

ドローン熱画像撮影による砂州における伏流水湧出場の検出

Detection of Hyporheic Upwelling Flows Around Gravel Bars Using Drone and Thermography

小林草平・角 哲也・竹門康弘

Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

Synopsis

To detect hyporheic outflows and understand topographic characteristics of the outflows around gravel bars, thermographic images were taken by drone at downstream reaches of Saigo Dam in Mimi River and a reach in the Kizu River. Spatial heterogeneity in water surface temperature was evident between main-flow and secondary flow (fed by hyporheic outflow), and middle and periphery of each flow. Hyporheic outflow (upwelling flow) can be determined according to the distribution (planar shape) of distinct temperature zones. Many of the hyporheic outflow showed a tapered shape from edge to middle of flow, while stagnant water affected by sunlight and air temperature showed a band along edge. Temperature in the secondary flow fed only by hyporheic outflow changed longitudinally by inlet of hyporheic outflows with different temperatures.

キーワード: 河川, 砂州, 伏流水, 水温, 熱画像, ドローン

Keywords: rivers, gravel bars, hyporheic flows, water temperature, thermography, drone.

1. はじめに

河川では土砂の堆積と浸食によってつくられる「砂州」と呼ばれる河床地形がみられる。砂州が発達すると、河川区間内の流れ（流速、水深）や河床（底質、粒径）に空間的異質性が生じる。水生生物の各種は、特定の流れや河床条件の組み合わせに対して適応している。そのため、流れや河床の空間的異質性（＝多様性）が確保されることが生物多様性の維持に不可欠である。河川生態系における砂州の機能の1つは、生物多様性の基盤である流れや河床の空間的基質性を創出・維持することである。

砂州のもう一つの重要な機能として、水質と水温の改変作用が挙げられる。河川水の一部は砂州内に浸透して伏流し、再び砂州の表面に湧出する[Fig. 1]。こうした表層と砂州の間で水の交換が行われる間に水質や水温が変化する。例えば、水が砂州を通過することで濁り成分が濾過され、濁度が0に近い水が砂州から湧出する（小林ら, 2016; 2017）。水中の有機物や栄養塩は砂州において濾過されたり微生物によ

る作用を受けることで濃度に変化する（Alexander et al., 2006）。また、地表より安定的な砂州内の温度の影響により、伏流-湧出水は表流水よりも日周変動が小さい場合が多い（Burkholder et al., 2008; Ock et al., 2015）。冬の低温時や夏の高温時、また出水後の高濁度時には湧出水からなる水体（側流やワンド）が、水温変化や濁水に対する耐性が低い一部の水生生物の避難場として重要になると考えられる。また、砂州における水質や水温の改変作用は、湧出水の水量によっては、本流の水質や水温にも影響力を持つと考えられる。河川水が流れ下る間に濁水や栄養塩・有機物成分が少なくなることは自浄作用と言われるが、砂州における濾過はまさにそれに関わる。

砂州に浸透し湧出する水量は、砂州ごとに、また1砂州においても時間によって異なるだろう。大きい砂州ほど潜在的に通過可能な水量は大きい。しかし、大きくても動水勾配が小さい砂州や、細かい成分により内部が詰まって水が通りにくい砂州では水量は小さいだろう。土砂が堆積してきたばかりの砂州は空隙が多く通過する水量は多いが、できてから時

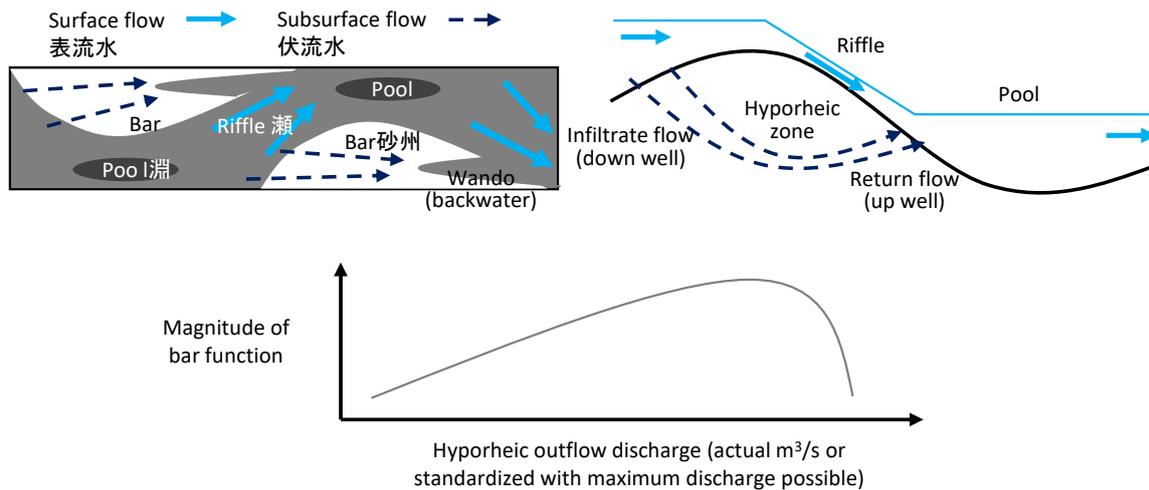


Fig. 1 A schema of bar structure and hyporheic outflow, and a hypothesis of hyporheic discharge and bar function

間が経った砂州では土砂が押し固められ通過水量は少ないと考えられる (Alexander et al., 2006; Ock et al., 2015). 砂州を通過する水量が大きいくほど、水質・水温の改変作用における砂州の機能は大きいことが仮説として考えられる [Fig. 1]. ただし、通過する流速が大きすぎる場合、砂州内での作用を受ける前に湧出してしまいうため、通過水量はたとえ大きくても水質・水温改変の機能は小さいことになる (例えば、大きな礫からなるスカスカ状態の砂州など).

著者らは野外において砂州における水の浸透—湧出しやすさ、またはその潜在的な水量を「砂州の湧水ポテンシャル」と定義し、どういった特性の砂州で湧水ポテンシャルが高いのかを明らかにする研究に取り組んでいる (小林ら, 2017). 砂州周辺から湧出する水量は、砂州に浸透して砂州内を通過する水量の一部であり、湧水ポテンシャルを評価する1指標である。湧出した水がそれだけで一方向に流れていけば、流速を測定することで水量を評価することができる。しかし、淀んでいる場所に湧出したり、表流水の流れのあるところに湧出していると、視覚的に湧出場を検知することすら難しい (表流水が濁っている場合、透明な水の存在によって湧出場が検知できることがある)。表流水と伏流水によって水温に違いが生じていけば、熱画像カメラ等によって湧出場の検出が可能である (小林ら, 2017). 本研究では、ドローンに搭載した熱画像カメラによって砂州周辺の水域を撮影し、湧出場検出の有効性について検討し、また、砂州周辺のどのような微地形において湧出場が多いのかを探った。

2. 調査地と方法

2.1 調査地

ダム下流で河床低下していたが土砂還元によって一部の区間で砂州が再発達した宮崎県・耳川の西郷ダム下流区間と、砂河川である京都府・木津川の15k付近で、合計3つの砂州を対象にドローンによる撮影を行った [Fig. 2]. 各砂州においては、本流とは砂州の反対側に伏流水が湧出し、湧出水は流速をもって流れて最終的にワンドとなり本流と合流するのが確認された [Fig. 2].

宮崎県東臼杵郡美郷町にある西郷ダムは1929年に竣工の重力式コンクリート (堤高: 20 m) で発電専用のダムである (九州電力株式会社). ダムの集水域面積は約650 km²で総貯水容量は24,452,000 m³である。上流に位置する山須原ダムをはじめとする複数のダムで発電による取水と放流が行われている。西郷ダムにおける取水と下流発電所への導水により、ダム下流は数キロにわたって減水区間で、普段は環境維持流量の0.2–0.4 m³/sの水が流れている。洪水時に上流から流入する土砂を貯水池に貯めずに下流へ排出できるように、洪水吐ゲートの一部を切り下げる工事が2016年に完成した。2017年9月の出水時にゲートが開かれ通砂が行われた結果、下流に土砂が堆積し砂州が形成された。本研究ではそのときに形成された2つの砂州を対象に調査を行った [Fig. 2]. なお、西郷ダム下流区間ではおおよそ河道幅40–50mで河床勾配は1/300–1/250である。調査は環境維持流量のみ流れていた2018年3月24日と25日に行った。

木津川15.0–15.2k付近では、単調になりやすい砂河川の流れを多様化させる目的と、河畔での繁茂が問題となっている竹林の利用を目的に、伝統的河川工法である竹蛇籠と聖牛を用いた河川環境の回復事業が行われている。調査は竹蛇籠や聖牛が設置されて

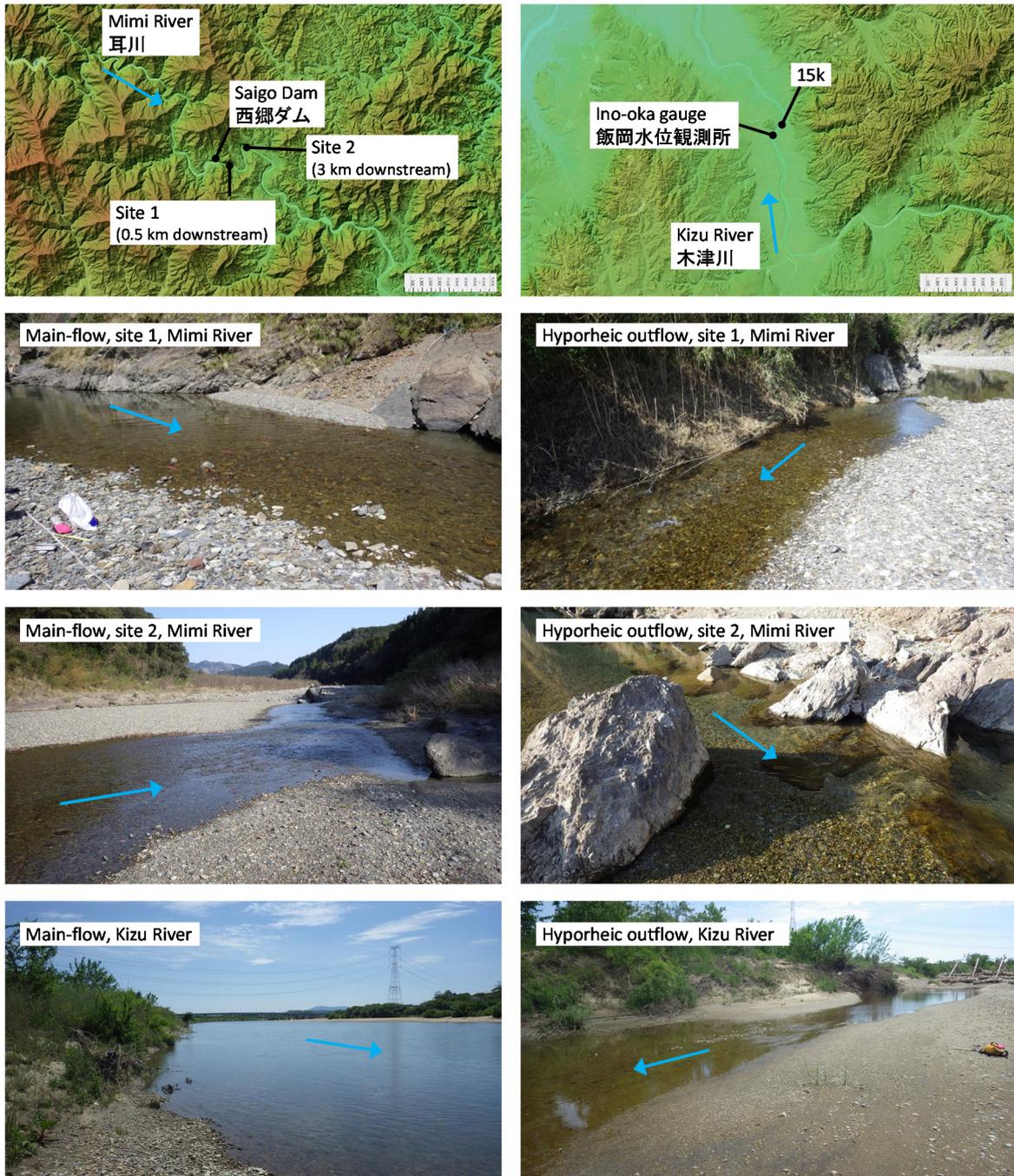


Fig. 2 Maps of study sites and photos of main-flow and secondary flow (hyporheic outflow) each site

いる砂州を対象に行った。なお、この砂州のあたりではおおそ河道幅（低水路）は90–140 m，河床勾配は1/500–1/400，付近にある飯岡水位観測所における平水時流量は20–40 m³/sである。調査は平水時であった2018年3月28日に行った。

2.2 ドローン撮影と画像分析

熱画像カメラ搭載のドローン（スカイロボット社製）を使用した。カメラはFlir Vue Pro R（FLIR® Systems社）で、物体の表面から放出される赤外線に

基づいた温度データ（分解能0.1°C）が640×512ピクセルの画像として得られる。河川においては河床表面や水面の温度を計測する（河床内や水中の温度は分からない）。カメラは4枚回転翼ドローンのDJI Phantom3 Advanced（DJI Science and Technology社）に搭載されている。このドローンにもともと搭載されていた視覚画像用のカメラは取り外されているため、操縦は地上からの目視とスカイロボット社独自のシステムで手元のモニターにリアルタイムで送信される熱画像により行われる。ドローンを地上から

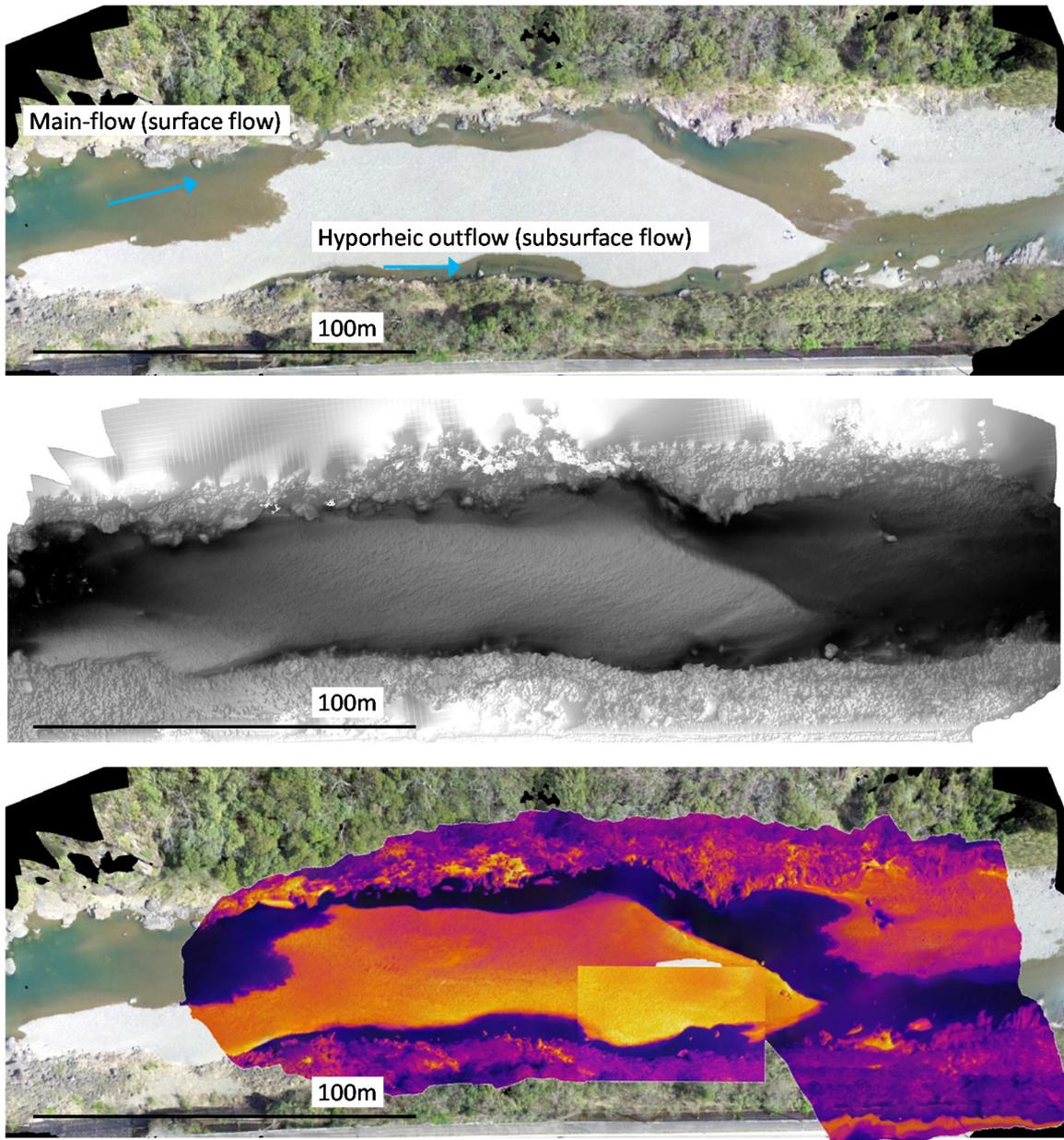


Fig. 3 Orthogonalized aerial photo (upper), topographic image (middle), and thermographic image (lower) of Site-1, Mimi River

の高度50–100 mで飛行させ、カメラを真下に向け隣合う写真が一部重複するように砂州全体をカバーするように熱画像を撮影した。また、これとは別に、砂州のオルソ化画像の取得と地形データを得るため、DJI Phantom3 Professional (DJI Science and Technology社)による撮影も行った。各地点におけるドローンの合計飛行時間は1時間程度であった。

取得した熱画像はFlir Tools (FLIR® Systems社)を用いて温度の空間分布を確認した。また、Photoscan (Agisoft社)を用いて、画像の連結を試みた。Photoscanは、空撮画像を用いたステレオ写真測量の解析に本来用いられ、視覚画像からはオルソ化画像

とDEM (digital elevation model) データが得られる。Photoscanにより作成した画像はArcGIS 10.4.1 (ESRI JAPAN社)で読み込み、熱画像、空撮写真、地形データを重ねた。

3. 結果

3.1 砂州全体像

調査した各砂州の全体像 (オルソ化画像)、写真からステレオスコープ解析により求められた地形、それらに位置合わせをした熱画像を[Fig. 3, 4, 5]に示す。砂州の陸域における長さは90–250 m、幅は30–100 m

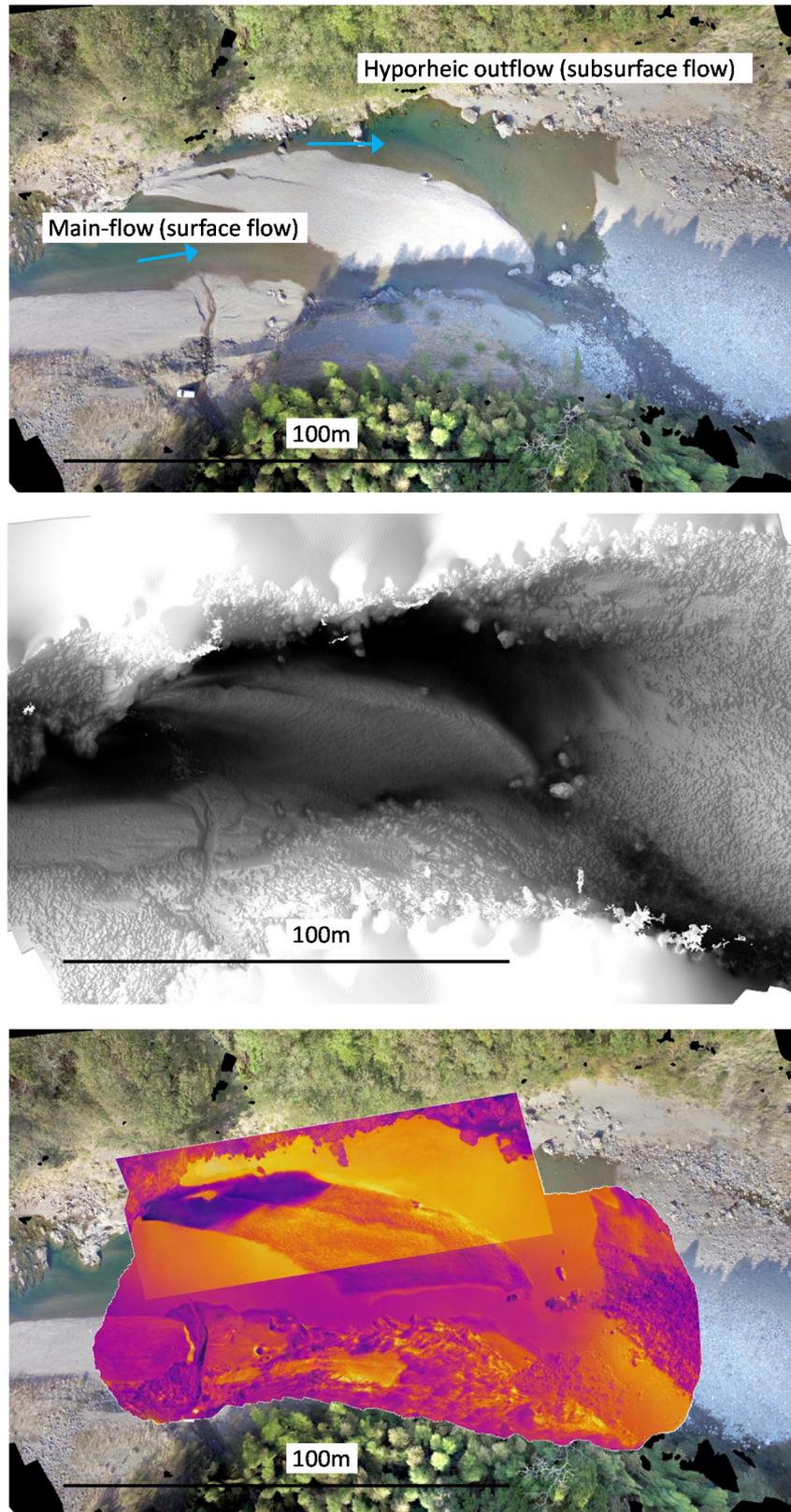


Fig. 4 Orthogonalized aerial photo (upper), topographic image (middle), and thermographic image (lower) of Site-2, Mimi River

であった。西郷ダム下流の2つの砂州は起伏がはっきりとしていたが、木津川の砂州は比較的平坦であっ

た。西郷ダム下流の2つの砂州では、主流(main-flow)とともに伏流水湧出流(hyporheic outflow)の流路が

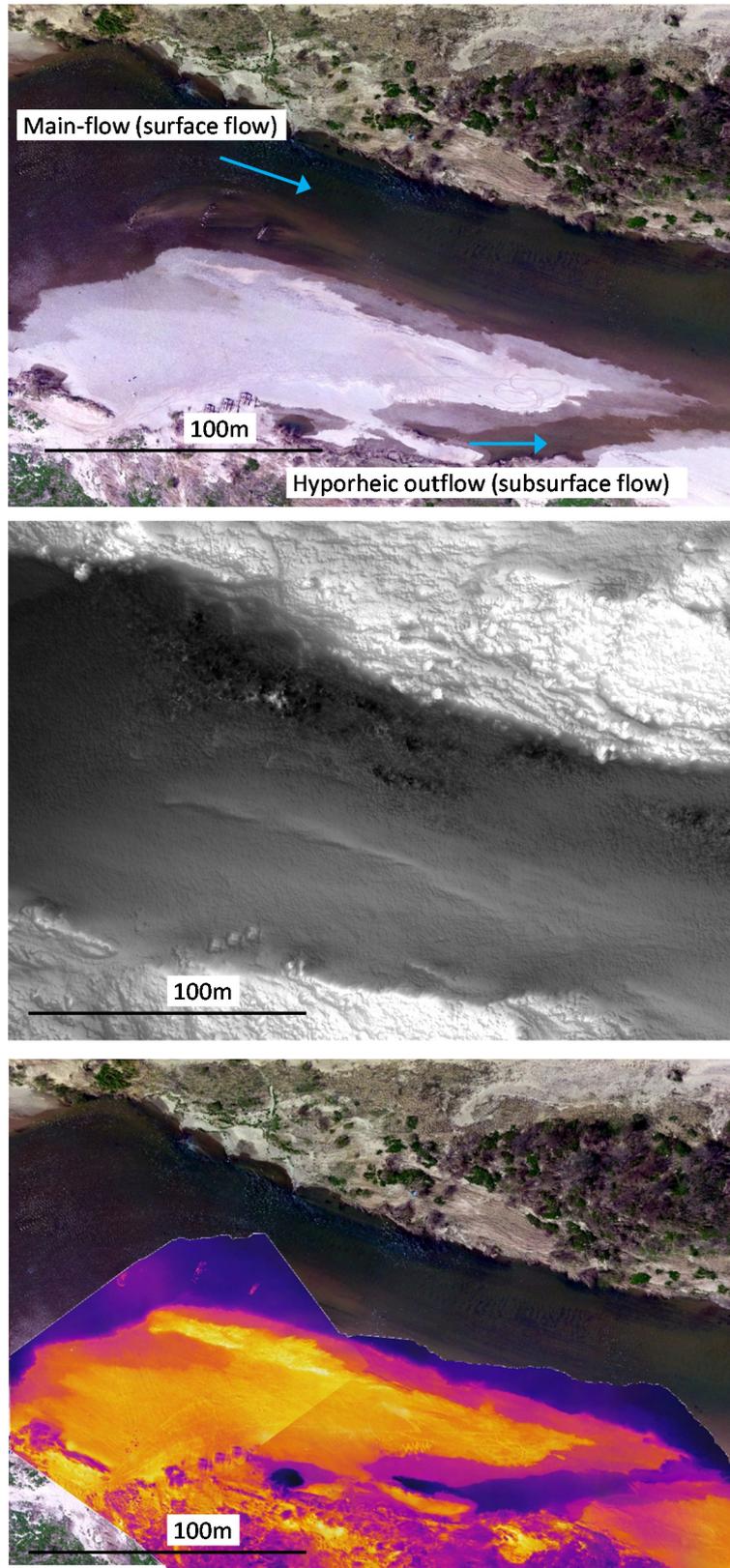


Fig. 5 Orthogonalized aerial photo (upper), topographic image (middle), and thermographic image (lower) of 15k, Kizu River

地形的にはっきりしていた。同横断面では主流よりも湧出流の流路の方が比高が低く、主流から湧出流

へ動水勾配が生じやすいのがよくわかる。

熱画像は100-200枚の画像をPhotoscanによって繋

ぎ合わせたもので、一部手動によって繋ぎ合わせた部分もある[Fig. 3, 4, 5]. 色のギャップのある部分が手動でつなげた部分であるが、画像によって計測される温度に差があることを示している。この温度差は、撮影時間の微妙な違いのほかに、撮影の角度、熱計測の安定性、横方向からの日射が影響していた可能性がある。熱画像の結果の解釈にはこうした影響を踏まえる必要がある。

それでもなお、いくつかのパターンが共通してみられた。例えば各砂州において、陸域と水域では温度の違いによって明瞭に配色が異なった（西郷ダム下流のSite-2以外では陸域がより暖色であった）。また、陸域と水域のそれぞれで配色の空間的変異が明らかであった。これは、陸域の場合、特に植生の無い砂州上においては、日の当たり方による温度の違いを反映している。西郷ダム下流Site-2の砂州の上流側が寒色なのは、熱画像の撮影が朝方に行われ、河道の一部がまだ日陰であったためである。砂州内の大きな礫によっては、日向と日陰の面による温度の違いにより、個々の石の形が熱画像に現れた。水域に接した湿った場所は、陸域においてより寒色であった。また、両岸において植生のある場所は礫や岩の場所に比べて寒色であった。

水域においては、陸域に接した場所でもより暖色を示す箇所が見られた。これは後述する、日射や空気により暖められた水が川縁に存在する場合と、伏流水が湧出する場所である場合がある。西郷ダム下流Site-2と木津川の砂州では本流と湧出流の合流点での温度差が明瞭であった。木津川の砂州では湧出流は下流に行くほど暖色である傾向が明らかであった。

3.2 小スケールでの水温の空間変異

砂州ごとに水温の空間変異を詳しくみていく[Fig. 6, 7, 8]. 各砂州において温度スケールを揃えて熱画像を示しており、各画像において右側に色と温度の対応、左上に観測点における温度が表示されている。先述のとおり画像による温度差があるため、画像間の温度値の比較は行わず、また絶対値の信頼性はあまり高くなく、1画像内における温度差に注目した。なお、各画像は空間補正を行っていないので多少歪んでいる。

西郷ダム下流Site-1の熱画像を[Fig. 6]に示す。①は砂州上流の主流である。川縁に沿って温度が高く、任意の場所の計測で流心と川縁では3℃前後の温度差があった。ここは比高が高く、水が砂州内に浸透していく場所である。川縁の温度が高いのは、淀んだ水が空気や日射により温められたためと考えられる。②は砂州のやや下流における主流で、画像の左側は岩盤、右側が砂州である。岩盤の川縁に沿って

温度が高く、流心と川縁で3℃近くの温度差があった。ここは特に水が湧出する場でないため、やはり空気や日射により温められた水が川縁に沿って存在すると考えられる。一方、砂州側には川縁から流心へ、先端がやや尖った筋状に伸びる周囲より5-6℃高い水が見られた。ここはちょうど砂州内から噴出したとみられる砂が堆積している場所であり（視覚画像参照）、伏流水が湧出する場と考えられる。③は砂州下流端の主流でちょうど瀬のある場所で、画像の中央から下の黄色や赤は下流の別の砂州の陸域である。①と同じようにこの砂州の川縁（下流にある別の砂州の川縁）の温度が高く、流心と川縁で4-5℃の温度差があった。ここは砂州内に水が浸透していく場所であり、水が空気や日射により温められたと考えられる。この砂州の左側の川縁は比高が低い伏流水が湧出してもおかしくない場所であるが、温かい領域は岸に沿って帯状であることから、やはり空気や日射により温度が高まった場所と考えられる。④は③のやや上流側で、画像の右下で主流と湧出流が合流している。主流と湧出流の温度差は1℃程度で大きくはなかった。湧出流の最下流（合流前）は砂州の川縁から流心へ先端がやや尖りながら伸びる周囲より3℃ほど高い水の筋が多数みられた。これらは伏流水の湧出場と考えられる。⑤と⑥は砂州上流と中流における湧出流であるが、同じく先端のやや尖る川縁から流心へ伸びる周囲より2-3℃高い水の筋が多数みられた。これらは上流から続く湧出流に途中で横から加わる湧出流と考えられる。

西郷ダム下流Site-2の熱画像を[Fig. 7]に示す。①は砂州上流（中央が砂州）で左側の水色～緑色の部分が流出流である。砂州の川縁から勢いよく水が流出するのが現地で確認されており、画像の水色の部分は本流に比べると1℃ほど温かかった。湧出流の流心はそれよりもさらに2℃近く高かった。これは時間的に前に湧き出した温かい水がまだ残されていたのか、底部から新しく温かい水が湧出しているのかはわからない。②は砂州中流の湧出流（中央より左側の赤色～黄色の部分）である。川縁の一部に流心より1-2℃高い場所があり、そこから下流へ筋が伸びていた。これは横から加わる湧出流と考えられる。③は砂州中流の本流（中央より右側の赤色や橙色）でその中央はちょうど瀬にあたる。瀬の下流端あたりから砂州の川縁に沿って流心より1.5℃ほど高い水の帯があった。ここは砂州においても日陰側の川縁にあたるので、日射により温められたことは考えにくく、湧出流によって温かかった可能性がある。④は砂州下流で本流と湧出流が合流する部分である。本流に比べて湧出流は1-2℃高く、2つの違いは明らかである。現場での流量観測により、本流よりも湧出流で

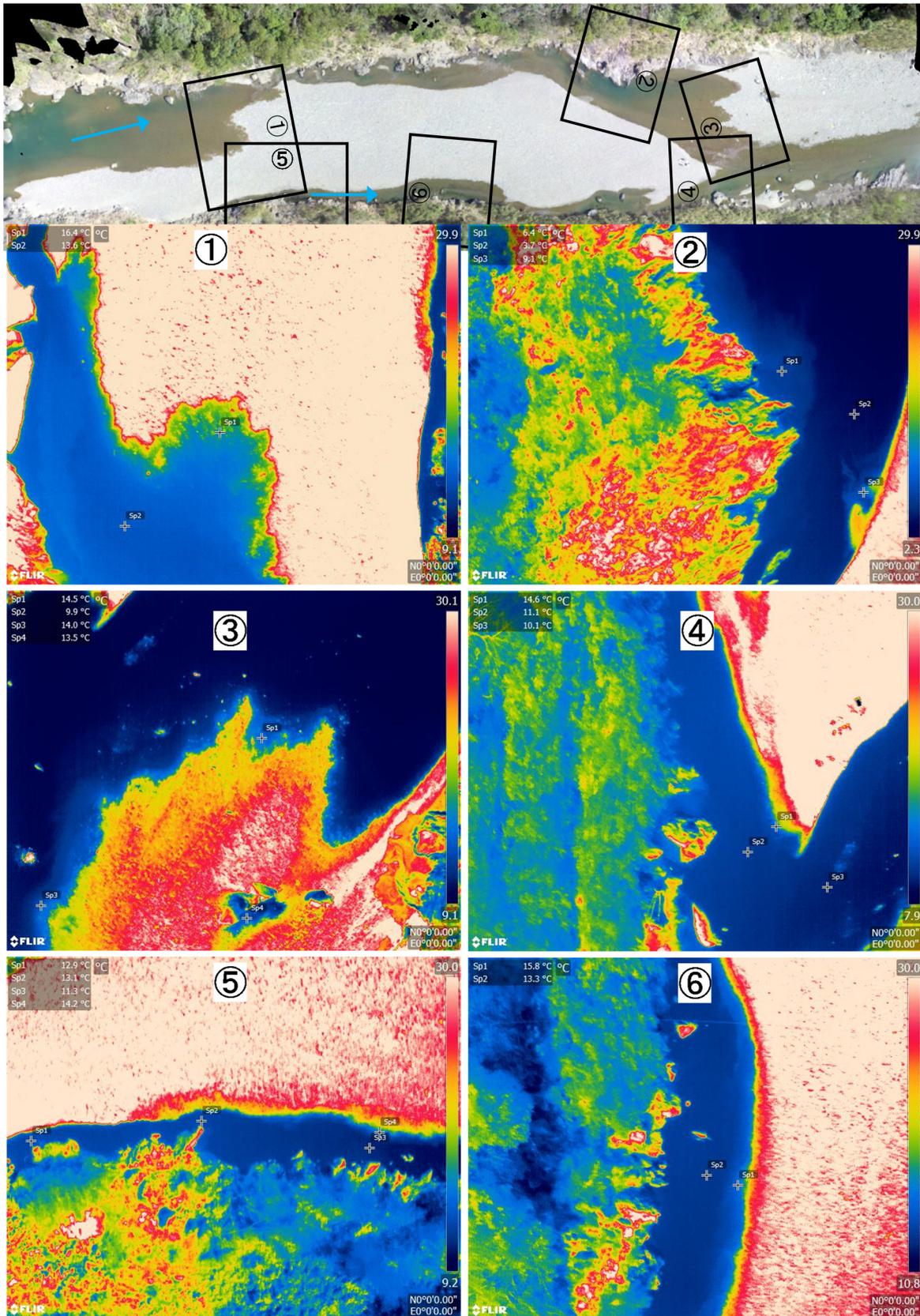


Fig. 6 Thermographic images of some places around the bar at Site-1, Mimi River

流量がやや大きいことが分かっている。
木津川15kの砂州の熱画像を[Fig. 8]に示す。①は砂

州上流の本流である。川縁から流心に伸びる温度が
2-3°C高い水の筋がみられた。これは湧出流だと考え

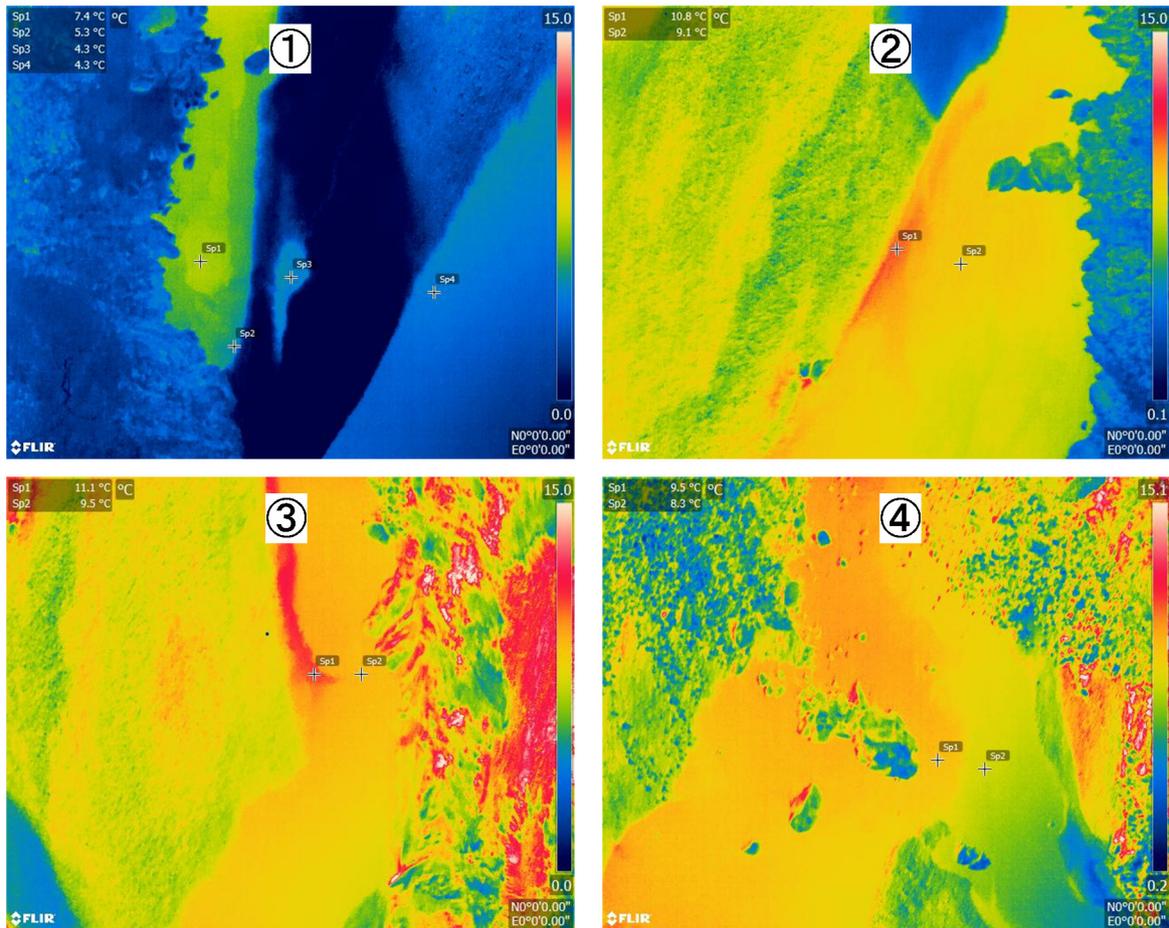
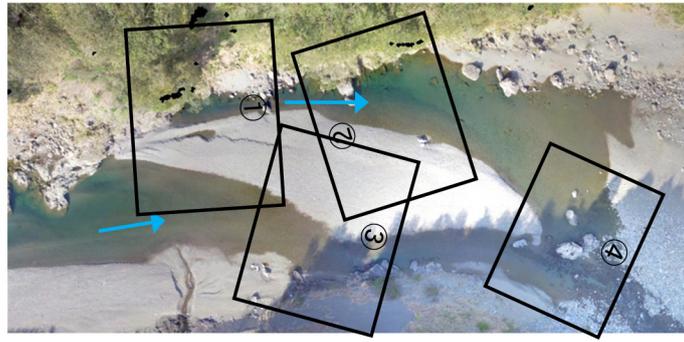


Fig. 7 Thermographic images of some places around the bar at Site-2, Mimi River

られる。また砂州の本流の川縁は幅1mで流心よりも4°C以上温かい水が帯状に続いた。これは日射や空気により温められた淀んだ水域である。なお、流心にある黄色から赤色の部分は蛇籠が設置されている部分にあたる。②は砂州下流で、画像の下において本流に湧出流が合流している。合流付近において湧出流は本流よりも5°C近く高かった。湧出流の川縁からは温かい水(画像中央より上)や冷たい水(画像中央より下)が流心へと伸びているのがわかる。③は湧出流であるが上流で水域が孤立するたまり(画像下)と、本流と接続している湧出流のワンド(画像上)である。たまりよりもワンドの流心で温度が5°C近く低

かったが、ワンドの川縁は流心よりも4°C近く高かった。低い温度の水が湧出するものの、川縁では日射や空気により温められていると考えられる。④はそのワンドの中流で、冷たい水が温かい水に入り込んでいるのがわかる。また、川縁から流心へ温かい水が筋状に伸びており、横から湧出流が加わっているのがわかる。

4. まとめ

本研究はドローンからの熱画像の空撮により、砂州周辺における伏流水の湧出場の検出を試みた。湧

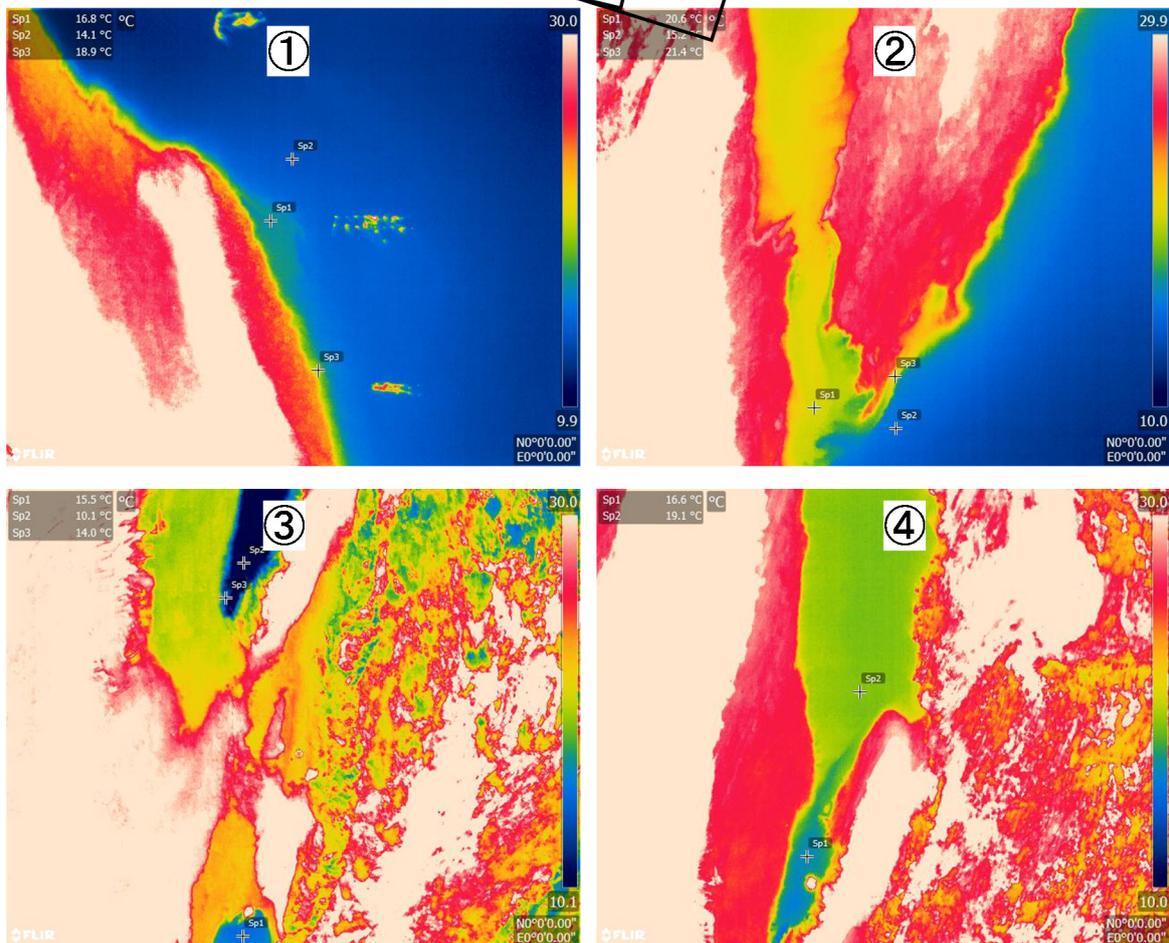
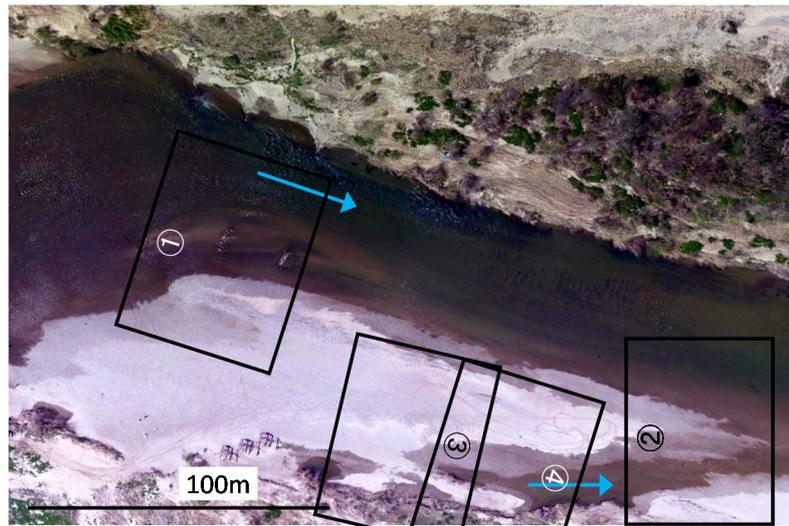


Fig. 8 Thermographic images of some places around the bar at 15k, Kizu River

出流は川縁から流心に伸びる周囲と異なる温度の水により判定ができる可能性が示された。川縁において日射や空気により淀んだ水も流心とは異なる水温を示すが、川縁に沿って帯状に存在することなどから湧出流との区別が可能である。湧出流のみの流れであっても横から新たな湧出流が加わり、縦断的に温度が変化していた。

謝 辞

資料の提供、調査の調整など多大なご協力をいただいた九州電力株式会社耳川水力整備事務所の方々、また調査を手伝っていただいた京都大学同研究室所属の大学院生である肖，田住，高田の各氏に感謝の

意を表す。

参考文献

小林草平・角 哲也・竹門康弘 (2016) : ダム撤去後に下流に形成した砂州の生物生息場機能, 河川技術論文集, 第22巻, pp. 463-468.

小林草平・角 哲也・竹門康弘 (2017) : ドローンとサーモグラフィを組み合わせた砂州の湧水ポテンシャルの評価, 河川技術論文集, 第23巻, pp. 621-626.

Alexander, G.F., Dixon, H.L. and Parker, J.W.Jr (2006): Water quality changes in hyporheic flow paths between a large gravel bed river and off-channel alcoves in

Oregon, USA, *River Research and Application*, Vol. 22, pp. 1111-1124.

Burkholder, B.K., Grant, G.E., Haggerty, R., Khangaonkar, T. and Wampler, P.J. (2008): Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA, *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 941-953.

Ock, G., Gaeuman, D., McSloy, J. and Kondolf, G.M. (2015): Ecological functions of restored gravel bars, the Trinity River, California, *Ecological Engineering*, Vol. 83, pp. 49-60.

(論文受理日 : 2018年6月13日)