

III-646

堆積軟岩を対象としたLNGの地下深部貯蔵時における熱伝導解析

㈱竹中工務店技術研究所 正会員 甲村 雄一
愛媛大学工学部 正会員 稲田 善紀
㈱竹中工務店技術研究所 正会員 上田 貴夫
㈱竹中土木技術開発本部 正会員 神崎 靖

1. はじめに

天然ガスの需給量は近年増加しており、クリーンエネルギーであるという観点からも今後の需給量のいっそうの増加が見込まれている¹⁾。天然ガスは-162℃まで冷却し液化することで体積が約1/580となるため、運搬・貯蔵時には液化天然ガス（LNG）として取り扱うことが多い。現在、LNGの貯蔵には埋め立て地等における地下式タンクが実用化されているが、安全性、敷地確保の点および土地の立体的な有効利用の点で改良の余地が残されている。本研究ではこれらの点を考慮した貯蔵方式として、地下深部の堆積軟岩中に掘削した空洞をLNG貯蔵タンクとして使用する場合を想定し、要素分割法を用いて空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を求め、岩盤の熱物性値の違いによる凍結領域の変化を求めた。また、貯蔵開始時に空洞内の温度を徐々に冷却するというクールダウンを行った場合についての温度分布についても考察を加えた。

2. 要素分割法による解析方法

空洞形状は直径10mの円形空洞とし、2次元の熱伝導問題を考える。図1に示すように空洞周辺岩盤を要素分割する。要素の厚さを1とした場合、要素mの時刻n+1における温度は(1)式で求められる。

$$U_{m,n+1} = U_{m,n} + \frac{1}{c_m \rho_m \cdot \Delta X_m \cdot \ell_m} \left[\frac{\lambda_m \cdot \Delta X_m + \lambda_{m+1} \cdot \Delta X_{m+1}}{\Delta X_m + \Delta X_{m+1}} \cdot \frac{U_{m+1,n} - U_{m,n}}{\Delta X_m/2 + \Delta X_{m+1}/2} \cdot \ell_{m+1} \cdot \Delta t \right. \\ \left. - \frac{\lambda_{m-1} \cdot \Delta X_{m-1} + \lambda_m \cdot \Delta X_m}{\Delta X_{m-1} + \Delta X_m} \cdot \frac{U_{m,n} - U_{m-1,n}}{\Delta X_{m-1}/2 + \Delta X_m/2} \cdot \ell_{m-1} \cdot \Delta t \right] \quad \text{---- (1)}$$

ただし、 $U_{m,n}$ ：要素mの時刻nにおける温度、 λ_m ：要素mの熱伝導率、 ΔX_m ：要素mの幅、 ℓ_m ：要素mの長さ、 Δt ：時間間隔、 c_m ：要素mの比熱、 ρ_m ：要素mの密度

堆積岩のように水分の多い物質の凍結問題を考える場合には潜熱を考慮する必要がある。単位体積あたりの潜熱をL、岩盤の凍結温度を T_F (℃)とする。要素mの潜熱は $L \times \Delta X_m \times \ell_m = L_m$ (cal)で表される。

(1)式により計算を行い、 $U_{m,n+1} < T_F$ となった場合、以下のような処理を行うことで潜熱を考慮する。

① $(U_{m,n+1} - T_F) / c_m \rho_m \cdot \Delta X_m \cdot \ell_m$ を計算し $L_{m,n+1}$ とする。

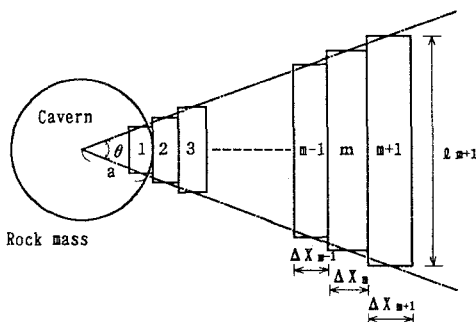


図1 要素分割の例

表1 解析に用いた熱物性値

		Thermal conductivity λ (cal/cmsec℃)	Thermal capacity $c\rho$ (cal/cm℃)	Latent heat of fusion L (cal/cm)
case1	before freezing	0.360	0.750	15.9
	after freezing	0.550	0.500	
case2	before freezing	0.180	0.750	15.9
	after freezing	0.275	0.500	
case3	before freezing	0.540	0.750	15.9
	after freezing	0.825	0.500	

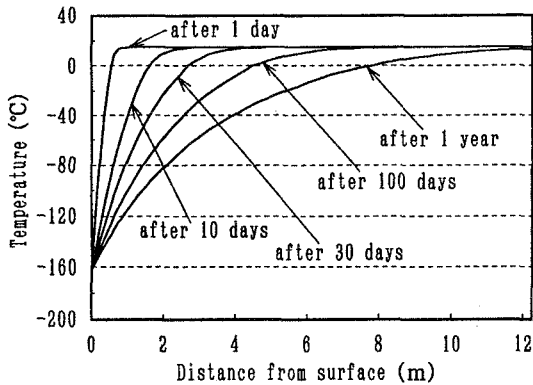


図2 空洞周辺岩盤の温度分布 (case 1)

- ② $|L_{m,n+1}| < |L_m|$ の場合, $U_{m,n+1} = T_f$ とし次の時間ステップに移る。ただし, $L_{m,n+1}$ の値は次の時間ステップでの初期値とする。
- ③ $|L_{m,n+1}| \geq |L_m|$ の場合, $U_{m,n+1} = (L_{m,n+1} - L_m) / c_m \rho_m \cdot \Delta X_m \cdot \ell_m$ とする。

3. 解析結果および考察

本研究ではcase 1～case 3の3種類の熱物性値を想定し解析を行った。用いた物性値を表1に示す。熱容量と潜熱は固定し熱伝導率を変化させた。なお、岩盤の初期温度は15℃とし、空洞内の温度は-162℃とした。case 1における解析結果を図2に示す。初期の時間には急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに低温の影響範囲が広がっていき温度勾配が緩やかになっていることがわかる。

次に、3つのcaseにおける岩盤の温度分布を比較したものが図3である。ここでは貯蔵10日後と貯蔵1年後の温度分布を示した。貯蔵1年後における凍結範囲はcase 1で空洞表面から約7.8m, case 2では約5.8m, また、case 3においては約9.0mとなることがわかった。実際の貯蔵においては、空洞周辺岩盤に発生する熱応力を抑制する目的で、貯蔵開始時に空洞内の温度を徐々に冷却するという“クールダウン”を行うことが予想される。ここではクールダウンにより空洞周辺岩盤の温度分布がどの程度影響を受けるかを求めた。冷却速度は非常に遅い場合を想定し、一定速度で空洞内を冷却し貯蔵1ヵ月後に-162℃となるものとした。解析結果を図4に示す。図2と比較して初期の時間においては温度の影響範囲に差がみられるが、貯蔵1年後においてはクールダウンをしない場合とほとんど差がみられなくなることがわかった。

4. おわりに

本研究では、地下深部の堆積岩中に空洞を掘削し、これをLNG貯蔵タンクとして使用した場合について空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法を用いて求めた。今後は堆積軟岩の熱物性値の温度依存性を実験により求めるとともに、これを用いてより現実的な解析を行う予定である。

参考文献 1) たとえば、資源エネルギー庁編集：総合エネルギー統計，pp.446～447，1992

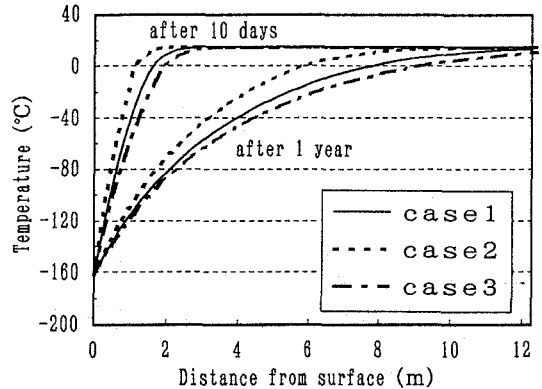


図3 熱物性値の差異による温度分布の変化

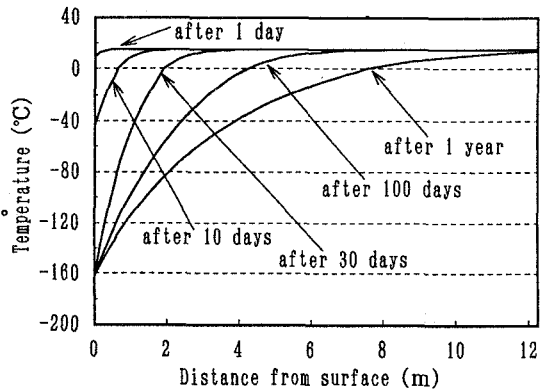


図4 クールダウン時の空洞周辺岩盤の温度分布