

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—

Long-term trend in thermal impact of urban water use on the receiving water
- Case study of the sewerage system in the central Tokyo area and the Tokyo bay -

木内 豪¹

Tsuyoshi KINOCHI

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主任研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)

Water and energy consumed by various urban activities are eventually released to the atmosphere and hydrosphere. Their impacts may not be negligible as the great amount of water and energy are dumped according to the growth of urban activities. To demonstrate the impact of urban growth on the water temperature released from wastewater treatment plants via a sewerage system, the decadal trend of the water temperature, as well as water amount and heat flux are revealed, and the factors affecting the trend are analyzed for the central Tokyo area. It is found that the effluent water temperature and the heat flux have been increasing over the past 36 years. Based on the model that quantifies the effluent water temperature, it is indicated that the increase of water temperature is attributed to the increase of supply-water temperature, the increase of the water used for bathing and the increase in the energy consumption for hot water supply due to the change of life style and the total energy demand increase.

Key words: Urbanization, Water use, Energy consumption, Sewerage, Water temperature

1. はじめに

東京湾においては、従来、夏季においてのみ発生していた鞭毛プランクトンが、近年になって春季においてもみかけられるようになったと報告されている¹⁾。この一因として内湾の水温上昇が考えられているが、実際に水温上昇が生じているのか、一体何が水温上昇をもたらすのか、という点は解明されていない。都市の発展や生活様式の変化に伴う水・エネルギー消費量や排出量の経年的変化が排出先の公共用水域に環境影響をもたらしたためではないかと想像されるものの、都市から公共用水域に排出される水・エネルギー量やその長期的変化の実態は明らかにされていない。

そこで、本論文においては、都市活動に伴い下水道を経由して公共用水域に排出される下水放流水温と放流熱量の経年的、季節的な変化の実態とその放流先の水温実態について、東京都区部下水道と東京湾をケーススタディとして報告する。また、家庭部門や業務部門における水利用やエネルギー利用の実態に基づいて下水放流水温

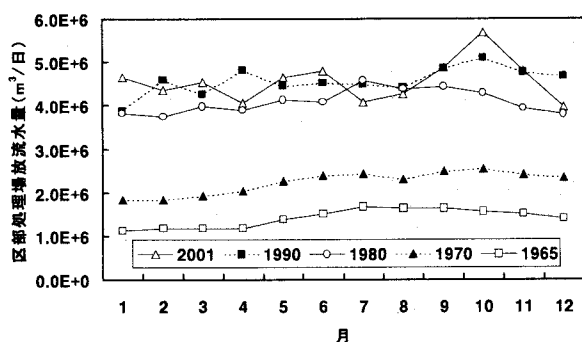
の経年的な変化を定量的に算定するマクロモデルを構築し、放流水温の経年変化をもたらした主たる要因を明らかにしたので、その結果について報告する。

2. 放流量、放流水温および東京湾水温の実態

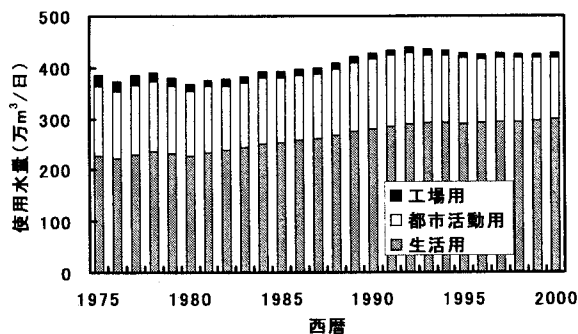
(1) 処理場からの放流量

東京都区部にある全下水処理場から処理後に放流される水量(雨水を除く)の経年変化を図-1に示す。1970年から1980年にかけて放流量が急激に増大しているが、これは、区部の下水道整備に伴うものである。ちなみに、区部の下水道普及率は、1965年に35%であったが、1975年に63%、1985年で83%に達し、現在では既にほぼ全域に普及している。また、処理場の数も同様に増加しており、現在では13箇所が稼働している。

下水道普及率の上昇の他に、使用水量そのものの増大も放流量増加の一因である。都水道局の資料によると、使用水量全体としては1975年に対して、2000年において11%の伸びを示し、生活用および都市活動用の使用水



図一 月別放流水量の経年変化



図二 東京都区部の水利用
東京都水道局提供のデータに基づき作成

量は、同期間でそれぞれ 31% の増加と 11% の減少となっている (図二)。核家族化の進行や生活様式の変化を背景に、一人あたりの水使用量が増加しており (図略)、放流量にもその影響が表れていると言える。

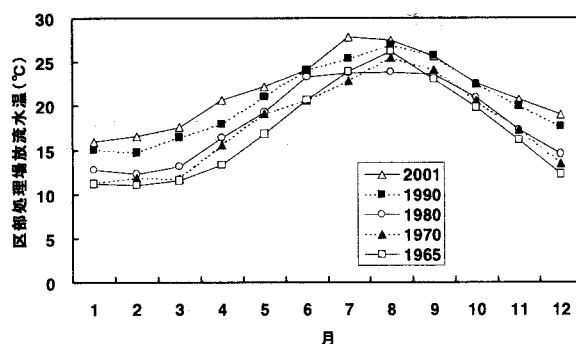
(2) 処理場からの放流水温

東京都下水道局では、各処理場において 1 日 1 回、流入水温を測定している。そこで、各処理場における定時測定値の月別平均値を放流量で加重平均した値を用いて月別放流水温の経年変化を整理したのが図三である。これによると、下水処理場からの放流水温は年々、上昇傾向にあること、夏期よりも冬期に水温上昇が顕著であることがわかる。

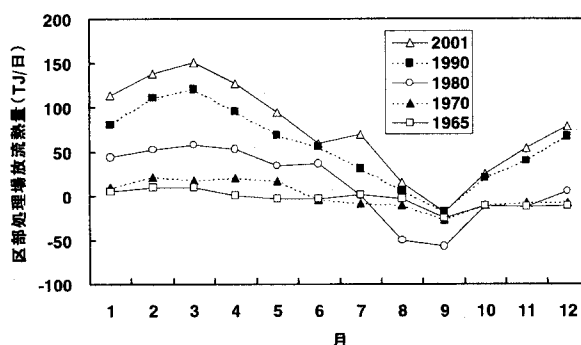
2001 年を基準として、各年からどれだけ月平均放流水温が上昇したか調べてみると (図略)、1965 年当時と現在では、4 月と 12 月でそれぞれ 7.3℃ 及び 6.9℃ 上昇していた。3 月～4 月と 7 月、12 月で上昇量が極大となり、9～10 月、5～6 月に極小化するという特徴が見られた。

(3) 放流熱量

内湾への熱的影響という観点からすると、湾内水温よりどの程度高温の処理水がどの程度の量、排出されているかが問題となる。そこで、都区部の下水処理場からの放流熱量を、内湾の水温を基準として式(1)により算出し、その特徴を整理したのが図四である。なお、内湾の水温には公共用水域の測定結果のうち、東京都により測定されている環境基準点 No.35 の 1975 年から 2000 年ま



図三 月別放流水温の経年変化



図四 月別放流熱量の経年変化

でのデータの平均値を用いた。

$$Q: \text{放流熱量 (TJ/日)} = c_p \rho Q_{\text{out}} (T_{\text{out}} - T_{\text{sea}}) / 10^6 \quad (1)$$

ここで、 c_p : 水の熱容量 (4.186 MJ/m³/K)、 Q_{out} : 放流量 (m³/日)、 T_{out} : 放流水温 (°C)、 T_{sea} : 内湾水温 (°C) である。

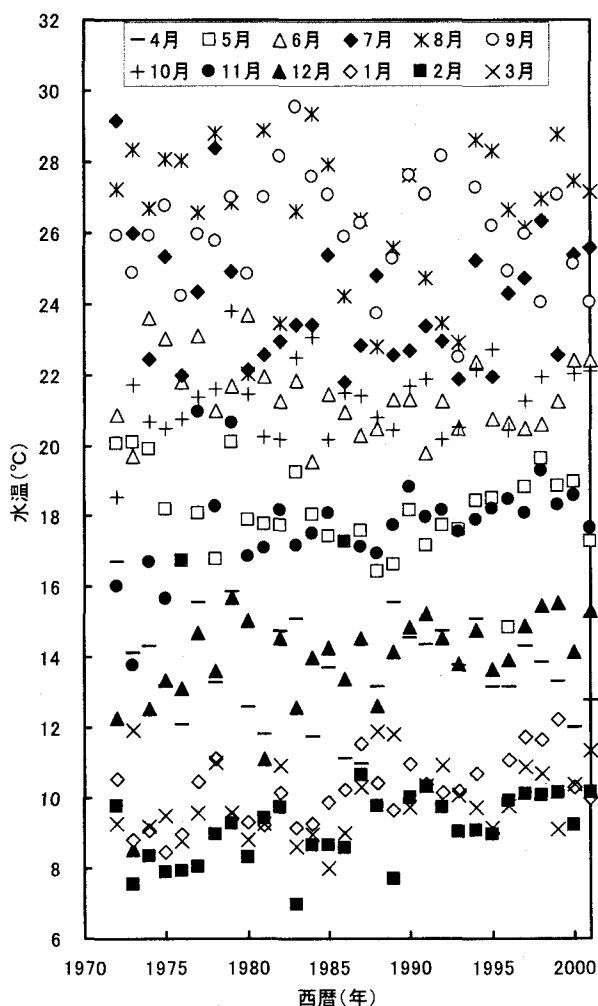
放流熱量は 3 月に最大値、8～9 月に最小値を示すことがわかる。これは、No.35 地点における平均の水温が 2 月と 3 月に最低となるが、放流水温を左右する 1 つの要因と考えられる給水温度は 2 月よりも 3 月で高いことによる。また、各月とも概ね経年的に放流熱量が増大傾向にあることが明らかである。

ここで算定した放流熱量 Q が都区部における業務部門・家庭部門からのエネルギー消費量と比較して量的にどの程度になるかを試算してみると、例えば 3 月の放流熱量は東京都環境局²⁾ の推計によるエネルギー消費量約 880TJ/日の約 18% に相当することがわかる。

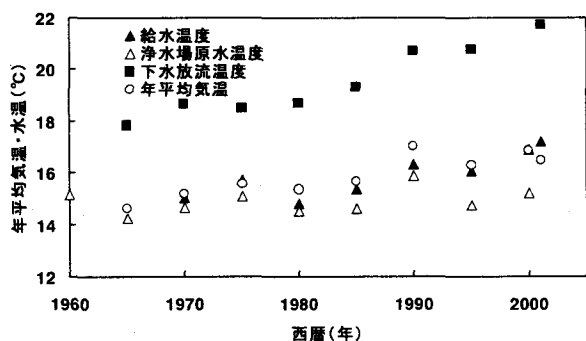
未利用エネルギーの活用という観点からすると、図四の結果は、下水にまだ大量の利用可能なエネルギーが残存していることを意味している。特に、冬から春にかけて温熱源として下水の有する熱エネルギーをもっと有効利用できる余地がある。

(4) 湾内水温の経年変化

ここでは、東京都区部からの下水等の影響を強く受けると考えられる東京湾湾奥部における水温データを整理し、気象の影響を受ける状況下で、どの程度経年的な水



図一五 東京湾の表層水温の経年変化



図一六 年平均給水温度の経年変化

温上昇傾向が確認できるかを明らかにする。使用したデータソースは1972年以降の東京都の公共用水域測定結果で、このうち、環境基準地点に指定されて月に1度測定されている地点の表層水温データを用いた。各年で測定月日が異なっているが、特に補正は行っていない。

図一五は8地点における月ごとの測定結果の平均値を表している。この結果から、1～3月、5月、11月においては水温の経年的な上昇傾向が見受けられる。一方、それ以外の月では年ごとの変動が大きく、明確な経年的上昇傾向は見られない。図一四で示したように、放流熱量

は冬期から春期にかけて相対的に大きい点とも対応しているように思われる。ただし、12月や4月では明らかな経年上昇はないことから、気象条件の変化や外洋の海流の影響を受けて海水の混合具合に季節的な違いが生じ、結果として都市活動の影響が薄められているのではないかとと思われる。

3. 放流水温増大の原因に関する考察

放流量とともに放流水温も上昇している実態が把握されたことから、以下においては、果たしてどのような原因により水温上昇がもたらされているのかについて、定性的な考察を加える。

想定される原因としては、経年的な給水温度の上昇、家庭・業務建物において付加される熱量の増大（給湯・厨房割合の増加）による排水温度の上昇、下水管を流れる間における地中との熱の授受量の変化が考えられる。

(1) 給水温度の上昇

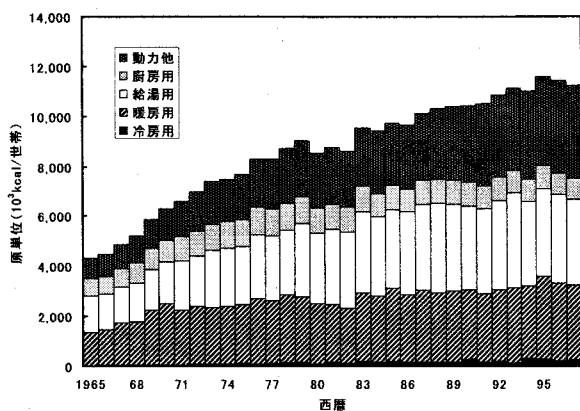
給水温度が経年的にどのように変化してきたかを調べるため、各建物の蛇口から出る水の温度に最も近い値を示すと思われる23区内の給水栓における水温測定結果および主要な浄水場（金町、朝霞、三郷、三園）における原水温の経年変化を整理した。給水栓および浄水場原水の水温等の測定は、東京都水道局により毎月実施されている。図一六に示すように、浄水場原水の水温には顕著な経年変化の特徴が見られない一方で、都区部の給水栓温度（測定箇所数は30～60で年によって異なる）は年々上昇する傾向にあることがわかる。

給水温度の上昇は何が原因で発生しているのであろうか。地下水から表流水への依存の割合が高まってきたことも理由として考えられるが、1965年から現在までの量的な変化はそれほどでない。また、現在、ほとんどは河川水で、地下水の比率は0.2%とごくわずかである。

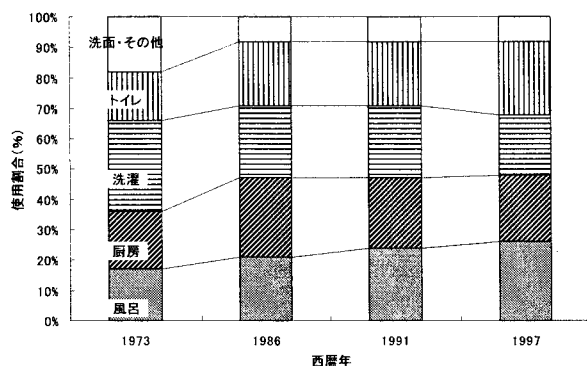
外的要因として、気象条件や地中温度の変化が挙げられる。図一六には東京管区気象台の測定した東京の年平均気温の経年的な変化も示した。上昇傾向が給水栓温度とほぼ一致しており、都市部における気温上昇との因果関係が推察される。浄水場原水に気温変化の影響が現れていないことからすると、気温上昇が地中温度の上昇につながって、地表近傍に埋設されている水道管中を流れる上水の温度上昇をもたらしたとするのが最も自然であると考えられる。

(2) 付加熱量増大の影響

水の使用に伴って付加される熱量を定量化するには、使用用途毎の熱付加の実態を明らかにする必要がある。日本エネルギー経済研究所³⁾の推計値によると、全国ベースの世帯あたりエネルギー使用量のうち、動力・照明や給湯に要するエネルギー消費量が年々増加傾向にある



図一 7 家庭部門におけるエネルギー消費量原単位
日本エネルギー経済研究所³⁾の推計値に基づき作成



図一 8 家庭での用途別水使用量の割合の変遷

(図一 7)。これらの用途のうち、雑排水として排出される熱は、入浴、洗面、炊事といった給湯・厨房由来のものと考えられる。給湯・厨房由来のエネルギー消費量の増加要因としては、浴槽の大型化、シャワー利用の増加(時間差無しで排水されるため、排水温度が高い)、食器洗浄機、温水洗浄便座の普及などのエネルギー多消費型生活様式への移行が考えられる。また、世帯あたりのエネルギー使用量の増大とともに、各家族化の進展により、世帯数自体も増加しており(図略)、総量としてのエネルギー消費量増大につながっている。

現状、使用水量の約 7 割を占める生活用水の使用用途別使用割合の経年的な変化については、既往資料^{4)~7)}に基づき図一 8 のように整理される。経年的には風呂用水とトイレ用水の使用割合が増加傾向、洗濯用水、厨房用水の割合が減少傾向にある。風呂用水の増大には、浴槽の大型化やシャワーの普及が反映しているものと思われる。トイレ用水は 1973 年と 1986 年の間で 5 ポイント増加しており、下水道の普及に伴う水洗化の影響であろうと推察される。厨房、洗濯用水の減少は全自動洗濯機や食器洗浄機の普及によるものではないと思われる。

一方、業務系建物における単位床面積あたりの使用熱量は、動力・照明や冷房用において増加傾向を示しているが、給湯・厨房におけるエネルギー消費量はほぼ横這いとなっている³⁾。ただし、業務系建物の床面積は年々

増大している²⁾ことから、業務系建物における水系への排熱量は総量としては増加してきていると考えられる。これらのことから、給水温度の上昇以外に排水温度も増大傾向にあると考えられる。

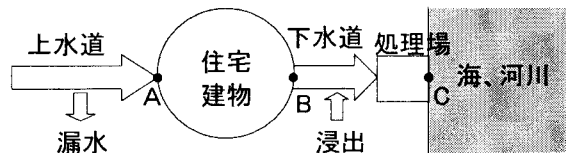
(3) 地中温度の影響

排水後、地中との熱の授受が発生するが、これには地中温度が関連する。地温は地表面の被覆状態や土壌の水分量に大きく依存する。したがって、地温が都心部が高いこと⁸⁾や 1920 年代から 50 年代にかけて経年的に上昇傾向にあること⁹⁾も理解できる。しかし、これらは 1970 年代以前のデータに基づく報告であり、現状については不明の点が多い。前述のように、給水温度には地温の変化が影響していると考えられるが、水道管よりも埋設深度の大きい下水道内の水温については、地中温度の長期的変化の影響は小さいものと考えられる。

4. 放流水温上昇要因の定量的分析

(1) 定量化手法の概要

定性的には、給水温度の上昇と家庭部門および業務部門における水使用量の変化・エネルギー使用量の増大が放流水温上昇の主たる要因になっていることが示された。ここでは、より定量的な分析として、前述した要因の影響を加味して水の使用と輸送に伴う温度変化をマクロにモデル化する手法を構築し、放流水温上昇を定量化する。



図一 9 都市の人工系水循環の模式図

図一 9 は、都市の人工系水循環を模式的に表したものである。放流水温の定量化にあたっては、上水道から各建物に至る途中の A 点を上流境界として、A 点から B 点(各建物から下水道への排水点)、および B 点から C 点(下水道処理場)にかけての温度変化を計算し、C 点における放流水温を算定する。ただし、ここでは、入手可能なデータの制約上、処理場ごとの放流水温ではなく、処理場全体の年平均放流水温を算出する。

水温の算出にあたっては、熱量と水量のバランスに基づく次式を基本にした。

$$Q_A(T_A - T_0) + H/c_p \rho = Q_B(T_B - T_0) \quad (2)$$

$$Q_C(T_C - T_0) + G/c_p \rho = Q_B(T_B - T_0) + Q_G(T_G - T_0) \quad (3)$$

ここで、 Q_A : 給水量、 Q_B : 排水量、 T_A : 給水温度、 T_B : 排水温度、 T_0 : 基準温度(例えば気温)、 H : 正味の負荷熱量、 Q_C : 処理場からの放流量、 T_C : 流下後の水温、

Q_G : 地下水の下水道への浸出量、 T_G : 下水道に浸出する地下水の温度、 G : 下水道内の流下過程において周囲地盤との間で授受される熱量(地盤への熱伝導を正とする)で、次式により表される。

$$G/c_p \rho = Q_C (T_C - T_G) = Q_C (T_W - T_G) \exp(-kt) \quad (4)$$

ここで、 T_G : 地温、 T_W : 流下前の水温、 t : 流下時間、 k : 熱伝導係数である。

負荷熱量 H の算出には二通りの方法が考えられる。ひとつは、入浴、洗濯などの用途毎に排水量と排水温度を設定して算出する方法(式(5))で、もう一つは、用途別の水温上昇に費やされたエネルギー量に基づいて算出する方法(式(6))である。

$$H = c_p \rho \sum_i Q_i (T_i - T_A) \quad (5), \quad H = \sum_i H_i \quad (6)$$

ここで、 i : 水の使用用途、 Q_i : 用途別の水使用量、 T_i : 用途別の排水温度、 H_i : 用途別のエネルギー使用量のうち、水温の上昇に費やされた分である。家庭用の排水については、既存の調査結果に基づいて、用途別の使用水量と排水温度を設定することが可能であることから、式(5)を用いた。一方、業務部門の建物排水について、業務種別の用途別水使用量のデータに乏しく、また、排水温度に関する実態報告もほとんど見られない反面、用途別のエネルギー使用量については、既往文献を参考にすることができることから、式(6)を適用した。

以上より、式(2),(5),(6)は次式のようにまとめられる。

$$(Q_{B,res} + Q_{B,bus} + Q_{B,ind}) T_B = \sum_i Q_{i,res} T_{i,res} + \sum_i \frac{H_{i,bus}}{c_p \rho} \quad (7) \\ + Q_{A,bus} T_A + Q_{A,ind} T_{ind}$$

ここで、下付添字の res , bus , ind はそれぞれ家庭部門、業務部門、工場を意味する。

区部の複雑な下水道システムにおいて式(4)中の平均流下時間を決定することは難しいが、ここでは、いくつかの処理区の処理水量データに基づき、処理水量が最低となる時間と汚水発生源における最低排水量の生起時刻(午前3時)の差分から推定し、区部の平均的な値として5時間を与えた。熱伝導係数には三好ら¹⁰⁾に従い、 -0.048 (1/時間)を用いた。 T_W には下水道内流下水の水温の区間代表値として、浸出水の50%が流出した時の水温を用いる。また、地温には年平均気温を与える。これにより求まる T_C は、さらに下水処理などの過程を経ることによって変化するが、量的には小さいことから、放流水温は流下後の水温に等しいと仮定した。

(2) 水使用・エネルギー使用等の条件設定

1) 家庭部門

家庭部門における用途別水使用量は、図-8にも示したように、既往の資料に基づき設定した。

排出温度算出にあたっては、次のように考えた。風呂

表-1 建物用途別給湯エネルギー消費量の原単位

建物用途	分類	原単位
事務所ビル	業務	13
百貨店	商業	23
その他の各種商品小売業	商業	23
その他の卸・小売業	商業	23
飲食店	商業	23
ホテル・旅館・待合・料亭等	宿泊	310
学校	教育	0
病院・医療施設等	医療	206
その他のサービス業	娯楽	64

単位: Mcal/m²/年

用水に関しては、浴槽への注水用とそれ以外の入浴用に分ける。入浴用水は、時間遅れ無しで排水されるため、給湯水温=排水温になると仮定し、排水温を40℃と設定した。風呂用水の排水温度は、ため湯後、浴槽から湯を抜くまでの放置時間によって異なってくることから、徳富ら¹¹⁾の調査データを参考に、平均的には注水後、12時間経過後にお湯を抜くものとした。その時の水温は、給水温度と平均気温の平均値とした。注水用水量と入浴用水量は、文献7を参考に、風呂用水のそれぞれ60%と40%とした。

台所用水の排水温度を定める明確な根拠は必ずしもない。ここでは、給湯と給水に分け、給湯温度は40℃、給水温度は平均気温に等しいとし、給湯と給水の割合は1:1に設定して求めた。

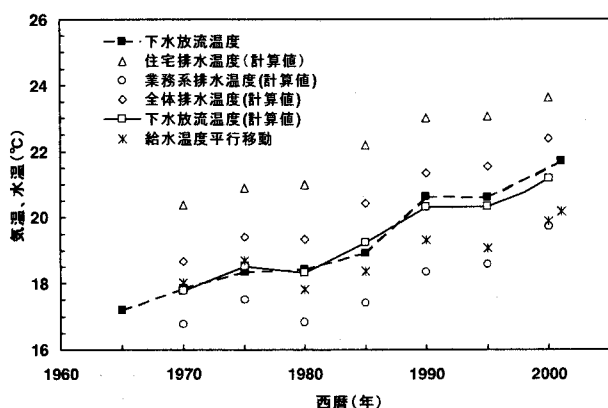
洗濯用水、トイレ用水、その他雑用水については、給水温度と同じ温度で排出されるものと仮定した。

2) 業務部門

業務部門の情報として必要なのは、業務部門全体の使用水量($Q_{A,bus}$)と建物種別の給湯・厨房エネルギー消費量($H_{i,bus}$)である。建物種別の給湯・厨房エネルギー量の算出には、東京都における建物別延べ床面積データ²⁾とエネルギー消費原単位データ¹²⁾を用いた。エネルギー消費原単位は機器効率の向上や熱需要の変化に応じて経年的に変化するものであるが、下水放流温度に対する感度は住宅排水ほど敏感ではなかったことから、対象期間を通じて一定値を与えた。建物別の給湯・厨房用エネルギー消費原単位を表-1に示す。延べ床面積データは東京都全体を対象としていることから、東京都環境局²⁾に従い、区部の床面積データへの換算を行った。給湯に投入されるエネルギーのうち、機器効率分は大気中に排熱として放出され、残りは全て下水へ排出されるとした。厨房における使用エネルギーについては100%が空気中への排熱になると仮定した。

3) その他

下水道への地下水浸出量の統計データは存在しないことから、上水の使用水量から下水放流量を差し引いた値が浸出量であるとした。このようにして算出される浸出



図一10 下水放流水温の計算結果

量は下水放流量の2～10%を占めていた。浸出地下水の水温は平均気温に等しいとする。

工業用水の排水温度は平均気温に等しいとした。工業用水が上水使用量全体に占める割合は2～5.5%と小さいことから、この部分の設定の影響は非常に小さい。

(3) 算定結果

以上に説明した方法と条件設定により算出される家庭部門と業務部門からの排水温度ならびに放流水温度を図一10に示す。最終的に公共用水域に排出される時の水温である下水放流水温は、実測された年平均放流水温とほぼ一致しており、上昇傾向も良好に再現されている。また、住宅部門、業務部門ともに排水温度が経年的に増大する傾向が表れている。この原因は、住宅部門の場合、風呂用水の増大によるものであり、業務部門の場合、建物延べ床面積の増大に伴い給湯・厨房への投入エネルギーの総量が増大したことによる。給水温度の経年的増加傾向も影響しているが、給水温度の経年変化データを平行移動しても、近年の放流水温の増大は説明しきれない。

都市活動や人間生活に伴って消費されるエネルギーが排熱として、どの程度の割合で大気と水系に放出されているかについてはほとんど明らかにされていない。そこで、図一10の試算結果と式(1)を用いて、水に負荷されて下水道に排出される熱量を算出する。なお、式(1)の放流量は2001年の使用水量(428万 $\text{m}^3/\text{日}$)に、内湾水温は給水温度の実測値に、放流水温は全体排水温度の計算値に置き換えた。その結果、年平均で水に負荷される熱量は約99(TJ/日)となり、前述した都区部における業務部門・家庭部門のエネルギー消費量(約880TJ/日)に対して年平均で約11%に相当する熱量が下水道に排出される勘定となる。

5. 結論

今回の分析により下記のポイントが明らかとなった。

- ・ 都区部の下水処理場からの放流水は、1965年以降現在まで、水量ばかりでなく水温も増大傾向にある。

- ・ 1965年以降現在までの月別放流水温の上昇量は、3月～4月と7月、12月で極大となる特徴が見られた。月によっては1965年と2001年の間で7度以上上昇していることがわかった。
- ・ 放流熱量は3月に最も大きく、8～9月に小さい。また、3月の放流熱量は、都区部における業務部門・家庭部門のエネルギー消費量の約18%に相当する。
- ・ 東京湾の水温測定記録を整理したところ、1～3月、5月、11月で経年的な表層水温の上昇が認められた。
- ・ 放流水温を算定するマクロモデルを構築し、水温の経年的な増大要因は、給水温度の上昇と、家庭部門・業務部門における排水温度の上昇により説明されることがわかった。
- ・ 家庭部門の排水温度上昇は、風呂用水量の増大に起因するものであると推定された。また、業務部門の排水温度上昇は、建物延べ床面積の増大に伴う給湯・厨房への投入エネルギー総量が増大したことによるものであると推定された。

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。東京湾の水温データは国立環境研究所より提供して頂いた。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事業団の戦略的創造研究推進事業の支援を受けた。

参考文献

- 1) 日本放送協会：「ヒートアイランド ～今東京で何が起きているか～」、NHK スペシャル、2002/6/29 放送。
- 2) 東京都環境局：都におけるエネルギー需給構造調査報告書、2001.2。
- 3) 日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター編：エネルギー・経済統計要覧、2000。
- 4) 東京都水道局実態調査結果、1973。(水道施設設計指針・解説、1977より再引用)
- 5) 東京都水道局：一般家庭水使用目的別実態調査、1991。
- 6) 東京都水道局：一般家庭水使用目的別実態調査、1997。
- 7) 厚生省監修：水道施設設計指針・解説、日本水道協会、1990。
- 8) 西沢利栄、山下孔二、鈴木守人：東京都心部における地温分布、地理学評論、52-6、283-292、1979。
- 9) 三浦昌生、尾島俊雄：東京における地中温度分布に関する実測調査研究、日本建築学会計画系論文報告集、第348号、11-18、1985。
- 10) 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、第18巻、118-123、1990。
- 11) 徳富直子他：住宅の排水熱利用に関する実態調査(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 分冊、p.541、1999。
- 12) 尾島俊雄研究室：建築の光熱水原単位、早稲田大学出版会、1995。

(2002. 9. 30受付)