

ドローンが変える湖沼環境研究

The drone makes a change in lake environmental research

三浦 真吾*・高津 文人
Shingo MIURA* and Ayato KOHZU

国立環境研究所 地域環境研究センター
Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

摘 要

近年、さまざまな分野でドローン（小型無人航空機）が利用されており、それは湖沼環境分野においても同様である。その主な利用用途としては、フィールドを撮影して植生の分布を把握したり、近距離リモートセンシングとして植物の水ストレスや生育状況の観測に用いられたいしている。このような目的のハッキリとした用途では、ドローンの活用は広がってきている。それ以外には、ドローンを使った立ちこみ危険地域での採水や、環境DNAサンプルの採水などといったユニークな利用方法が紹介されているが、実際に広く普及しているとは言えない状況である。この理由としては利用用途が限定的であり、その利便性あるいは優位性についての理解が広がっていないことが原因であると思われる。本論文では、さまざまなドローンの活用事例を整理し、ドローンの利用が湖沼環境研究に及ぼす影響について考察を行うものである。

キーワード：イメージング、サンプリング、センサーロギング、ドローン(UAV)

Key words：imaging, sampling, sensor logging, Drone(UAV)

1. はじめに

近年さまざまな分野において急速な勢いで利用が進んでいるドローン(小型無人航空機の通称：国内では略語としてはUAV(Unmanned Aerial Vehicle)が多用される。)だが、元来、第二次世界大戦や東西冷戦といった世界情勢の中で軍事利用を目的に発展を遂げてきた。無人航空機とは、パイロットが搭乗していない航空機であり、遠隔操縦及び自律飛行によるものが含まれる。無人航空技術には自動制御技術、無線遠隔操作技術、航法技術、通信技術、センサー技術などの要素技術が含まれ(久保, 2017), 1995年には有名な軍事用ドローンRQ-1プレデターが開発され、実戦投入されたことは世界中で注目を浴びた。

有人航空機の代替として開発された大型のドローンから、民生利用されるような小型のドローンが登場するまでには電子技術や蓄電池の発展があった。1990年代からジャイロや加速度センサーの小型化により、スマホやゲームコントローラーなど身近な電化製品に組み込まれることで、センサーチップの低価格化に拍車をかけた。2000年代には軍事用だったGPS(Global Positioning System, 全地球測位システム)の測位精度が民間に開放されたことで(杉本・柴崎, 2010), GPS航法による位置決定が飛躍的に高精度

となった。また同時期に、従来に比べて4倍のエネルギー密度を有するリチウム系二次電池が実用化された。こうした技術革新を背景にさまざまな用途のドローンが開発されるようになっていった。2010年にはフランスのParrot社がホビー用ドローンを、更に中国のDJI社が空撮用ドローンを発売した。廉価で誰でもコントロールできるドローンは軍事だけでなく産業での利用も広がり急速に普及していった。

このドローンだが最近特に空の産業革命とも呼ばれ、以下のような分野で活用が広がっている(野波, 2017)。農業分野においては、精密農業の一翼を担う存在として、圃場の生育モニタリングに利用されている(井上・横山, 2019)。災害対策の分野では、大規模な天災が続く中で、国土地理院ランドバード(中村, 2017)や国土交通省TEC-FORCE(国土交通省, 2004), あるいはDroneBird(CRISIS Mappers JAPAN, 2015)などの民間ボランティアに至るまで、被災状況を確認する手段としての利用が広がっている。土木分野では、国土地理院の公共測量作業規定(国土地理院, 2020)の改正により、「UAV点群測量」の項目が新規に追加され、TS(Total Station)などの地上測量に比べて、非常に効率的な測量手段として利用されている。

また、上述のようなドローンの空撮能力を活かした利用に加え、米Amazon社のPrime Air構想に代

受付：2020年9月2日、受理：2020年11月6日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail: miura.shingo@nies.go.jp

表されるように、物流での利用は非常に大きな産業規模になることが見込まれている(永岩・竹田, 2018)。本稿では、ドローンのもつさまざまな特徴を組合せることで、ドローンの活用が湖沼環境研究にどのような影響を与え、どのような変化をもたらすのかを検討・評価した。

2. 環境研究におけるドローンの優位性

ドローンはその空撮技術の高さにより社会に広まったわけであるが、それに先駆けて高い空撮技術をもっていたのが人工衛星と航空機である。これまでの人工衛星を用いたリモートセンシングは、高高度からの撮影であるため、地上分解能は気象観測衛星のような数 km のものから、高分解能衛星では約 50 cm のものまでさまざまである(Jaxa, 2020)。利用目的に応じて使い分けことが可能だが、やはり広範囲を対象とした撮影こそ最大の長所であると言える。特に森林管理などの用途では広く利用されてきたが(Beckline, 2017)、粗い画像分解能が制限となり植物単体の種の特特定や分布状況の把握までは困難である。航空機は人工衛星よりも低高度で飛べるため、より高分解能の撮影が可能となり、雲の影響を受けにくい点で人工衛星よりも優れている。これらに対して、ドローンを使う方法は近接リモートセンシングとも言い換えられるが、地上分解能が数 mm から数 cm 解像度の画像が撮影できることにより、木や草などの種類判別や樹高やバイオマスの推定が可能となった(Guerra-Hernández *et al.*, 2017)。また、これまで現地を歩いて調査していた植生調査などの作業効率を飛躍的に向上させることができた。

ドローンは航空機に比べると撮影日や撮影頻度が自由になり、コストパフォーマンスも優れている。撮影範囲が狭いのがマルチコプター型(複数のプロペラを使用するタイプ)の短所であったが、飛行機型の航続距離の長いドローンも登場しており、航空機利用との差は小さくなってきている状況である(浦久保, 2016)。

ドローンの利用方法として撮影は最も使われているが、それ以外の利用方法も少しずつではあるが広がっている。その1つは、ドローンにさまざまなセンサーロガーをつけて観測を行うものである。例えば、東日本大震災の後で放射線の空間線量の計測に航空機とドローンが活用された(米谷・眞田, 2015)。そのほか、温室効果ガスの計測などにもドローンが活用されている(Berman *et al.*, 2012)。航空機よりも低高度で飛行できることで、その場所の地形や植生等の影響を反映したデータが取れることがドローンを用いる利点である。これまでのセンサーロガーの利用方法は定点観測に利用するのがメインであったが、ディスプレイ付きのフィールドセンサーよりも軽量であるため、ドローンの機動力と組合せること

で、短時間で多くの地点のデータを取得することが可能となる。

また、ドローンの輸送能力を生かしてサンプリングにも利用されている。湖沼等における採水にはこれまで船を利用するのが一般的であったが、備船の手配には手間や費用がかかるだけでなく、モーターのスクリューによる水の攪乱、あるいは藻場など水深の浅い場所へ乗り入れができないなど、いくつかの不都合があった。これまでは、その代替手法が存在しないため問題視されてこなかったものの、現場環境をできるだけ非破壊かつ簡便な方法で採水できるのが理想である。船やボート、水辺への立込みなどと比較しても、ドローンでの採水は非攪乱で理想的な方法と言える。さらに、人が近づけない危険な場所で安全にサンプリングを行えるなど、人工衛星や航空機にはない利用価値がドローンには存在する。

研究分野におけるドローンの特徴を整理すると、①ドローン搭載のカメラを使ったイメージング、②ドローンを使って試料を採るサンプリング、③ドローンにロガー型センサーをつけて計測をおこなうセンサーロギングの3つに大きく分類できる。以下では、それぞれの優位性を生かした湖沼研究の事例を紹介する。

3. ドローンの優位性を活かした湖沼研究の事例

3.1 ドローンを使ったイメージング

ドローンのカメラを使ったイメージングで最も広く活用されているのが可視光を撮影するカメラを用いた植生あるいは地形などの分布状況の把握である。狭いフィールドであればドローンをできるだけ高く飛ばして、直下視で単画像撮影するのが最も簡単な方法であるが、航空法の規制により 150 m 以下という高度制限がある(国土交通省, 2020)。そのため、単画像でカバーできない場合はオーバーラップ撮影した画像を、SfM (Structure from Motion) ソフトウェアを使って正射投影に変換したオルソ画像で広域の写真地図を作ることにも可能である(早川・小花和, 2016)。図1は猪苗代湖畔の鬼沼上空で複数枚の写真を撮影後に、SfM 処理によって作成したオルソ画像を示している。

また、ドローン用のマルチスペクトルカメラ(Blue, Green, Red に不可視光となる RedEdge や Near-InfraRed (近赤外) バンドを加えたもの)も販売されており、バンド間演算によって植物の分布状況や活性度を示す NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 正規化植生指数) を求めるなど(Bendig *et al.*, 2015)、クラスター解析等を用いて樹種分類を行うことが容易に実施できるようになっている。そのほかにも、更に長い波長である Thermal-InfraRed (遠赤外) を使った赤外線サーモグラフィカメラを

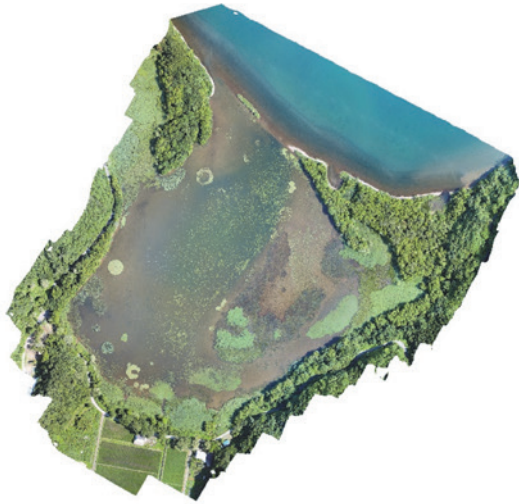


図1 SfM処理した猪苗代湖畔の鬼沼のオルソ画像。

使って土壌水分量の予測なども可能となっている (Iizuka *et al.*, 2018)。

可視光カメラ搭載ドローンを利用すれば、これまでは数mの範囲で行われていたコドラート法による調査を数十倍の規模で行うことが可能となる。一方、マルチスペクトル搭載ドローンを使えば、水生植物の光合成活性やアオコの分布状況の把握が可能となるだろう。あるいは赤外線サーモグラフィー搭載ドローンを使えば、水温の異なる水塊の広がりも認知することが可能となる。

3.2 ドローンを使ったサンプリング

ドローンを使ったサンプリングの事例はあまり多くないが、地下水サンプラーを吊るしたドローンによる火山性湖沼の遠隔採水では、1km以上離れた場所から危険な場所に近づくことなくサンプルを取得している (Terada *et al.*, 2018)。ステンレスのポット (1L) を吊るしたドローンによる環境DNA用の採水では、船を使うより簡易にコンタミの少ない採水が可能であると報告されている (Doi *et al.*, 2017)。これらの事例は1フライトで1地点の採水を行うものであるが、海外では小型のポンプを搭載したドローンによる多地点採水の試みなどが報告されている (Song *et al.*, 2017; Banerjee *et al.*, 2020)。ドローンの弱点は飛行時間の短さであるため (通常は1フライト20分程度)、ホームポイントと採水地点の往復をしなくて済む多地点採水ドローンは魅力的である。しかし、多地点採水ドローンは未だ発展途上の技術で問題も指摘されている。採水時の飛行高度が低くドローンから発生するダウンウォッシュ (直下方向への風) が水塊を攪乱する影響を考慮していない点である (Miura & Kohzu, 2020)。図2は水上3.5mの位置にホバリングさせたドローンから吊り下げた温度ロガー (水深10, 30, 50, 70cm) で計測した水温の変化である (Miura & Kohzu, unpublished data)。水深10cmでは実験開始直後から水温が下がり始め、約

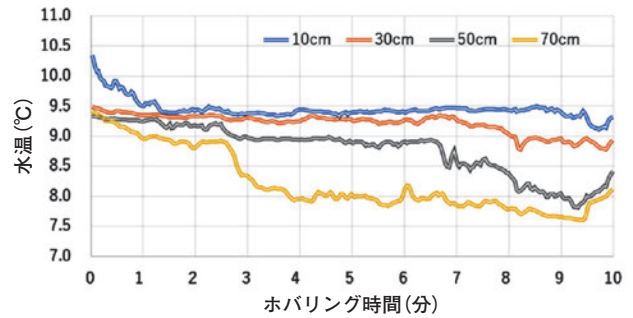


図2 ドローンのダウンウォッシュによる湖水温の変化。

1分半後には水深30cmの初期水温である9.5°Cで安定した。その後、水深70cmでは約2分半後から大きく水温が下がり始め、8°C付近で安定した。水深70cmの水温が下がったことで、その上の水深50cm, 30cmの水温は7分以降に低下を始めている。この結果はダウンウォッシュが底層の水塊を巻き上げることが示している。図2ではホバリングの継続によって水塊の攪乱が伝播していく様子の一例を示したが、風の状況や水塊の上下層の温度の違いに起因する密度差なども伝播速度に影響を及ぼすと考えられることから、実際にドローン採水を行う際には、水塊を攪乱しない十分な飛行高度を確保する方法が現実的な運用方法と考えられる。

高山湖の微生物の空間分布を計測した事例では、採水量が50mlと少量で、250m²の範囲と近距離ではあるが1フライトで複数地点の採水を行っている (Benson *et al.*, 2019)。我々も中型のドローンから地下水サンプラー (採水量330ml) を8mのワイヤーで吊り下げて、日常的なサンプリングに活用している。ホームポイント上でドローンをホバリングさせた状態でサンプラーを付け替えることで、1~2km程度の距離を1フライト3, 4地点往復させる採水を行っている。利用しているドローンは1バッテリーで約20分のフライトが可能であるため、1時間で10点という非常に迅速なサンプリングを実施している。

ドローンを使って適切な飛行高度でサンプリングを行えば、迅速に非攪乱に近いサンプルを取得することが可能である。このことは多地点において並列的に日周変動を追いかけるような時間分解能の高い調査を可能とする。例えば5, 6km²の規模の水域であれば、1時間で10地点の採水が可能であるため、これを複数回繰り返せば、水域全域における水質の空間分布の時間変化を観測することが可能となる。あるいは水の流下速度に合わせて採水を行うことで、水域への流入から流出へと同じ水塊が時々刻々と変化していく様子を把握できる可能性もあるだろう。

3.3 ドローンを使ったセンサーロギング

地球温暖化ガスや放射線空間線量の計測など、大

気観測分野ではさまざまなセンサーをドローンに搭載して計測が行われている (Berman *et al.*, 2012; Sanada & Torii, 2015)。しかし、湖沼環境研究では大気観測のようにドローンに直接センサーを搭載するのではなく、センサーを吊り下げて水塊の計測を行う必要があるため事例が少なく、ドローンにフロートをつけて着水して計測を行うもの (Koparan *et al.*, 2018)、あるいは水温の計測にロガーを吊り下げたものにとどまる (Miura & Kohzu, 2020)。この際もダウンウォッシュの影響については、当然考慮する必要がある。採水器の代わりにロガータイプの多項目水質計を使用することで、直接水質の計測が可能となり調査地点とホームポイントとの往復が必要ないため、より多くの地点が計測可能となる。あるいは、センサーを吊るすワイヤーを長くしてやることで、水深数十 m の深度別の計測も物理的には可能となる。また、センサーとは異なるが、我々は 360 度カメラを使って水中の動画撮影を行っている。定点カメラを使った植物の生育観測といった定性的な研究は多く見られるが、最近では AI や機械学習を利用した解析手法の進化により、定量的な環境情報抽出の試みが行われている (Crimmins & Crimmins, 2008; Lynch *et al.*, 2015)。水中の動画撮影であれば、水中ドローンの利用も考えられるが、視野角が制限されない 360 度カメラの方が情報量の面で優れている。撮影された高解像度の動画からは水中の浮遊する懸濁物質や微生物から魚類、湖底の地形、土壌、植物や底生生物など、定量的ではなくとも、その場その時の状況を理解するのに役立つ情報を非常に多く得ることができている。

ドローンを使ったセンサーロギングは船や立ち込みなどによるセンサーロギングに比べて現場の水塊構造に大きな変化を与えることなく、より自然な状態をモニタリングすることができ、カルデラ湖のような危険な場所でも安全にモニタリングすることができる。さらには、動画情報を組合せることで、さまざまな水質項目の計測と同時に視覚的な情報を加えることができ、これまでにないユニークなデータ取得が短時間で可能となる。

3.4 従来調査とドローンを併用することで可能となる新たな環境解析

図 3 は下水処理施設からの放流水が三面張りの人工河川を通じて湖内に流入している様子である (Miura & Kohzu, unpublished data)。この日は河道方向に対して直角に風が吹いている影響で、湖水より高水温の放流水が鋭角に折れ曲がっていた。一般的に考えると、放流水の影響を観測するためには、河道の延長線上に何点かの観測点を設置してしまうため、放流水の影響を過小評価することになるだろう。それに対して、図 3 の流動場を理解した直後に船で当該水域の採水をすることで、我々は放流口から離れた水域 (図 3 の画面右下) でも処理水の影響下

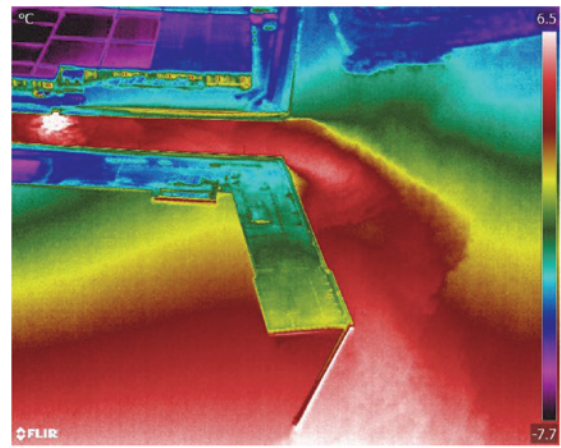


図 3 新川河口における処理場温排水の温度分布。

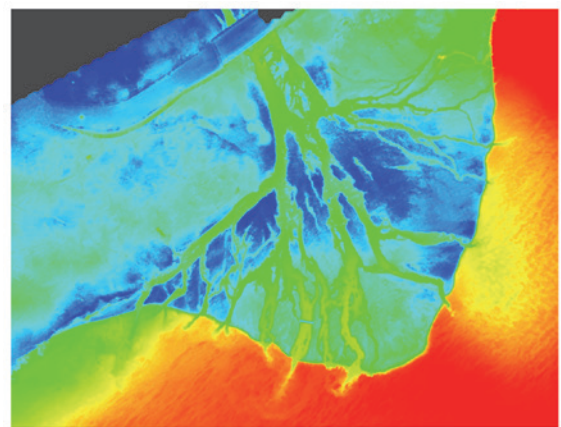


図 4 奥日光白根沢のサーマル画像。

にあることを、水質データから明らかにすることができた。ひとえに、ドローンによる俯瞰的な流動場の理解がフィールドにおいてできたおかげである。

また、図 4 のような自然河川においては、撮影時期や天候等といった条件の制約はあるが、砂洲の地表面温度の違いにより伏流河川の存在を示唆するような情報を取得することも可能である (Miura & Kohzu, unpublished data)。

上述の例のように、川から湖へ、あるいは川から海へと推移していく遷移帯 (接続部) の環境は非常に不安定で変化の激しい場所である (Boulton *et al.*, 1998)。このような不安定な場においては、固定点で用いる従来型の調査方法よりも、高い機動性と柔軟な対応が可能である、ドローンを用いたモニタリング調査の方が、より効率的・効果的であると考えられる。

人間の視点は 2 m 弱と低いため主観的に周囲の状況を判断しやすい。ドローンを使って上空から俯瞰的に比較・観察することで気づかされることは思いのほか多いものである。調査フィールドにおける客観的な視点を確保する意味でも、ドローンによって調査時の状況を記録することは有益である。

これまで、ドローンの3つの利用方法を紹介したが、これらを組合せることで更に効率的な調査が可能となる。サーモグラフィ画像を見ながらピンポイントで湧水のサンプリングを行う、あるいは湖底の画像を360度カメラで録画しながら水質を計測するなど、さまざまな組合せが考えられる。

さらに、技術が進んでドローンの耐風・防水性能が向上すれば、嵐の中でのサンプリングが可能となるだろうし、映像やセンサーデータをテレメトリーで送信できるようにすれば、湖底の状況をオンタイムで見ながら、採水や計測が可能となるだろう。

このようにドローンは調査の為のツールとしてだけでなく、既存の調査手順や方法に変革をもたらしながら、これまでに見られなかった自然本来の姿を映し出す手助けをしてくれるだろう。

4. おわりに

湖沼環境研究におけるドローンの使用事例を整理し、新しい活用方法を提案した。考察を進めていく中で、ドローンが環境計測に親和性が高く、まるでネットワーク HUB のように要素技術を結び付けるものであることに気づかされた。ドローンを HUB とする環境計測機器群を投入することで、次世代型のモニタリングが可能となるであろう。

ドローンはまだまだ発展途上の技術である。最近では水中ドローンも数多く発売されるようになり、随分と操作性も向上してきている(南, 2020)。このような新技術も取り込みながら、これまで解析が困難であった、沿岸生態系、干潟のような物理的・化学的・生物的な現象が同時に生起する複雑な生態系に対して、我々がこれまで入手できなかったサンプルや情報を与え、湖沼環境研究を新たな領域へ進める可能性をドローンは秘めているのではないだろうか。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、国立環境研究所地域環境センター 珠坪一晃副センター長、国立環境研究所 今井章雄琵琶湖分室長には資金的な援助をいただき感謝いたします。また、調査を行うにあたって栃木県保健環境センターの佐々木貞幸氏にはご協力を賜りました。本研究の一部は地方創生基金「健全な水環境保全のための水質・湖底環境に関する研究」における滋賀県との共同研究から資金援助を受けました。ここに深謝いたします。

引用文献

Banerjee, B. P., Raval, S., Maslin, T. J. and Timms, W. (2020) Development of a UAV-mounted system

for remotely collecting mine water samples. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(6), 385-396. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1549526>

Beckline, M. (2017) Perspectives of remote sensing and GIS applications in tropical forest management. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 5(3), 33. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20170503.11>

Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L. and Bareth, G. (2015) Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>

Benson, J., Hanlon, R., Seifried, T. M., Baloh, P., Powers, C. W., Grothe, H. and Schmale, D. G. (2019) Microorganisms collected from the surface of freshwater lakes using a drone water sampling system (DOWSE). *Water*, 11(1), 157. <https://doi.org/10.3390/w11010157>

Berman, E. S. F., Fladeland, M., Liem, J., Kolyer, R. and Gupta, M. (2012) Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 169, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.04.036>

Boulton, A. J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E. H. and Valett, H. M. (1998) The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 59-81. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.59>

Crimmins, M. A. and Crimmins, T. M. (2008) Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management*, 41(6), 949-958. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9086-6>

CRISIS Mappers JAPAN (2015) DroneBird. <http://dronebird.org/> (2020年8月20日確認)

Doi, H., Akamatsu, Y., Watanabe, Y., Goto, M., Inui, R., Katano, I., Nagano, M., Takahara, T. and Minamoto, T. (2017) Water sampling for environmental DNA surveys by using an unmanned aerial vehicle. *Limnology and Oceanography: Methods*, 15(11), 939-944. <https://doi.org/10.1002/lom3.10214>

Guerra-Hernández, J., González-Ferreiro, E., Monleón, V., Faias, S., Tomé, M. and Díaz-Varela, R. (2017) Use of multi-temporal UAV-derived imagery for estimating individual tree growth in *Pinus pinea* Stands. *Forests*, 8(8), 300. <https://doi.org/10.3390/f8080300>

早川裕弐・小花和宏之(2016)小型無人航空機を用い

- た SfM 多視点ステレオ写真測量による地形情報の空中計測. 物理探査, 69(4), 297-309. <https://doi.org/10.3124/segj.69.297>
- Iizuka, K., Watanabe, K., Kato, T., Putri, N., Silsigia, S., Kameoka, T. and Kozan, O. (2018) Visualizing the spatiotemporal trends of thermal characteristics in a peatland plantation forest in Indonesia: Pilot test using unmanned aerial systems (UASs). *Remote Sensing*, 10(9), 1345. <https://doi.org/10.3390/rs10091345>
- 井上吉雄・横山正樹(2019)ドローンリモートセンシングによる農地の分光画像・3D 情報計測. 精密工学会誌, 85(3), 236-242. <https://doi.org/10.2493/jjspe.85.236>
- Jaxa(2020)人工衛星による宇宙利用. https://www.jaxa.jp/projects/sat/index_j.html(2020年8月31日確認)
- 国土地理院(2020)公共測量作業既定の準則. <https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>(2020年8月20日確認)
- 国土交通省(2004)TEC-FORCE(緊急災害対策派遣隊). <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/pch-tec/pdf/TEC-FORCE.pdf>(2020年8月20日確認)
- 国土交通省(2020)無人航空機の飛行ルール. https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html#a(2020年8月29日確認)
- Koparan, C., Koc, A. B., Privette, C. V. and Sawyer, C. B. (2018) In situ water quality measurements using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. *Water*, 10(3), 264. <https://doi.org/10.3390/w10030264>
- 久保大輔(2017)無人航空機システム(ドローン)の歴史と技術発展. 計測と制御, 56(1), 12-17.
- Lynch, T. P., Alderman, R. and Hobday, A. J. (2015) A high-resolution panorama camera system for monitoring colony – wide seabird nesting behaviour. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(5), 491-499. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12339>
- 南政樹(2020)水中ドローンシステムの現状と課題. 計測と制御, 59(7), 492-496. <https://doi.org/10.11499/sicejl.59.492>
- Miura, S. and Kohzu, A. (2020) Effects of downwash during unmanned aircraft system – assisted water sampling on water mass structure directly below the UAS. *Limnology and Oceanography: Methods*, 18(8), 391-397. <https://doi.org/10.1002/lom3.10367>
- 永岩健一郎・竹田将人(2018)これからの人口減少地域における物流のあり方について. 日本航海学会誌 *NAVIGATION*, 206, 7-12. https://doi.org/10.18949/jinnavi.206.0_7
- 中村孝之(2017)無人航空機(UAV)を活用した国土地理院の災害対応. 北海道測量技術講習会. <https://www.gsi.go.jp/common/000150883.pdf>(2020年8月31日確認)
- 野波健蔵(2017)ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線. 情報管理, 59(11), 755-763. <https://doi.org/10.1241/johokanri.59.755>
- Sanada, Y. and Torii, T. (2015) Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 294-299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.027>
- Song, K., Brewer, A., Ahmadian, S., Shankar, A., Detweiler, C. and Burgin, A. J. (2017) Using unmanned aerial vehicles to sample aquatic ecosystems. *Limnology and Oceanography: Methods*, 15(12), 1021-1030. <https://doi.org/10.1002/lom3.10222>
- 杉本末雄・柴崎亮介(2010)GPSハンドブック. 朝倉書店. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB03412300.bib>(2020年8月28日確認)
- Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori, T., Ohba, T., Yaguchi, M. and Kanda, W. (2018) Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0835-3>
- 浦久保孝光(2016)VTOL型ドローンの研究開発. システム/制御/情報, 60(10), 437-442. https://doi.org/10.11509/isciesci.60.10_437
- 米谷雅之・真田幸尚(2015)環境回復の取組の概要と遠隔放射線モニタリング. 日本原子力学会誌 *ATOMO*, 57(8), 517-522. https://doi.org/10.3327/jaesjb.57.8_517

三浦 真吾 / Shingo MIURA



株式会社武揚堂に所属。GIS 上級技術者。「海象等航海支援情報の電子海図等への統合化に関する調査研究」で水路技術奨励賞を受賞。鳥取大学連合大学院で「非特定汚染源からの窒素・リンの河川流出プロセスの研究」で論文博士を取得。

国立環境研究所で客員研究員として UAV やアクションカム等、新しい機器を環境計測に利用した、次世代型のモニタリング手法を研究。また、UAV を使った風況計測に関する特許を取得。個人事業として、洋上風力発電予定地等の風況計測が困難な地域での計測を行う MiuLabo を設立。

高津 文人 / Ayato KOHZU



国立環境研究所に所属。湖沼・河川環境研究室室長。京都大学で生態学を専攻し、大型菌類の生理生態と安定同位体比に関する研究で博士号を取得した。その後は森林に限らず草原、湿地、湖沼、河口と幅広いフィールドを対象に、食物網構造や炭素、窒素循環の研究を進めた。現職に赴任してからは、流域からの窒素負荷や底層の貧酸素に関する基礎研究を元に、湿地再生や気候変動適応に関する研究課題に取り組んでいる。
