

【報告】

ドローンを活用した新たな河川観測の可能性
—水温に着目して

加藤 憲二¹・舟橋 弥生²・十田 一秀³・宗林 留美¹・永翁 一代¹
太田 昌志²・程谷 浩成⁴・杉澤 文仁⁴・古谷 佳文⁴

1. 静岡大学理学部、2. 公益法人リバーフロント研究所、3. (有限会社) KELEK、4. 国土交通省沼津河川国道事務所

1. はじめに

従来の小型航空機を使った空中からの地表観測にかわって2012、3年頃から無線操縦する無人小型機(ここでは4つの回転翼をもつクワッドコプター、あるいはクワッドローターを指す)が使用されるようになり空中からの地表観察技術は大きく様変わりしつつある。トムソン・ロイター社の文献検索ツール Web of Science を使って Drone を用いた自然環境の観測事例を検索すると20件ほどの文献が上がってくる。その中で最も古いものは2013年ドイツのチームが泥火山の様子を観測した発表の会議録であった (Amici et al. 2013)。検索項目に河川を対象としたものに限定すると入力するとわずか2本の論文が検出されるのみで、いずれも同じイタリアと米国の合同チームによる河川の流速の測定を試みたものであった (Tauro et al. 2016)。

筆者等はドローンの大きな特徴である、①簡単に飛行させることができる利便性、つまりリアルタイムでの情報取得が可能であることと、②上空数十メートルの範囲内で自由に飛行高度を設定できることによる対象物から得るメソスケールでの情報取得に可変性があること、を活用してダイナミックに変動する河川水について今まで見えなかった情報の取得が可能ではないかと考え、2016年から富士山麓の三島溶岩流からわき出す湧水が涵養する柿田川とその柿田川が流入する狩野川を対象に試験的観測に取り組んでいる。現在までに

得られた成果をもとに、ドローンによるこれからの河川観測の可能性と問題点について速報として紹介する。ドローンを用いて試みたのは、可視光による現場環境情報の取得とサーマルカメラによる河川表層水温情報の取得である。後者は、狩野川本川においてその位置と地形的特性から地下深部を経て供給される地下水が河床から湧出する可能性が考えられることから、その検出が可能かどうかを探ろうとしている。

2. 使用したドローンと撮影機器、および観測対象地点

使用したドローンは世界シェアの7-8割を占めると言われる中国 DJI 社の Inspire 1 (バッテリーを取り替えずに飛行できる最大時間: 約8分) と2台のカメラを同時に搭載できる M210 (最大飛行時間: 約13分) である (図1)。用いたカメラは、可視光撮影について同じ DJI 社の X4S (重量: 235g, 有効画素数: 2000万画素、レンズ: F/2.8~11, 8.8mm [35mm換算: 24mm]、動画品質: 4K 中央重点測光) サーマルカメラは米国 FLIR 社 Zenmuse XT (解像度: 640x512, 温度感度 0.1°C 未満, 対応温度: -25~135°C)。取得情報は写真フォーマットとして JPEG, R-JPEG (インターネット上の FLIR F ツールより解析可能)、ビデオフォーマットは MP4 である。



図1 (左) M210 機外観。(右) 狩野川城山直下でのドローン観測状況 (2016年8月19日)



図2 狩野川における観測地点

3. 柿田川－狩野川での観測結果

観測対象は水温情報の取得から河川への湧水の供給による影響を探ることを目的とし、日量100万トンの湧水が涵養する流程1.2kmの柿田川（静岡県駿東郡清水町）が流入する狩野川とした。狩野川は、伊豆半島中央部の静岡県伊豆市の天城山系にその源を発し、大小の支川を合わせながら北流。田方平野に出て狩野川放水路を分派した後、来光川、大場川、黄瀬川と合流し、駿河湾に注ぐ幹線流路延長46km、流域面積852km²の一級河川である。地形の特徴としては、狩野川流域は、伊豆半島と富士・箱根の諸火山からなる山地によりその大部分が占められており、浸透性のよい火山噴出物や溶岩が分布している。

観測地点は、狩野川の柿田川合流地点（河口から約7km地点、N35° 5'55", E138° 54'02"）標高342mの城山が左岸にせり出す城山直下地点（河口から約21km地点、N35° 00'04", E138° 55'59"）と河川周辺が自然景観をもち始める本立野（河口から約27km地点、N34° 57'46", E138° 56'26"）とした（図2）。紙面の都合上本報告では本立野の観測結果は省略する。

図1（右）に示したとおり城山は火山岩の一枚岩で柱状節理など冷却に伴う収縮割れ目ができているものが多い（小山、2007）とされている。降水が地下浸透し地上基底部より地下水が湧出する可能性は高いと予測された。

ドローンにより取得できる情報は河川表面であることと、地下から供給される湧水の検出を目的の中心に据えたことから狩野川における季節的な水温の変化は重要な外部要因となる。柿田橋（河口から約7km地点）、徳倉橋（河口から約7.6km地点）大仁橋（河口から約22.7km地点）の3地点において2015年から2016年に観測された河川水温の季節変化を図3に示す。なお柿田川で観測された湧水水温の年間変動は小さく、14.7℃から15.7℃である（Segawa et al. 2015）。図3には目安として15℃に線を入れた。これより河川水温が低い場合、湧出地下水の影響が観測可能な表層に現れる可能性が高いと考えられる。

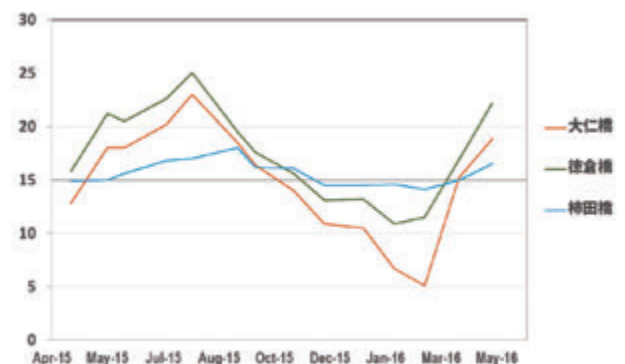


図3 狩野川3地点における河川水温の季節変化
（平成27年、平成28年 狩野川水系水質監視分析、沼津河川国道事務所より）

3-1. 柿田川-狩野川合流地点での観測

図4に2016年8月19日に柿田川が狩野川に合流する地点でのサーモカメラカメラによる河川表層水温の測定結果を示す。このときの狩野川の水温は徳倉橋付近で25～26℃であった。水温15～16℃の柿田川の水（図4では濃紺で示される）は河川表層で見ると暖かい狩野川本川の流れ（図4ではオレンジ色で示される）に入り込むことなく地形上の境界線付近で混合する、あるいは部分的に潜り込むように推察される（図4中のピンク色部分）。水温の異なる河川水の混合のフロントはあたかも北斎描く富嶽三十六景、神奈川沖浪裏の波しぶきのようである。異なった色の重なり部分は

フラクタル図形のようにも見える。高度約40mからドローンによって撮影されたこの図で一画素はcmのオーダーであることから自然界における物理特性の異なる水の混り合いのダイナミズムを感じさせる。

次に、流入する柿田川の水温が狩野川（徳倉橋付近で約9℃）より高いケースの観測を2017年12月8日に行った結果を図5に示す。図4に示した夏のケースとは異なり、暖かく軽い湧水は狩野川本川表層に勢いよく流れ出ていることがわかる。柿田川の温かい水と狩野川の冷たい水が混ざり合うフロントでは、夏と同様に3層に亘る複雑な文様が認められる。

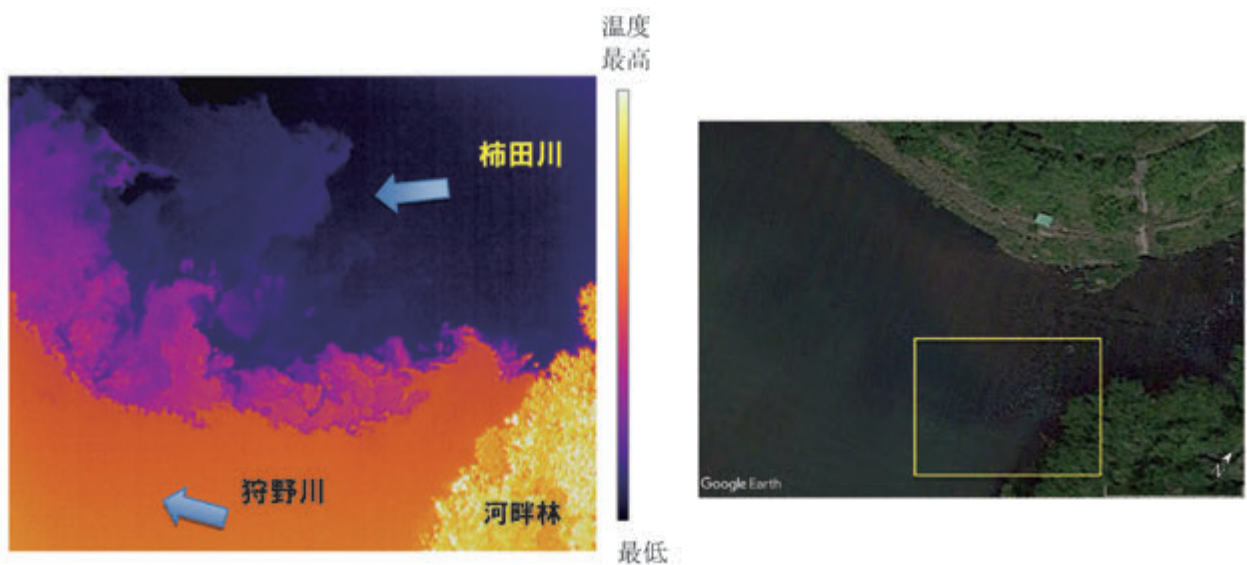


図4 柿田川が狩野川に合流する地点でのサーマルカメラカメラによる河川表層水温の測定結果（左）。（右）は同地点の観測箇所をGoogleの地図情報上に示す。黄色のフレームは温度観測箇所。2016年8月19日。

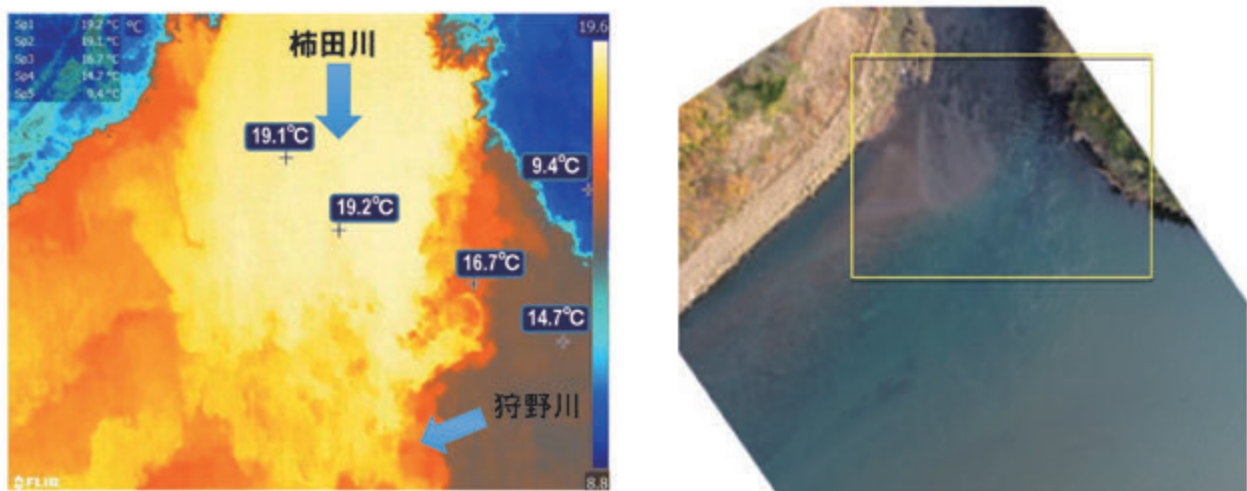


図5 柿田川が狩野川に合流する地点でのサーマルカメラによる河川表層水温の測定結果（左）。（右）は同地点の可視光での撮影写真。黄色のフレームは温度観測箇所。2017年12月8日。

温度情報ではないが、サーマルカメラカメラを搭載して飛行した直前に撮影した可視光写真では柿田川河口右岸に堆積物が確認される(図5(右)中の茶褐色部分)。実際にこの辺りでは水深は2~30cm未満となっており柿田川から流出した土砂が堆積していることが分かる。ドローンを用いた河川情報の取得において、河岸状態の把握、微小な流入水路の確認などの他、このような堆積現象の面的広がりを把握することも可能なケースがあることを示している。

高精度で河川表面の温度分布が把握できることが示されたが問題が一つあった。それはサーマルカメラが捉えた温度が実測値と異なることである。いずれの画像も高度およそ30~40mからの撮影であるが、サーマルカメラは水面での乱反射や空気中の水蒸気による妨害を受けるため観測時の天候にも左右されるが経験的に実測値よりも高く測定値が標記される傾向にあるようだ。一枚の画像の中で場の温度差分を0.1℃の精度で検出することができるが絶対値は現場の値で補正する必要がある。

3-2. 湧水の河床からの湧出を調べる意味

なぜ私たちは地下水の河床からの供給の探査に取り組み始めたか。水循環基本法がようやく平成26年に制定されたこともあり、山岳地帯が国土の6、7割を占める我が国にあってそこを流れる河川に対して山岳地の地下に蓄えられた地下水の河川への直接供給の量と意味を考えることは水循環の思想の下に河川管理を行う上で必須であろうと思われる。そして、上述したように狩野川においては世界的にも巨大な湧水河川である柿田川から本川の流量の数分の1から2分の1もの湧水が流れ込むことや、地形地質から狩野川下流部には溶岩流が

到達していることから、ここが河川表層への地下水(湧水)の供給の意味を考える格好のフィールドであると考えた。

地下圏を時間をかけて通過してきた湧水が河川水に与える影響を考える上で、地下水が地表の生態系に持ち込む栄養塩、特にリンの効果がまず考えられる。Kato et al. (2015)は駿河湾の海底から湧出する地下水(淡水)が海水中の微生物の増殖を促進する可能性を示唆している。次いで地下水は岩石との相互作用を経た結果、たとえば富士山湧水で涵養される柿田川はバナジウムやクロムを豊富に含む一方、鉄の濃度は低いということが見いだされている(斎木、2017)。これら水の含有成分の違いが環境への応答の早いバクテリアなどの原核生物に影響を与えることは容易に推測される。原核生物を基点とする生態系にも効果が及ぶこともあろう。このような化学的な影響に加え、地下水が湧き出す場では河床の一定の空間に年間を通じて一定温度環境を作り出すことが考えられる。これによって河川に生息する動物に、厳冬期や夏期における避難場や、あるいは産卵場所を提供し得ることが考えられる。

3-3. 河床からの湧出水検出の試み 城山直下での観測

1年半の試行錯誤を経て湧水の湧出が強く想定される城山直下(図1(右))で、現場での水温の直接測定と重金属に焦点を合わせた化学分析のための採水を2017年12月河川水温が10℃を下回ったときに行った。観測結果の画像の一部を図6に示す。サーマルカメラ画像は動画より切り出した。

図6(左)のaで示された地点で河川本流表層(図6中の黒色部分)より1.7℃高い水温(ドローンに搭載したサーマルカメラは14.8℃を表示)が繰り返

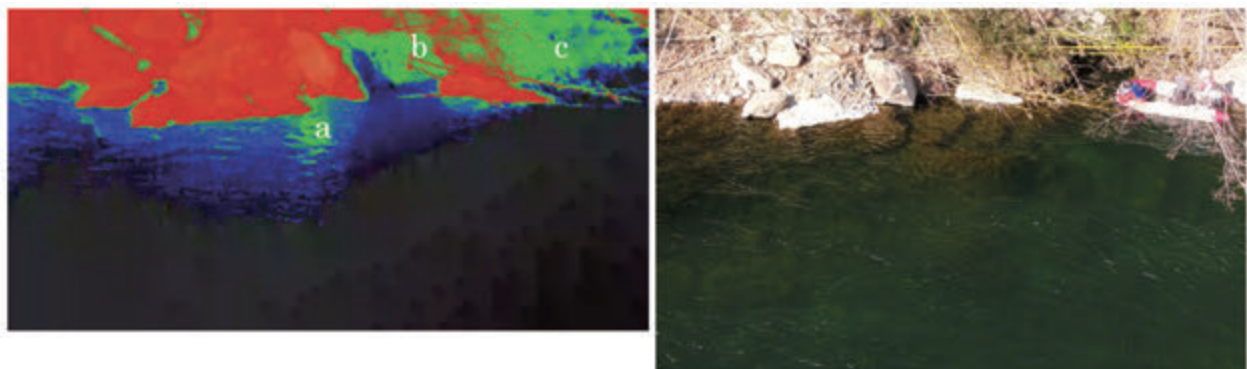


図6 城山直下でサーマルカメラにより検出された周囲より高温部分(図左a)と現場の可視光撮影の写真

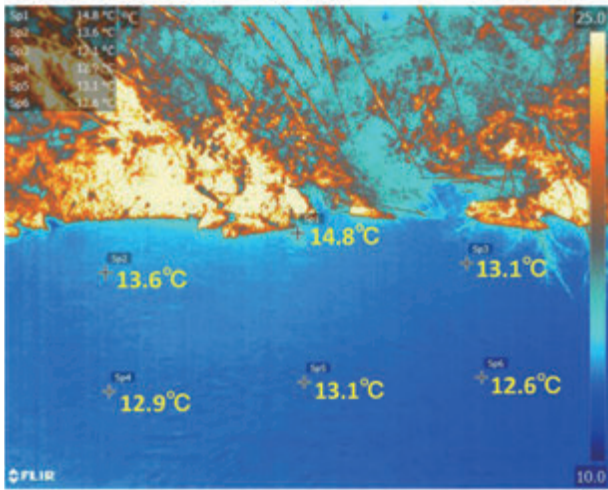


図7 城山直下対象地点のサーマルカメラによる静止画像上でソフトウェア FLIR Tools Library によって観測水温を表示 (図6の観測時刻との時間差1時間以内)

返し静止観測や動画観測によって検出された (図7; ここでは高温が水色、低温側が濃い青で表示されている)。このとき実測された本川の水温は9.4~9.7°Cであり、a地点周辺の水温実測値は11.0~11.8°Cを示した。実測値の温度差はドローンによる観測値に同じくほぼ1.5°C程度となる。なお図6b地点は浅い水塊に枯れ枝が覆い被さった状態であったのでノイズを拾っている可能性がある。また図6c地点は観測用のゴムボートに2名が乗船しており明らかに人体からの温度の妨害があると考えられるためこれらは考察から除外する。

湧出水が柿田川同様の地下水であるとすれば水温は約15°Cとなる。現場の河川水温を元に温度影響域を川幅1mと仮定して考えれば地下水の湧出量はおおよそ毎秒0.1m³と推定される(脚注)。これは日量約9000m³に相当し、湧水河川柿田川から狩野川への供給量のおおよそ100分の1になる。今後

脚注

河床から湧出する湧水による河川表面の水温変化は、温度差のある水の攪拌や河床から河川表面へ水の移動など、複雑な現象により発生しているが、ここでは、簡易的に水量(河川流量、湧水の湧出量)と温度との関係を把握するため、以下により数値の算出を行った。

- ・河川内における湧水の影響範囲を横幅1mと仮定し、その幅を単位時間に通過する流量、河川水温と湧水の湧出量、湧水温の関係を整理する。
- ・ドローン観測地点近傍で流量観測を行っている大仁観測所の流量13.9m³/s(12月上旬(12/1~10)の過去5年分の12:00の平均流量)となっており、大仁観測所地点の低水路幅約50mから、1m幅を通過する流量は、0.28m³/sとなる。また、12/8の12:00時点で現地で計測した河川水温は9.5°Cを用いた。
- ・一方、湧水温は、1年中安定して15°Cと想定される。
- ・ここで、湧水の湧出により1.5°Cの河川水温上昇が発生すると仮定し、1秒当たりの簡単な熱量保存則で考えると、(9.5°C×0.28m³) + (15°C×湧出量 m³) = 11.0°C×(0.28m³+湧出量 m³)、湧出量=0.105m³となる。あくまで河川水と湧水が均等に混合するという簡易的な仮定の上であるが、河川水温を1.5°C上昇させるためには、0.105m³/s(日量約9000m³)の湧出が発生していることになる。これは柿田川おおよそ100分の1の水量に相当する。

の課題として、該当する水の化学分析を進めること。さらにドローン観測と平行して現場における水温測定を精度を上げて実施し、湧出量の推定を進めることを目指したい。またこの手法を狩野川の他の場所へ、さらには他の河川へ広げることも考えられる。

3-4. ドローンを用いて高精度に水温情報を取得する上での問題点と解決方法

1. 技法状の注意点

- 1) サーモメータの検出温度値は観測時の天候や飛行高度によって変化するため現場の実測値で観測ごとにチェックする必要がある。なお、飛行高度は環境条件が許す範囲で低空である方が、水蒸気など空間がもたらすノイズを小さくすることができる。
- 2) 水面からの反射がもたらすノイズを少なくする上でも風の弱い(M210で運用可能風速は最大で10m/s)曇天時が河川水温の観測にはよいということになる。
- 3) 河川水温の測定については河畔林も大きなノイズになるため、冬期が観測にふさわしい。
- 4) 観測対象の絶対尺度を得るためには実際のスケールの空撮が同時に必要である。
- 5) 水面からの反射を小さくするためには鉛直上空からの撮影より、角度(45度)をつけた方が望ましい。

2. なお当研究期間中にサーマルカメラのスペック向上によって動画による水温情報取得が可能となった。また、新型ドローンMP210はサーモカメラと可視光撮影カメラの同時搭載が可能であり、現場環境の情報取得と特定目的(今回は水温)の情報取得が同時に行いうるという利点がある。

4. 環境測定におけるドローン活用の可能性

低高度からの空撮により地表の情報を取得するという目的に限っても、今後ドローンは様々な用途に向けてその利用が広がっていくであろう。センサーを温度から他のものに変えることができれば、たとえば衛星に搭載され観測が始まっている海色センサー（平澤ほか、2017）をドローンに搭載することができれば河川や湖沼の富栄養化度を知ることができるようになるだろう。赤外などのガスセンサーを搭載することで、石炭採掘場などの地中で起こる火災を探索するところにも着手されている（Dunnington & Nakagawa, 2017）。

最後に、スイス、ヌーシャテル大学理学部水文科学科学研究室のBrunner教授たちもドローンを使った地下水と河川水の混合に関する観測をスイスアルプスで進めているという情報を追記しておきたい（http://www.unine.ch/mas-icm/home/icm_lecturers/philip-brunner-phd.html）。

謝辞

2016年から2017年初めにかけての観測を大いにサポートしてくれた静岡大学加藤研究室の大学院生の双木笙太君、榊田卓君、学部生の門馬弘幸君には記して謝意を表したい。

文献

- Amici et al. Volcanic environments monitoring by drones mu volcanic case study. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5-10 (2013).
- Dunnington & Nakagawa, Fast and safe gas detection from underground coal fire by drone fly over, *Environmental Pollution*, 229:139-145 (2017).
- 平澤 亨他、衛生による海洋基礎生産力の推定、*海の研究*, 26:65-77 (2017).
- Kato et al. Unveiled groundwater flushing from the deep seafloor in Suruga Bay. *Limnology*, 16:79-83 (2015).
- 小山真人、白浜層群の時代（6）火山の根、静岡新聞 2007年12月23日。
- 斎木美悠、柿田川と狩野川の微量金属元素濃度、静岡大学理学部卒業研究、93pp. (2017).
- Seagawa et al. Microbes in groundwater of a volcanic mountain, Mt. Fuji; 16SrDNA phylogenetic analysis as a possible indicator for transport routes of groundwater. *Geomicrobiology Journal*, 32:677-688 (2015).
- Tauro et al. Surface flow measurements from drones. *J. Hydrology*, 540:240-245 (2016).