

河川水温の時空間偏差と変動

SPATIAL AND TEMPORAL DEVIATION AND FLUCTUATION OF RIVER WATER TEMPERATURE

枡本 拓¹・島兒伸次¹・森山泰明¹・空閑徹也²・稲葉潤也³
竹内洋介¹・黒崎靖介⁴・陰山建太郎⁴・佐藤隆洋⁴・尾関哲史⁵

Taku MASUMOTO, Shinji SHIMAGO, Yasuaki MORIYAMA, Junya INABA, Tetsuya KUGA,
Yosuke TAKEUCHI, Yasusuke KUROSAKI, Kentaro KAGEYAMA, Takahiro SATO,
Tetsushi OZEKI

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2丁目2-2)

²東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2丁目2-2)

³第一建設工業株式会社 (〒950-8582 新潟市中央区八千代1丁目4-34)

⁴正会員 日本工営株式会社 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1丁目14-6)

⁵日本工営株式会社 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1丁目14-6)

Water temperature is one of the most fundamental factors in evaluating river environment. Many studies have been made about detailed distribution of other physical factors such as bed material, velocity, etc. In actual river flow, water temperature also may have its own distribution in many scales and may fluctuate in association with solar radiation, flow configurations and other factors. However, water temperature had been represented in only one or few points in many studies.

As a result of simultaneous water temperature survey in hundreds of points, it became clear that there is spatial deviation and time fluctuation of water temperature even in the flow path which seems to be uniform. This paper reports the state of spatial and temporal bias and fluctuation of water temperature in actual river flow. It is also observed that the water body which was warmed in the specific section flows down the river.

Key Words : water temperature, actual river, fluctuation, bias, spatial scales

1. 目的

水温は、地形や土砂粒径を規定する河床勾配と並んで河川における魚類の生息環境を支配する2大要因の一つとされ¹⁾、特に魚類に与える影響は甚大であるとされる²⁾ことから、生物の生息環境や分布を河川の水温と関連づけた研究は多い。たとえば望月ら(2012)は最高水温に着目し、河川水辺の国勢調査の結果からヤマメの生息域と水温分布の傾向が一致することを示している³⁾。

魚類の生息可能水温や選好温度については古くよりさまざまな調査や実験が行われ、これらを取りまとめた日本水産資源保護協会(1980, 1983)^{4), 5)}や柏木(1990)⁶⁾の資料は、魚類の生息環境評価に広く用いられている。一方で、実河川の水温に関する調査研究の多くでは、水温はいわゆる代表点での水温を扱うにとどまり、さまざまなスケールでの偏差や変動を考慮したものとはなっていない。たとえば魚類調査において広く用いられている「河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル」では、水温

の測定について「調査対象環境区分ごとに代表的な場所で測定等を行い、記録する」「表層の水温を0.1℃単位で測定し、記録する」とされているのみである⁷⁾。実際の河川においては、河床材料や水深などの他の環境因子と同様に水温も空間的な分布を持つ可能性があり、気温や日射、流量の変動や流れにより時間的に変動する。しかしながら実際の河川において水温がどの程度の時空間スケールをもって分布あるいは変動しているのかを調査した例は、内藤ら(2012)など限られたものしかない⁸⁾。ある生物の移動可能範囲以下のスケールで水温の空間偏差が存在するのであれば、生息環境の評価はこの偏差を考慮したものである必要がある。またある地点の水温が短時間に大きく変動するのであれば、水温測定に際して水温計の時定数を考慮したり、あるいは生物の生息閾値となりうる最高値や最低値を測定、評価することも必要であろう。これらのことから、実河川における水温の時空間的な分布や偏差、変動を把握することを目的とし、観測を行った。



図-1 調査位置図

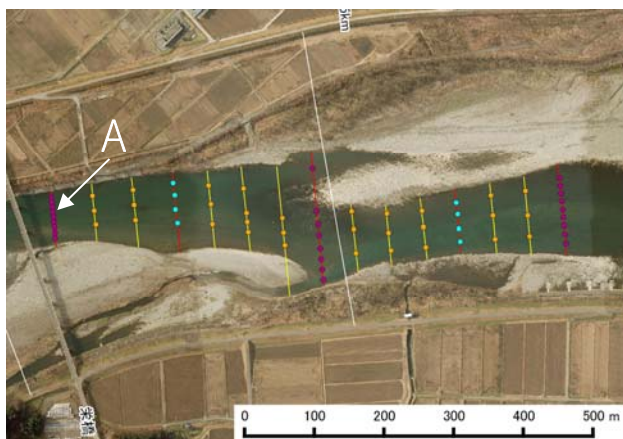


図-2 面的水温調査地点配置例（栄橋地区）

2. 観測方法

(1) 観測箇所

観測は図-1に示す信濃川中流域の宮中取水ダム（75km）～魚野川合流点（41.5km）間の約33.5kmの区間において実施した。同区間は、上流端に位置する宮中取水ダムから2010年から2015年までの試験放流として定められた定量放流が行われているため、流量の時間的変動がない上に、区間内には大きな支川流入や大規模な取排水がない⁹⁾ため、降雨等による出水時以外は流量に伴う流量変化もきわめて少ないという特徴を持つ。

調査では、河川内のリーチスケール（瀬、淵などの流路単位が1セット以上繰り返される区間で、流路幅の $10^1 \sim 10^2$ 倍に相当する区間）¹⁰⁾での平面、水深方向の空間的な水温分布を把握するための面的水温調査と、より大きなスケールでの河川縦断方向の水温分布を把握するための縦断水温調査の2つの調査を同時に実施した。

a) 面的水温調査

66～65km付近（十日町橋地区）、63～62.5km付近（妻有大橋地区）、58～57km付近（栄橋地区）および47.5～46km付近（川井大橋地区）にそれぞれ縦断方向の延長0.5～1.5km程度の観測地区を設定し、観測地区毎に設定した9～18の横断測線にそれぞれ5～30m間隔で調査地点を設置し、各調査地点で1～3の深度に水温計を設置して連続測定を行った。4地区の合計で調査測線数は49測線、



図-3 観測機器設置状況例（川井大橋地区）

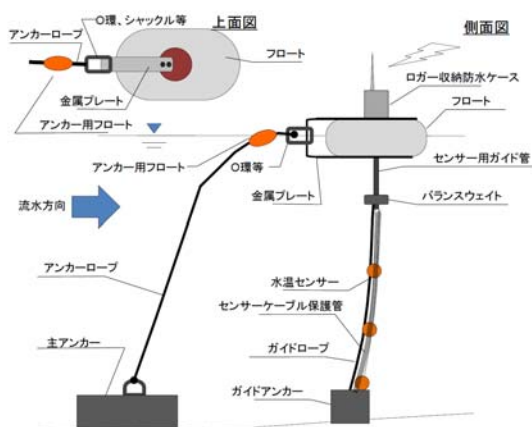


図-4 観測機器設置概略図（3水深の場合）

調査地点は228地点、水温計数は474個である。調査地点の設定例として、栄橋地区の調査地点を図-2に、観測機器の設置状況例（川井大橋地区）を図-3に示す。

b) 縦断水温調査

74.5km～41.5kmの33kmの区間について1km毎の34調査地点、および代表的な淵24地点に調査地点を設定し、各調査地点において1～3水深に水温計を設置して連続測定を行った。宮中取水ダムの放流量が $60\text{m}^3/\text{s}$ である際の調査地点の水深は0.7～10.4m、流速は0.3～2.2m/sである。

各調査の調査地点には重複があるため、面的水温調査、縦断水温調査を合わせた調査全体での調査地点数は280地点、設置した水温計数は588個である。

(2) 観測方法

a) 水温

各観測地点にフロートとアンカーにより水温計を設置して観測を行った。水温は10分毎に計測し、データは原則として無線で1日1回回収した。水温計設置の概念図を図-4、観測機器の諸元を表-1に示す。水温計の校正は1点校正で行い、28℃の恒温槽を用いて基準ガラス製温度計との差を校正値とした。

b) その他の観測項目

水温に関係する代表的な因子として、表-2に示す項目について現地測定あるいはデータ収集を行った。

表-1 観測機器諸元

区分	機器	仕様
タイプA (面的水温調査に使用)	データロガー/無線装置: 日本電業工作(株)製 Muセンサー 水温センサー: (株)チノー製 MODEL R900 シリーズ	無線到達距離: 約 350m センサ種別: PT100 計測範囲: 15℃～35℃ 精度: 0.1℃以下 分解能: 0.1℃以下
タイプB (面的水温調査及び縦断水温調査に使用)	データロガー/無線装置: T&D 社製 おんどとり (RTR502 または TR505-TC) 温度センサー: フッ素樹脂被覆センサ (TR-5106) または T 熱電対 (TR-5530)	無線到達距離: 約 150m センサ種別: サーミスタ/熱電対 計測範囲: -60℃～155℃ 精度: 0.3℃以下
タイプC (縦断水温調査に使用)	水温計/データロガー オンセット社製 ティドビット v2	計測範囲: -20℃～30℃ 精度: ±0.2℃ 分解能: 0.02℃

表-2 データ収集項目及び取得方法

項目	データ取得方法
気温, 降水量	十日町地域気象観測所のデータを収集整理
日射量	現地測定
水位	岩沢水位観測所 (60.5km), 十日町 (姿) 水位観測所 (80.7km) のデータを整理
流量	宮中取水ダムの毎時放流量を整理

(3) 調査期間

調査は2014年7月26日～9月5日に実施した。調査期間中は、宮中取水ダムより試験放流量として定められた60.0m³/s以上の放流が行われている。調査期間中には400m³/sを超える出水が複数回発生したほか、一部観測機器が不具合も生じたため、全期間の観測データが得られているわけではない。

3. 観測結果

(1) 気象等の条件

調査期間のうち、気温が高く天候の安定していた7月26日～8月4日の10日間の気象、流量等の周辺条件を図-5に示す。この間の宮中取水ダムの放流量は日中は62～63m³/sで安定しており、夕刻に流域内の降雨に伴うと思われる一時的な流量増加が見られたが、その際も宮中取水ダムの放流量は66m³/s以下であった。調査区間内の2箇所の水位観測所における水位はおおむね数cm以内の変動に納まっており、宮中取水ダムの放流量変化や、調査区間内での降雨に起因すると思われる一時的な水位変動も20cm程度と小さく、大きな流量変化はなかったと判断される。日中の日射量はほぼ3.0MJ/m²/時を超え、気温も30℃を超える日が連続し、流量、気象条件ともに安定した暑い日が続いた。

(2) 面的水温調査結果

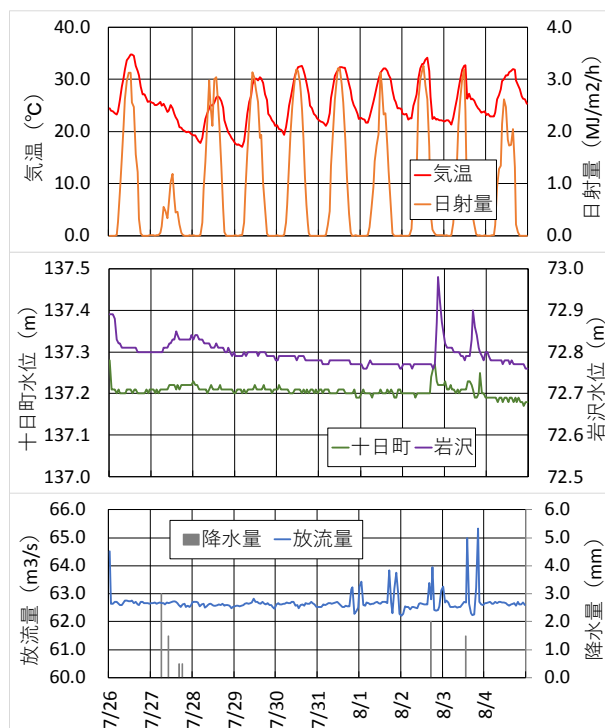


図-5 調査期間の気象等条件

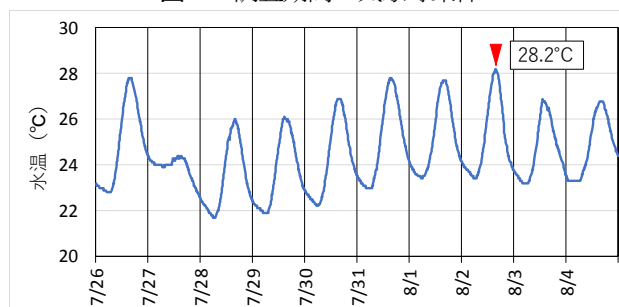


図-6 代表地点の水温経時変化

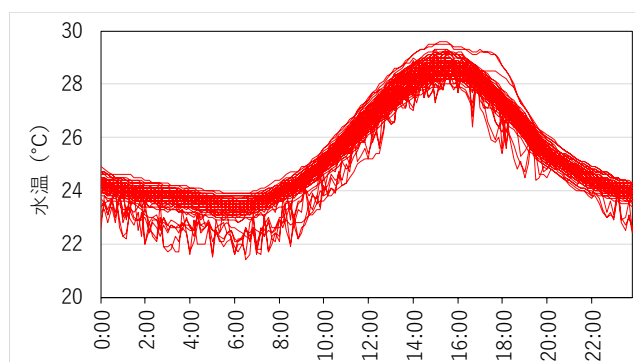


図-7 栄橋地区の水温概況 (8月2日 全観測データ)

a) 水温の概況

代表地点として、58～57km付近の栄橋地区のうち水深の最も深い最上流端中央部 (図-2 A) の中層の水温変化を図-6に示す。同地点で最高水温を記録したのは、8月2日の15:20～15:50であり、水温は28.2℃であった。同日に栄橋地区で観測された全水温の時系列変化を図-7に示す。水温が最低となったのは6時頃、最高となったのは15時頃であり、一日を通じての時間変動は全水温計で

表-3 8月2日の各地区水温測定結果概要（単位：℃）

	十日町橋	妻有大橋	栄橋	川井大橋
最高水温生起時刻	13:30	14:40 ～15:10	15:10 ～15:30	14:50 ～15:00
同時刻の最高水温	32.3	28.1	29.6	29.4
同時刻の最低水温	26.2	25.8	27.8	26.7
同時刻の水温地点差最大値	6.1	2.3	1.8	2.7
同一時刻の地点間の水温差	最大 平均 最小	2.5 1.4 0.9	3.3 2.0 0.9	3.5 2.0 1.0

ほぼ同じ傾向を示したが、水温の絶対値には地点によって大きな差があり、水温の低い箇所では短時間に大きく水温が変動した。

同日の4つの地区で観測された全水温計の測定結果概要を表-3に示す。十日町橋地区での最高水温は32.3℃、最高水温の生起時刻は15:30であり、同時刻での十日町橋地区内での水温の地点間差は6.1℃に達した。他の3地区においても同一時刻の水温差は最大で2.5～3.5℃であり、ワンド等の地形による影響を受ける地点は含まれているものの、1km程度のスケールで河川内に大きな水温差があることがわかる。

b) 水温の平面分布

同日の栄橋地区での13時、15時、17時における下層水温の平面分布を図-8に示す。右岸側の支川合流点およびその下流で水温の低い箇所が認められるほか、流路の中心付近においても周囲と水温の異なる箇所が認められ、水温の地点間差は最大1.6～1.9℃である。

c) 水温鉛直分布

複数の水深に設置した水温計のうち、上層に設置したものと下層に設置したもののそれぞれの水温の平均値、上端値、下端値の時系列変化を示したものが図-9である。上端値、下端値では時刻によっては上層水温が下層水温より高い値を示すが、平均値では両者はほぼ同一であり、その差は0.1℃以下である。このことは、たとえば流れのほとんどない場所や河床からの湧水の影響を受ける地点等を例外として、鉛直方向では混合が十分に行われ、水深による水温差はほとんどないことを示している。

c) 水温の短時間変動

栄橋地区の調査地点の中から特徴的な2地点を取り出し、上中下各層の水温の時系列変化を示したものが図-10である。水温が穏やかに経時変化する地点がある一方で、短時間に大きく上下する地点が存在することがわかる。同一地点での10分間の水温変化は最大で1.9℃に達した。このことは、河川内に水温の大きく異なる複数の流れが存在し、流れの揺らぎによって同一地点に水温の変化をもたらしていることを示唆している。

(2) 縦断水温調査結果

流程方向の水温の縦断変化として、8月2日に測定された

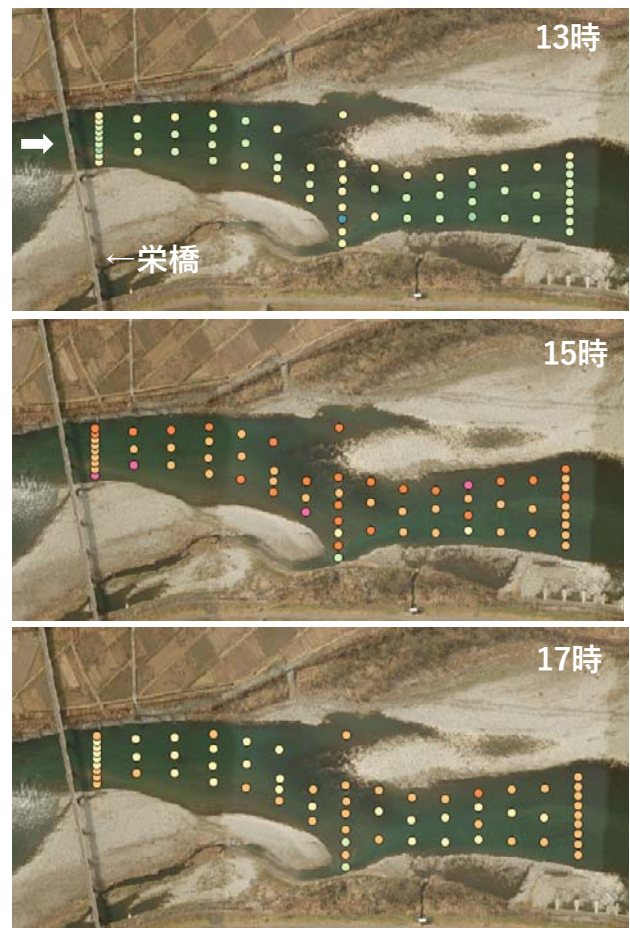


図-8 水温の平面分布（栄橋地区8月2日）

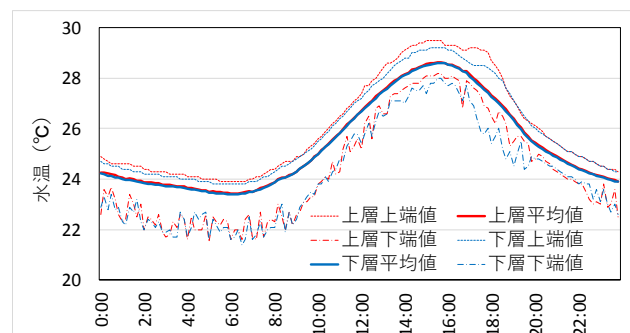


図-9 鉛直位置による水温差異（栄橋地区8月2日）

85の水温計の全データを時系列でプロットしたものを図-11に示す。朝8時頃に調査区間全体で24℃前後となった

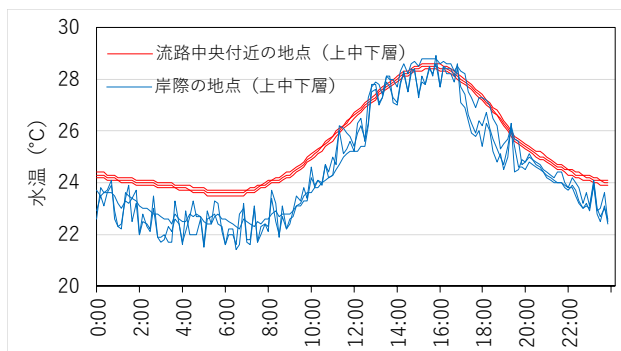


図-10 水温の短時間変動（8月2日栄橋地区代表地点）

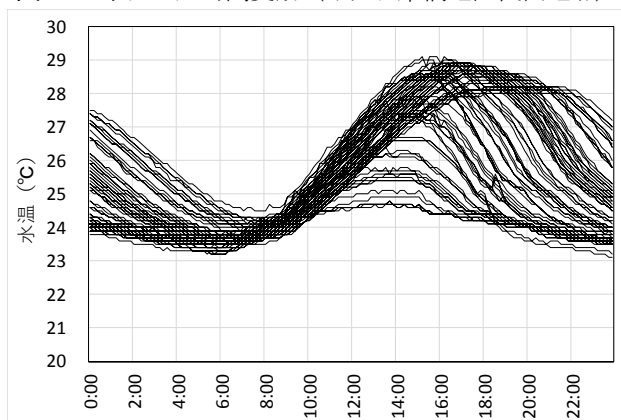


図-11 流程による水温の変化（8月2日）

水温は日射の増加とともに上昇するが、その上昇程度は地点によって大きく異なる。最高水温の生起時刻も場所によって大きく異なり、同日の最高水温は54.5km地点の上層に設置した水温計で15:10～16:10の間に記録された29.1°Cであった。同地点の上層の日最低水温は5時台～6時台の23.6°Cであり、水温の日較差は5.5°Cである。一方最上流端の74.5km地点の上層では、日最高水温は12時台～13時台の24.7°C、日最低水温は21時台～22時台の23.7°Cであり、日較差はわずか1.0°Cであった。

図-12に示す地点ごとの最高水温とその生起時刻では、下流に向かって従って生起時刻が遅くなるとともに日最高水温が高くなる傾向が確認できるが、最高水温は54～50km付近をピークに下流に向かって再び低下する。

図-13には時刻別水温縦断分布を示した。朝の時間帯に区間全体でほぼ一定となった水温は、気温、日射とともに上昇するが、その上昇量は区間によって異なり、昼までの間は68km～52km付近において水温上昇が著しい。12時以降は水温上昇は56kmより下流で著しくなり、54kmより下流では、15時以降も水温の上昇が続く。上流側では水温は徐々に低下するが、下流側ではその時刻が遅くなり、同日の午前3時の水温分布では前日の水温上昇の影響が残存していることが確認される。図-14には気温、日射量と、最上流端の74.5km、栄橋付近の58.5kmおよび最下流端の42.5kmの上層での水温の変化を示した。栄橋およびその下流では、水温のピークは気温や日射量のピークより大きく遅れて生じていることが分かる。

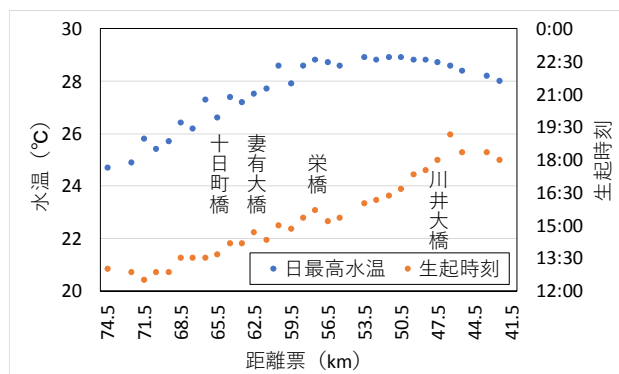


図-12 流程による水温の変化（8月2日）

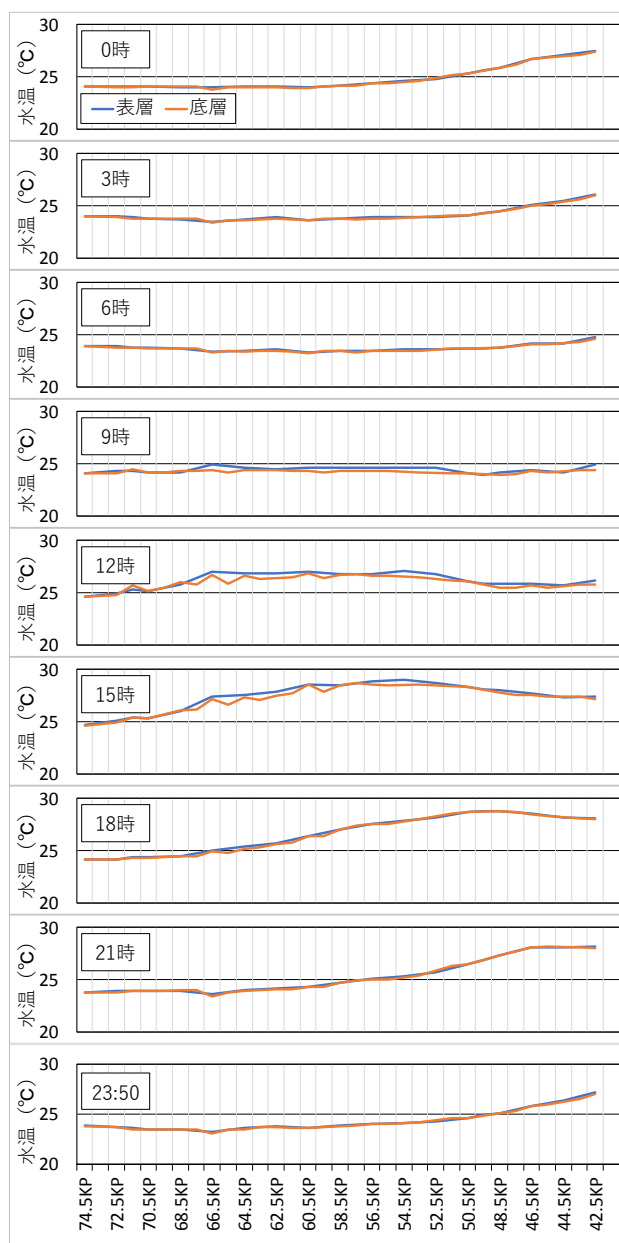


図-13 時刻別水温縦断分布（8月2日）

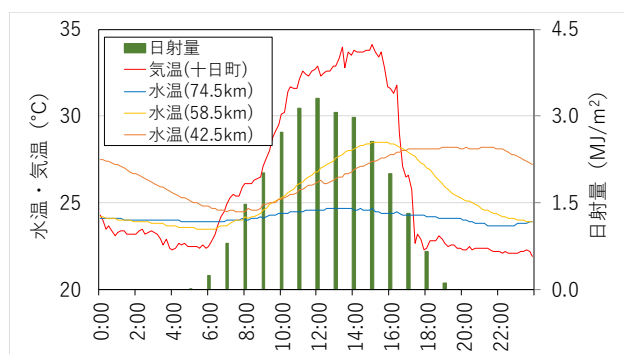


図-14 水温と気温、日射量の変化（8月2日）

4. 結論

・実河川の観測において、同一リーチスケール内でも0.9～6.1℃の水温差が観測された。これらの水温差には、支川の流入の影響により水温が上昇低下したり、ワンド状の地形や浅場など水温の上昇しやすい河川形態による影響があるが、主流路内においても水温の差がみられることから、生物の生息環境としての評価を行う際には、代表点だけではなく移動範囲全体をとらえた評価が必要であろう。

・河川水温を評価するための水温計測に際しては、上記の空間偏差に加え、場によっては10分以内の時間スケールでの揺らぎが生じている可能性を考慮することが必要である。特に支川等の合流後の混合領域や底層での水温測定に際しては、水温の変動を考慮した平均水温測定や時間変動の把握が必要であろう。

・河道の形態的特性に起因すると思われる水温上昇区間の下流では、局所的に温められた水塊が流下することにより、日射量や気温のピークより大きく遅れて水温のピークが生じるという特徴的な水温変動を示すことが明らかとなった。

5. 課題と今後の展望

・本調査により明らかとなった水温の空間偏差や揺らぎを生じる要因としては、支川流入、ワンドや浅場などの河川形態による影響の他に、側方からの地下水流入や覆没に伴う地下水との熱収支が考えられるが、本調査では原因を特定するに至らなかった。流水中で地下水流入や覆没を直接観測することはきわめて困難であり、熱収支解析による現象の推定が望まれる。

・短時間での水温については、設定した測定間隔である10分間で水温が上下に振れる現象が観測されているため、実際の水温変動の時間スケールを把握することはできなかった。観測機器によってはより短時間でのデータを取得しており、水温計の反応速度を考慮しつつさらに詳細な解析を行うことにより、短時間の水温変動について新たな知見が得られる可能性がある。

・近年サーモセンサーとドローンによる地表等の表面温度観測技術が進みつつある。本稿執筆時では、本観測と同等の空間解像度と絶対温度精度を同時に確保することはまだ困難であるが、技術の進歩とともに容易な観測技術の開発が進み、河川の水温分布の実態把握が一層進むことが期待される。

上記のとおり調査結果の評価にはまだ課題は残るが、本調査の基礎データが河川水温分布把握の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 有田正光, 池田裕一: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, 1998
- 2) 中村太士, 百海琢司: 河畔林の河川水温への影響に関する熱収支的考察, 日本林業学会誌, 71(10), 1989
- 3) 望月貴文, 天野邦彦: 河川水辺の国勢調査を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析, 河川技術論文集, No.18, 2012
- 4) (社) 日本水産資源保護協会: 水産生物適水温図, 1980
- 5) (社) 日本水産資源保護協会: 環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理, 1983
- 6) 柏木正章: 水温が魚類に及ぼす影響, 三重大学環境科学研究紀要, No.14, 1990
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課: 河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル 河川版 魚類調査編, 2016
- 8) 内藤淳也, 角哲也, 竹門康弘: 冷水性淡水魚類生態に適した河川水温環境に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No.55B, 2012
- 9) 国土交通省河川局: 信濃川水系河川整備基本方針, 2008
- 10) 永山滋也, 原田守啓, 萱場祐一: 河川地形と生息場の分類～河川管理への活用に向けて～, 応用生態工学, 18(1), 2015

(2018. 4. 3受付)