

寒冷地ダムの取水塔部凍結防止パイプ内の熱移流について

An Analysis on the Thermal Diffusion in the Air Pipe for the Intake Structure

東洋大学工学部土木工学科 荻原 国宏

北海道開発局石狩川開発建設部 小川 稔

日兼特殊工業株式会社 坂口 外男

上野 信幸

凍結防止パイプについて

北海道内の表面取水塔については、冬期間に取水塔まはりの凍結を防止するためにエアーのジェットを湖底より水面に向けて噴出させて、水の流れを作ることによって、水面にも流れを作ることによって凍結を防止している。

この手法は非常にうまく機能しており、その様子を写真に示しておこう。写真-1は今回現地観測した取水塔であり、写真-2は取水塔内の水面を示しており、凍結していないことが良く判かる。

さて、この凍結防止装置のエアーコンプレッサーから取水塔脚部へエアーを送るパイプ中で水滴が凍結して徐々に成長して、パイプ全断面にまで発達してエアーの送出が不可能になる現象が発生した。写真の取水塔ではエアー送出用のパイプは8本用意されており、水中では2段にセットし上段に3本、下段に4本、予備が1本となっている。

配管の概略は図-2に示してある冬期間の表面取水用フロートは水中に沈めて使用することになっている。このような現象が昭和56年に発生したので昭和57年に現地観測を計画実施し、現象の解明と対応策を建てた。この論文はこのときの結果をとりまとめたものである。

現地観測時の気象と運転状況

現地観測を実施する前後における気温の状況は図-1に示してあるごとくマイナスの日々となってい



写真-1 取水塔全景

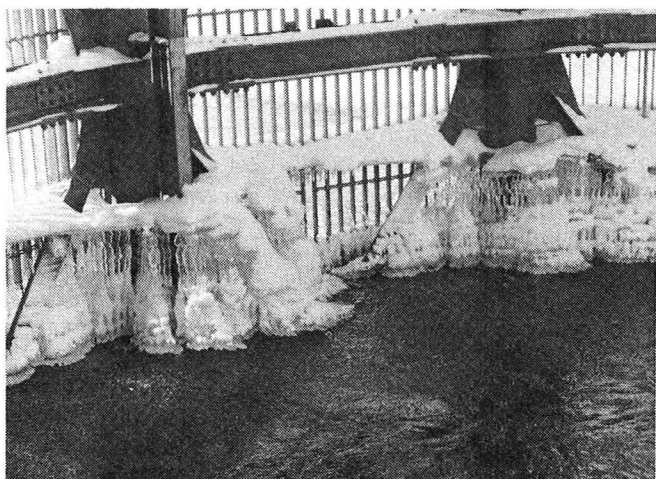


写真-2 塔内の水面

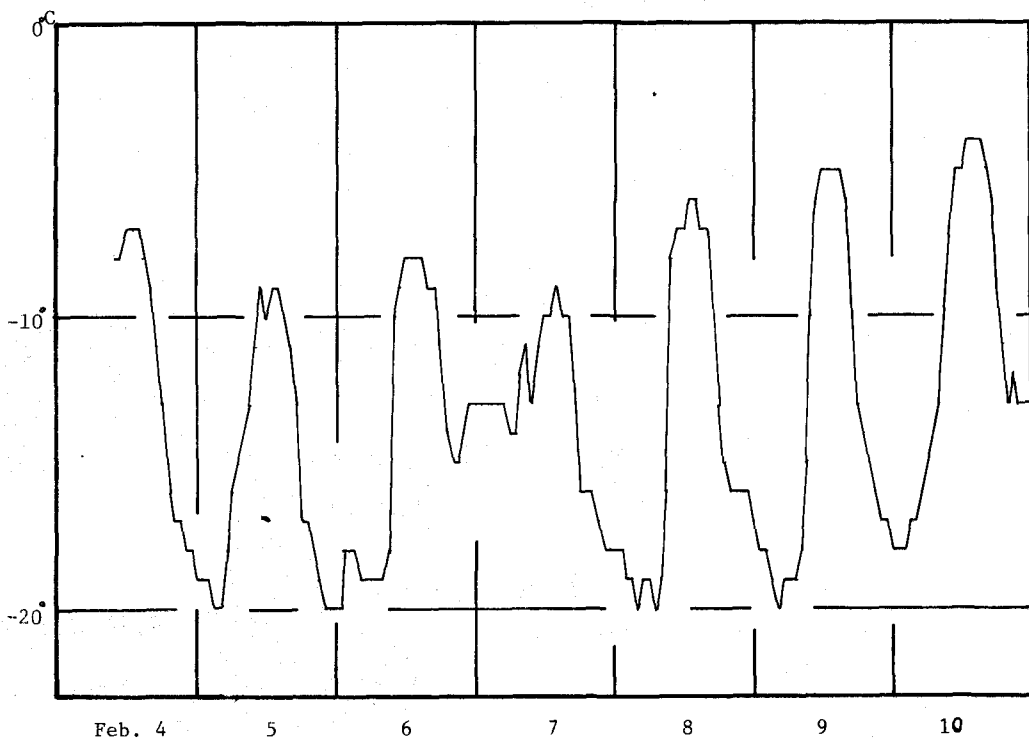


図 - 1

る。この記録は昭和57年2月4日から10日までである。現地観測は2月9日から10日にかけて実施した。

いづれの日も記録をみてもマイナスの気温になっており、したがってパイプ内に水があれば完全に凍結するはずである。その水がどこから補給されるかは確定的なことは言えないが、考えられるものとしては、コンプレッサーからの空気中に含まれるもの、パイプが閉鎖状態であるので、夏期の水面が高くしかも気温の高いときに蒸発したものが残留しているもの、管内に凍結が起ると水蒸気圧が変化して水面からの蒸発が促進されてくる水分、等が考えられる。

次に57年1月におけるエアパイプ内の凍結状況について、まとめておこう。

1月5日・6日・・・上段の配管の3本中1本が不通となっていた。この間のコンプレッサーの運転は30分間運転、1時間30分の休止のくりかえしであり、外気温は-18°Cであった。下部配管の4本中3本が不通となっていた。

1月8日・・・下部の内1本が通気となる。6日より連続運転をしていた。

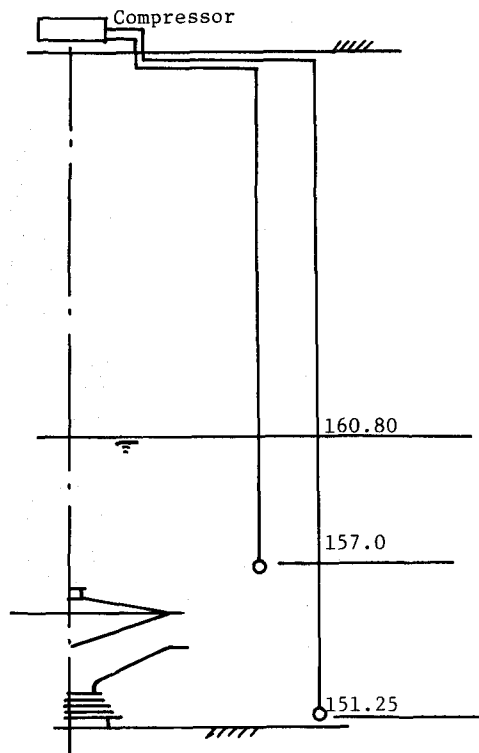


図 2

測定回数 測定時間(タイム) コンプレッサー運転状態			1 13:49 運転	2 15:00 運転	3 17:30 休止	4 20:30 休止	5 22:30 運転	6 1:30 運転	
温度 ℃	室内	エアーヘッダー	40	22	15	13	41	38	
		レシーバータンク	39	25	21	23	40.5	38	
	コンプレッサー本体			44	31	23	67.5	64	
	室外	入口部	-3	-5	-9	-14.8	-16.5	-17	
		ドア部	-4	-5	-10	-16	-18	-18	
	室内(中央)		2	3	2	-1	-2	-5	
	度	上部配管	B	29	11	8	6	27	29
			F	30	14	12	9	30	28
			D	33	12	10	8	32	30
		下部配管	A	30	10	7	3	27	28
E			30	13	11	8	30.5	28	
C	33		12	10	8	31	28		
室外	G	30	12	10	8	31	28		
	B		-6	-10	-16	-9	-13		
		A	-1	-5	-10	-16	-11	-11	

7 2:30 休止	8 5:30 休止	9 7:30 運転	10 8:30 休止	11 9:10 運転	12 9:20 運転	13 9:30 運転	14 9:40 運転
0	0	38	0	11	24	28	35
4.5	4.5	38	8	11	24	31	35
9	9	65	15	48	65	68	68
-17	-15	-11	3				
-18	-15	-14	-9	-8	-8	-8	-8
-7	-9	-5	-5	-4	-4	-3	-2.5
-7	-7	30	-3	7	18	23	35
-4	-5	28	-2	4	14	20	28
-6	-7	30	-3	7	18	22	25
-8	-8	28	-2	4	15	20	27
-5	-6	28	-2.5	5	15	20	24
-6	-6	30	-3	7	18	22	27
-6	-6	28	-2.5	6	16	21	26
-18	-16	-4.5	2				
-18	-16	-8	-5.5				

表- / 測定温度

ノ月22日・・・上部管が全通となる。しかし下部の内ノ本の通気が悪くなる。

ノ月28日-30日・・・下部管が全部不通となる。これ以降全管開通となるようにトーチランプで加熱工事をする。

以上のごとくなっているが、ノ月22日に下部管が流れなくなったのは、それまで上部で不通になっていたものが、開通するようになったため、こちらに多くのエアーが流れて、背後圧の高い下部には流れなくなったと考えられる。

現地観測時(2月9/0日)の状況

まづヘッドタンクから各管への流れが同じ

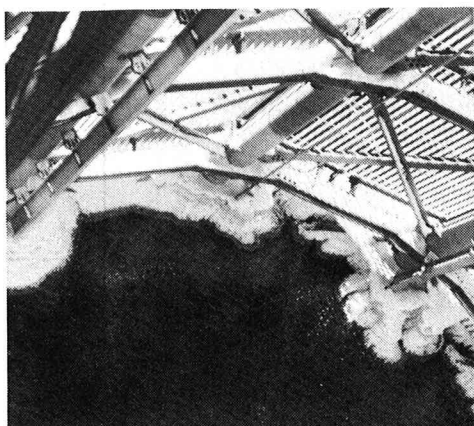


写真-3 塔脚部水面

になるように圧力の調整をした。

運転状況は2時間の連続運転に続き30分と停止を繰り返す方法によっている。測定項目は外気温、室内気温、コンプレッサー、ヘッドタンク、送気パイプの室内および屋外の温度を測定している。測定回数は全部で74回である。運転中のものが10回であり、休止中のものが4回である。

最後の4回は運転開始より10分間隔で40分まで測定している。他のケースは30分/時間30分の運転中の観測および運転停止後30分での測定となっている。

基準温度を外気温として、各測定値との差をとってデーターの整理をする。またパイプの温度は各管毎に差がないので平均して扱うことにした。

各測定点の温度の時間変化をグラフにしたのが図-3である。このグラフをみると判るごとく各点の温度が同じ傾向で上昇している、そこで同じデーターを半対数グラフにプロットしたのが図-4である。これにはヘッドタンクとパイプの2点、ヘッドタンクから3.5mと10mの所の温度変化をとり上げている。

理論的な検討

この現象はパイプ壁面よりの熱拡散、パイプおよび空気の熱伝達、およびコンプレッサーからの熱空気流による熱移流の現象であると考えられる。

コンプレッサーの運転中は熱移流項のある現象であり、停止中は熱拡散項のみの現象であると考えて以下の解析をする。

熱移流のあるときの熱拡散方程式は次のようになる。

$$\beta \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T}{\alpha} = \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

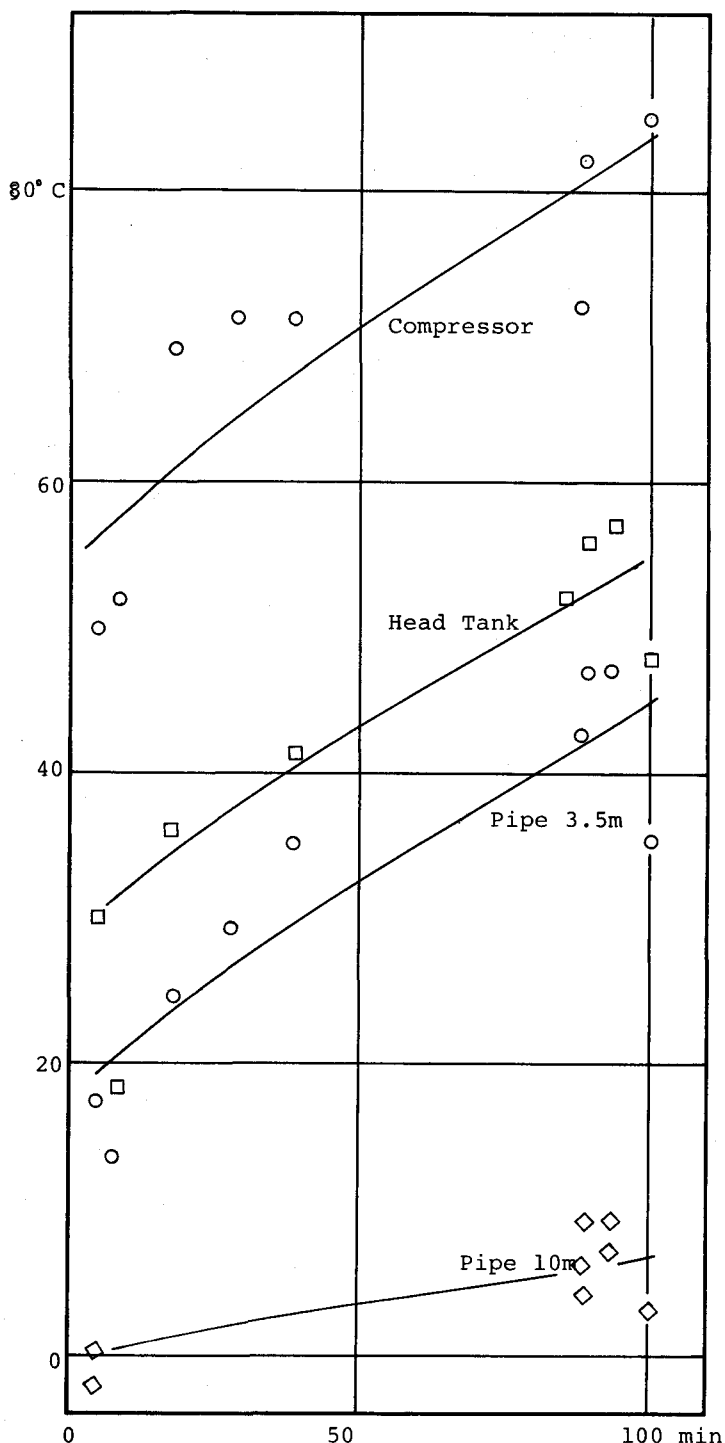


図 3

$$\beta = C_a \rho_a A_a + C_s \rho_s A_s$$

$$\gamma = k A_s, \quad \delta = \rho_a C_a u$$

$$\alpha = \frac{1}{2\pi h r_0} + \frac{1}{2\pi h r_i}$$

$$+ \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{2\pi k}$$

ρ_a, A_a, C_d は空気の密度、空気の部分のパイプ断面、および比熱である。また ρ_s

A_s, C_s は鋼管の密度、断面、比熱を表はす。

k は鋼管の熱伝導率、 h は熱伝達率（自然対流）を表はす。

r_0, r_i はパイプの外径および内径である。

この方程式の解は変数分離法によって解くことができる。次々となる。

$$T = \text{Exp}\left(\frac{\delta}{2\gamma}x\right) \cdot \text{Exp}(\lambda t)$$

$$\cdot \{B \text{Exp}(s_2 t) + C \text{Exp}(-s_2 t)\}$$

$$s_2 = \text{SQR}\left\{\left(\frac{\delta}{2\gamma}\right)^2 + \right.$$

$$\left. \frac{1}{\gamma}\left(\frac{1}{\alpha} + \beta\lambda\right)\right\}$$

..... (2)

また移流項のない場合の解は (/) 式で $\delta = 0$ として求められる。

$$T = \text{Exp}(\lambda t) \cdot$$

$$\{B \cdot \text{Exp}(s_1 x) + C \cdot \text{Exp}(-s_1 x)\}$$

$$s_1 = \text{SQR}\left\{\frac{1}{\gamma}\left(\frac{1}{\alpha} + \beta\lambda\right)\right\}$$

..... (3)

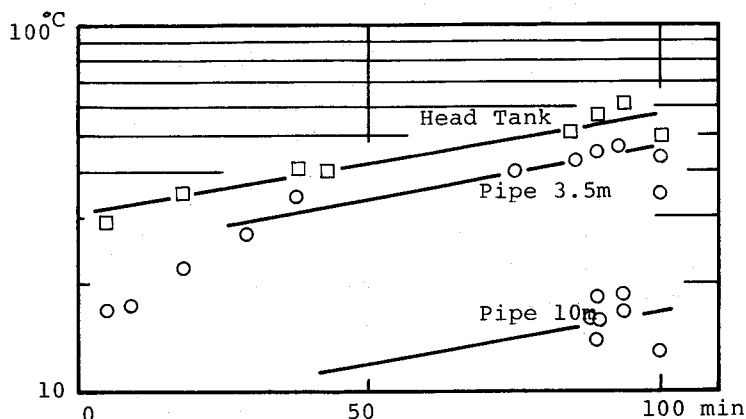


図 - 4

図 - 5

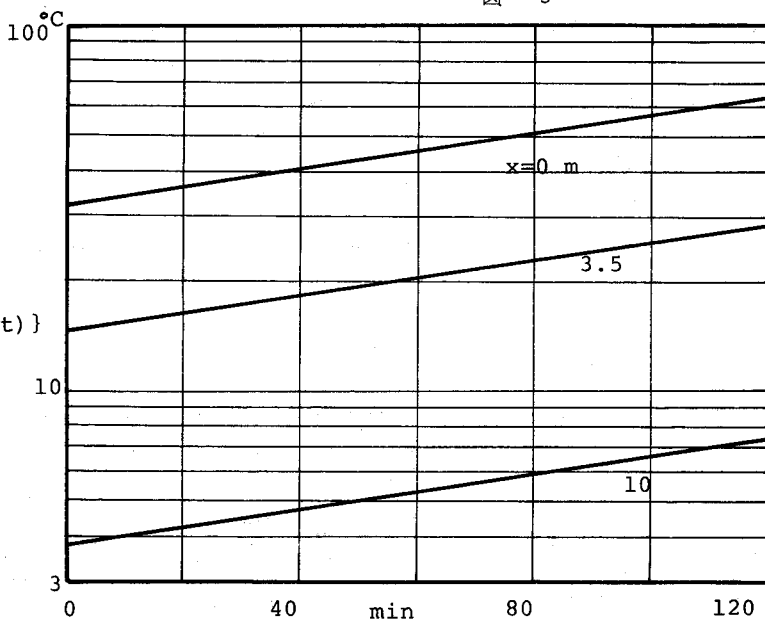
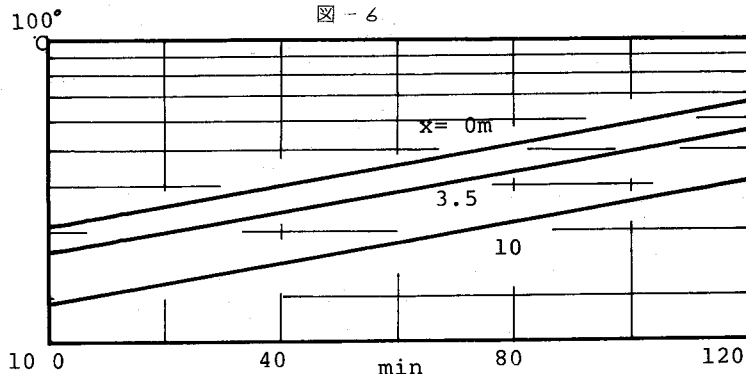


図 - 6



現地観測結果への理論の

摘要

これらの式を使って現地観測のデーターを解析してみる。まず(/) 式中の係を求めることにする。

パイプの内径 $r_i=2.72$ 肉厚 0.25 cm および空気と銅管の諸係数を次のようにとて α, β, γ の値を求めると以下のようになる。

$$C_a = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\rho_a = 1.4128 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 10 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

$$C_s = 0.46 \text{ kJ/kg K}$$

$$\rho_s = 7865 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 86.9 \text{ cm K/W}$$

$$\beta = 7.027 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/K cm}$$

$$\gamma = 0.6964 \text{ cm W/K}$$

(SI unit)

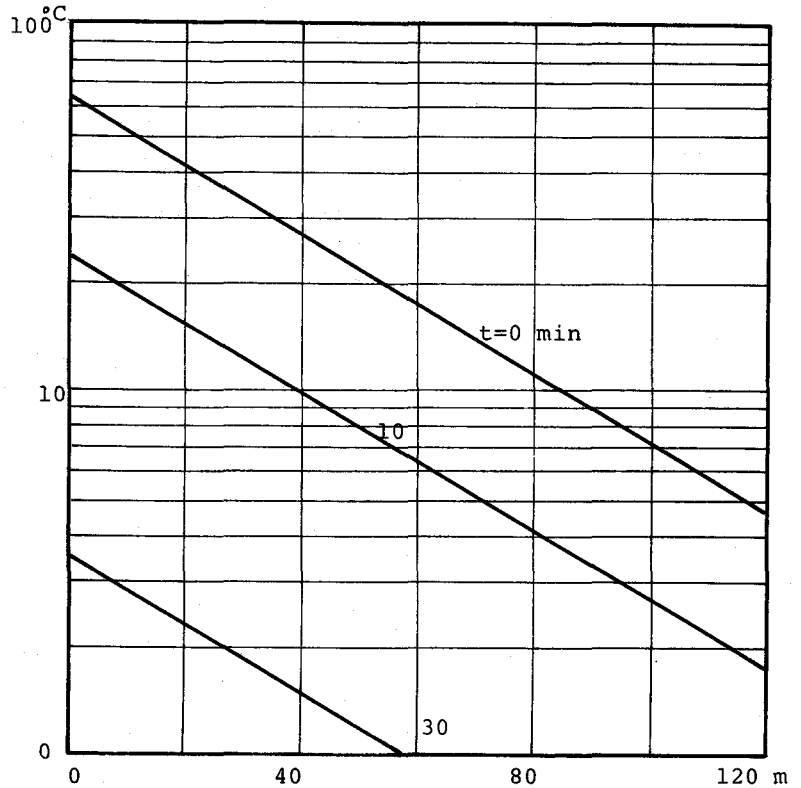


図 - 7

次に δ の値であるが流速 u の大きさが良く判らないので温度の観測値より次のようにして決めることにした。

図-4でヘッドタンクからパイプの観測点までの温度上昇のずれが33分であることを注目して、ヘッドタンクでの温度 $T(x, t) = T(0, t)$ は33分後に $x = 3.5$ m のパイプの温度観測点に表はれるので

$$T(0, t) = T(3.5, t_x)$$

$$t_x = t + 33 \quad (4)$$

の関係があることが判る。

またヘッドタンクの温

度上昇曲線より(2)式の時間項の係数 λ は

$$\lambda = 1.015 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sec}$$

となり、(2)式に(4)式の関係を摘要することによって u が求まり、さらに流速 u が求まる。

$$u = 6.85 \text{ m/sec}$$

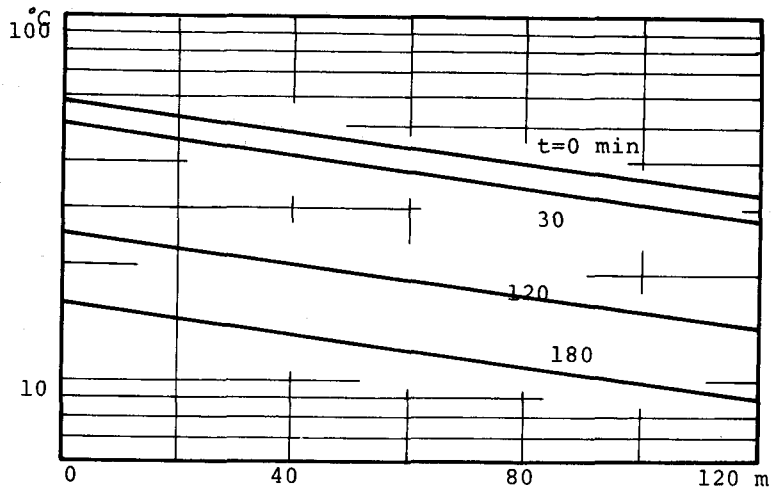


図 - 8

このようにして得られた係数を使ってパイプの温度測定点の温度の上昇を計算し時間（コンプレッサーの運転開始のりの経過時間）との関係でグラフ表示したのが図-5である。ただしこのときの温度は気温（ $-1/5^{\circ}\text{C}$ ）との差で表はしてある。

$x = 10\text{ m}$ の地点での値は屋外の測定点に相当しており120分後で7°Cアップで現地観測値との相関は良く一致している。

次にコンプレッサー停止後の冷却状態について計算してみよう。

現地と同じようにコンプレッサーは2時間連続運転して停止したとすると、この時点でパイプが持っていた温度分布が冷却過程の初期条件となるので(2)式で $t=120$ 分としたときの x に関する式と(3)式で $t=0$ 分としたときの x に関する式が同じでなければいけないことより(3)式の s_1 の値が求まり、さらに s_1 と λ の関係式より冷却過程における λ の値が次のごとく求められる。

$$\lambda = -1.638 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sec}$$

s_1 と λ が求まったのでパイプ中の温度分布の変化をコンプレッサーの運転停止後10分と30分について求めたのが図-7である。これから判るごとく30分経過するとパイプの温度は4°Cアップ以下になってしまっていることが判る、10分後でも外気に厳しくさらされる4m以遠では10°Cアップ、外気温が $-1/5^{\circ}\text{C} \sim -1/8^{\circ}\text{C}$ であることを考えると当然のこと、として水滴は凍結してしまう状態になっていると考えられ現地の状況と良く合致している。

改良案について

改良工事としてはパイプの太さをより大きくする、断熱材をまく、コンプレッサーの能力アップをする等種々と考えられるが、最っとも工事がしやすく効果の期待できる断熱材をパイプに巻いて、さらに配管の水平部分の工事を実施した。

そこで断熱材を巻いた場合のパイプの温度変化について、先の場合と同じように計算してみる。断熱材はグラスウールを使用している。グラスウールの密度、比熱、熱伝導係数の値は

$$C_p = 0.837 \text{ kJ/kg K}$$

$$k_p = 0.02966 \text{ W/m K}$$

$$\rho_p = 96 \text{ kg/m}^3$$

である。ヘッドタンクまでは先の場合と同じとして諸係数を求めると次のごとくなる。

$$\alpha = 7.12 \text{ m K/W}, \beta = 11.36 \text{ J/K cm}, \gamma = 1.61 \cdot 10^{-2} \text{ W cm/K}$$

$$\delta = 5.67 \text{ J/K cm}, \lambda = 1.015 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sec}$$

$$\lambda = -1.236 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sec}$$



写真-3 工事中の取水塔

これらの値をもとにしてコンプレッサー運転時のパイプの温度上昇を求めたのが図-6である。2時間運転後には外気温にさらされるノ0m地点でも40°Cアップまでになっていることが判る。改良前に比して42°Cの相異がでている。

次に2時間運転後のコンプレッサー停止時の冷却過程について計算したのが図-8である。これには停止後30分、ノ20分、ノ80分の経過後の温度分布を示してあるが、ノ0m地点を注目してみると、30分後では30°Cアップ、ノ20分でノ5°Cアップ、ノ80分でノ0°Cアップとなっていることが判る。したがって改良前に比較して大きく改善されていることが判る。

(温度の表示はS I単位ではKであるが、グラフと本文の説明に限り従来通りの表示°Cを使いました。)

参考文献

ノ) 伝熱工学 上, 下 J R ホールマン, 平田 賢監訳 プレイン図書

2) 凍結防止装置、エアー配管調査、対策報告書, 昭和57年2月 日兼特殊工業株式会社