

下水管路を活用した下水熱利用・熱融通システムのシミュレーション手法の研究

地域環境計画分野 澤部 孝一

Abstract

本研究では、地球温暖化対策として、下水熱の空調・給湯へ活用を考え、下水管路近傍での下水熱利用・熱融通システムの実用化に向けて、本システム導入の際に、基本計画の一助となるシステム全体のシミュレーション方法を提案する。シミュレーションモデルは、熱交換器やヒートポンプ等の設備機器、下水管路、補機類などの特性を共通の特性表現形式で整理し、構成したものである。その方法により、多数の集合住宅と年間冷房施設での熱融通モデルにてケーススタディを行った。また、下水熱利用・熱融通システムにおいて、熱導管となる埋設管路の熱輸送特性計算手法についてまとめ、定常計算手法と非定常計算手法の適用条件について検討を行った。その結果より、管路長 1(km)、管路径 1.2(m)の埋設管路モデルにおいて、定常計算を適用可能な流速条件を示した。

1 研究の背景と目的

地球温暖化対策として、都市域における未利用エネルギーである下水熱の活用が考えられる。Fig.1に示す様に、下水は外気温と比べ年間を通して温度変化が小さく、冬期は 10(degC)以上、夏期は日中 2~3(degC)の差があり、ヒートポンプ(以後、HP と呼ぶ)の熱源として価値が見込まれる。下水熱利用を考えた時、我が国では下水道施設近傍地域での導入に限定されており、距離が離れた施設間での下水熱利用は存在しない。

そこで、既設の下水管路網を熱導管として活用すれば、管路上での熱利用、建物間での熱融通が可能となり、熱輸送管路を新設する費用も削減できる。本研究では、管路近傍の建物で、管路内の下水に採排熱を行うことを『下水熱利用』、ある建物での下水熱利用による下水温度変化を活かし下流の建物で採排熱を行うことを『下水熱融通』と呼ぶ。

下水熱利用・熱融通システムの普及へ向け、本システムの設計手法を研究する必要がある。本研究では、下水管路近傍での下水熱利用・熱融通システムの実用化に向けて、本システム導入の際に、基本計画段階の一助となるシミュレーション方法の確立を目指す。

本研究の目的は、熱融通のための管路熱輸送特性計算手法を確立することと、下水熱利用・熱融通システム全体のシミュレーション方法を確立することである。

本研究では、管路熱輸送特性計算手法として、非定常計算による手法を提案し、既往の 2 つの定常計算による手法と非定常計算手法を検討管路モデルにおいて計算結果を比較する。その結果から、定常計算・非定常計算の適用条件について検討する。

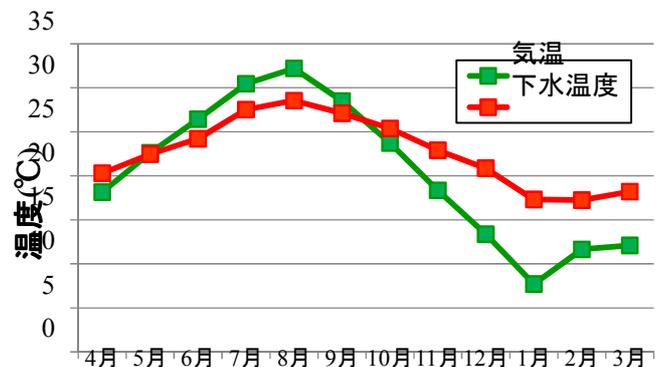


Fig.1 気温と下水温度の比較^[1]

また、設備機器、埋設管路、補機類の特性をシステムの要素として捉え、各要素を接続して全体のシミュレーションを行う手法を提案する。各要素の入出力状態量を整理して、物理モデル式を作成する。この方法によるケーススタディにて年間の省エネ効果を試算し、熱融通建物間の規模との関係について検討する。

2 地中埋設管路の熱輸送特性計算手法

本研究では、地中埋設管路として Fig.2 の様なモデルを考える。熱輸送特性計算手法は、埋設管路内の水温を推定する 2 種の既往一次元定常伝熱計算手法がある。Eq.1 は、境界条件として気温を与え、管路と地表面との間の土壌の熱抵抗を考慮し、管路内水と地表面との熱交換を考える定常計算モデル(以降、気温境界条件定常計算手法と呼ぶ)である。また、Eq.3 は、境界条件として管路周囲の土壌温度を与え、管路内水と管路周辺土壌との熱交換を考えた定常計算モデル^[3](以降、土壌温度境界条件定常計算手法と呼ぶ)である。

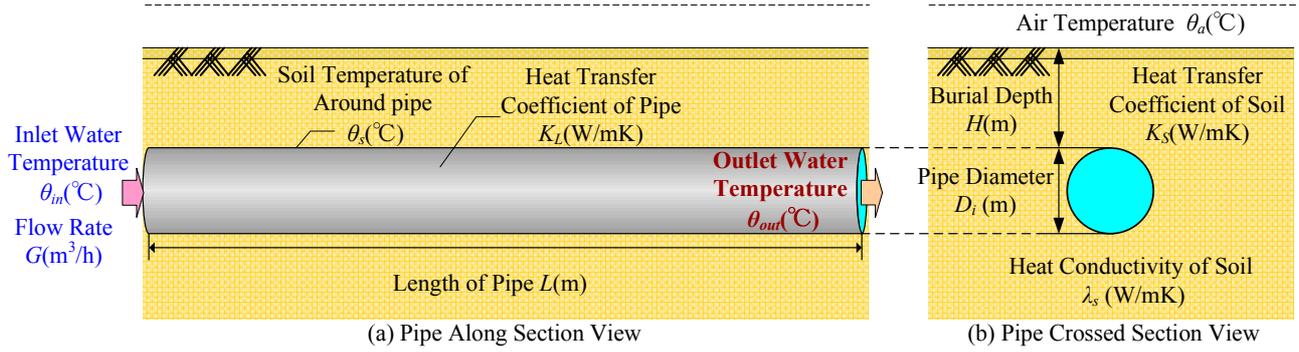


Fig.2 地中埋設管路モデル

以上2種類の定常計算モデルが考えられるが、どちらの手法も土壌の熱容量が考慮されていない。そこで本研究では、土壌伝熱を考慮した非定常伝熱計算により埋設管路の熱輸送特性計算を行い、既往の定常計算モデルとの比較を行う。

2.1 非定常熱輸送特性計算手法

地中埋設管路の非定常熱輸送特性計算では管路断面方向と、管路長方向の三次元非定常伝熱計算を行う必要がある。しかし、土壌伝熱を考慮した三次元非定常伝熱計算は複雑で、計算時間も長く必要となる。そこで、建物の非定常熱負荷計算に用いられる応答係数法を埋設管路の非定常伝熱計算に利用する。管路内水から土壌への管路断面方向の放熱特性を、重み関数の一種である応答係数を利用して別途求めておき、管路長方向の熱輸送特性計算に利用する方法をとる。なお、管路長方向の土壌伝熱は無視する。

応答係数は、有限要素法解析ソフト Freefem++^[4]を用いて地中埋設管路断面モデルを作成し、三角形メッシュに分割して算出する。

2.2 応答係数による埋設管路断面方向への伝熱計算

地中埋設管路断面モデルは、Fig.3に示す地表面を一辺に取った長方形土壌に管路が敷設されたモデルである。なお、土壌は舗装を含む均質な土壌であると仮定する。このモデルにて土壌の応答係数を算出する。管路の内表面に三角波励振 $\theta_A(t)$ を与えた際の管路内表面の応答を吸熱応答 $\phi_A(t)$ とする。また、地表面に三角波励振 $\theta_T(t)$ を与えた際の管路内表面の応答を貫流応答 $\phi_T(t)$ とする。応答係数を用い、Eq.5の畳込み計算により管路から土壌への熱流を計算する。

2.3 管路長方向の伝熱計算

管路長方向の伝熱計算は Eq.6 で行う。Eq.6 の左辺は単位時間あたりの熱量変化、右辺第一項は管路の

【気温境界条件定常計算】

$$\theta_{out} = \theta_a + (\theta_{in} - \theta_a) \exp\left(-\frac{K_s L}{C_w G}\right) \quad \text{Eq.1}$$

$$K_s = \frac{2\pi\lambda_s}{\ln\left[2Z/D_N + \sqrt{(2Z/D_N)^2 - 1}\right]} \quad \text{Eq.2}$$

【土壌温度境界条件定常計算】^[3]

$$\theta_{out} = \theta_s + (\theta_{in} - \theta_s) \exp\left(-\frac{K_L L}{C_w G}\right) \quad \text{Eq.3}$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{\alpha_0 D_0} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\log(D_i/D_{i-1})}{\lambda_i} \right\} \quad \text{Eq.4}$$

【管路断面方向の畳込み計算】

$$q_{s_{(i,j)}} = \sum_{m=0}^j (\theta_{w_{(i,j-m)}} - \theta_r) \phi_{A_{-m}} - \sum_{m=0}^j (\theta_{a_{(i,j-m)}} - \theta_r) \phi_{T_{-m}} \quad \text{Eq.5}$$

【非定常熱輸送特性計算】

$$C_w A \frac{\partial \theta_{w_{(x,t)}}}{\partial t} = -C_w G \frac{\partial \theta_{w_{(x,t)}}}{\partial x} - q_{s_{(x,t)}} \quad \text{Eq.6}$$

$$\theta_{w_{(i,j+1)}} = \frac{\left\{ \theta_{w_{(i,j)}} + \frac{G \Delta t}{A \Delta x} \theta_{w_{(i-1,j+1)}} - \frac{\Delta t}{C_w A} (q_{s_{(i,j+1)}}^* - \phi_{A_{-0}} \theta_r - q_{T_{(i,j+1)}}) \right\}}{\left\{ 1 + \frac{G \Delta t}{A \Delta x} + \frac{\Delta t}{C_w A} \phi_{A_{-0}} \right\}} \quad \text{Eq.7}$$

$$(h/D) = 0.6791 (G/G_{full})^{0.4875} \quad \text{Eq.8}$$

【使用記号】

θ_{out} : 出口温度(degC), θ_{in} : 入口温度(degC), θ_a : 外気温(degC), K_s : 土壌熱貫流率(W/mK), L : 管路長(m), G : 流量(m³/h), C_w : 容積比熱(MJ/m³K), λ_s : 土壌熱伝導率(W/mK), Z : 埋設深さ(m), θ_s : 土壌温度(degC), K_L : 管路熱貫流率(W/mK), D_0 : 管路内径(m), D_N : 管路外径(m), D_i : i 層の外径(m), α_0 : 管内表面熱伝達率(W/m²K), $\lambda_{p,i}$: i 層の管路熱伝導率(W/mK), $q_{s_{(i,j)}}$: 管路断面方向の放熱量(J/m), θ_w : 水温(degC), θ_r : 基準温度(degC), $\phi_{A_{-m}}$: 吸熱応答係数(W/mK), $\phi_{T_{-m}}$: 貫流応答係数(W/mK), i : 空間節点(-), j : 時間節点(-), m : 経過時間(-), q_A : 吸熱熱流(J), q_A : 貫流熱流(J), A : 流水断面積(m²), t : 時間(s), x : 位置(m), h : 水深(m), G_{full} : 満管流量(m³/h)

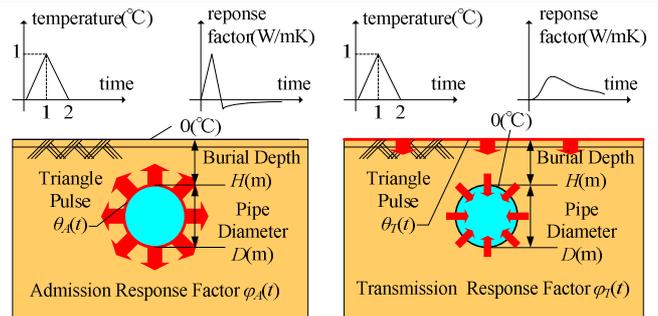


Fig.3 埋設管路断面モデル

単位長さあたりの熱量変化，第二項は管路水と地中の伝熱項である．右辺第二項は，Eq.5 で算出する放熱流を代入する．Eq.6 は風上差分法を用いて差分化する． $q_{s(x,t)}$ にも $\theta_{w(i,j+1)}$ が含まれているため， $\theta_{w(i,j+1)}$ の項を分離し，整理するとEq.7となる．下水管路の場合は管内を流れる水が満水でないため，水理特性曲線近似式Eq.8を用いて流量から水深を求め，Fig5の管路断面図から幾何学的に流水断面積 A を求める．

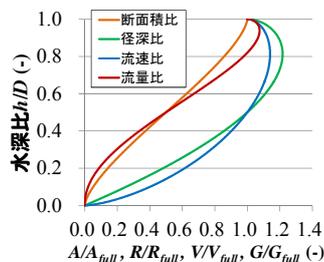


Fig.4 水理特性曲線

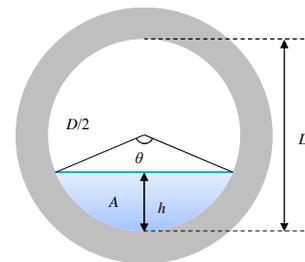


Fig.5 下水管路断面図

3 応答係数の算出

本研究では Table1 に示す 36 種の埋設幹線管路モデルにおいて，応答係数を算出した．Freefem++における応答係数を算出する計算条件と土壌物性値を Table2 に示す．Table2 の土壌物性値， $D=1.2(m)$ ， $H=1.0(m)$ の管路断面条件において算出された吸熱応答，貫流応答を Fig.6 に示す．算出された応答係数は，管路断面方向への熱流計算に利用する．吸熱応答は，1 時間ごとの 24 時間後までの時系列グラフ，貫流応答については，1 時間ごとの 600 時間後までの時系列グラフを示している．なお，本研究では，様々な土壌物性値において，住宅敷地内埋設管路のような細い管路についての応答係数も算出している．

4 管路熱輸送特性手法の定常・非定常計算適用範囲

本項では，管路熱輸送特性計算手法について定常計算と非定常計算による管路出口水温計算結果の差異を評価し，定常計算の適用条件を検討する．

4.1 計算条件

検討モデルにおける計算条件を記す．管路条件は管路径 1.2(m)，埋設深さ 1.0(m)，管路長は 1.0(km)とした．満水の管路を一定の流速で水が流れるとし，Table3 に示す流速の各ケースにおいて，入口水温は 20(degC)と 25(degC)で 12 時間ごとに切り替える周期的な矩形波入力を与える．非定常計算に用いる応答係数については，Fig.6 の応答係数を用いる．公比打ち切り項数は 700 項とし，そのときの公比は吸熱応答の公比が 0.9222，貫流応答の公比が 0.9994 と算出される．Table4 に計算条件をまとめる．また，計算の助走期間を 5 日，計算期間を 5 日としている．

4.2 計算結果

代表ケースとして流速 $V=0.02(m/s)$ と $V=0.3(m/s)$ の定常計算と非定常計算の管路出口水温の計算結果を Fig.8 に示す．なお，計算開始の助走期間から計算期間 5 日目(120~240 時刻)までの結果を示している．

計算結果を見ると流速が遅い場合，非定常計算で

Table1 幹線管路断面モデル

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
H	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
No	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
H	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
No	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
D	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.6	1.2
H	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1.0	1.0

Table2 応答係数算出条件と土壌物性値

	吸熱応答	貫流応答
初期条件	範囲全体に温度=0(degC)	範囲全体に温度=0(degC)
境界条件	管路周り 1 時間で 温度=1(degC)の三角波	地表面に 1 時間で 温度=1(degC)の三角波
	地表面に温度=0(degC)	管路周りに温度=0(degC)
メッシュ 分割数	管路周り=30，地表面=20 地表面以外の辺=20	管路周り=30，地表面=50 地表面以外の辺=20
土壌 物性値	熱伝導率 $\lambda_s=1.8953(W/mK)$ ，密度 $\rho_s=1591(kg/m^3)$ ， 比熱 $c_s=1465.1(J/kgK)$	
計算時間	50 日間(1200 時間)	

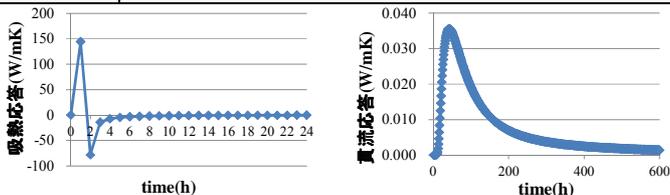


Fig.6 吸熱応答係数 (左) と貫流応答係数 (右)

Table3 検討モデルの流速ケース

	case1	case2	case3	case4	case5	case6	
流速	(m/s)	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.075
流量	(m³/h)	40.7	81.4	122.1	162.9	203.6	305.4
	case7	case8	case9	case10	case11	case12	
流速	(m/s)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	1.000
流量	(m³/h)	407.2	814.3	1221.5	1628.6	2035.8	4071.5

Table4 管路条件と計算条件

項目	値	単位
管路長 L	1000	(m)
管路径 D	1.2	(m)
埋設深さ H	1.0	(m)
外気温 θ_a	20	(degC)
地中温度 θ_s	17	(degC)
初期水温	20	(degC)
空間刻み幅 dx	10	(m)
計算日数	5	(day)
応答係数打ち切り項数	700	(h)
定常熱貫流値 K	6.67	(W/mK)

は時間遅れがあるのが分かる．流速 $V=0.02(m/s)$ の場合では定常計算に比べ，非定常計算の水温のピークが約 12 時間程度遅れている．流速が大きいほど，時間遅れは小さく，定常計算と非定常計算による計算結果は近い値を示す．流速 $V=0.3(m/s)$ の場合には非

定常計算と定常計算に大きな差異は見られない。

管路熱輸送特性計算の2種類の定常計算と非定常計算の差異の評価指標として平均二乗誤差(RMSE)を用いる。RMSEは非定常計算の出口水温計算結果に比べ、定常計算の結果が近いほど小さい値を示す。

Fig.9に各流速ケースのRMSEを示す。非定常計算に対する定常計算の計算結果の誤差を許容する許容誤差温度を目的により設定する必要がある。Fig.9によると、Table5に示すような許容誤差RMSEに対する流速条件において、気温境界条件定常計算手法、土壌温度境界条件定常計算手法のどちらを適用しても良いことが分かった。

5 下水熱利用・熱融通システムのシミュレーション

建築設備システムのシミュレーションを行う場合、現在は、Excelを利用したLCEMツールが一般的には普及している。しかし、入力条件に対して設備機器の消費電力などが計算できるが、ユーザーが入出力条件の変更をできず、計算モデルを変更するのが困難である。また、埋設管路の伝熱特性をはじめとした、建築設備機器以外の要素が不足している。

そこで、本研究では、斎藤ら^[2]の熱システムの各要素の入出力変数を整理し、物理数式モデルを要素ごとに構築する方法を、都市レベルにまで拡張した都市エネルギーシミュレーションの手法を提案する。

5.1 シミュレーションの方法

本研究では設備機器、埋設管路、補機類の特性をシステムの要素として捉え、各要素を接続しシステム全体のシミュレーションを行う方法を提案する。

変数と物理モデル式を整理した各要素をモジュールとよび、熱源機器等については、LCEMツールに蓄積された機器特性をモジュールタイプへ変換し使用する。LCEMツールには登録されていない埋設管路については、管路熱輸送特性計算手法を利用し、入出力変数を整理してモジュールとする。また、機器類はメーカーカタログ等の機器能力線図などから機器特性を抽出し、モジュールを作成可能である。

各モジュールについて、流体の流量、圧力、温度を入出力状態量として、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、機器特性式を立て、数式モデルを構築する。なお加熱能力、冷凍能力はモジュールの入出力状態量から求められる。あるモジュールで解かれた数式モデルの出力状態量を、接続された先のモジュールへと渡し、次のモジュールで入力状態量とすることにより未知数を減らしている。数式モデルはExcelのソルバーを使用してモジュール全体

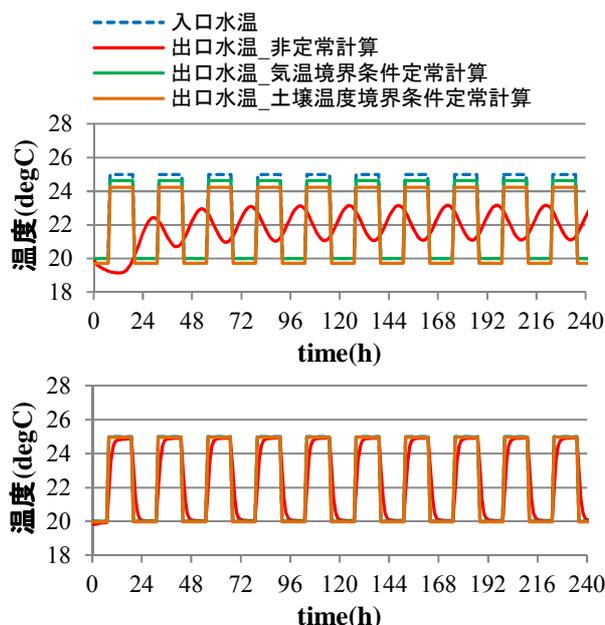


Fig.8 各計算手法の出口水温計算結果の比較 (上)流速 $V=0.02(\text{m/s})$ (下)流速 $V=0.3(\text{m/s})$

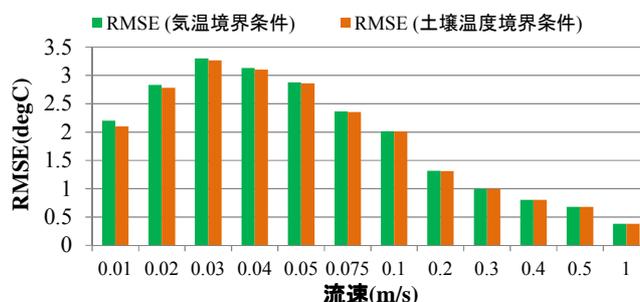


Fig.9 各モデルケースのRMSE

Table5 RMSEに対する定常計算適用流速条件

許容誤差 RMSE (degC)	流速 (m/s)
2	0.1 以上
1	0.3 以上
0.5	1.0 以上

の連立方程式を解く。

後のケーススタディで用いる水冷HPチラー(ゼネラルHP工業ZQH-10W10-A)の数式モデルを熱源機器モジュールの数式モデル例として、Eq.9~Eq.18に示す。なお、本研究では圧力・流量の変動を考慮しないため連続の式、運動方程式は一定条件とする。管摩擦抵抗の情報があれば、運動方程式で計算する。

6 下水熱利用・熱融通システムのケーススタディ

下水熱を活用に有望な熱需要施設としては、熱需要量の大きいホテルや病院が考えられるが、都市内により多く存在する集合住宅での利用を考えると、下水熱需要の拡大が見込まれる。そこで、本ケーススタディでは、熱需要施設の対象建物を集合住宅と

し、Fig.11 に示すように、集合住宅にて数回繰返して下水を暖房と給湯用熱源として利用し、水温の低下した下水を年間冷房施設(データセンタ)にて冷却水として利用する熱融通モデルを考える。熱利用を行う集合住宅の棟数を15棟まで増加させ、下水熱利用・熱融通システムが普及した場合を想定したシミュレーションを行う(Table6)。現状システムでは建物個別で空調・給湯を行なっているものとする。各建物の熱源機器消費電力から年間の一次エネルギー消費量、CO₂削減量を算出し、現状システムと比較して、Eq.19で定義する総合効率向上効果を試算する。

6.1 計算条件

気温については標準年アメダス気象データを使用する。下水温度・流量に関しては2010年度からの実測値^[1]を用いる。流量は、管径φ1200(mm)における実測流量を用い年間一定の流量とする。Fig.13に下水流量と下水取水流量を示す。本ケーススタディにおいて熱利用を行う際は、最低流量の70%の取水流量(0.0117(m³/s))にて熱利用を行う。実測^[1]によると下水流速は約0.3(m/s)であるため建物間の管路熱輸送特性計算は、土壌境界条件定常計算にて行う。管路の条件は、Table4の管路条件と同様とする。1棟の集合住宅は延床面積9,000(m²)とし熱負荷は熱負荷原単位^[5]より算出する。年間冷房施設では年間毎時刻一定の250(kW)の負荷があるものとする。Table7に建物条件と熱源機器を示す。計算期間は年間各月代表日の1日について1時間ごとの計算を行い、代表日の結果に月日数を乗じて各月の計算結果とする。

6.2 計算結果

冬期の建物での熱利用による下水温度変化日平均値をFig.14に示す。集合住宅1棟あたりの下水温度の低下は冬期、中間期、夏期で平均1(degC)、0.4(degC)、0.2(degC)となった。中間期、夏期では給湯負荷のみで負荷量も小さいので温度低下も小さくなる。またデータセンタでは約3(degC)の温度上昇がある。

年間の現状システム、下水熱利用・熱融通システムの一次エネルギー消費量と総合効率向上効果を集合住宅、年間冷房施設、システム全体についてFig.15~Fig.18に示す。Fig.15によると集合住宅では、年間総合効率向上効果が1.7~1.9倍と高い効果がある。棟数が増えると下水熱利用を繰返す度に下水温度が低下し、熱源機器効率が低下するため総合効率向上効果は徐々に低下する。Fig.16よると年間冷房施設では、上流の集合住宅にて下水熱の使用を繰返すごとに、総合効率向上効果が微量上昇することがわか

<モジュール数式モデル>

・連続の式

$$G_{chi_in} = G_{chi_out} \quad \text{Eq.9}$$

・運動方程式

$$G_{cool_in} = G_{cool_out} \quad \text{Eq.10}$$

・エネルギー方程式

$$P_{chi_in} = P_{chi_out} \quad \text{Eq.11}$$

・機器固有特性式

$$P_{cool_in} = P_{cool_out} \quad \text{Eq.12}$$

・機器固有特性式

$$Q_{CON} = Q_{EVA} + E_{ref} \quad \text{Eq.13}$$

・機器固有特性式

$$Q_{CON} = G_{cool} C_w (\theta_{cool_out} - \theta_{cool_in}) \quad \text{Eq.14}$$

・機器固有特性式

$$Q_{EVA} = G_{chi_in} C_w (\theta_{chi_in} - \theta_{chi_out}) \quad \text{Eq.15}$$

・機器固有特性式

$$COP = Q_{EVA} / E_{ref} \quad \text{Eq.16}$$

・機器固有特性式

$$COP = a\theta_{chi_out}^2 + b\theta_{cool_out}^2 + c\theta_{chi_out}\theta_{cool_out} + d\theta_{chi_out} + e\theta_{cool_out} + f \quad \text{Eq.17}$$

・機器固有特性式

$$q = Q_{EVA} / Q_{EVA_r} \quad \text{Eq.18}$$

・機器固有特性式

$$\text{効率向上効果} = \frac{\text{導入システムの効率}}{\text{現状システムの効率}} \quad \text{Eq.19}$$

【使用記号】

θ :温度(degC), G :流量(m³/s), P :圧力(kPa), Q_{EVA} :冷却能力(kW), Q_{CON} :加熱能力(kW), Q_{EVA} :定格冷却能力(kW), E_{ref} :消費電力(kW), COP :成績係数, C_w :容積比熱(kJ/m³K), a,b,c,d,ef :機器特性近似式係数
 <添え字> cool:冷却水側,chi:冷水側,in:入口,out:出口

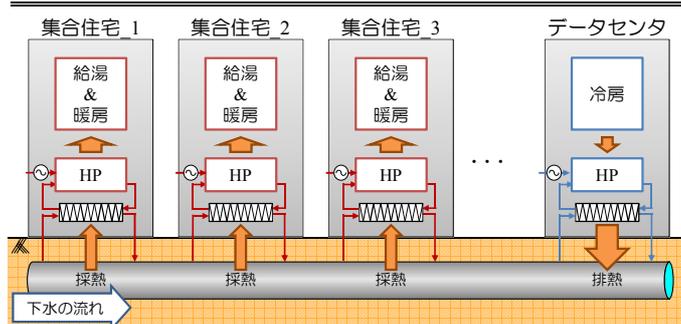


Fig.11 ケーススタディの下水熱利用・熱融通概要図

Table6 システムシミュレーションモデルケース

	case1	case2	case3	case4	case5
集合住宅 棟数	1	2	3	4	5
総延床面積(m ²)	9,000	18,000	27,000	36,000	45,000
時間最大負荷(kW)	272	544	816	1,088	1,360
	case6	case7	case8	case9	case10
集合住宅 棟数	6	7	8	9	10
総延床面積(m ²)	54,000	63,000	72,000	81,000	90,000
時間最大負荷(kW)	1,632	1,904	2,176	2,448	2,720
	case11	case12	case13	case14	case15
集合住宅 棟数	11	12	13	14	15
総延床面積(m ²)	99,000	108,000	117,000	126,000	135,000
時間最大負荷(kW)	2,992	3,264	3,536	3,808	4,080

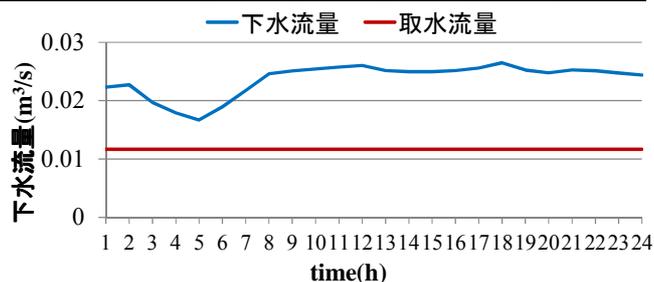


Fig.13 下水流量と取水流量(管径 1200mm)

る。case11以降、下水熱利用・熱融通システムの方が一次エネルギー消費量は少なくなり、case15では、年間効率向上効果が約1.1倍となった。Fig.17を見るとシステム全体では、集合住宅2棟(case2)の場合からシステム導入効果が確認できる。また、case15において総合効率向上効果が1.6倍となり、一次エネルギー消費量では11.4(TJ/年)、CO₂排出量では約400(tCO₂/年)の削減効果がある。本ケーススタディによれば、年間冷房施設の規模に対し40倍の規模の集合住宅郡で採熱を行えば、年間冷房施設においてもシステム導入の効果が得られることがわかる。

7 まとめ

- 1) 埋設管路の熱輸送特性計算手法を示した。
- 2) 非常管路熱輸送計算に使用する応答係数を、幹線管路、住宅敷地内管路について算出し、データベースとして整理した。
- 3) 管路長1(km)の管路モデルにおいて、定常計算を適用できる許容誤差温度を2, 1, 0.5(degC)としたときの流速条件を示した。
- 4) 下水熱利用・熱融通システムのシミュレーション手法を提案した。
- 5) 下水取水流量0.0117(m³/s)の場合、システム全体では集合住宅2棟以上のとき、システム導入効果がある。
- 6) 年間冷房施設に対して約40倍規模の集合住宅での熱融通を行えば、双方にシステム導入の効果が得られ、システム全体での総合効率向上効果は1.6倍となった。

8 今後の課題

- 1) 埋設管路熱輸送計算手法の定常計算適用条件について、システムシミュレーションに与える影響を考慮した適用基準を精査し、管路条件を変えて検討する必要がある。
- 2) 埋設管路熱輸送計算手法の実証実験を行い、精度検証をする必要がある。
- 3) 補機類や運転制御等を含めたより詳細なシステムシミュレーションを行う必要がある。

【参考文献】

- [1]河合 弘樹 他, 下水管路を活用した下水熱利用・熱融通システムの研究(第1報)下水管路における下水流量・水温実測について, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2011, p2329-p2332
- [2]齋藤 潔, スマートエナジーに対応可能な大規模エネルギーシステム解析論とその応用, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2010.9.14-18, (E334-1)-(E334-6)
- [3]坂上 恭助 他, 配水管・給水管内水温の予測法に関する研究第1報-地域別浄水場水温の調査結果と配水管水温の推定法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.82, p121-p128, 2001年7月
- [4]F.Hecht et al.: "freefem++ Third Edition 3.7-1", Jan, 2010
- [5]社団法人日本地域冷暖房協会, 地域冷暖房技術手引書(2002)

Table7 建物条件

想定施設	集合住宅	
延床面積	9,000(m ²)	
給湯・暖房負荷	熱負荷原単位より時刻ごとに計算	
機器出口水温	給湯 65(degC)	暖房 45(degC)
想定施設	年間冷房施設：データセンター	
延床面積	2,500(m ²)	
冷房負荷	250(kW)一定	
機器出口水温	冷水 7(degC)	
熱源機器	空冷 HP：ZQH-10A10-□-A(現状システム)	
	水冷 HP：ZQH-10W10-A(下水熱システム)	

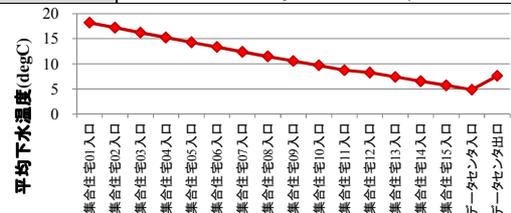


Fig.14 熱利用・熱融通による下水温度変化(冬期)

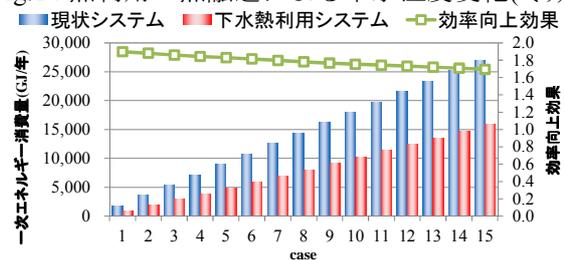


Fig.15 各 case の一次エネルギー年間消費量(集住)

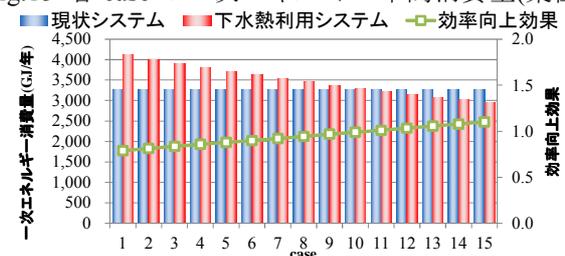


Fig.16 各 case の一次エネルギー年間消費量(冷房)

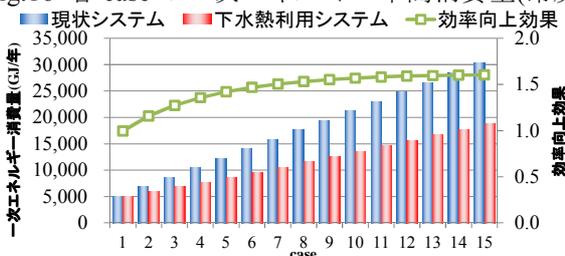


Fig.17 各 case の一次エネルギー年間消費量(合計)

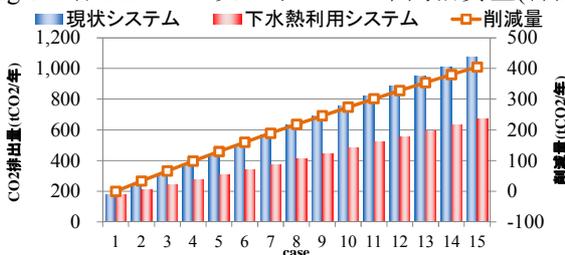


Fig.18 各 case の CO₂ 排出量(合計)

【あとうき】

本研究は NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託を受け、(株)総合設備コンサルタント、中央復建コンサルタント(株)、関西電力(株)、(株)NTT ファシリティーズ総合研究所、三菱重工(株)、(株)トヨックス、と共同研究により取り組んでいるものである。

【謝辞】

本研究を進めるにあたりご協力賜った大阪市建設局下水道河川部の皆様へ謝意を表します。

◆討議 1[都市リサイクル工学 貫上教授]

図 1(概要集 Figure.9)において、流速が大きくなった場合はどうなるのか？0.6(m/s)以上では殆ど定常計算と非定常計算の結果はあってくるのでは？

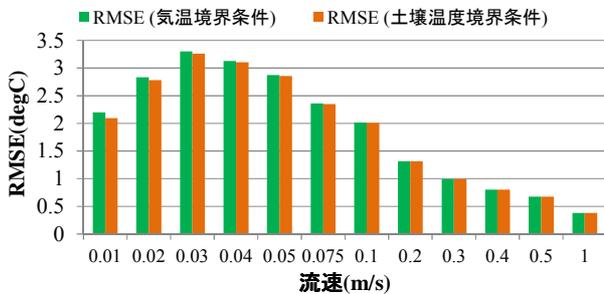


図 1(概要集 Figure.9) 各モデルケースの RMSE

◆回答 1：管路長に対して流速が大きい場合、定常計算と非定常計算の計算結果は概ね一致していく。0.5(m/s)の場合以下の図 2 のようになり、RMSE は 0.6(degC)程度である。0.6(m/s)以上では概ね一致すると考えられる。しかし、各流速ケースの計算結果の RMSE は管路長により変化するため、今後、管路長を変えて検討を行う必要がある。

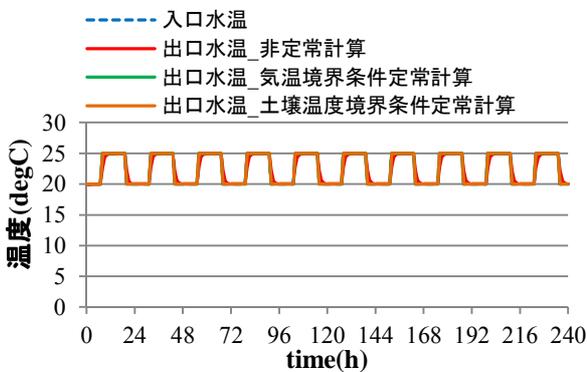


図 2 定常計算と非定常計算の出口水温計算結果(流速 0.5(m/s))

◆討議 2[地域環境計画 中尾教授]

管路径は RMSE に影響するのか？流速が同じで管路径が違う場合どう影響するのか？

◆回答 2：管路径も RMSE に影響を及ぼす。RMSE に影響を及ぼす因子としては、流速、管路長、管路径、埋設深さ、土壌と管路の熱貫流値・熱容量が考えられる。今後これらのパラメータを整理した無次元数で検討を進めていく必要がある。

◆討議 3[都市リサイクル工学 貫上教授]

下水流速は速くても 3(m/s)であるため、低い流速は意味がないのではないのか？

◆回答 3：本研究で提案する管路熱輸送特性計算手法は下水管路のみではなく、上水管路なども対象としており、流速が遅い場合も検討していく必要があると考えて、検討を行った。下水管路に限っては、最低流速が 0.6(m/s)以上となるように設計されているため、管路長が 1km 以下であれば定常計算を適用できる可能性は高いと考えている。

◆討議 4[都市リサイクル工学 貫上教授]

ケーススタディにおいて、集合住宅・データセンタの下水出口水温はどうなっているのか？時間変動はどうなっているのか？急激な時刻変化を与えると処理場側に影響を与える。

◆回答 4：冬期において集合住宅側での暖房・給湯負荷が大きいため、温度の変化が大きく、時刻変化は以下の図 3 のようになる。18 時から 21 時は給湯運転を行っていないため、下水温度が低下していない。負荷を平準化して急激な変化が起きないように配慮する必要がある。また水温が低下しすぎないようにデータセンタにて排熱を投入する必要がある。

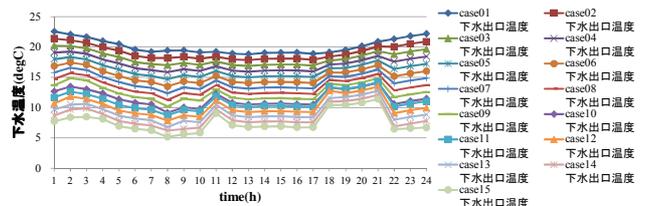


図 3 冬期におけるデータセンタ出口水温(冬期)

◆討議 5[都市リサイクル工学 貫上教授]

集合住宅での利用はどういう形態か？

◆回答 5：集合住宅では、給湯と暖房用の熱源として利用している。給湯では蓄熱運転を考えて、負荷を平滑化している。

◆討議 6[地域環境計画 西岡准教授]

負荷の変動に対して、機器の効率は数値として変化しているのか？

◆回答 6：負荷が極端に小さい場合は、熱源機器の効率が悪くなる。

◆討議 7[地域環境計画 中尾教授]

データセンタへの入口下水温度がどれくらいならば、データセンタにメリットがあるのか？

◆回答 7：本ケーススタディにおいては、Case11 以降でデータセンタでもメリットが生じ、Case11 でのデータセンタへの入口温度は平均 10(degC)程度であるので、10(degC)以下の下水温度となればデータセンタ側にもメリットが有ると考えられる。

◆討議 8[地域環境計画 鍋島講師]

熱輸送特性計算の定常計算を適用できる条件を整理していくと思うが、許容誤差として RMSE の値はどの程度の値を用いていくのか、その考えはあるか？

◆回答 8：無次元数による整理を行った後、システムシミュレーション全体のシミュレーション計算結果に、どの程度影響を与えるか検討を行う必要がある。非定常計算によるシステム全体のシミュレーションに対して、定常計算を適用した場合の差異を評価していく必要がある。