

都市集水域における水・熱輸送の実態解明とモデリング — 一久が原水文気象観測データに基づいて —

Investigation and modeling of water and heat transport in an urbanized catchment
- Based on hydro-meteorological monitoring data collected in the Kugahara Experimental Site -

木内 豪¹, 中山 有², 森脇 亮³, 神田 学⁴

Tsuyoshi KINOCHI, Yu NAKAYAMA, Ryo MORIWAKI and Manabu KANDA

¹正会員 博 (工) 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²非会員 東京工業大学工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

The water and energy transport dynamics in urban catchments are investigated to facilitate better understanding of thermo-hydrological impact of urbanization on the receiving water. For this purpose, meteorological and hydrological variables have been monitored in a catchment with an area of 12.2ha located in the central Tokyo District. The amounts and dynamic patterns of urban wastewater showed quite reasonable results compared with existing survey reports. The time variation of sewage temperature showed a distinct diurnal pattern, which reflects water and energy consumption characteristics in residential houses and is insensitive to a day of the week and season. In a thunderstorm event, the impact of summertime urban heating on the runoff was revealed by an abrupt increase of storm temperature. Finally, a dynamical model was proposed to estimate sewage temperature in response to hydrological and meteorological conditions as well as human behavior of water and energy consumption.

Key words: Urban thermo-hydrology, Water use, Energy consumption, Wastewater temperature, Runoff

1. はじめに

水の循環には絶えずエネルギーの輸送が伴うことから、水循環の変化は大気や水域に熱的な影響を及ぼす(図-1)。特に、都市域においては人間活動の影響が水循環系を改変するばかりでなく、大量に消費されるエネルギーの一部が水に付加されて排水されるため、河川等の排水先へ熱的影響も加える。普段、何気なく利用しているお風呂、台所等からの排水の影響により、下水処理場から排水される処理水の水温は、過去35年で最大で7℃も上昇しているという事実が報告されている¹⁾。このように、都市の高密度化やライフスタイルの変化、ヒートアイランド化などが原因となって公共用水域への排熱量が増大し、水域の生態環境に無視できない影響を与えている可能性が示唆された¹⁾。

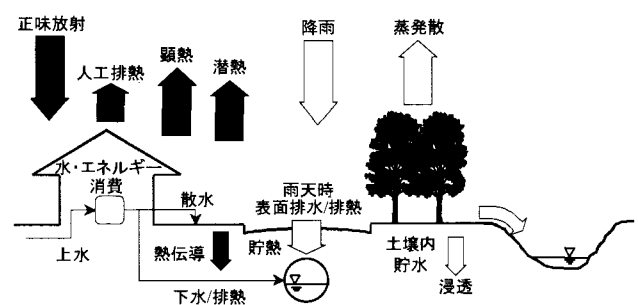


図-1 都市域の水循環と熱輸送の模式図

また、都市化の象徴とも言える地表面の人工被覆化は、地表面熱特性を変化させ(蒸発散域の減少や人工地覆自体による蓄熱と放熱)、ヒートアイランド現象の原因となるばかりでなく、雨水の自然な浸透を阻害して雨天時の流出増や地下水の低下などをもたらす、雨天時越流水に

よる水質悪化の問題等を引き起こしている。

我々の日常生活における水利用も実は人工被覆化の影響を間接的、直接的に受けている。間接的影響としては水道水温の上昇が挙げられる。蛇口から出てくる水道水の温度（以下、給水温度）を代表すると考えられる給水栓（水質検査用に水道管の途中に設けられている蛇口）における水温（以下、給水栓温度）は東京 23 区においては過去 30 年間に年平均で 2°C 以上上昇している¹⁾。このこと自体は各家庭で給湯に必要なエネルギーが少なく済むように思えるが、最終的な排出先である河川や内湾へ排出される熱量が増大する結果となる。

直接的な影響として、夏期の雷雨時などに、降水が、暖められた地表面から熱を奪いながら流出し、排水先の河川や下水道に一時的ではあっても高温な水塊が大量に流れ込むことが想像される。現に、元来水温の低い河川に舗装面から高温の流出水が流入して魚類等へ影響を及ぼすのを防ぐ必要性から、米国ウィスコンシン州のある郡においては、開発区域からの流出水温に規制を加える条令が定められている²⁾。我が国の都市域において、降雨流出過程における熱輸送を明らかにすることは、都市の水・熱循環過程の理解を深めるとともに、生態系へのインパクトを評価するために重要であると考えられる。

これまでの検討では、人工地覆の増大やエネルギーの大量消費が、月平均、年平均といった時間スケールでの都市の水循環過程に及ぼす熱的な影響を解明してきた³⁾。しかし、時間スケールまで遡った動的な挙動や、雨天時の都市集水域の水・熱輸送の応答特性については、まだ、未知の部分が多く残されている。そこで、本研究においては、人工被覆化と人口の高密度化が進展した東京 23 区内の集水域をフィールドとした実測に基づいて、晴天時と雨天時の水・熱輸送過程のより動的な実態を解明することを試みた。また、都市圏から水圏へのインパクトを評価する上で必要となると考えられる晴天時の都市水・熱輸送の動的挙動を推定するモデルを作成し、実測との比較を通じた検討を行った。

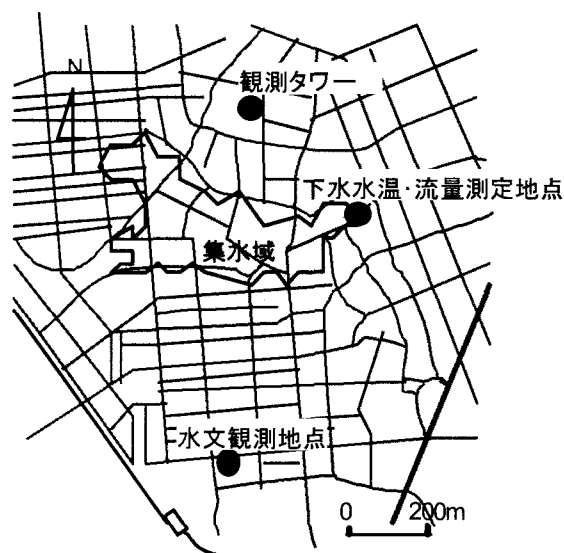
2. 都市集水域の水・熱輸送の観測

(1) 集水域における水・熱輸送の観測概要

フィールド観測地域は東京都大田区内の低層住宅地域に設けた。本地域では、既に森脇・神田⁴⁾によって接地境界層内の放射や熱・水フラックス等の計測が連続的に行われており、これとあわせて陸面における各種水文量と水温等を測定することにより、集水域から大気と排水系・地下に輸送される水量、熱量を包括的に把握することができる。

集水域の範囲と気象の観測タワーの位置を図一2に示す。本集水域の面積は約 12.2ha で合流式下水道が完備している。集水域内の人口、世帯数は大田区提供の当該集水域が含まれる町丁目の人口、世帯数を面積割合によ

り按分して求めたところ、人口は1,760人、世帯数は766世帯と推定された。フィールド観測地域の緑被率とアスファルト被覆率は航空写真に基づきそれぞれ 22%、20.7%と推定されている⁴⁾。表一1に示すように、既存の観測項目⁴⁾に加えて、下水流量、下水温度、降雨量、降雨温度、土壌水分量、地中温度を測定した。また、東京都水道局により計測された給水栓温度情報を入手した。降雨の温度は、降雨を小さな受け皿に一旦貯え、その受け皿内の水温を測定する方法と雨量計端部の雨滴通過部にセンサーを仕込んで測定する方法により求めた。両者の違いは非常に小さかった。



図一2 フィールド観測地域の概要

表一1 水・熱輸送測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定間隔等
下水流量	超音波流量計 (Isco 社 Model 2150)	5 分
下水温度	サーミスタ温度計	10 分
降雨量	転倒枡雨量計 (Campbell 社 TE525MM)	0.1mm/1 パルス
降雨温度	アルメルコンスタンタン熱電対	10 分
土壌水分	土壌水分計 (Sentek 社 EnviroSMART)	10 分
地中温度	銅コンスタンタン熱電対	10 分

(2) 晴天時の水・熱輸送の実態

4月5日から8月31日までの間の無降雨時の測定データに基づき、平常時に排出される水量、水温の時間変動、季節変動、週間変動の特徴を図一3、図一4に整理した。

図一3の流量の時間変動パターンでは、いずれの月においても午前8時頃に最大のピークがあり、午後10時頃に1度目よりやや流量が少ないピークが発生している。ただし、日曜日には両者の差が小さくなる傾向が見られる。また、月別の最低流量の違いは、下水管周辺の土壌から管渠の継ぎ目を通じて浸出する土壌水（浸出水）の大小を反映したものであると考えられる。8月の下水流

量が全体的に大きいのは、当該月の降水量が多かったことと対応している。また、6月には逆に降雨量が少なく、その影響は7月の最低流量に反映されていた。このように、浸出水の量には基本的には降雨量に応じた変動が確認された。このような生活排水の水量の時間変動や季節変化については、例えば長谷川ら⁵⁾や山田⁶⁾によっても報告されている。しかし、既往の研究論文を見る限り、生活排水の水温の時間変動に関しての知見は乏しい。

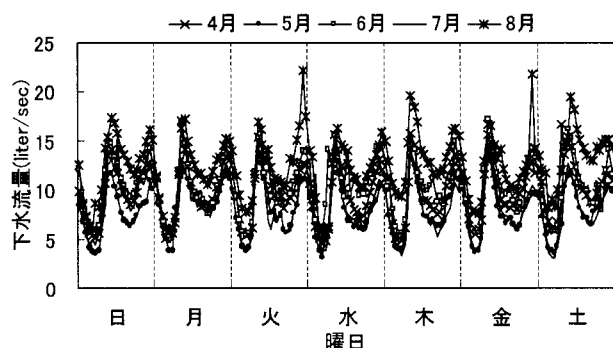


図-3 月別・曜日別の下水流量の時間変動

水温の時間変動パターン(図-4)では、23~24時にかけて水温が最大に、午前6時頃には最小となり、日中は若干変動を繰り返す様子が見られる。月ごとに水温のレベルが異なるのは給水温度と浸出水の水温が季節によって異なるためである。水温ピークの発生時刻が流量ピークよりも1~2時間程度後にずれていることが特徴である。

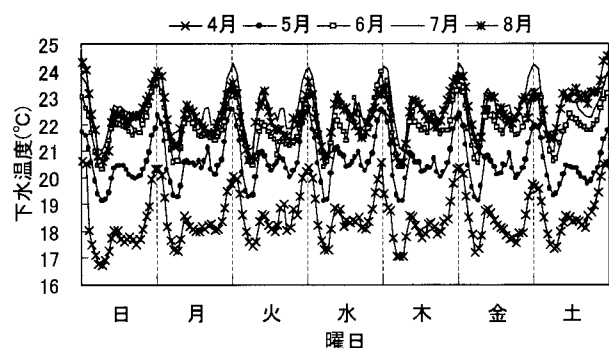


図-4 月別・曜日別の下水温度の時間変動

図-5には、今回の分析対象期間の無降雨時データ平均の下水流量と水温の時間変動パターンを示す。水温と流量は日内でそれぞれ3℃、10 liter/sec程度の変動幅をもつことがわかる。明け方の流量に生活系由来の排水がどの程度含まれているかにもよるが、仮に生活系排水の最低流量が2.5 liter/hour/人で、図-4に示す浸出水量が月ごとに一定値であると仮定した場合、このデータから1日あたりの下水流量は500 m³/dayと算出された。これを集水域内の推計夜間人口で除して1人あたりの排水量原単位に換算すると、4月と5月の平均で284 liter/dayとなる。対象集水域内には、住居用建物の他に、

小学校、お寺、図書館などがあり、建物数で1割程度を占めているが、上記原単位には、これらの建物からの排水も含まれている。

図-6には、図-4で示した下水温度とともに給水栓温度の時間変動データを月別に示す。下水温度と給水栓温度との相対的な関係は月により異なり、4月と5月では給水栓温度<下水温度であるのに対して、6月と7月では平均値で見ると給水栓温度と下水温度はほぼ等しく、時間帯によっては下水温度<給水栓温度となっていた。給水栓温度は水道管設置深度における地中温度に大きく左右されるが、下水温度には地盤から下水道管内への浸出水温や家庭での付加熱量の影響が大きいため、これらの影響の程度により給水栓温度と下水温度の相対的な関係が決まってくると考えられる。付加熱量の季節的な変動要因としては、台所における湯使用割合や浴槽内の温度設定値が挙げられる。

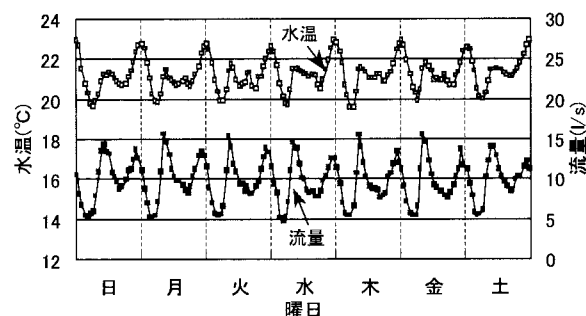


図-5 下水流量と水温の平均変動パターン(無降雨時)

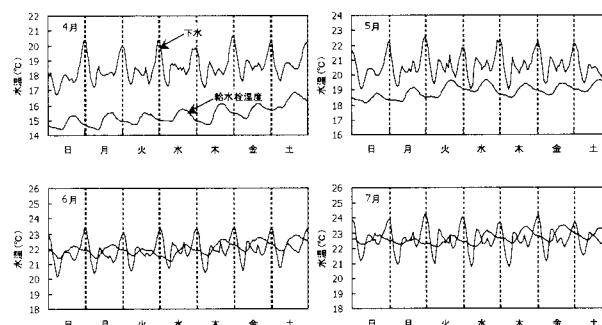


図-6 下水温度と給水栓温度の比較

(3) 降雨時の水・熱輸送の実態

図-7は下水管内に設置した水温計が今夏の夕立時に捉えた、下水及び雨天時流出水の水温の時間変動である。降雨前の水温は生活排水の影響による変動を示すが、18時頃に降雨が始まって下水管内の流量が増大する(降雨ピークに対する流量ピークの遅れ時間は約20分)に連れて排水温度も上昇して、降雨前後で3℃程度変化している。雨水の温度が高ければこのような現象は起こりうるものの、図-7に示すように降雨温度は降雨前の下水温度よりは高いが、流出時の下水温度よりは低く推移しており、雨水の温度では下水温度の急激な上昇を説明できない。したがって、図-7は都市表面(屋根面やアス

ファルト・コンクリートの舗装面)が夏期の日中に加熱され、その後の夕立によって表面に蓄えられた熱の一部を雨水が奪い、下水道(最終的には河川や内湾)に大量に流れ込む現象を明確に捉えたものであると考えられる。

降雨流出における熱輸送には降雨温度も重要である。水文観測地点(図-2)における降雨温度の測定結果は同地点における地上気温とほぼ同じか、やや降雨温度が地上気温より低い傾向を示している(図-8)。また、タワーにおける気温の測定データに較べると降雨温度はほぼ恒常的に低い値を示すことがわかる。したがって近似的には地上気温により降雨温度を表しうることがわかる。

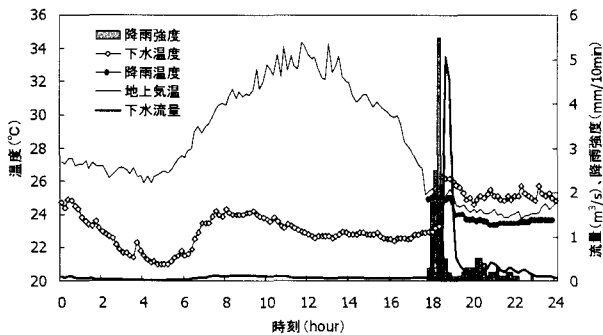


図-7 夕立時の水・熱輸送の観測結果 (2003/8/5)

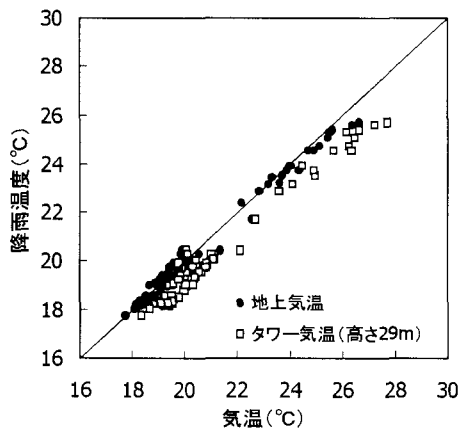


図-8 気温と降雨温度の関係
(7/18~9/16, 時間平均値)

本データを用いて集水域からどの程度の熱量が奪われて下水道に流入したか、大まかに見積もることとする。降雨が地表面から奪い取る熱量を H_r 、降雨流出量とその水温を Q_r 、 T_r 、平常時(無降雨時)の下水(浸出水を含む)として下水道に流入する熱量と流量、下水温度を H_s 、 Q_s 、 T_s 、集水域末端の観測地点を通過する熱量、流量、水温を H_o 、 Q_o 、 T_o 、系内の損失熱量(下水から周囲地盤への熱移動)を ΔH 、液状水の熱容量を $c_p\rho$ とすると、熱量と流量の保存則から式(1)~(3)が成り立つ。

$$H_r + H_s = H_o + \Delta H \quad (1)$$

$$Q_r T_r + Q_s T_s = Q_o T_o + \Delta H / c_p \rho \quad (2)$$

$$Q_o = Q_r + Q_s \quad (3)$$

Q_r は式(3)より求まるので、系内の損失熱量を無視できれば、 T_r は式(2)により定まる。式(2)から求めた 8 月 5 日の夕立イベントにおける平均的な流出水温は 26.3°C であった。流出水温の 10 分ごとの時間変動を見てみると、最初の流出が低減する 20:00 頃まで流出水温が上昇し続け、最大で約 30°C に達していたものと推定された。

夕立イベント期間中に集水域に降雨に付加されて流出した正味の熱フラックス H_{met} を $H_{met} = c_p \rho Q_r (T_r - T_{rain}) / A$ により算出した結果を図-9 に示す。ここで、 T_{rain} : 降雨温度、 $c_p \rho = 4.19 \times 10^6 \text{ J/m}^3/\text{K}$ 、 A : 集水域面積で、流出水温 T_r には時々刻々の値を与えた。図-9 より、降雨の流出過程において雨水への付加熱量は集水域単位面積あたり最大で 25 W/m² であると見積もられた。実際の表面流出に寄与する面積は集水域全体の面積より小さいことから、25 W/m² 以上の熱が付加されていると考えられる。後述する水収支から算出される総流出率が 50% 程度であることから、直接流出域では単位面積あたり最大でおよそ 50 W/m² ($= 25 / 0.50$) の熱量が付加された勘定となる。

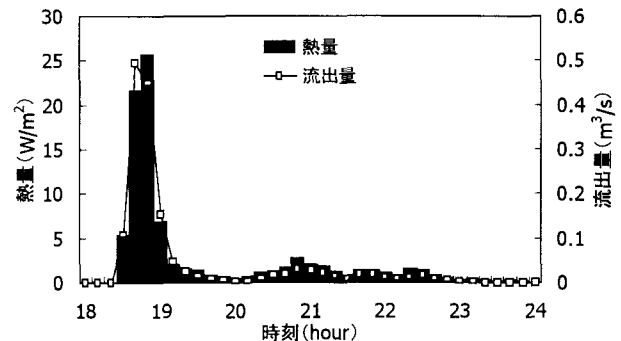


図-9 集水域で降雨に付加されて流出する熱量

(4) 水収支の定量化

ここでは降雨イベントを対象に水収支を定量化し、本集水域における降雨流出特性を整理する。降雨イベントごとの水収支は式(4)により表される。上水供給量 I と平常時の下水流量 Q_o が等しいと仮定し、降雨開始から流出終了までの期間で見たとき、集水域内における浸透、窪地貯留、蒸発による損失量 $\Delta Q (= E + \Delta S)$ は式(5)より求まる。同じく、流出量は総流出率を α とすると式(6)で表せる。

$$R + I = Q_r + Q_s + E + \Delta S \quad (4)$$

$$R = Q_r + \Delta Q \quad (5)$$

$$Q_r = \alpha R \quad (6)$$

ここで、 R : 降雨の流量換算値、 I : 上水供給量、 E : 蒸発散量、 ΔS : 貯留量の変化である。

式(3)と(5)から 8 月の降雨イベント 2 ケースについて、時間毎の水収支を算出した結果を図-10 に示す(本集水域の降雨到達時間はおおよそ 20 分と推定されることから水収支の整理では 1 時間平均値が妥当と考えられる)。

8/5 の夕立イベントで 19 時前後に損失量 $E + \Delta S$ が負の値

となっているのは、一旦土壌に浸透した雨水が下水管渠の継ぎ目等から下水道に浸出することによるものと考えられる。両イベントともに、降雨初期においては降雨のほとんどが集水域内における浸透、窪地貯留、蒸発による損失量 $E+\Delta S$ となるが、降雨が継続するにつれて表面流出量 Q_s の割合が増大している。8/14、8/15、8/16 の総流出率はそれぞれ約 0.34、0.53、0.57 で、図-10 に示した期間全体での総流出率は約 0.5 であった。8/5 の夕立イベントの総流出率は $\alpha=0.471$ となった。この値は本地域の下水道計画における流出係数 (=0.5) とも類似していることがわかった。

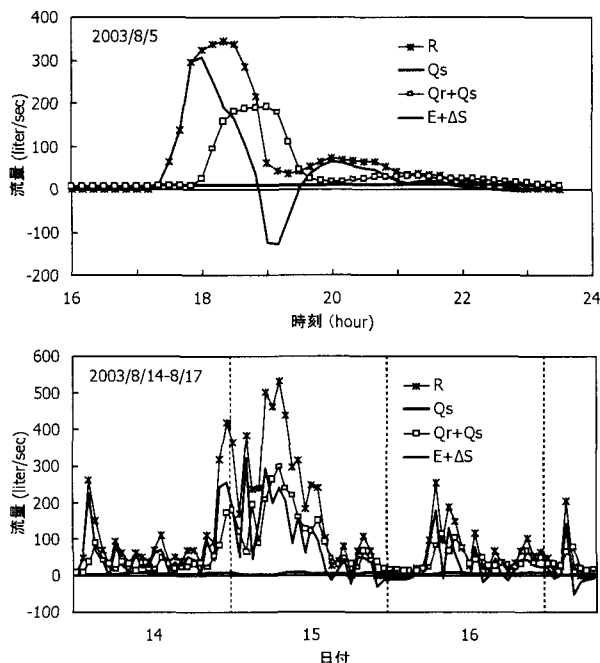


図-10 降雨時の水収支 (2003/8/14~8/17)

3. 水・熱フォーシングモデルの構築と適用

(1) 無降雨時の熱輸送モデルの概要

無降雨時の熱輸送モデルは木内³⁾を基本とし、時間変動に拡張したものである。各建物への給水量の集水域内総和を Q_A 、各建物への平均給水温度を T_A 、各建物からの排水量の集水域内総和を Q_B 、各建物からの平均排水温度を T_B とすると、集水域全体における熱量、水量のバランスは次式により表される。

$$Q_A(T_A - T_r) + \sum H / c_p \rho = Q_B(T_B - T_r) \quad (7)$$

$$Q_A = Q_B + e \quad (8)$$

ここで、 T_r : 基準温度 (例えば気温)、 H : 各建物の正味の付加熱量 (総和は全建物についてとる)、 $c_p \rho$: 水の熱容量、 e : 建物内外における蒸発、人体による摂取等による損失量である。

一般世帯における付加熱量 H の算出にあたっては、「風呂」、「洗濯」、「厨房」、「トイレ」、「洗面・その他」の5種類の用途毎に排水量とその時間変動及び排水温度を設

定して算出する (式(9))。

$$H = c_p \rho \sum_i Q_i (T_i - T_A) \quad (9)$$

ここで、 i : 水の使用用途、 Q_i : 用途別の使用水量、 T_i : 用途別の排水温度である。

下水道内の流下過程においては、周囲地盤への熱伝導による水温低下が発生するが、これは式(10)で表す。さらには、浸出水に伴う熱の移流があることから、集水域末端下水管内の流水の水温 T_C (°C) は式(11)で表現する。

$$T_B' - T_G = (T_B - T_G) \exp(-kt_f) \quad (10)$$

$$Q_C(T_C - T_r) = Q_B(T_B' - T_r) + Q_{GW}(T_{GW} - T_r) \quad (11)$$

ここで、 T_B' : 下水流下後の水温、 T_G : 地温、 t_f : 集水域平均の流下時間、 k : 流下過程における熱伝導の定数、 Q_C 、 T_C : 浸出水の影響を含んだ集水域末端流量及び水温、 Q_{GW} 、 T_{GW} : 浸出水の水量、水温である。なお、集水域平均の流下時間は20分程度であることから $T_B' - T_G$ と $T_B - T_G$ の違いは2%に満たない。

(2) モデルの適用条件

用途別の排水量時間変動パターンは木内⁷⁾、長谷川ら⁵⁾を参考にしながら図-11 に示すとおり設定した。今回は排水の流下と合流に伴う流量波形の平滑化は考慮せず、総排水量の時間変動パターンには便宜的に実測データから得られる平均的パターンを用いた。排水量原単位には前述の値を参考にして、284 (liter/day/人) を与えた。給水温度の時間変動には、東京都水道局が大田区内で測定しているデータを用いた。

浸出水の流入量は生活用水量が最も少ない時間帯 (早朝) の実測データと生活用水量の最小値から同定した。集水域末端の下水温度をより良く再現するように、式(11)中の浸出水の水温は19~20°Cに、式(9)の用途別排水温度は、炊事における給水・給湯比率=7:3、風呂の浴槽水温=気温、入浴水は給湯温度と気温の荷重平均値と設定して求めた。

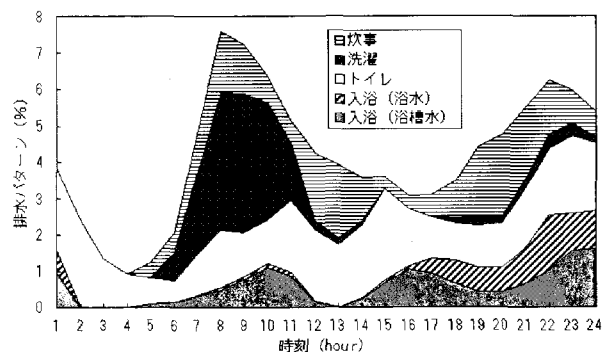


図-11 用途別の排水量変動パターン

(3) 無降雨時の熱輸送モデルの適用

前述のモデルを検討対象の久が原集水域に適用して計

算される流量、水温の時間変動パターンを5月と6月の無降雨日について示したものが図-12、図-13である。いずれも無降雨日が4日以上続いた期間を取り上げて示している。流量については5月の無降雨時流量実測データから求めた平均的な下水流量パターンを用いているので、当然ながら、実測と計算で大差はない結果となっている。また、6月にも上手くあてはまっている。一方の水温については、大まかな時間変動傾向は5月、6月ともに再現されているものの、計算による水温ピークの発生時刻が早めに出現している。この原因として、今回用いた用途別の排水量変動パターン（キャリブレーション対象外）が当該集水域内における水消費行動パターンを表現しきれていない可能性があることが考えられる。特に夜間のピーク発生には浴槽水や浴水の排水時刻、排水温度に関する精度の良い情報が必要である。

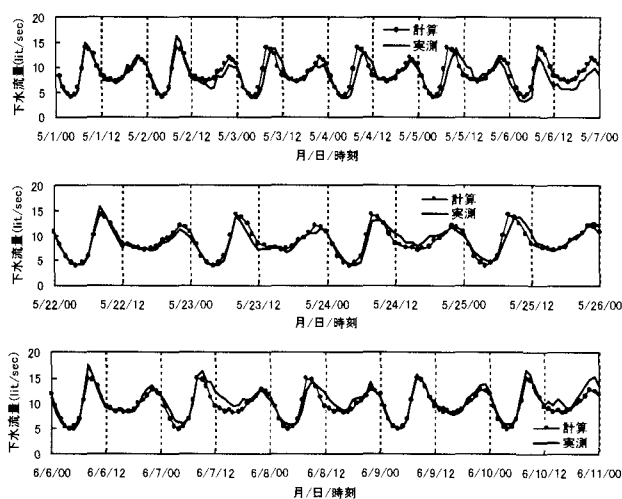


図-12 下水流量の実測値と計算値

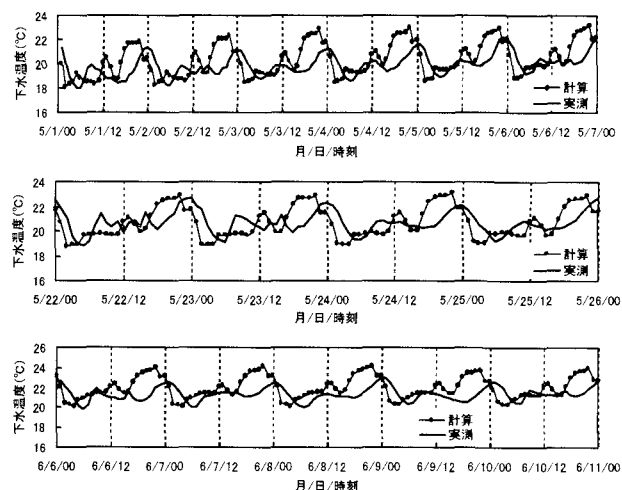


図-13 下水温度の実測値と計算値

4. 結論と今後の課題

本研究により都市集水域からの水・熱輸送現象に関して以下の知見を得ることができた。

流量データからは、排水量原単位として約280(liter/day/人)を得た。浸出水の量については降雨量に応じた変動が確認された。地盤から下水道への浸出水と生活系の排水の正確な分離が今後の課題である。

水温に関しては明確な日変動パターンが明らかとなり、また、夜間の流量のピーク発生時刻よりも1～2時間後に水温のピークが生じることがわかった。さらには、夕立ちに伴って都市集水域で加熱された雨水が流出する現象を捉えることができた。あわせて、降雨温度と気温との関係についても明らかにした。

晴天時の下水温度の動的変化を推定するモデルを提案し、実測データとの比較を行った。水温の変動傾向は良好に再現されたが、時間的なずれが確認された。現時点ではキャリブレーションの対象とせざるを得ないパラメータがいくつか存在していることから、これらの値を物理的条件に基づいて与えられるようにする必要がある。また、今後、雨天時の流出水温を推定するモデルについても検討を行う予定である。

謝辞

本研究の実施に際して、東京都下水道局、東京都水道局の諸氏にデータ提供等でご協力頂いた。各機関の担当の方々には厚くお礼を申し上げます。なお、本研究実施にあたっては科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（研究代表：神田学）の財政的支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木内 豪：都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化—東京都区部下水道と東京湾を事例として—、水工学論文集, Vol.47, 25-30, 2003.
- 2) Arrington, K.E. et al., Development of educational material about the thermal impact of impervious surfaces, Proceedings of 5th International Conference on Urban Climate (CD), Poland, 2003.9.
- 3) 木内 豪：都市の水・エネルギー利用が水域に及ぼす熱影響のモデル化と東京都区部下水道への適用、水文水資源学会誌, Vol.17, No.1, 2004 (印刷予定).
- 4) 森脇 亮, 神田 学：都市接地層における放射・熱・水・CO₂フラックスの長期連続観測、水文・水資源学会誌, Vol.16, No.5, 477-490, 2003.
- 5) 長谷川 敏, 市川 憲良, 紀谷 文樹：給水・給湯負荷の計測と時系列解析を用いた時間負荷変動の予測、日本建築学会計画系論文集, 第494号, 53-59, 1997.
- 6) 山田 啓一：家庭用水量変動特性と時間帯排水量の推定、水道協会雑誌, 第754号, 2-8, 1997.
- 7) 木内 豪：中小都市河川における日周変動と流域状況の対応について、東京工業大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 1989.

(2003.9.30 受付)