

Study on simplified calculating method for hot water temperature and condensation in presumed steady condition of cross-linked polyethylene pipe

給湯用架橋ポリエチレン管の定常時における 湯温及び結露に関する簡易計算方法及び 精度検証

Tetsutoshi KAN¹ ‡

菅 哲俊¹ ‡

Koji KUROTORI¹

黒鳥 皓史¹

Yuki NAGUMO¹

南雲 祐輝¹

Abstract

In this paper, we present simplified calculating method for hot water temperature inside the pipe and probability of condensation on surface of cross-linked polyethylene pipe in presumed steady condition, for constructing programs to calculate these elements demanded at situation of marketing or introducing. In addition, we carried out experiment of water temperature and condensation on surface in several condition, to verify preciseness of calculating method by comparing the result of experiment and calculated value. In water temperature inside the pipe, the difference of result of experiment and calculated value was within 0.3 degrees when water temperature is between 40 to 60 degrees. In probability of condensation, relative humidity dew-point value difference of result of experiment and calculated ambient relative humidity dew-point value was within 5.4%. The calculated value was positioned at safe side from experiment value in every case, we concluded this calculation method is practical at marketing situation.

Keywords: Cross-linked Polyethylene pipe, Hot Water Supply, water temperature, Condensation

キーワード: 架橋ポリエチレン管, 給湯, 湯温, 結露

1. はじめに

給湯用架橋ポリエチレン管の販売・導入現場（打合せも含む）においては、示された給湯入口からの距離における管内湯温や夏季の給湯管外表面における結露発生の有無をその場で短時間内に求められ、計算結果だけではなく計算根拠及び計算式に関する説明も求められる場合がある。配管の熱損失や水温を正確に計算するためには、配管の設置環境や設置状態を十分に考慮したうえで2次元または3次元モデルによる非定常計算が望ましいと思われる。しかし、このような計算方法では計算条件となる入力データが多くなることと微分計算を含むため計算が複雑になる。

そこで、本論文では汎用の表計算ソフトやウェブ上で

簡単に計算結果を示せるプログラムの構築を目指して、簡易化及び理想化した条件における定常時の給湯用架橋ポリエチレン管の管内湯温計算方法及び管外表面の結露の有無を判断する簡易計算方法を整理したので報告する。さらに、代表条件における管内湯温の測定実験と管外表面の結露発生の有無を確認する実験を行い、計算結果との比較により計算精度の確認を行った結果を報告する。

2. 本論文の位置づけ

配管の熱収支に関する計算はすでに理論が確立されており、従来多くの実験及び計算が行われたと認識する。既往研究では円筒2次元計算モデル⁽¹⁾から、1m当たり

*1 Tsukuba Building Res. & T. Laboratory, Center for Better Living, 2 Tachihara, Tsukuba, Ibaraki, 305-0802, JAPAN

‡Ph.D.(Eng.) e-mail: kan@tbtl.org

Received: 29 November 2019, Accepted: 16 January 2020

*1 (一財) ベターリビング つくば建築試験研究センター
(〒305-0802 茨城県つくば市立原2番地)

‡主席試験研究役 博士(工学) e-mail: kan@tbtl.org

(原稿受付: 2019年11月29日, 受理日: 2020年1月16日)

の配管熱損失性能を示す線熱貫流率を用いた計算⁽²⁾や配管の総合熱伝達率などを実測と合うように調整してから検討した報告例⁽³⁾などがあった。しかし、熱収支の計算で熱伝達率など境界条件の値を示した報告は少なく、熱伝達率の値を示した検討例でも計算根拠も含めて説明した報告はほとんど見当たらない。有識者の知見で決めた境界条件の値を用いた計算でもほぼ期待通りの計算結果が得られることは否定しない。しかし、販売・導入現場（打合せも含む）において建築設備に詳しくない人から計算根拠や計算結果の正確さを質問された時に説明が難しい場合があるのも確かである。この様な背景から、本検討では計算の根拠を説明できる簡易計算に着目し、特に熱伝達率などにおける既存の計算式を調査して組み合わせた計算方法を提示することに重点を置いた。後述する計算方法にて組み合わせた全ての計算式は、関係する専門分野の教科書などで示した式であり、本研究で新しく提案する計算式ではない。また、前述したとおり戸建て住宅に設置する給湯管に限定しても、さまざまな設置環境や設置状態があり、すべてのケースを正確に反映できる計算方法の提示は工学的に不可能に近い。そこで、本報告では熱伝達率などの境界条件を計算する際の設置環境や設置状態は単純化・理想化した。

3. 計算対象の給湯用架橋ポリエチレン管及び計算概要

計算対象は、戸建て住宅の床下空間に設置する給湯管用架橋ポリエチレン管とし、給湯管の長さは20mまでとする。給湯用架橋ポリエチレン管の種類は、架橋ポリエチレン管単体と保温材付き架橋ポリエチレン管とする。

整理する熱計算式は定常時における給湯管内湯温の計算と給湯管外表面の結露発生の有無を判断する計算である。給湯定常時の給湯管内湯温の計算は、給湯入口温度及び環境空気の状態などを示した時に給湯入口から任意の距離 L 離れた管内の湯温を計算で求める。給湯管外表面の結露発生の有無判断の計算は、給湯入口温度及び環境空気の温度と湿度条件を示した時に給湯管外表面で結露が発生するかどうかを判断する計算である。表1に湯温計算及び結露有無判断の計算時の計算条件と計算項目を示す。

4. 給湯定常時の管内湯温の計算方法

4.1 架橋ポリエチレン管単体の計算方法

4.1.1 湯温計算の熱平衡式

給湯入口温度と給湯流量が一定である架橋ポリエチレン管単体が戸建て住宅の床下空間で定常状態に達したと仮定して計算を行う。熱平衡式は、給湯管の出入口温度及び流量から計算した管内水の放熱量と管内水から給湯管を通過して環境空気への放熱量が同じである設定でを構

Table1 Calculation condition and Output item

表1 計算条件及び計算項目

	Item(項目)
Calculation condition (計算条件)	Inlet water temperature (°C) (給湯管の入口温度)
	Distance L(m) from inlet (給湯管の入口からの距離L)
	Water flow (L/min) (水流量)
	Air temperature (°C) (環境空気の温度)
	Wind speed (m/s) (環境空気の風速)
	Thermal conductivity of Crosslinked Polyethylene (W/mK) (架橋ポリエチレンの熱伝導率)
	Thermal conductivity of pipe insulation(W/mK) (保温材の熱伝導率)
Calculation result (計算結果)	Convective heat transfer coefficient on outside surface of pipe (W/m ² K) (外表面の対流熱伝達率)
	Radiant heat transfer coefficient on outside surface of pipe (W/m ² K) (外表面の放射熱伝達率)
	Total heat transfer coefficient on outside surface of pipe (W/m ² K) (外表面の総合熱伝達率)
	Convective heat transfer coefficient on inside surface of pipe (W/m ² K) (内表面の対流熱伝達率)
	Inner surface temperature of pipe (°C) (内表面温度)
	Outer surface temperature of pipe (°C) (外表面温度)
	Outer surface temperature of insulation (°C) (保温材の外表面温度)
	Water temperature at a distance L(m) from inlet (入口から距離L(m)の湯温)

築した。給湯管の表面温度を含む複数の未知数があるため連立方程式を解くことにより、給湯入口から所定距離における管内湯温を計算する。管内水から給湯管を通過して環境空気へ放熱される放熱量計算の概念を図1に示す。給湯管の出入口温度及び流量から計算する放熱量の計算式を式(1)に、管内水から給湯壁を通過して環境空気へ放熱する放熱量の計算式を式(2)に示す。また、各部分の熱伝達計算式を式(3)～式(6)に示す⁽⁴⁻⁶⁾。なお、計算式で使った記号の説明は附表A1に示す(以下同じ)。

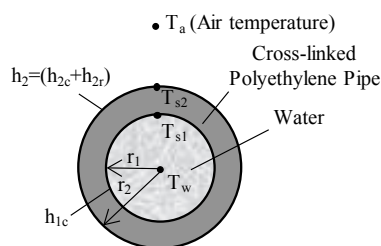


Fig.1 Cross-linked polyethylene pipe cross section

図1 架橋ポリエチレン管単体の断面図

給湯管の出入口温度及び流量から計算する放熱量

$$Q = c_w \rho_w v_{wa} (T_{w.in} - T_{w.out}) \quad (1)$$

給湯管の管壁を通して伝達する放熱量

$$Q = \frac{(T_w - T_a)}{R_t} \quad (2)$$

ここで

$$R_t = \frac{1}{2\pi r_1 h_{1c} L} + \frac{1}{2\pi \lambda_k L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2\pi r_2 h_2 L} \quad (3)$$

給湯管内の水と内表面の熱伝達量

$$Q = \frac{1}{2\pi r_1 h_{1c} L} \cdot (T_w - T_{s1}) \quad (4)$$

管壁（架橋ポリエチレン部分）の熱伝導熱量

$$Q = \frac{1}{2\pi \lambda_k L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad (5)$$

給湯管の外表面と空気の熱伝達量

$$Q = \frac{1}{2\pi r_2 h_2 L} \cdot (T_{s2} - T_a) \quad (6)$$

4. 1. 2 給湯管の外表面の対流熱伝達率の計算式

架橋ポリエチレン管単管の外表面対流熱伝達率 h_{2c} は、円周を横切る流れによる熱伝達率の計算式で計算する。架橋ポリエチレン管単体の外表面対流熱伝達率を計算する場合の説明図を図 2 に、計算式を式 (7) ～式 (10) に示す⁽⁴⁾。

$$Nu_{Do} = \frac{h_{2c} D_2}{\lambda_{air}} \quad (7)$$

$$Nu_{Do} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{Do}^{1/2} Pr_o^{1/3}}{[1 + (\frac{0.4}{Pr_o})^{2/3}]^{1/4}} [1 + (\frac{Re_{Do}}{2.82 \times 10^5})^{5/8}]^{4/5} \quad (8)$$

$$Re_{Do} = \frac{u_{air} D_2}{\nu_{air}} \quad (9)$$

$$Pr_o = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{air}} \quad (10)$$

計算式の適用範囲 $Re_{Do} Pr_o > 0.2$

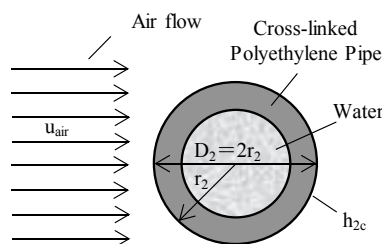


Fig.2 Calculation diagram of convective heat transfer coefficient on pipe surface

図 2 外表面の対流熱伝達率計算の説明図

4. 1. 3 給湯管の外表面の放射熱伝達率の計算式

床下空間に、図 3 に示すように架橋ポリエチレン管単体が設置してあると仮定して外表面の放射熱伝達率 h_{2r} を計算する。計算式を式 (11) に示す⁽⁵⁾。

$$h_{2r} = \frac{\sigma(T_{s2}^2 + T_{ws}^2)(T_{s2} + T_{ws})}{\frac{1}{\epsilon_1} + (A_{s2}/A_{ws})(\frac{1}{\epsilon_s} - 1)} \quad (11)$$

4. 1. 4 給湯管の内表面の対流熱伝達率の計算式

架橋ポリエチレン管の内表面の対流熱伝達率は、円管内の発達した乱流の熱伝達率計算式を用いて計算する。説明図を図 4 に、計算式を式 (12) ～式 (15) に示す⁽⁴⁾。

4. 1. 5 計算プログラムにおける湯温の計算方法

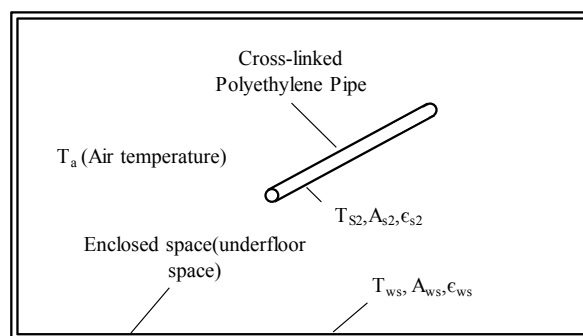


Fig.3 Calculation explanation of radiation heat transfer coefficient on the pipe surface

図 3 外表面の放射熱伝達率計算の説明図

$$Nu_{Di} = \frac{h_{4c} D_1}{\lambda_w} \quad (12)$$

$$Nu_{Di} = 0.023 Re_{Di}^{4/5} Pr_i^{1/3} \quad (13)$$

$$Re_{Di} = \frac{u_w D_1}{\nu_w} \quad (14)$$

$$Pr_i = \frac{\nu_w}{\alpha_w} \quad (15)$$

計算式の適用範囲 $0.7 < Pr_i < 160$, $Re_{Di} > 104$, $L/D_1 > 10$

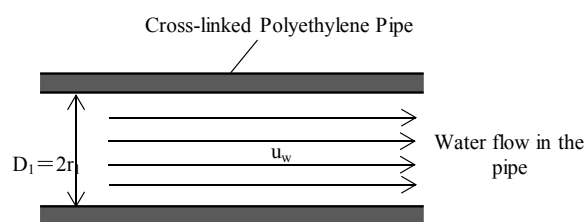


Fig.4 Calculation explanation of convective heat transfer coefficient on the pipe inner surface

図 4 内表面の対流熱伝達率計算の説明図

計算手順の説明を図 5 に示す。上述したとおり給湯管の出入口温度及び流量から計算した管内水の放熱量と管内水から給湯管を通して環境空気へ放熱された熱量が同じである設定で熱平衡式を構築し、式 (1) ～式 (6) の連立方程式を解くことにより入口から L 距離における管内湯温及び管表面温度を計算する。ただし、湯温及び給湯管の表面温度など未知数の数が連立方程式の数より多くなるため、計算プログラムでは給湯管の外表面温度の初期値は環境空気温度を与えてから二分法による反復計算で求める。

4. 2 保温材付き架橋ポリエチレン管の計算方法

保温材付き架橋ポリエチレン管においても給湯管の出入口温度及び流量から計算した管内水の放熱量と管内水から給湯管を通して環境空気へ伝達した放熱量が同じである設定で熱平衡式をたて、給湯入口から距離 L 離れたところの管内の水温を計算する。管内水から給湯管を通して環境空気へ放熱される放熱量計算の概念を図 6 に示す。給湯管出入口温度及び流量から計算する放熱量の計算式を式 (16) に、管内水から給湯管を通して環境空気

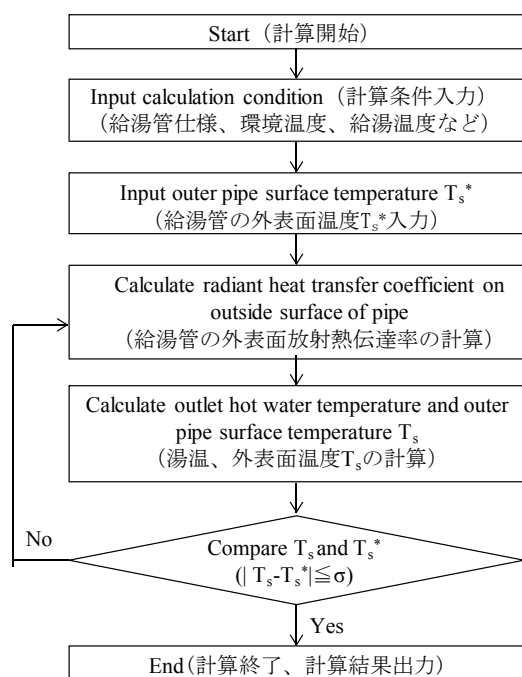


Fig.5 Calculation procedure of hot water temperature in the calculation program

図5 計算プログラムにおける湯温の計算手順

へ伝達する放熱量の計算式を式(17)に示す。また、各境界面や管壁部分の熱伝達計算式を式(18)～式(22)に示す⁽⁴⁻⁶⁾。外表面及び内表面の対流熱伝達率計算式、計算プログラムにおける計算方法は架橋ポリエチレン管単体と同じでありここでは省略する。

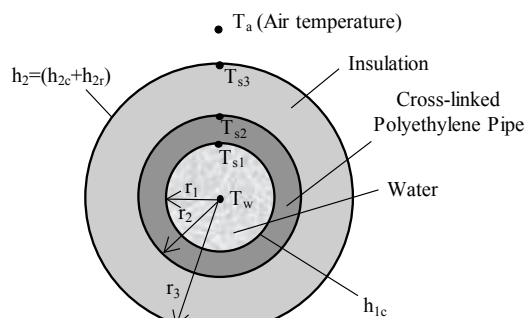


Fig.6 Cross section of Cross-linked polyethylene pipe with insulation

図6 保温材付き架橋ポリエチレン管の断面図

給湯管の出入口温度及び流量から計算する放熱量

$$Q = c_w \rho_w v_{wa} (T_{w.in} - T_{w.out}) \quad (16)$$

給湯管の管壁を通して伝達する放熱量

$$Q = \frac{(T_w - T_a)}{R_t} \quad (17)$$

ここで

$$R_t = \frac{1}{2\pi r_1 h_{1c} L} + \frac{1}{2\pi \lambda_k L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2\pi \lambda_h L} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{2\pi r_3 h_{2L}} \quad (18)$$

給湯管の水と内表面との熱伝達量

$$Q = \frac{1}{2\pi r_1 h_{1c} L} \cdot (T_w - T_{s1}) \quad (19)$$

管壁（架橋ポリエチレン部分）の熱伝導量

$$Q = \frac{1}{2\pi \lambda_k L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad (20)$$

管壁（保温材部分）の熱伝導量

$$Q = \frac{1}{2\pi \lambda_h L} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \cdot (T_{s2} - T_{s3}) \quad (21)$$

給湯管の外表面と空気の熱伝達量

$$Q = \frac{1}{2\pi r_3 h_{2L}} \cdot (T_{s3} - T_a) \quad (22)$$

5. 給湯管の外表面の結露に関する計算方法

定常時の給湯管の外表面で結露が発生する環境空気の相対湿度は式(23)に示すとおり、給湯管の外表面温度を露点温度にした場合の飽和水蒸気圧（式(24)）と空気温度における飽和水蒸気圧（式(25)）で計算する。この計算結果の相対湿度と環境空気の相対湿度を比較することで結露の有無を判断する。なお、結露状態の計算で用いる給湯管外表面温度は上述の湯温計算方法で計算する。結露の有無を判断する計算手順を図7に示す⁽⁷⁻⁸⁾。給湯定常時の給湯管の外表面で結露が発生する環境空気の相対湿度の計算式

$$\phi = \frac{P_{ws} \cdot T_{s2}}{P_{ws} \cdot T_a} \times 100 \quad (23)$$

架橋ポリエチレン管の外表面温度 T_{s*} における飽和水蒸気圧の計算式

$$P_{ws} \cdot T_{s*} = [\exp\{-5800.2206/T_{s*} + 1.3914993 - 0.04864023 \times T_{s*} + 0.41764768 \times 10^{-4} \times T_{s*}^2 - 0.14452093 \times 10^{-7} \times T_{s*}^3 - 6.5459673 \times \log(T_{s*})\}] / 1000 \quad (24)$$

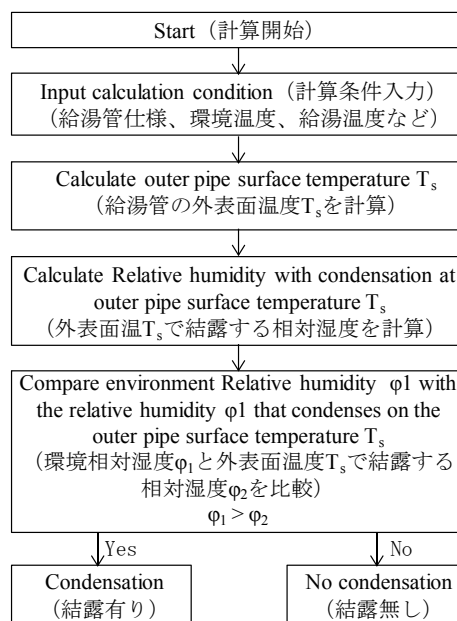


Fig.7 Calculation procedure for judging the presence or absence of condensation on the surface of a hot water pipe

図7 結露の有無を判断する計算手順

環境空気温度 T_a における飽和水蒸気圧の計算式

$$P_{ws} \cdot T_a = [\exp\{-5800.2206/T_a + 1.3914993 - 0.04864023 \times T_a + 0.41764768 \times 10^{-4} \times T_a^2 - 0.14452093 \times 10^{-7} \times T_a^3 - 6.5459673 \times \log(T_a)\}]/1000 \quad (25)$$

6. 実験結果と計算結果の比較検証

計算方法の計算精度を確認するために、一戸建て住宅で比較的によく使用されている給湯管及び温度条件における実験を行い、実験結果と計算結果の比較検証を行った。実験は、（一財）ベターリビング つくば建築試験研究センターで行い、計算は VBA でプログラミングして行った。以下、実験概要及び実験結果と計算結果の比較結果を示す。

6.1 比較検証対象の給湯用架橋ポリエチレン管

実験結果と計算結果の比較検証を行った給湯用架橋ポリエチレン管を表 2 に示す。なお、給湯用架橋ポリエチレン管の長さは 20m である。

Table2 Cross-linked polyethylene pipe for comparison
verification

表 2 比較検証対象の架橋ポリエチレン管

	Size (径)	Material (材料)	Section details (断面寸法)
Cross-linked polyethylene pipe (架橋ポリエチレン管単体)	13A	Pipe	Cross-linked polyethylene Outer diameter 17mm, Inner diameter 12.8mm, Thickness 2.1mm
Cross-linked polyethylene pipe with insulation 5mm (5mm 保温材付架橋ポリエチレン管)	13A	Pipe	Cross-linked polyethylene Outer diameter 17mm, Inner diameter 12.8mm, Thickness 2.1mm
		Insulation	polyethylene Thickness 5.0mm
Cross-linked polyethylene pipe with insulation 10mm (10mm 保温材付架橋ポリエチレン管)	13A	Pipe	Cross-linked polyethylene Outer diameter 17mm, Inner diameter 12.8mm, Thickness 2.1mm
		Insulation	polyethylene Thickness 10.0mm

6.2 給湯定常時の湯温の実験結果と計算結果の比較

給湯定常時における湯温測定の実験は、図 8 に示すように恒温恒湿室内で行った。恒温恒湿室の大きさは幅 3.6m×長さ 5.2m×高さ 4.5m で、温度設定範囲は -20°C ~ $+25^{\circ}\text{C}$ (変動幅 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$) である。表 3 に使用した実験装置と測定機器の概要を示す。実験条件を表 4 に示す。給湯管の入口温度 60°C 、 40°C の 2 条件の実験を行った。測定記録は、恒温水槽から所定温度の水を循環させてから十分に安定して定常状態に到達してから 1 秒間隔で 30 分間計測した。

図 9~図 12 に代表として架橋ポリエチレン管単体と 10mm 保温材付き架橋ポリエチレン管の入口温度 60°C に

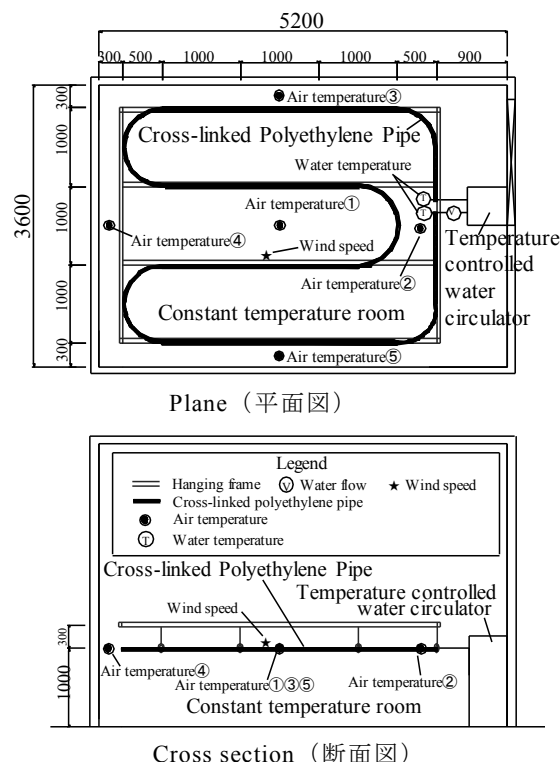


Fig.8 Outline of experimental equipment for measuring hot water temperature

図 8 給湯定常時の湯温測定の実験装置概要

Table3 Outline of equipment and measurement instrument
表 3 実験装置と測定機器の概要

Equipment and Measurement item	Measurement instrument
Temperature controlled water circulator	Low temperature circulator NCC-1110A, Tokyo Rikakikai co., Ltd
Water temperature	Resistance Temperature Detector, Yashimasokki co., Ltd
Water flow	Magnetic Flowmeter AXF005G, Yokogawa Electric Corporation
Air humidity and temperature	Humidity and Temperature Probe HMP110, Vaisala Oyj
Air temperature	T-type thermocouple (0.2mm)
Wind speed	Air Velocity Meter 6141, Kanomax Japan Incorporated

Table4 Experimental conditions for hot water temperature measurement experiment

表 4 給湯定常時の湯温測定の実験条件

Case	Inlet water temperature $^{\circ}\text{C}$	Water flow L/min	Ambient air temperature $^{\circ}\text{C}$
Case1	60	6	5
Case2	40	6	5

における実験結果及び計算実施結果を示す。また、表 5 に全条件における給湯定常時の実験条件と計算条件及び実験結果と計算結果の比較を示す。架橋ポリエチレン管単体では、入口温度が 60.7°C の場合に、給湯管入口から 20m 離れた湯温の実験結果は 57.9°C 、計算結果は

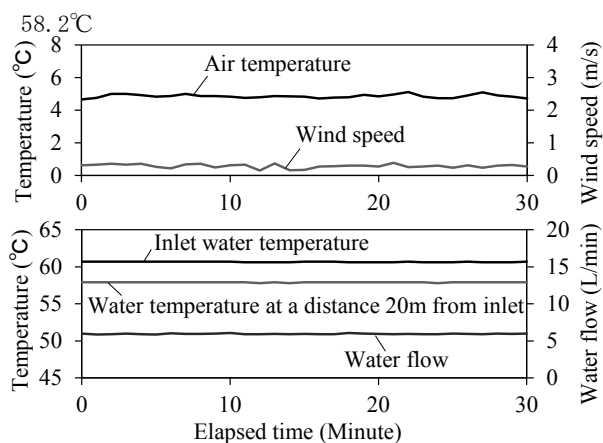


Fig.9 Experimental result of cross-linked polyethylene pipe (Inlet water temperature 60°C)

図 9 給湯定常時の湯温測定の実験結果 (架橋ポリエチレン管単体 入口温度 60°C 設定)

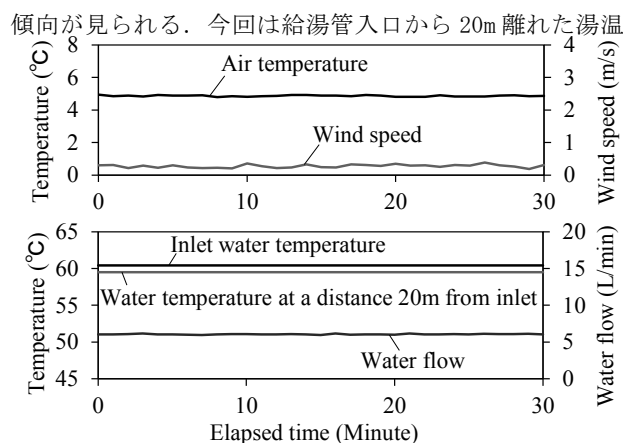


Fig.10 Experimental result of cross-linked polyethylene pipe with insulation 10mm (Inlet water Temperature 60°C)

図 10 給湯定常時の湯温測定の実験結果 (10mm 保温材付き架橋ポリエチレン管 入口温度 60°C 設定)

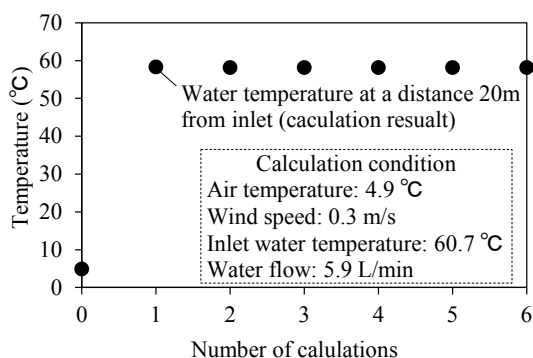


Fig.11 Calculation result of cross-linked polyethylene pipe (Inlet water temperature 60.7°C)

図 11 給湯定常時の湯温の計算結果 (架橋ポリエチレン管単体 入口温度 60.7°C)

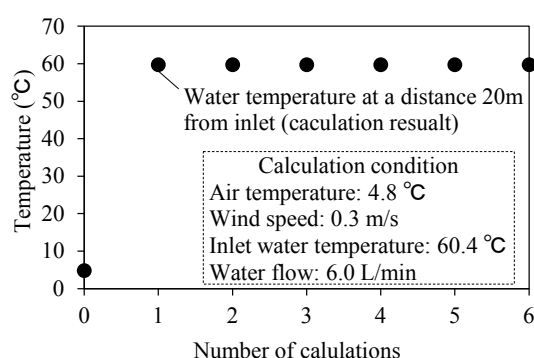


Fig.12 Calculation result of cross-linked polyethylene pipe with insulation 10mm (Inlet water temperature 60.4°C)

図 12 給湯定常時の湯温の計算結果 (10mm 保温材付き架橋ポリエチレン管 入口温度 60.4°C)

Table5 Comparison verification between hot water calculation results and experimental results

表 5 給湯定常時の湯温測定の実験結果と計算結果との比較

	Item	Cross-linked polyethylene pipe		Cross-linked polyethylene pipe with insulation 5mm		Cross-linked polyethylene pipe with insulation 10mm	
		Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2
Experiment condition and Calculation condition	Inlet water temperature (°C)	60.7	40.5	60.5	40.4	60.4	40.4
	Water flow (L/min)	5.9	5.9	6.0	6.0	6.0	5.9
	Ambient air temperature (°C)	4.9	4.9	4.8	4.9	4.8	4.9
	Wind speed (m/s)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	Thermal conductivity of Cross-linked Polyethylene(W/mK)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
	Thermal conductivity of pipe insulation(W/mK)	-	-	0.035	0.035	0.035	0.035
Calculation result	Convective heat transfer coefficient on outside surface of pipe(W/m ² K)	13.9	13.9	9.7	9.5	8.6	8.6
	Radiant heat transfer coefficient on outside surface of pipe(W/m ² K)	5.2	5.2	4.6	4.6	4.6	4.6
	Total heat transfer coefficient on outside surface of pipe(W/m ² K)	19.1	19.1	14.3	14.1	13.2	13.2
	Convective heat transfer coefficient on inside surface of pipe(W/m ² K)	3971.8	3971.8	4833.6	4022.4	4847.0	4008.0
	Water temperature at a distance 20m from inlet (°C)	57.9	38.8	59.3	39.6	59.5	39.8
Experiment result	Water temperature at a distance 20m from inlet (°C)	58.2	38.9	59.6	39.8	59.8	40.0

と 0.3°C の差で再現することができた。また、給湯管の入口温度が 40.5°C の場合には実験結果では 38.8°C、計算結果では 38.9°C と 0.1°C の差であった。厚さ 5 mm 及び厚さ 10 mm の保温材付き架橋ポリエチレン管の実験結果と計算結果の差は 0.2°C ~ 0.3°C であった。全体的に給湯入口温度が低いほど計算結果と実験結果の差が小さい

測定の実験結果と計算結果との比較を示しているが、給湯管入口からの距離が短いほど実験結果と計算結果との差が小さく、計算精度は高くなると考えられる。ここから、整理した定常状態での湯温計算式は給湯入口温度が 60°C 以下、給湯管の長さ 20m 以内の架橋ポリエチレン管の販売・導入現場においては実用上大きな問題がないと

思われる。

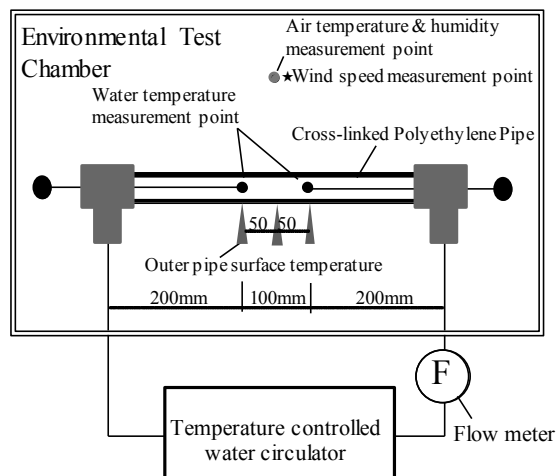


Fig.13 Outline of experimental equipment for determine the presence or absence of condensation

図 13 結露の有無を判断する実験装置概要

6.3 給湯定常時の結露の有無を判断する実験結果と計算結果の比較

給湯定常時の結露の有無を判断する実験は、図 13 に示すように給湯管を恒温恒湿器に設置して行った。実験対象の給湯管の種類は表 2 に示した 3 種類である。実験は JIS A 1514「建具の結露防止性能試験方法」を参考にして給湯管内の湯温が安定してから実験開始とし、実験開始から 1 時間後に外表面の結露性状を観察した。実験条件を表 6 に示す。

図 14 に架橋ポリエチレン管単体の結露の有無を判断する実験結果及び計算結果を示す。また、表 7 に実施した全条件の結露の有無を判断する実験結果と計算結果との比較を示す。架橋ポリエチレン管単体では、給湯管の入口水温が 14.9℃、環境の空気温度が 29.7℃の場合、計算では空気の相対湿度が 44.7%時に外表面で結露が生じる計算結果になり、実験では相対湿度が 47.1%時に結露（性状：くもり）を確認した。計算結果における結露発生時の相対湿度は実験で結露を確認した時の相対湿度より 2.4%低い値となった。同様に、厚さ 5mm 及び 10mm の

Table6 Experimental conditions for determine the presence or absence of condensation experiment

表 6 結露の有無を判断する実験条件

Item	Setting condition
Ambient air temperature(°C)	30
Water temperature in pipe(°C)	15
Water flow(L/min)	8

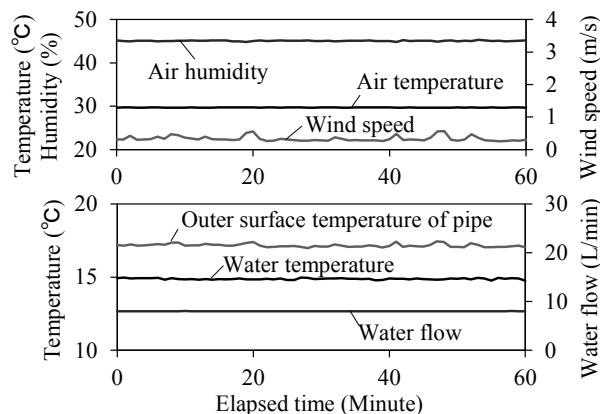


Fig.14 Experimental result of cross-linked polyethylene pipe

図 14 結露の有無を判断する実験結果（架橋ポリエチレン管単体）

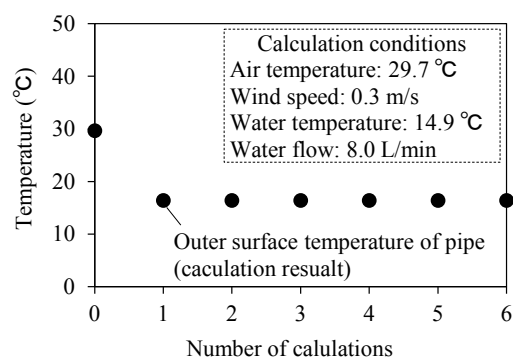


Fig.15 Calculation result of cross-linked polyethylene pipe

図 15 結露の有無を判断する計算結果（架橋ポリエチレン管単体）

Table7 Comparison verification between hot water calculation results and experimental results

表 7 結露の有無を判断する実験結果と計算結果の比較

	Item	Cross-linked polyethylene pipe	Cross-linked polyethylene pipe with insulation 5mm	Cross-linked polyethylene pipe with insulation 10mm
Experiment condition and Calculation condition	Inlet water temperature (°C)	14.9	15.1	15.1
	Water flow (L/min)	8.0	8.0	8.0
	Ambient air temperature (°C)	29.7	29.7	29.7
	Wind speed (m/s)	0.3	0.5	0.5
	Thermal conductivity of Cross-linked Polyethylene(W/mK)	0.47	0.47	0.47
	Thermal conductivity of pipe insulation(W/mK)	-	0.035	0.035
Calculation result	Inside pipe surface temperature(°C)	15.1	15.1	15.2
	Outer pipe surface temperature(°C)	16.4	15.6	15.5
	Relative humidity of ambient air with confirmed condensation on the outer pipe surface	47.1%	87.2%	95.1%
Experiment result	Relative humidity of ambient air with confirmed condensation on the outer pipe surface	44.7%	82.2%	89.7%

保温材付き架橋ポリエチレン管の実験結果と計算結果との差はそれぞれ 5.0%, 5.4%であり, とともに計算結果の相対湿度が実験結果の相対湿度より低く, 安全側の評価であった。

7. まとめ

本報告では, 簡易化及び理想化した条件における定常時の給湯用架橋ポリエチレン管の管内湯温計算方法及び管外表面の結露発生の有無を判断する簡易計算方法を整理して提示した。戸建て住宅の給湯用架橋ポリエチレン管の販売・導入現場(打合せを含む)における求めに応じて, 計算精度の高さよりも計算根拠の説明ができる計算方法に着目し, 特に対流熱伝達率など境界条件の計算式の明示に重点を置いた。

提示した簡易計算方法の計算精度を検証するために, 代表条件における管内湯温の測定実験と管外表面の結露の発生有無の実験を行い, 実験条件と同じ計算条件での計算結果との比較を行った。比較検証の結果, 給湯定常時の管内湯温計算方法では給湯管入口湯温 60℃, 40℃の2条件において給湯管から 20m 離れた箇所の管内湯温の実験結果と計算結果の差が 0.1℃~0.3℃であった。また, 給湯管外表面での結露発生の有無を判断する計算方法では, 結露すると判断する相対湿度の計算結果と実験結果の差が 2.4%, 5.0%, 5.4%であった。いずれの計算結果とも実験結果より安全側であり, 計算精度が高いとは断定できないが, 給湯用架橋ポリエチレン管の販売・導入現場(打合せも含む)においては実用上大きな問題はないと思われる。

8. 謝辞

本報告は, 架橋ポリエチレン管工業会(会員会社: ㈱イノアック住環境, ㈱オンダ製作所, 積水化学工業㈱, 前澤給装工業㈱ 三菱ケミカルインフラテック㈱, 未来工業㈱)の依頼を受けて実施した業務内容をまとめたものである。業務の計画, 実施, まとめの各段階において架橋ポリエチレン管工業会事務局及び会員会社のご担当者から貴重なご意見, ご指導及び多大のご協力を得た。ここに記して謝意を示す。

9. 参考文献

- 1) S.Kondo, S.Hokoi, Heat Loss from Hot Water Supply Line in a Residential Building, J. Environ. Eng., AIJ, Vol. 76 No. 669, 981-989, Nov. 2011.
- 2) 天辰公史郎, 平田 智子, 山本 高広, 住吉 大輔, 集合住宅における家庭用燃料電池を用いた電力・熱融通システムに関する研究 その 4 給湯配管での熱損失の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) 2016, 1137-

1138.

- 3) 岩本 静男, 浅野 健太, 近藤 武士, 王 祥武, 前真之, 鎌田 元康, 斎藤 忠義, 森田 哲司, 鬼塚 宏, 住宅用給湯設備の設計・評価に関する研究(その 11) 住宅用給湯配管と混合水栓の熱損失に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集(松江) 2003, 1601-1604.
- 4) 庄司 正弘, 伝熱工学, 東京大学出版会.
- 5) J. R. ホールマン, 平田 賢監訳, 伝熱工学, ブレイン図書出版株式会社.
- 6) 空気調和衛生工学便覧, 空気調和・衛生工学編, (株)オーム社.
- 7) 空気調和・衛生工学会, 空気線図の読み方・使い方
- 8) ASHRAE HANDBOOK Fundamentals 1981, ASHRAE.

Table A1 Symbols and units

附表 A1 計算式で使用了記号説明

Symbol	Name of quantity	Unit
$T_{w.in}$	Inlet water temperature	℃
$T_{w.out}$	Outlet water temperature	℃
T_w	Average temperature($=(T_{w.in}+T_{w.out})/2$)	℃
T_a	Ambient air temperature	℃
T_{s1}	Inside pipe surface temperature	℃
T_{s2}	Outer pipe surface temperature	℃
T_{s3}	Outer insulation temperature	℃
T_{ws}	Surface temperature of enclosed space	℃
r_1	Inner radius of pipe	m
r_2	Outer radius of pipe	m
r_3	Outer radius of pipe insulation	m
L	distance from pipe inlet	m
A_{s2}	Pipe outer surface area	m ²
A_{ws}	Enclosed space area	m ²
λ_k	Thermal conductivity of Crosslinked Polyethylene	W/mK
λ_h	Thermal conductivity of pipe insulation	W/mK
h_{1c}	Convective heat transfer coefficient on inside surface of pipe	W/m ² K
h_{2c}	Convective heat transfer coefficient on outside surface of pipe	W/m ² K
h_{2r}	Radiant heat transfer coefficient on outside surface of pipe	W/m ² K
h_2	Total heat transfer coefficient on outside surface of pipe	W/m ² K
λ_{air}	Thermal conductivity of air	W/mK
λ_w	Thermal conductivity of water	W/mK
v_{wa}	Water flow in pipe	m ³ /s
ν_{air}	Kinematic viscosity of air	m ² /s
α_{air}	Temperature conductivity of air	m ² /s
ν_w	Kinematic viscosity of water	m ² /s
α_w	Temperature conductivity of water	m ² /s
c_w	Specific heat of water	J/kgK
ρ_w	density of water	kg/m ³
u_{air}	Wind speed across the circumference	m/s
u_w	water flow rate through pipe	m/s
σ	Stefan-Boltzmann constant	-
ϵ_1	Radiant heat transfer coefficient on outside surface of pipe	-
ϵ_2	Radiant heat transfer coefficient on enclosed space	-
Nu_{Do}	Nusselt number of air on the outer surface of pipe	-
Re_{Do}	Reynolds number of air on the outer surface of pipe	-
P_{ro}	Prandtl number of air on the outer surface of pipe	-
Nu_{Di}	Nusselt number of water on the inner surface of pipe	-
Re_{Di}	Reynolds number of water on the inner surface of pipe	-
P_{ri}	Prandtl number of water on the inner surface of pipe	-