

給湯用架橋ポリエチレン管の給湯定常時における管内湯温計算式の整理及び精度検証 Proposal of Simple Hand-Calculation Formula for Hot Water Supply Crosslinked Polyethylene Pipes and Accuracy Verification

正 会 員 菅 哲俊（一般財団法人 ベターリビング）

Tetsutoshi KAN*¹

*¹ Center for Better Living

In this paper, propose simple hand-calculation formula, to calculate water temperature in hot water supply crosslinked polyethylene pipes in the house. In addition, calculated water temperature with proposed simple hand-calculation formula. And carry out test under same condition. To compare the calculation results and test results, confirmed that proposed simple hand-calculation formula is indeed.

1. はじめに

住宅の給湯用架橋ポリエチレン管の販売・導入現場においては、示された給湯入口からの距離における管内湯温を短時間に答えることが求められる場合がある。また、管内湯温の計算結果だけではなく湯温を求める計算根拠及び計算式に関する説明も求められる。湯温を正確に計算するためには、給湯管の設置環境及び設置状態など考慮すべき要因が多く、既往研究では順非定常計算や非定常計算モデルによる検討結果が発表されている。しかし、現場対応の計算では、入力データを少なくするなど計算の利便性が求められる。

そこで、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の計算式を整理したので報告する。さらに、代表条件における実験結果と計算結果との比較も行ったので、合わせて比較検討結果を報告する。

2. 計算対象の給湯用架橋ポリエチレン管と計算概要

計算対象は、一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とする。

給湯用架橋ポリエチレン管が床下空間で定常状態に達したと仮定し、表1に示した計算条件で給湯入口からの距離Lにおける給湯管内の湯温を計算する。湯温は、出入口温度差で計算した管内水の放熱量と管内水から管壁を通して伝達した熱量が同じであることから、熱平衡式をたてて計算する。計算手順を図1に示す。未知数の数が連立方程式の数より多いため、初期の管外表面温度は空気温度と水温度の平均値を与えてから繰り返し計算により計算結果を求める。

表1 計算条件及び計算すべき項目

	項 目
計算条件 (入力項目)	給湯管の入口温度 (°C)
	給湯管の入口からの距離L(m)
	水流量 (L/min)
	環境空気の温度 (°C)
	環境空気の風速 (m/s)
	架橋ポリエチレンの熱伝導率 (W/mK)
	保温材の熱伝導率 (W/mK)
計算項目 (出力項目)	管外表面の対流熱伝達率 (W/m ² K)
	管外表面の輻射熱伝達率 (W/m ² K)
	管外表面の総合熱伝達率 (W/m ² K)
	管内表面の対流伝達率 (W/m ² K)
	架橋ポリエチレン管の内表面温度 (°C)
	架橋ポリエチレン管の外表面温度 (°C)
	保温材の外表面温度 (°C)
	給湯管の入口からの距離L(m)点の管内湯温

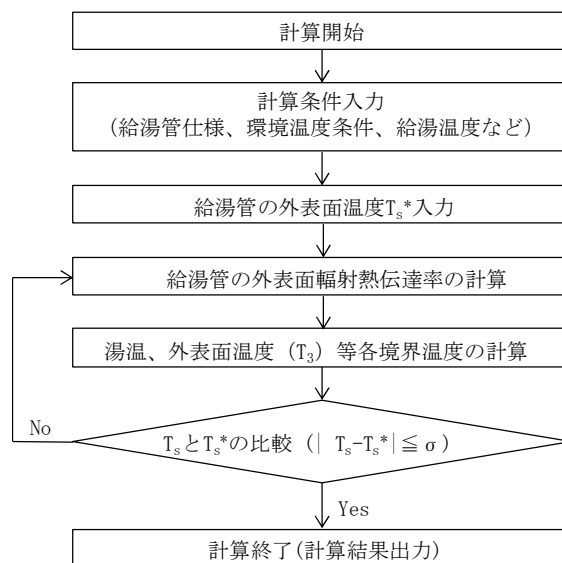


図1 計算手順

3. 架橋ポリエチレン管単体の計算方法

3. 1 湯温及び各境界面温度計算用の計算式

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床下空間で定常状態に達したと仮定して計算を行う。架橋ポリエチレン管単体の断面図を図 2 に示す。また、各部分の放熱量及び各部分温度の計算式を式 1～式 6 に示す。管内水の放熱量と管内水から環境空気への放熱量が同じであり、連立方程式を解くことで入口から距離 L 離れたところの管内湯温及び各部分の表面温度を計算する。なお、計算式で使用した記号の説明は附表 1 に示す (以下同じ)。

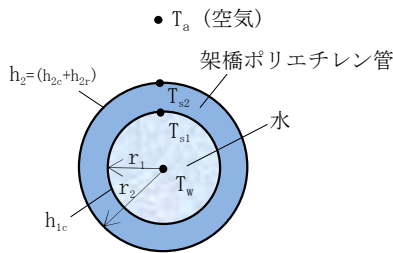


図 2 架橋ポリエチレン管単体の断面図
管内水の放熱量

$$Q = c_w \rho_w v_w (T_{w.in} - T_{w.out}) \quad \text{式 1}$$

管内水から環境空気への放熱量

$$Q = \frac{(T_w - T_a)}{Rt} \quad \text{式 2}$$

ここで

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

各表面温度の計算式

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

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

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

3. 2 給湯管外表面の対流熱伝達率の計算式

架橋ポリエチレン管単体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 3 に、計算式を式 7～式 10 に示す。

$$Nu_{Do} = \frac{h_{2c} D_o}{\lambda_{air}} \quad \text{式 7}$$

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

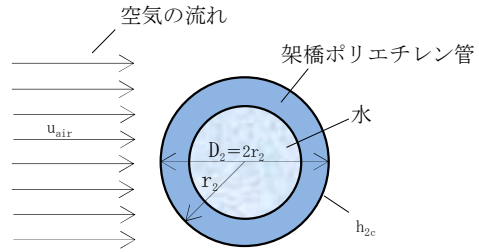


図 3 外表面対流熱伝達率計算の説明図

$$Re_{Do} = \frac{u_{air} D_o}{\nu_{air}} \quad \text{式 9}$$

$$Pr_o = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{air}} \quad \text{式 10}$$

計算式の適用範囲 $Re_{Do} Pr_o > 0.2$

3. 3 給湯管外表面の輻射熱伝達率の計算式

床下空間に、図 4 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輻射熱伝達率 h_{2r} を計算する。計算式を式 11 に示す。

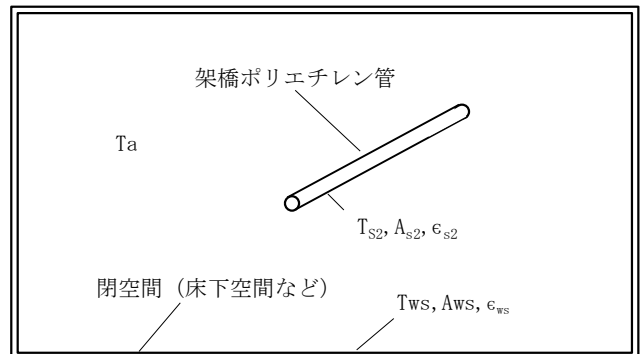


図 4 外表面の輻射熱伝達率計算の説明図

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

3. 4 給湯管内表面の輻射熱伝達率の計算式

架橋ポリエチレン管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の計算式を用いて計算する。説明図を 5 に、計算式を式 12～式 15 に示す

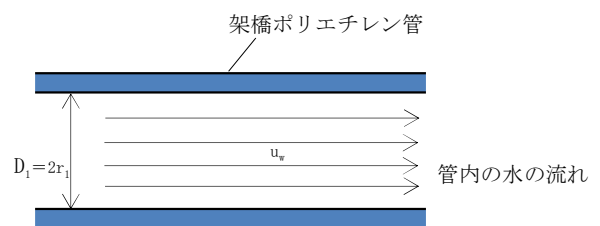


図 5 内表面対流熱伝達率計算の説明図

$$Nu_{Di} = \frac{h_{1c} D_1}{\lambda_w} \quad \text{式 12}$$

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

$$Re_{Di} = \frac{u_w D_1}{\nu_w} \quad \text{式 14}$$

$$Pr_i = \frac{c_p u_w}{\alpha_w} \quad \text{式 15}$$

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

4. 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も、管内水の放熱量と管内水から環境空気への放熱量が同じである条件で、給湯入口から距離 L 離れたところの管内湯温及び各部分の表面温度を計算する。保温材付き架橋ポリエチレン管の断面図を6に、各部分の放熱量及び各部分温度の計算式を式16～式22に示す。なお、外表面及び内表面の熱伝達率計算式は架橋ポリエチレン管単体と同じであり省略する。

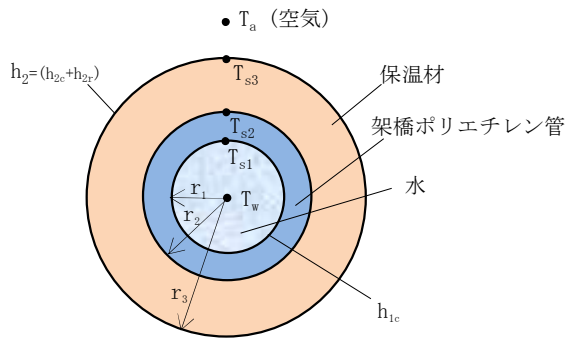


図6 保温材付き架橋ポリエチレン管の断面図

管内水の放熱量

$$Q = \frac{(T_w - T_a)}{R_t} \quad \text{式 16}$$

管内水から環境空気への放熱量

$$Q = c_w \rho_w v_w (T_{w.in} - T_{w.out}) \quad \text{式 17}$$

ここで

$R_t =$

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

各表面温度の計算式

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

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

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

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

5. 実験結果と計算結果との比較による精度確認

計算方法の計算精度を確認するために、一般的に使用されている給湯管及び温度条件における計算結果と実験結果との比較を行った。なお、計算条件と実験条件(特に、風向風速など)を同じに設定することは難しく、実験結果は計算精度を確認する位置づけである。

5. 1 実験概要

図7に示すように給湯用架橋ポリエチレン管を恒温室に設置して行った。給湯管の入口温度 60°C 、 40°C の2条件で実験を行い、定常状態に到達した時に給湯管入口から20m離れた箇所の管内湯温を測定した。実験を行った架橋ポリエチレン管を表2に、実験条件を表3に示す。

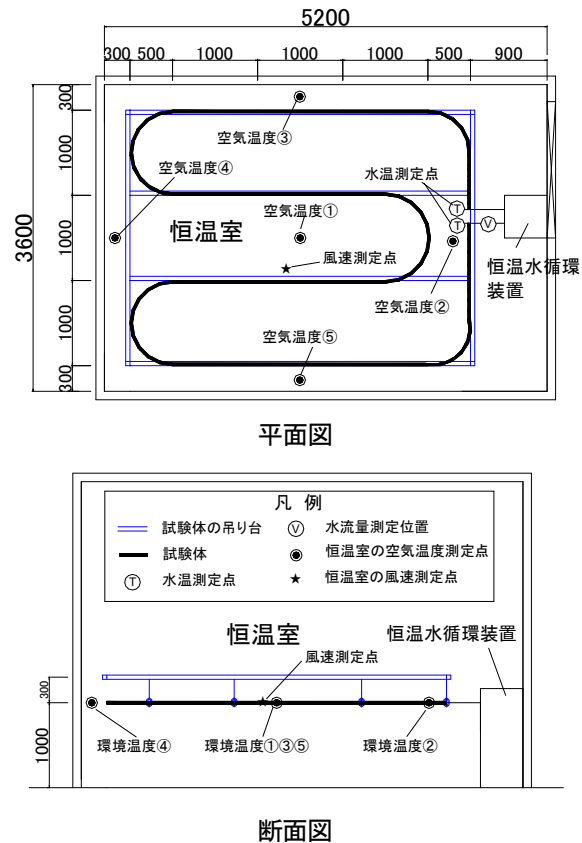


図7 実験装置の概要

表2 実験を行った架橋ポリエチレン管

試験体	呼び径	材質		断面寸法	長さ
架橋ポリエチレン管単体	13A	管	架橋ポリエチ	外径17.0mm, 内径12.8mm, 厚さ2.1mm	20m
5mm保温材付き架橋ポリエチレン管	13A	管	架橋ポリエチ	外径17.0mm, 内径12.8mm, 厚さ2.1mm	20m
		保温材	ポリエチレン	厚さ5.0mm	
10mm保温材付き架橋ポリエチレン管	13A	管	架橋ポリエチ	外径17.0mm, 内径12.8mm, 厚さ2.1mm	20m
		保温材	ポリエチレン	厚さ10.0mm	

表4 実験結果と計算結果の比較

	項目	架橋ポリエチレン管単管		保温材付き架橋ポリエチレン管 (5mm)		保温材付き架橋ポリエチレン管 (10mm)	
		条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
実験条件 及び計算条件	給湯管の入口温度 (°C)	60.7	40.5	60.5	40.4	60.4	40.4
	水流量 (L/min)	5.9	5.9	6.0	6.0	6.0	5.9
	恒温室の空気温度 (°C)	4.9	4.9	4.8	4.9	4.8	4.9
	恒温室の風速 (m/s)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	架橋ポリエチレンの熱伝導率 (W/mK)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
	保温材の熱伝導率 (W/mK)	-	-	0.035	0.035	0.035	0.035
計算結果	管外表面の対流熱伝達率 (W/mK)	13.9	13.9	9.7	9.5	8.6	8.6
	管外表面の輻射熱伝達率 (W/mK)	5.2	5.2	4.6	4.6	4.6	4.6
	管外表面の総合熱伝達率 (W/mK)	19.1	19.1	14.3	14.1	13.2	13.2
	管内表面の対流伝達率 (W/mK)	3971.8	3971.8	4833.6	4022.4	4847.0	4008.0
実験結果及び 計算結果	入口から20m離れた管内の湯温 (実験結果) (°C)	57.9	38.8	59.3	39.6	59.5	39.8
	入口から20m離れた管内の湯温 (計算結果) (°C)	58.2	38.9	59.6	39.8	59.8	40.0

表3 実験を行った架橋ポリエチレン管

実験条件	給湯管の入口温度	水流量	恒温室の空気温度
	°C	L/min	°C
実験条件1	60	6	5
実験条件2	40	6	5

附表1 記号の説明

記号	用語	単位
Tw.in	給湯管の入口湯温度	°C
Tw.out	給湯管の出口湯温度	°C
Tw	給湯管の平均湯温 (= (Tw.in+Tw.out)/2)	°C
Ta	環境の空気温度	°C
Ts1	架橋ポリエチレンの内表面温度	°C
Ts2	架橋ポリエチレンの外表面温度	°C
Ts3	保温材の外表面温度	°C
Tws	閉空間 (床下空間) の内表面温度	°C
r1	架橋ポリエチレンの内半径	m
r2	架橋ポリエチレンの外半径	m
r3	保温材の外半径	m
L	給湯管の入口からの長さ	m
As2	給湯管の外表面面積	m ²
Aws	給湯管の外表面面積	m ²
λk	架橋ポリエチレンの熱伝導率	W/mK
λh	保温材の熱伝導率	W/mK
h1c	給湯管の内表面対流熱伝達率	W/m ² K
h2c	給湯管の外表面対流熱伝達率	W/m ² K
h2r	給湯管の外表面輻射熱伝達率	W/m ² K
h2	給湯管の外表面熱伝達率	W/m ² K
λair	空気の熱伝導率	W/mK
λw	水の熱伝導率	W/mK
vw	給湯管内水の流量	m ³ /s
vair	空気の動粘度	m ² /s
αair	空気の温度伝導率	m ² /s
vw	水の動粘度	m ² /s
αw	水の温度伝導率	m ² /s
cw	給湯管内水の比熱	J/kgK
ρw	給湯管内水の密度	kg/m ³
uair	円周を横切る風速	m/s
uw	給湯管内を流れる水流速	m/s
σ	ステファン-ボルツマンの定数	-
ε1	架橋ポリエチレン管の外表面輻射率	-
ε2	閉空間 (床下空間) の輻射率	-
NuDo	ヌッセルト数 (給湯管外表面の空気)	-
ReDo	レイノルズ数 (給湯管外表面の空気)	-
Pro	プラントル数 (給湯管外表面の空気)	-
NuDi	ヌッセルト数 (給湯管内表面の水)	-
ReDi	レイノルズ数 (給湯管内表面の水)	-
Pri	プラントル数 (給湯管内表面の水)	-

5. 2 実験結果と計算結果の比較

表4に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、給湯管入口温度が60.7°Cの場合、給湯管入口から20m離れた管内湯温の実験結果は57.9°C、計算結果は58.2°Cと0.3°Cの差であった。また、給湯管入口温度が40.5°Cの場合は、管内湯温の実験結果が38.8°C、計算結果は38.9°Cと0.1°Cの差であった。厚さ5mm及び厚さ10mm付き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も0.2°C~0.3°Cだった。

6. おわりに

一戸建て住宅で使用する給湯用架橋ポリエチレン管について、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の計算式を整理した。さらに、代表条件における実験結果と計算結果との比較を行い、実験結果と計算結果との湯温差が0.1~0.3°Cであることを確認した。温度差は0.3°C以内と小さいが、もともと給湯管出入口の温度差が少なく、温度差の割合から見ると70~90%であった。

謝辞：本報告の内容は、(一財)ベターリビングが架橋ポリエチレン管工業会(会員会社:株式会社イノアック住環境、株式会社オンダ製作所、積水化学工業株式会社、前澤給装工業株式会社、三菱ケミカルインフラテック株式会社、未来工業株式会社)の業務依頼を受けて実施した内容をまとめたものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 庄司正弘、伝熱工学、東京大学出版会
- 2) 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)
- 3) 空気調和衛生工学便覧、空気調和・衛生工学編、(株)オーム社
- 4) 松尾 陽、HASP/ACLD/8501 解説、日本建築設備士協会、1985)