

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560606

研究課題名(和文) 河川環境と生態系保全のための水文学的水温管理手法の研究

研究課題名(英文) Mitigating human impacts on stream temperature for conserving river environment and aquatic ecosystem

研究代表者

木内 豪 (KINOUCHI, Tsuyoshi)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00355835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：都市化の進展した多摩川流域を対象に現地計測、データ分析およびモデル解析に基づきながら河川水温の実態と形成要因の解明および水温に対する人為的影響を軽減する方法の検討を行った。多摩川中下流部では下水処理水の放流等が集中するため冬期に水温の急激な上昇が見られるとともに近年も上昇傾向にあることがわかった。一方、地下水と河川水との水・熱交換や夏期の下水処理水放流には水温上昇の抑制効果があることを示した。また、モデル解析により上流域における取水抑制や雨水浸透促進による河川流量の増加と地下水・河川水の交換量の増大による水温上昇の緩和効果を定量化し、いずれも一定の水温低減効果があることを示した。

研究成果の概要(英文)：We studied the stream temperature of the Tama River, which has been strongly affected by the progress of urbanization. Through our monitoring and historical data analysis, we found an abrupt increase in the middle- and downstream reaches where a huge wastewater effluent is discharged, and the increase is even intensified in recent years. We also indicated that the interaction between groundwater and streamflow, and the summertime wastewater discharge contribute to suppress the daily maximum stream temperatures. Finally, we simulated stream temperatures assuming the introduction of two measures, i.e. the increase of flow rate by reducing upstream withdrawals and the larger interaction between groundwater and stream water by enhancing the rainwater infiltration and recharge to groundwater, to demonstrate the effect in mitigating the human impact on stream temperatures.

研究分野：水文学

キーワード：河川水温 多摩川 水・熱輸送解析 下水処理水 水面と河床の水・熱交換 都市化

1. 研究開始当初の背景

水温は水圏の生態系と水質形成にとって最も基本的かつ重要な環境要素である。河川水温に関しては、近年、大気と水面の熱輸送などの物理的メカニズム解明が進展してきたが、今後世界的に都市の拡大や人口増加、温暖化の進行が予想される中で、多様な人間活動が水温にどのような影響を及ぼすのかについての総合的な研究は行われていない。実際、東京を流れる多摩川では水温変化等が魚類の生息環境に及ぼす影響が指摘されているが、水温の実態や形成要因は未解明であるとともに良好な水環境を取り戻す方策についての検討も行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、人口の増大や流域の都市化が進展し、人間活動の影響による河川水温の上昇が顕著であると考えられる多摩川を対象に温度環境の実態や温度場の形成要因の解明、さらには適正な水温環境を取り戻すための管理手法・対策について検討を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現地計測および過去の資料解析

多摩川における水温の時空間分布の実態を明らかにするため、2011年4月から約2年間にわたり本川4か所で水温モニタリングを行うとともに下水処理施設6か所でも同様の水温モニタリングあるいは行政当局による計測データの収集を行った(図1)。また、2012年8月と2013年2月には縦断方向の水温変化をより詳細に把握するための集中観測を行い、多地点での流量、水温測定その他、河道内での気温、湿度、風速、放射量および河床温度・熱流量の計測を行った。

また、過去20年間を対象に多摩川本川における流量・水温と流域の気象条件、放流される下水処理水量・水温等の情報を収集して水温の時空間変動を明らかにするとともに河道区間における水・熱収支解析を行い、都市排熱等が水温に及ぼす影響を定量化した。

(2) 水温解析

河道の一次元流れと大気-河川水-地下水の水・熱交換ならびに下水処理水の放流や支川の合流、本川からの取水を考慮した水温解析モデルを構築し、多摩川本川に適用した。解析対象期間としては夏期・冬期の集中観測を行った2期間に加えて水温モニタリング期間の中で晴天日が連続する13期間を選定した。これらの期間で実測の水温変動を良好に再現するように本モデルのパラメータを決定するとともに再現性を評価した。その上で本モデルを多摩川中下流域における通年の水温解析に適用して現況の水温形成に及ぼす自然要因・人為要因の影響を定量化するとともに、水温の上昇を抑制するための方策について検討を行った。

(3) 流域水文解析

(2)の検討においては地下水・伏流水と河川水との相互作用が河川水温の上昇を抑制している可能性が示唆された。そこで、MODFLOWをベースに多摩川流域の浅層地下水流動を解析するモデルを構築して地下水と河川水の交流実態を推定するとともに、流域における雨水浸透促進による地下水涵養が地下水と河川水の交流に及ぼす影響を定量化した。モデルに必要な3次元の地質構造情報は流域内多数地点の既存ボーリングデータ等に基づき作成した。

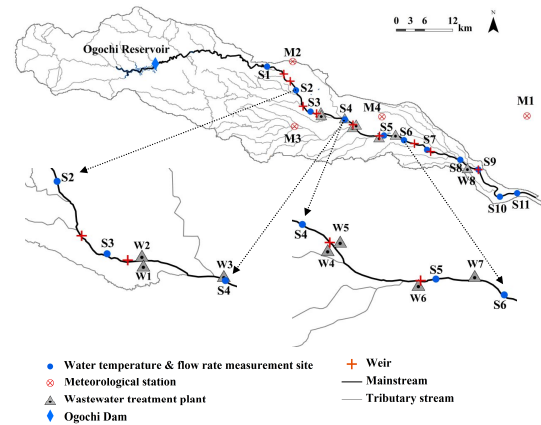


図1 研究対象流域と計測地点

4. 研究成果

(1) 現地計測および過去の資料解析

多摩川本川各地点の水温の時空間的变化を図2に示す(地点情報は図1参照)。夏期では、いずれの時期も比較的滑らかな縦断方向変化を示すが、経年的変化は明瞭ではない。一方、冬期では近年S3からS4にかけて急激に上昇し、S4以降は高温状態が維持されているとともに、近年S4以降で水温が上昇していることが明らかとなった。この冬期におけるS3からS4にかけての急変には下水処理水の放流等の影響が大きいことを示した。

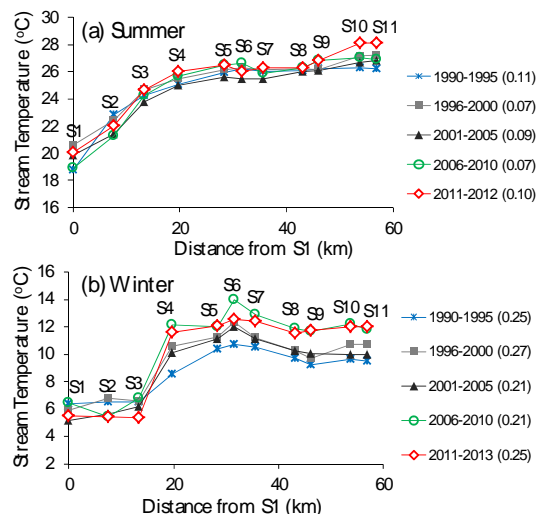


図2 各期間の平均水温(凡例括弧内は変動係数)

モニタリングデータの分析結果からも同等的特徴が見られたが、加えて夏期には下水処理水の放流によって日中の河川水温上昇が抑制されていることを明らかにした。また、下水処理水の放流が無い下流区間（S6～S8）でも水温上昇が限定的なことから、河床を通じた地下水と河川水の水・熱交換等の自然の機能が働いていることが示唆された。

(2)水温解析

構築したモデルはいずれの期間における水温変動も良好に再現し、13 期間平均の RMSE は S6 と S8 でそれぞれ 0.40 と 0.54 であった。本モデルを用いて下水処理水の放流が無い場合および地下水と河川水の水・熱交換が無い場合について水温への影響を推定した（図 3）。処理水の放流があることで夏期は最高温度がわずかではあるが低減していることや冬期は放流水によって極めて大きな水温上昇をもたらされていることがわかる。また、地下水との水・熱交換は夏期・冬期ともに最高水温の抑制につながっていると推定された。

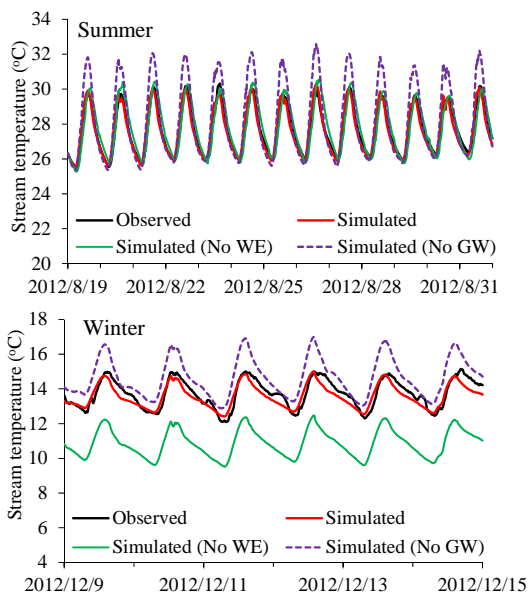


図 3 夏期(上)と冬期(下)の S6 における水温変動 (No WE: 下水処理水の放流が無い場合, No GW: 地下水と河川水の水・熱交換が無い場合, Obs: 実測値, Sim: 実測再現計算値)

河川水温に対する人為的影響を軽減するための方策として、上流域における取水の抑制や雨水浸透の促進による河川流量の増加と地下水・河川水の水・熱交換量の増大を想定し、これらがどの程度寄与するのかについてモデルを用いて検討した結果を図 4、図 5 に示す。

図 4 は S4 の河川流量を様々に変えて（S4 地点における水温は変えない）、下流 S6 及び S8 の日最高水温への影響を解析した結果である。夏期及び冬期において現況約 $5.4\text{m}^3/\text{s}$ 及び $8.0\text{m}^3/\text{s}$ の S4 流量を $\pm 50\%$ まで増減させた場合、S6 では比較的水温への影響が大きい

が、さらに下流の S8 では気象等、他の要因にかき消されて影響はあまり現れないことが示唆された。

図 5 には区間 S4～S6 で地下水と河川水との交換量（現況夏期 $2.0\text{E}-6\text{m}^3/\text{s}$ 、冬期 $2.9\text{E}-6\text{m}^3/\text{s}$ の涵養）を増減させた場合の水温への影響を示す。交換量を増大させることにより日最高水温、日平均水温ともに低減し、日最高水温への影響がより大きいことがわかる。

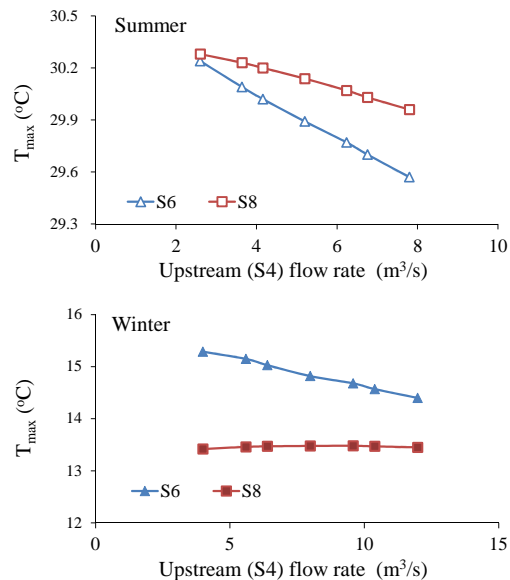


図 4 河川流量の増大による日最高水温低減効果

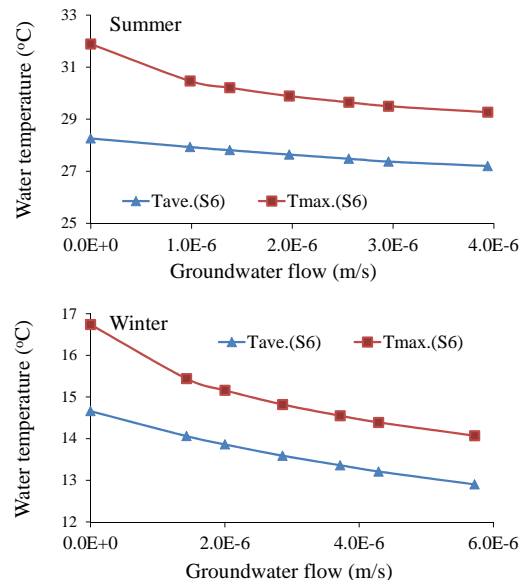


図 5 河川から地下水への涵養量増大による水温低減効果（上段：夏期，下段：冬期， T_{ave} ：日平均水温， T_{max} ：日最高水温）

(3)流域水文解析

解析で得られた地下水位の絶対値・変動の特徴とともに下流域では実測と近い値を示した。多摩川本川における地下水から河川への流出量の計算結果は河道区間を対象とした水収支式から推定した値より小さかったが流出・涵養の傾向は定性的に一致していた。

図6には解析対象期間内の2008年12月における地下水から本川への流出量の縦断方向変化の計算結果を示す。一定の流出あるいは涵養の傾向は見られず、場所によって地下水と河川水との交換状況が異なっている様子が見られた。図7には都市域で地下水の浸透を促進した場合の区間S3～S4とS4～S6における交換量への影響を解析した結果を示す。ここで、現況再現計算では都市域における降雨浸透に伴う地下水の涵養量を降水量の30%と設定しており、仮想計算ではこの割合を40%と50%に増やした。降雨浸透による地下水の涵養量増加によって両区間ともに交換（この場合は地下水から河川への流出）が促進されることが示された。前述の水温の解析では地下水と河川水の交換量の増大が水温低下をもたらすことが示唆されており、都市域等における雨水の浸透促進によって地下水の涵養を図ることで水温上昇の抑制につながることを示唆される。

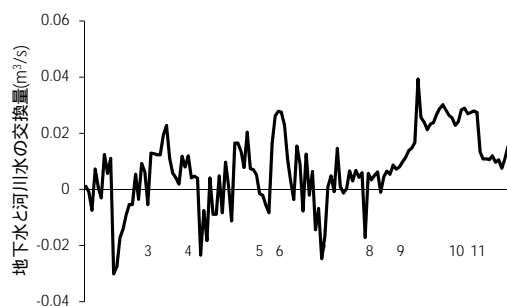


図6 多摩川本川における地下水と河川水の交換量（正值は地下水から河川への流出を，負値は河川から地下水への涵養を表す）

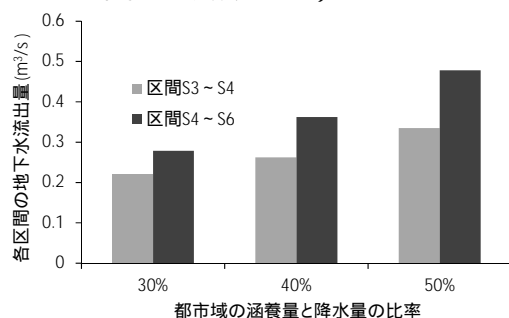


図7 地下水の涵養量増大による地下水流出量への影響（いずれも2008年末の解析結果）

5. 主な発表論文等

（研究代表者，研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3件）

Xin, Z., Kinouchi, T., Analysis of stream temperature and heat budget in an urban river under strong anthropogenic influences, Journal of Hydrology, 査読有, 489, 16-25, 2013.
DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.02.048

Xin, Z., Kinouchi, T. and Nakaya, T., Factors affecting summertime stream temperatures in the Tama river, Jour. of

Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Eng.), 査読有, Vol. 69, No.4, 1_241-1_246, 2013.

DOI:10.2208/jscejhe.69.1_241

Xin, Z. and Kinouchi, T., Water and energy budget analysis of an urban river under strong anthropogenic influence, Jour. of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Eng.), 査読有, Vol. 68, No. 4, 1_283-1_288, 2012.
DOI:10.2208/jscejhe.68.1_283

〔学会発表〕（計 6件）

Xin, Z., Kinouchi, T., Analysis of stream temperature variation in the Tama River and the role of flow, Int. Symposium on Environmental Flow and Water Resources Management, Oct. 2014, Bangkok (Thailand).

Xin, Z., Kinouchi, T. and Nakaya, T., Modeling of stream temperature considering wastewater effluents and surface-groundwater interaction, The 46th annual Fall Meeting of American Geophysical Union, Dec. 2013, San Francisco (U.S.).

Xin, Z., Kinouchi, T. and Nakaya, T., Stream temperature control by surface-subsurface water interaction in the Tama River, Japan, Proceedings of 2013 IAHR Congress, Sep. 2013, Chengdu (China).

Xin, Z., Kinouchi, T. and Nakaya, T., Influence of wastewater effluents and surface subsurface water exchange on stream temperature in the Tama River, 水文水資源学会 2013 年研究発表会要旨集, 2013.9, 神戸大学（兵庫県神戸市）.

Xin, Z. and Kinouchi, T., Urbanization impact on stream temperature variations and energy budget within the Tama River watershed, Japan, 10th Int. Conference on Hydrosience & Engineering, Nov. 2012, Orlando (U.S.).

Xin, Z. and Kinouchi, T., Human impact on stream temperature and heat budget within Tama River watershed, 水文水資源学会 2012 年研究発表会要旨集, 広島, 2012.9, 広島市西区民文化センター（広島県広島市）.

〔その他〕

NHKタどきネットワークにて成果紹介

6. 研究組織

(1)研究代表者

木内 豪 （KINOUCHI, Tsuyoshi）

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：00355835