

気液相変化を考慮した LPG 地下貯蔵施設の気密性解析

大成建設（株）土木技術研究所

正会員 ○山本 肇

ローレンスバークレー国立研究所

K. Pruess

大成建設（株）土木技術研究所

正会員 下茂道人

1. 目的

液化石油ガス（LPG）の地下貯蔵施設は、地下 100m～200m の岩盤内に設けた空洞中において、プロパンやブタンなどの石油ガスを常温・高圧の状態では液化貯蔵するものである。気密条件に関し、これまで地下水の動水勾配などに基づいた検討がなされているが、気液相変化などの LPG の特性については考慮されていない。

筆者ら¹⁾は、気液相変化および地下水への溶解といった LPG の物理化学的特性を考慮できる流体解析シミュレータ TMVOC V1.0²⁾を用い、LPG 地下貯蔵の気密条件を検討したので、その結果を以下に述べる。

2. 解析コード

TMVOC V1.0 は、水、非凝縮性ガス、VOC（揮発性有機化合物）で構成される多成分 3 相系を対象とした、非等温地下流体のシミュレータである。数値解法には積分差分法（IFDM）を用いている。ガス（O₂, CO₂, CH₄, N₂ など）や VOC を多成分で取り扱うことができる。気化や溶解による各成分の相間移動も考慮できるので、今回の LPG の気液相変化や地下水中への溶解の解析に適している。

3. プロパンの気液相変化

ここでは、LPG 地下施設の貯蔵物としてプロパンを対象とした。プロパンガスは、常温では約 8 bar で液化し、密度・粘性が大きく変化する。試みに、TMVOC を用い、立方体の単一グリッド中に気体プロパンを注入したときの、圧力 P による密度変化を計算した（図-1）。P=0.84MPa で気液相変化による密度変化が現れており、計算値は Vargaftik³⁾によるデータとも一致する。

4. 1 次元モデルによる予備解析

貯蔵ガスの気密条件に関し、従来から Åberg の基準³⁾ ($I \geq 1$; I : 鉛直動水勾配) が設計に用いられている。ここでは、水封ボーリング貯槽間の鉛直動水勾配を変えた解析により気密条件を検討した。解析には水封ボーリング孔と貯槽空洞間を模擬した 1 次元モデル（図-2a）を用いた。液体プロパンを最下グリッドに格納し（プロパン飽和度 100%, $P_{\text{stor}}=0.86\text{MPa}$ ）、十分な水封圧力 ($P_{\text{wc}}=1.4\text{MPa}$) で安定させた後、 P_{wc} を所定の動水勾配まで低下させた。岩盤の浸透係数、空隙率は $k=1 \times 10^{-14}\text{m}^2$ （透水係数 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 相当）、 $n=0.03$ とし、相対浸透率、毛管圧力には、各々、Stone⁶⁾、Parker⁷⁾による 3 相モデル²⁾を用いた。岩石の飽和状態での熱伝導率は、 $3.0\text{W/m}^\circ\text{C}$ 、比熱は $800\text{J/kg}^\circ\text{C}$ とした。

解析結果を図-3 に示す。毛管圧力による抵抗を考慮しない場合（図中の“Capillary pressure=0”）でも、 $I \geq 0.45$ 程度であれば気密性を確保できる。さらに毛管圧力を考慮すれば、より高い気密性を期待できる（図-3 中の“High capillary pressure”）。

図-3 に示した $I=0.35$ （Capillary pressure=0）のケースでの LPG 挙動を図-4 に示す。当初、プロパンは液相のまま上昇するが、水封ボーリングの下約 5m に達した時点（8500 日後）において、プロパンの飽和蒸気圧が水圧を上回り、気液相変化によりガス飽和度が上昇する。

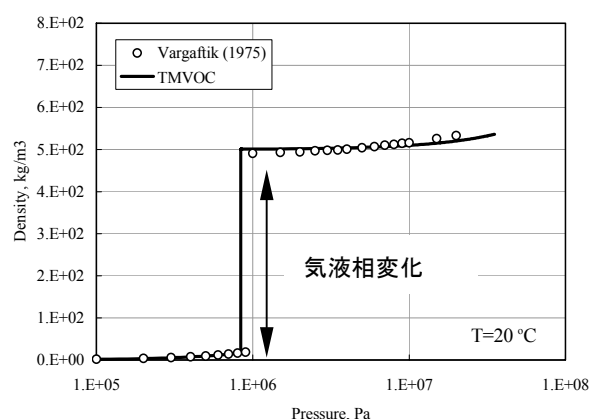
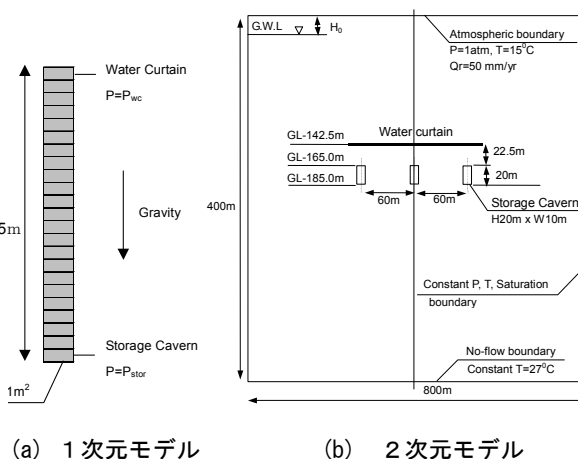


図-1 圧力による気液相変化



(a) 1 次元モデル

(b) 2 次元モデル

図-2 解析モデル

キーワード LPG 地下備蓄, 多相流, 数値解析, 気液相変化, プロパン

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7237

5. LPG 貯槽の気密性解析

5-1 解析モデル

図-3b の LPG 貯槽周辺を模擬した 2 次元モデルの半断面 (5m × 5m グリッドで離散化；グリッド総数=3,200) を用い、気密性解析を実施した。

上部境界は大気圧固定 (1atm) し、一定涵養量 50mm/年を与えた。側面境界は水位 GL-75m の静水圧状態、地温勾配 3°C/100m で固定した。貯槽空洞内は、気体プロパン、液体プロパン、水の 3 相状態とした (図-5)。液化プロパンの圧力は、飽和蒸気圧よりやや高い 0.86MPa に固定した。浸透物性および温度物性は、1 次元モデルと同様である。

5-2 解析結果

貯槽－水封ボーリング間の鉛直動水勾配 $I=1$ ($P_{wc}=0.86\text{MPa}$) のケースで得られた、気体および液体プロパンの飽和度を図-5a に示す。図より、気密性、液密性とも保たれているのが分かる。この状態から、鉛直動水勾配を $I=0.35$ ($P_{wc}=0.7\text{MPa}$) に低下させた場合の LPG 挙動 (1 年後) を図-5b に示す。貯槽上部の蒸気プロパンは上方へ移動し、水封ボーリングに達する。貯槽内の液化プロパンは、地下水圧が飽和蒸気圧よりも大きいため、液化したまま存在する。これらの他、水溶プロパン濃度や気化熱による温度変化等も解析可能である。

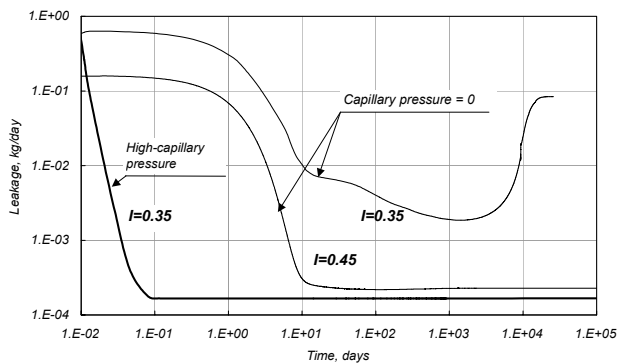
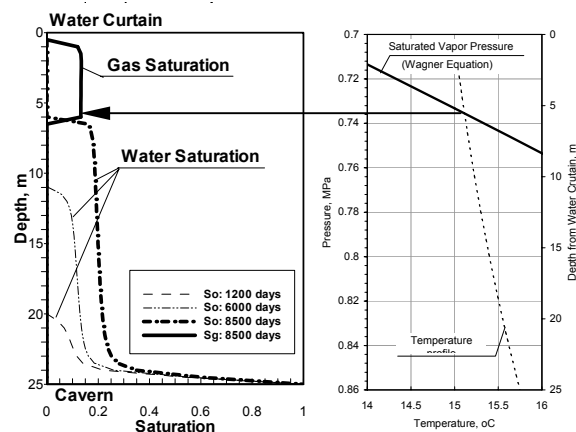


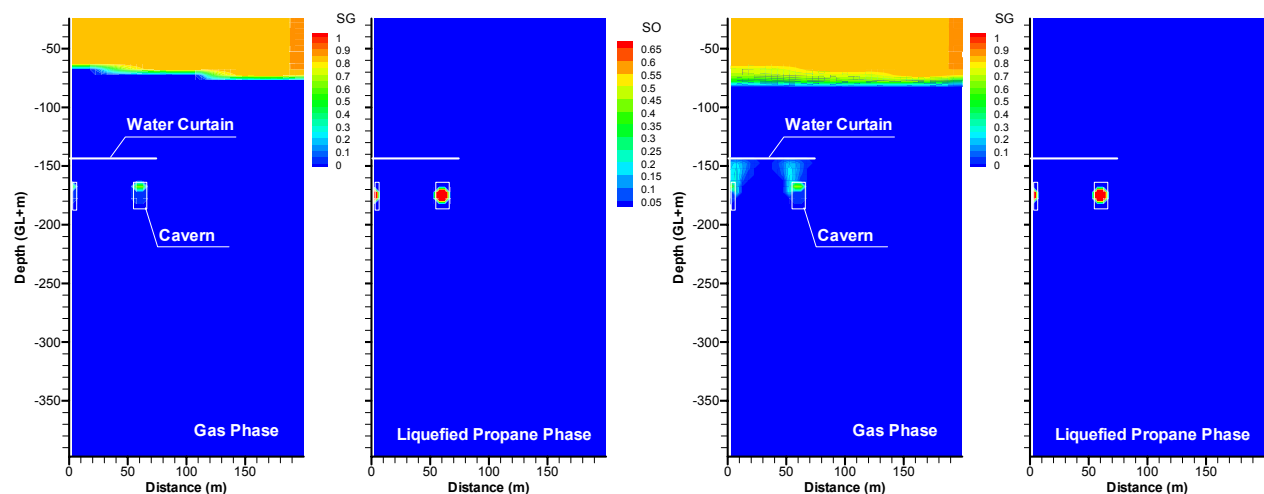
図-3 動水勾配と気密性



(a) 流体飽和度

(b) プロパン沸点

図-4 1次元モデル解析結果



(a) 水封圧力 0.86MPa ($I=1$)

(b) 水封圧力 0.7MPa ($I=0.35$)

図-5 2次元モデル解析結果（気相及び液体プロパン相の飽和度）

6. まとめ

1) 温度・圧力条件による相変化（密度・粘性変化）など、LPG の有する複雑な物理化学特性を考慮した気密性解析が可能である；2) 気密条件に関しては、設計に用いられている Åberg の基準と整合的である；3) ガスフロントの進行速度や範囲、種々の物理化学条件を総合的に解析でき、モニタリングなどの維持管理計画にも有用である。

参考文献

- 1) Yamamoto, H., K. Pruess, Numerical simulation of leakage from underground LPG storage caverns, LBNL Report LBNL-56175, 2004.
- 2) Pruess, K., A. Battistelli, TMVOC, a Numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media, LBNL Report LBNL-49375, 2002.
- 3) Åberg, B. Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock, Proc. Int. Symp. Storage in Excavated Rock Caverns, pp.399-413, 1977
- 4) Reid et al. The properties of gases and liquids, 4th ed., McGraw-Hill, 1987.
- 5) Vargaftik, N.B. Tables on the thermophysical Properties of Liquid and Gases, 2nd ed. New York, J. Wiley, 1975.
- 6) Stone, H.L. Probability model for estimating three-phase relative permeability, Trans. SPE of AIME, 249, 214-218, 1970.
- 7) Parker et al. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media, Water Resour. Res., v23, n4, pp.618-624, 1987.