

II-40 寒冷地における給水装置－給水管の凍結実験－

札幌市水道局 正会員 平賀 岑吾

上瀬戸正則

神保 稔

高橋 美宏

1. はじめに

北海道における水道の凍結事故は、冬期間における大きな問題である。水道事業体が安定・安全給水に努めている一方で、使用者側での凍結による給水停止の発生は断水事故に匹敵する問題であり、使用者サービスを考えれば、ぜひとも解決しなければならない課題である。

札幌市においてもその件数は多く、無視できないものとなっている。これらの凍結事故は多くが一般家庭やアパートなどで起こっている。凍結箇所は約70%が地下から屋内に引き入れるいわゆる立上がり部で発生しており、この部分での凍結を解決すれば凍結事故の大半をなくすることができると言える。凍結防止の方法として水抜きにより水抜きを行い、管内の水を排除して凍結する物質そのものをなくするというのが従来の方法であった。しかし、この水抜き操作は煩雑なこともあり、つい忘れてしまうことがある。最近では、電熱ヒータを巻き凍結を防止する方法や、電動水抜き栓等も用いられているが、火災発生の危険、費用の問題等があり、完全な方法とは言い難い。

従来の考えに捕らわれず新しい発想に立ち、立上り管を凍らせない、あるいは、凍っても水の出る立上り管を用いることを考え、給水管の凍結実験を行うこととした。今回は、この基礎実験を行ったのでそれらについて報告するものである。

表-1 最低気温と凍結件数

年月日	最低気温	凍結件数	年月日	最低気温	凍結件数
59. 2. 5	-9.5℃	277 件	60. 1.24	-14.2℃	969 件
59. 2. 6	-12.7℃	1,066 件	60. 1.25	-16.5℃	2,856 件
59. 2. 7	-11.7℃	2,177 件	60. 1.26	-14.2℃	2,565 件
59. 2. 8	-12.0℃	1,612 件	60. 1.27	-11.4℃	998 件

2. 凍結の状況

札幌市における過去の凍結件数をみると、12月から翌年の2月の間に約50,000件も発生したことがある。これは全給水栓数の10%弱にもあっており無視できないものとなっている。

このような凍結事故発生時の気温と凍結件数は、表-1のとおりであり、寒波が連続した場合に多く発生している。これらの寒波襲来時の一日の気温変化は、図-1のとおりである。これをみると夜間に最低気温となり、日中においても、気温が零下となる真冬日となっている。

本市では予想最低気温が-8℃以下となる日には、放送各社の協力を得て凍結防止のPRを行っているが、凍結事故を完全になくすには至っていない。

水抜き方法として図-2の立上り管の近くにある水抜きハンドルを操作し、水を抜くこととしているが、図-3のような鳥居配管の場合には、水抜きハンドルをまわした後、各所の蛇口

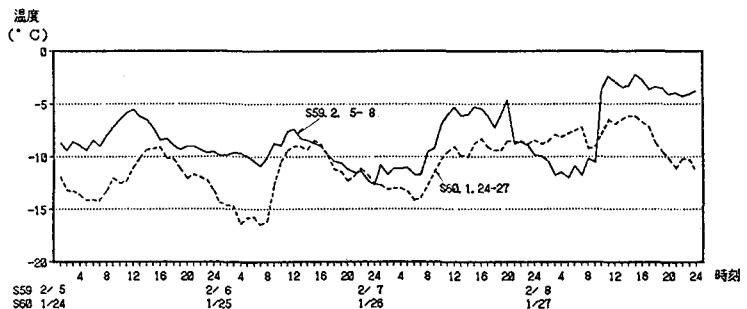


図-1 寒波時の日気温変化

を開け、さらに空気入れ用蛇口を開けなければならない。このとき、空気入れ用蛇口を開けないで、各所の蛇口と水抜き操作のみでは、排水時に鳥居配管部が負圧となり、水が残留して凍結することとなる。

生活の多様化に伴い、水使用の場所が多くなると配管も複雑になり、水

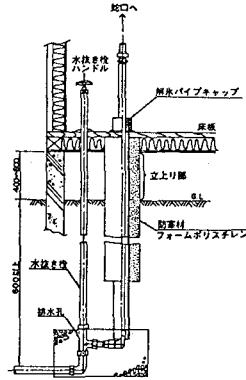


図-2 札幌市の立上り管標準図

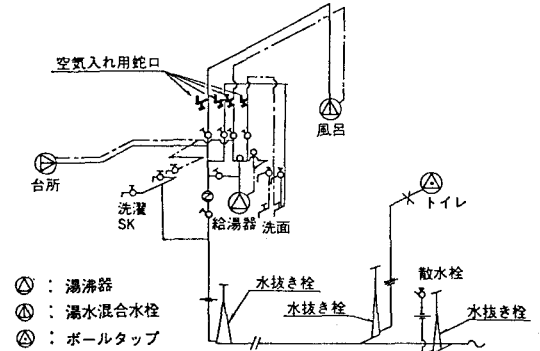


図-3 一般住宅の平均的配管

抜き操作がわずらわしいものとなる。これらを解消するための吸気弁も開発されているが、信頼性に不安があり、未だ有効な方法とはいえない。わずらわしい操作の必要がなく、凍結の心配のない立上り管が開発されることが急務であり、その一環として以下の実験を行った。

表-2 真空二重管

真空度 10^{-4} torr, 10^{-6} torr の2種類共通

呼び径	内径	外径	真空部の幅	SUS管の厚さ	長さ	上端部	下端部
φ20	20.2	42.7	9.25	1.0	1000	ポリスチレン製栓	
φ50	48.0	72.0	10.0	1.0	1000	ポリスチレン製栓	
φ75	73.0	97.0	10.0	1.0	1000	ポリスチレン製栓	
φ100	98.0	122.0	10.0	1.0	1000	ポリスチレン製栓	

3. 実験方法

今回の実験においては、低温室として冷凍庫（サンヨー冷凍庫 T20N-1.0SRF）を用い、供試管として水道用塩化ビニルライニング鋼管（JWWA K-116）および表-2の真空二重管（管壁を二重にし、中を真空にしたもの、SUS304製、真空度は 10^{-4} 、 10^{-6} torrの2種類）を用いた。

口径は各々φ20、50、75、100とした。また、断熱材として側壁にはポリスチレンフォーム保温筒（JIS-A9511 A類3号、厚さ50、75、100mmの3種類）及び上下端部にはポリスチレンフォーム保温板（JIS-A9511 B類1号厚さ100mm）を用いた。管の凍結状況を見るため、供試管の中に温度測定点を設け、測点は図-4のように原則として管中心、管中心と内壁の中間、管内壁の3点とした。ただし、φ20、50については中心と内壁、または中心のみとした。温度測定には、熱電対（T、単線平行 2.5×1.8mm）を用いた。

あらかじめ熱電対をセットした供試管を垂直に立て、管上端部より10cm下まで水道水を注入し、 -20°C の一定温度の低温室に入れることとした。管内水温が 0°C になった直後から水と氷の共存状態を経て、管中心部が 0°C からさらに下降し始める直前までの時間を凍結時間とし、その時間を測定した。実験条件は次のとおりである。

(1) 塩化ビニルライニング鋼管

- ① 各管を断熱材なしでそのまま凍結させる。
- ② φ75、100に3種類の厚さ（ $t=50$ 、75、100mm）の断熱材を巻いて凍結させる。但し、上下端部の断熱材厚は常に $t=100$ mmとした。

(2) 真空二重管

- ① 上部、下部のみ厚さ100mmの断熱材を巻き凍結させる。（断熱方法Ⅰ）

- ② 上部、下部にヒータを取り付け、断熱材100mmで覆った後上部、下部の温度を $0\sim5^{\circ}\text{C}$ （室温、地温を想定）に設定した状態で凍結させる。（断熱方法Ⅱ）

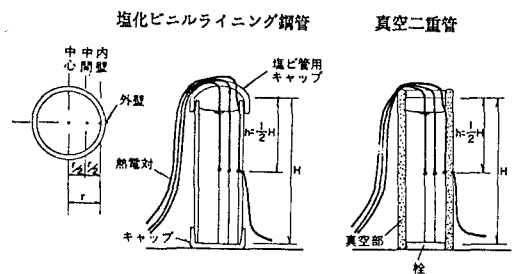


図-4 供試管の温度測定点

4. 実験結果と考察

4-1 塩化ビニルライニング鋼管

塩化ビニルライニング鋼管の実験結果を表-3、及び凍結状況の例を図-5、6に掲げる。断熱材のない場合については、-20℃において、管中心まで凍結する時間がφ20で1.2時間、φ50、φ75、φ100でそれぞれ6.0、8.0、11.5時間となっている。凍結時間は管径にほぼ比例すると考えられる。これは、凍結の方向が管外側から管中心部に向かって進行していったためと考えられる。また、断熱材を使用した場合は、φ75では断熱材厚さが50mmの場合凍結時間が67時間であり、明らかに断熱材の効果が認められた。これらの結果に基づき熱伝達の理論式と実験結果との比較を行う。伝熱計算における定常状態での合成円筒壁の熱貫流の式は、

$$Q = U_L (t_{r1} - t_{r2}) L$$

$$L : \text{合成円筒の長さ}$$

$$U_L : \text{熱貫流率 (総括熱伝達係数)}$$

と表され、

$$U_L = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{R_{f1}}{r_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_i} \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \right) + \sum_{i=2}^n \left(\frac{R_{fi}}{r_i} \right) + \frac{R_{f2}}{r_{n+1}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_{n+1}}}$$

----- (1)

であるが、 R_f 項については水あかや、汚れによる熱抵抗係数であるため無視し、管内面における熱伝達係数 α_1 については水が静止状態にあり0℃になった状態では水の対流は行われないと考え α_1 は無視する。

この時 λ_1 、 α_2 については、塩ビ管、鋼管、および断熱材の熱伝導率を各々 $\lambda_1 = 0.18$ 、 $\lambda_2 = 50$ 、 $\lambda_3 = 0.032 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$ を、外周部の熱伝達係数 α_2 については、冷凍室内に冷凍ファンからの冷風が流れているため、強制対流熱伝達と考えミハイエフの方法により、風速 $v = 1.0 \text{ m/sec}$ として、 α_2 を各々求めた。

これらの数値を式(1)に入れ、理論式による凍結時間を算出した。その結果を表-3の右側に示す。これらの結果によれば、理論式と実験結果はほぼ合致していると判断できる。実験結果と計算式との差異は、断熱材を用いない場合、上下端部からの熱損失があることと、冷凍ファンによる影響が管の設置位置によって異なること等がその原因と考えられる。

この理論式を基に、管中心部φ20程度が凍結せずに水のままで、周囲が凍結するまでの時間 T_2 を求めてみると表-3の右端欄のようになる。この結果は、管の中間における測定結果と整合している。

さらに、今回実験を行わなかった断熱材厚が薄い

表-3 塩化ビニルライニング鋼管の凍結時間

① 断熱材なしの場合の凍結時間 (単位 hr)

口 径	温度測定点			理論式による中心までの凍結時間 T_c	中心部φ20を凍らせない場合の凍結時間 T_2
	内 壁	中 間	中 心		
φ20	—	—	1.2	1.0	—
φ50	—	—	6.0	4.9	3.6
φ75	2.0	6.0	8.0	7.8	7.5
φ100	2.0	7.0	11.5	11.5	11.0

② 断熱材付の場合 (単位 hr)

口 径	断熱材の厚さ t_q	温度測定点			理論式による中心までの凍結時間 T_c	中心部φ20を凍らせない場合の凍結時間 T_2
		内 壁	中 間	中 心		
φ75	t=50	49.5	73.5	67.0	74.6	70.2
	t=75	88.0	91.0	95.0	95.4	89.8
	t=100	96.0	97.0	97.0	112.3	105.7
φ100	t=50	94.0	—	104.5	109.3	105.7
	t=100	136.0	148.0	142.0	168.8	163.1

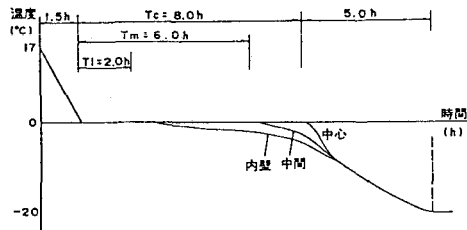


図-5 φ75 (断熱材なし) の凍結時間

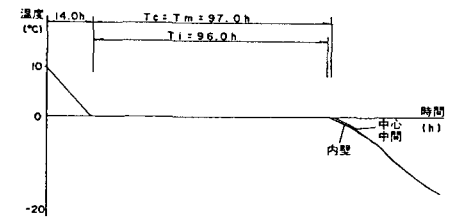


図-6 φ75 (断熱材付) の凍結時間 (断熱材厚さ100 mm)

場合の理論式による凍結時間を求めると、表－４のとおりとなる。また、前図－２の本市の立上り管について計算してみると、凍結時間は 7.4時間となり、これは断熱材なしの場合のφ75とほぼ同じである。

以上の結果から、塩化ビニルライニング鋼管の立上り管についてみると、－20℃の一定温度の条件下では、
 ① 断熱材を巻かない場合はφ75、100 にかかわらず凍結時間が12時間以下のため、生活態様によっては一昼夜で凍結する恐れがある。
 ② 凍結時間を24時間確保するとした場合は断熱材なしで、φ200 の管が必要であり、断熱材付の場合ではφ50で、30^{mm}、φ75、φ100 でそれぞれ20^{mm}、5^{mm}の厚さの断熱材が必要である。ことがわかった。

4－2 真空二重管

真空二重管の場合は真空断熱効果により小口径においても明らかに凍結時間が長く、断熱方法Ⅰでもφ50においては72時間と塩化ビニルライニング鋼管のφ50の 6時間より長い。φ20においてもこの傾向がみられた。真空二重管の場合、管の上下が完全に断熱されていれば、内管から外管への放射による熱伝達が主となり他の伝導や対流による熱伝達はほとんどないと考えてよい。放射熱伝達によって管中心部から管外壁に伝達される熱量は次式で表される。

$$q = \sigma F (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_1$$

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

σ＝ステファン・ボルツマン定数
 F＝修正形態係数

ここで、ε₁、ε₂、A₁、A₂、T₁、T₂ は各々内管、外管の放射率、表面積および温度である。

この式により、各口径の凍結時間を求めるとφ20で92.9時間、φ50で 248.1時間となり実験結果と大きく異なった値となった。これは上下部を断熱材で保温したとしてもそこからの熱流失があること、管の長さが 1 mと短いため内部の熱が管材料をとおして管端部をまわりこみ流失したものと考えられる。一方、断熱方法Ⅱでは端部からの熱流失が少ないため凍結時間は大幅に長くなっている。この時の凍結時間はφ20でも2日以上凍結しておらず、凍結防止には充分効果があるといえる。いずれにしろ真空二重管の場合は上下端部からの熱流失が大きく、断熱方法によって凍結時間が大きく異なることがわかった。本来の効果をみるためには、実験条件に対する充分な検討が必要であると考えられる。

5. おわりに

凍結しない給水管、凍結しても水の出る給水管を目指して口径の大きい管、真空二重管について実験を行い、これらの可能性について検討を行った。立上り管を太くし、断熱材を巻くことによって一昼夜は凍結しないことがわかった。長期不在をする場合は別として、一昼夜の間凍結しなければ、あるいは、管壁側が凍結したとしても中心部が通水可能であれば、翌日の水使用によって凍結部分は融解しななら問題がなくなると考えられる。

今回の実験は凍結に強い立上り管を目指すための基礎実験である。今後は、実際の家屋における立ち上がり管部分、隠蔽配管部分の温度分布等を調査し、さらに実際の気温変化、使用水量モデルによる凍結実験を行い、より実情に即した給水立上り管を開発していくこととしたい。

表－４ 断熱材が薄い場合の凍結時間（計算値）

（ 単位 hr ）

	T _c	T _z		T _c	T _z
20-20	5.6	—	75-20	41.0	38.6
20-30	6.7	—	75-30	53.7	50.5
20-40	7.9	—	75-40	64.7	60.9
50-20	23.1	19.9	100-20	58.7	56.7
50-30	29.8	25.7	100-30	77.4	74.8
50-40	35.5	30.6	100-40	94.2	91.0

※ 20-40 はφ20の管に厚さ40^{mm}の断熱材を巻いたものを表す。