

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

豊平川における水温の将来変化

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○星野 剛
山田 嵩
布川 雅典

豊平川における河川水温の特徴を観測データから分析し、気温と水温との関係性から将来の水温を予測した。気温と水温の相関は高いものの、気温に対する水温の値は季節によって異なる関係性（ヒステリシス）を有することが明らかとなった。また、その影響の大きさは地点によっても異なる。気温から水温を推定する回帰式を作成し、将来気候の気温データから水温を予測した結果、融雪水が流量に支配的となる1-4月の期間では将来気候における水温の上昇は小さく、流量の小さい夏季は水温の上昇が顕著となることがわかった。

キーワード：河川水温、豊平川、水温観測、気候変動

1. はじめに

河川水の温度は河川の水質、水性生物、農業等にとっての重要な環境指標である。気候変動による気温の上昇は河川水温の上昇を招くことが予想される。図-1に示す気温の観測値と観測された気象データから算出した平衡水温（大気と水塊とが熱的平衡状態にあるときの理論水温）の変化トレンドから、全国的に気温とともに水温も既に上昇していることがわかる¹⁾。さらなる気温上昇が進む将来においてはより水温が上昇することが予想される。

河川水温は気温や日射量といった気象条件だけでなく、上流や支川の流量・水温、河道形状や流量、湧水の量や温度など地形的、水理的な特徴の影響も受けて決まる。積雪地域においてはそれらに加えて融雪のタイミングと量を適切に反映する必要がある。このように水温の力学的・熱力学的なシミュレーションには降雨流出や河川流および大気との熱交換や短波・長波放射による加熱や冷却のモデル化が必要となる。精緻なシミュレーションのためには、河畔林による日射の遮断や長波放射、湧水の量や水温などの観測や推定が容易ではない気象・水文的な物理量の面的な情報が必要となる。このため、力学（熱力学）的なモデルによる精緻な予測には困難さが伴う。

上述のような河川水温の特徴から将来気候における水温予測のためには流量や大気との熱交換を反映した力学（熱力学）モデルが必要となる。本研究ではそのようなモデルによる予測を実施する前段階として、観測データに基づく水温変動の特徴を明らかにし、気温と水温の関係性から将来の水温の予測を試みた。

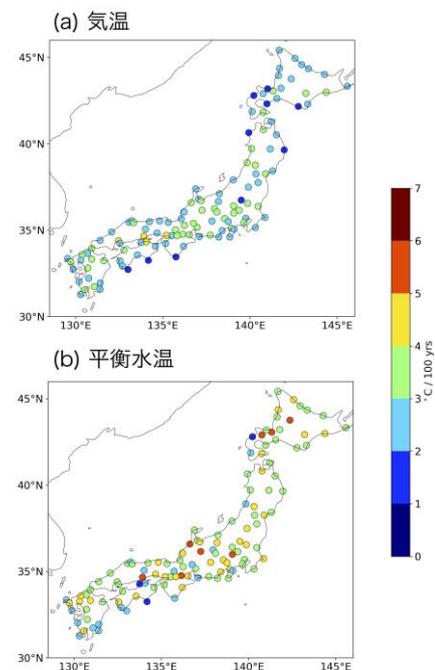


図-1 気温と平衡水温の変化トレンド¹⁾



図-2 水温観測地点（赤丸は水温観測地点、青丸は豊平川本川の流量観測地点を示す。）

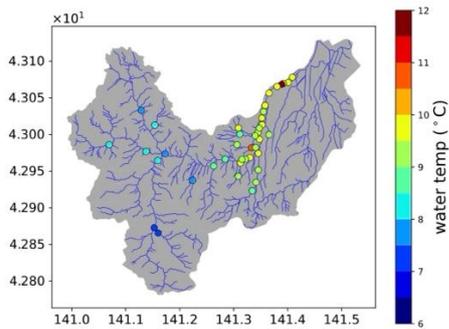


図-3 年平均水温

2. 観測データ

図-2に示す豊平川流域の40地点（豊平川本川19地点、支川21地点）に水温計を設置し、10分もしくは20分間隔で水温を計測した。定山溪ダム、豊平峡ダムの上流から下流は石狩川の合流点から約11 km地点までが観測範囲であり、扇状地河川の特徴であり水温の変化に影響を与えると考えられる湧水による水温変化を把握できるように配置した。2022年11月中旬から2024年12月現在まで観測を継続している。

観測対象期間である2023年8月は札幌で複数の猛暑日が観測された記録的な猛暑であったことから、本観測データは気候変動を見据えた高気温時の河川水温の変動特性を把握する際の重要な知見となると考えられる。

3. 水温の特徴

2023年の年平均水温および月平均水温を図-3, 4に示す。年平均水温および3-11月の月平均水温は下流ほど高い傾向にあることがわかる。これは河川水の流下とともに大気との熱交換および日射による加熱が進行するためと予想される。12-2月においては上流と下流の水温の違いは小さく、0°C程度を維持したまま流下することがわかる。これは気温が氷点下もしくは0°Cに近いことから大気との熱交換による昇温がほとんど生じないこと、および河川流に占める融雪水の割合が上下流ともに大きいことが理由であると考えられる。

図-5に札幌気象官署における日平均気温と本流上流、石山、雁来地点における日平均水温との関係を示す。同図よりいずれの地点においても日平均気温と日平均水温は相関が高いことがわかる。また、いずれの地点においても3-5月は同程度の気温である9-11月と比べて気温に対して水温が低い傾向にあることがわかり、図-5石山地点に矢印で示すようなループを描く。このヒステリシス

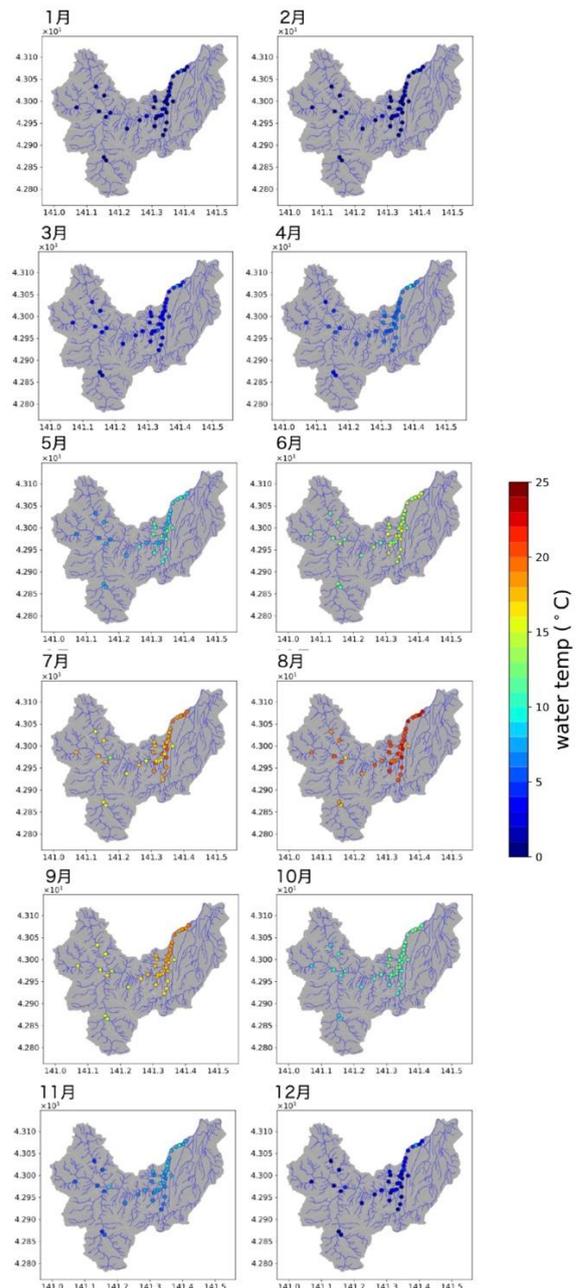


図-4 月平均水温

の要因は融雪にあると考えられ、水温の低い(0°Cに近い)融雪水が河川水に占める割合が大きいため3-5月は相対的に冷たい水温となると予想される。特に中流部である石山地点でその傾向が強く現れている。これにはダムからの放流の影響、融雪水が河川に入るまでのタイムラグ(浸透による遅れ)があることから春と秋の水温差がより顕著になるものと予想される。また、下流では大気との熱交換が進むため春と秋の水温差は減少するものと考えられる。このような特徴から、中流部では春と秋の水温差が顕著になると思われる。今後は物理的なモデルを用いてこの要因の詳細を検討する。

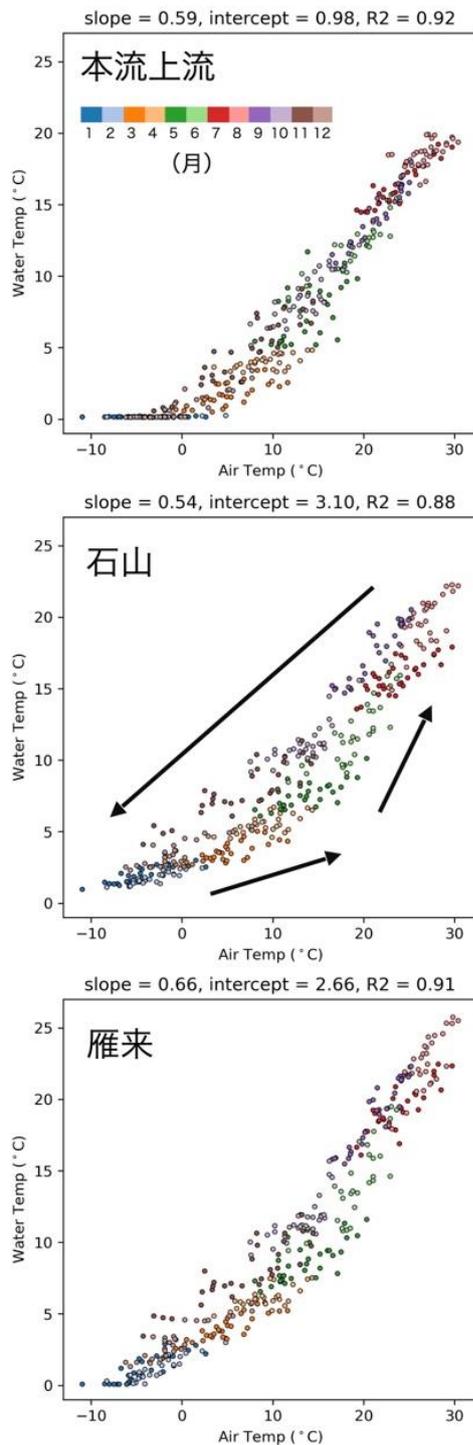


図-5 気温-水温関係

4. 回帰式による水温の将来予測

前章で気温と水温の関係にはヒステリシスが存在するものの相関が高いことを確認した。本章では両者の関係に基づく水温の将来予測を実施した。水温予測の手順を図-6に示す。いずれの地点においても気温と水温の相関は高いものの、季節によってその関係性（傾き）は異なる。このことから日平均気温から日平均水温を推定する回帰式（1次関数）を月ごとに作成した。次に、気候

手順

1. 月ごとの気温-水温回帰式の作成

水温観測地点ごとの月別の日平均気温-日平均水温の回帰式を作成

2. d4PDFの気温のバイアス補正

札幌近傍におけるd4PDFの過去実験の気温と札幌気象官署の気温を比較し、月別の平均値が一致するようにバイアス補正を実施（過去、+2K、+4Kすべてに補正を適用）

3. 過去・将来水温の推定

バイアス補正されたd4PDFの気温データを回帰式に入力し、各地点の水温を推定

図-6 気温-水温関係からの水温の将来予測フロー

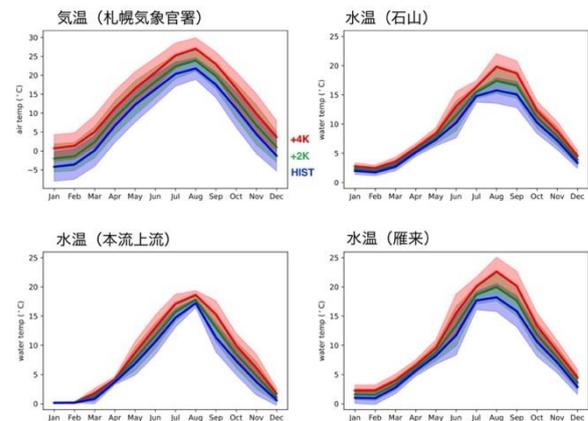


図-7 気温と水温の将来予測

予測データセット（d4PDF²⁾）から各気候条件における札幌気象官署から最も近い点における日平均気温を抽出した。気候データの気温のバイアスを補正するために1951-2010年の期間において各月のd4PDF過去実験と観測の平均気温が一致するような補正量を算出し、各気候条件の日平均気温を一律に補正した。最後に各気候条件の日平均気温を回帰式に入力し、各地点の将来水温を予測した。

気温および水温の将来予測結果を図-7に示す。月平均気温の年々変動の振れ幅（10-90パーセンタイル幅）から、過去気候における高温年は2℃上昇気候条件における平均値を上回ることがわかる。これは現在の気候であっても猛暑年のデータに着目することで将来変化を想定できることを意味する結果であり、過去のデータを十分に検討することの重要性を示す結果である。推定された将来の水温はいずれの地点でも1-4月の期間では気候条件による差はほとんどないことがわかる。これはこの期間は融雪が支配的であり、気温の影響を受けづらいためと考えられる。一方で、7-9月は気温による影響が顕著となることがわかる。この要因として、この期間は河川流量が少ないことから大気との熱交換が進みやすく気温の影響を強く受けるためと考えられる。また、上流に比べて下流ほど気候の違いによる水温差が大きくなっており、流下に要する時間が長いほど大気との熱交換の影響

を受けるためと考えられる。簡易的な予測手法ではあるものの、地域・季節ごとに水温の変化量が異なることを示した。

5. まとめ

本研究では豊平川における河川水温の特徴を観測データから分析し、気温と水温との関係性から将来の水温を予測した。気温と水温の相関は高いものの、気温に対する水温の値は季節によって異なる関係性（ヒステリシス）を有することが明らかとなった。また、その影響の大きさは地点によっても異なることが明らかとなった。気温から水温を推定する回帰式を作成し、d4PDFの気温データから水温を予測した結果、融雪水が流量に支配的となる1-4月の期間では将来気候における水温の上昇は小さく、流量の小さい夏季は水温の上昇が顕著となることを示した。また、上流よりも下流において水温がより上昇することがわかった。

気温と水温の関係性から河川水の起源が水温に大きく影響することがわかった。本研究では気温と水温との関

係性から将来の水温を予測したが、この方法は流量の卓越する時期や河川水の起源が変わらないことを仮定している。しかしながら、将来の気候では積雪の減少や融雪の早期化が生じることや降雨パターンの変化が予測されており、現在の気温と水温の関係性を将来気候にそのまま適用できるかは疑問が残る。このため、現在、河川水の起源や河川流量の季節変化を明らかにするとともに、熱力学的に河川水温をシミュレーション可能なモデルを構築中であり、そのモデルを用いた水温の将来予測を実施する予定である。

参考文献

- 1) 星野剛、越田裕斗、宮本仁志：日本における平衡水温の長期変化傾向とその要因分析、土木学会論文集 B1 (水工学)、投稿中。
- 2) Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M., Shiogama, H., Hibino, K., Mori, N., Arakawa, O., Imada, Y., Yoshida, K., Aoyagi, T., Kawase, H., Mori, M., Okada, Y., Shimura, T., Nagatomo, T., Ikeda, M., Endo, H., Nosaka, M., Arai, M., Takahashi, C., Tanaka, K., Takemi, T., Tachikawa, Y., Temur, K., Kamae, Y., Watanabe, M., Sasaki, H., Kitoh, A., Takayabu, I., Nakakita, E., Kimoto, M.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, pp.1383-1398, 2017.