

水素ガスの地中での移動特性とその検知

岡本 英樹¹・五味 保城²・赤木 寛一³

¹正会員 日本ガス協会技術開発部 (現:大阪ガス(株)導管事業部) (〒554-0051 大阪市此花区西島5-11-61)
E-mail: hideki-okamoto@osakagas.co.jp

²日本ガス協会技術開発部 (現:東京ガス(株)技術開発本部) (〒230-0045 横浜市鶴見区末広町1-7-7)
E-mail: y-gomi@tokyo-gas.co.jp

³フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: akagi@waseda.jp

水素は将来の環境に良いクリーンエネルギーとして、実用化に大きな期待が寄せられている。この1つの活用形態として、埋設導管による水素ガスの燃料電池への供給構想が国内外で検討されている。これらを実現する上で、最も重要となるのが保安確保である。これには配管材料の信頼性評価だけでなく、万一の水素ガス漏出時の地中での移動範囲や速度などの移動特性に関する知見が極めて重要で、安全な設備の設計や維持管理を行う上で基盤となる。これら水素ガス供給用埋設導管の保安確保の基礎を確立するため、実大規模の水素ガスの地中漏出実験と数値解析を実施して地中における水素ガスの移動特性を確認するとともに、水素ガスの漏洩検知技術の確立を目的として各種の埋設場所・条件下での水素ガスの移動特性を調査した。

Key Words : road base, buried pipeline, partially saturated soil, hydrogen gas permeability

1. はじめに

(1) 背景および目的

化学プラントやガス業界などでは、可燃性ガスなどを輸送するための大規模な埋設配管を保有している。これら埋設配管の安全管理には、配管材料に関する長期信頼性の評価だけでなく、万一のガス漏出時の地中での移動範囲、速度などの移動特性に関する知見が極めて重要である。これらは安全な設備の設計や、維持管理を行う上での基盤となるものである。

一方、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した。

これら水素ガスの埋設導管による供給を検討する上で、重要となる保安確保に関する調査・研究のため、実大規模の水素ガスの地中漏出実験と水素ガスの地中移動に関する数値シミュレーションを実施した。

これにより地中における水素ガスの移動範囲や速度などの移動特性を解明するとともに、水素ガスの漏洩検知技術の確立を目的として種々の埋設場所、条件下での水素ガスの移動特性、特に地上への浮上特性を調査した。

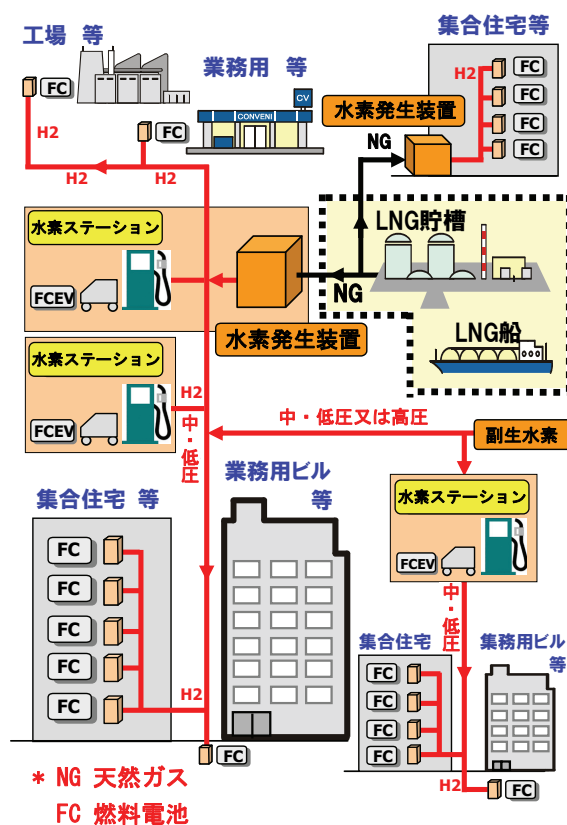


図-1 埋設導管による燃料電池への水素供給ビジネスのイメージ

(2) 既往研究の調査

「埋設配管から漏出した水素ガスの地中での移動」を解明する上で研究されていなくてはならない主な項目として、次の3つが挙げられる。すなわち、解明すべき挙動は、様々な地盤条件下で漏出箇所から地中へ放出されたガスが土粒子の間隙を3次的に広がって行く現象であることから、下記の項目の検討が必要である。

- a) 加圧下で輸送している配管の漏出箇所から100VOL%のガスが放出された場合に、ガスが地中を広がっていく主要要素と考えられる圧力差および比重差、濃度差などによる挙動が検討されていること。特に、比重について水素ガスは空気より軽く、これらについて比較検討がされていること。
- b) 土壌やガスの組成、地盤の幾何学境界条件などの影響が検討されていること。
- c) 広い範囲だけでなく、漏出点などの局所的な挙動が検討されていること。

これらが実大規模の実証実験および実証実験の結果を踏まえた数値解析手法などによって、3次的な観点から研究されていることが必須である。具体的には、地中での移動範囲や速度など周辺への影響範囲や、地表面での浮上による漏洩検知の可能性が確認されていることが必要である。

この観点から、まず「実大規模の漏出移動実験」による地中での拡散挙動の確認、およびそれらを踏まえた「解析手法の適用性の検証とケーススタディ」などに関する既往の研究例を調査することとした。ガス拡散に関する研究は、一般的に室内や屋外など大気中におけるガス拡散状況については数多く発表されているが、それに比べ地中での漏出ガスの拡散挙動について調査・研究した例は少ない。本研究に際し既存の研究成果を活用するため、「地中内の流体挙動に関する研究」について、幅広く国内外の学術情報などを調査し、それらの研究の特徴を要約整理すると、下記のとおりである。

- 1) 圧力差などを基にした不飽和、飽和状態での地下水などの流れの研究^{1),2),3),4),5)}

環境汚染や雨水浸透・浸出などを対象に気液二相、液相系の流れの挙動を確認しているが、不飽和、飽和状態での気液二相、液相系の流れの挙動の研究であり、気体を主体とした流れの挙動の研究ではない。

- 2) 温度と土壌水分量を基にした水-水蒸気の挙動の研究⁶⁾

比熱、熱伝導率、拡散係数などを温度と土壌水分量のパラメータとして水-水蒸気二相系に特化した挙動を確認しているが、温度による水と水蒸気の挙動の研究であり、圧力差および比重差、濃度差によって広がっていくガスの挙動の研究ではない。

- 3) 自然界の土壌-植生-大気の領域で CO₂, N₂ などの形成・循環の研究^{7),8)}

陸面における鉛直1次元の形成・循環の挙動を確認しているが、道路幅レベルの範囲で漏出箇所から3次的に広がっていく挙動の研究ではない。

- 4) 粒子運動を基にしたガスの拡散の研究⁹⁾

流体を衝突と並進を繰り返す多数の粒子の集合体と考え、その規則的な粒子運動(Lattice-Boltzmann法)として挙動を確認しているが、小さな領域での粒子運動によるガスの挙動の研究であり、大きな領域で漏出箇所から圧力差および比重差、濃度差によって広がっていく挙動の研究ではない。

- 5) 濃度差を基にしたガスの拡散の研究^{10),11),12),13)}

濃度差による分子拡散を主体としたガスの挙動の研究であり、圧力差および比重差、濃度差を総合的に考慮した挙動の研究ではない。

- 6) 濃度差、圧力差や比重差などを基にしたガスの移動の研究^{14),15),16),17),18),19),20),21),22),23),24),25)}

Darcy 則を用いた移流-分散によるガス移動の研究であるが、理論的な検討が主で、圧力差および比重差、濃度差のすべてを考慮に入れ、更に地盤条件や漏出点の状況も考慮した実大規模レベルの実証実験と解析は、都市ガスなど一部で行われているが、水素ガスでは行われていない。

以上に示すように、地中での水および溶解物質の移動について農学や土木工学分野で検討が行われている。また、近年ではガスについても核廃棄物容器の腐食に伴って発生する水素の粘土層内での挙動、土壌汚染など環境地盤工学の分野で注目され、調査・研究されている。しかしながら、環境に優しいエネルギーとして実用化が期待される水素ガスの埋設配管からの漏出を想定し、地下1~2m から加圧下で100VOL%のガスが圧力差および比重差、濃度差などで移動する挙動を実大規模レベルの実験、また数値シミュレーションによって地中濃度分布、地上への浮上による地表面濃度分布を確認した例は少ない。

(3) 研究の方針

都市ガスなどの埋設管の維持管理など保安確保における主要な方法の一つに、法律で義務付けられている定期漏洩調査(ガス事業法ガス工作物技術基準の解釈例113条)があげられる。これは埋設後40月に1回以上路線上を約5m間隔で深さ約50cmのボーリングもしくは地表面でガス検知器を用いて漏洩調査を行うものであり、万一の導管からの漏れの発見には、漏出ガスの地上への浮上がポイントとなる。漏出ガスが地上へ浮上し難い場合は漏れの発見が難しく、土中でガスの漏出および移動

が継続するため危険な状態となる可能性がある。

この都市ガスの知見を参考に代表的な埋設条件にて実大規模の水素ガスの地中漏出実験により、

- a) 地中での移動範囲や速度の実測による周辺への影響範囲の確認
- b) 地表面での浮上ガス濃度の実測による漏洩検知の可能性確認

を行うこととした。

保安検証にはさまざまな埋設条件でのガスの移動や浮上の状況の確認が必要となるが、想定されるすべての条件で実験を行うことは現実的でない。これらについては、数値シミュレーションを用いて確認することとした。

地中でのガス移動の数値解析による再現を考えた場合には、加圧下で空気より軽い 100 VOL%のガスが地中へ放出されることから、圧力差および比重差、濃度差などのガス移動要素のすべてが考慮されていることが必要である。このことから、先に述べた 6)Darcy 則を用いた移流一分散による解析手法が理論的に適していると考えられる。

以上のことから、本研究では、将来のエネルギーとして期待される水素ガスの埋設配管からの漏出を想定し、地下 1~2m から都市ガスの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、地中移動

や地上への浮上に関して実大規模の実験にて確認する。その結果を踏まえて、数値シミュレーション結果を 3 次元的な観点から検証する。更に、その結果を踏まえ、各種の埋設条件下での水素ガスの地中における移動や地上への浮上特性を数値シミュレーションにより調査する。これらは、水素の埋設導管による供給の保安確保の基盤となるものである。

2. 実大規模実験による漏出水素ガスの地中移動特性の調査

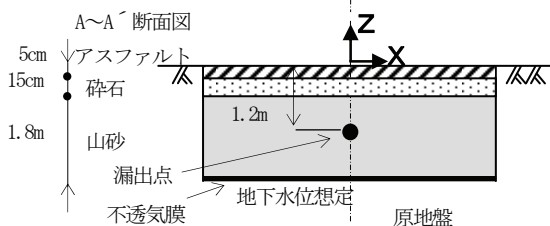
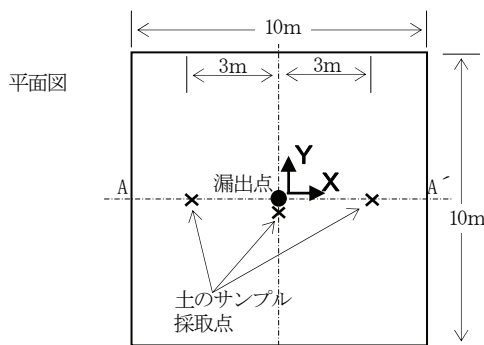
(1) 実験概要

水素ガス導管の道路埋設を想定し、実大規模の実験フィールドを製作した。図-2 に示すよ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 に示すようなものを採用した。

水素ガスは、図-3 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、後述の不透気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多孔質セラミック製の球体を取り付けて漏出点とした。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。

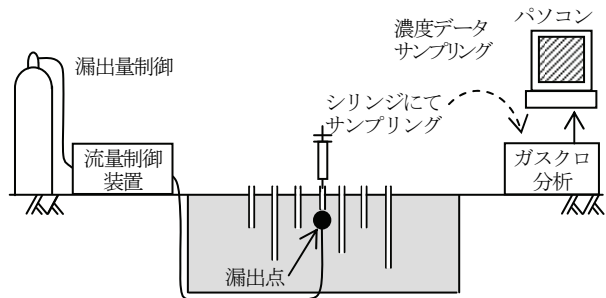


(a) 実験フィールドの外観および内部



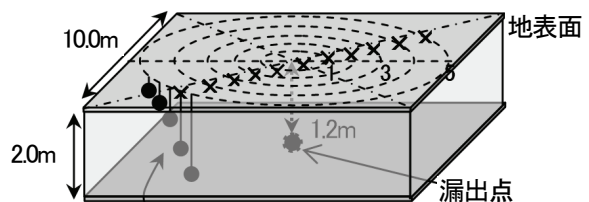
(b) 平面および断面図

図-2 実験フィールドと試験地盤構成



(a) 濃度計測の概況

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



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

図-3 地中内水素ガス濃度の計測

試験地盤は、通常の道路工事を想定して導管埋め戻しに一般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 30cm 毎の埋め戻し転圧を行い、路盤には 15cm 厚さの碎石(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、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°C)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、締め固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 に合わせて示されている。

地中内の水素濃度は、図-3 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ー(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ー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ー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。

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
	碎石	22.1 ± 1.0	1.94 ± 0.01
	山砂	19.5 ± 3.0	1.91 ± 0.09
*アスファルトは 乾燥密度	山砂	19.5 ± 3.0	1.91 ± 0.09
	原地盤	18.8 ± 3.0	1.92 ± 0.15

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 0.008 VOL%)を用い、都市ガス検知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。

(2) 実験結果

a) 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。

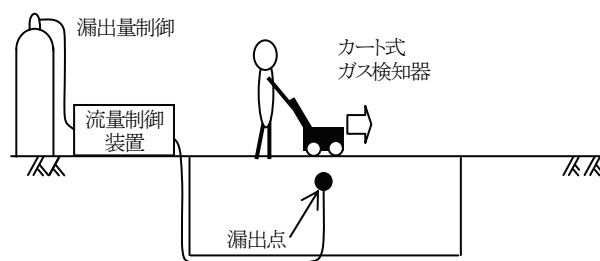
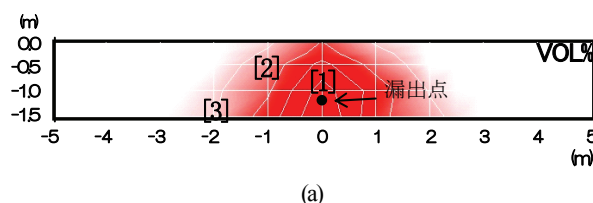
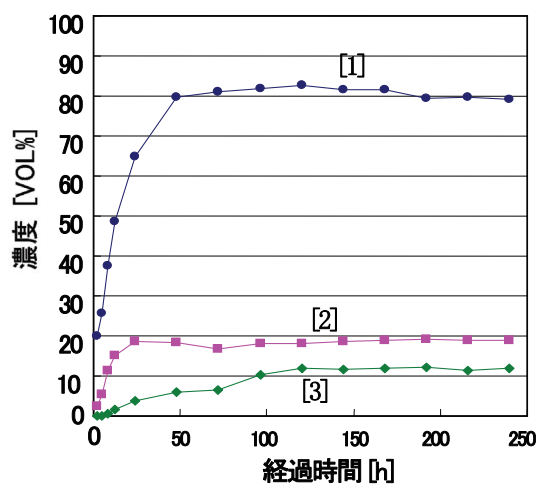


図-4 地表面水素ガス濃度の計測



(a)



(b)

図-5 地中内水素ガス濃度の経時変化

b) 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て、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方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 10 VOL%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。

c) 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概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 0.2 VOL%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 0.008 VOL%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、前述の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、水素ガスの浮上を確認できることを示している。

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、移動範囲や地上への浮上状況などを確認した。

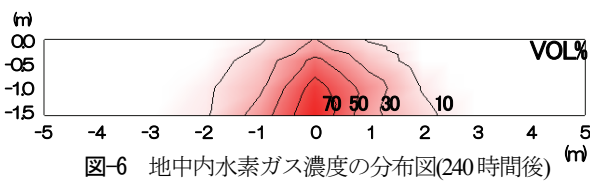


図-6 地中内水素ガス濃度の分布図(240時間後)

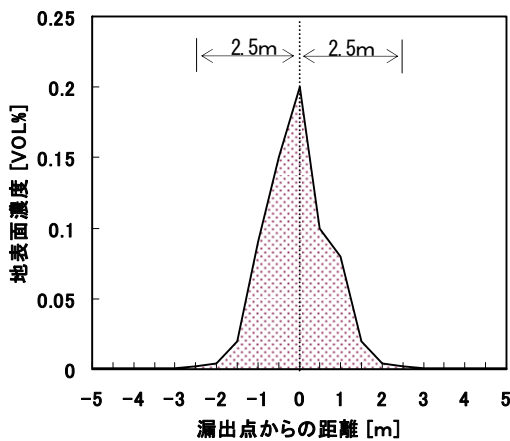


図-7 地表面水素ガス濃度の分布図(240時間後)

3. 水素ガスの地中移動特性に関する数値シミュレーション

(1) 基本方程式

先に述べた Darcy 則と Fick 則に基づく解析手法は、土を多孔質体として、その空隙でのガスの移流-分散問題を対象としているので、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。但し、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。

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。更に、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 毎の埋め戻し転圧を行っているため、土は十分締め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。

a) 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。

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

但し、

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

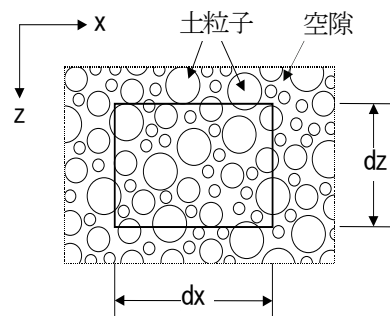


図-8 土中に設定した微小体積要素

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(たとえば、 Z 方向)の平均流速は式(2)で表される。更に、上記の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。

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

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

但し、

\vec{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]

b) 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。

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

但し、

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、 $D_{12}=D_{21}=D$ 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。

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

c) 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。

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

d) 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。

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

但し、

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。

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

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 p_0)からの圧力差 p' を扱った方が便利であるため、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。

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

但し、

r : 基準点からの位置ベクトル, ρ_s : 大気密度

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

e) 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²⁶⁾。

$$\mu = \sum_i \frac{\mu_i}{1 + \sum_{j \neq i} \phi_{i,j} x_i / x_j} \quad (11)$$

但し、

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

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。

(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、 $\partial C_2 / \partial Y = 0$, $\partial p' / \partial Y = 0$, 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²⁷⁾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^{28), 29)}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.

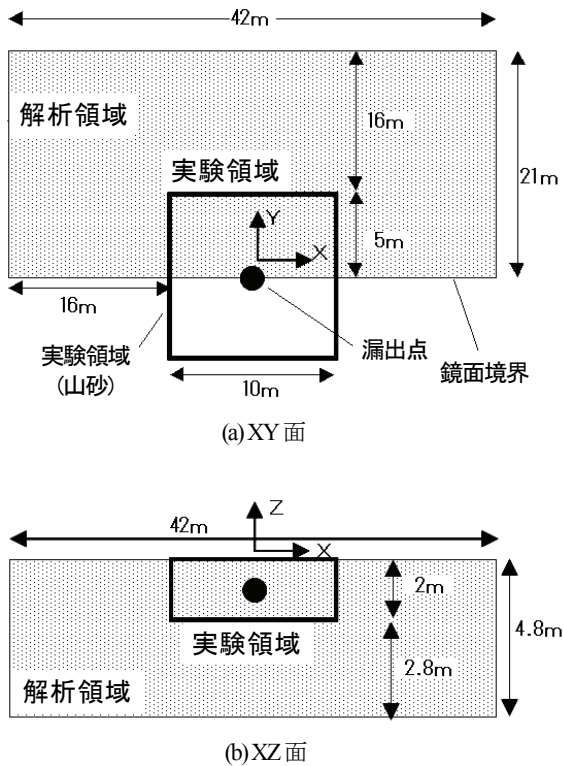


図-9 解析対象領域

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	2.90×10^{-4}	1.80×10^{-7}
水素	2.00×10^{-3}	8.80×10^{-6}

(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

a) 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.

b) 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.

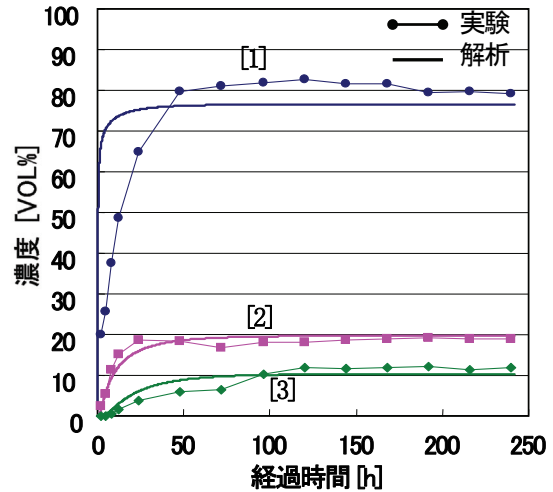


図-10 地中内水素ガス濃度の経時変化の比較

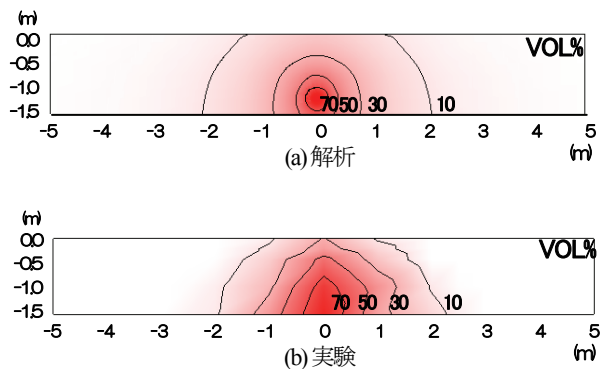


図-11 解析と実験の地中内水素ガス濃度分布の比較 (240時間後)

c) 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 21.7 VOL%であったのに対し実験前は 17.0 VOL%であり、4.7 VOL%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±3.0 VOL%におさまっていた。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-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。但し、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概ね妥当なものと判断してよい。

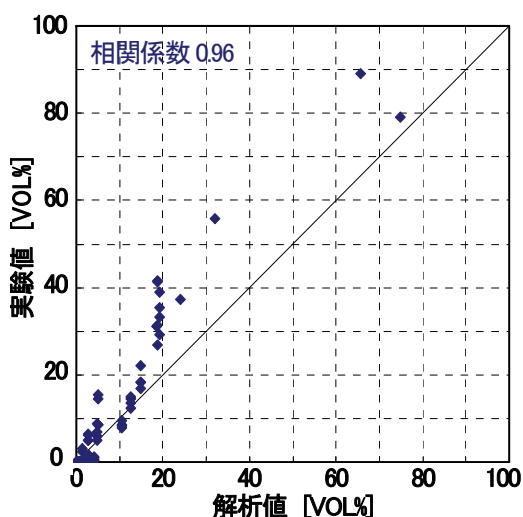


図-12 解析と実験の地中内水素ガス濃度の相関(240時間後)

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^{27), 28), 29)}。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、更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. 種々の導管埋設条件下での水素ガスの地中移動特性とその地上での検知

(1) ケーススタディ条件

都市ガス導管の埋設実績に関する知見を参考に表-3 に示すような代表的な導管埋設条件を想定して、水素ガスの地中移動状況を前節でその妥当性を確認した数値シミュレーション手法を利用した解析により調査した。

なお、●印は標準ケースに対して変更したパラメータであり、網掛け部分の条件は全国ガス事業者の調査結果(「(社)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年)」)をもとに、現実的にガス漏出に関して厳しいと想定される埋設導管条件を設定した。また、土質物性パラメータは過去の実測値より設定した。

表-3 代表的埋設条件下でのケーススタディ

各種パラメータ	標準	ケーススタディ			
		[1]	[2]	[3]	[4]
表層					
舗装					
路盤(碎石)					
表層	アスファルト透過性: 標準表-2	○	○	○	○
	アスファルト透過性: 小 空隙5.0% *透気係数 $1.95 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ *拡散係数 $4.92 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	○	●		
路盤	碎石厚さ: 標準 15cm	○	○	○	○
	碎石厚さ: 大 40cm			●	
路床	山砂透過性: 標準表-2	○	○	○	○
	山砂透過性: 小 空隙9.4% *透気係数 $7.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ *拡散係数 $1.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	○			●
地下水	標準: 2m	○	○	○	○
	深い: 10m				●

(2) 解析結果

図-13 から図-16 は、4 種類のケーススタディにより得られた、漏洩 240 時間後の定常状態に到達した時の水素ガス濃度の分布を示したものである。

図-13 のケース[1]では、アスファルト舗装のガス透過性が小さいので地上からの水素ガス拡散が抑制されて、漏洩点から±2.5m 程度の地中の比較的広い範囲に 10 VOL%以上の等値線が分布している。

図-14 のケース[2]では、碎石路盤が厚く地上への水素ガス拡散が容易なので、地中での水素ガス濃度等値線は図-11 に示す標準ケースよりやや漏洩点近傍に集中している。

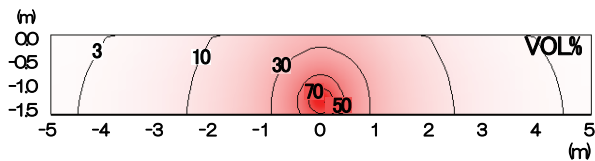


図-13 ケース[1] (表層：アスファルト透過性：小)

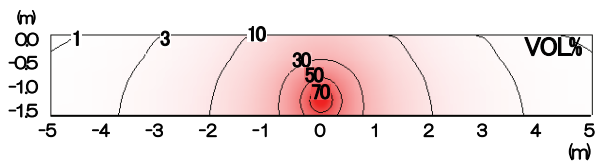


図-14 ケース[2] (路盤：碎石厚さ：大)

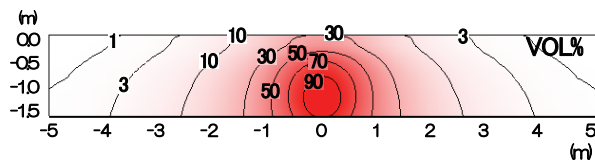


図-15 ケース[3] (路床：山砂透過性：小)

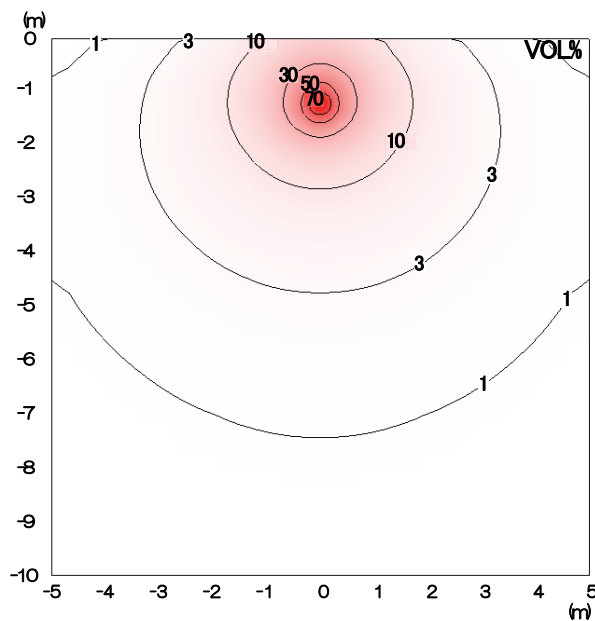


図-16 ケース[4] (地下水位深度：大)

また、図-15 のケース[3]では、路床部分の山砂のガス透過性が小さいので漏洩点近傍に等値線が集中する結果となっている。

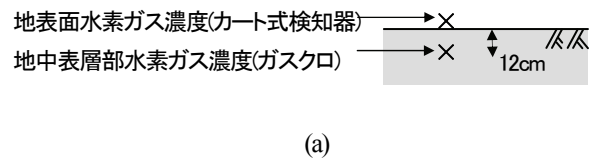
図-16 のケース[4]では、不透気面である地下水位深度が大きいため水素ガスは地中深い部分まで移動し、地上に水素ガスが浮上しにくい状況となっている。

以上の結果より、ケース[4]の地下水位が深い場合が水素ガス漏洩時に地上に浮上しにくい状況になることが理解される。

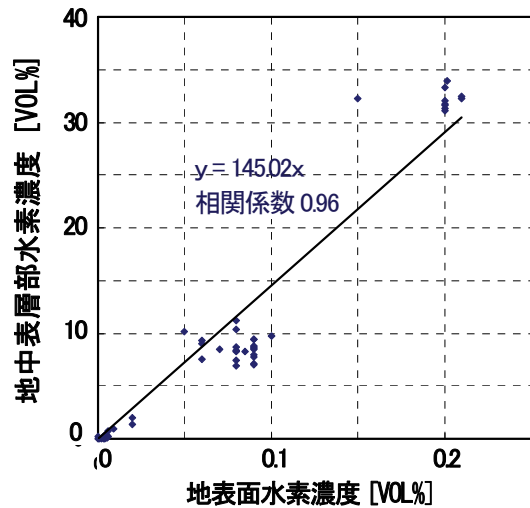
(3) 漏出水素ガスの地上での検知

都市ガスなどの埋設導管の保安確保のための定期漏洩調査は、前述のように地上でガス検知器を用いて行われる。

そこで、図-17 に示すように、2で述べた実大規模実験で得られた結果をもとに、地表面で測定された水素ガス濃度とその直下 12cm 位置での地中表層部水素ガスの濃度の漏洩開始後のべ 5 日分をプロットし、その相関式を求めた。この式を用いて、図-16 の地下水位が深い場合の地表表層部濃度の解析結果に対応する地表面で検出される水素ガス濃度を推定した結果をまとめたものが表-4 である。



(a)



(b)

図-17 地表面水素ガス濃度と地中表層部水素ガス濃度の相関

この表-4 からわかるように、漏洩点からの水平距離が 3m の点においても地表面の水素ガス濃度は 0.012 VOL%と推定される。一方、カート式検知器の水素ガス濃度の検知限界は 0.008 VOL%なので、万一水素ガス漏洩した場合にも、都市ガスと同様の定期漏洩調査で水素ガスの漏洩を検知できると言える。

5. まとめ

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重要となる保安確保に関する調査・研究を目的として、実大規模の水素ガスの地中漏洩実験と水素ガスの地中移動に関する数値シミュレーションを実施した。

本研究で得られた成果は、以下のように要約できる。

(1) 地中での移動範囲や速度の実測による周辺への影響範囲の確認

1)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、漏洩開始より 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。

2)地中を移動した水素ガスの 10 VOL%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。

3)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洩状況を概ね再現できるので、妥当なものと判断してよい。したがって、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。

(2) 地表面での浮上ガス濃度の実測による漏洩検知の可能性確認

1)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概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 0.2 VOL%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。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により、水素ガスの浮上を確認できることを示している。

2)数値シミュレーション結果から、都市ガスの知見より想定される水素ガスの地上への浮上が生じにくい条件下でも、漏洩点からの水平距離が 3m の点において地表面の水素ガス濃度は 0.012 VOL%と推定される。

一方、カート式検知器の水素ガス濃度の検知限界は 0.008 VOL%なので、万一水素ガス漏洩した場合にも、都市ガスと同様の定期漏洩調査法で水素ガスの漏洩を検知できると言える。

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。

謝辞：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である。これらを行うにあたり、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(社)日本ガス協会特別専門委員会でご指導頂いた経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課、横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター、田村昌三教授(委員長)を始めとする委員会メンバーおよびワーキングメンバーに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 黄錫鎬, 大岡龍三, 関根賢太郎, 池内 研: 場所打ちを用いた地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(その 5) 揚水実験による土壌物性値の把握, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1659-1662, 2004.
- 2) 齋藤雅彦, 川谷健: 間隙内空気の運動を考慮した数値シミュレーションによる雨水浸透・浸出過程に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.865-872, 2003.
- 3) 日比義彦: 土壌の気相中における多成分の物質移動の支配方程式の誘導, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.4, pp.1035-1040, 2007.
- 4) Ewing, R. E., Wang, J. and Weekes, S. L.: On the simulation of multicomponent gas flow in porous media, *Applied Numerical Mathematics*, Vol.31, pp.405-427, 1999.
- 5) Faust, C. R.: Transport of immiscible fluids within and below the unsaturated zone : A numerical model, *Water Resources Research*, Vol.21, No.4, pp.587-596, 1985.
- 6) dos Santos, G. H. and Mendes, N.: The Solum Program for Predicting Temperature Profiles in Soils: Mathematical Models and Boundary Conditions Analyses, *Proc. Eighth International IBPSA Conference*, pp.1171-1176, 2003.
- 7) 永井晴康: Atmosphere-Soil-Vegetation Model Including CO₂ Exchange Processes: SOLVEG2, 日本原子力研究所報告書 JAERI-DATA/Code 2004-014, pp.1-92 (1 冊), 2004.

表-4 漏洩検知が厳しいケースの地表面水素検出濃度の推定

漏出点からの 水平距離 [m]	地中表層部濃度 (解析値) [VOL%]	地表面水素検出濃度 (推測値) [VOL%]
0.0	16.5	0.114
1.0	10.1	0.070
2.0	4.0	0.028
2.5	2.8	0.019
3.0	1.8	0.012
4.0	1.0	0.007
5.0	0.5	0.003

- 8) 熊谷朝臣：森林土壌中における CO₂ ガス環境形成過程—数理モデルを用いた検討，日本林学会誌，Vol.80, No.3, pp.214-222, 1998.
- 9) Weerts, A. H., Kandhai, D., Bouten, W. and Sloop, P. M. A.: Tortuosity of an Unsaturated Sandy Soil Estimated using Gas Diffusion and Bulk Soil Electrical Conductivity: Comparing Analogy-based Models and Lattice-Boltzmann Simulations, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.65, No.6, pp.1577-1584, 2001.
- 10) Jin, Y. and Jury, W. A.: Characterizing the Dependence of Gas Diffusion Coefficient on Soil Properties, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.60, No.1, pp.66-71, 1996.
- 11) Arah, J. R. M. and Ball, B. C.: A functional model of soil porosity used to interpret measurements of gas diffusion, *Eur. J. Soil Sci.*, Vol.45, No.2, pp.135-144, 1994.
- 12) 遅沢省子，久保田徹：土壌のガス拡散係数の測定法，日本土壌肥料学雑誌，Vol.58, No.5, pp.528-535, 1987.
- 13) 江種伸之，神野健二，鷺見栄一：ガス拡散を考慮した有機塩素化合物の不飽和—飽和領域における輸送特性解析，土木学会論文集，No.503/II-29, pp.167-176, 1994.
- 14) Senger, R., Xu, T., Marschall, P. and Finsterle, S.: Modeling approaches of two-phase flow phenomena associated with corrosion of SF/HLW canisters in a proposed repository in Opalinus Clay, Switzerland, *International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Lille, pp.59-60, 2007.
- 15) Wilson, D. E., Montgomery, R. E. and Sheller, M. R.: A mathematical model for removing volatile subsurface hydrocarbons by miscible displacement, *Water Air Soil Pollut.*, Vol.33, No.3/4, pp.231-255, 1987.
- 16) 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.
- 17) 赤塚広隆，松田正：地中に漏洩したガスの拡散（その1～4）研究ノート，高圧ガス保安協会誌 高圧ガス，Vol.25, No.2, pp.46-54, No.3, pp.52-67, No.4, pp.44-52, No.5, pp.44-51, 1988.
- 18) Iwata, T., Hamaide, G. and Fuchimoto, K.: Development of Analytical Methods for the Behavior of Underground Leakage Gas from Low-Pressure Mains, *Proc. International Gas Research Conference*, Vol.1, pp.1302-1311, 1992.
- 19) 大阪ガス(株)-東京ガス(株)-フランスガス公社共同研究，1989～1992. (社)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(株) 地中ガス拡散挙動の調査研究，1987～2009.
- 20) 小林健一郎，R. Hinkelmann, R. Helmig, 寶馨，玉井信行：2相モデルおよび2相・3成分モデルによる地下帯水層メタン輸送数値実験，土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp.122-133, 2007.
- 21) Slough, K. J., Sudicky, E. A. and Forsyth, P. A.: Numerical simulation of multiphase flow and phase partitioning in discretely fractured geologic media, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.40, pp.107-136, 1999.
- 22) Cheng, P. and Wang, C. Y.: A multiphase mixture model for multiphase, multicomponent transport in capillary porous media-II. Numerical simulation of the transport of organic compounds in the subsurface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No.17, pp.3619-3632, 1996.
- 23) Abriola, L. M. and Pinder, G. F.: A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds 1. Equation development, *Water Resources Research*, Vol.21, No.1, pp.11-18, 1985.
- 24) Falta, R. W., Pruess, K., Javandel, I. and Witherspoon, P. A.: Numerical modeling of steam injection for the removal of nonaqueous phase liquids from the subsurface 1. Numerical formulation, *Water Resources Research*, Vol.28, No.2, pp.433-449, 1992.
- 25) Sleep, B. E. and Sykes, J. F.: Compositional simulation of groundwater contamination by organic compounds 1. Model development and verification, *Water Resources Research*, Vol.29, No.6, pp.1697-1708, 1993.
- 26) 化学工学協会編：化学工学便覧 改訂四版，p.51, 1978.
- 27) 安田環：土壌の通気性測定の評価，土壌の物理性，Vol.33, pp.43-48, 1976.
- 28) 濱田洋平，及川武久：遅沢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，Vol.7, pp.71-86, 2006.
- 29) Troeh, F. R., Jabro, J. D. and Kirkham, D.: Gaseous diffusion equations for porous materials, *Geoderma*, Vol.27, pp.239-253, 1982.

(2009.2.2 受付)

MOVEMENT CHARACTERISTICS OF HYDROGEN GAS WITHIN COMPACTED SOIL AND ITS DETECTION

Hideki OKAMOTO, Yasuhiro GOMI and Hirokazu AKAGI

A hydrogen gas is expected to be a clean, environmentally-friendly future energy source. In order to supply a hydrogen gas with a fuel cell station, the employment of buried pipeline is being studied in Japan and foreign countries. To implement this idea, the most important thing is to ensure the safety against the hydrogen gas leakage from the buried pipeline. Specifically, the understanding of a hydrogen gas movement characteristics within the compacted soil is extremely important as well as the reliability assessment of pipeline materials. Aiming to establish a safety basis for buried hydrogen gas pipeline system, the full-scale experiment on underground hydrogen gas leakage and the numerical simulation were carried out. The movement characteristics of a hydrogen gas within the soil was investigated and the leaked hydrogen gas was detected at the road surface by the portable gas detector, following the procedure specified by the legal requirement.