

円管内の氷層の成長

その他（別言語等） のタイトル	Ice Formation in the Cylindrical Pipe
著者	水野 忠治, 野沢 勝広, 榎 清
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	5
号	2
ページ	741-751
発行年	1966-08-25
URL	http://hdl.handle.net/10258/3274

円管内の氷層の成長

水野忠治・野沢勝広・榎 清

Ice Formation in the Cylindrical Pipe

Chuji Mizuno, Katuhiro Nozawa and Kiyoshi Enoki

Abstract

Some experiments are made on freezing still water in the cylindrical pipe, with a view to explain experimentally the process of ice formation. And the results are compared with the analytical ones already discussed as the thermal conduction with state change.

The nomograph to predict the freezing time is presented for actual systems.

I. 緒 言

水の凍結機構に関しては、従来いくつかの研究がある。例えば、A. L. London, R. A. Seban¹⁾, W. D. Murray, F. Landis²⁾, 甲藤・西村³⁾, S. Lin⁴⁾, 河合・馬淵⁵⁾がこれであるが、相変化を伴い、かつ移動熱源問題であるため、特殊条件のもとの厳密解、あるいは近似解があるのみである。我々は大気中に露出した裸管内の静水が外気温の低下により凍結する過程を実験的に明らかにして、寒冷地における水道管などの凍結による障害防止のための工学的資料をえる目的で、低温室内に各種管径の塩化ビニール管を置き、凍結過程および完全凍結時間などを実例し、既発表の研究との比較検討を行なって、円管内の氷層の成長過程を明らかにしさらに凍結時間に関する簡易な計算図表を作成した。

II. 実験装置および実験方法

実験装置は図-1に示すとおりである。①はモーター（容量1馬力）、②は冷凍機、③は膨張弁、④は自動調整弁で、冷凍函内温度を自動調整するごとくしてある。⑤は凍冷函本体で600 mm×600 mm×600 mmである。⑥は蒸発用銅管で冷媒としてダイフロン R-12 を使用、⑦は供試用円管で詳細は後述する。⑧は水の凍結による容積膨張量を測定するためのガラス製の容積測定器、⑨は自動温度記録計で、冷凍函内温度ならびに円管内・外表面、円管中心温度を記録する。供試用塩化ビニール円管の詳細は図-2および表-1に示すとおりであり、その内径は52 mm, 77 mm, 100 mm, 125 mmの4種で、上下部は断熱材で断熱してある。円管には L_1 の高さまで水を入れ、更にその上部にはトルエンを満して置き、またトルエンの高さと

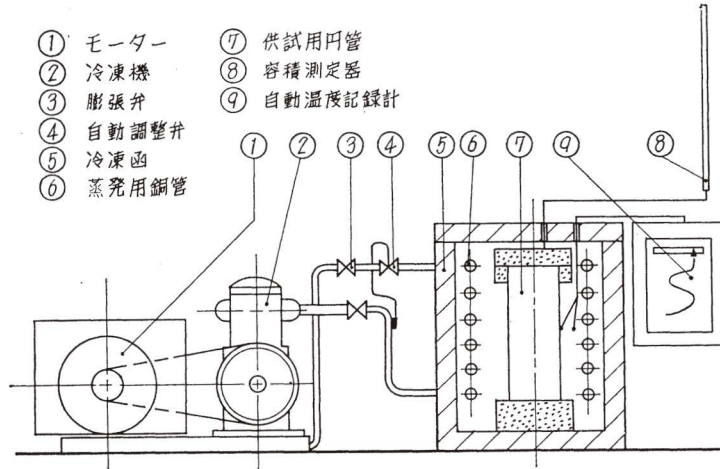


図-1 実験装置

表-1 供試用円管等の詳細表

番号	項目	管名			
		塩化ビニール管			
1	内径 D_1 (mm)	52	77	100	125
2	外径 D_2 (mm)	60	89	114	140.2
3	厚さ t (mm)	4	6	7	7.6
4	水の高さ L_1 (mm)	247	251	251	255
5	管の長さ L_2 (mm)	290	295	295	300
6	断熱材の幅 L_3 (mm)	43	44	44	45
7	水の容積 (cc)	523	1173	2002	3130
8	トルエンの容積 (cc)	92	207	353	550
9	外表面積 (m ²)	0.0490	0.0702	0.0900	0.112
10	内表面積 (m ²)	0.0422	0.0607	0.0725	0.100
11	冷凍函温度 (°C)	-35	-35, -29, -16~-18		

同じ部分まで外面を断熱材で断熱した。管の水の高さの 1/2 の位置で管の中心、内外両表面にそれぞれ図示のごとく熱電対をつけ、上部密閉板に 10^φ mm の孔をあけ、トルエンを容積測定器に導くためのガラス管を取付けた。

実験方法は、まず冷凍函内温度を表-1に示した実験温度に保ち、一方前述のとおり準備した円管ならびに水、トルエンを 4°C 前後に一樣にして冷凍函内部に入れる。温度記録計によって円管内外表面および冷凍函内温度を測定し、逐次円管の内外温度および函内温度の変化が一定となり、それより少し遅れて円管中心に取付けた熱電対が 0°C を示す。この時から容積測定器に表われる容積変化すなわち、氷層の

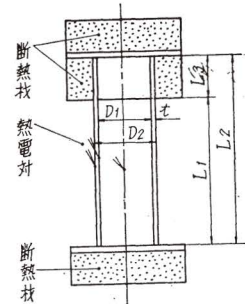


図-2 供試用円管詳細

生成量を連続測定した。凍結完了は温度記録計に表われる円管中心部温度の下降状況と容積測定器の読みの両者より決めた。

III. 理論および実験結果と考察

1. 理論

円管の内表面から半径が減少してゆく方向へ氷層の成長（水は氷点にあるとして）する機構およびその熱回路は Seban らの表示によれば、図-3 のようになる。ここで水の熱容量の影響はその潜熱に比し無視する。この回路において、円管の単位長さ当りの氷の抵抗 R_i [m·hr·°C/kcal] および表面抵抗（円管壁抵抗を含む） R_0 [m·hr·°C/kcal] は次のごとく表わされる。

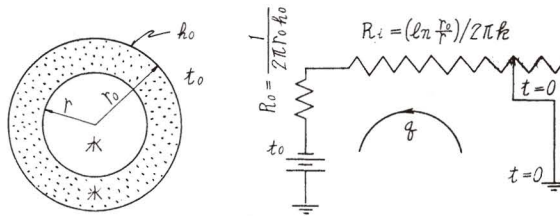


図-3 円筒氷生成の熱回路表現

$$R_i = \frac{\ln r_0/r}{2\pi k} \tag{1}$$

$$R_0 = \frac{1}{2\pi r_0 h_0} \tag{2}$$

ここで r_0 [m], r [m] は、それぞれ円管の内半径、および成長する氷表面の内半径を、 k [kcal/m·hr·°C] は水の熱伝導率を、 h_0 [kcal/m²·hr·°C] は円管壁の熱貫流率を表わす。

氷および表面の有する抵抗は直列になっているが、これらを通して流れる熱流 q [kcal/m·hr] は、 t_0 [°C] を凍結温度 (0°C) と周囲温度との差とすれば、

$$q = \frac{-t_0}{R_i + R_0} \tag{3}$$

また、この熱流は、表面 r において凍結に必要な凝固の潜熱に等しい。

$$q = -2\pi \rho L r \frac{dr}{d\tau} \tag{4}$$

ここで、 L [kcal/kg], ρ [kg/m³] はそれぞれ氷の凝固の潜熱および密度を、 τ [hr] は時間、 $-2\pi r dr/d\tau$ は成長表面での氷形成の体積割合を表わす。ゆえに、

$$-2\pi \rho L r \frac{dr}{d\tau} = -t_0 \left(\frac{\ln r_0/r}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r_0 h_0} \right) \tag{5}$$

無次元半径 $r^* = r/r_0$, 無次元抵抗 $R^* = h_0 r_0/k$, 無次元時間 $\tau^* = (-t_0 k/\rho L r_0^2) \tau$, を代入すれば、

$$\left(-\ln r^* + \frac{1}{R^*}\right)r^*dr^* = -d\tau^* \tag{6}$$

境界条件として、

$$\begin{aligned} \tau = 0 \quad r = r_0 \quad \text{または} \quad \tau^* = 0 \quad r^* = 1 \\ \tau = \tau \quad r = r \quad \text{または} \quad \tau^* = \tau^* \quad r^* = r^* \end{aligned}$$

式(6)の解は次のようになる。

$$\tau^* = \frac{r^{*2}}{2} \ln r^* + \left(\frac{1}{2R^*} + \frac{1}{4}\right)(1 - r^{*2}) \tag{7}$$

この式においては $r^* \geq 1$ 。

管内の水全部が凍結するまでに要する無次元時間 $\tau_{r^*=0}^*$ は式(7)より、

$$\tau_{r^*=0}^* = \left(\frac{1}{2R^*} + \frac{1}{4}\right) \tag{8}$$

ゆえに、時間 $\tau_{r^*=0}$ は式(8)より次のごとくして求まる。

$$\tau_{r^*=0} = \frac{L\rho r_0^2}{-t_0 k} \left(\frac{1}{2R^*} + \frac{1}{4}\right) \tag{9}$$

2. 実験結果と考察

A. 凍結過程

凍結量の測定結果を、横軸に凍結開始からの経過時間 (hr) を、縦軸に氷層生成量に対応する膨張量 (cc) をとって示すと 図-4 のとおりで、いずれも生成量は凍結開始時に逐次増加し、以

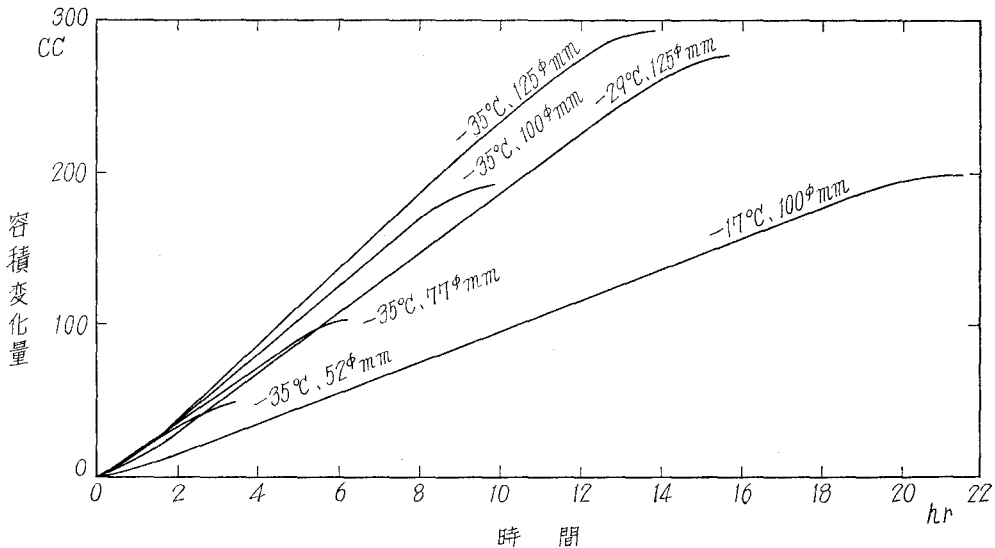


図-4 凍結速度

後一定量となり、終りに急に減少する傾向にある。これを無次元時間 τ^* を横軸、無次元容積変化量 $(1-r^{*2})$ を縦軸とし、 R^* (表-2) をパラメーターにして図示すれば、図-5~図-9 のとおりである。なお、図中の実線は式 (7) に示す Seban らの計算値を示す。

実測値と Seban らの計算値とを比較すると、凍結の開始時において氷層の生成速度がとくに遅れるが、 τ^* が 0.1~0.2 以後の時間経過においては計算値と傾向はよく一致する。凍結の開始時に氷層の生成速度がとくに遅れることについては、次の原因が考えられる。

- (i) 水が完全に凍ての部分において 0°C とはなりえない。
- (ii) 凍結の始めに過冷却状態がありうる。
- (iii) 容器の熱容量の影響

凍結完了の近くで再び計算値と傾向を異にするが、これは実験試料の端面の影響が大きいと思われる。なお Seban らの式は氷の熱容量を無視しているのので、この差異も含まれるものとする。

表-2 h_0 の実測値と R^* の値

冷凍函温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-35				-29	-16~-18		
	52	77	100	125	125	77	100	125
管内径 (mm)	52	77	100	125	125	77	100	125
h_0 (内表面基準) ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	8.4	7.4	6.6	6.0	6.0	6.0	6.2	6.0
$R^* = h_0 r_0 / k$	0.106	0.142	0.166	0.188	0.188	0.115	0.155	0.188

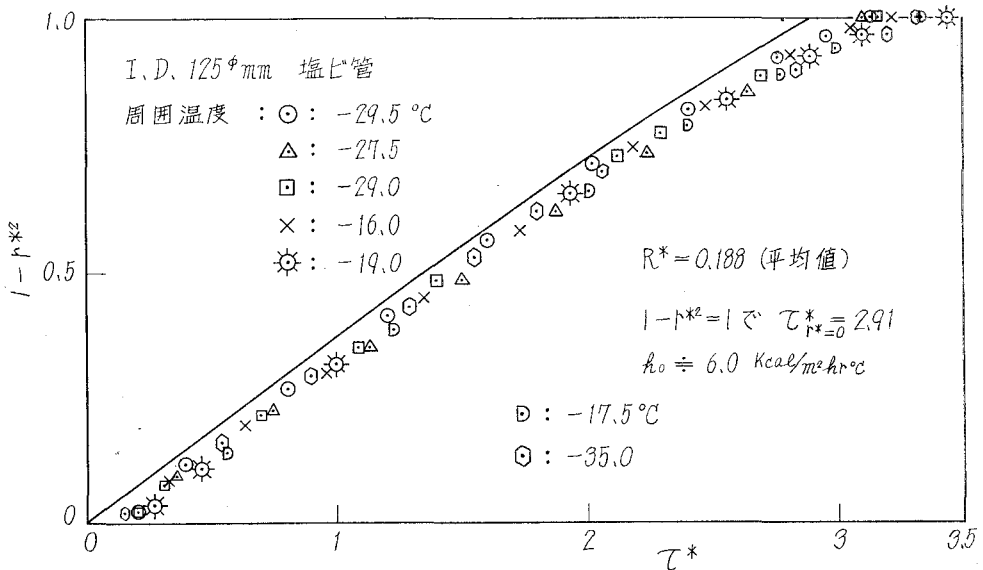


図-5 成長過程の計算値と実測値 (125 ϕ mm)

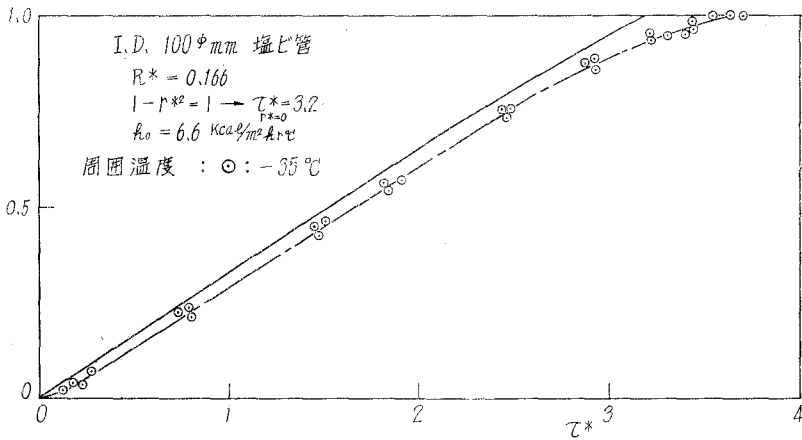


図-6 成長過程の計算値と実測値 (100φ mm)

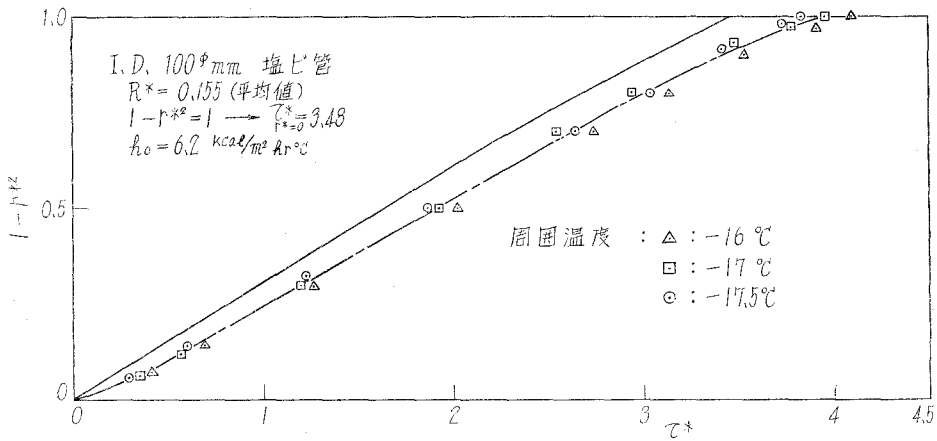


図-7 成長過程の計算値と実測値 (100φ mm)

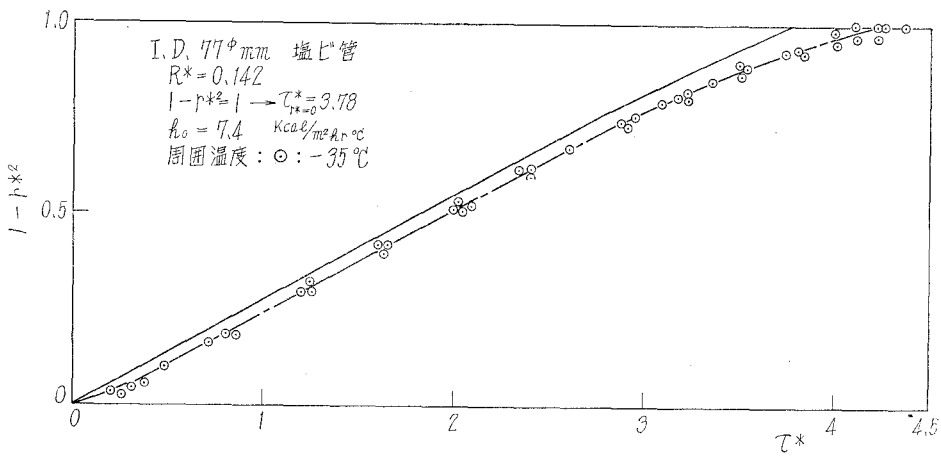


図-8 成長過程の計算値と実測値 (77φ mm)

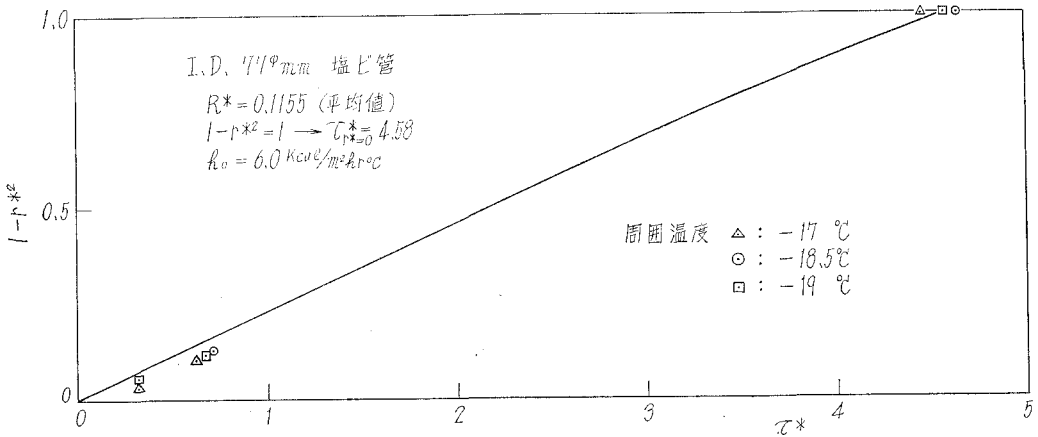


図-9 成長過程の計算値と実測値 (77 mm)

B. 完全凍結時間

各種内径ごとの完全凍結までの時間について、実測値を計算値と比較すると表-3のとおりである。図-10は管内径と完全凍結時間の関係を、 h_0 をパラメーターとして、実測値を計算値と比較したものであり、また図-11は温度差をパラメーターとして両者を比較したものである。これによると、凍結完了までに要する時間は、実測値に較べてSebanらの式による計算値が一般に短い時間を示しており、その相違は約15%である。この点についてSebanらも、この計算式は水の熱容量を潜熱に比較して無視しているため凍結速度は5~10%をこえない範囲で実際の場合より早い値を与えると述べている。以上のことから、凍結開始時に氷層の生成速度が遅れることをさらに考慮するならば、Sebanらの計算式は実際の凍結速度より早い値を示すことは明らかである。

冷寒大気中に露出した円管内の静水の凍結による障害防止の立場からは、現実的には外気温度も、円管表面の熱伝達の条件もともに変動していることから、対策を考慮するときには凍結速度の早いSebanらの式を利用することがむしろ安全側にあることとなる。図-12は $h_0=50$ kcal/m²·hr·°Cの場合の計算値である。

表-3 完全凍結時間の実測値(平均)と計算値との比較表

冷凍函温度 (°C)	-35				-29	-16~-18		
	52	77	100	125	125	77	100	125
管内径 (mm)	52	77	100	125	125	77	100	125
A: 計算値 (hr)	3.5	5.7	8.6	12	14.3	13.3	18.8	24
B: 実測値(平均) (hr)	3.7	6.4	9.8	13.7	15.5	13.5	21.5	27.5
$\frac{B-A}{A} \times 100$ (%)	5.7	12	14	14	8.5	1.5	14.3	14.5

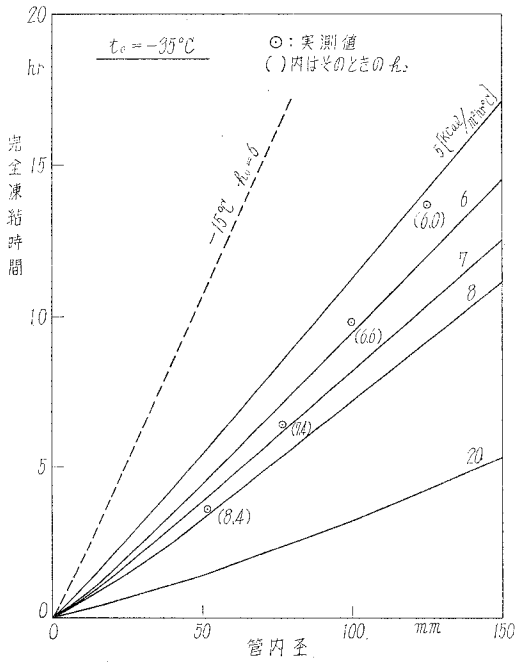


図-10 管内径と完全凍結時間 (h_0 をパラメーター)

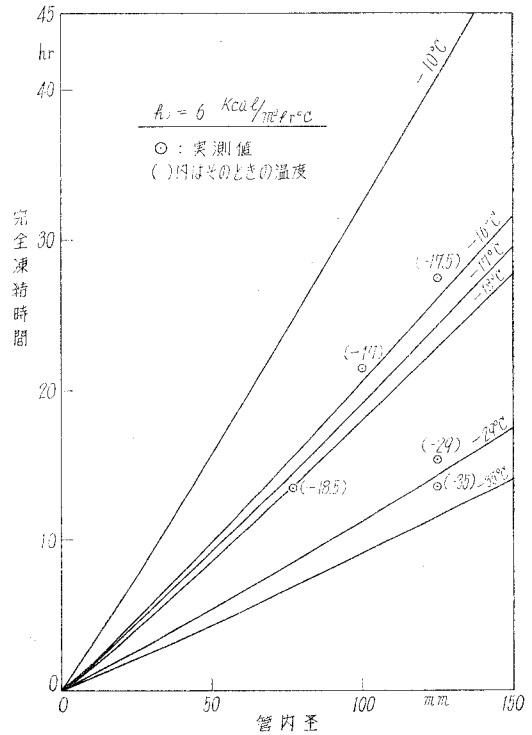


図-11 管内径と完全凍結時間 (t_0 をパラメーター)

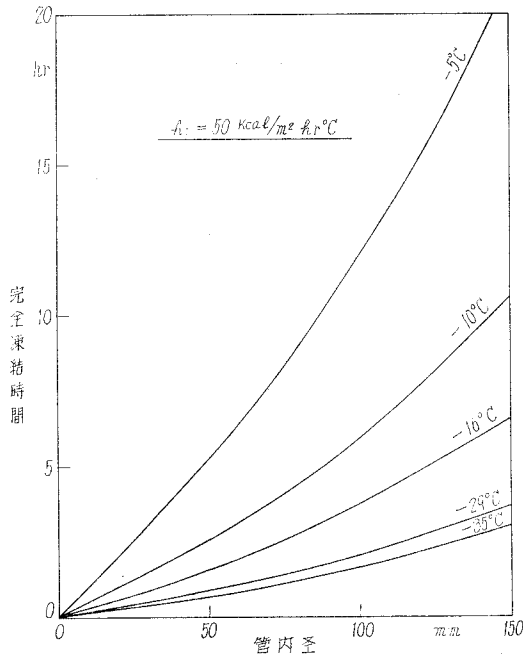


図-12 管内径と完全凍結時間

3. 無限長円管の完全凍結時間の計算図表

円管内の水が完全に凍結を完了するまでの時間を求めるのに Seban らの計算式を用いるとすれば、管表面の放熱および管保温の条件 h_0 、外気温度 t_0 、管径 r_0 の3個の変数を含んでいる。実用に便のため、これら3つの条件を含む簡易な計算図表を作成した。

式(9)を変形すると次のごとくなる。

$$\tau_{r^*=0} = \frac{1}{|t_0|} \left(\frac{L\rho r_0}{2h_0} + \frac{L\rho r_0^2}{4k} \right) \quad (10)$$

式(10)に

$$P = \frac{L\rho r_0}{2h_0} + \frac{L\rho r_0^2}{4k} \quad (11)$$

として式(10)を変形すると次のごとくなる。

$$\tau_{r^*=0} = \frac{1}{|t_0|} \cdot P \quad (12)$$

式(11)に

$$A = L\rho r_0/2h_0 = A_1 r_0/h_0 = S/h_0 \quad (\text{ただし, } A_1 = L\rho/2, S = A_1 r_0) \quad (13)$$

$$B = L\rho r_0^2/4k = B_1 r_0^2 \quad (\text{ただし, } B_1 = L\rho/4k) \quad (14)$$

を代入すると、

$$P = A+B = A_1 r_0/h_0 + B_1 r_0^2 = S/h_0 + B_1 r_0^2 \quad (15)$$

ゆえに、式(12)は次のごとく表わされる。

$$\tau_{r^*=0} = \frac{1}{|t_0|} (A+B) = \frac{1}{|t_0|} \left(\frac{A_1 r_0}{h_0} + B_1 r_0^2 \right) \quad (16)$$

水について L, ρ, k は氷点において定数と考えられるので、 A_1, B_1 も定数となり 図-13 の計算図表によって完全凍結時間を求めうる。

例 題：

管内直径 (I.D.) = 125^φ mm, $h_0 = 6 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, $t_0 = -35^\circ\text{C}$, の場合の完全凍結時間の求め方を示す。

管内直径 [mm] 軸上に 125 の読みの位置に ① をとり、矢印にしたがって ②, ③ と進む。② より管内半径 [ft] に垂直に直線を引き半径軸, $B = B_1 r_0^2$ 曲線, $S = A_1 r_0$ 線との交点をそれぞれ ③, ④, ⑥, とする。点 ④ より B 軸に垂線をひき B 軸上の読み B をとる。点 ⑥ より S 軸への垂線を延長して $h_0 = 6$ の線との交点 ⑧ を求め、⑧ より A 軸に垂線をひき A 軸との交点 ⑨ を求めると此の読みが A となる。A 軸上に先に求めた B の読みを A に加える、即ち $P = A+B$ 。P 点より A 軸に垂線をひき、 $t_0 = -35^\circ\text{C}$ の線との交点 ⑩ を求め、⑩ より完全凍結時間 [hr] 軸へ垂線をひき ⑪ を求めると、この読みより完全凍結の時間 12 hr が求められる。

本例題の $h_0=6 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ は静穏大気中の裸管に相当する値であるが、例えば強風下では $h_0=30 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ 程度となり、完全凍結時間が 3 hr となる。また、10 mm 程度の保温材をほどこし $h_0=4 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ となったとすれば、完全凍結時間は 17 hr となる。このように外気条件、保温程度が凍結防止におよぼす影響を容易に求めることができる。

IV. 結 言

1. 大気中に露出した円管内の静水の凍結について実験を行ない、凍結速度に関する Seban らの計算式との比較を行なった。実測値と Seban らの計算値との相違は、計算式の仮定により生ずる 5~10% 以下の差と実験条件による違いで、計算値は実測値より約 15% 少ない結果を示した。

2. 円管内の水が完全に凍結を完了するまでの時間の算出に便のため、管表面の放熱および管保温の条件、外気温度、管径をパラメーターとする実用計算図表を作成した。

終りにあたり、本実験の当初から御懇切な御指導を賜った北海道大学 斎藤武教授、関信弘教授、ならびに本学 千谷茂教授に深甚な謝意を表する。

(昭和 40 年 10 月、日本機械学会・精機学会北海道支部第 10 回講演会にて講演)

(昭和 41 年 4 月 30 日受理)

文 献

- 1) A. L. London, R. A. Seban: Trans. A S M E Vol. 65 (1943-10), 771.
- 2) W. D. Murray, F. Landis: Trans. A S M E Vol. 81 (1959-5), 106.
- 3) 甲藤・西村: 日本機械学会論文集, 26-165 (昭 35), 715.
- 4) S. Lin: VDI-Z., 28-106 (1964), 1379.
- 5) 河合・馬淵: 日本機械学会論文集, 18-67 (昭 27), 66.