# 気液二相流解析による岩盤空洞周辺の ガス移行挙動評価

石中 亮1\*・安原 英明1・木下 尚樹1・下茂道人2

<sup>1</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
 <sup>2</sup>(公財)深田地質研究所(〒113-0021東京都文京区本駒込2丁目13番12号)
 \*E-mail: ryo.ishinaka.11@cee.ehime-u.ac.jp

本研究では、石油・天然ガス備蓄の貯蔵方法の一つである水封式地下岩盤貯槽方式に関して、水封機能 の有無が岩盤内のガス移行挙動に及ぼす影響を数値解析によって評価した.数値解析では気液二相流解析 を実施し、境界条件として水封機能有無の他に絶対浸透率、相対浸透率、備蓄施設の岩盤タンク内圧条件 を変化させ解析を実施した.これにより、初期・境界条件、物性パラメータの違いがガス移行挙動に及ぼ す影響について定量的に評価した.その結果、水封機能が停止している条件では、絶対浸透率、相対浸透 率、タンク内圧条件の違いにより、岩盤内のガス移行挙動は大きく変化することが確認された.

Key Words : water seal, two-phase flow, gas leakage

# 1. 緒言

現在,我が国では石油や液化石油ガス(LPG: Liquefied Petroleum Gas)を地下に貯蔵している. 貯蔵方式は様々あ るが, 主に水封式地下岩盤貯槽方式を採用している. こ の方式を採用している地下備蓄施設は岩手県久慈市の久 慈基地, 岡山県倉敷市の倉敷基地, 愛媛県今治市の菊間 基地、同じく今治市の波方基地、鹿児島県いちき串木野 市の串木野基地の合計5か所ある. その中で石油を備蓄 しているが久慈基地, 菊間基地, 串木野基地であり, LPGを貯蔵しているのが倉敷基地と波方基地である. 岩 盤タンク周辺の岩盤は、串木野基地が安山岩、それ以外 の基地は花崗岩である<sup>1)~3</sup>,地下環境下では、地上に比 べ耐震性に優れており、台風や雷など気象災害を受ける 恐れが少なく、安全性に優れている. さらに、地下に貯 蔵することによって地上の景観を損なわない<sup>4</sup>. そして、 岩盤タンクは透水性の低い緻密な岩盤を選定して設置さ れるので地下水位の変化量が少ないという利点を有する 5)

我が国の地下備蓄施設ではガス漏気を防ぐために地下 水を利用した水封システムと底水排水処理システムを採 用している.水封システムとは、地下水圧によってガス の上昇を防ぐもので、地下水のみで水封を行う方法を自 然水封方式、地下水だけでなく人工的に供給する方法を 人工水封方式という<sup>6</sup>.また、底水排水システムとは岩 盤タンク内に侵入した地下水を排水することによって水 位を一定に保つものであり、これによって岩盤タンクの 内圧上昇を防いでいる.仮に、何らかの外的要因により、 これらバリアシステムが機能停止すると、鉛直下方向へ の地下水の流れがなくなるため、岩盤タンクの内圧が上 昇しガスの漏気につながる.従って、水封の有無がガス 漏気に与える影響について精査し、ガス漏気量の定量的 評価や、ガス漏気の外的要因について詳細に検討する必 要がある.

そこで本研究では、数値解析によって、水封の有無や 絶対浸透率、岩盤の相対浸透率、岩盤タンク内圧条件が ガス漏気挙動の変化に及ぼす影響を定量的に評価すると ともに、ガス漏気メカニズムの検討を行う.数値解析で は水、空気の二相流によって地下水、石油や LPG の気 化ガスを再現し、岩盤タンクを1次元モデルで模擬する. そして、初期条件、境界条件、解析時間などを設定し解 析を実行することでガス漏気の素因・誘因についても検 討する.

## 2. 解析概要

## (1) 解析概要

本研究の数値解析は有限差分法数値モデルシミュレー タの TOUGH2<sup>7</sup>を組み込んだ PetraSim<sup>8</sup>を用いた.これに より多次元の多孔質・亀裂媒体における多層流流れを記 述することができる.地下の岩盤タンクおよび岩盤タン ク上部から地表面までの領域を1次元モデルで表現する ことで、岩盤タンクから漏気するガスの挙動を推定する ことができる.実際の地下備蓄施設では石油の一部が気 化ガスとして存在しており、本研究ではその気化ガスの 漏気メカニズムについて精査する.なお解析では、現象 を単純化するため、石油の気化ガスを空気に、人工的に 供給した水と地下水を水と模擬し、空気と水による気液 二相流解析を実施する.

# (2) 解析モデル

気液二相流解析の支配方程式は質量保存則であり、任意の体積  $V_n$  と表面積 $\Gamma_n$ における境界で表現されており、以下の式で表される<sup>7</sup>.

$$\frac{d}{dt}\int_{V_n} M^{\kappa} dV_n = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^{\kappa} \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma_n + \int_{V_n} q^{\kappa} dV_n \qquad (1)$$

ここで、 $\kappa$ :空気や水などの構成物質、 $M^{\kappa}$ :構成物質  $\kappa$ の質量 [kg/m<sup>3</sup>]、F:流束 [kg/m<sup>2</sup>·s]、n:体積表面から 外部に向かうベクトル、 $q^{\kappa}$ :体積内の構成物質  $\kappa$ の発 生・消失量 [kg/m<sup>3</sup>·s]である.また式(1)の $M^{\kappa}$ は、以下の 式で表される.

$$M^{\kappa} = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}$$
<sup>(2)</sup>

ここで, $\beta$ :液相および気相,S:水飽和度 [-], $\rho$ :密度 [kg/m<sup>3</sup>],X:質量比 [-], $\phi$ :間隙率 [-]である.また,式(1)の質量流束項の $\mathbf{F}^*$ は次式で表される.

$$\mathbf{F}^{\kappa} = \sum_{\beta} X^{\kappa}_{\beta} \mathbf{F}_{\beta} \tag{3}$$

次に、相ごとの流れは圧力や重力を考慮している Darcy則を拡張した次式で表される.

$$\mathbf{F}_{\beta} = \rho_{\beta} \, \mathbf{u}_{\beta} = -k \, \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \big( \nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \, \mathbf{g} \big) \tag{4}$$

ここで、 $\mathbf{u}_{\beta}$ :  $\beta$ 相におけるダルシー流速 [m/s], k:絶対 浸透率 [m<sup>2</sup>],  $k_{\beta}$ :  $\beta$ 相における相対浸透率 [-],  $\mu_{\beta}$ :粘性 係数 [Pa·s],  $\mathbf{P}_{\beta}$ :  $\beta$ 相の圧力 [Pa], g:重力加速度 [m/s<sup>2</sup>] である.絶対浸透率 k は飽和透水係数から求めており, 以下で示される.

$$k = \frac{\eta_w}{\rho_w g} k_{ws} \tag{5}$$

ここで、 $\eta_{w}$ :水の粘性係数 ( $1.0 \times 10^{3}$ [Pa·s]),  $k_{ws}$ :飽 和透水係数 [m/s] である.液相 (liquid) と気相 (gaseous)の圧力の相互関係はサクション圧  $P_{cap}$  ( $\leq 0$ ) を介して以下の関係で表される.

$$P_l = P_g + P_{cap} \tag{6}$$

次に, 液相と気相の相対浸透率については, van Genuchten model<sup>10</sup>と Linear Function を使用する. van Genuchten model に関しては, 下記に液相, 気相ごとの式 を表す.

液相

$$k_{rl} = \sqrt{S_a} \left\{ 1 - \left[ S_a \right]^{\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right\}^2 \tag{7}$$

気相

$$k_{rg} = (1 - S_b)^2 (1 - S_b^2)$$
(8)

$$S_a = \frac{\left(S_l - S_{lr}\right)}{\left(S_{ls} - S_{lr}\right)} \tag{9}$$

$$S_{b} = \frac{(S_{l} - S_{lr})}{(1 - S_{lr} - S_{gr})}$$
(10)

ここで,  $K_{n}$ :液相の相対浸透率 [-],  $K_{ng}$ :気相の相対浸 透率 [-],  $\lambda$ :間隙率パラメータ [-],  $S_{l}$ :水飽和度 [-],  $S_{k}$ :残留水飽和度 [-],  $S_{k}$ :最大水飽和度 [-],  $S_{gg}$ :残留ガ ス飽和度 [-]である.水飽和度が高いほど液相の相対浸 透率が高くなり,水飽和度が低いほど気相の相対浸透率 が高くなる.

次に,水飽和度とサクションの関係を表す水分特性曲 線モデルは以下で定義した.

$$P_{cap} = -P_0 \left( \left[ S_a \right]^{-1}_{\overline{\lambda}} - 1 \right)^{1-\overline{\lambda}}$$
(11)

ここで、 $P_{ap}$ : 毛細管圧 [Pa]、 $P_0$ : 基準圧力 [Pa]である. 飽和領域では水飽和度 100 %と設定しているので毛細管 圧は作用せず、不飽和領域では水飽和度は 1 %と設定し ているので毛細管圧が 18 kPa かかっていることになる.

次に、水に対する空気の溶解度を表すヘンリーの法則 は次式で表される.

$$P_{NCG} = K_h x_{aq}^{NCG} \tag{12}$$

ここで,  $P_{NCG}$ : 非凝結気体圧力 [kPa],  $K_h$ : 平衡定数 [-],  $X_{aq}^{NCG}$ : 液相における非凝結気体のモル分率 [-]である. 本研究では, 平衡定数は  $K_h$ =10<sup>10</sup> Paを採用する.

## (3) 解析条件

本研究で実施した解析の境界条件,解析条件を表-1, 表-2に示す.今回与えた境界条件は水封機能の有無,絶 対浸透率,岩盤タンク内圧の3つである.絶対浸透率は 健岩を模擬した場合,40×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>とし,亀裂を有する岩 を模擬した場合,40×10<sup>11</sup> m<sup>2</sup>に設定する.ここで,絶対 浸透率とは固有透過係数のことで流体の通りやすさを示 している.この値を設定したのは,地下備蓄施設の岩盤 周辺の岩が主に花崗岩であり,花崗岩が健全な時を 4.0×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>と設定し,亀裂部は健岩部との差を与えるた めに4.0×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>と設定した.岩盤タンク内圧については, ガス内圧として105.3,141.3,401.3 kPaの空気圧を与える. 地表面では,大気圧条件で101.3 kPaを与えるため,地表 面と岩盤タンクの差圧として4,40,300 kPaを設定する ことになる.4 kPaは実際の地下備蓄施設の岩盤タンク における平常時の内圧

を想定し、40 kPaは外的要因により底水排水システムが 停止し、水封ポンプが機能していない状況を模擬する.



図-1 岩盤タンク概念図と解析モデル

	<b>表-</b>   境界条件	
シナリオ	水封あり	水封なし
絶対浸透率 [m <sup>2</sup> ]	4.0 × 10 <sup>-15</sup> 4.0 × 10 <sup>-11</sup>	4.0 × 10 <sup>-15</sup> 4.0 × 10 <sup>-11</sup>
ガス差圧 ∆P [kPa]	4, 40	4, 40

≢1 应用久供

表-2 解析条件

パラメータ	值
密度 [kg/m³]	2600
間隙率 [-]	0.05
比熱 [J/kg·s]	1000
湿熱伝導率 [W/m·c]	2.0
気温 [°C]	25
解析期間[年]	100

# 3. 解析結果

# (1) 解析結果(水封機能あり)

水封が機能する条件の解析結果を示す. 亀裂部を模 擬した絶対浸透率4.0×10<sup>11</sup> m<sup>2</sup>で,岩盤タンク内圧を40 kPaと設定して解析を実施した時の岩盤タンクの空洞か ら飽和領域までのガス飽和度の経時変化を示す(図-2). 図より,ガス飽和度は変化せず,ガスの移動がないこと から,ガス漏気は起こってないことが確認された. つま り,水封が機能している場合は亀裂を有し内圧が高い岩 盤においてもガス漏気が発生しないことが再確認された.



図-2 ガス飽和度の経時変化(水封あり)

# (2) 解析結果(水封機能なし)

次に、水封が機能しない条件の解析結果を示す.健 岩を模擬した絶対浸透率4.0×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>で、岩盤タンク内圧 を4kPaと設定して解析を実施した時の岩盤タンクの空 洞から飽和領域までのガス飽和度の経時変化を示す(図
-3).図より、ガス飽和度が時間の経過とともに増加し ていることが確認された.これは、水封機能の停止に伴 い飽和領域の水位が低下してガス飽和度が増加し、その
結果、ガスの流路が形成されることでガス漏気に繋がっ
たと考えられる.これにより、この条件より危険側の条 件でも同様にガス漏気が起こると考えられる.従って、 水封が機能していない場合は、ガス漏気に対する対策が 必要であることが判明した.

#### (3) 解析結果(定量的評価)

次に、各解析条件におけるガス漏気挙動の違いについ て検討した結果を示す. 表-3 に定常状態における各条 件のガス漏気量を示す. 岩盤タンク内圧を変化させると、 ガス漏気量は1オーダー程度変化し、絶対浸透率を変化 させると、4オーダー程度変化することがわかった.



図-3 ガス飽和度の経時変化(水封なし)

また、図-4 に漏気ガスが地表面に到達するまでの時間を示す。絶対浸透率が40×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>の時、ガスは数年から数十年のオーダーで地表面まで到達しているのに対し、絶対浸透率が40×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>の時は、ガスは数時間から数日のオーダーで地表面まで到達していることが確認できる。つまり、絶対浸透率が40×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>の時、ガス漏気量は微量で地表面に到達するまでの時間も長いためガス漏気の危険度は低いと判定できる。ところが、絶対浸透率が40×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>の時、ガス漏気量は比較的多く、地表面に到達する時間も短いためガス漏気に対する危険度は相対的高くなる。

表-3 ガス漏気量

ガス漏気量 [kg/s/m<sup>2</sup>] ∆P=4 kPa ∆P=40 kPa 4.0 × 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>  $4.4 \times 10^{-9}$  $8.3 \times 10^{-8}$  $4.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  $4.4 \times 10^{-5}$  $8.3 \times 10^{-4}$ 10<sup>10</sup>  $K=4 \times 10^{-15} \, m^2$ 10<sup>9</sup> 0 ∆P=4 kPa  $K=4 \times 10^{-15} \, m^2$ 10<sup>8</sup> ∆P=40 kPa 54vears Time [s] 107 3vears 10<sup>6</sup>  $K=4 \times 10^{-11} m^2$ 10<sup>5</sup>  $K\text{=}4\times10^{\text{-}11}\,m^2$ ∆P=4 kPa 10<sup>4</sup> ∆P=40 kPa 2years 3.6hours 10<sup>3</sup> 10<sup>2</sup> 0 10 20 30 40 50 ∆P [kPa] 図-4 ガスの地表面までの到達時間

## (4) 解析結果(圧力, ガス飽和度の関係性)

次に, 圧力とガス飽和度の関係を示す.境界条件は絶対浸透率が4×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>で岩盤タンク内圧は4 kPaに設定して 解析を実施した.図-5より飽和領域のガス飽和度は時間 の増加とともに増加していることがわかる.さらに,図 -6よりガス圧が時間の経過とともに減少し,飽和領域下 方から上向きにガスが流れていることがわかる. したが って、ガス飽和度の増加とともにガス圧は減少し、飽和 領域がガス飽和になった時ガス圧が一定となる.





#### 4. 結言

本研究では、気液二相流解析により地下岩盤タンク内 の気化ガスの漏気メカニズムについて精査した.具体的 には、岩盤タンクにおける水封機能の有無、岩盤の絶対 浸透率、岩盤タンク内圧がガス漏気挙動に及ぼす影響を 定量的に評価した.本研究で得られた知見を以下に示す.

i) 水封の有無

水封機能の有無を考慮し、解析を実施した結果、水封

システムが機能している場合,ガス漏気は発生しないこと,内圧が水封圧を超えるとガス漏気が発生することが 確認された.水封システムが機能していない場合は,岩 盤タンクの通常運転時の内圧(4 kPa)でも,周辺岩盤への ガス漏気が確認された.

## ii) 絶対浸透率

岩盤の絶対浸透率を考慮し,解析を実施した結果, 健岩部条件(絶対浸透率4.0×10<sup>15</sup> m<sup>2</sup>)の時から亀裂部条 件(絶対浸透率4.0×10<sup>11</sup> m<sup>2</sup>)に変更すると,ガス漏気量 も同様に4オーダー上昇した.さらに,ガスが観測 点,地表面に到達するまでの時間も4オーダー早く なった.つまり,健岩部より亀裂部においてガス漏 気が多くなり地表面まで早くガス漏気が発生するこ とが確認された.従って,健岩部条件の時は,ガス 漏気量は微小で地表面まで漏気するのに時間がかか るため危険度が低いことが確認された.亀裂部条件 の時は,ガス漏気量が多く地表面まで漏気するのが 早いため危険度が高く,亀裂部に対策する必要があ ると確認された.

# iii) 岩盤タンク内圧

岩盤タンク内圧を考慮し解析を実施した結果,岩 盤タンク内圧を4kPaから40kPaに上昇させるとガス 漏気量は約20倍となり,さらに,ガスが観測点,地 表面に到達するまでの時間は10倍程度早くなること が確認された.

#### iv) 圧力, 飽和度の関係性は

圧力,飽和度の関係性はガス飽和度が増加するほ ど空気圧は減少し,飽和領域がガス飽和になると空 気圧は一定となる.ガス飽和度は水位の低下ととも に増加するので,飽和領域上方から増加していき, 飽和領域下方からはわずかながらガス飽和度が上昇 し,ガスの流れが衝突した時にガス飽和度がさらに 上昇しガス飽和状態となる. したがって、ガス漏気は亀裂部を介して漏気するこ とことが確認された.ガスみちとなる絶対浸透率の 高い領域が岩盤タンクから地表面まで連続的に存在 する場合、漏気したガスは地表面まで到達すること が容易に想像できるが、その限りで無い場合、地表 面までガスが到達することは困難であり危険度が低 いことが確認できた.

今後は相対浸透率曲線や水分特性曲線を実験によっ て算出しより現場の条件に近いパラメータで解析を 実施していきたい.また,気候条件に関して,低気 圧条件についても精査していきたい.

#### 参考文献

- 1) 蒔田敏昭:岩盤タンクによる石油の地下備蓄について, 圧力技術, Vol.29, pp.12-21, 1991.
- JOGMEC:周辺環境に配慮した LP ガスの水封式地下 岩盤貯槽方式-岡山県倉敷地点-(石油・天然ガスレ ビュー), pp.56-72, 2001.
- 3) 下茂道人, 臼井達哉, 坂本淳, 新藤竹文, 藤原靖, 川又睦, 谷卓也, 大黒雅之: 波方国家石油ガス備蓄 基地建設工事, pp.1-8, 2013.
- 4) 牧哲史: 我が国初の LP ガス地下岩盤タンクその技術 的基礎, 圧力技術, Vol.36, pp.286-293, 1998.
- 5) 須知修: LPG 岩盤貯槽について, 圧力技術, Vol.29, pp.104-110, 1991.
- 植出和雄、岡本明夫、宮下国一郎:水封式岩盤タンクにおける岩盤を対象とした水封分類法、土木学会論文集、 Vol.2003, pp.185-195, 2003.
- 7) K. Pruess, C. Oldenburg, and G. Moridis : TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134, 197pp., 2012.
- PetraSim 5, PetraSim User Manual, Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 113pp., 2012.
- M. van Genuchten : A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc., Vol. 44, pp. 893-898, 1980.

# GAS LEAKAGE PROCESSES SIMULATED BY MULTIPHASE FLOW MODEL

## Ryo ISHINAKA, Hideaki YASUHARA, Naoki KINOSHITA and Michito SHIMO

The underground petoroleum storage system includes water seal system. This system makes pumped ground water flow towards the rock cavern and prevents leakage of the vaporized gas. If water seal system does not perform well, down-flow of water towards the rock cavern stops, then gas leakage may occur. In this work, we evaluate the efficacy of water seal system and also evaluate gas flow behavior using appropriate simulations. As a result of simulation, in case of presence of water seal system, gas leakages do not occur even in fractured rock (absolute permeability K=4.0×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>). In case of no water seal system, gas leakage occurs with increasing gas saturation.