

# 河川・湖沼における採水ドローンの開発と 実用性の検証

DEVELOPMENT OF UAV FOR WATER SAMPLING AND ITS PRACTICAL USE  
IN DAM RESERVOIR AND RIVER

赤松 良久<sup>1</sup>・渡辺 豊<sup>2</sup>・平坂 直行<sup>2</sup>・土居 秀幸<sup>3</sup>・後藤 益滋<sup>4</sup>・  
小室 隆<sup>5</sup>・乾 隆帝<sup>6</sup>・河野 誉仁<sup>7</sup>

Yoshihisa AKAMATSU, Yutaka WATANABE, Naoyuki HIRASAKA, Hideyuki DOI,  
Masuji GOTO, Takashi KOMURO, Ryutei INUI and Takanori KONO

<sup>1</sup>正会員 博（工）山口大学大学院准教授 創成科学研究科  
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

<sup>2</sup>ルーチェサーチ株式会社（〒731-0152 広島県広島市安佐南区毘沙門台4-16-21）

<sup>3</sup>非会員 博（農）兵庫県立大学大学院准教授 シミュレーション学研究科  
（〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目1番28）

<sup>4</sup>正会員 博（工）山口大学大学院学術研究員 創成科学研究科  
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

<sup>5</sup>正会員 博（理）山口大学大学院特命助教 創成科学研究科  
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

<sup>6</sup>正会員 博（農）山口大学大学院特命助教 創成科学研究科  
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

<sup>7</sup>学生会員 山口大学大学院創成科学研究科  
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

We developed a new method of water sampling by using UAV with a bleached attachment for a 1-L water bottle. To confirm the practical performance, water sampling for water quality and environmental DNA surveys was conducted in Haizuka dam reservoir and Saba river.

The result indicates that the UAV method can be applied to water quality and eDNA surveys in many kinds of water bodies, such as lakes/ponds and rivers. In the dam reservoir, this method enables efficient water sampling for a short period of time, compared with that using boat. In the river, it can apply for the water sampling in the stream with a high velocity (1.46m/s).

**Key Words :** UAV, drone, water sampling, environmental DNA, Haizuka Dam, Saba River

## 1. はじめに

近年、ドローン（UAV : Unmanned Aerial Vehicle）の発展は目覚ましく、様々な分野での活用が検討されている。特にドローンとSfM（Structure from Motion）を組み合わせた写真測量は海岸の地形変化のモニタリング<sup>1)</sup>、砂防堰堤の堆積状況のモニタリング<sup>2)</sup>、河川地形測量<sup>3)</sup>等に幅広く用いられており、国土地理院でも「公共測量におけるUAV測量マニュアルと安全基準の概要」を取りまとめている<sup>4)</sup>。河川地形測量においては、水面下の地形を把握しようとする試みも進められており、河床面が視認できる河川ではその有効性が確認されている<sup>5)6)</sup>。ま

た、建設分野では測量以外にも橋梁や道路のり面の点検<sup>7)8)</sup>や施工管理<sup>9)</sup>などにドローンが活用されつつある。一方で、農業分野ではドローンを用いて作物の生育状態の把握に活用されている<sup>10)11)</sup>。また、生態学分野では河川水辺の構造、鳥類のねぐら、草花の分布の把握等に利用されている<sup>12)13)14)</sup>。

上記のようにドローンは地形測量だけでなく、様々な分野で新たな活用が期待されている。河川・湖沼の環境モニタリングにおいて、水を持ち帰り水質等を分析するために採水を行う必要があり、このようなモニタリングにもドローンが活用できる可能性がある。既存の方法においては、湖沼ではボートを用意する必要があり、多大な労力と時間が必要である。また、流れの早い河川区間

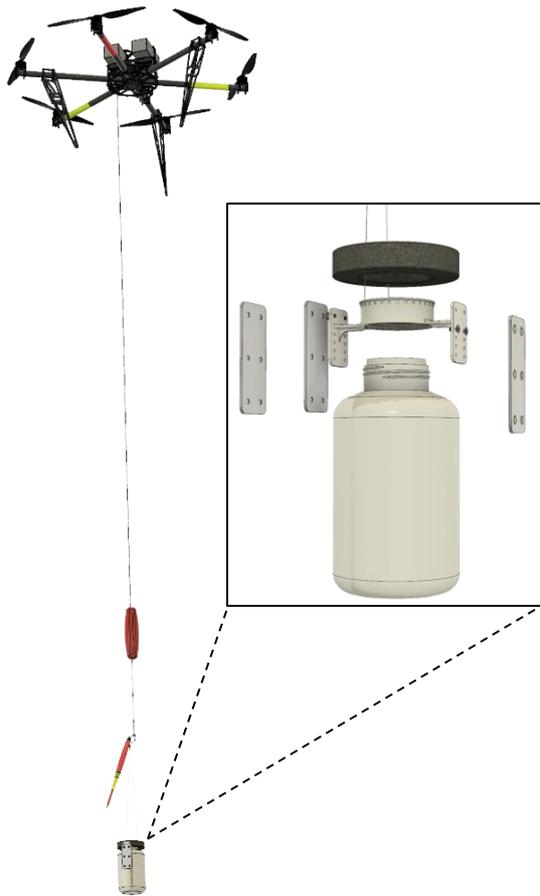


図-1 採水ドローン

や溪谷に位置する河川区間においては人力による採水自体が不可能であった。これに対して、ドローンを用いて採水を行うことが可能となれば、河川・湖沼における採水作業が人力に比べて格段に簡便に行えるようになると考えられる。

そこで、本研究では河川・湖沼における採水ドローンを開発し、その効率性や水質調査・環境DNA調査における実用性を検討することを目的とする。

## 2. 採水ドローンの開発

採水器および水サンプル（ここでは1Lを想定）をドローンを用いて輸送することから、採水器は可能な限り軽量でシンプルな仕組みとした。また、ドローンに関しても安定性の高い機体が必要とされている。以下に開発した採水ドローンの詳細を示す。

### (1) 自動採水装置

液体試料の採取は簡便な方法で行う必要がある。そこで、図-1に示すような採水装置を作成した。採水装置は市販の1L採水ボトル（広口タイプ）の口にネジ式の着脱可能な本体フレームと、フレームを吊り下げる紐状体と、



写真-1 採水の様子

表-1 採水ドローンの仕様

項目	仕様
機体重量	3,800g
外形寸法	1,000×1,000×400mm
駆動	モータ駆動
耐風	15m/s以下
飛行時間	10分～25分(リチウムポリマー電池)
搭載重量	4,000g～6,000g
撮影範囲	約1,000m
到達高度	250m

ボトルの周囲に取り付けられた環状の浮輪で構成されている。また、本体フレームの左右には錘を取り付け、片側の錘を重くすることで重心が傾き、着水した際に自動的に転倒し、水表面の水を採水できることが可能となっている。

### (2) 採水専用のドローン

採水に用いるドローンはルーチェサーチ社が開発したSPIDARをベースとした。本研究で用いたドローンの仕様を表-1に示す。このドローンの大きな特徴は、比較的小さいサイズではあるが6枚羽で、5kg程度までのものを積載した状態で安定した飛行が可能なことである。

### (3) 採水ドローン

採水ドローンは図-1に示すように、ドローン本体と自動採水装置を10mのワイヤでつなぎ、採水器付近に2つのブイを取り付けてある。上部のブイは採水ボトルが水中に入った際にワイヤにかかる張力を低下させるためのものである。下部のブイは満水になると直立し、遠方から採水が終了したことを確認しやすくするためのものである（写真-1）。採水後には約1kgのものを10mのワイヤを用いてつるすため、高速での移動は困難であるものの、低速で移動することによってドローンの安定性を確保できる。なお、この点に間してはワイヤを巻き取り可能なウィンチを登載し、採水前後のみワイヤを伸ばして採水し、採水時以外は高速に移動可能なように改良を進めている。

### 3. ダム貯水池での適用

#### (1) 方法

図-2に示す広島県の灰塚ダム貯水池の5地点 (St.1-A, B, C, St.2, St.3) においてドローンを用いた採水を2016年11月17日および12月19日に実施した。また、ボートによる採水を同時に行い、採水ドローンの効率性を検証した。さらに、ボートによって得られた採水サンプルとドローンによって得られた採水サンプルに対して水質分析および環境DNA分析を行い、両者の測定結果を比較した。水質分析では栄養塩類2項目 (T-N, T-P) をJIS K 0170 (流れ分析法による水質試験方法) に従い、オートアナライザー (SWATT, ビーエルテック社製) で計測を行った。また、環境DNA分析ではリアルタイムPCRを用いて、ブルーギルおよびオオクチバスの環境DNA濃度の計測を行った。この環境DNA分析の詳細についてはTakahara et al.<sup>15)</sup>およびYamanaka et al.<sup>16)</sup>を参照されたい。

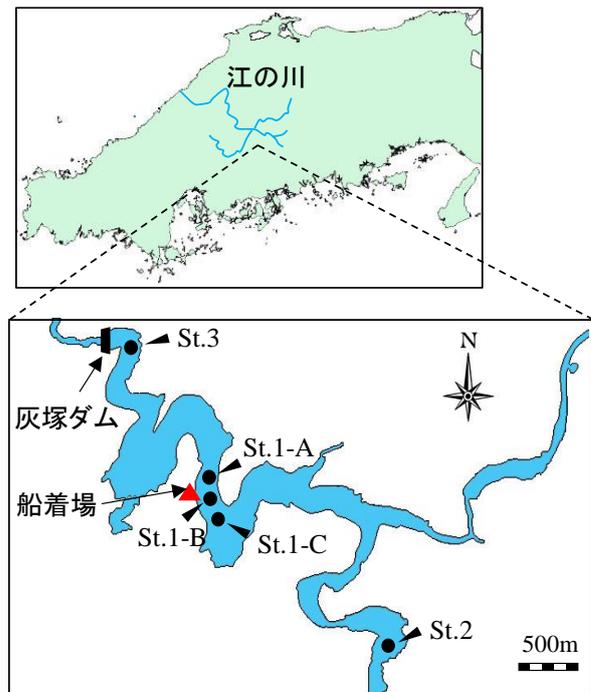


図-2 調査対象としたダム貯水池および調査地点

#### (2) 採水効率の検討

使用したボートは船外機の無い手漕ぎボートを使用した。ボートは船着場を出発後、St.1-A, B, Cの順に船着場に戻ることなく採水をした。採水ドローンはSt.1-A, B, Cの各地点について毎回採水しては船着き場に戻る形で実施した。開発した採水ドローンは着水後5~10秒でボトル満杯に採水を行い、採水後も安定した飛行で水サンプルの輸送を行えることが示された。また、表-1にボートとドローンの採水時間の比較を示す。3地点の合計時間を比較すると、採水ドローンによる作業はボートを用いた採水の1/4以下の時間で済むことが明らかとなった。今回は船着場から200~500m程度の地点で検証した結果を示しており、船着場から距離が離れるにつれて、さらに採水ドローンによる作業時間の短縮が期待できる。また、灰塚ダム貯水池にはボート侵入禁止区域が設けられているが、ドローンによる採水であればこのような侵入禁止区域でも採水を行える可能性が高い。

表-2 ボートとドローン採水時間

		ボート	ドローン
St.1-A	出発	12:12	12:19
	採水	12:18	12:20
	終了	12:31	12:23
St.1-B	出発	12:32	12:34
	採水	12:34	12:35
	終了	12:40	12:36
St.1-C	出発	12:40	12:44
	採水	12:44	12:46
	終了	12:50	12:47
合計時間 (分)		38	9

#### (3) 水質調査における有効性の検討

図-3にドローンおよびボートで採水したサンプル水のT-Nの計測結果を示す。なお、St.2, St.3についてはドローンによる結果のみを示している。両者の差はオートアナライザーを用いたT-Nの測定誤差範囲 (5%程度) 内に収まることが明らかとなり、ドローン採水とボートによる採水の間に有意な差はなかった。

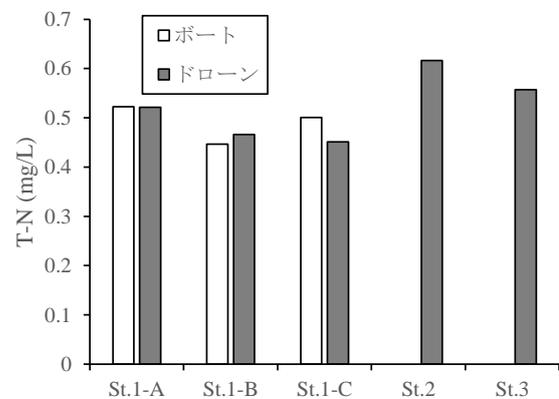


図-3 ボートおよびドローンを用いたT-N調査結果の比較

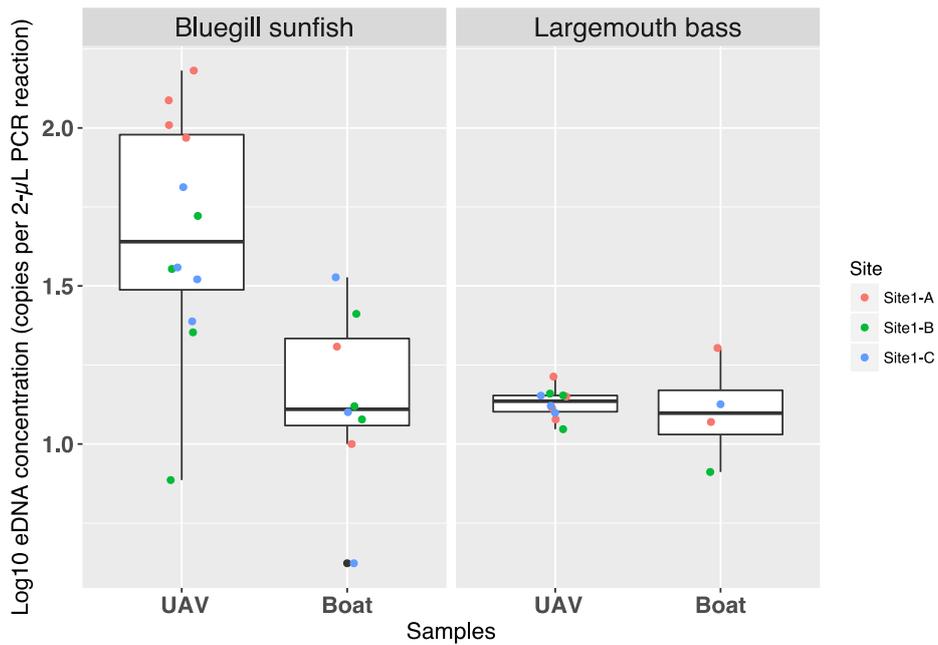


図-4 ボートおよびドローンを用いたブルーギル、オオクチバスの環境DNA調査結果の比較<sup>17)</sup>

#### (4) 環境DNA調査における有効性の検討

環境DNA調査においては輸送中のDNAを含む異物の混入が懸念されるため、純水を積んだドローンをSt.3まで輸送し、持ち帰り、そのサンプル中に今回対象としたブルーギル、オオクチバスのDNAが検出されないことを事前に確認した。図-4にドローン及びボートを用いたブルーギル、オオクチバスの環境DNA濃度の調査結果を示す。St.1-A～Cのサンプルについて4回の計測結果を示している。オオクチバスに関してはドローンとボートの間に大きな差はないものの、ブルーギルに関してはドローンとボートの結果に大きな差がみられる。この要因として、ボートでの採水においてはボートが採水地点に近づいた時点でブルーギルが逃げたのに対して、ドローンを用いた場合には採水器の着水直前までブルーギルが存在していた可能性がある。

### 4. 河川における適用

#### (1) 方法

図-5に示す山口県佐波川の中流部6地点においてドローンを用いた採水を2017年8月4日に実施した。この調査では流速が異なる6地点を選定し、どの程度の流速まで安定した採水ができるかについて検討を行った。各地点で、流心部においてまずドローンによる採水を行い、その後、同地点で通常の人力による採水を行った。なお、採水ドローンによる採水では、極力他のDNAが混入することを防ぐため、各地点で採水するごとに使用した採水装置のフレーム、ブイを次亜塩素酸ナトリウム漂白剤（市販

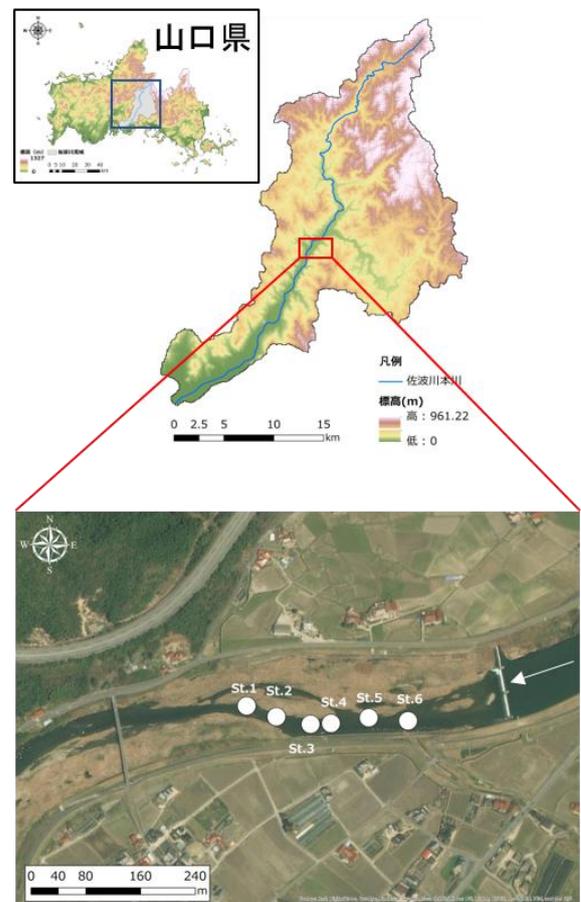


図-5 佐波川における調査地点

製品を10倍希釈したもの)で洗浄し、DNAを含まない脱イオン水によって洗浄し、採水ボトル以外は繰り返し使用し、採水を行った。採水したサンプルについてはリアルタイムPCRを用いてアユの環境DNA濃度の計測を行った。環境DNA分析の詳細についてはDoi et al.<sup>18)</sup>を参照されたい。また、各地点において電磁流速計を用いた流速の計測を行った。

## (2) 流水での適用性の検討

図-6にSt.1～6の流速・水深を示す。水深は35～50cm、流速は0.22～1.46m/sの範囲で採水を行った。写真-2にもっとも流速の速いSt.1での採水の様子を示す。流速の速い地点においては採水ボトルが5～10m程度流されるものの、ドローンは安定して飛行し、問題なく採水が可能であることが明らかとなった。St.1は水深35cm程度で辛うじて、人力で流心部における採水が可能であるが、経験的に1.5m/s程度の流速で50cm以上の水深のある場所(図-6中の網掛け部)では人力での採水は不可能である。採水ドローンはこのような人力では採水できない場所でも採水ができる可能性があり、これまで採水調査の不可能であった場所でも調査が可能になると考えられる。また、今回は比較的に水際に近づきやすく、離発着場所を確保しやすい河川区間で行っているが、河川の高水敷の樹林化によって水面に近づきにくい場所や深い溪谷を流れる区間などのアプローチが困難な場所においても、離発着地点さえ確保できれば採水ドローンによる採水は可能であると考えられる。

## (3) 環境DNA調査における有効性の検討

図-7にSt.1～6における手採水とドローン採水によるアユの環境DNA濃度の比較を示す。St.2およびSt.6に関しては大きな差が見られず、ドローン採水の方がわずかに小さい値をとる。一方で、他の地点においてはドローン採水の方が手採水より明確に大きな値を示していることがわかる。環境DNAの濃度は発生源の直下が最も高いことが知られていることから<sup>19)</sup>、これは手採水時には人が河川内に入っていくことによって、アユが警戒して逃げるのに対して、ドローン採水時はアユが逃げずに採水地点近傍にいたため考えられる。

## 5. まとめ

本研究ではドローンと10m程度のワイヤの先につけられた1Lの採水ボトルを取り付け可能な採水器から構成される採水ドローンを開発した。採水器は、採水器の片方に錘を付けることによって重心をずらし、これによって、着水後は自動的にボトルが横転し採水が行われる仕組みとした。

この採水ドローンを用いてダム貯水池および河川にお

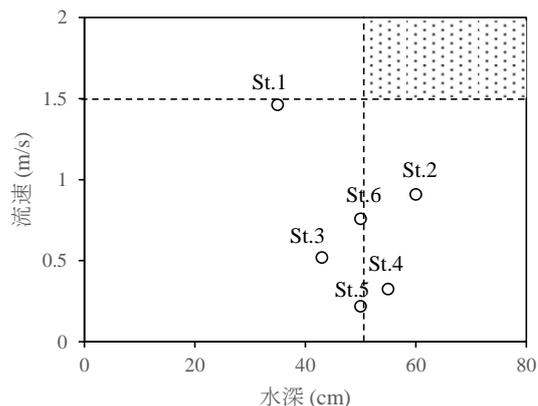


図-6 佐波川における調査地点の流速・水深



写真-2 佐波川St.1 (流速1.46m/s) における採水の様子

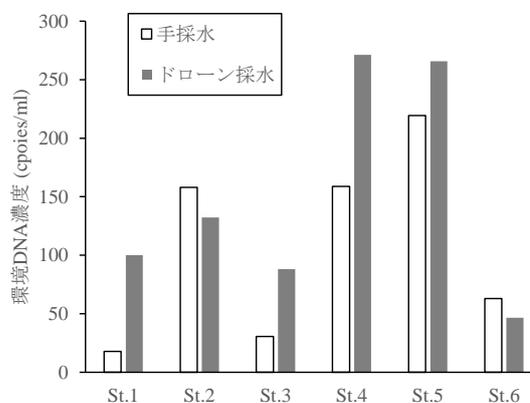


図-7 手採水およびドローン採水によるアユの環境DNA調査結果の比較

いて採水を実施し、水質調査および環境DNA調査における有効性を確認した。水質調査の結果はボートによる採水とドローンによる採水では測定誤差範囲内（5%）に収まり、有意な差が見られなかったことから採水ドローンの有効性を確認できた。環境DNA調査ではボートや人による採水に比べて、採水ドローンによる採水では環境DNA濃度が高く検出される傾向が見られた。これは採水地点付近にいる魚が警戒し、逃げにくいためだと考えられ、魚類等の環境DNA計測には有効な手段である可能性が示された。

ダム貯水池では採水ドローンを用いることによってボートによる採水に比べ、作業時間が1/4に短縮でき、効率的に採水を行えることが明らかになった。河川では流速1.46m/sの流れの速い場所においても問題なく採水できることが明らかとなり、人力による採水が困難な流速においても採水が可能になるということが明らかとなった。

今後、開発した採水ドローンによって、水域における水質調査や環境DNAを用いた水生生物調査が、従来の調査手法よりはるかに簡便に行えるとともに、調査者が水域に直接入る必要がなく、作業者の安全が確保され、水域での調査の安全性を大幅に高める可能性がある。

**謝辞：**本研究の一部は、公益財団法人河川財団河川基金「ドローンを用いたダム貯水池環境モニタリングシステムの開発とその適用」（研究代表者：赤松 良久）の一環として行った。また、現地実験に際して、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所および三次河川国道事務所灰塚ダム管理支所にご協力を頂いた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 黒岩 正光, 末葭 良太, 市村 康, 福岡 和明: UAVを活用した海岸地形変化解析に関する研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, pp. I\_784-I\_789, 2016.
- 2) 山村充, 内山庄一郎, 熊井 直也: UAV-SfMを用いた砂防えん堤の堆砂状況のモニタリングと堆砂量推計, 日本地すべり学会誌, Vol.53, No.6, pp.235-239, 2016.
- 3) 渡辺 豊, 河原 能久: UAVを利用した空中写真の河川地形計測への適用性, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp. I\_1105-I\_1110, 2016.
- 4) 国土地理院-Construction推進本部事務局: 公共測量におけるUAV測量マニュアルと安全基準の概要, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp. 210-216, 2016.
- 5) 掛波優作, 神野有生, 赤松良久, I GD Yudha Partama, 乾隆帝: UAV-SfM手法を用いた高解像度かつ簡便な河道測量技術の検証, 河川技術論文集, 第22巻, pp.79-84, 2016.
- 6) 神野有生, 赤松良久, I GD Yudha Partama, 乾隆帝, 後藤益滋, 掛波優作: UAVとSfM-MVSを用いた河道水面下測量技術における水面屈折補正の高度化, 河川技術論文集,

第23巻, pp.185-190, 2017.

- 7) 岡田 佳都, 岡谷 貴之: 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と実橋梁における点検性能評価, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.2, pp.119-122, 2016.
- 8) 今村 大地, 内山 庄一郎, 江山 栄一, 梅田 篤: 構造物点検における小型UAVによる低空空撮技術の活用, 日本地すべり学会誌, Vol.52, No.6, pp. 293-298, 2015.
- 9) 櫻井 淳, 田中 成典, 中村 健二, 窪田 諭, 今井 龍一, 重高 浩一: UAVの空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案, 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol.72, No. 2, pp. II\_73-II\_81, 2016.
- 10) 村井 諒平, 島田 沢彦, 関山 絢子, 豊田 裕道, 貝澤 太一: ドローン航空画像を用いた水稻生育状態の把握, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.36, No.2, pp. 117-121, 2016.
- 11) 濱 侃, 早崎 有香, 望月 篤, 鶴岡 康夫, 田中 圭, 近藤 昭彦: 小型UAVとSfM-MVSを使用した近接画像からの水稻生育モニタリング, 水文・水資源学会誌, Vol.29, No.1, pp. 44-54, 2016.
- 12) 丹羽 英之, 林 直弥, 森本 幸裕: UAVを用いた河川の水辺構造調査, 景観生態学, Vol.21, No. 1, pp. 75-80, 2016.
- 13) 嶋田 哲郎, 神山 和夫, 森 晃, 藤本 泰文: UAVを用いたマガンねぐらの環境収容力の推定, 日本鳥学会誌, Vol.65, No. 2, pp.161-166, 2016.
- 14) 小熊 宏之, 井手 玲子, 井鶯 裕司: UAV観測画像を用いた絶滅危惧植物の花の自動検出手法, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.36, No.2, pp.72-80, 2016.
- 15) Takahara, T., T. Minamoto, and H. Doi: Using environmental DNA to estimate the distribution of an invasive fish species in ponds, PLoS ONE 8: e56584. doi: 10.1371/journal.pone.0056584, 2013.
- 16) Yamanaka, H., and T. Minamoto: The use of environmental DNA of fishes as an efficient method of determining habitat connectivity, Ecol. Indic, Vol.62, pp.147-153. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.11.022, 2016.
- 17) H. Doi, Y. Akamatsu, Y. Watanabe, M. Goto, R. Inui, I. Katano, M. Nagano, T. Takahara and T. Minamoto: Water sampling for environmental DNA surveys by using an unmanned aerial vehicle, Limnology and Oceanography: Methods, 15, pp.939-944. 2017.
- 18) H. Doi, R. Inui, Y. Akamatsu, K. Kanno, H. Yamanaka, T. Takahara, T. Minamoto: Environmental DNA analysis for estimating the abundance and biomass of stream fish, Freshwater Biology, 62, pp.30-39, 2017.
- 19) S F Jane, T M Wilcox, K S Mckelvey, M K Young, M K Schwartz, W H Lowe, B H Letchers, A R Whiteny: Distance, flow and PCR inhabitation: eDNA dynamics in two headwater streams, Molecular Ecology Resources, 15, pp.216-227, 2015.

(2018. 4. 3受付)