

都市人工排水系における水・熱輸送 に関する観測研究

OBSERVATION STUDY ON WATER AND HEAT TRANSFER IN URBAN SEWAGE SYSTEM

中山 有¹・神田 学²・木内 豪³・森脇 亮⁴

Yu NAKAYAMA, Manabu KANDA, Tsuyoshi KINOUCHI and Ryo MORIWAKI

¹学生会員 東京工業大学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)

²正会員 工博 東京工業大学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)

³正会員 博(工) 福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地)

⁴正会員 博(工) 東京工業大学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)

In urban area, water and heat transfer is not decided only by surface energy balance, but also by artificial effects including waterworks and sewage system. To investigate how water and heat are transferred in urban catchment, meteorological and hydrological values are observed over one year. The catchment is a residential area located in Tokyo metropolitan and the area is 12.2ha. The following results are obtained.

Groundwater from soil into sewer occupies 29% of whole wastewater by evaluating water balance of the catchment. The heat added by water use is up to 3.4 W m^{-2} in winter and the value is 10% of whole anthropogenic heat. In winter, the heat that the wastewater gains through flowing the catchment is 28% of ground heat flux as a residual heat of surface heat balance.

Key Words : Urban thermo-hydrology, Water and heat balance, Wastewater, Groundwater, Water temperature

1. はじめに

近年、都市の過密化・拡大に伴いヒートアイランド現象をはじめとした熱環境の悪化が明らかになっている。気圏への人工排熱量については多くの研究がなされている(例えば環境省¹⁾) が、水圏への人工排熱を調べた例は多くない。しかし、下水処理水の温度は過去35年間で最大7℃も上昇しており²⁾、河川・海など隣接する水圏の熱環境の悪化が懸念されている。

都市集水域の水・熱輸送は正味放射、顕熱、潜熱、人工排熱、降雨といった大気側のフラックスだけではなく、上水、下水を通じた地下でのフラックスが存在する(図-1)。このような人工排水系は森林や裸地ではなく、都市の大きな特徴である。

森脇・神田³⁾ は都市に気象観測タワーを設置し、都市住宅部における水・熱収支を大気の面から明らかにしてきたが、人工排水系を含めた水・熱収支に対する寄与については不明であった。

そのため著者らは都市集水域における水・熱輸送、

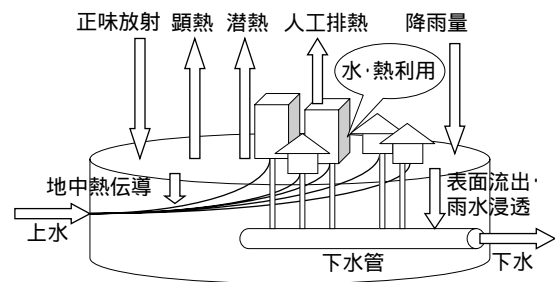


図-1 都市集水域の水・熱輸送の模式図

特に下水管網を通じた水・熱輸送実態を調べるために、2003年より住宅地域で下水流量・水温を測定している⁴⁾。前報では流量・水温の時間変動や降雨時のみの熱流出現象について報告した。本論では年間の連続計測データを用いて、都市集水域における水・熱輸送の実態を明らかにする。

2. 観測概要



図-2 観測機器の配置

人工排水系を含めた水・熱収支を調べるために、まずこの地域から排出される下水の流量・水温の計測を行った。2003年4月から集水域下流端（図-2）で下水の流量・温度を計測している。集水域からの排水はすべてこの下流端に集まるため、集水域をコントロールボリュームと見たとき系外に排出される水・熱を測っていることになる。

また降雨量および降雨の持つ熱量が系への入力となるため、畑に水文観測場を設け降雨量と雨の温度を計測した。同地点で土壌の水分貯留量、土壌の蓄える熱貯留量を見積もるために、土壌の体積含水率、温度の計測も行った。体積含水率、温度は地表から深さ2mまでの6深度で測っており、各測点の体積含水率から深さ2mまでの水分貯留量を計算できる。

系への入力条件として重要な上水の流量に関しては東京都水道局提供の配水量データを用いた。データは久が原地域全体の年配水量であるため、これを東京都23区の時間別配水量の時間別比率で分配し、久が原地域全体との面積比から本集水域に供給される上水流量を計算した。上水の水温は東京都水道局に提供いただいた集水域周辺3点のモニタリングの値を平均して用いた。

集水域の面積は東京都公共下水道台帳上下流追跡図から約12.2haであり、この地域では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各町丁目の人口、世帯数を面積按分して求めた。これにより、人口は1830人、世帯数は830世帯であると推定した。対象集水域内の建物数は住宅地図から約407戸であり、住宅用建物が主である。

集水域を含めた観測地域の緑被率、アスファルト被覆率、浸透面の割合は航空写真および東京都のGISデータよりそれぞれ22%、21%、34%である。

3. 無降雨時の下水流量・水温の時間・季節変動

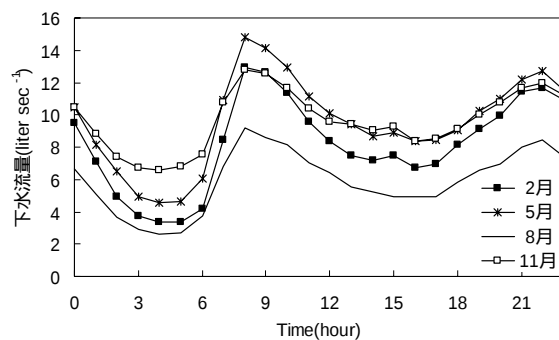


図-3 季節別の下水流量の時間変動

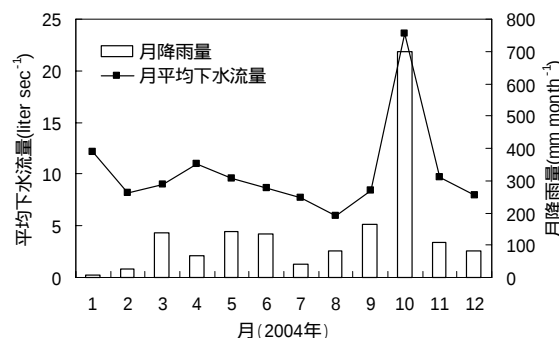


図-4 月別の平均下水流量と月降雨量

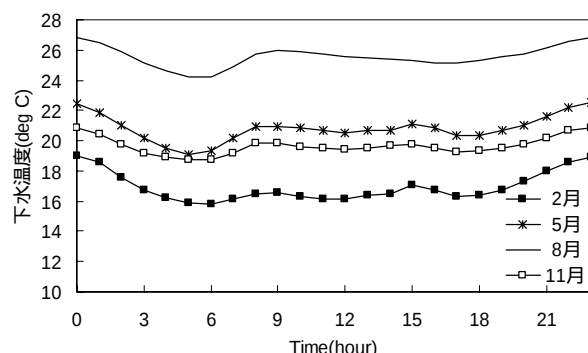


図-5 季節別の下水水温の時間変動

無降雨時の下水道での観測データから平常時に排出される下水流量および水温の時間変動・季節変動を整理した。データは2004年1月1日から12月31日までのものを用い、そのデータの時刻の過去12時間の積算降雨量が1mmを越えないものを無降雨時のデータとした。なおこの年の年降雨量は1691mmであり、東京（気象庁）の過去30年の平均値1467mmと比べてやや多かった。また10月には台風が2度来たため降雨量は平年に比べて多かった。

(1) 流量の時間変動・季節変動

下水流量はどの月においても8時ごろと22時ごろにピークがある（図-3）。グラフの形は季節によって大きく変わらないため、月による最低流量の違いは地下水が下水管の継ぎ目等から浸出してくるためと考えられる。実際、降雨の多かった10月は下水流量が著しく多い傾向がある（図-4）。

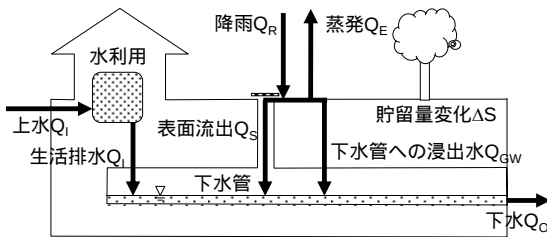


図-6 集水域の水収支概念図

(2) 水温の時間変動・季節変動

下水水温はどの月でも23時から24時ごろに最大値をとるピークが見られ、日中では8時ごろに小ピークがある（図-5）。時刻別水利用のデータ⁵⁾との比較から夜のピークは風呂によるもの、朝8時のピークは炊事によるものと考えられる。

4. 集水域水収支

集水域の水収支は図-6のように考えられる。集水域を流れる水はおおまかに人工排水系と自然排水系に分けられる。人工排水系では上水が系に入ってくる水であり、住宅等で炊事・洗濯などの水利用を経て下水道へ流出する。自然排水系では降雨が系に入ってくる水であり、一部は蒸発し残りは表面流出と地中への浸透となる。不浸透面に降った雨は表面流出としてすぐ下水道に流れ、浸透面に降った雨は地中へ浸透する。浸透水は降雨から時間を経た後、下水管の継ぎ目等から下水道へ浸出するが、一部は地中で貯留となる。

これらの水量を2004年の各月ごとに計算した。

(1) 計算方法

集水域に配水される上水流量を Q_I とおく。生活排水流量については、配水された水はすべて下水道に流される、つまり生活排水流量は上水流量 Q_I と等しいと仮定する。降雨量を Q_R 、蒸発量を Q_E 、表面流出を Q_S 、土壌から下水管に浸入してくる浸出水の流量を Q_{GW} 、土壌に貯留される水量の変化を ΔS 、集水域下流端での観測流量を Q_O とおく（図-6）。

a) 集水域内の下水道（人工排水系）の水収支

集水域内の下水管をコントロールボリュームにとって水収支を考えると式(1)のようになる。

$$Q_I + Q_{GW} + Q_S = Q_O \quad (1)$$

b) 集水域内の土壌（自然排水系）の水収支

また降った雨が表面流出、浸透、貯留量変化になることから式(2)が導ける。

$$Q_R - Q_E = Q_S + Q_{GW} \pm \Delta S \quad (2)$$

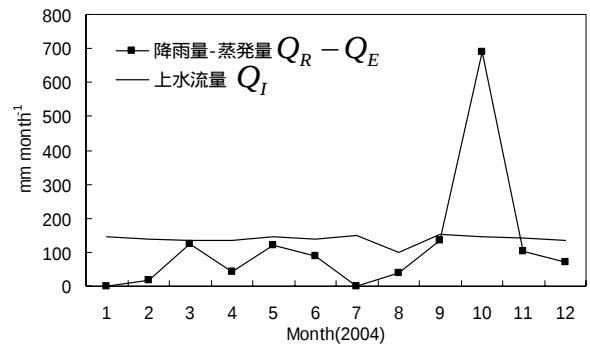


図-7 集水域に入ってくる水量の内訳

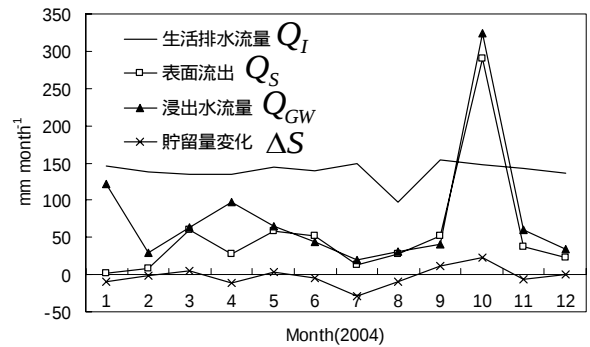


図-8 集水域から出て行く水量の内訳

c) 集水域内全体の水収支

式(1)(2)を足し合わせると集水域の水収支式は式(3)のようになる。

$$Q_I + Q_R - Q_E = Q_O \pm \Delta S \pm \Delta R \quad (3)$$

ただし ΔR は残差である。

これらの値のうち、 Q_I 、 Q_R 、 Q_E 、 Q_O 、 ΔS は既知であり、それぞれ東京都水道局の配水量データ、水文観測地点で計測した降雨量、気象観測タワーの水蒸気フラックス、観測している下水流量、水文観測地点の体積含水率を用いた。

未知数である Q_{GW} 、 Q_S 、 ΔR については以下のように計算した。 Q_{GW} は式(1)のうち、無降雨時に Q_S がゼロであるため無降雨時の Q_O を計算し、式(1)から計算した。 Q_S は Q_{GW} が既知となったため、降雨時も含めた Q_O を用いて式(1)から計算した。降雨時の Q_{GW} と無降雨時の Q_{GW} は必ずしも一致しないと考えられるが、水文観測地点の深さ2mの土壌水分量が降雨前後で急激な変化をしないことからここでは等しいと仮定した。 ΔR は式(3)の ΔR を除く各項が既知であるので残差として求めた。各値について1ヶ月あたりに単位面積に流れる流量を計算した。

(2) 結果

集水域に入ってくる水である有効降雨量 $Q_R - Q_E$ と上水流量 Q_I を比べると両者はほぼ同じオーダーであり、降雨量が月によって大きく異なるのに対し、上

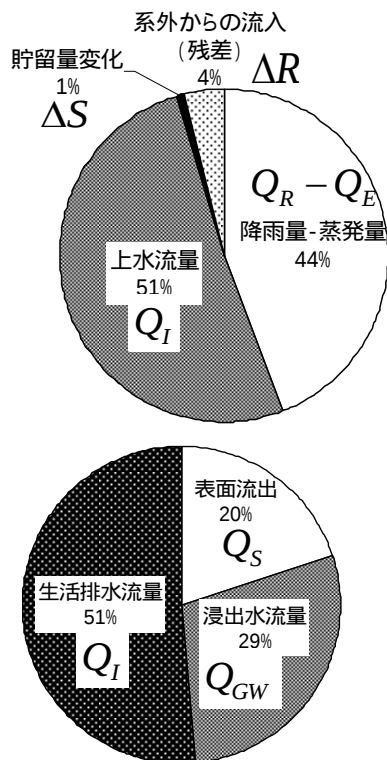


図-9 (上) 系内に供給される水の内訳
(下) 系外に流出する水量の内訳

水の供給量は月によってほとんど変わらない(図-7)。集水域から出て行く水は浸出水流量が降雨量と同じ挙動を示し、貯留量変化は生活排水流量・浸出水流量より1オーダーほど小さい(図-8)。

次に1年間の水収支について説明する。貯留量変化と残差は1年間で負となったため、集水域に供給される水としてカウントした。集水域に入ってくる量では降水量から蒸発量を引いた有効降雨量と上水の量がそれぞれ44%、51%と大部分を占めている(図-9)。一方、集水域から出て行く量では生活排水流量が51%、表面流出量と浸出水流量を合わせた自然系の排水量が49%となっており、家庭で使用される水の量とほぼ同量の自然系水が下水道によって運ばれている。下水道が合流式であるので下水全体の中で表面流出が20%含まれていることに不思議はないが、無降雨時の浸出水が29%もあるという点は重要である。

前に触れたように集水域に供給される流量よりも集水域から出て行く流量のほうが大きく、残差が負となった。集水域がゆるい谷状の地形に位置することから集水域外の水が地中を浸透し、集水域の下水道に流入したものと考えられる。

5. 集水域熱収支

(1) 地下の熱環境の概況

熱収支を計算する前に地下の熱環境の概況につい

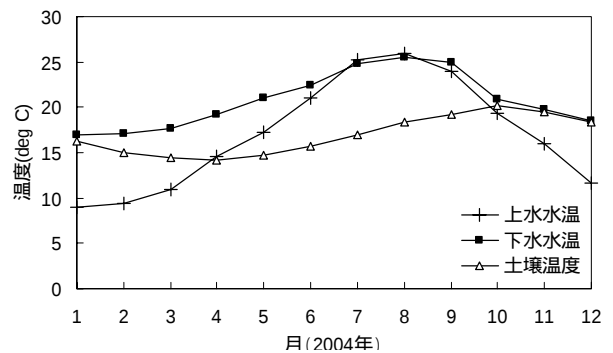


図-10 上水・下水・土壌(深さ2m)の温度の季節変化

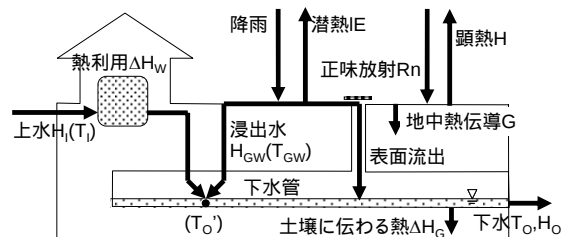


図-11 集水域の熱収支概念図

て説明する。

下水の水温はほぼ1年を通じて上水水温、土壌温度よりも高く、上水の水温に比べて変動が小さい(図-10)。上水温度は比較的浅いところに埋められているため、気温の影響を受けて大きく変化している。

また下水水温は土壌温度よりも高いことから熱は常に下水管から管の外に移動していることになる。前章から地下水は管の外から中へ入ってくる一方であるので、管の中と外を行き来する水と熱で交換の向きが逆になっていることが予想される。

(2) 集水域熱収支の概要

集水域の熱収支について概観する(図-11)。熱の流れについても水収支と同様人工排水系と自然系に分けることができる。人工排水系においては集水域に上水が供給され、住宅で水利用に伴い熱が付加されたのち下水道に排水される。下水管では土壌からの浸出水が混入し、また下水と土壌の温度差のために下水の熱が土壌へと伝導する。自然系では地表面と大気の間で正味放射、顕熱、潜熱の熱交換があり、その残差として土壌には地中熱伝導が供給される。また降った雨は一部蒸発し、残りは集水域の浸透と表面流出になる。これらはさらに下水道に浸出水と表面流出として系外に流出する。

(3) 表面流出の持つ熱

熱収支の各項の計算に移る前に表面流出が地表面から奪う熱について特にとりあげる。前報⁴⁾では降雨時に雨が地表面の熱を奪って下水道に流出するケースを報告した。しかし、2004年の降雨を調べてみると 10 W m^{-2} を超えるケースはまれであり、無降雨時を含めた年平均で 0.1 W m^{-2} と小さいことがわかった。

2004年の1年間に顕著な流出の見られた降雨日（全部で90ケース）を整理した．前報⁴⁾と同様の方法で雨の温度を基準として，流出時に雨が地表面から奪った熱を計算すると瞬間値で 10 W m^{-2} を越えるケースは24回あった．しかし，無降雨時も含めた月平均の値は各月で $0 \sim 0.2 \text{ W m}^{-2}$ の値をとり全体としては大きくなかった．したがって以下で示すとおり熱収支において雨が地表面から奪った熱の割合はあまり大きくない．

(4) 計算方法

計算の際に水の移動によって運ばれる熱は何らかの基準となる温度との差をとる必要があるが，この基準の温度として集水域の外から入ってくる上水の水温を用いた．したがって上水が集水域に持ち込む熱量はゼロである．

下水の流下過程では生活排水と土壌からの浸出水の混合および下水管から管外の土壌への熱伝導の2つの現象は同時に起こっているが，簡単のため生活排水と浸出水の混合の後，管外への熱伝導が起きているとモデル化して考える．

上水の水温を T_I ，住宅からの生活排水水温を T_W ，土壌から下水道に浸出してくる水の温度を T_{GW} ，生活排水と浸出水が混ざった直後の下水の温度を T_O' ，下水管周囲の土壌温度を T_G ，観測している下水の水温を T_O とおく．

a) 集水域内の下水道（人工排水系）の熱収支

住宅で水利用に伴って付加された熱を ΔH_W ，土壌からの浸出水が下水道に持ち込む熱フラックスを H_{GW} ，流出時に雨が地表面から奪った熱 ΔH_S ，下水・土壌間の熱伝導フラックスを ΔH_G ，下水の熱フラックスを H_O とおく．

集水域内の下水管をコントロールボリュームにとって熱収支を考えると式(4)のようになる．

$$\Delta H_W + H_{GW} + \Delta H_S - \Delta H_G = H_O \quad (4)$$

b) 集水域内の土壌（自然系）の熱収支

地表面での正味放射，顕熱，潜熱の正味の和を $Rn - H - IE$ ，地表面熱収支の残差である地中熱伝導を G とおく．土壌に入ってくる熱と土壌から出て行く熱で収支をとると式(5)のようになる．

$$Rn - H - IE = G - H_{GW} - \Delta H_S + \Delta H_G \quad (5)$$

c) 集水域内全体の熱収支

式(4),(5)を足し合わせると集水域内全体の熱収支は式(6)のようになる．

$$Rn - H - IE = G + \Delta H_W - H_O \quad (6)$$

この中で人工排水系の熱収支を計算すれば G を除く

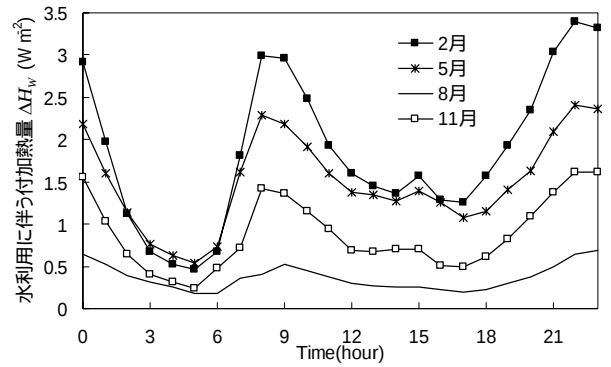


図-12 水利用に伴う熱付加量 ΔH_W の時間変動

各成分が求まる．人工排水系の各成分は式(7)～(10)のように表せる．

$$\Delta H_W = \rho c_p Q_I (T_W - T_I) \quad (7)$$

$$H_{GW} = \rho c_p Q_{GW} (T_{GW} - T_I) \quad (8)$$

$$\Delta H_G = \rho c_p Q_O (T_O' - T_O) \quad (9)$$

$$H_O = \rho c_p Q_O (T_O' - T_I) \quad (10)$$

生活排水と浸出水の混合に関しては以下の水収支・熱収支式が成り立つ．

$$Q_I + Q_{GW} = Q_O \quad (11)$$

$$Q_I T_W + Q_{GW} T_{GW} = Q_O T_O \quad (12)$$

式(7)～(9)を足し合わせ，式(11)，(12)を用いて式(10)と比較すると人工排水系の熱収支式(4)が導ける．ここまでに用いた記号の中で T_I ， T_O はそれぞれ計測しており， T_{GW} ， T_G については水文観測地点での深さ2mの温度を用いた．水文観測地点と集水域の間は約600m離れているが双方とも住宅街の中であり，水文観測地点の土壌温度が集水域の土壌温度を代表していると考えた．集水域の下水管の埋設深さは2～4mである．流量に関しては前章で示したとおりである． T_O' が未知であるが，これは下水の温度が流下に従って土壌の温度になじむという考え方から式(13)のようにモデル化した．

$$(T_O' - T_G) \cdot \exp(-kt_f) = (T_O - T_G) \quad (13)$$

k は流下過程における熱伝導の係数， t_f は集水域平均の流下時間を示す．係数 k は三好ら⁶⁾を参考にして， 0.048 hour^{-1} とおき，流下時間 t_f は降雨時の降雨ピークと流量ピークの時間差から20分と決定した．

(5) 結果

まず，水利用に伴って付加された熱 ΔH_W の時間・季節変化について述べる．流量・水温と同じように8時ごろと23時から24時ごろの2回にピークが見られ，住宅から気圏に排出される人工排熱⁷⁾と同じ傾

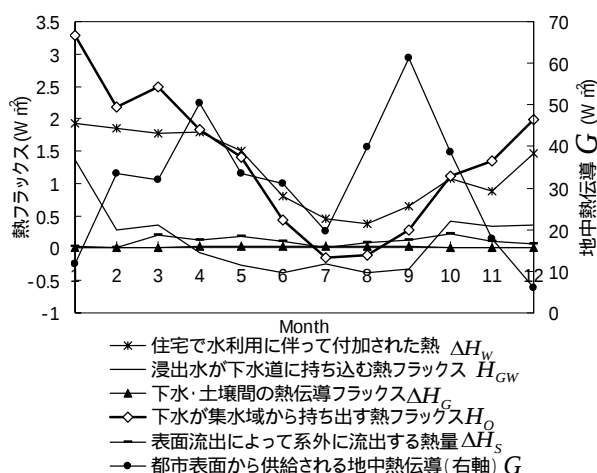


図-13 集水域における主な熱フラックスの季節変化

向を示している（図-12）．季節を比べると冬に付加熱量が多く，夏に少ないという傾向が現れており，冬夏それぞれの1日の最大値は 3.4 W m^{-2} ， 0.7 W m^{-2} となった．このピーク値を人工排熱全体⁷⁾と比較すると下水に対する付加熱量は2月で約10%，8月で約3.2%となった．この比だけで言うと人工排熱は大部分が大気へ放出されている．

次に各熱量の月変化について述べる（図-13）．

a) 集水域内の下水道（人工排水系）の熱収支

下水に付加される熱量の成分の中では水利用に伴って付加される熱 ΔH_W が最も大きく，1年中で正となる．浸出水が下水道に持ち込む熱量 H_{GW} は夏に負になるが，これは夏に土壌の温度（＝浸出水温度）が上水の温度よりも低くなるためである．したがって夏には水利用に伴って付加される熱量を冷たい浸出水が緩和しているといえる．冬には浸出水が下水道に持ち込む熱量は正であり，水利用に伴って付加される熱にさらに熱を加えていることになる．水収支と同様，浸出水が人工排水系の熱収支に大きな影響を及ぼしていることがわかる．また表面流出によって系外に流出する熱量 ΔH_S および下水・土壌間の熱伝導フラックス ΔH_G は他の熱量に比べて小さく，季節変化も乏しい．

b) 集水域内の土壌（自然系）の熱収支

下水が系外に持ち出す熱量は1月に最大値 3.3 W m^{-2} をとり，気象観測タワーで観測された地表面熱収支の残差として供給される地中熱伝導⁸⁾と比べると約28%に及ぶことが分かった．したがって下水道が都市集水域の熱輸送に重要な役割を果たしているといえる．

6. 結論

本研究から以下のことが明らかになった．

1. 集水域の年間水収支を調べた結果，下水管外から下水道に流入する浸出水が下水全体の29%に及ぶことが分かった．
2. 住宅地において水利用に伴って付加される熱量を計算した結果，夏には最大で 0.7 W m^{-2} ，冬には最大で 3.4 W m^{-2} になることが分かった．このピーク値は人工排熱全体のうち夏で約3.2%，冬で約10%となった．
3. 集水域の年間熱収支を調べた結果，土壌から下水道に流出する浸出水は夏に冷たいため，水利用によって付加される熱を緩和し，冬には暖かいため熱をさらに加えていることが分かった．また冬には下水が集水域外に持ち出す熱量が地表面熱収支の残差としての地中熱伝導フラックスの約28%に相当することがわかった．

謝辞：本研究で用いた上水配水量・上水水温，下水管深さのデータはそれぞれ東京都水道局，下水道局からご提供いただいた．各機関の担当の方々には厚くお礼申し上げる．またこの研究の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（代表：神田学）の支援を受けた．ここに謝意を示す．

参考文献

- 1) 環境省：ヒートアイランド現象の実体解析と対策のあり方について，2001.
- 2) 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，土木学会水工学論文集，Vol.47, pp.25-30, 2003.
- 3) 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.
- 4) 木内豪，中山有，森脇亮，神田学：都市集水域における水・熱輸送の実態解明とモデリング - 久が原水文気象観測データに基づいて -，土木学会水工学論文集，Vol.48, pp.175-180, 2004.
- 5) 長谷川巖，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，Vol.494, pp.53-59, 1997.
- 6) 三好伸浩，楠田哲也，井村秀文：都市における下水排熱の利用性に関する研究，環境システム研究，Vol.18, pp.118-123, 1990.
- 7) 妹尾泰史，神田学，木内豪，萩島理：潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と都市局地気象に対する影響，土木学会水工学論文集，Vol.48, pp.169-174, 2004.
- 8) 森脇 亮，神田 学，木本由花：住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間積算値，土木学会水工学論文集，Vol. 49, pp.361-366, 2005.

（2005.9.30受付）