

(9) 液化天然ガスの地下貯蔵に関する基礎的研究

— 特に空洞周辺における温度分布について —

愛媛大学工学部 ○稲田 善紀
〃 八木 則男

1. 緒 言

液化天然ガスを地下の岩盤内空洞に貯蔵する場合、低温が岩石の強度に及ぼす影響についてはすでに報告したが、^{1), 2)} 低温によって空洞周辺に発生する熱応力の計算に先立ち、今回は周辺の温度分布を非定常熱伝導問題として扱い、微小体積内の熱収支によるシュミットの方法³⁾を応用した要素分割法によって矩形要素ならびに三角形要素について温度分布を計算により求めた結果について述べる。

2. 要素分割法の原理

2. 1 矩形要素の場合

まず、平面状熱源で一次元の場合を考える。図1に示すように伝熱方向に ΔX の等間隔で分割し、 m 番目の要素のある時間 n における温度を $U_{m,n}$ とする。

時間 $\Delta\tau$ 内に、 m に $m-1$ 側から入る熱量 $Q_{m,in}$ は、

$$Q_{m,in} = -\lambda \frac{U_{m,n} - U_{m-1,n}}{\Delta X} \times \ell \Delta\tau \quad (1)$$

ただし、 λ :熱伝導率、 ℓ :熱が要素の境界を通過して流れる面積(紙面に直角な方向の厚みを1としている)

時間 $\Delta\tau$ 内に、 m から $m+1$ 側に出る熱量 $Q_{m,out}$ は、

$$Q_{m,out} = -\lambda \frac{U_{m+1,n} - U_{m,n}}{\Delta X} \times \ell \Delta\tau \quad (2)$$

m にたくわえられる熱量は m 内の温度上昇に費されるから

$$Q_{m,in} - Q_{m,out} = c\rho \Delta X \cdot \ell (U_{m,n+1} - U_{m,n}) \quad (3)$$

ただし、 c :比熱、 ρ :密度、 $U_{m,n+1}$: $\Delta\tau$ 時間の終りにおける m の中心温度

(3)へ(1),(2)を代入して

$$\lambda \frac{\Delta\tau}{\Delta X} \{ \ell (U_{m+1,n} - U_{m,n}) - \ell (U_{m,n} - U_{m-1,n}) \} = c\rho \Delta X \ell (U_{m,n+1} - U_{m,n})$$

$$\therefore \left(\frac{\Delta X^2}{K \Delta\tau} - 2 \right) U_{m,n} + U_{m+1,n} + U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{K \Delta\tau} U_{m,n+1} \quad (4)$$

ただし、 K :熱拡散率で $K = \lambda / c\rho$

次に、図2に示す矩形要素分割を行なうと、式(4)は次式にかきかえられる。

$$\left(\frac{\Delta X^2}{K \Delta\tau} \ell_m - \ell_{m+1} - \ell_{m-1} \right) U_{m,n} + \ell_{m+1,n} + \ell_{m-1,n} U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{K \Delta\tau} \ell_{m,n} U_{m,n+1} \quad (5)$$

いま、円の半径を a 、中心角を θ とすると

$$\ell_1 = 2a \sin \frac{\theta}{2}, \ell_2 = 2 \left(a \sin \frac{\theta}{2} + \Delta X \tan \frac{\theta}{2} \right), \ell_3 = 2 \left(a \sin \frac{\theta}{2} + 2 \Delta X \tan \frac{\theta}{2} \right) \dots\dots\dots$$

$$\ell_{m-1} = 2 \left\{ a \sin \frac{\theta}{2} + (m-2) \Delta X \tan \frac{\theta}{2} \right\}, \ell_m = 2 \left\{ a \sin \frac{\theta}{2} + (m-1) \Delta X \tan \frac{\theta}{2} \right\}, \ell_{m+1} = 2 \left\{ a \sin \frac{\theta}{2} + m \Delta X \tan \frac{\theta}{2} \right\}$$

であるから、これらを(5)式に代入し整理すると次式が得られる。

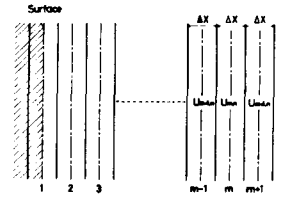


図1 要素分割法の原理説明図

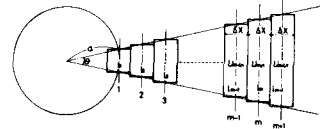


図2 要素分割法(矩形要素)の原理説明図

$$U_{m,n+1} = \frac{1}{C \{A + (m-1)B\}} \{ (C-2) \{A + (m-1)B\} U_{m,n} + (A+mB) U_{m+1,n} + \{A + (m-2)B\} U_{m-1,n} \}$$

$$\text{ただし, } A = a \cdot \sin \frac{\theta}{2}, B = \Delta X \cdot \sin \frac{\theta}{2}, C = \Delta X^2 / K \Delta \tau \quad (m \geq 2) \quad (6)$$

2. 2 三角形要素の場合

空洞が円形でかつ1つの場合は前述の矩形要素によって求めることができるが、空洞が2つ以上又は形状が複雑な場合には矩形要素では求めることができない。

このような場合は、要素の形状を三角形にすることによって種々の形状の空洞に適用できる。この場合、次のような仮定をおく。

- (1) 熱は三角形要素の各辺（紙面に直角な方向の厚さを1とする）を通じて出入するものとする。
- (2) 1つの三角形要素内部の温度は均一であるものとし、三角形要素間の熱の受授はそれぞれ重心間で行なわれるものとする。

さて、図3に示すように

①, ②, ③………: 各三角形要素の接点番号, 1, 2, 3………: 各三角形要素の番号

$U_{1,t}, U_{2,t}, U_{3,t}$ ………: 任意の時刻における各要素の温度

$\ell_{1,2}, \ell_{2,3}, \ell_{2,4}$ ………: 各要素の重心間距離, d_{12}, d_{23}, d_{34} ………: 各辺の長さ

S_1, S_2, S_3 ………: 各要素の面積 とすると

いま、 $\Delta \tau$ 時間内に各辺を通して要素2にたくわえられる熱量は

$$\left(\lambda \frac{U_{1,t} - U_{2,t}}{\ell_{1,2}} d_{12} \Delta \tau \right) + \left(\lambda \frac{U_{4,t} - U_{2,t}}{\ell_{2,4}} d_{24} \Delta \tau \right) + \left(\lambda \frac{U_{3,t} - U_{2,t}}{\ell_{2,3}} d_{23} \Delta \tau \right)$$

この熱量は、要素2の温度上昇に費されるから $S_2 (U_{2,t+1} - U_{2,t}) c \rho$ に等しい。

$$\therefore U_{2,t+1} = U_{2,t} + \frac{K}{S_2} \Delta \tau \left\{ \frac{U_{1,t} - U_{2,t}}{\ell_{1,2}} d_{12} + \frac{U_{4,t} - U_{2,t}}{\ell_{2,4}} d_{24} + \frac{U_{3,t} - U_{2,t}}{\ell_{2,3}} d_{23} \right\} \quad (7)$$

ただし、 $K = \lambda / c \rho$

3. 計算結果および考察

3. 1 矩形要素の場合

(6)式を用いて計算する際に精度上問題となるのは、分割要素の大きさおよび時間間隔である。前者についてはさらに中心角の大きさおよび要素の間隔(ΔX)の2つが問題となる。

まず、中心角の大きさの決定については、液化天然ガスの気化温度である -162°C を表面温度とし、空洞の直径 $2m, 5m, 10m$ に対し、分割要素間隔(ΔX)および中心角(θ)を種々に変化させた場合の各要素の中心温度の時間的変化を求めたが、このうち代表例を図4および図5に示した。これらの結果を総合して判断すると、どの要素においても、また、空洞の直径にかかわらず $\theta = 30^\circ$ 以下であればほとんど精度上影響がないことがわかった。

しかし、今回はさらに念のため、 $\theta = 15^\circ$ として計算することとした。

次に、空洞の直径 $2m, 5m, 10m$ に対し、分割要素の間隔(ΔX)を 1cm とし、 K の値を種々に変え、無次元化した $C = \Delta X^2 / K \Delta \tau$ の値を種々に変化させた場合の20分後の分割要素の中心温度の変化を求めた。ここでは代表例として $K = 8.0 \times 10^{-3} \text{ [cm}^2/\text{sec}]$ のものを

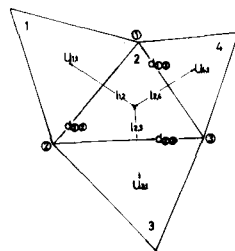


図3 要素分割法(三角形要素)の原理説明図

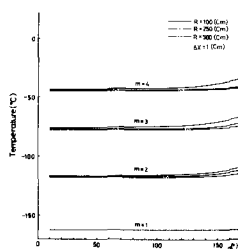


図4 θ を変化させた場合の各要素の中心温度(10分後)

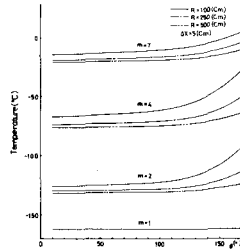


図5 θ を変化させた場合の各要素の中心温度(10時間後)

を図6に示した。同様に、600分後の温度を求めて示したものが図7である。次に、 $\Delta X = 10 \text{ cm}$ として20分後および600分後の温度を求めたものが図8である。

これらの図からわかるように、 $C \geq 10$ 以上ではほとんど温度は収束して精度上も問題がないことがわかるが、今回はさらに念のため、 $C = 20$ として計算することとした。

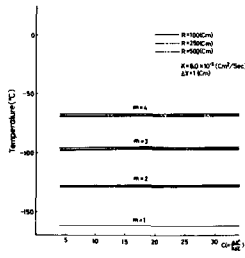


図6 Cを変化させた場合の各要素の中心温度(20分後)

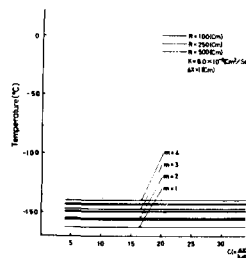


図7 Cを変化させた場合の各要素の中心温度(600分後)

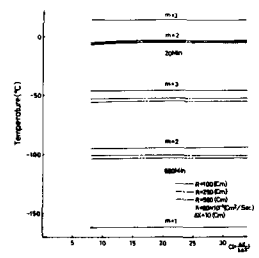


図8 Cを変化させた場合の各要素の中心温度(20分600分後)

$C = 20$ とした場合のKと ΔX と $\Delta \tau$ の関係をとりまとめて表1に示した。

表1により、種々のKに対し、 ΔX をまず決めれば適当な時間間隔 $\Delta \tau$ を決定し得る。

以上のような基礎事項をふまえて、種々の直径の空洞周辺の温度分布を求め、とりまとめたものが図9～図11である。

これらの図から、初期の時間には空洞の直径いかにかわらず、極めて温度勾配が大きく、また、温度分布もさほど大きな違いがみられないが、時間が経つにつれて温度勾配がゆるやかとなり、とくに直径の大きいほど同じ時間において温度勾配はゆるやかとなり、より速くまで温度の影響を及ぼし得ることがわかる。

表1 $C = 20$ とした場合のKと ΔX と $\Delta \tau$ の関係

K	ΔX (cm)	$\Delta \tau$ (sec)	K	ΔX (cm)	$\Delta \tau$ (sec)
5×10^{-8}	1	10	5×10^{-8}	1	5.6
	2	20		2	22.2
	5	100		5	138
	10	1000		10	555.6
	15	2250		15	990
	20	4000		20	2222.2
6×10^{-8}	1	6.3	10×10^{-8}	1	5
	2	25.2		2	19.6
	5	250.5		5	125
	10	1002		10	500
	15	2250		15	1125
	20	4000		20	2000
7×10^{-8}	1	5.3	11×10^{-8}	1	4.5
	2	21.6		2	16.2
	5	216		5	113.6
	10	864		10	454.5
	15	1944		15	1022.7
	20	3520		20	1818.2
8×10^{-8}	1	4.5	12×10^{-8}	1	4.2
	2	18.2		2	16.7
	5	182		5	106.2
	10	729		10	426.7
	15	1620		15	937.5
	20	2900		20	1666.7

また、岩盤内の同じ位置において温度の変化は対数的に非常に緩慢となり、1年後ではほぼ準定常の状態になっていることがわかる。

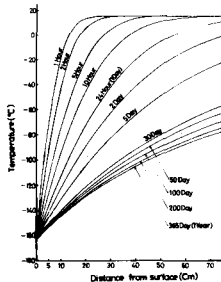


図9 空洞直径2 mの場合の岩盤内温度の時間的変化

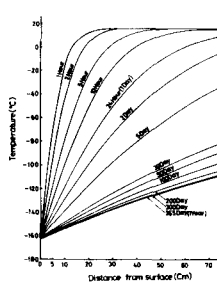


図10 空洞直径5 mの場合の岩盤内温度の時間的変化

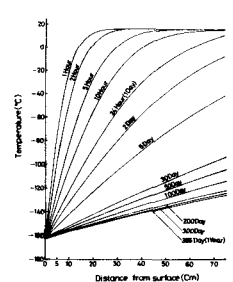


図11 空洞直径10 mの場合の岩盤内温度の時間的変化

3. 2 三角形要素の場合

前述の矩形要素の場合と同様、三角形要素の場合も分割時間間隔($\Delta \tau$)が問題となり、できるだけ短い方が精度上よいことはいうまでもない。 $\Delta \tau$ が温度に与える影響を種々求めたが、 $\Delta \tau = 180 \text{ sec}$ までは 1°C 以内の誤差を許すならほとんど影響がないことがわかった。とくに誤差を生じやすいのは初期の時間であって、その後は $\Delta \tau$ にさほど影響がないこともわかった。今回はさらに念のため、初期(5時間)の間は $\Delta \tau = 30 \text{ sec}$ で、また、それ以上の時間では $\Delta \tau = 150 \text{ sec}$ として計算することにした。

次に、空洞周辺の要素分割の例を示したものが図12および図13である。図12は空洞表面から同一距離にある三角形要素の面積をできるだけ等しくなるように組んだ例であり、図13は必ずしもそうではなく、とくに境界に近い部分で等しくない例である。さて、このような場合に岩盤内温度分布に及ぼす影響を比較したものが図14である。図14から両者には 2°C 程度

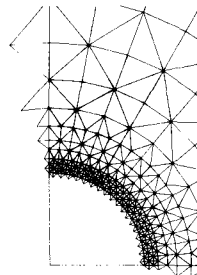


図12 空洞周辺の要素分割の例(その1)

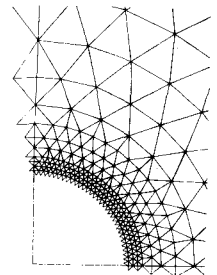


図13 空洞周辺の要素分割の例(その2)

の差があることがわかるが、できるだけ図12のように空洞表面から同一距離の三角形要素面積を等しくなるように分割すべきであろう。

ここで、前述の矩形要素と三角形要素の形状が温度分布に及ぼす影響を調べたものが図15である。図15から、時間が経つほど両者の間には少しずつ差が出てくることがわかるが、しかし、空洞の数が複雑になったり、形状が複雑になると三角形要素に変えざるを得ないことは前述のとおりである。

次に、空洞表面の冷却速度の差異が岩盤内温度に及ぼす影響を求めたものが図16である。

ここでは、 $-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ および $-10^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ の速度で温度降下するもの、ならびに -16.2°C （一定）としたものの3種類の条件について岩盤内温度分布を求めているが、図16からわかるように、 $-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合については、約5時間経過以後は表面を一定とした場合とほぼ同じ温度分布を示す。

一方、 $-10^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ については、初期の段階で表面を一定とした場合と比較すると極端に温度分布が異なるが、5日目からはほぼ同じような温度分布を示すことがわかる。

以上のことから、表面と内部とが極端な温度差をもって分布するのは、やはり表面を -16.2°C （一定）に保った場合であり、熱応力の発生を考慮するとこのような条件の、しかも初期の状態に注目すべきであると考えられる。

また、実際には貯蔵空間と空洞表面との間で熱伝達があるので、必ずしも -16.2°C （一定）と考えるような厳しい現象は発生し難いと思われるが、安全性を見込んだ設計という観点からはこのような条件を考慮に入れて熱応力が計算されるべきであると考えられる。

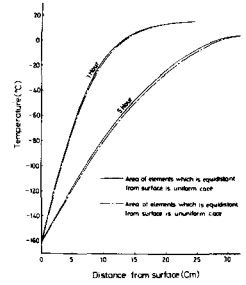


図14 表面から同一距離にある三角形要素面積の差異が温度分布に及ぼす影響

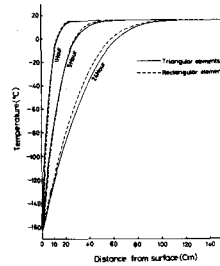


図15 分割要素の形状が温度分布に及ぼす影響（直径5m）

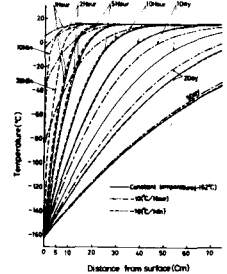


図16 空洞表面の冷却速度が温度分布に及ぼす影響（直径5m）

4. 結 言

今回得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 地下岩盤内空洞周辺に発生する温度分布を、要素分割法によって求め得ることを示した。
- (2) 空洞の形状が円形で、しかも空洞の数が1つの場合は矩形要素を、その他の場合には三角形要素が便利であり、両者による温度分布は時間の経過につれ多少の差があらわれ、24時間後で最大 5°C である。
- (3) 空洞表面の温度降下速度を $-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 、 -16.2°C （一定）にした場合について温度分布を求めたが、いずれの場合も5日後にはほぼ同じ温度分布を示すことがわかった。
- (4) 実際には、貯蔵空間と空洞表面との間で熱伝達があるので、必ずしも -16.2°C （一定）と考えるような厳しい現象は発生し難いと思われるが、安全性を見込んだ設計という観点からはこのような条件を考慮に入れて熱応力が計算されるべきである。

参 考 文 献

- 1) 稲田善紀，八木則男：液化天然ガスの地下貯蔵に関する基礎的研究；土木学会岩盤力学委員会，「第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要」1979年2月
- 2) 稲田善紀，八木則男：低温の影響を受けた岩石の力学特性；「材料」，第28巻，第313号，昭和54年10月
- 3) エム・ミハイエフ著，内田透雄，鎌田重夫訳：「基礎伝熱工学」，東京図書株式会社，1966年

A Fundamental Study on Underground Storage of
Liquefied Natural Gas

—— Temperature Distribution around

Underground Openings ——

By Yoshinori INADA and Norio YAGI

Abstract

In a design of underground openings for storage of L.N.G. whose temperature is -162°C , we must consider a mechanical and a thermal stresses.

A temperature distribution around openings is necessary for getting a thermal stress distribution.

This report presents the results of the theoretical analysis for temperature distribution around underground openings in various thermal conditions of openings surface. The finite divided rectangular and triangular elements method is adopted for the analysis.

Main results obtained are as follows :

- 1) Rectangular elements are effective only to mono-circular openings and triangular elements may be applied to another case of openings. The differences of temperature around mono-circular openings between two methods of calculation by rectangular and by triangular elements are 5°C in maximum after 24 hours.
- 2) In the case of the rate of cooling temperature of openings surface more than $-10^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, every temperature distribution around underground openings is nearly same after 5 days.
- 3) As a heat transfer coefficient exist practically between a room and surface, it doesn't always follow that surface temperature is -162°C constantly. But from safety design view point of underground openings, temperature distribution should be calculated under condition of constant surface temperature -162°C .