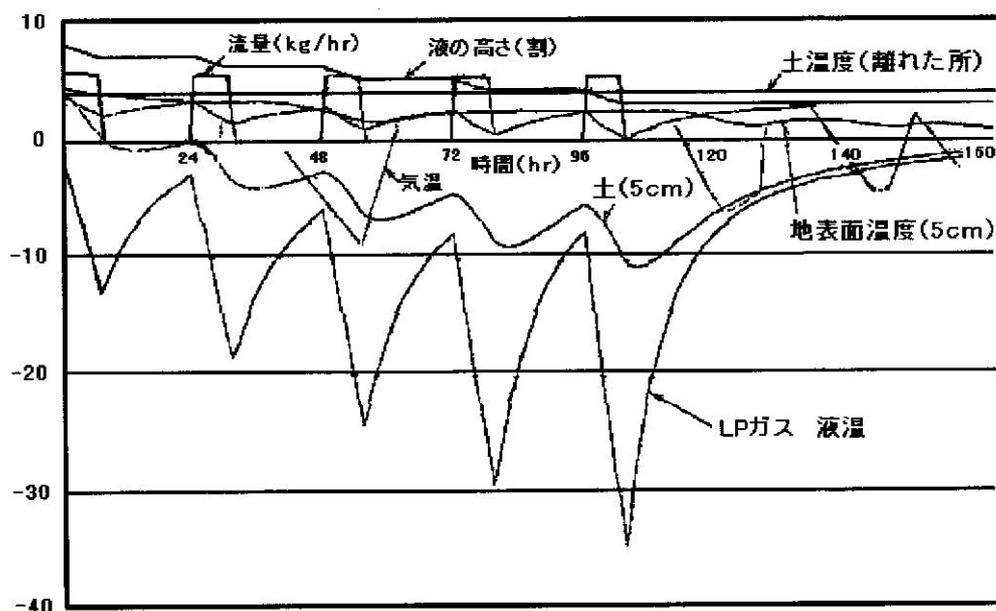


## 解説1. 地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算手法

地下埋設式バルク貯槽の発生能力に関する実験データは限られているが、中でも高压ガス保安協会（以下、KHKという）が平成3年1月7日～13日に実施した北海道石狩郡石狩町（岩谷産業(株)石狩工場）での実験<sup>※1</sup>は、解1・図1に示す通り消費を繰り返すごとに液温が降下し、地下埋設式バルク貯槽の自然気化消費における消費パターンの特徴を明確に示しているものと考えられる。即ち、地下埋設式バルク貯槽の自然気化消費では、地上設置式バルク貯槽の場合と異なり、次の消費開始までに消費開始時の液温が元の温度（地上設置式バルク貯槽の場合では外気温）まで回復しない。従って、自然気化消費～休止の繰り返しにおける液温変化を忠実に再現できれば、地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算のモデル化に成功したものといえよう。本基準では、このKHK実験データを解析することにより、地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算のモデル化を試みた。



解1・図1 KHK:北海道フィールドテストシュミレーション結果

### 1. 地下埋設式バルク貯槽の発生能力のモデル化と総括伝熱係数

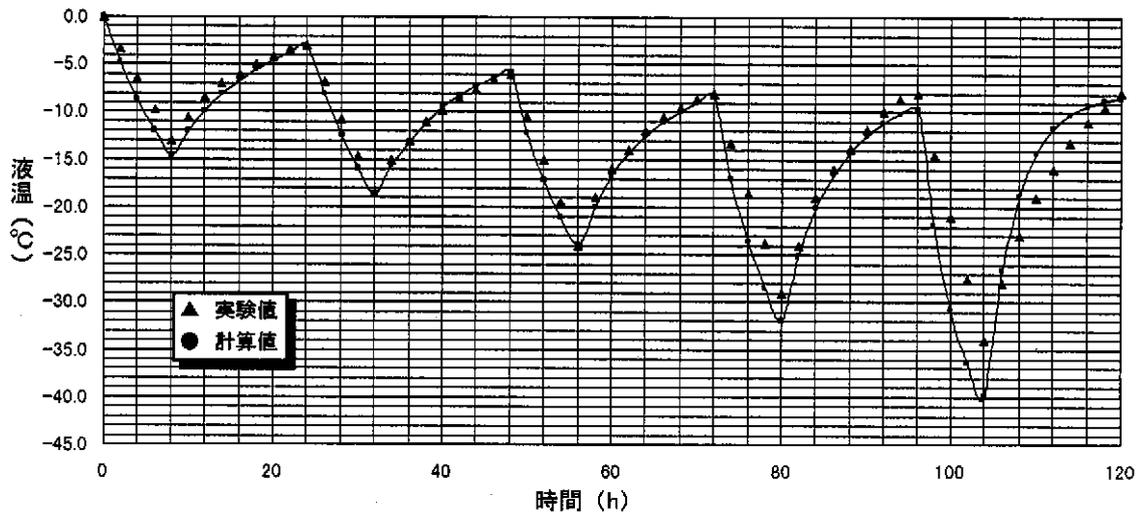
発生能力計算の要因は「伝熱」、「液及び貯槽の顕熱」及び「気相部ベーパーの圧力降下」であるから、伝熱による発生速度に関わる総括伝熱係数が発生能力の計算結果に影響のあることは予想されるが、それがどの程度のものであるかという点については、発生能力計算のモデルによっても異なるだろう。この点を検証する意味で、技術基準 E-001「地上設置式横型バルク貯槽等の発生能力」解説2発生能力推算方法の評価においては、発生能力における伝熱発生速度の割合を計算することによって、総括伝熱係数の発生能力への影響を調べた。一方、今回の地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算においては、総括伝熱係数の検討を通じてモデル化のための有益な知見を得ることができた。尚、総括伝熱係数の値については、平成6年3月のKHK報告書では総括伝熱係数を一定 ( $11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \approx 12.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) としているが、他の文献<sup>※2</sup>によると土質条件等によってかなり変化するものの、実際には  $11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  以下と推定している。

技術基準E001においては、総括伝熱係数を可変としたが、今回のモデル化においても総括伝熱係数を可変とすべきかどうかを検討するため、本基準4節で示した「発生能力計算式」及び「液温回復計算式」等の発生能力計算のための基礎式を用いて、上記のKHK実験結果をシミュレート

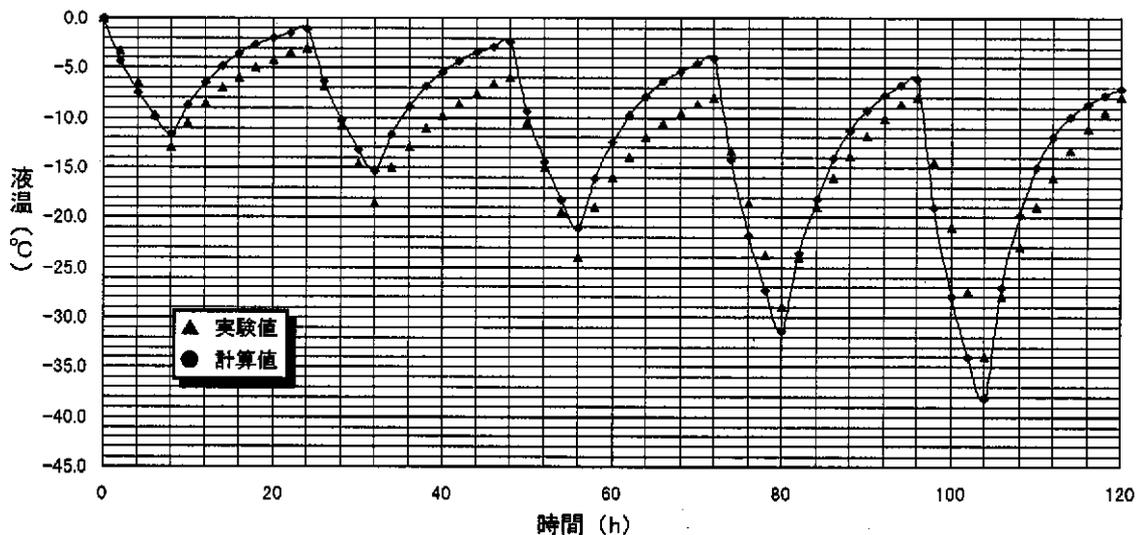
※1 <平成3年度通産省委託事業>平成4年3月「石油ガス供給事業安全管理技術開発・指導普及事業（技術開発事業）に関する報告書」（安定供給のための機器の開発／石油ガス地下バルク供給システムの開発）

※2 土木工学会編：土の凍結－その理論と実際

した。解1・図2は総括伝熱係数の値を本基準4.3節の(13)式で計算したモデル(可変)であり、解1・図3は総括伝熱係数の値を $11\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}\doteq 12.8\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (一定)としたモデルである。



解1・図2 地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算のためのモデル化検討～総括伝熱係数を可変



解1・図3 地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算のためのモデル化検討～総括伝熱係数を一定

【解1・図2及び解1・図3の実験条件】 バルク貯槽:300kg縦型(直埋設), 自然気化消費状況: 8時間消費～16時間休止, 地中温度:4.5°C, 充填時温度:0°C

液温変化のシミュレート結果を比較すると、解1・図2の方が解1・図3より良好な一致を示している。従って、今回のモデル化においても、総括伝熱係数の値を可変とすることにした。

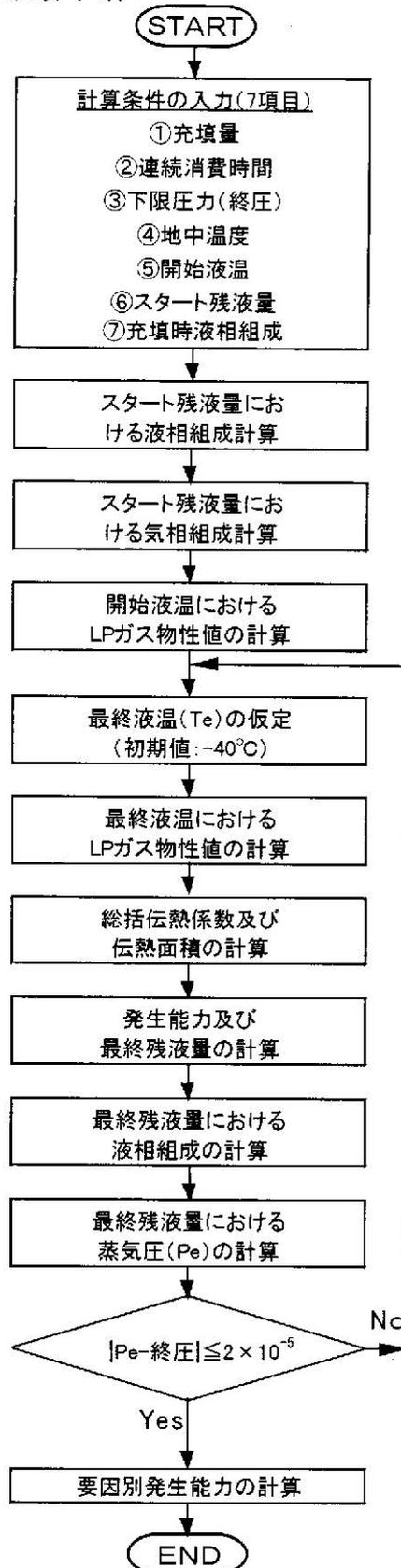
尚、総括伝熱係数の値は一定かどうかという問題については、次のような考え方から、本来は一定であっても可変とする解釈もあり得るものと考えられる。即ち、発生能力をモデル化する場合、一般に伝熱面積を濡れ面積としているが、内部での沸騰現象や気相部の貯槽壁を通じての入熱などを考慮すると必ずしも伝熱面積を濡れ面積とすることが妥当かどうか疑問の生じる余地があり、(総括伝熱係数)×(伝熱面積)をセットとして考えれば、総括伝熱係数の値を一定として伝熱面積を可変とすることと総括伝熱係数の値を可変として伝熱面積を一定とすることは、発生能力の計算上同じことになるので、総括伝熱係数を可変とする考え方である。

以上、今回のモデル化における総括伝熱係数の扱い方を検討したが、解1・図2のシミュレート結果から、液温回復の計算など本基準のモデル化全般の評価としても良好であると判断される。

## 2. 地下埋設式バルク貯槽の発生能力計算手順

地下埋設式バルク貯槽の発生能力を計算する手順は、(Step1) 任意の残液量における開始液温を求めた後、(Step2) その開始液温を用いて発生能力の計算を行うものとする。

### (1) 発生能力計算手順



Step2における発生能力計算手順(以下、「VOR基本手順」という)を解1・図4に示す。

…開始液温については、後述のStep1 計算手順による。

…液相組成の計算方法については、後述の液相組成計算手順による。

…発生能力を計算する場合、物性値、伝熱面積及び液深さについては、スタート残液量及び最終残液量でそれぞれ求めた値の平均値とする。

解1・図4 VOR基本手順

## (2) 自然気化消費に伴う液相組成計算方法

本基準(8)式～(11)式を用いた自然気化消費に伴う液相組成変化計算手順を以下に示す。  
但し、LPガスの組成をプロパン、ノルマルブタン及びイソブタンの三成分系 ( $x_1$ : プロパン,  $x_2$ :  
ノルマルブタン,  $x_3$ : イソブタン) とし、残液量の刻みを2wt%とする。

【手順1 (k=1)】 残液量が100wt%から98wt%に変化した場合

$$\text{〈プロパン〉} \quad \left(\frac{1-x_{1,0}}{1-x_{1,1}}\right)^{p_1} \cdot \left(\frac{x_{1,1}}{x_{1,0}}\right)^{p_2} = \left(\frac{w_1}{w_0}\right)^{p_1-p_2} \quad \dots(\text{解1-1})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,1} - p_1 \cdot x_{1,0}}{1 - x_{1,0}} \quad \dots(\text{解1-2})$$

$$\text{〈ノルマルブタン〉} \quad \left(\frac{1-x_{2,0}}{1-x_{2,1}}\right)^{p_2} \cdot \left(\frac{x_{2,1}}{x_{2,0}}\right)^{p_3} = \left(\frac{w_1}{w_0}\right)^{p_2-p_3} \quad \dots(\text{解1-3})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,1} - p_2 \cdot x_{2,0}}{1 - x_{2,0}} \quad \dots(\text{解1-4})$$

$$\text{〈イソブタン〉} \quad \left(\frac{1-x_{3,0}}{1-x_{3,1}}\right)^{p_3} \cdot \left(\frac{x_{3,1}}{x_{3,0}}\right)^{p_4} = \left(\frac{w_1}{w_0}\right)^{p_3-p_4} \quad \dots(\text{解1-5})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,1} - p_3 \cdot x_{3,0}}{1 - x_{3,0}} \quad \dots(\text{解1-6})$$

$$\text{但し、} \pi_{0,1} = p_1 x_{1,0} + p_2 x_{2,0} + p_3 x_{3,0} \quad \dots(\text{解1-7})$$

$$w_0 = 1.00, \quad w_1 = 0.98$$

$p_1, p_2, p_3$  : 各成分の蒸気圧 (本基準の(9)式で計算する)

$x_{1,0}, x_{2,0}, x_{3,0}$  : 各成分の充填時液相組成

$x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1}$  : 各成分の98wt%時液相組成

【手順2 (k=2)】 残液量が98wt%から96wt%に変化した場合

$$\text{〈プロパン〉} \quad \left(\frac{1-x_{1,1}}{1-x_{1,2}}\right)^{p_1} \cdot \left(\frac{x_{1,2}}{x_{1,1}}\right)^{p_2} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^{p_1-p_2} \quad \dots(\text{解1-8})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,2} - p_1 \cdot x_{1,1}}{1 - x_{1,1}} \quad \dots(\text{解1-9})$$

$$\text{〈ノルマルブタン〉} \quad \left(\frac{1-x_{2,1}}{1-x_{2,2}}\right)^{p_2} \cdot \left(\frac{x_{2,2}}{x_{2,1}}\right)^{p_3} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^{p_2-p_3} \quad \dots(\text{解1-10})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,2} - p_2 \cdot x_{2,1}}{1 - x_{2,1}} \quad \dots(\text{解1-11})$$

$$\text{〈イソブタン〉} \quad \left(\frac{1-x_{3,1}}{1-x_{3,2}}\right)^{p_3} \cdot \left(\frac{x_{3,2}}{x_{3,1}}\right)^{p_4} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^{p_3-p_4} \quad \dots(\text{解1-12})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,2} - p_3 \cdot x_{3,1}}{1 - x_{3,1}} \quad \dots(\text{解 1-13})$$

但し、 $\pi_{0,2} = p_1 x_{1,1} + p_2 x_{2,1} + p_3 x_{3,1}$  …(解 1-14)  
 $w_1 = 0.98, \quad w_2 = 0.96$

$x_{1,2}, x_{2,2}, x_{3,2}$  : 各成分  
 の残液量 96wt%における液  
 相組成

以下、ターゲットとする残液量に至るまで同様の  
 手順で計算を繰り返す。

n回目の手順における一般式は次の通りである。

<プロパン>

$$\left(\frac{1-x_{1,n-1}}{1-x_{1,n}}\right)^{p_i} \cdot \left(\frac{x_{1,n}}{x_{1,n-1}}\right)^{p_j} = \left(\frac{w_n}{w_{n-1}}\right)^{p_i-p_j} \quad \dots(\text{解 1-15})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,n} - p_1 \cdot x_{1,n-1}}{1 - x_{1,n-1}} \quad \dots(\text{解 1-16})$$

<ノルマルブタン>

$$\left(\frac{1-x_{2,n-1}}{1-x_{2,n}}\right)^{p_i} \cdot \left(\frac{x_{2,n}}{x_{2,n-1}}\right)^{p_j} = \left(\frac{w_n}{w_{n-1}}\right)^{p_i-p_j} \quad \dots(\text{解 1-17})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,n} - p_1 \cdot x_{2,n-1}}{1 - x_{2,n-1}} \quad \dots(\text{解 1-18})$$

<イソブタン>

$$\left(\frac{1-x_{3,n-1}}{1-x_{3,n}}\right)^{p_i} \cdot \left(\frac{x_{3,n}}{x_{3,n-1}}\right)^{p_j} = \left(\frac{w_n}{w_{n-1}}\right)^{p_i-p_j} \quad \dots(\text{解 1-19})$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,n} - p_1 \cdot x_{3,n-1}}{1 - x_{3,n-1}} \quad \dots(\text{解 1-20})$$

但し、 $\pi_{0,n} = p_1 x_{1,n-1} + p_2 x_{2,n-1} + p_3 x_{3,n-1}$  …(解 1-21)

$x_{1,n}, x_{2,n}, x_{3,n}$  : 各成分の残液量  
 $w_n$  (wt%) における液相組成

尚、上記の手順を Microsoft Excel のユーザ一  
 定義関数として記述した例を解1・図5に参考と  
 して示す。

```

' i成分の蒸気圧計算
Function CalcPi(i As Integer, T As Double) As Double
    Dim K1, K2, X As Double
    ' i = 1 : プロパン, i = 2 : ノルマルブタン, i = 3 : イソブタン
    K1 = If(i = 1, 7.653, If(i = 2, 8.198, 7.838))
    K2 = If(i = 1, 2301#, If(i = 2, 2864#, 2648#))
    X = K1 - K2 / T
    CalcPi = Exp(X)
End Function

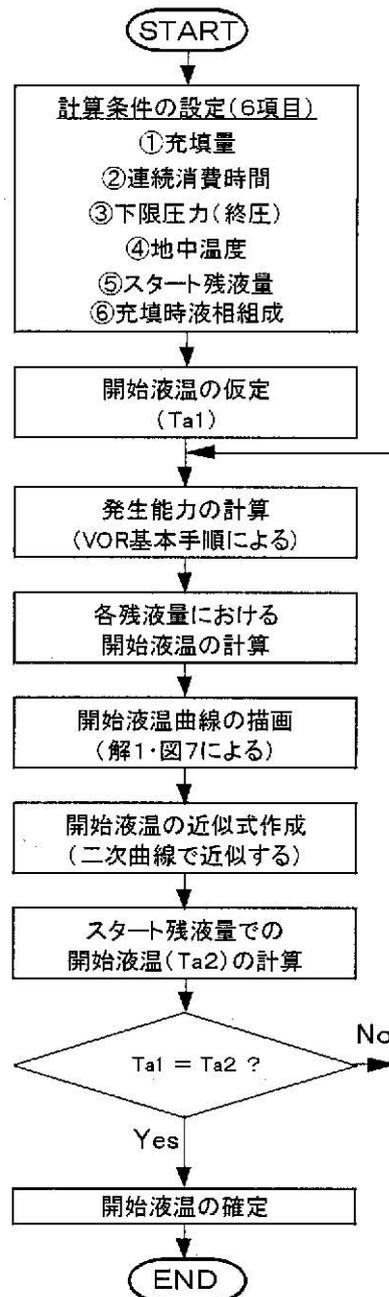
' j成分の蒸気圧計算
Function CalcPj(i As Integer, T As Double, X1 As Double, X2 As Double, X3 As Double) As Double
    Dim Xi, Ptotal, PartialPress As Double
    Xi = If(i = 1, X1, If(i = 2, X2, X3))
    Ptotal = 0#
    Ptotal = X1 * CalcPi(1, T) + X2 * CalcPi(2, T) + X3 * CalcPi(3, T)
    PartialPress = Ptotal - Xi * CalcPi(i, T)
    CalcPj = PartialPress / (1# - Xi)
End Function

' 液相組成の計算
Function CalcXi(i As Integer, T As Double, X1 As Double, X2 As Double, X3 As Double, Wratio As Double) As Double
    Dim Xf, Xmax, Xmin, Xave, Pi, Pj As Double
    Dim Xterm1, Xterm2, Xfunc1, Xfunc2, Xfunc As Double
    Dim Wterm, Wfunc, Diff, DiffAbs As Double
    Dim rep As Integer
    ' 初期値の設定
    Xf = If(i = 1, X1, If(i = 2, X2, X3))
    Xmax = If(i = 1, (Xf - 0.0005), 0.9999)
    Xmin = If(i = 1, 0.0005, If(i = 2, Xf, 0.0005))
    ' 液相組成を求める計算
    Pi = CalcPi(i, T)
    Pj = CalcPj(i, T, X1, X2, X3)
    Wterm = Pi - Pj
    rep = 0
    Do
        rep = rep + 1
        Xave = 0.5 * (Xmax + Xmin)
        Xterm1 = (1# - Xf) / (1# - Xave)
        Xterm2 = Xave / Xf
        Xfunc1 = Pi * Log(Xterm1)
        Xfunc2 = Pj * Log(Xterm2)
        Xfunc = Xfunc1 + Xfunc2
        Wfunc = Wterm * Log(Wratio)
        Diff = Xfunc - Wfunc
        DiffAbs = Abs((Xfunc - Wfunc))
        ' 収束条件の評価と次の値のセット(収束するまで)
        If DiffAbs <= 0.0001 Then
            Exit Do
        End If
        Xmax = If(Diff >= 0, Xave, Xmax)
        Xmin = If(Diff >= 0, Xmin, Xave)
    Loop Until (rep >= 200)
    CalcXi = Xave
End Function
    
```

解1・図5 自然気化消費における液相組成計算のリスト

## (3) 開始液温計算手順

Step1における任意の残液量における開始液温計算手順を解1・図6に示す。



…ここでいうスタート残液量とは、「任意の残液量」のことである。

…残液量の刻みは、上記の発生能力と連続消費時間から計算される。

…残液量と開始液温の計算結果をMicrosoft Excel上でグラフにする。

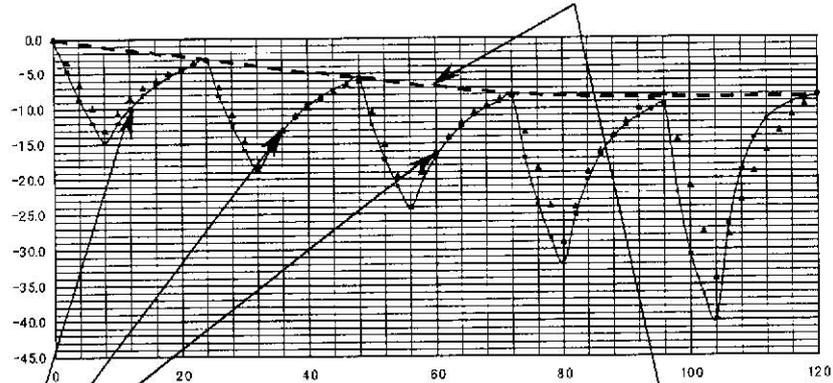
…Microsoft Excelの近似式作成機能により、二次曲線で近似する。

解1・図6 開始液温計算手順

解1・図6において開始液温曲線を描画する場合、残液量を発生能力と連続消費時間から計算し、本基準の(7)式(液温回復式)から次の消費における開始液温を求めている。

従って、この残液量変化の刻みでは、スタート残液量と必ずしも一致するとは限らないので、残液量に対する開始液温の変化に関する近似式(解1・図8)を作り、この近似式からスタート残液量における開始液温を計算している。即ち、今回のモデル化における開始液温は、実際の消費での残液量における液温と必ずしも一致するものではないが、地下埋設式バルク貯槽の発生能力を計算する上での仮想的な開始液温であるといえる。

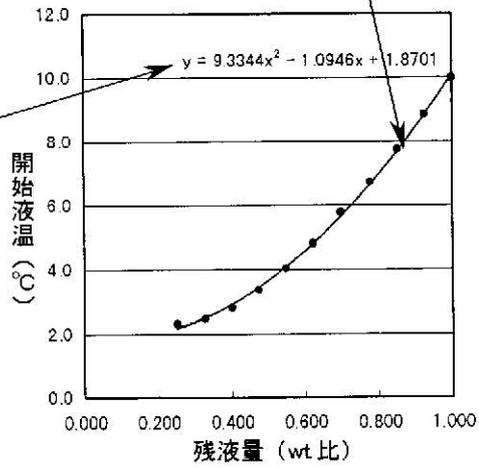
開始液温曲線



解1・図7 開始液温曲線

液温回復式による計算結果

開始液温近似式



解1・図8 開始液温近似式