



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 斎藤, 図 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/777

密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係

齊藤 図

Relation between Pressure Rise due to Freezing of Water Filled in a Circular Tube and Heat Transfer Conditions on the Surface

Hakaru SAITO

Abstract

Pressure rise due to freezing of water enclosed in a circular tube has been studied in this paper. A theoretical model is established by considering the heat transfer conditions on the outer surface of the tubes, elastic deformations of the tube walls, and change in the freezing temperature of water due to the increase in pressure. Numerical calculations were performed to integrate the theoretical equations. The calculated results showed a good agreement with the experimental results.

The new dimensionless parameters have been introduced, by combining the results thus obtained for various different conditions, to correlate the pressure in tubes to heat transfer conditions on the surface and physical properties and the dimensions of tubes.

使用記号

a	: 温度拡散率	R_t	: $R_o - R_b$: 管の肉厚
C	: 比熱	ΔR_i	: 氷層の厚さ
E	: 縦弾性係数	F^*_{crit}	: 無次元凍結破壊時間
h	: 管表面における熱伝達率	ΔR_i	: $\Delta \tau$ 内に成長する氷層厚さ
m	: ポアソン数	ΔR_w	: 氷層 ΔR_i が凍結前に占めていた水の層の厚さ
P	: 管内の圧力	T	: 管内における水の温度
P_{crit}	: 限界応力 σ_{crit} をもたらず管内圧力	T_f	: 管内水初期温度
		T_o	: 外気温度
無次元数;		ΔT_f	: ΔR_i の氷層成長に伴う圧力上昇による氷点降下
Bi	: ビオー数 = (hR_o/λ_s)	$T_f - T_o$: 管内水初期温度と外気温度の差
ΔQ	: 圧力上昇に伴う管の変位量	$\Delta W = \Delta R_i - \Delta R_w$: 凍結による体積増加
R_o	: 管の外半径		
R_b	: 管の内半径		

B^*	: 修正ビオー数 = $Bi / \ln(1 + R_o/R_b)$ = $(hR_o / \lambda_s) / \ln(1 + R_o/R_b)$	ギリシャ文字 ;
Fo	: フーリエ数 = $a_i \tau / R_b^2$	ρ : 密度
F^*	: 修正フーリエ数 (無次元時間) = $Fo \times Ste$	λ_s : 管材料の熱伝導率
P^*	: 無次元圧力	σ : 応力
Ste	: ステファン数 = $C_i (T_f - T_o) / L$	σ_{crit} : 限界応力
		$\Delta \tau$: 時間刻み
		添字 ;
		i : 氷を表わす
		w : 水を表わす

1. 緒 言

冬季間、水道配管内の水が凍結し体積膨張によって水道管が破壊することがよくある。この現象は、本質的には水の凍結にともなう体積膨張にその原因があることはいうまでもない。管内水の一部が凍結しその体積膨張によって残りの水を排除するとき、水が逃げ場を失うことによるのである。

管内の水層の進行は、外からの冷却、凍結の進行に伴う潜熱の放出、管内水からの供給熱などのバランスによって決定される伝熱現象であり、一方、管の破壊は管内水の圧力上昇による管壁内応力が破壊限界を越えることによるものである。従って、凍結破壊の問題は相変化を伴う複合伝熱問題と材料力学との連成問題としてとらえなければならない。

管内の凍結問題は、古くからいわゆる Stefan 問題として扱われてきており、現象がきわめて身近のものであることならびに問題の数学的興味とも相まって、多くの報告がある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。それらの研究とここに報告する管内凍結破壊問題との間には本質的な違いがある。これまでの研究においては凍結が水の3重点において起こり、凍結境界面の温度が凍結の進行によって変わらない、としている。これに対し、本研究の対象とする問題では、氷層厚さの増加によって管内圧力の上昇の大きさは常圧から管の破壊圧力にいたる広い範囲であって、その結果、凍結温度は水の3重点とは著しく異なったものになる。⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾。従って、このような凍結問題は、単純な Stefan 問題として扱うことはできない。

本研究は、種々の管径における凍結破壊過程と管外表面における熱伝達条件との間の関係を明らかにするため、いくつかの条件下における破壊実験を行った実測例を示すとともに、これまで著者らが提案してきている物理的モデルによる数値実験結果を示し、管内圧力と管外表面温度及び熱伝達率、ならびに管の強度など材料力学的性質を含めたパラメーターの相互関係を提案す

るものである。

2. 凍結破壊に関する理論的考察

2.1 理論モデルの概要

図1は、密閉管内における水の凍結に関する理論モデルの概要を示したものである。すなわち、外径 R_o 、内径 R_b 、壁の厚さ $R_t = R_o - R_b$ の円筒管内に温度 T_f の水が密封されていて、管表面からの冷却によって管内表面に厚さ $R_b - R_i$ の氷層が成長している。外気の温度 T_o を一定、 $\Delta \tau$ 時間内に成長する氷層厚さを ΔR_i 、それに伴う圧力上昇による氷点降下を ΔT_f とする。

氷層形成のための潜熱および管内水の氷点降下に相当する顕熱が管表面から除去されるものとする、氷層内表面におけるエネルギーバランスは次のように表される。ただし、氷層内における顕熱変化は無視し、管内水の温度は一様と仮定している。

$$L \rho_i \frac{dR_i}{d\tau} = \lambda_i \frac{dT}{dr} - \frac{1}{2} \rho_w C_w R_i \frac{dT_f}{d\tau} \quad (1)$$

ここに、 L ：凝固の潜熱、 ρ ：密度、 λ ：熱伝導率、 C ：比熱であり、添字 w および i はそれぞれ水及び氷に対する値であることを示す。

氷層 ΔR_i が凍結前に ΔR_w を占めていたとすると、凍結によって $\Delta W = \Delta R_i - \Delta R_w$ だけ体積が増したことになる、管が密閉されていれば圧力の上昇をもたらす。この圧力上昇によ

って氷面が外側へ向かって変位するが、この変位を ΔQ とし、管内水の体積変化を ΔV とすれば、

$$\Delta V = \Delta W - \Delta Q \quad (2)$$

ΔV は圧力上昇による水の体積変化であるから、圧縮率 α を用いて表わせばつぎようになる⁽⁴⁾。

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = -\frac{1}{2} \alpha R_i \quad (3)$$

ΔQ は、内圧 ΔP を受ける厚肉円筒の変形量と同じであるから、 $\bar{R}_o = R_o/R_b$ 、 $\bar{R}_b = R_b/R_i$ とおくことにより、

$$\Delta Q = \left(\frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} + \frac{1}{m_i} \right) \frac{\Delta P}{E_i} R_i - \frac{2\bar{R}_b^2}{\bar{R}_b^2 - 1} \cdot \frac{\Delta P_b}{E_i} R_i \quad (4)$$

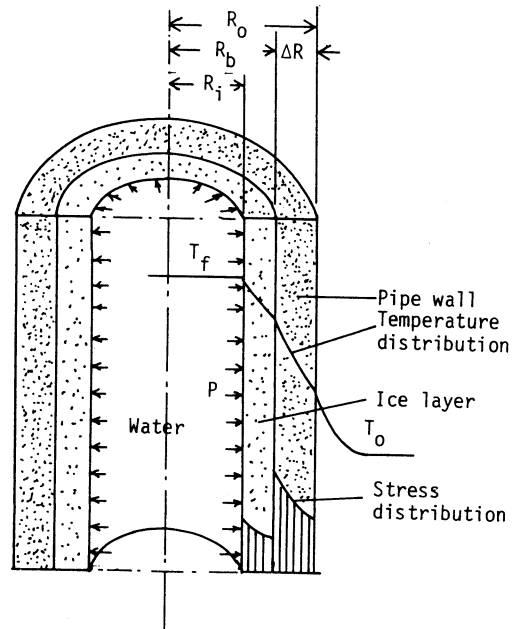


図-1 理論モデル

式(4)中、 ΔP_b は氷層と管内表面の境界における圧力の増分で、次式より得られる。

$$\Delta P_b = \frac{2 \Delta P / \{E_i (\bar{R}_b^2 - 1)\}}{\frac{1}{E_s} \left(\frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} + \frac{1}{m_s} \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} - \frac{1}{m_i} \right)} \quad (5)$$

ただし、 E ：縦弾性係数、 m ：ポアソン数、添字 s および i は管材料及び氷に対する値であることを示す。このとき管内表面に生じている周方向応力 σ は、

$$\sigma = \frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} P_b \quad (6)$$

$\Delta \tau$ 時間内における圧力変化 ΔP による密度変化を $\Delta \rho$ とすれば、圧縮率 α は定義より、 $\alpha = (\Delta \rho / \Delta P) / \rho$ なる関係がある。また、凍結前の厚さ ΔR_w の水が凍結によって厚さ ΔR_i の氷になったとすると、凍結前後の質量保存から、 $\rho_i \Delta R_i = \rho_w \Delta R_w$ でなければならない。これらの関係及び前掲の諸式より、 ΔP について解くことができる。すなわち、

$$\Delta P = \frac{(1 - \rho_i / \rho_w) \Delta R_i}{\frac{1}{2} \alpha R_i + \frac{R_i}{E_i} (A - B)} \quad (7)$$

式(7)中の A 及び B は次の関係から求められる。

$$A = \frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} + \frac{1}{m_i}, \quad B = \frac{4\bar{R}_b^2 / (\bar{R}_b^2 - 1)^2}{\frac{E_i}{E_s} \left(\frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} + \frac{1}{m_s} \right) + \left(\frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} - \frac{1}{m_i} \right)}$$

これらにの関係より微小時間 $\Delta \tau$ に生じた圧力上昇 ΔP を求めることができる。

また、圧力上昇に伴う氷点温度 T_f の変化は Clapeyron - Clausius の式、

$$\frac{dT_f}{dP} = \frac{T_f (v_w - v_i)}{L} \quad (8)$$

より求められる。ただし、 v は比体積である。

2.2 数値計算過程の概要

- [1] 式(1)において、 $dT_f/d\tau = 0$ において初期氷層厚さを求める。
- [2] 氷層内および管壁内の温度分布を準定常仮定に基づいて計算する。
- [3] ついで、式(6)より ΔP の第1近似値を求める。
- [4] この結果に基づいて式(7)より氷点降下 ΔT_f を計算する。
- [5] これらの結果から、初期に仮定した $dT_f/d\tau$ を補正し、式(1)により新たな氷層厚さを計算する。[2]～[4]と同様の過程を ΔP が所定の精度で収束するまで繰り返す。
- [6] 時間刻みを $\Delta \tau$ 進め、[1]以下の過程を繰り返す。

この計算では、温度分布 T 、凍結温度 T_f 、氷層径 R_i および圧力 P などの変数についてことごと

とく収束させねばならないが、実際に計算を行なってみると、圧力 P の収束がもっとも遅いので、計算途中における収束の判定には P の収束状況を監視すれば十分である。本計算では、繰り返し前後の P の差と最後にえられた P の比が 10^{-5} になったときをもって繰り返しを打ち切った。また、式(1)の氷層成長に関する数値解を求めるには、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いた。なお、管内水の初期温度は 0°C と仮定した。

2.3 無次元数の導入

非定常熱伝導問題においては、無次元時間として Fourier 数 Fo を用いるが、半径 R_b の円管内の熱伝導現象に適用すれば、

$$Fo = \frac{a_i \tau}{R_b^2}$$

である。ここに、 a_i ：氷の温度拡散率 $= \lambda_i / (C_i \rho_i)$ 、 C_i ：氷の比熱、 ρ_i ：氷の密度である。

凍結現象などの相変化と熱伝導の共存系においては、無次元時間 F^* は、Fourier 数 Fo を修正してつぎのように定義すると便利である。

$$F^* = Fo \times Ste$$

無次元数 Ste は、Stefan 数で次のように定義される。

$$Ste = \frac{C_i(T_f - T_o)}{L}$$

ここに、 C_i ：氷の比熱、 $T_f - T_o$ ：管内水初期温度と外気温度、 L ：水の凝固の潜熱である。管表面の熱伝達条件に関わる無次元数は、管表面における対流抵抗の大きさと管壁を通じての伝導抵抗の比の形、すなわち Biot 数、で表わされるが、この研究の対象とする現象においては、管を通じての伝導抵抗が管の半径によって異なり、また、氷層の成長につれて時間的に変化することを考慮し、修正 Biot 数の第 1 近似として次の無次元量 B^* を導入する。

$$B^* = \frac{Bi}{\ln(1 + R_t/R_b)} = \frac{hR_o/\lambda_s}{\ln(1 + R_t/R_b)}$$

ここに、 h ：管表面における熱伝達率、 λ_s ：管材料の熱伝導率である。

管が破壊にいたる限界応力 σ_{crit} を生じさせる管内圧力 P_{crit} とすると、これら両者の関係は、式(7)において $P_b = P_{crit}$ とおくことにより求めることができる。すなわち、限界応力 σ_{crit} は、内半径 R_b 、肉厚 $R_o - R_b$ の円管内に厚さ $R_b - R_i$ の氷層があり、その氷層内面に圧力 P_{crit} が作用したときに管壁内に生ずる応力である。従って、無次元圧力 P^* を、実際に生じている圧力 P と P_{crit} との比として定義すれば、無次元圧力 P^* は実際の応力 σ と限界応力 σ_{crit} の比を表わすことになる。いいかえると、無次元圧力 P^* は、管の凍結破壊現象を整理するのに有効な指標であるといえる。

3. 結果と考察

3.1 実験の概要

3.1.1 圧力測定実験

本実験は、円管内に密封された水が管外面から熱伝達により冷却され、管の内表面に氷層が成長する際の管内圧力の上昇、円管の変形、管内水の温度などを時間ごとに測定し、計算結果の妥当性を検証するものである。

実験は長さ300mm、外径34mm、内径27.6mmの炭素鋼管の内部に十分脱気した水を封入し、これをあらかじめ所定の温度まで冷却してあるブライン槽内に投入することにより行った。管内部の圧力上昇は直接測定することが困難であったので、鋼管の外表面に歪ゲージを貼付し、管の周方向歪の測定値と材料の縦弾性係数より、内部圧力を計算した。また、管外表面温度は、管両端および管長手方向中央部に熱電対を取り付けて測定した。

3.1.2 氷層成長可視化実験

可視化実験には、透明アクリル管にメチレンブルーにて着色した水を入れ、管周囲にブライン液を循環させ、外部より観察、写真撮影した。アクリル管は、長さ550mmで、外直径44mmのものと外直径24mm、内直径20mmのもの2種類を使用した。

3.2 実験結果の例

3.2.1 可視化実験による氷層厚さ並びに各部温度変化の測定例

図2は、可視化実験から得られた氷層厚さの時間的変化を各部の温度変化とともに示したものである。氷層厚さは、管底方向から写真より読み取ったものである。この図によると、氷層の成長は冷却開始約6分経過してはじめて認められるようになる。この時間遅れは、管と管内部の水の

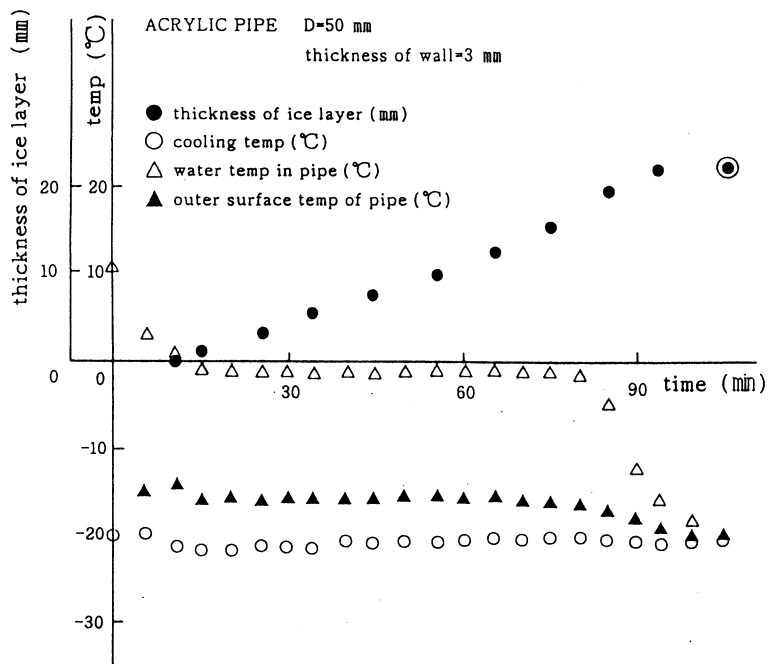


図2 氷層厚さ並びに各部温度変化

熱容量によるものである。これは、管内水温の時間的変化 (Δ 印) をみると、冷却初期にはおよそ14℃で、それ以降急激に温度降下して約7分にて0℃に達していることから明らかである。氷層は、いったん成長を始めると時間とともにはじめは直線的に成長し、やがて成長速度を早める傾向がある。これは、未凍結水部分全体に樹枝状結晶が分布しており、その部分の水は過冷却状態になるためと考えられる。なお、図中の◎印は、凍結完了点である。この例では冷却開始後およそ100分であった。管の外表面温度は、実験開始時約-17℃であるが、管内水の温度低下につれて約-18~-19℃になり、凍結の進行によって著しい変化は認められない。しかし、氷層成長の速度が増し、管内水の温度が低下する時点からは、やや下降し、凍結終了時には-25℃で、ブライン温度と等しくなっている。

3.2.2 管内圧力実測例

Fig.3 は、水を密封した鋼管を温度-20℃のブライン槽内に投入した場合の圧力の時間的上昇を示した例である。この図によると、投入後約5分から管内部圧力の上昇が認められ、時間に関してほぼ直線的に増加する。投入後13分以降は、それまでの圧力上昇に比べてきわめて急速に上昇する。その後、投入後約20分を経過した頃から、管内圧力の上昇傾向が弱まり、次第に一定値に近づく傾向を示している。このような管内圧力の時間的変化は、管外側の冷却条件、管の寸法、材質、ならびに水の初期温度などに関わらず、つねに観察される一般的傾向である。この圧力上昇は、さきにも述べたよう

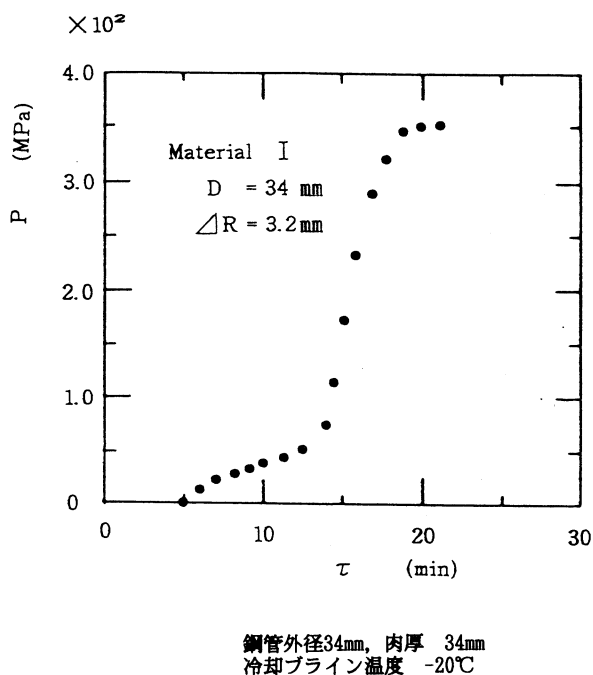


図3 管内圧力実測例

に、管の変形が材料の弾性限内にあるとの仮定によるものであるから、この図の後半部分に見られる圧力の急上昇については、圧力の絶対値は必ずしも正確ではなく、定性的傾向を示すものである。また、実験終了後の検討によれば、ここに示した例では、管内に容積率で約2%の空気を含んでおり、初期における圧力上昇開始時間の遅れはおもにこれによるものと考えられる。密閉管内の水の凍結による圧力上昇は、管材料の力学的性質ならびに熱物性、管表面の冷却に関わる伝熱学的条件、冷却温度並びに管内水の初期温度など、種々の要因に影響されるが、管内に氷層が生ずる限りどのような条件のもとにおいてもきわめて短時間に生ずるものである。

3.3 計算結果と実測値との比較

3.3.1 計算結果の吟味 — 実験結果との比較 —

本節では、先に述べた理論に基づく数値計算結果と実測値の比較を述べる。

図4中、(a)は、前野ら⁽⁶⁾による小径、肉厚管（直径：5mm，肉厚：12.5mm）に対する例である。実測は、内直径5mmの銅管に水を入れ温度 -10.6°C にて冷却凍結した際の圧力変化である。冷却開始後

5分経過すると、圧力は約4MPaに達し、およそ10分後までは上昇の程度は減少しつつも約7MPaになり、それ以降は顕著な圧力上昇は認められない。

一方、計算値は実測値のおよそ1/2の上昇速度で約17分で7MPaに達している。計算値と実測値は、初期の上昇過程においてはやや開きがある。これは、さきも述べたように、実測値は歪みが材料の弾性限度内にあるとの仮定を前提としているが、供試円管が銅製であって弾性係数がかならずしもはっきりしないこと、および理論式が歪一応力の直線関係に基づいていること、変化がこの種の熱現象としては比較的早く、装置全体の熱容量の問題があることなどを考え合わせると、この程度の差異はやむをえぬところであろう。

一方、図4中の(b)は内径27.6mm，肉厚3.2mm，冷却温度 -20°C の場合に対するものである。実測値圧力は冷却開始よりただちに上昇しはじめ、10分後頃からやや上昇の程度を下げつつ、およそ15分後には16MPaに到達している。計算値は、これに対し、約10分頃まで実測値によく追従しているが、それ以降は少々実測値よりも高めの値を示している。この原因もさきに述べたように、本研究における理論の弾性仮説によるものである。従って、これらの結果を総合すれば、前章にて提示した諸式によって与えられる結果は、材料が弾性限度内にある限り妥当なものであることがわかる。

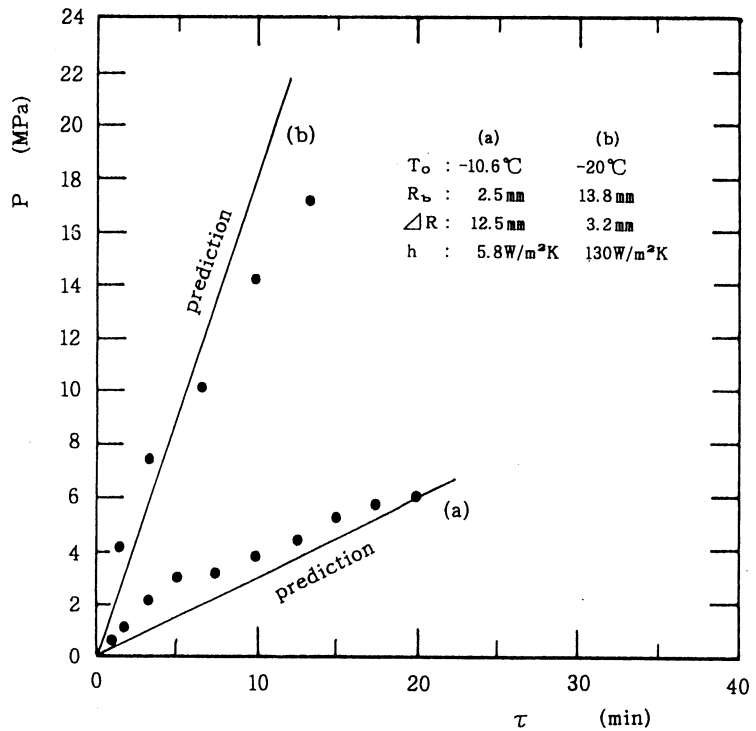


図4 計算結果と実測値の比較

3.3.2 計算条件

本研では表1に示した材料からなる管を想定し、数値実験を行った。また、後述の伝熱条件に関する無次元数の値ならびに水の物性値は、それぞれ、表2および表3のごとくである。

表1 管材料の物性値

材 料 名	縦弾性係数 GPa	ポアソン数 —	限界応力 GPa	熱伝導率 W/(mK)
I	206	3.45	0,445	46.5

表2 水の物性値 (−5℃)⁽⁹⁾

縦弾性係数 GPa	ポアソン数 —	圧縮率 m ³ /N	熱伝導率 W/(mK)
9.8	2.94	4.5×10^{-10}	2.2

表3 計算条件

T ₀	B*	F*	T
−30~−5℃	0.01~10	0.01~10	0.0001~5 h

3.4 管内圧力の時間的变化

図5は肉厚3mmで内半径5mmないし75mmの管の凍結に関する計算結果をまとめたものである。すなわち、縦軸にはそれぞれの管内水の圧力を、横軸には凍結開始後の経過時間をとってある。その際、管の周囲空気の温度 $T_0 = -10^\circ\text{C}$ とし、管表面における対流条件は、熱伝達率 $h = 5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (一定) としている。この図を見ると、密閉管内に封入された水が、管外表面からの冷却によって凍結し、管の内表面に氷層として成長する場合、凍結による水の比体積の増加によって生ずる管内圧力の上昇に関する一般的傾向を読み取ることができる。管内の圧力 P は、氷層形成初期には伝熱条件や管径によらず、きわめて急速に上昇し、時間の経過とともに次第に上昇の速度が遅くなる。しかし、これらの結果を諸条件によって詳細に検討すると、つぎのようなことがわかる。すなわち、周囲温度 T_0 、管表面における熱伝達率などの条件が同じであれば、管内半径 R_b が小さいほど管内圧力の上昇が著しい。たとえば、管内径 $R_b = 5 \text{ mm}$ で、周囲温度 $T_0 = -10^\circ\text{C}$ の場合では、 $\tau = 1$ 時間後の管内圧力は約 60MPa に達している。これは、管の内表面に成長した氷層が同じであれば、半径の小さい場合ほど、全容積に占める氷の割合が相対的に大

きくなることによるものである。また、図には示していないが、管径が同じであれば、周囲温度 T_0 が低いほど管内部の氷成長が早くなるので、結果的に管外圧力の上昇も早いことはいうまでもない。管内圧力の上昇は、時間の経過によって徐々にその上昇速度が緩やかになることはすでに述べたが、管内圧力上昇鈍化の程度は、管の内半径が小さい場合ほど顕著に現れる。この原因も上に述べたのと同じように、管内容積に対する氷層の占める容積割合の差異によるものである。きわめて細い管たとえば半径 $R_b = 5\text{ mm}$ 程度の管においては、長時間経過すると圧力上昇が停止する。これは、管内圧力の上昇による水の凍結温度の低下によるもので、ここに示した例では、 $\tau = 4.5$ 時間後には、管内水の凍結温度は周囲空気の温度と同じになる。いかえると、この時点で水の成長が停止し、それ以降、管内の水は凍結することがない（不凍結管）。

3.5 圧力変化の無次元表次

種々の管径および伝熱条件について、管内圧力の時間的変化を計算し、前節にて示した無次元数で整理した結果を図6に示す。なお、この図は、材料Iを想定した結果で、 $B^* = 0.01, 0.1$ および 1.0 の場合について示しても、無次元圧力 P^* は無次元時間 F^* の増加とともにおおむね直線的に上昇し、 F^* が大きくなるにつれて P^* の上昇が鈍化する傾向が認められる。その場合、比 $\Delta R/R_b$

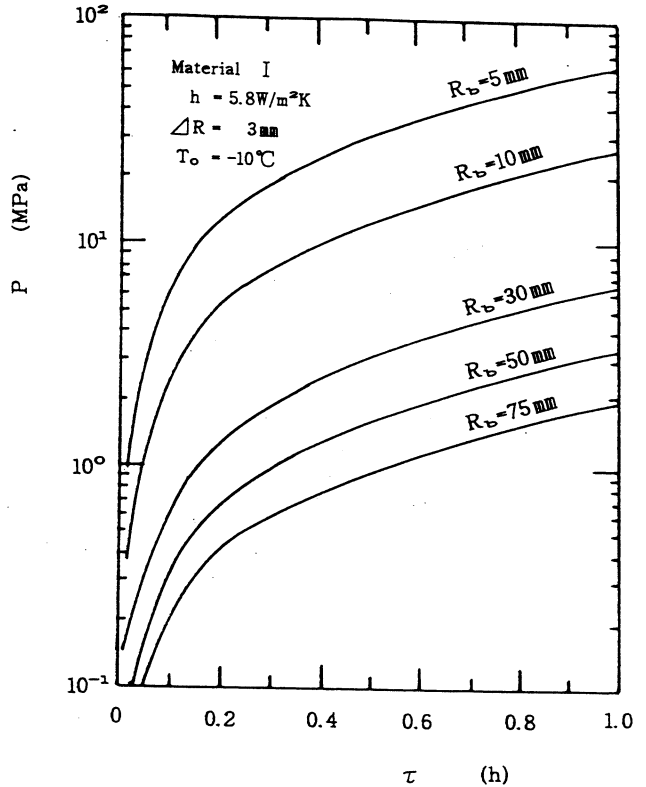


図5 管内圧力の時間的变化

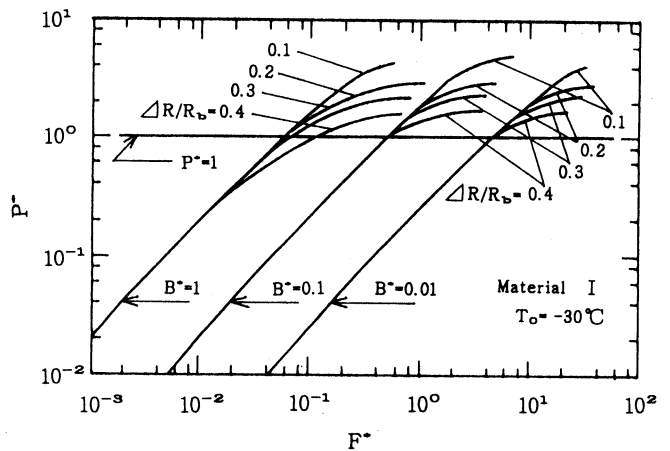


図6 圧力変化の無次元表示

の差異による無次元圧力 P^* への影響も現れ、この比の大きいほど無次元圧力が高くなる傾向がある。これは、比 $\Delta R/R_b$ が大きい場合には、管径が小さくかつ肉厚の厚いことを意味するが、そのような管においては圧力上昇がきわめて急速であることに対応する。また、パラメータ B^* が大きいほど、小さな無次元時間 F^* で高い

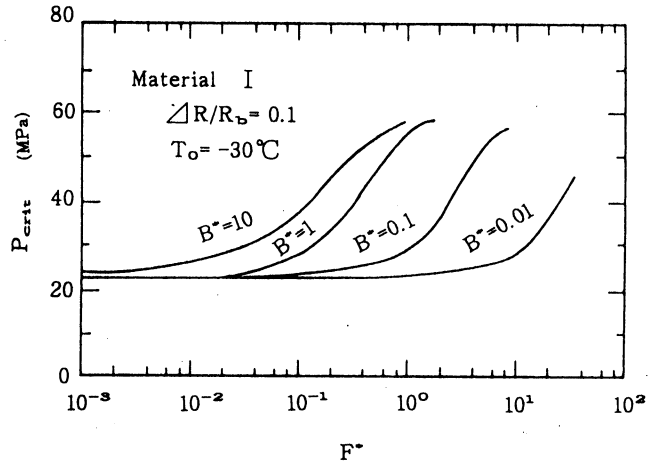


図7 限界圧力の F^* による変化

B^* が大なる場合は管からの熱伝達が良好であることを意味する。従って、無次元圧力 P^* のことといえる。

から、図において $P^* = 1$ なる点は、管内の圧

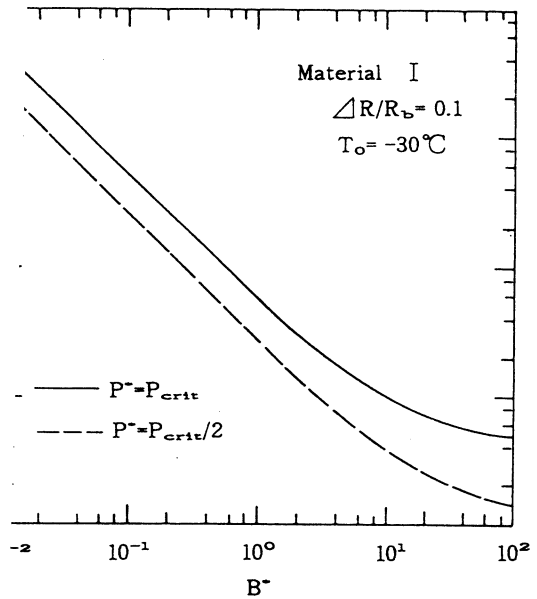


図8 無次元凍結限界時間と修正ビオー数の関係

示したものである。ここで、限界

無次元時間 F^*_{crit} は図 6 において、 $P^* = 1$ となるときの F^* の値である。なお、図中には $P^* = 0.5$ の場合も併記してある。この結果によると、限界無次元時間 F^*_{crit} は修正ピオー数 B^* 減少に伴って急速に増加している。これは修正ピオー数 B^* が小さい場合には、たとえ管内に凍結が生じて管破壊にいたるまでの時間がきわめて長いことを意味している。また、限界無次元時間 F^*_{crit} の修正ピオー数 B^* による減少のし方は $B^* < 1$ ではおおむね直線的である。直線式で近似すれば、図 8 に示した例では、

$$F^*_{crit} = 0.083 \times B^{*-0.9} \quad P^* = P_{crit}, \quad B^* < 1 \quad (8)$$

$$F^*_{crit} = 0.026 \times B^{*-1.0} \quad P^* = P_{crit}/2, \quad B^* < 1 \quad (9)$$

と表される。

4. あとがき

寒冷地における水道配管の凍結破壊問題について実験的理論的に研究し、この現象を支配する無次元因子を示し、これら因子を用いることにより、管凍結時の圧力上昇および管凍結破壊時間と伝熱条件がどのような関係にあるかを明らかにした。本研究を遂行するに当たって、圧力上昇計算など数値計算については秋田大学菅原征洋助教授に多大のご教授を頂いた。また、結果の検討について北海道大学工学部福迫尚一郎教授、旭川工業高等専門学校山本春樹教授にご援助賜わった。また、まとめに際しては室蘭工業大学戸倉郁夫助手(当時)、当時大学院学生鈴木 淳君に多大のご協力を頂いた。付記して謝意を表わす。

参考文献

- (1) London, A. L., Seban, R. A. : Rate of Ice Formation, Trans. Trans. ASME. 771(1943).
- (2) Gilpin, R. R. : The Effect of Dendritic Ice Formation in Water Pipes, Int. J. of Ht. & M. Transf. Vol. 18, No. 11(1975).
- (3) Sparrow, E. M. et al., Freezing in a Vertical Tube, Trans. ASME. J. Ht. Vol. 105, (1983).
- (4) Sugawara, M. et al., Freezing of Water in A Closed Circular Tube, Trans. JSME. Vol. 49, No. 439, (1983).
- (5) Sugawara, M., Seki, N. : Freezing of Water in A Closed Circular Tube, Warme u. Stoffubertagung, 17, (1983).
- (6) 堀内, 前野: 水の凍結に伴う圧力上昇に関する研究, 日本雪氷学会講演予稿集, 66(1980-10).
- (7) 追分, 齊藤, 稲葉, 戸倉: 管の凍結破壊に関する研究, 凍結協会論文集 Vol.2, NO2. (1985).
- (8) Saito, H., Sugawara, M., Tokura, I., Kishinami, K., Seki, K., Seki, N. : Freezing Fracture of Water pipes in Low Temperature, Proc. 1987 Int. Symp. Cold Regions Ht. Transf. Edmonton, Alta., Canada (1987)
- (9) Fletcher, N. H., (前野紀一訳) 氷の化学物理 第1版 共立出版 1974

密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係

計算プログラム：

```

10 REM *** Ice Formation Analysis -- 1989/4/17 ***
20 DEF FNDRT(A, B, C, D, E)=.454545*LOG(B/A)+LOG(C/B)/D+1/C/E
30 CLOSE
40 READ G$ '(*ファイル名の読み込み*)
50 PRINT "ファイル名ハ";G$;"デス。"
60 LPRINT "ファイル名ハ";G$;"デス。"
80 OPEN G$ FOR OUTPUT AS #1 '(*出力ファイルのオープン*)
90 READ SMT$, RM, RTH, TCS, PNS, ES '(*管半径、管材料の物性値読み込み*)
100 PRINT #1, SMT$,"";RM$,"";RTH$,"";TCS$,"";PNS$,"";ES
110 R3=(RM+RTH)/1000!:R30=R3
120 READ VART, HTC, TIF, EPS, HS, MN '(*空隙率、熱伝達率などの読み込み*)
130 DT3=-TIF
140 PRINT #1, VART,"";HTC$,"";TIF$,"";EPS$,"";HS$,"";MN
150 PRINT USING "Tube ハ & & デス。 r1=####.## mm δ=##.## mm Es=#####^" ;SMT$
, RM, RTH, ES
160 LPRINT USING "Tube ハ & & デス。 r1=####.## mm δ=##.## mm Es=#####^" ;SMT$
, RM, RTH, ES
170 PRINT USING " hc=####.## W/m2°C Tam=####.## °C δ=##.#### H=##.####";HTC, TIF
, EPS, HS
180 PRINT USING " Va=##.### ";VART
190 LPRINT USING " hc=####.## W/m2°C Tam=####.## °C δ=##.#### H=##.####";HTC, TIF
, EPS, HS
200 LPRINT USING " Va=##.### ";VART
210 PRINT
220 PRINT "Time[h] δi[mm] P[MPa] Ti[°C] Do[mm] εo×10**6"
230 'LPRINT "Time[h] δi[mm] P[MPa] Ti[°C] Do[mm] εo×10**6"
240 C1=.292893:C2=1.70711:C3=.5349 '(*Runge-Kutta法の係数*)
250 RM=RM/1000!:RTH=RTH/1000! '(*メートルをミリメートルに変換*)
260 IF VART=0 THEN 280
270 SCRIT=RM*SQR(1-12.5*VART):SND=SCRIT/RM
272 '(*諸定数の設定*)
280 EI=9.8E+09:TCI=2.2:PNI=2.94:SVI=.001087:SVW=.001:CPRW=4.5E-10
290 HL=334800!:TIF=TIF+273.15:T1=273.15:HLH=93.02:C8W=1.172
292 '
300 IF VART=0 THEN SCRIT=RM:TIMS=0:GOTO 360
310 BI=R3*HTC/TCS '(*ビオー数の計算*)
320 TND=SND^2*LOG(SND)/2+(1-SND^2)*((LOG(R3/RM)+1/BI)*TCI/TCS+.5)/2'(*Fo×Ste数)
330 TIMS=HLH*RM^2*TND/SVI/DT3/TCI '(*加圧開始時間の計算*)
340 PRINT USING " Fo*Ste=##.####^ Bi=##.####^ Rcrit=##.####^ TIMEc=##.##
###^";TND, BI, SND, TIMS
342 LPRINT USING " Fo*Ste=##.####^ Bi=##.####^ Rcrit=##.####^ TIMEc=##.
###^";TND, BI, SND, TIMS
350 PRINT #1, USING "##.####^, ##.####^, ##.####^, ##.####^";TND, BI, SCRIT,
TIMS
360 S=SCRIT:PR1=0!:PR10=PR1:M=0:MP=MN:LB=1
370 DT1=0! '(*温度勾配の初期値*)
380 N=0:LA=1
390 A3D=R3/RM:A3=A3D^2
400 C6=(1+A3D)*(A3D-1!)
410 A5=((1+A3)/C6+1!/PNS)*EI/ES
420 ON LB GOTO 430, 650
430 DRTC=FNDRT(S, RM, R3, TCS, HTC)
440 AA1=SVI*(TIF-T1)/S/DRTC
450 REM ***** Runge ***** '(*Runge-Kutta法による氷層位置の計算*)
460 AA2=C8W*SVI*DT1/(2!*SVW*HS)
470 AA3=HLH+(SVI*C8W/SVW-C3)*DT1/2!
480 X1=HS*(AA1-AA2*S)/AA3
490 Y1=X1/2!

```

```

500 Z1=S+Y1
510 Q1=3!*Y1-X1/2!
520 X2=HS*(AA1-AA2*Z1)/AA3
530 Y2=C1*(X2-Q1)
540 Z2=Z1+Y2
550 Q2=Q1+3!*Y2-C1*X2
560 X3=HS*(AA1-AA2*Z2)/AA3
570 Y3=C2*(X3-Q2)
580 Z3=Z2+Y3
590 Q3=Q2+3!*Y3-C2*X3
600 X4=HS*(AA1-AA2*Z3)/AA3
610 Y4=(X4-2!*Q3)/6!
620 Z4=Z3+Y4
630 ON LA GOTO 640,650
640 SOLD=Z4
650 A2D=Z4/RM:A2=A2D^2
660 C4=(1!+A2D)*(1!-A2D)
670 A4=2!*A2/C4
680 A6=(1!+A2)/C4-1!/PNI
690 ON LB GOTO 700,990
700 B1=((1!+A2)/C4+1!/PNI)*Z4/EI
710 B2=2!*Z4/EI/C4
712 '(*圧力増加の計算*)
720 DP1=(1!-SVW/SVI)*(1!-Z4/S)/(CPRW/2!+(B1-B2*A4/(A5+A6))/S)
722 '
730 P1=DP1+PR1 '(*圧力の新しい値*)
740 ON LA GOTO 750,760
750 DP10=DP1
760 PRM=A4*DP1/(A5+A6)
770 DU=DP1*B1-PRM*B2
780 DUM=A5*PRM*RM/EI
790 DU3=2!*R3*PRM/ES/C6
800 DT1=T1*DP1*(SVW-SVI)/HL '(*氷点降下の計算*)
810 ON LA GOTO 820,830
820 DU30=DU3:LA=2:GOTO 450
830 ERA1=ABS((Z4-SOLD)/S)
840 ERA2=ABS((DT1-DT10)/DT3)
850 IF ERA1>ERA2 THEN ERA=ERA1 ELSE ERA=ERA2
860 ERA3=ABS((DP1-DP10)/P1)
870 IF ERA<ERA3 THEN ERA=ERA3
880 IF ERA<EPS THEN 930 '(*収束判定*)
890 N=N+1
900 IF N<20 THEN 920
910 LA=1:GOTO 980
920 SOLD=Z4:DT10=DT1:DP10=DP1:GOTO 450
930 M=M+1:TIME=M*HS+TIMS '(*時間ステップの増加*)
940 SVW=SVW*(1!-CPRW*DP1) '(*水の比体積の計算*)
950 S=Z4+DU:PR1=P1:T1=T1+DT1:RM=RM+DUM:R3=R3+DU3'(*水層位置、水温の計算)
960 IF ABS(S)<.0005 THEN LA=3:GOTO 980 '(*凍結完了か否かの判定*)
970 IF MP>M THEN 370 '(*プリントするか否かの判定*)
980 Z4=S:LB=2:GOTO 390
990 SL=RM-S '(*水層厚さの計算*)
1000 PM=PR1*A4/(A5+A6):LB=1
1010 SF=PM*(1!+A3)/C6 '(*最大応力の計算*)
1020 STR=(R3-R30)/R30 '(*歪の計算*)
1030 PRINT USING "##.##,##.#####^",##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.#####^
^,##.#####^,##.#####^,TIME,SL,PR1,PM,T1,R3,STR,SF
1040 PRINT #1, USING "##.##,##.#####^",##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.##
###^,##.#####^,##.#####^,TIME,SL,PR1,PM,T1,R3,STR,SF

```

