中での水素ガス移動に関する境界条件としては、試験地盤底面の地下水位については、実験場周辺での降雨などによる特異な変動に対する対応策として、図3(e)に示すようにガスや水などを透さないゴム製の不透気膜を敷設し、その位置に地下水位があるものと想定した。敷設深さは、全国各地の代表的な埋設配管の地下水位を調査のうえ、平均的な深さである2mに設定した。なお、可燃性ガスの多くは水への溶解度が小さく、本実験における水素ガスでは0.01ml/水1ml(20℃)程度で、無視できる。このため、不透気膜の敷設により、地下水位の存在を模擬できるものと考えた。側面については、原地盤と接して透気可能とした。このように通常の埋設導管と同様の条件とした。

また、締め地盤の均一性の確認については、実験後に漏出点、漏出点より水平(X軸)方向+3.0m、漏出点より水平方向-3.0mの位置においてボーリングを行い、それぞれ、Z = -0.2m, -0.5m, -1.1m, -1.7mの深さで土のサンプルを採取し確認した。その結果は、表1に併せて示されている。

地中内の水素濃度は、図3(f)に示すように複数本の計測細管(先端部に多孔質フィルタ(10μm)を取り付けた内径約1mmのステンレス管)をあらかじめ所定の位置・深度に埋設しておいて、測定した。具体的には、漏出開始から3, 6, 9, 12, 24時間後、以降は24時間間隔で、シリンジにて微量の水素ガスを地上より計測細管からサンプリングした。これらをガスクロマトグラフィで分析し水素ガス濃度を測定した。サンプル量としてはガスクロマトグラフィで精度良く分析が可能で、かつガス移動に影響を及ぼさないよう10ml程度とした。

地表面に浮上した水素ガス濃度は、図4に示すとおりカート式の汎用ガス検知器(熱線型半導体式/水素ガス濃度検出限界0.008VOL%)を用い、都市ガス漏洩検知⁴⁾の場合と同様に地上約2cmの位置で、時速4km程度で走行して計測した。

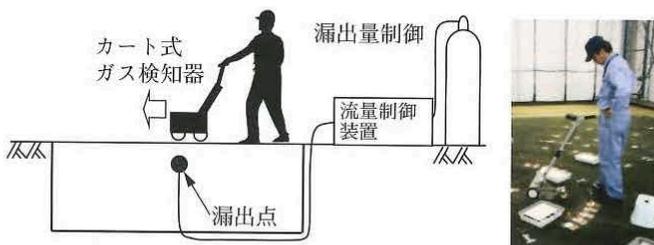


図4 地表面水素ガス濃度の計測

3.1.2 実験結果

(1) 地中内水素ガス濃度の経時変化

図5(a)に示す試験地盤内のAA'断面上の点(1)~(3)(座標(X, Z) = (0.0, -1.0), (-1.0, -0.5), (-2.0, -1.5))の位置での、実験で得られた地中内水素ガス濃度の経時変化を図5(b)に示した。

水素ガスの比重は空気より小さいため、上方へ移動しやすく、漏出開始より50時間程度で地中での水素ガスの漏出量と、大気中へ抜けていく量がバランスして、定常状態となっている。

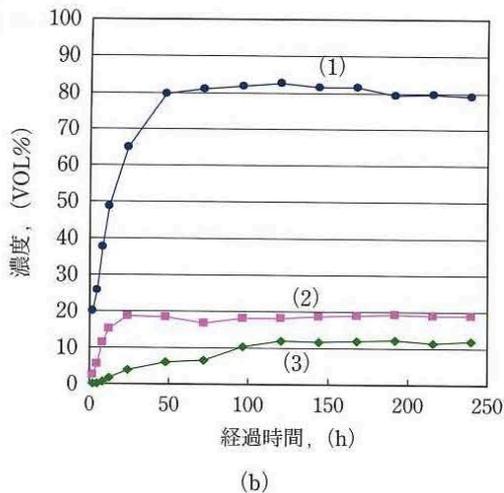
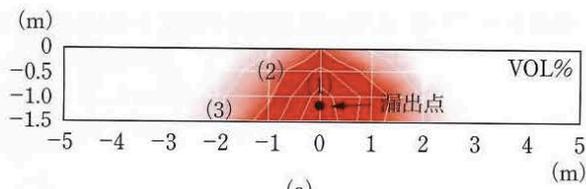


図5 地中内水素ガス濃度の経時変化

(2) 地中内水素ガス濃度の分布

図6に、水素ガスの漏出開始から240時間経過した定常状態の時のAA'断面における地中内水素ガス濃度の分布を示した。

濃度分布は、試験地盤が均一に作製できていることを反映し、漏出点を中心に左右対称に広がっている。

また、水素ガスの比重は空気より非常に小さいので、アスファルト面から大気中へ拡散し、試験地盤上層部や漏出点側の濃度は比較的低濃度となっている。試験地盤下層部は地下水面に相当する不透気膜の影響で、水素が下方に移動できないため、比較的高濃度となっている。地中を移動した水素ガスの10VOL%以上の濃度域は、漏出点を中心に側方に±2m程度の範囲に分布していた。

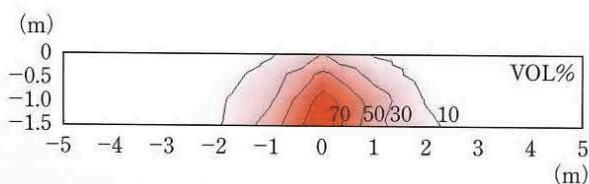


図6 地中内水素ガス濃度の分布図
(240時間後)

(3) 地表面に浮上した水素ガス濃度の分布

図7に、図6と同様に漏出開始から240時間経過した定常状態の時にカート式ガス検知器で測定した地表面X軸方向の水素ガス濃度の分布図を示した。

濃度分布は、水素ガス漏出点直上を中心におおむね左右対称に広がっており、地中内濃度の分布と同様に、漏出点直上の濃度が0.2VOL%程度と高く、漏出点から離れるほどに濃度は低くなっている。浮上した水素ガスは、漏出点を中心に±2.5m程度の範囲に分布し、この範囲では水素ガス濃度検知限界が0.008VOL%であるカート式ガス検知器で検出可能であった。この結果は、ガス事業法で定められた路線上の地表面におけるガス検知器を用いた定期漏洩調査⁴⁾により、水素ガスの浮上を確認できることを示している。

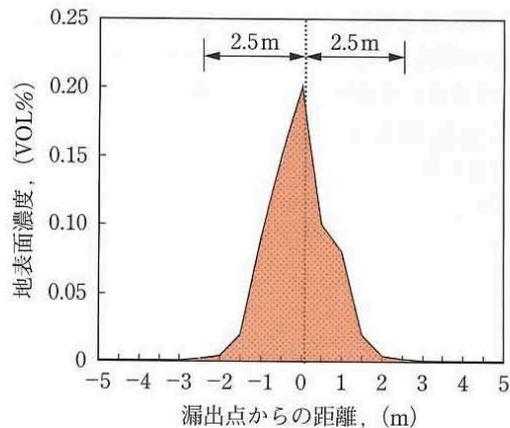


図7 地表面水素ガス濃度の分布図
(240時間後)

以上の実大規模実験結果から、標準的な埋設条件の下での水素ガス漏出時の地中での移動速度、移動範囲などの滞留や地上への浮上状況を確認した。

3.2 数値シミュレーションの適用調査

3.2.1 基本方程式

Darcy則とFick則に基づく解析手法⁵⁾⁻⁷⁾は、土を多孔質体として、その空隙でのガスの移流-拡散によって移動し、時間とともにその濃度に変化する。ガスの流動は、空隙中に生じた圧力勾配および重力に依存するものである。圧力差、比重差、濃度差の存在する本研究における実験条件を再現するのに、理論的に適していると考えられる。

土の空隙中の流体の流れについては、一般の運動方程式、質量保存則などが成り立つ。ただし、土の空隙部分の形状は極めて複雑であり、ここではこの空隙の局所的なサイズより十分大きい、対象とする地盤全体の大きさよりも十分小さい体積で積分平均した図8に示すような体積要素に関する運動方程式、質量保存式を用いることとした。

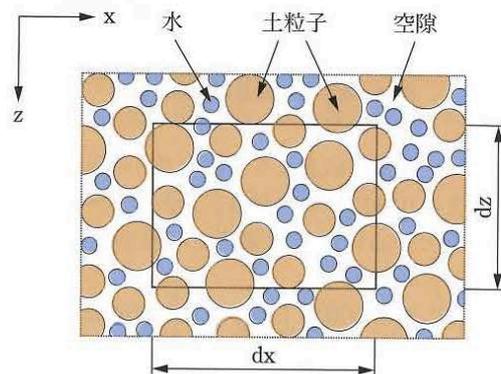


図8 土中に設定した微小体積要素

また、本研究は都市ガスの供給圧力による漏出と同程度の0.2kPaで低い圧力を対象としており、この漏出圧力に伴う水の移動は極めて小さいと考えられ、土の空隙中での水素ガスと空気の2成分混合気体の移動問題とした。さらに、理想気体の状態方程式を基礎方程式に組み込むこととした。

なお、実験フィールド内は、平均含水比9.2%の14号山砂を用いて30cmごとの埋戻し転圧を行っているため、土は十分締固められていると考えられることから、数値シミュレーションでは、土の体積は変化しないと仮定した。

(1) 運動方程式

地中の混合気体の移動を記述する場合のデカルト座標における運動方程式は式(1)で表現される。

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v} = -\nabla p - [\nabla \cdot \bar{\tau}] + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、

- ρ: 混合気体圧力 (Pa), \bar{g} : 重力加速度 (m/s²)
- $\bar{\tau}$: せん断応力 (N/m²), ρ: 混合気体密度 (kg/m³)
- \bar{F} : 単位体積当りの混合気体に加わる外力
- \bar{v} : 混合気体速度 (m/s)

土の微小体積要素は、多様な大きさの断面を要する曲がりくねった円管の集合体と考えることができる。ここで、直径 d の円管内における定常状態の層流の流れを考えると、流れ方向(例えば、Z方向)の平均流速は式(2)で表される。さらに、上記の多様な大きさの断面を要する曲りくねった円管の集合体を考慮するために平均断面に関する透気係数を導入すると、Darcyの式に相当する式(3)が得られる。式(3)は、多孔質内での気体のDarcy速度が空隙内の気体の圧力分布から求められることを示している。

$$v = \frac{d^2/32}{\mu} \left(-\frac{dp}{dz} + \rho g \right) \quad \dots\dots (2)$$

$$\bar{v}_s = \varepsilon \bar{v} = \frac{\kappa}{\mu} (-\nabla p + \rho \bar{g}) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、

- \bar{v}_s : Darcy速度 (m/s), ε : 土の空隙率
- μ: 混合気体粘性係数 (Pa・s), κ: 透気係数 (m²)

(2) 気体 i の質量保存式

ここでは気体 i (i = 1 空気, i = 2 水素ガス) を対象とする移流一分散および水素ガス漏出(計算領域内での漏出)を考慮した質量保存式として式(4)を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho C_i) + \nabla \cdot (\rho C_i \bar{v}_s) = \nabla \cdot (D_{ij} \nabla \rho C_i) + \rho_i Q_i \quad \dots\dots (4)$$

ただし、

- ρ_i: 気体成分 i の密度 (kg/m³)
- C_i: 気体成分 i の濃度 (wt%)
- Q_i: 気体成分 i の漏出量 (1/s)
- D_{ij}: 多孔質体内でのガス成分 i が空気成分 j 内を分散する際の Fick 則に基づく実効分散係数 (m²/s)

式(4)において、D₁₂ = D₂₁ = Dとして水素ガス(i = 2)について書き下すと式(5)となり、この式が水素ガスについての濃度変化を支配する方程式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho C_2) + \nabla \cdot (\rho C_2 \bar{v}_s) = \nabla \cdot (D \nabla \rho C_2) + \rho_2 Q_2 \quad \dots\dots (5)$$

(3) 混合気体の質量保存式

混合気体の質量保存式は、水素ガスと空気について式(4)の和をとった式(6)で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_s) = \nabla \cdot (D \nabla \rho) + \sum_i \rho_i Q_i \quad \dots\dots (6)$$

(4) 状態方程式

混合気体の物性を考慮した移動計算を行うために、土の空

隙中の気体を理想気体と仮定して、式(7)の状態方程式を導入した。これにより、混合気体物性の違いが圧力と速度の関係式(3)に反映される。

$$p = \sum_i \frac{\rho_i RT}{M_i} = \sum_i \frac{C_i \rho RT}{M_i} = \frac{\rho RT}{M} \quad \dots\dots (7)$$

ただし、

- T: 絶対温度 (K), R: 気体定数 (J/mol・K)
- M_i: 気体成分 i の分子量 (kg/mol)
- M: 混合気体の平均分子量 (kg/mol)

最終的に、式(3)と式(7)を式(6)に代入すると圧力 p に関する方程式(8)を得ることができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon M}{RT} p \right) - \nabla \cdot \left\{ \frac{\rho \kappa}{\mu} (\nabla p - \rho \bar{g}) \right\} = \nabla \cdot (D \nabla \rho) + \sum_i \rho_i Q_i \quad \dots\dots (8)$$

式(8)を解く際に、圧力 p の絶対値を扱うよりもある基準値(大気圧 p₀)からの圧力差 p' を扱った方が便利であり、式(9)を用いて式(8)を圧力差 p' の式(10)に変換し、この式(10)を差分法により解くこととした。

$$p = p' + p_0 + \rho_s (\bar{g} \cdot \bar{r}) \quad \dots\dots (9)$$

ただし、

- r: 基準点からの位置ベクトル, ρ_s: 大気密度

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon M}{RT} \frac{\partial}{\partial t} (p') + \frac{\varepsilon p}{RT} \frac{\partial}{\partial t} (M) - \nabla \cdot \left[\frac{\rho \kappa}{\mu} \{ \nabla p' - (\rho - \rho_s) \bar{g} \} \right] \\ & = \nabla \cdot (D \nabla \rho) + \sum_i \rho_i Q_i \quad \dots\dots (10) \end{aligned}$$

(5) 混合気体の粘性係数

混合気体の粘性係数は、式(11)のWilkeの式より推定した⁸⁾。

$$\mu = \sum_i \frac{\mu_i}{1 + \sum_{j \neq i} \phi_{i,j} x_i/x_j}$$

ただし、

$$\phi_{i,j} = \frac{\{ 1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4} \}^2}{2\sqrt{2(1 + M_i/M_j)^{1/2}}} \quad \dots\dots (11)$$

- x_i: 気体成分 i のモル分率 (mol/mol)
- μ_i: 気体成分 i の粘性係数 (Pa・s)

以上より、式(5)と式(11)を差分法で解くことで、水素ガス濃度および圧力の分布を求めた。

3.2.2 解析条件

シミュレーション解析の条件は、図2に示す実大規模実験の試験地盤のXY平面の10m四方の範囲に加えて、図9に示すように原地盤領域の周辺に16m加えた42m四方の領域とし、深さZ方向は4.8mまでの範囲を解析対象とした。

これは、実験では地下水位を想定し、深さ2.0mの位置に10m×10mの不透気膜を敷設したので、試験外側の原地盤領域に移動した微量の水素ガスが膜面より下側の領域にもごく僅かながら移動する可能性も考慮したためである。

境界条件は、漏出点を含むXZ断面は鏡面境界とし、∂C₂/∂Y

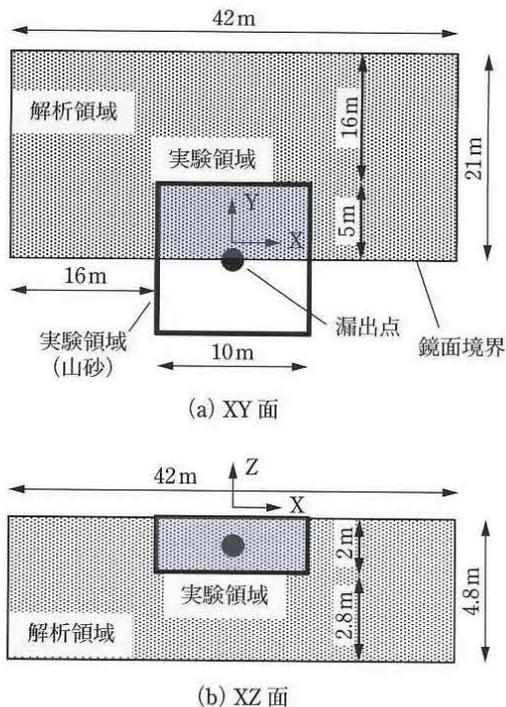


図9 解析対象領域

$= 0, \partial p' / \partial Y = 0$, その他の解析領域側面は $C_2 = 0, p' = 0$, 地表面は $\partial C_2 / \partial Z = 5.0 C_2, \partial p' / \partial Z = 0$ とし, 底面は $\partial C_2 / \partial Z = 0, \partial p' / \partial Z = 0$ とした。解析格子数は, X方向92, Y方向46, Z方向34で設定した。格子幅は, 漏出点付近で1.25~2cm, その他の格子幅は15~40cmの不等間隔格子を用いた。解析時間間隔は, 初期値1分で400時間までを500ステップで計算した。また, 解析に必要な物性パラメータは, 表2(a), (b)に示すとおりであり, 土質物性パラメータは実規模実験で得られた実測値を用いた。

なお, 透気係数は一般的な測定法⁹⁾に準じて, 地中温度と同じ条件下で円筒容器内の土壌サンプルに圧搾空気を送り, 測定した差圧と流量から算出し求めた。分散係数についても一般的な測定法^{10), 11)}に準じて, 円筒容器内の土壌サンプルに水素ガスを拡散させて, その濃度変化より算出し求めた。

表2 解析に用いた物性パラメータ

(a) 土質物性パラメータ

土層	空隙率 (VOL%)	透気係数 (m ²)	水素分散係数 (m ² /s)
アスファルト (0.0~0.05m)	7.5	3.59×10^{-12}	1.00×10^{-6}
砕石 (0.05~0.2m)	22.1	4.07×10^{-11}	6.82×10^{-6}
山砂 (0.2~0.4m)	18.3	6.19×10^{-12}	4.26×10^{-6}
山砂 (0.4~0.8m)	19.0	1.19×10^{-11}	4.42×10^{-6}
山砂 (0.8~1.4m)	22.6	1.40×10^{-11}	5.96×10^{-6}
山砂 (1.4~2.0m)	18.1	1.31×10^{-11}	3.65×10^{-6}
原地盤	18.8	3.23×10^{-11}	3.14×10^{-6}

(b) 空気と水素ガスの物性

ガス	1molあたりの重さ (kg/mol)	粘性係数 (Pa·s)
空気	28.95×10^{-3}	17.98×10^{-6}
水素	2.00×10^{-3}	8.80×10^{-6}

3.2.3 実大規模実験結果との比較に基づく数値シミュレーション手法の検証

(1) 地中内水素ガス濃度の経時変化

図10は, 図5(a)に示した試験地盤内の点(1)~(3)に相当する位置での, 解析と実験で得られた地中内水素ガス濃度の経時変化を比較したものである。

解析と実験の水素ガス濃度の経時変化を比べると, 特に漏出点直上の点(1)では解析結果の方が早い時期に定常状態に到達する結果を与えているが, 他の2点での時間的な濃度変化をよく再現できている。また, 定常状態における濃度はほぼ実験結果に相当する値となっている。

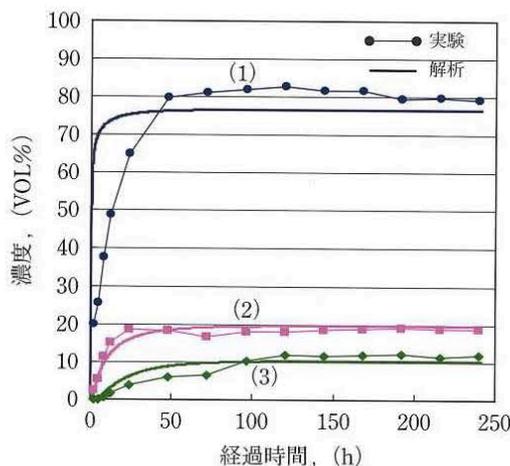


図10 地中内水素ガス濃度の経時変化の比較

(2) 地中内水素ガス濃度の分布

図11は, 漏出開始から240時間経過した定常状態の時の解析と実験による地中内水素ガス濃度の分布を比較したものである。これらを比べると, たとえば10VOL%の等値線の範囲は漏出点の側方±2mの範囲となっており, ほぼ対応した分布形状となっている。

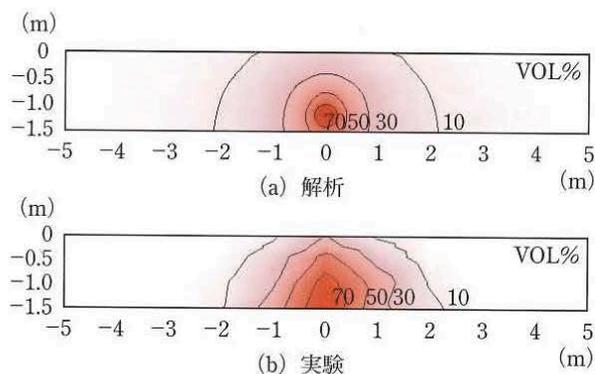


図11 解析と実験の地中内水素ガス濃度分布の比較

(240時間後)

(3) 解析で得られた水素ガス濃度と実験値の相関

図12は, 漏出開始から240時間経過した定常状態における試験地盤内の水素ガス採取地点における水素ガス濃度実測値と解析対象地盤内の対応する地点における水素ガス濃度解析値の相関を示したものである。

漏出点からの距離が遠い低濃度領域では両者の相関は比較的よいが, 漏出点近傍の高濃度領域では実験値の方が解析値より全般に大きな値となっている。この要因として, 実験フィール

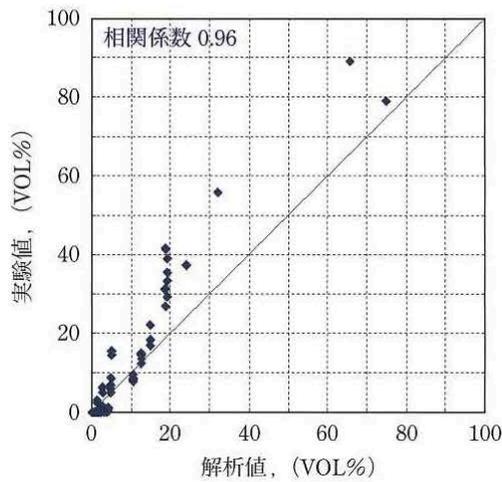


図12 解析と実験の地中内水素ガス濃度の相関 (240時間後)

ド製作時に計測しておいた試験地盤の空隙率と漏洩試験後に測定した空隙率に着目した。漏出点直上のGL-1.1m地点では、実験後は21.7VOL%であったのに対し実験前は17.0VOL%であり、4.7VOL%増加していたが、それ以外の地点ではいずれも空隙率のバラツキの範囲である±3.0VOL%に収まっていた。この原因は、漏出点直上では土中の空隙内を長時間にわたって乾燥した水素ガスが通過したことや土中の水分が水素ガスの流れで移動したことなどによるものと考えられる。

解析では実験後の空隙率を用いていることから、漏出点直上の空隙を漏出途中の計算では幾分大きめに見積っていることになり、移流一分散しやすい結果となると推定される。このため、解析では漏出点周辺の高濃度域の濃度が過小評価されることになる。ただし、この結果は漏出点直上に限られており、全体としては経時変化グラフや濃度分布に示す通りで、採用した数値シミュレーション手法は、本研究が対象とする条件下でおおむね妥当なものと考えられる。

通常、ガス導管を埋設する場合は、配管周りの埋戻し土の土質条件は行政機関によって決められており、一般的な土質試験にて含水率や空隙率や粒径他が計測されている。この実測値から、透気係数や分散係数を推定する手法は数多く提案されている^{9)~11)}。これらの入力パラメータを用いてここで採用した数値シミュレーションを行うことで、簡便に保安に資する漏出ガスの移動範囲などの目安を求めることができるようになる。

しかしながら、さらに高い供給圧力を想定する場合は、水-水素-空気の3成分2相モデル(気液2相モデル)など水の移動も考慮するのが望ましいと考えられる。

4. 付臭剤の適用調査

実大規模の水素ガスの地中漏洩実験において、都市ガスの付臭基準¹²⁾と同様に水素へ付臭剤を添加し、その拡散挙動を確認した。

付臭剤の主な要件としては、

- ・他の臭いと区別ができ、日常的には多く存在しない。
- ・他物質への吸着や溶解などが少ない。
- ・人体に害がない。

などが挙げられ、さらにクリーンな水素への添加であり環境負荷も考慮すると硫黄分を含まない付臭剤が望ましい。

無硫黄で土中の水分に溶け難く、沸点が低く気体になりやすい物質の一つにシクロヘキセンが挙げられる。近年、都市ガスの付臭剤の硫黄分削減のため添加されている物質である。本付臭剤を実大規模の漏洩実験時に水素へ都市ガスの付臭基準と同様に代表的な例として臭気強度2000倍で添加して、水素と付臭剤の拡散状況を確認する。表3に付臭剤の添加仕様を示す。

図13は、漏出開始から670時間経過した定常状態の時の図2(b)に示したAA'断面における地中内水素ガスとシクロヘキセンの濃度分布を比較したものである。

シクロヘキセンは土中でおおむね吸着や溶解することが少なく、水素ガスの拡散に追従する。また、臭気閾値濃度は0.06ppmであることから、無色・無臭の水素漏出を付臭剤の添加により、臭気によって早期に発見・検知できる可能性を確認した。ただし、実際の運用に際しては、都市ガスの付臭基準にあるパネラー試験により、添加量を決めて適用するものとする。

表3 シクロヘキセンの添加量と物性

漏出ガス	水素+シクロヘキセン	
添加量	添加量	540mg/Nm ³ *臭気強度2000倍
物性	水への溶解度 沸点 分子量 臭気閾値濃度	1% 83℃ 82 0.06ppm
		 C ₆ H ₁₂

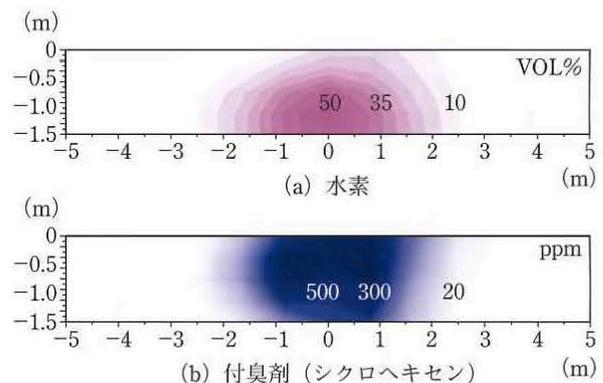


図13 水素とシクロヘキセンの拡散挙動の比較

5. おわりに

本研究では、水素ガスの埋設導管による供給を検討する上で保安上重要となる万一の漏洩時の代表的な拡散状況や、その漏れの検知の可能性について確認した。

水素ガス導管の道路埋設を想定し、都市ガスと同様の供給圧力、過去の地中における腐食や継ぎ手からの漏出条件において、得られた保安知見は、以下のように要約できる。

5.1 地中でのガスの滞留状況実測による周辺への影響範囲確認

- ・水素ガスの比重は空気より小さいため、上方へ移動しやすく、漏出開始より50時間程度で地中での水素ガスの漏出量と、大気中へ抜けていく量がバランスして、定常状態となっている。
- ・地中を移動した水素ガスの10VOL%以上の濃度域は、漏出点を中心に左右対称で側方へ±2m程度の範囲に分布していた。広範囲に拡散し、道路境界部から家屋内に流入する可能性は低いと考えられる。

- ・本研究で採用した水素ガスの地中移動に関する Darcy 則、Fick 則に基づく数値シミュレーション手法は、実大規模の水素ガスの地中漏出状況をおおむね再現できるので、妥当なものとして判断してよい。従って、適切な入力パラメータを用いてここで採用した数値シミュレーションを行うことで、簡便に保安に資する漏出ガスの移動範囲などの目安を求めることができるようになる。

5.2 地上へのガスの浮上状況実測による周辺への影響範囲確認

- ・地上に浮上した水素ガス濃度分布は、水素ガス漏出点直上を中心におおむね左右対称に広がっており、地中内濃度の分布と同様に、漏出点直上の濃度が 0.2VOL% 程度となり、漏出点から離れるほどに濃度は低くなっている。水素は比重が軽く拡散係数も大きいことから、地表面に浮上したガスは着火下限を上回るような濃度で滞留することはなく、着火・爆発に至る可能性は低いと考えられる。

5.3 漏出ガスの検知の可能性確認

- ・地上へ浮上したガスは、ガス事業法で定められた路線上の地表面におけるガス検知器を用いた定期漏洩調査により、検知できる可能性がある。
- ・付臭剤（シクロヘキセン）は水素ガスの移動に追従しており、水素ガスの漏れを検知できる可能性がある。

ただし、以上は地中に埋設物や地上に構造物などがあり拡散状況に影響がある場合や、導管の折損などによる大量漏出などの場合は、この限りではない。

これらの知見は、将来の水素ガスの埋設導管供給の保安確保の基盤となるものである。

なお、本調査・研究は「経済産業省委託事業／水素漏えい検知技術調査事業（2006～2008年度）」の一部として実施されたものを含んだものである。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：経済産業省委託事業 水素漏えい検知技術調査調査報告書、(2006-2008)
- 2) 岡本英樹、五味保城、赤木寛一：水素ガスの地中での移動特性とその検知、土木学会論文集 F, 66(1), pp.146-157, (2010)
- 3) 大阪ガスー東京ガスーフランスガス公社共同研究、(1989-1992)、日本ガス協会重比重ガス漏えい検知技術検討ワーキング、(1999-2002)、大阪ガス 地中ガス拡散挙動の調査研究、(1987-2009)
- 4) ガス事業法 ガス工作物技術基準の解釈例 第 113 条（定期漏洩調査）
- 5) D. E. Wilson, R. E. Montgomery and M. R. Sheller : A mathematical model for removing volatile subsurface hydrocarbons by miscible displacement, Water Air Soil Pollut., 33(3/4), pp.231-255, (1987)
- 6) 藤縄克之、日比義彦、藤原幸彦：多孔体中における水-疎水性液体-気体の等温多相流れに関する研究の進歩、農業土木学会論文集, No.214, pp.553-562, (2001)
- 7) T. Iwata, G. Hamaide and K. Fuchimoto : Development of Analytical Methods for the Behavior of Underground Leakage Gas from Low-Pressure Mains, Proc. International Gas Research Conference, 1, pp.1302-1311, (1992)
- 8) 化学工学協会編：化学工学便覧 改訂四版, p.51, (1978)
- 9) 安田 環：土壌の通気性測定の評価、土壌の物理性, 33, pp.43-48, (1976)
- 10) 濱田洋平、及川武久：遅滞式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定、筑波大学陸域環境研究センター報告, 7, pp.71-86, (2006)
- 11) F. R. Troeh, J. D. Jabro and D. Kirkham : Gaseous diffusion equations for porous materials, Geoderma, 27, pp.239-253, (1982)
- 12) ガス事業法 ガス工作物技術基準の解釈例 第 77 条（臭気の確認）



岡本 英樹 大阪ガス（株）(554-0051 大阪市此花区西島 5 丁目 11-61) 導管技術センター ネットワークカンパニー 導管計画部 兼 エネルギー技術研究所 技術顧問
1992 年大阪ガス（株）に入社、ガス事業を行う上で最重要課題の保安確保・向上に関する研究開発に従事。安全、流体、土工学など専門的観点から、ガスの拡散・着火爆発挙動を実大規模実験や数値シミュレーションなどで検証。施策や基準規定、保安教育などに資する技術知見を業界へ広く発信。2011 年 東京大学で博士号取得
URL : <https://www.osakagas.co.jp/>



五味 保城 東京ガス（株）(105-8527 東京都港区海岸 1-5-20) デジタルイノベーション本部 基盤技術部 知的財産室
1992 年東京ガス入社、基礎技術研究所にて化学分析、機能材料開発を担務。現在、知的財産室にて知的財産管理に従事
URL : <https://www.tokyo-gas.co.jp/>



赤木 寛一 早稲田大学 (169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室 赤木研究室) 理工学術院 教授
早稲田大学において 30 年余りにわたって土質力学、地盤工学の研究教育を行っている
URL : <http://www.f.waseda.jp/akagi/>