

は削除している。建物用途別延床面積比率，月別日平均下水流量，時刻別下水流量，平均時刻別流量比率，月別下水温度，時刻別下水温度(非降水時月平均下水温度との差)を示す。

2.2 下水流量

日平均下水流量をみると，夏期になるに従い流量は増える傾向がある。時刻別で見ると，下水流量は人間活動に大きく依存していることが分かる。具体的にいえば，夜になると流量が小さくなり，昼間にかけてピークが存在する。昼間のピークの継続は集水域の建物用途により異なる。また，時刻別下水流量の最小流量は最大流量の30~70%程度であった。

2.3 下水温度

月別下水温度をみると夏に温度が高くなり，冬に温度は低くなる。しかし，その変動幅は気温と比べれば小さい。夏は気温より低いところもあるが殆ど同じくらいである。冬は約12℃ほど下水温度の方が高い。また，月別では測点による温度の違いはあまり見られなかった。

時刻別にみると測点により変動パターンに違いは見られることが分かり，地域差があるといえる。また日較差は4℃程度が最大であった。

以上，下水流量，温度ともに時刻別でみると場所による差異があることが分かった。

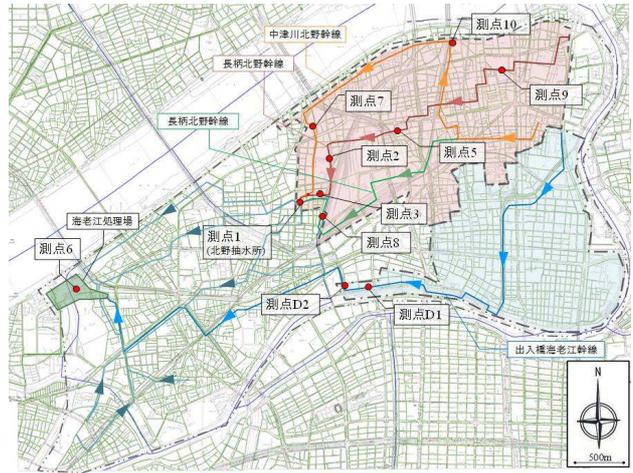


図1 第1期~第3期までの実測箇所

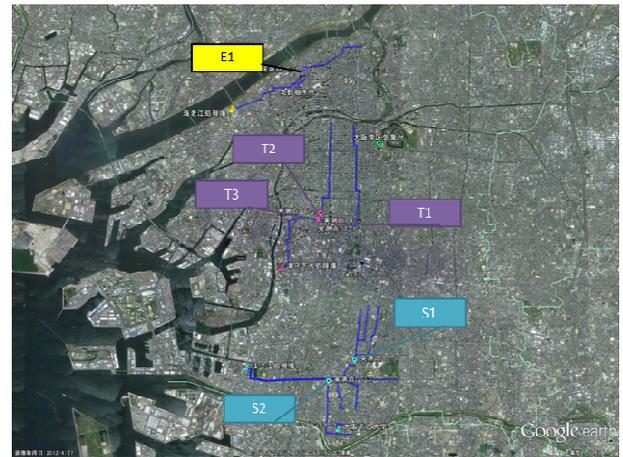


図2 第4期実測箇所

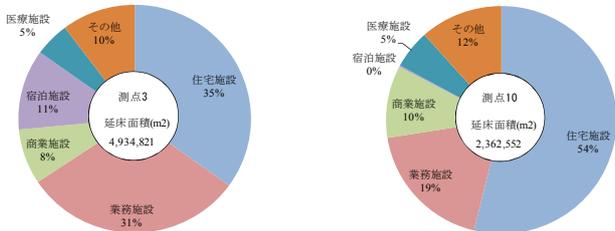


図3 測点3 建物用途別延床面積比率

図4 測点10 建物用途別延床面積比率

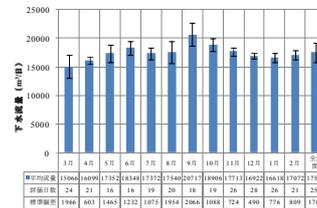


図5 測点3 月別日平均下水流量

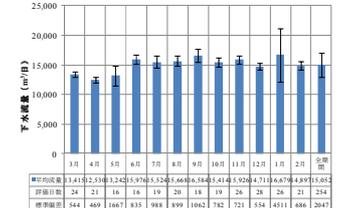


図6 測点10 月別日平均下水流量

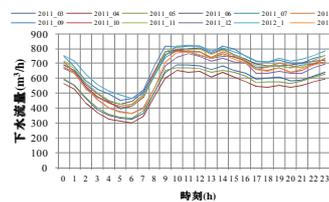


図7 測点3 時刻別下水流量

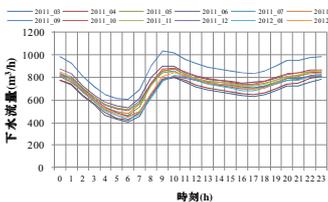


図8 測点10 時刻別下水流量

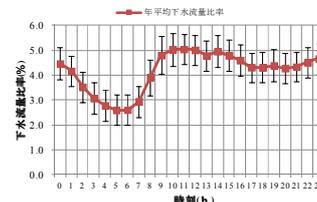


図9 測点3 平均時刻別流量比率

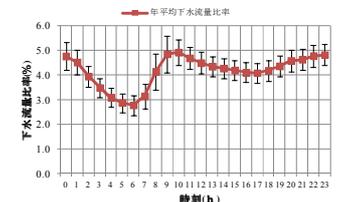


図10 測点10 平均時刻別流量比率

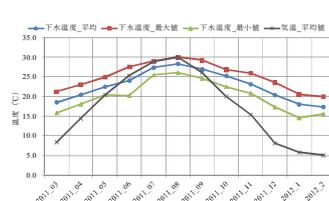


図11 測点3 月別下水温度

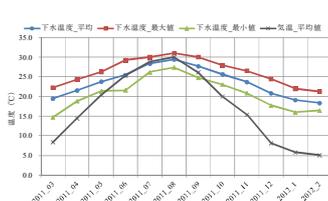


図12 測点10 月別下水温度

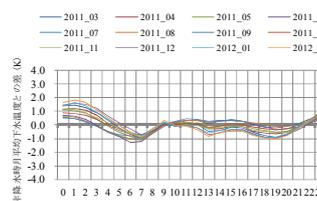


図13 測点3 時刻別下水温度

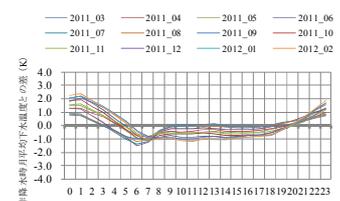


図14 測点10 時刻別下水温度

3. 下水流量推定法の提案

3.1 下水流量の形成メカニズム

図 15, 式 1~式 4 より, 下水流量とは生活排水量と降雨量と蒸発量にて説明することができる. 今回, 検討するのは降雨がない場合, 浸入水がない場合である. そのため, 生活排水量が直接下水流量を決定すると考え, 以下の下水流量推定法を提案する.

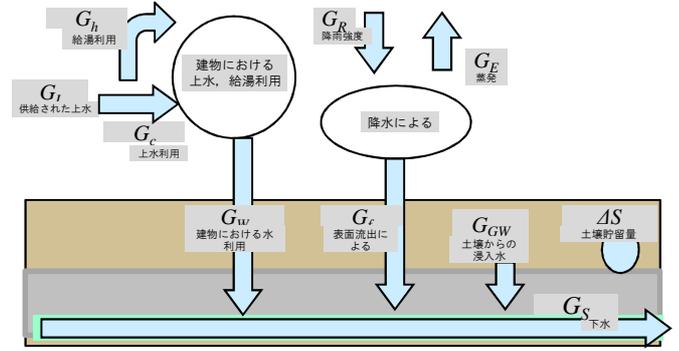


図 15 都市内水収支ダイアグラム

$$G_I = G_W \quad \text{式 1}$$

$$G_W + G_{GW} + G_f = G_S \quad \text{式 2}$$

$$G_R - G_E = G_f + G_{GW} + \Delta S \quad \text{式 3}$$

$$G_W + G_R - G_E = G_S + \Delta S + \Delta R \quad \text{式 4}$$

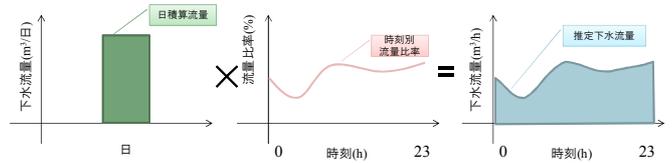


図 16 時刻別下水流量の求め方イメージ

3.2 提案する流量推定法

設備を含めたシステムシミュレーションを行う際には, 1 時間間隔程度まで求められていることが望ましい. 本研究における時刻別下水流量の求め方のイメージを図 16 に示す. 日積算流量と時刻別流量比率を別々に算出し, 掛け合わせる方法をとる.

3.3 日積算流量について

今回, 日積算流量を検討する方法は処理場(またはポンプ場)で処理された下水流量(m³/日)のデータを集水面積, 延床面積で按分する方法である. なお, 本梗概では延床面積按分について述べる. 下水道統計の流量データを加工したのが

表 2 である. なお, この統計には日本全国の処理場の情報が記載されている.

表 2 下水道統計データ(筆者加筆)

処理場名	水処理施設・日平均処理 処理面積...①	総建物延床面積 ...②	水処理施設・日平均処理 水量・晴天時平均下水流量 ...③[m ³ /日]	処理面積m ² あたり 晴天時下水流量 ...④+①	延床面積m ² あたり 晴天時下水流量 ...④+②
	ha	m ²	m ³ /日	m ³ (日・m ²)	m ³ (日・m ²)
津守下水処理場	1,962	36,796,791	224,848	1.15E-02	6.11E-03
海老江下水処理場	1,215	21,630,020	129,823	1.07E-02	6.00E-03
住之江下水処理場	3,263	28,114,907	170,739	5.23E-03	6.07E-03
大阪市合計	6,440	-	525,410	8.16E-03	-

3.3.1 延床面積按分

延床面積按分のイメージを図 17 に示す. 処理場が処理した処理流量(m³/日)[既知]を処理区内総延床面積(m²)で割り, 処理区毎の延床面積あたり下水流量(m³/日/m²)を算出する. その値に推定する場所の集水域内総延床面積(m²)を掛け, 推定流量(m³/日)を求める(式 5).

3.3.2 結果

6つの測点で実測値と延床面積按分による推定値との差を比較した. 推定結果を図 18 に示す. T1, T3, S1, S2 の4箇所については推定誤差が実測値の3.0~25.2%となった. 測点 T2 と測点 E1 の推定誤差が-60~325%と大きくなった理由として, 正確な集水域の設定が困難であったことが考えられる. この推定法は集水域の判定が困難な場所では推定精度が極端に悪くなる可能性がある.

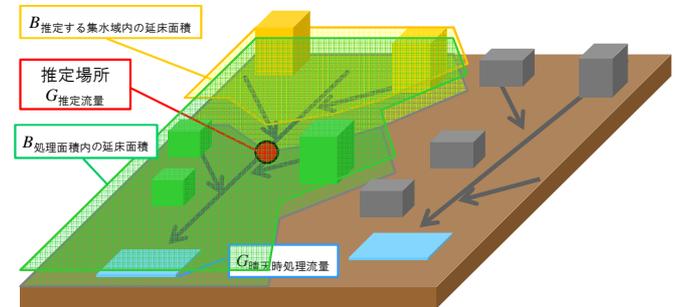


図 17 延床面積按分

$$G_{\text{推定流量}} = \frac{G_{\text{晴天時処理流量}}}{F_{\text{処理区内延床面積}}} \cdot F_{\text{推定する集水域内の延床面積}} \quad \text{式 5}$$

3.4 時刻別下水流量比率について

3.4.1 特徴

第4期に実測した6点の時刻別下水流量比率を図 19 ~ 図 24 に示す. T1, T2, T3, E1 は業務施設が, S1, S2 は住宅が多い地域である. 住宅が多い地域(S1, S2)の比率パターンは9時頃と24時頃に山, 17時頃に谷がある変動を示している. 他の4地点ではこの傾向が見られない. また, T2, T3 では夜間の最低値が3%と, 他の4地点より1ポイント程高い傾向が見られた. 比較的商業施設と飲食施設の割合が高い地域であった. T2の変動のみ7時から右肩上がり増加しているが, これは営業時間の異なる様々な飲食店の排水の影響を受けた為と考えられる.

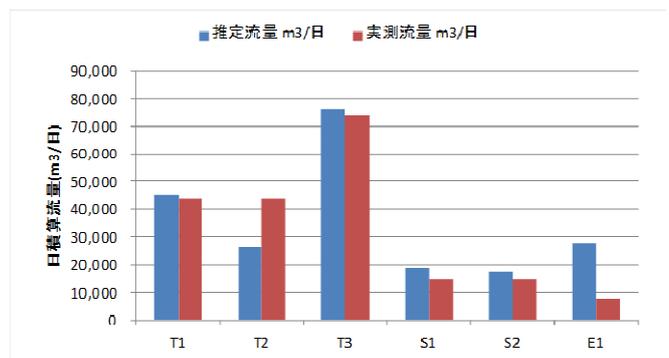


図 18 延床面積按分 結果

3.4.2 延床面積比率との相関係数

表 3 に建物用途別延床面積比率と時刻別流量比率の相関係数を示す。住宅比率と 8 時～10 時の流量との相関係数は 0.92～0.96 と強い正の相関があり、また住宅比率と 3 時～6 時、15 時～18 時の流量との相関係数は -0.85～-0.99 と強い負の相関がある。住宅施設の比率を用いた推定モデルと業務施設の比率を用いたモデルの 2 種類を検討したが、本梗概では結果の良い住宅比率を説明変数とした回帰分析モデルについて報告する。

3.4.3 住宅比率と時刻別流量比率の回帰式

最小比率や最大比率が発生する特徴のある時間帯として 6 時、10 時、16 時、22 時の 4 つを選択した。

図 19～図 24 に示す 6ヶ所のデータに対して、住宅比率を説明変数とした場合の回帰式を図 25～図 28 に示す。その他の時刻は線形補間により求め、全時刻を足して 100%になるように調整する。

3.5 推定法と実測値との比較

測点 D2、測点 9、測点 5 の 3 地点において推定を行う。延床面積按分を用いて算出した結果を図 29 に示す。また、時刻別流量比率を住宅比率の回帰式を用いて算出した結果を図 30、図 32、図 34 に示す。さらに、それらを掛けあわせ、実際の時刻別流量と比較した結果を図 31、図 33、図 35 に示す。測点 D2、9 については日積算流量の推定誤差が実測値の 4～10%となり精度よく推定できたが、測点 5 は 271%と大きな誤差が生じた。時刻別流量比率は測点 D2、測点 5 についてはよく再現できた。また掛け合わせると、測点 5、9 は差が大きい。推定精度は日積算流量が重要で、集水域の判定精度に大きく依存していることがわかった。

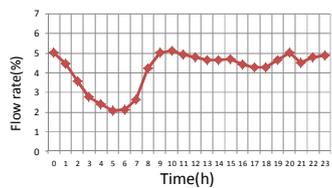


図 19 測点 T1 流量比率

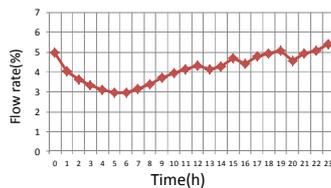


図 20 測点 T2 流量比率

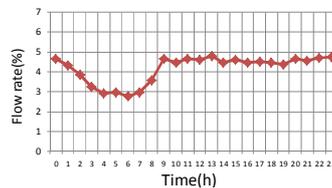


図 21 測点 T3 流量比率

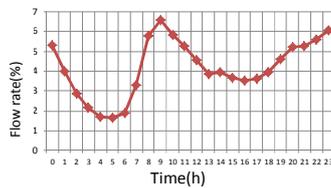


図 22 測点 S1 流量比率

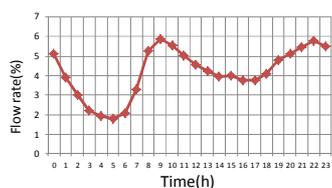


図 23 測点 S2 流量比率

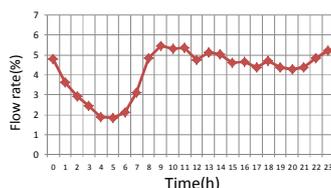


図 24 測点 E1 流量比率

表 3 建物用途別延床面積比率と時刻別流量比率との相関

係数

	時刻											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
住宅(%)	0.73	-0.33	-0.80	-0.93	-0.87	-0.85	-0.85	0.47	0.96	0.95	0.92	0.74
業務(%)	-0.68	0.52	0.86	0.93	0.86	0.82	0.77	-0.62	-0.94	-0.89	-0.87	-0.70
商業(%)	-0.34	0.40	0.79	0.92	0.93	0.91	0.92	-0.18	-0.88	-0.91	-0.95	-0.96
宿泊(%)	-0.73	-0.34	0.18	0.46	0.31	0.37	0.44	-0.14	-0.50	-0.55	-0.49	-0.17
医療(%)	-0.24	-0.68	-0.60	-0.50	-0.61	-0.55	-0.48	0.08	0.40	0.35	0.47	0.70

	時刻											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
住宅(%)	0.22	-0.44	-0.54	-0.93	-0.86	-0.99	-0.89	-0.13	0.70	0.68	0.82	0.67
業務(%)	-0.11	0.41	0.54	0.90	0.82	0.93	0.75	0.06	-0.57	-0.73	-0.87	-0.70
商業(%)	-0.65	-0.12	0.01	0.60	0.44	0.80	0.70	0.52	-0.35	-0.21	-0.44	-0.29
宿泊(%)	0.03	0.70	0.80	0.75	0.86	0.78	0.88	-0.25	-0.98	-0.75	-0.70	-0.42
医療(%)	0.59	0.64	0.60	0.07	0.28	-0.11	0.09	-0.55	-0.45	-0.34	-0.09	-0.07

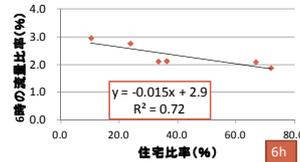


図 25 住宅比率と 6 時の時刻別流量比率回帰式

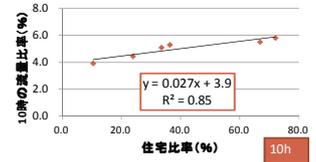


図 26 住宅比率と 10 時の時刻別流量比率回帰式

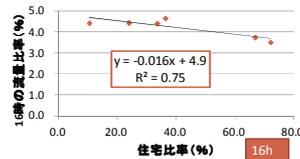


図 27 住宅比率と 16 時の時刻別流量比率回帰式

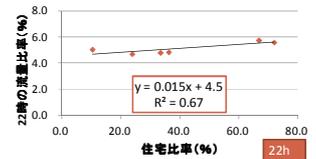


図 28 住宅比率と 22 時の時刻別流量比率回帰式

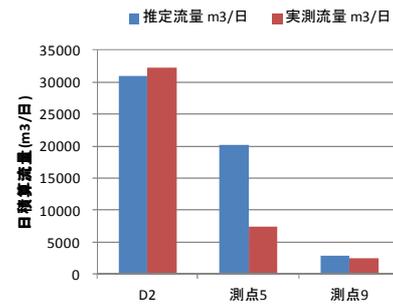


図 29 延床面積按分法結果

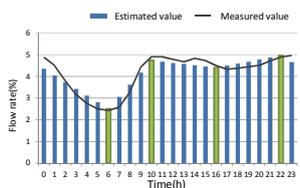


図 30 測点 D2 推定流量比率

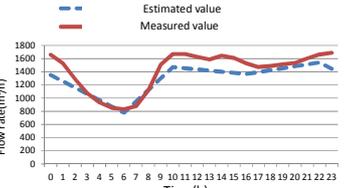


図 31 測点 D2 推定流量

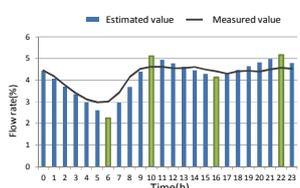


図 32 測点 5 推定流量比率

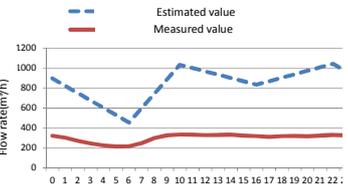


図 33 測点 5 推定流量

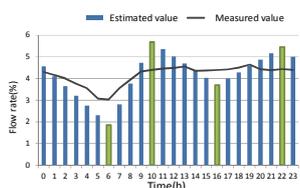


図 34 測点 9 推定流量比率

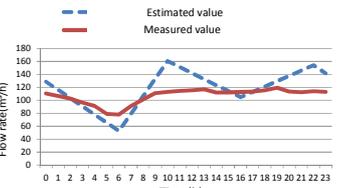


図 35 測点 9 推定流量

4. 下水温度推定法の提案

4.1 下水温度の形成メカニズム

図 36 に示すように、下水温度の生成には様々な要因があるが、本研究では降水と浸出水の影響を考慮していないので、下水温度を形成する主な要因は建物による水利用と気温などの気象条件であるといえる。

4.2 提案する下水温度推定法

図 37 に示すように、下水温度を年変動と時刻変動に分けて推定し、足し合わせるという方法をとる。なお、降水時は除いて考えることとする。

4.3 年間変動下水温度

年間の気温と下水温度の日平均値を図 38 に示す。最高気温と最高下水温度の出現する時刻に時間遅れが見られ、下水温度の方が、年変動が小さいことが確認できる。これより、気温の時系列データをフーリエ級数により表現し、平均値と振幅、位相の違いで下水温度の年変動を表現する。式 6～式 10 を用いて 2011 年 2 月から 2012 年 1 月の気温と下水温度をサイクル数 $f=1$ のフーリエ級数で表現する。気温と下水温度の関係は、平均値の差と振幅比、位相差がそれぞれ 5.91K, 0.42, -0.24radian(14 日相当)となる(表 4)。よって気温が式 11 で表現されるならば、下水温度の年変動は式 12 と表すことができる。式 12 を用いて日平均下水温度から月平均値を算出する。これを推定月平均下水温度と呼ぶ。なお、近隣の下水施設の下水温度実測データが入手できる場合は実測値を用いればよい。

4.4 時刻変動下水温度

実測値より得られた北野抽水所における月平均下水温度を基準として各測点の実測値との差をとった時系列データを整理する。これらに建物用途による違いが表れていると考え、8 測点(第 1 期～第 3 期)について調べた(表 5)。日中と夜間に掛けて上昇するグループ(A 群)と、夜間にのみ上昇するグループ(B 群)に大別することができた。また、北野抽水所と比べ相対的に温度が高いというグループ(C 群)もあった。各グループから代表測点を選び、データベースとする。集水面積情報、データの欠測情報などから総合的に判断し、測点 2、測点 7、測点 8 を代表測点とした。これらをグループ別代表時刻変動データベースとして表 6 に示す。

4.5 推定値と実測値との比較

測点 T3, 測点 S1(共に第 4 期)の 2012 年 10～2013 年 1 月の下水温度について、提案した推定方法の精度を確認する。2012 年 4 月以降については北野抽水所の実測データがないので、式 11, 式 12 を用いて推定月平均下水温度を推定する。推定する測点の建物用途別延床面積比率により決定したパターンを表 7 に示す。

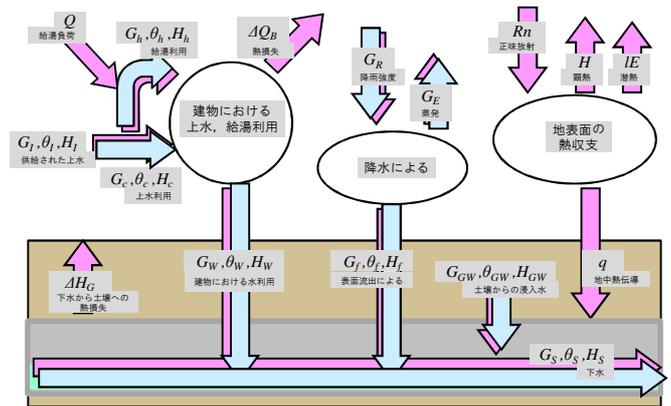


図 36 水収支・熱収支ダイアグラム

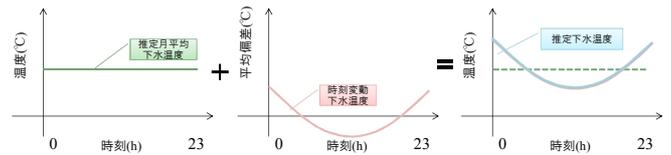


図 37 時刻別下水温度の推定法イメージ

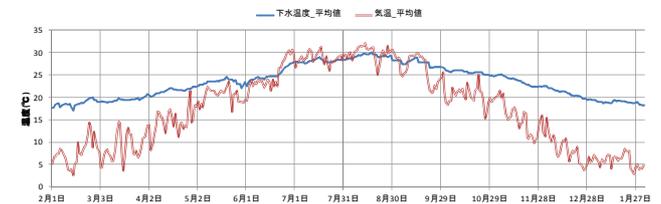


図 38 非降水時年間気温, 下水温度

$$D(j) \approx \bar{D} + \sum_{f=1}^T \{X_f \cos \frac{2\pi f j}{T} + Y_f \sin \frac{2\pi f j}{T}\} \quad \text{式 6}$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{j=1}^T D_j}{T} \quad \text{式 7}$$

$$X_f = \frac{2}{T} \sum_{j=1}^T D_j \cos \frac{2\pi f j}{T} \quad \text{式 8}$$

$$Y_f = \frac{2}{T} \sum_{j=1}^T D_j \sin \frac{2\pi f j}{T} \quad \text{式 9}$$

$$D(j) = \bar{D}_w + \sum_{f=1}^T \{A_f \sin(\frac{2\pi f j}{T} + \theta_f)\} \quad \text{式 10}$$

$$A_f = \sqrt{X_f^2 + Y_f^2}, \sin \theta_f = \frac{Y_f}{A_f}, \cos \theta_f = \frac{X_f}{A_f}$$

$$D_a(j) = \bar{D}_a + A_{1-a} \sin(\frac{2\pi f j}{T} + \theta_{1-a}) \quad \text{式 11}$$

$$D_s(j) = (\bar{D}_a + 5.91) + 0.42 A_{1-a} \sin(\frac{2\pi f j}{T} + \theta_{1-a} - 0.24) \quad \text{式 12}$$

ただし、周期 $T=366$ 日として計算する(1 年間の周期を考える)。

j : 2011/2/1 から年間通日(day), f : サイクル数(-)

添字: a : 気温, s : 下水温度

表 4 気温・下水の平均温度 \bar{D} , 振幅 A , 位相 θ の比較

	\bar{D} (°C)	A_1 (K)	θ_1 (rad)
気温の場合	17.57	11.91	4.71
下水の場合	23.48	5.06	4.47
下水-気温	5.91	—	-0.24
下水/気温	—	0.42	—

算出した1月の推定値と実測値を図39, 図40に示す。4ヶ月間の月別時刻平均RMSEを図41, 図42に示す。測点S1については時刻トレンドがよく一致した。測点T3については午前中に最大2K程度の誤差が生じた。RMSEはすべての月において1.0K以下であった。

5. まとめ

各推定法のフロー図を図43, 図44に示す。

(流量推定)

- ・日積算流量と時刻別流量比率に分けて考え、非降水時において時刻別下水流量を推定した。
- ・延床面積按分により日積算流量を算出した。
- ・住宅比率を説明変数とした時刻別下水流量比率との回帰式を作成した。

・本研究で提案する推定法は集水域の判定精度に大きく依存することがわかった。

(温度推定)

- ・2つの成分(年変動と時刻変動)に分けて考えた。
- ・(年変動)1年間の気温と下水温度のデータよりそれぞれフーリエ級数で近似した。下水温度と気温を比べると平均値の差と振幅比, 位相差がそれぞれ5.91K, 0.42, -0.24radian(約14日)となること分かった。
- ・(時刻変動)季節別時刻変動パターンを三種類のデータベースとして提示した。
- ・推定値と実測値を比較すると4ヶ月の月別時刻平均RMSEが0.4~1.0Kに収まった。また, 既往の研究では考慮されていなかった場所による違いを表現することができた。

表5 パターンと各建物比率

	該当測点	住宅施設比率(%)	業務施設比率(%)	商業施設比率(%)	宿泊施設比率(%)
A群	測点3, 測点2, 測点D1, 測点D2	26%~36%	26%~53%	8%~10%	4%~15%
B群	測点5, 測点7, 測点10	44%~55%	18%~22%	9%~10%	0%~9%
C群	測点8	12%	31%	23%	17%

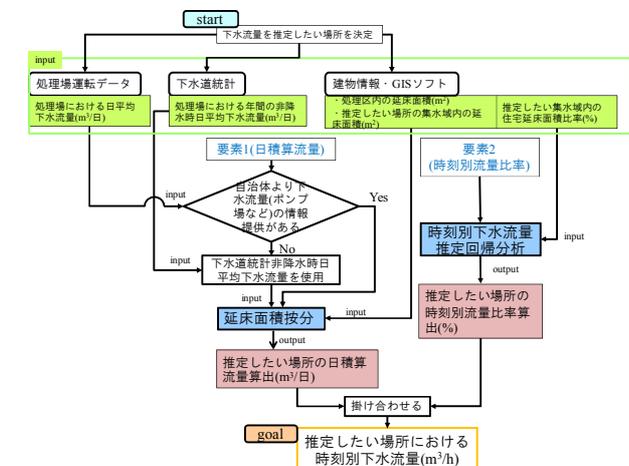


図43 流量推定法のフロー図

表6 グループ別代表時刻変動データベース

名称	代表測点	グループ別代表時刻変動	特徴
A群 オフィス街型	測点2		昼間に温度の上昇が見られる。しかし昼間の温度は常に0℃より低い。
B群 住宅地型	測点7		夜間の温度上昇が大きい。昼間に温度の上昇は少ない。
C群 繁華街型	測点8		1日を通じて温度が高い。

表7 推定する測点の建物用途別延床面積比率とパターン

該当測点	住宅施設比率(%)	業務施設比率(%)	商業施設比率(%)	宿泊施設比率(%)	パターン判別
測点T3	24%	40%	21%	7%	A群オフィス街
測点S1	72%	9%	9%	0%	B群住宅地型

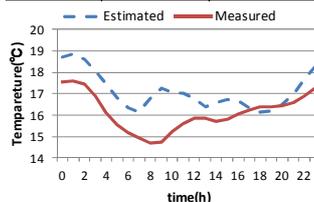


図39 測点T2 推定値と実測値

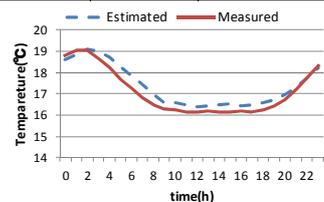


図40 測点S1 推定値と実測値

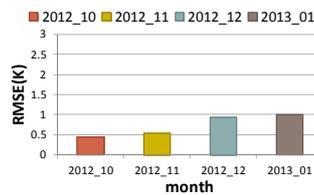


図41 測点T2 RMSE

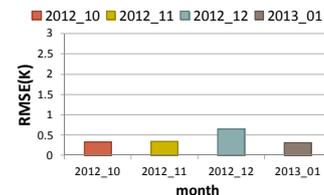


図42 測点S1 RMSE

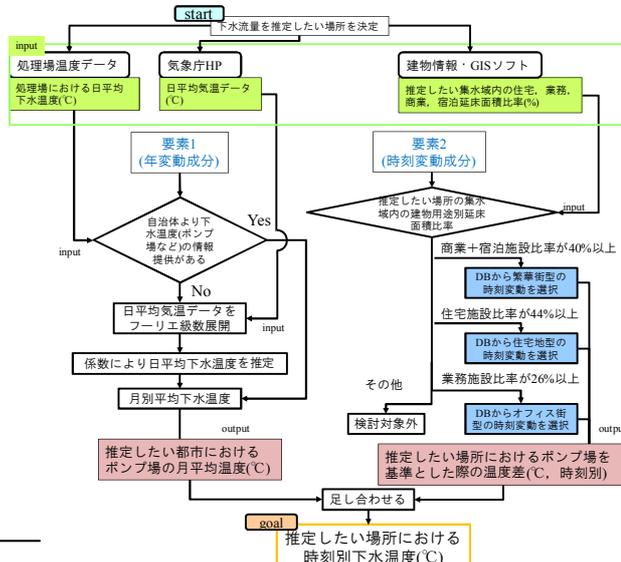


図44 温度推定法のフロー図

【参考文献】

[1] 脇田翔平「都市における下水熱ポテンシャル把握手法に関する研究-大阪市北区海老江処理区の下水熱ポテンシャル把握」,大阪市立大学 2011 年度卒業論文

討議

討議 [貫上佳則教授]

梗概の式1において $G_f = G_w$ として、上水使用量と建物排水量がイコールになっているが、管内貯留していると合わなくなるのでは？特に夜に合わなくなっている理由か？

回答

今回の推定法において、上水使用原単位は使用していないため、この式はあくまで流量の生成過程を把握するために掲載した。今回の推定法で基としたのは「処理場の処理流量(日積算流量)」であり、これを延床面積比率で按分した。貯留などの影響は時刻変動の要素(2つめの要素)に影響すると考えている。

討議 [貫上佳則教授]

水位を計測して流量を算出しているようだが、マンニングの式を用いて推定していないのはなぜか？

回答

今回の流量測定では、ある時刻の水位と流速を複数回計測し、場所ごとに水位—流量曲線を作成し、水位から流量を計算できる手法をとっている。マンニングの式を用いなかった理由として、マンニングの式は便宜式であり、流量計としての精度を求めた厳密な式ではないという点が挙げられる。

また、今回の測定では、流速を測る際に断面方向に約10分割してそれぞれの流速を計測した。

討議 [貫上佳則教授]

梗概の図表が小さいところがある。

回答

最終提出の梗概で修正する。

討議 [西岡真稔准教授]

流量比率按分法について、なぜ住宅延床面積比率だけでうまくいくのか？その理由。

回答

住宅比率だけでうまくいく理由は分からないが、今回、相関係数の高かった「住宅比率」と「業務比率」で回帰式を作成してみたところ、住宅比率を基にした回帰式の方が推定精度は良かった。理由として、確かに相関係数は住宅、業務ともに高い相関を示したが、実際の使用流量は住宅の方が多いため、流量比率の回帰式は住宅比率を説明変数とした。

討議 [西岡真稔准教授]

この一連の推定法は集水域が分かっている場合、できないということか？

回答

今回提案した方法、特に日積算流量を算出するために用いた延床面積按分法は集水面積に大きく依存してしまう。集水面積は計画段階で設計されているが、現実と異なることがあり、それらの把握が困難である。今後の推定精度向上のために以下の2つを提言する。

- 1) 自治体との密な連携により、集水面積を把握する。
- 2) 集水面積を概ね把握するような手法の研究(土地情報、幹線情報より概算)

討議 [貫上佳則教授]

住宅比率だけでなく、業務比率も考慮するべきではないか？また、適用範囲は？

回答

(西岡准教授への回答も参照)

ただし、今回は2つの単回帰モデルしか作成していない。例えば、住宅・業務の重回帰モデルにする。他にも宿泊施設比率と16時の流量比率には $R=0.86$ の強い正の相関が見られた。このように時刻によっても回帰モデルを選択し、より高い推定精度をもつモデルを作成できる可能性がある。また、適用範囲は今回、住宅比率10%~72%の範囲であるため、かなり広範囲にカバーしている。

討議 [貫上佳則教授]

この推定法には時間遅れが入っていない。下水を扱うものとして違和感がある。

回答

この推定法は、今回調べた集水面積に似た距離、大きさに限られるが、時間遅れも考慮されている。今後の提案としてはまず、時刻遅れがどの程度効くのかを検討し、集水面積や幹線距離をパラメータにした第三の要素「時刻遅れモデル」を組み込むことを考える。