

管網配管レイアウトを考慮できるパイプクーリング解析手法の構築

名城大学大学院

○池村 穰

名城大学

正会員 博(工)

石川 靖晃

Abstract : In this study, a new thermal analysis method which can be applicable to the bifurcated pipe layout problem is presented in order to achieve a more rational pipe-cooling design for concrete structures. The conventional analytical method had the restriction that pipe layout is one way. In this study, flow calculation technique in the pipe network is introduced into the conventional analysis to vanish the restriction. In addition, some pipe-cooling thermal analyses are carried and the validity of the proposed analysis method is numerically discussed.

Key words : Pipe cooling ,Bifurcated pipe layout , thermal analysis

1. はじめに

パイプクーリングは、コンクリート打込み時に発生する水和熱を抑制する有効な手段の一つである。パイプクーリングの効果は、パイプレイアウトやパイプ径、冷却水の温度、通水量などによって変化するため複雑である。そのためパイプクーリングの効果を定量的に判断するためにはパイプクーリングを的確に反映させた温度解析を行う必要がある。

パイプクーリングを考慮した温度解析理論は田辺ら¹⁾によって確立され、そのFEM解析手法は溝渕ら²⁾によって開発された。一方で、上記の解析手法にはいくつかの問題点があり、パイプを配置する際にパイプレイアウトはコンクリート要素を構成する辺に沿って配置する制約や、パイプレイアウトは一本続きである制約が存在した。パイプレイアウトをコンクリート要素の稜線に配置する制約は、著者ら³⁾によって解消されており、前報にて既に報告されている。しかしながら、パイプレイアウトが一本続きである制約は依然残っている。本研究では、溝渕らによって構築された手法を基にパイプレイアウトが一本続きである制約を解消し、パイプの分岐を考慮したパイプクーリング解析手法の構築を目的とした。そして、本手法を用いて簡単なモデルでの解析を行い、一本続きと分岐したパイプレイアウトではクーリング効果に対してどのような影響を及ぼすか数値的検討を試みた。

2. パイプクーリングを考慮したコンクリートの熱移動理論

本論で用いる熱移動理論は、田辺¹⁾、溝渕²⁾らによって確立されている。本節ではその概要を述べる。

図-1のようなコンクリート内部にパイプが埋め込まれた体積領域 Ω について考察する。コンクリートの表面と外気は境界 S_1 を介して接しており、コンクリートとパイプ壁面は境界 S_2 を介して接していると想定する。この時のコンクリート体積領域内における非定常熱伝導方程式は以下の式となる。

$$k \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) + Q(t) = \rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 k は熱伝達率、 T_c はコンクリートの温度、 $Q(t)$ はコンクリート内部の発熱率、 ρ_c はコンクリ

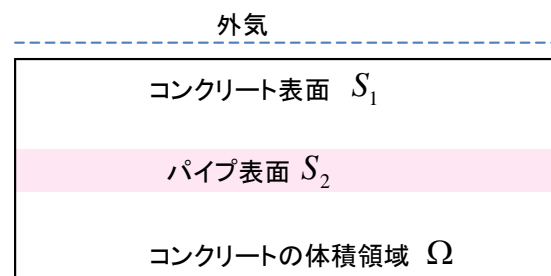


図-1 パイプが埋め込まれたコンクリート体積領域と熱伝達境界

ートの密度, c_c はコンクリートの比熱, t は時間である。

コンクリート表面と外気が接する対流境界は, 次式で表わされる。

$$k \frac{\partial T_c}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T_c}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T_c}{\partial z} n_z + q_s + \alpha_c (T_c - T_a) = 0 \quad (2)$$

ここで, n_x, n_y, n_z は境界面における方向余弦, q_s はコンクリート表面での熱流束, α_c はコンクリートの表面熱伝達率, T_a は外気温である。

パイプ壁面における境界条件は, パイプ内の水とコンクリートが接している境界面で熱伝達が行われると仮定すると次式で表現される。

$$k \frac{\partial T_c}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T_c}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T_c}{\partial z} n_z + \alpha_w (T_w - T_a) = 0 \quad (3)$$

ここで, α_w はパイプ壁面での熱伝達係数, T_w はパイプ内の水温である。

また図-2のようなパイプの微小区間における熱収支について考える。田辺らは, パイプ壁面から流入する熱変化量, パイプ区間内の熱変化量, 時間変化に伴う熱変化量を考慮することで, 熱収支の釣り合いよりパイプ内水温の支配方程式を次式の通りに得ることができる。

$$\rho_w c_w u \frac{\partial T_w}{\partial \ell} + \frac{2\alpha_w}{r} (T_w - T_c) + \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ここで ρ_w は水の密度, c_w は水の比熱, u はパイプ内流速, r はパイプ径, T_c はパイプ壁面温度である。

式(1)~式(3)にGalerkin法を適用し, コンクリートの節点温度 $\{T_c\}$ およびパイプ内節点水温 $\{T_w\}$ を用いてマトリクス表示すると次式となる。

$$[K_c] \{T_c\} - [K_{cw}] \{T_w\} + [C] \frac{\partial \{T_c\}}{\partial t} = \{F_c\} \quad (5)$$

同様に式(4)に対してGalerkin法を適用すると次式が得られる。

$$[K_w] \{T_w\} - [K_{wc}] \{T_c\} + [W] \frac{\partial \{T_w\}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

ここで, 式(5)における $[K_c]$ は次式となる。

$$[K_c] = \int_{\Omega} [B]^T k [B] d\Omega + \int_{S_1} [N_c]^T \alpha_c [N_c] dS_1 + \int_{S_2} [N_c]^T \alpha_w [N_c] dS_2 \quad (7)$$

また, $[C]$ および $\{F_c\}$ はパイプクーリングを考慮しない通常の熱伝導方程式に係わるマトリクスであり, $[K_{cw}]$, $[K_{wc}]$, $[K_w]$, $[W]$ はパイプクーリング効果を考慮することによって生成されたマトリクスである。ここまでの詳細については文献²⁾を参照にされたい。式(5), (6)を連成させると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_c & -K_{cw} \\ -K_{wc} & K_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_c \\ T_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} T_c \\ T_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式(8)を時間差分化することにより, パイプクーリング効果を考慮した温度解析が可能となる。式(7)はそれぞれコンクリートの熱伝導に関する項とコンクリート表面の対流境界に関する項, コンクリートとパイプ間の対流境界に関する項の3つから構成される。そこで式(7)を式(9), (10)のように分解する。

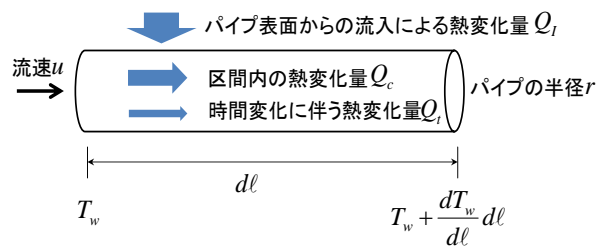


図-2 パイプ内水温の熱収支

$$[K_{c1}] = \int_{\Omega} [B]^T k [B] d\Omega + \int_{S_1} [N_c]^T \alpha_c [N_c] dS_1 \quad (9)$$

$$[K_{c2}] = \int [N_c]^T \alpha_w [N_c] dS_2 \quad (10)$$

ここで、 $[K_{c1}]$ は通常の熱伝導方程式に係わる項であり、コンクリート要素のみの情報から計算される。 $[K_{c2}]$ は残りの項である。このことから式(8)はコンクリート要素のみで成立する通常の熱伝導についての支配方程式(式(11))とパイプ要素およびパイプ要素が埋め込まれたコンクリート要素で成立する式(12)と2つに分解することができる。

$$\begin{bmatrix} K_{c1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} K_{c2} & -K_{cw} \\ -K_{wc} & K_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

言い換えれば、通常のコンクリートの温度解析プログラムに式(12)を単に重ね合わせることにより、パイプクーリングの効果を考慮することができる。

3. 従来の解析手法の制約とその改善

式(10)中にはパイプ要素に沿った数値積分が存在するが、その場合、対応するコンクリート要素のガウス点を明確にする必要がある。コンクリート要素の稜線上にパイプ要素が存在する場合、**図-3(左)**のように対応するガウス点は容易に求まるが、パイプ要素が稜線上に無い場合、**図-3(右)**のように対応するガウス点は容易には求めることができない。そこで著者らは、これらのガウス点を数値的に求める手法を構築することで自由にパイプレイアウトが可能な数値解析手法を構築した。詳細については、文献³⁾を参考にされたい。

4. 分岐したパイプ内流量の計算手法

前述の手法により任意のパイプレイアウトによるパイプクーリング温度解析が可能となったが、パイプレイアウトが一本続きである制約は未だ残っている。パイプレイアウトが一本続きの場合、流速は容易に求めることができる。一方、パイプが管網を構成している場合、各パイプ毎に流速が異なるので、何らかの手法で各パイプ要素の流速を求める必要がある。式(4)における u はパイプ内流速であるため、各パイプの流速を求める必要がある。管網を構成しているパイプ内流速を求める代表的な手法は、主にハーディ・クロス法や節点水頭法である。ハーディ・クロス法は閉管路の流量計算しか行うことができないため、本研究では節点水頭法を用いて各パイプ内流速を求めることを試みた。

節点水頭法の基礎方程式は、各管路の流量を節点エネルギー位で表わす流量式と各節点に接続する管

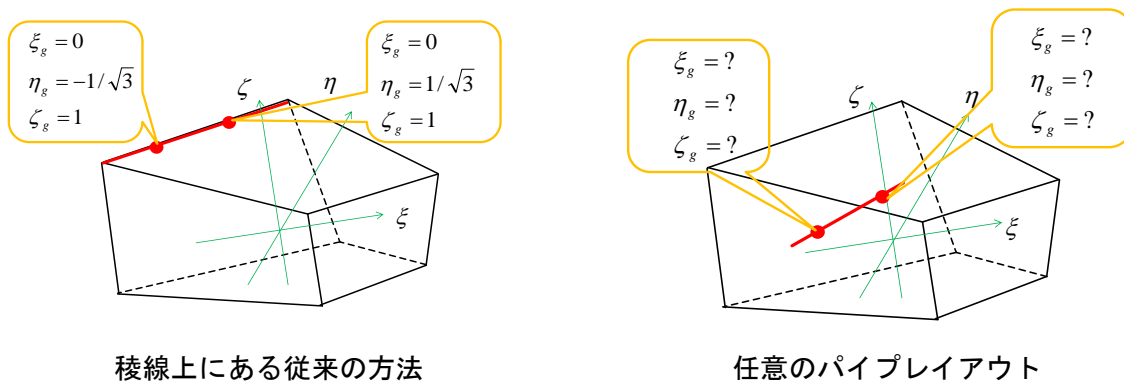


図-3 ガウス点に対応する局所座標の算出

路の流量が満たすべき節点方程式によって構成されており、次式で表わされる。なお、摩擦以外の折れ曲がり部と急縮部、急拡部の損失などは簡単のため無視した。すなわち、同一パイプ内の流速は一定と仮定した。

$$Q_{ij} = R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} (E_i - E_j) \quad (13)$$

$$\sum_j Q_{ij} + p_i = 0 \quad (14)$$

ここで、 i, j は節点番号、 Q_{ij} はパイプ要素 ij 間の流量、 E_i は節点 i におけるエネルギー位、 p_i は節点 i における流出量であり、 R と a はパイプ内の損失に関するパラメータである。これらのパラメータを決定する際、種々の方法があるが次式のヘーゼン・ウィリアムス式を用いる場合は次式となる。

$$R = 0.27853 C_H D^{2.63} L^{0.54}, \quad a = 0.54 \quad (15)$$

ここで、 C_H はヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数、 D は管径、 L は管路長である。式(13)を式(14)に代入し整理すると次式となる。

$$E_i \sum_j s_{ij} - \sum_j s_{ij} E_j = -p_i \quad (16)$$

ここで、 s_{ij} は次式で与えられる。

$$s_{ij} = R_{ij} |e_i - e_j|^{a-1} \quad (17)$$

この時、 e_i は節点 i におけるエネルギー位の仮定値である。式(16)は管路に存在する節点数から既知エネルギー位の節点数を引いた数だけ存在する。式(17)中の e_i, e_j を仮定し、式(16)を用いて E_i, E_j を解く。求めた E_i, E_j を e_i, e_j とし、繰り返し計算を行うことで、エネルギー位 E_i, E_j を求めることができる。そして得られた E_i, E_j を式(13)に代入し計算することでパイプ内流量を求めることができる。詳細については文献⁴⁾を参考にされたい。ここで求められた流量を流速に変換し、式(4)に反映させることにより分岐を考慮したパイプレイアウトに対するパイプクーリング解析が可能となる。本研究では、著者らが既に開発したパイプクーリング温度解析プログラムとは別に管網解析プログラムを作成し、両方のプログラムを併せることにより分岐を考慮したパイプクーリング温度解析プログラムを改良した。

5. 数値解析例

まず、流量計算に採用した節点水頭法の数値的確認を得るために、管網のみを考えその流量の数値計算を行った。数値計算を行う対象は文献⁵⁾を参考にした。パイプレイアウトおよび管路長 L 、管径 D を図-4に示す。節点Aより $0.082 \text{ m}^3/\text{sec}$ で注水し、節点B, C, Dよりそれぞれ $0.014 \text{ m}^3/\text{sec}$, $0.007 \text{ m}^3/\text{sec}$, $0.061 \text{ m}^3/\text{sec}$ で排水されているとして計算を行った。ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数 C_H は100とした計算結果を表-1に示す。またハーディ・クロス法による計算結果を併記した。両者の手法によって得られた結果は、同様な値であることが確認された。

次に分岐したパイプレイアウトに対するパイプクーリング解析を行った。解析モデルを図-5に示す。解析モデルは、 $2000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$ とし、コンクリートの表面は断熱境界、打設後3日目より $4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ で通水を開始することを想定した。解析に使用したパイプ物性値および計算されたパイ

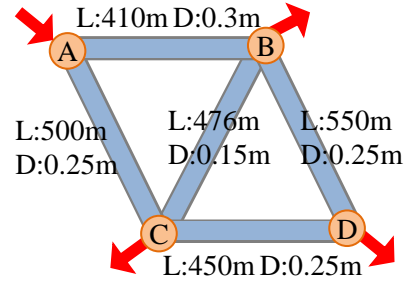


図-4 管網解析対象レイアウト (パイプのみ)

表-1 管網解析結果 (パイプのみ)

	流量(m^3/s) (節点水頭法)	流量(m^3/s) (ハーディ・クロス法)
パイプAB	4.95×10^{-2}	4.95×10^{-2}
パイプAC	3.25×10^{-2}	3.25×10^{-2}
パイプBC	4.23×10^{-3}	4.23×10^{-3}
パイプBD	3.13×10^{-2}	3.13×10^{-2}
パイプCD	2.97×10^{-2}	2.97×10^{-2}

ブ内流量を表-2に示す。ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数 C_H は120とした。解析に用いた熱特性値を表-3に示す。パイプ毎の熱伝達率は、管網解析にて得られた流速を用いて溝渕ら²⁾の研究を基に次式から求めた。

$$h = -0.06u^2 + 14.5u - 198 \quad (\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}) \quad (18)$$

ここで、 u は流速とする。詳細は溝渕らの研究²⁾を参考にされたい。図-6にコンクリート温度分布の経時変化、図-7に節点a、bにおける温度履歴を示す。図-6よりパイプレイアウトに沿ってクーリングの影響が見られ、節点a側のパイプ近辺が大きく冷却されていることが確認できる。節点aが節点bと比較した場合大きな差が見られ、パイプの分岐を考慮した上でのパイプ径や流量の変化により冷却効果に変化が見られることが確認された(図-7)。また、図-6よりパイプ屈折部周囲の温度がそれまでの直線部周辺の温度より低くなっているが、これは2次元的なパイプ配置の影響と同一パイプ内の流速を一定としているためと推察される。この点については、今後検討していきたい。

次に現実的なパイプレイアウトを基にパイプクーリング効果を多角的に数値検討を行えるかどうかを試みた。図-8は、一般的に施工されているパイプレイアウトの一部を想定したものである。図-9は図-8のパイプレイアウトにバイパスを繋ぎ管網を構成したレイアウトを想定した。解析対象モデルは、4500mm×4500mm×1000mmとした。緑色部分のパイプ径は24.5mmとし、青色部分のパイプ径は、24.5mm, 12mm, 6mmの3パターンとした。コンクリートの表面はすべて断熱境界とし、打設3日目から注水口より $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ で通水を開始すると想定した。先に節点水頭法を用いて各パイプ内流量を計算を行った。管網解析を行う際に用いた特性値は、各パイプにおけるパイプ径およびパイプ長、ヘーゼン・ウィリアムス式の流速係数 C_H は120とし、注水口から $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ で通水し、排水口のエネルギー位は大気圧とした。流量計算結果を表-4に示す。得られた流量を基にパイプクーリング解析を実施した。なおパイプの熱

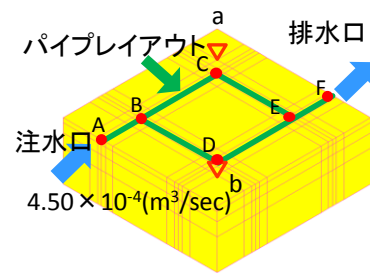


図-5 解析モデル

表-2 パイプ物性値と流量計算結果

区間	パイプ長(m)	パイプ径(mm)	流量(m ³ /sec)
AB	0.5	30	4.50×10^{-4}
BC	1	40	3.88×10^{-4}
CE	1	40	3.88×10^{-4}
BD	1	20	6.23×10^{-5}
DE	1	20	6.23×10^{-5}
EF	0.5	30	4.50×10^{-4}

表-3 使用した熱特性値

終局断熱温度上昇量	46°C
速度定数	1.104
水の密度	1000kg/m ³
水の比熱	4.18kJ/kg°C
コンクリートの熱伝達率	2.7W/m ² °C
コンクリートの密度	2300kg/m ³
コンクリートの比熱	1.1kJ/kg°C

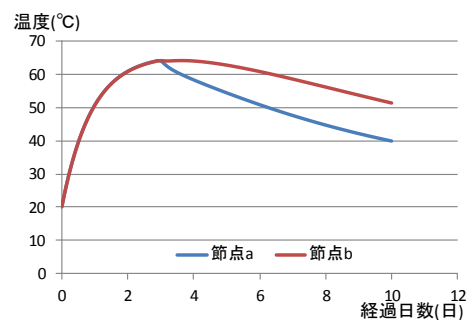


図-7 節点 a, b における温度履歴

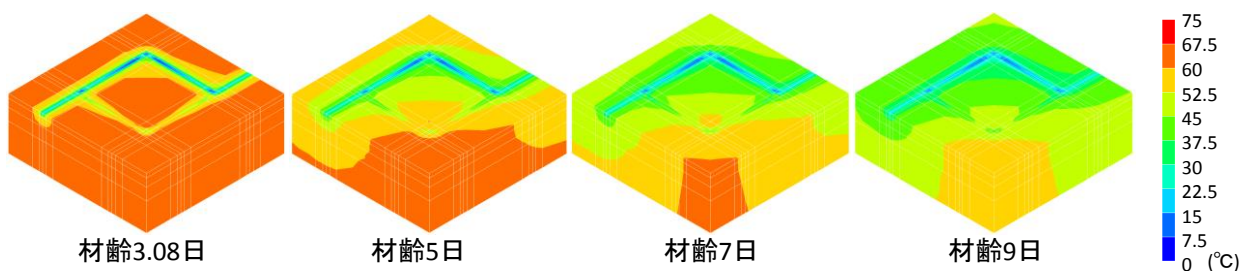


図-6 コンクリート温度分布の経時変化

伝達率は溝渕らの研究を参考に決定し、流速が適用範囲内より低い場合は最小の熱特性値を用いた。コンクリートに関する熱特性値は図-5の解析モデルと同様の値を使用した。図-10および図-11に節点A、節点Bにおける温度履歴を示す。節点Aでは、新たにパイプを通したことで一本続きのレイアウトより冷却効果が出ており、12mmのパイプを繋いだ時に大きく冷却されていることが確認できる。また排水口近傍の節点Bではバイパスを繋いだことにより従来のパイプレイアウトより2~4℃ほど冷却されていることが確認できた。以上のことから本研究で行った解析の範囲では、分岐を考慮したパイプクーリング温度解析が数値解析上可能であると思われる。

6. おわりに

提案した手法を用いて、管網配管を構成したパイプレイアウトに対するパイプクーリング解析を行った。その結果、分岐したパイプレイアウトにおけるパイプクーリング解析が数値上可能であることがわかった。また任意のパイプレイアウトが配置可能となったため、さらなる検証を行うことでパイプクーリング効果に対する多角的な検討が行えると思われる。今後は、実測との比較を行い本手法がどの程度冷却効果を表現できるか検証を行いたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、名城大学自然災害リスク軽減研究センター(代表者：小高猛司)と JSPS 科研費 25420467 の助成を受けて実施したものである。また、本研究を遂行するにあたり、LECOM 研究会の委員の方々から貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田辺忠顕, 山川秀次, 渡辺朗: パイプクーリングにおける管壁面の熱伝導率決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文集, 第 343 号, pp.171-179, 1984.3
- 2) 溝渕利明, 成田総一郎, 都築慶剛, 平戸裕之, 田辺忠顕: マスコンクリートにおけるパイプクーリングによる熱除去効果に関する研究, 土木学会論文集, No.665, V-49, pp147-163, 2000.12
- 3) 池村穰, 石川靖晃: 任意のパイプレイアウトに対するパイプクーリング解析の提案, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp59-64, 2013
- 4) 高桑哲男: 配水管網の解析と設計, 森本出版, 1979.8
- 5) 松梨順三: 水理学、土木工学基礎講座, 朝倉書店, 1975

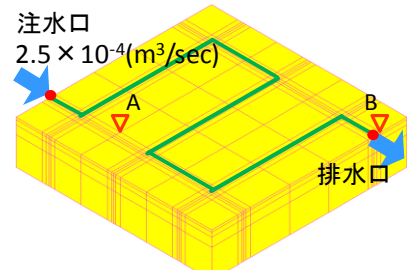


図-8 一般的なパイプレイアウト

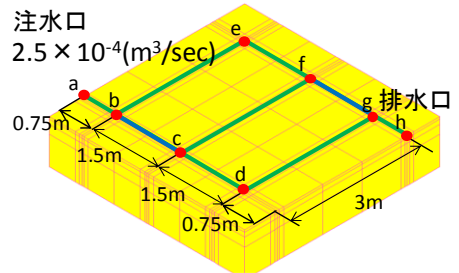


図-9 バイパスを繋いだレイアウト

表-4 流量計算結果

パイパス パイプ径	流量(m ³ /sec)		
	24.5mm	12mm	6mm
管路ab	2.50 × 10 ⁻⁴	2.50 × 10 ⁻⁴	2.50 × 10 ⁻⁴
管路bc	1.53 × 10 ⁻⁴	6.07 × 10 ⁻⁵	1.35 × 10 ⁻⁵
管路cd	9.74 × 10 ⁻⁵	1.89 × 10 ⁻⁴	2.37 × 10 ⁻⁴
管路be	9.74 × 10 ⁻⁵	1.89 × 10 ⁻⁴	2.37 × 10 ⁻⁴
管路cf	5.53 × 10 ⁻⁵	-1.29 × 10 ⁻⁴	-2.23 × 10 ⁻⁴
管路dg	9.74 × 10 ⁻⁵	1.89 × 10 ⁻⁴	2.37 × 10 ⁻⁴
管路ef	9.74 × 10 ⁻⁵	1.89 × 10 ⁻⁴	2.37 × 10 ⁻⁴
管路fg	1.53 × 10 ⁻⁴	6.07 × 10 ⁻⁵	1.35 × 10 ⁻⁵
管路gh	2.50 × 10 ⁻⁴	2.50 × 10 ⁻⁴	2.50 × 10 ⁻⁴

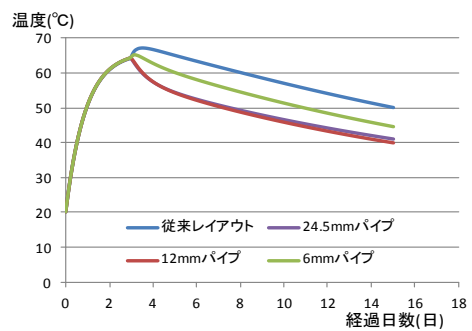


図-10 節点 A における温度履歴

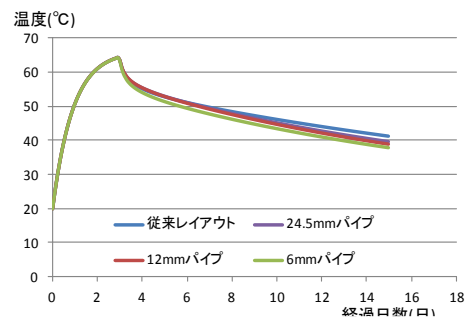


図-11 節点 B における温度履歴