

自動車部品を想定した断熱性能評価方法の検討 (第12報) 16 水道管凍結実験とそのモデル化

筒本隆博、長谷川浩治、棗田洋平

Experiment of freezing in water pipe and mathematical modeling of its phenomena

TSUTSUMOTO Takahiro, HASEGAWA Koji and NATSUMEDA Yohei

We are studying evaluation of the thermal insulation properties of automobile parts. In this study, heat transfer coefficient of air is an important part of the thermal insulation. While, there was a consultation about painting water pipes and investigating the effect of suppressing freezing of water pipes. In this study, water freezing experiments were performed and the temperature change of the water in water pipe was analyzed by mean of heat model using the heat transfer coefficient, and the effect of covering of the pipe by aluminum foil on freezing water was discussed by mean of change the heat transfer coefficient.

キーワード：水道管、凍結、冷却速度、凍結時間、熱伝達係数、数式モデル

1 緒 言

現在我々は自動車部品の断熱性を評価する手法について研究している^{1)~4)}。そこでは熱伝達係数が空気と部品との間の断熱性を示す重要な値となる。一方、水道管に塗装をして、水道管凍結抑制の効果を調べたいという相談があった。凍結防止のための断熱材施工については、工業規格 (JIS A 9501) で保温保冷基準が決められ⁵⁾、実験的研究も行われている⁶⁾。しかし、熱伝達係数という指標で整理されていない。そこで、水道パイプに水を入れた標準試料と、パイプの断熱性を高めるためにアルミ箔で覆った試料の凍結実験を行い、空気の熱伝達係数を使った数式モデルにより解析し、その効果を熱伝達係数の違いで評価した。

2 実験方法

図1に水道管凍結実験に用いた実験装置の概要を示す。図のように実証実験として、内径 23mm、外径 27mm 長さ 95mm の鉄パイプ2本に水を入れ、下部をプラスチック板の上のせて油粘土で封止固定し、上部をアルミニウムテープでふさいだ。管の底面から K 熱電対を管の中心部へ挿入してデータロガーで水温を記録した。水道管の一方はそのままの表面状態とし、これを標準試料とした。もう一方は断熱性を高めるために、アルミニウムホイルを巻いた。それを、-10℃にした恒温槽に入れて、水が完全に凍結する0℃以下になるまで放置して、その間の温度変化を記録した。

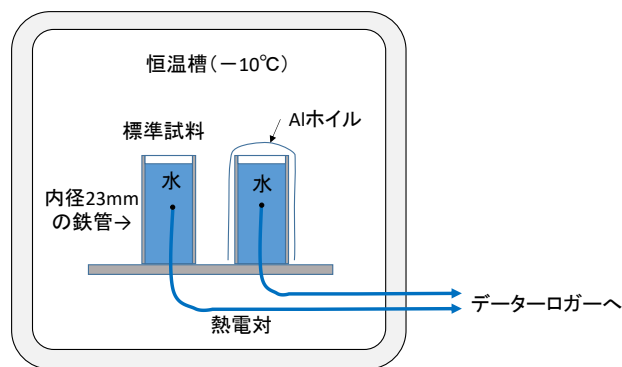


図1 水道管凍結実験の概要

3 凍結実験結果とそのモデル化

図2に水道管の水温の変化を示す。-10℃の恒温槽に入れると、水温は急速に低下していく。また、図2の初期の水温の変化に着目すると、4℃付近でわずかな変曲点が表れている。

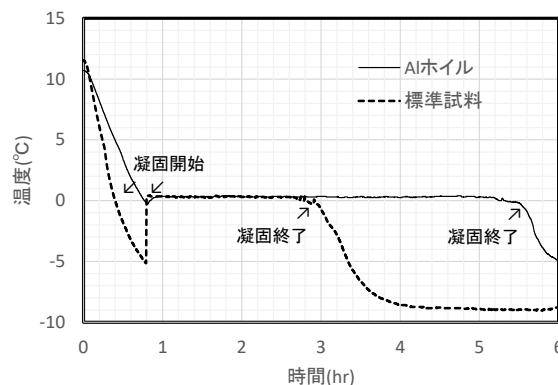


図2 凍結実験中の水道管の水温変化

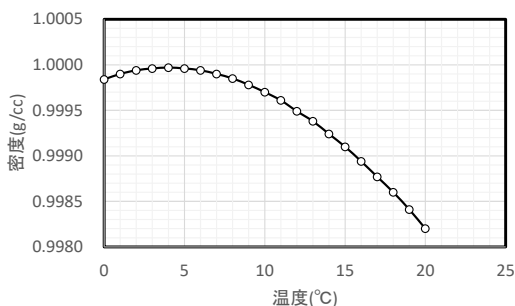


図3 水の密度と温度の関係⁷⁾

これは図3に示すように水が4°C付近で最大の密度になり⁷⁾、管の中の対流の方向が逆転することが原因であると考える。

さらに、冷却の早い標準試料の水道管では、0°C以下に大きな過冷現象が現れる。これは鋳造などの熔融金属の凝固でも現れる現象で、急速に凝固点以下に冷却されることにより凝固（凍結）開始のための核生成が遅れるためである。

水道水が外気により冷却される現象について図4のようなモデルを考える。恒温槽内の温度 T_r (-10°C) より水道管外表面（外表面積 A m^2 ）を通して冷却され、その時の熱流束を ϕ (W/m^2) とする。ここでは、簡便化するために、水温と鉄管の温度は均一の T °C と仮定した。これは表1に示すように空気に対して鉄と水の熱伝導率が大きく熱をよく伝えるため（空気を1とすると水は26倍、鉄は3,000倍）、熱抵抗が低く温度差が生じにくいからである。

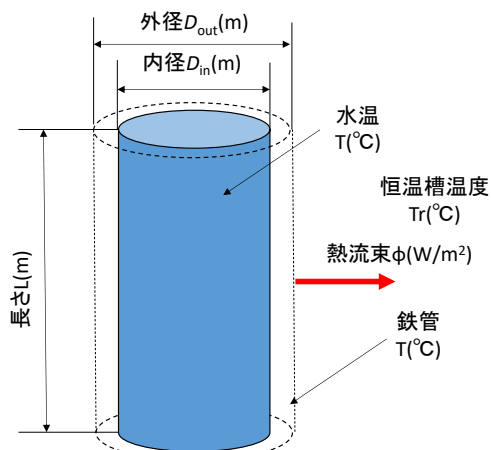


図4 水道管内の冷却モデル

表1 水と鉄と空気の熱伝導率⁸⁾

	水	鉄	空気
熱伝導率 λ $W/(m \cdot K)$	0.63	75.36	0.0241

このモデルで、平均熱流束 ϕ と表面温度 T との関係は、熱伝達係数 h を使って (1) 式のように関係付けることとする。

$$\phi = h \cdot (T - T_r) \quad (1)$$

鉄管と水の体積をそれぞれ V_{Fe} 、 $V_{水}$ 、比熱をそれぞれ C_{Fe} 、 $C_{水}$ 、密度をそれぞれ ρ_{Fe} 、 $\rho_{水}$ とする。温度変化 (dT/dt) により水と鉄管から放出される熱エネルギー Q は次式のようになる。

$$Q = (C_{水} \cdot \rho_{水} \cdot V_{水} + C_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot V_{Fe}) \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (2)$$

水と鉄管の体積はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$V_{水} = \frac{\pi D_{in}^2 L}{4} \quad (3)$$

$$V_{Fe} = \frac{\pi D_{out}^2 - \pi D_{in}^2}{4} L \quad (4)$$

また、熱流束 ϕ は、 $\phi = Q/A$ となる。ここで鉄管上下の端部を省略すると、 A は外表面積で $A = \pi D_{out} \cdot L$ となるので、これらの式をまとめ h を求める式に変形すると、温度変化 (dT/dt) から h 値を求める (5) 式が得られる。

$$h = \frac{C_{水} \cdot \rho_{水} \cdot D_{in}^2 + C_{Fe} \cdot \rho_{Fe} (D_{out}^2 - D_{in}^2)}{4 D_{out}} \frac{(dT/dt)}{(T - T_r)} \quad (5)$$

次に、水の凝固潜熱 Q_{SOL} と凝固時間 t_{SOL} の間には、次の関係がある。

$$V \rho Q_{SOL} = \phi A t_{SOL} \quad (6)$$

この式の V に水の体積 $V_{水}$ を、 ρ に水の密度 $\rho_{水}$ を、 A に鉄管の外表面積 $A = \pi D_{out} \cdot L$ を代入して、式を整理すると、

$$t_{SOL} = \frac{D_{in}^2 \rho_{水} \cdot Q_{SOL}}{4 D_{out} h (T - T_r)} \quad (7)$$

が得られる。また、(7) 式から熱伝達係数 h を求める式を導くと、(8) 式が得られる。

$$h = \frac{D_{in}^2 \rho_{水} \cdot Q_{SOL}}{4 D_{out} t_{SOL} (T - T_r)} \quad (8)$$

熱伝達係数 h の計算に必要な凝固時間 t_{sol} は凝固終了時間－凝固開始時間とした (表2)。ここで、凝固開始時間は、水の温度が最初に 0°C を通過した時間とした。

表2 凝固時間(t_{sol})の計算

試料	凝固開始時間 (hr)	凝固終了時間 (hr)	凝固時間 (hr)	凝固時間 t_{sol} (sec)
標準試料	0.4	2.9	2.1	9000
Al ホイル	0.77	5.5	4.73	17028

ただし、ここでの凝固開始時間は、 0°C の過冷状態から氷ができ始めて 0°C に温度上昇する時間ではなく、単純に 0°C を最初に通過する時間とした。また、 0°C を通過するときの冷却速度 (dT/dt) は 0.2°C と -0.2°C を通過する時間差を dt として表3のように計算し、(8)式で熱伝達係数 h 値を計算する際は、表4の物性値を用いた。

表3 冷却速度(dT/dt)の計算

試料	0.2°C を横切る時間 (sec)	-0.2°C を横切る時間 (sec)	dT/dt (K/sec)
標準試料	1408	1478	0.00571
Al ホイル	2693	2853	0.00250

表4 計算に必要な水と鉄管の物性値

	比熱 C J/(kg·K)	密度 ρ kg/m ³	凝固潜熱 Q J/kg
水	4184	1000	334000
鉄	461	7830	

これらの測定値 (凝固時間、冷却速度) と物性値、形状値 (内径 D_{in} 、22.3mm、外径 D_{out} 、25.4mm) を用いて、冷却速度と凝固時間による熱伝達係数 h を計算すると、表5のようになった。

垂直平板で熱伝達係数を測定すると、無風状態で $5 \sim 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、送風状態で $30 \sim 45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度である⁹⁾。本計算値は無風状態での測定値の2倍程度となった。これは、恒温槽の中が無風より送風状態に近いことや、下面に接しているプラスチック板が冷却フィンの効果として働き、熱が逃げやすくなったことが原因と考えられる。

表5 冷却速度と凝固時間より求めた熱伝達係数 h

	熱伝達係数 h [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	
	(5)式による (冷却速度より)	(8)式による (凝固時間より)
そのまま	14.70	18.16
Al ホイル	6.43	9.60

4 結 言

水道管凍結モデルを作成し、鉄管むき出しの標準試料と、断熱性を高めるために Al ホイルで覆った試料の二つの試料を -10°C の環境下で冷却した時の、鉄管内の水の冷却曲線を解析した結果、以下のことが分かった。

- (1) 0°C 付近の冷却速度 (dT/dt) 及び、凝固時間から、それぞれ水道管の熱伝達係数を推定することができた。
- (2) それぞれの熱伝達係数は、一致しないものの近い値となった。
- (3) これらのモデル式を使い、 0°C 付近の冷却速度と凝固時間から求めたそれぞれの熱伝達係数はほぼ半分に減少し、熱が逃げにくくなったことを定量的に示すことができた。

文 献

- 1) 長谷川浩治、筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 62(2019), 18
- 2) 長谷川浩治、筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 63(2020), 1
- 3) 長谷川浩治、筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 64(2021), 20
- 4) 長谷川浩治、筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 65(2022), 19
- 5) JIS A 9501:2019 (保温保冷工事施工標準)
- 6) 山本 武：清水建設研究報告、第 59 号 (平成 6 年 4 月), 49
- 7) <http://kentiku-kouzou.jp/kouzoukeisan-mizumitsudo.html>
- 8) http://japan-miyabi.com/thermal_light/data/03/conductivity.htm
- 9) 筒本隆博、長谷川浩治：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告 63(2020), 1